ＩＳＳＮ　0386-5876
土木研究所資料第3749号

土 木 研 究 所 資 料

新熱源を利用した道路消融雪技術の検討
都市部における道路消融雪施設への未利用エネルギー活用検討
（その１：フィージビリティ・スタディ）

平成12年10月

建 設 省 土 木 研 究 所
材料施工部機械研究室

Copyright© (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor tranmitted, nor translated into a machine language withou the written permission of the Director Genecral of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文章による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3749号2000年10月

新熱源を利用した道路消融雪技術の検討
都市部における道路消融雪施設への未利用エネルギー活用検討
（その１：フィージビリティ・スタディ）

室　　長　江本　平
前 室 長　村松　敏光*
前主任研究員　持丸　修一**
研 究 員　平下　浩史
技　　官　水上　紀明

要　旨

道路消融雪設備は、刻々と変化する気象に応じて、所要の融雪能力を発揮する必要があるため、最大降雪時に合わせた大きな熱源が必要である。一方、下水道熱・太陽光熱等の未利用のエネルギー源は、日や年の変動が大きく、必要に応じて熱を供給できない恐れがあることから、車道の融雪には活用されていなかった。そこで、未利用エネルギーの複合化や蓄熱による安定化と必要なエネルギーを確保したシステムについて、積雪地域の都市部を対象としたフィージビリティ調査を行った。この結果、都市に賦在するエネルギーは、他の熱源との複合化や蓄熱によって、都市部の道路融雪に利用可能であることが判明した。また、ピーク降雪に合わせて大量の熱を路面から放熱するには、舗装の耐久性から加熱温度には限界があり、舗装材料の熱抵抗減化や放熱パイプを密に敷設するなどの工夫が必要であることが明らかになった。

キーワード：融雪設備、未利用エネルギー、冬期道路交通確保

現　財団法人先端建設技術センター　普及振興部長
現　関東地方建設局　関東技術事務所　機械課長

まえがき

積雪寒冷地においては、その物流や人の移動の 90%以上が道路に依存しており、冬期における依存率はさらに高くなっている。社会･経済活動の基盤となっている道路交通であるが、冬期間は、凍結や降雪によって、道路の交通容量が低下したり、交通事故などの安全上の問題が発生する。このため、除雪機械による除雪作業、凍結防止剤の散布、散水融雪設備による路面の消融雪、その他の冬期道路維持作業によって、快適な道路交通を確保する努力が傾注されている。

しかし、特に除雪機械については、その作業速度が遅いことや、機械の幅が 2.6m 以上と大きいことなどから、交通量の多い都市部、朝夕の交通混雑時においては、除雪作業が交通渋滞の原因となることが少なくない。また、単路部では前進のみの作業になるが、交差点部やインターチェンジなどでは、後退や複雑な作業を要求され、除雪作業時間が長くなり、安全上の課題にもなっている。

このため、地下水や河川水による道路融雪設備が多く設置されているが、地下水では地盤沈下や一般の井戸への影響などの問題が発生し、河川水では取水や散布量などの関係で適用に限界がある。電熱を用いた融雪も一部で行われているが、消費エネルギーが大きいことからコスト等の問題がある。

そこで、地熱、下水、太陽熱などを利用した融雪施設が試みられているが、熱源からの採熱に限界があること、放熱量が不安定であること、想定される降雪量に十分対応するためには採熱設備が大きくなることなどの課題があり、駐車場などの付帯的な施設や、歩道などに限定的に使用されている。また、放熱量が十分でないため、降雪量が多いときには十分な融雪ができない問題もある。

近年、地球環境保全の観点から、未利用エネルギーの活用が望まれており、また融雪設備に対する需要が都市部において高いことから、都市部に豊富な廃熱を利用した融雪設備の実施可能性について検討したものである。

検討にあたっては、以下の事項について調査･分析した。

- 未利用エネルギー利用実績･課題の調査
- 未利用エネルギー賦存量と除雪･凍結防止エネルギーのバランス分析
- 融雪に必要な路面放熱施設の可能性分析

この結果、下水道を中心とした都市部の賦存エネルギーは、日変動が大きいなど安定性に欠け、必ずしも融雪に十分な熱量を常時供給することはできないが、降雪の合間に蓄熱することにより、十分な融雪熱量を供給可能であることが判明した。また、実験やコンピュータシミュレーションにより、路面からの放熱量は、高強度の降雪に対応可能な 500W/m^2 以上が可能であることが明らかとなった。これらの結果に基づき、熱源の複合化や蓄熱による、都市部における未利用エネルギーの利用による道路融雪システムを提案した。本資料は平成１１年度にこれらの研究を行った成果をとりまとめたものである。

目　次

第I章　背景と調査の概要……1
1. 除雪における課題……1
1.1. 除雪による速度低下……1
1.2. 拡幅除雪、運搬排雪による交通障害……2
2. 消融雪施設の課題……3
2.1. 実施上の課題……3
2.2. 設計、運用上の課題……4
3. 未利用エネルギー利用の必要性と可能性……5
4. 調査の概要……6
4.1. 未利用エネルギー利用実態調査……6
4.2. 融雪等必要放熱量調査……6
4.3. エネルギー需給バランス調査……6
4.4. フィージビリティスタディ……6

第II章　未利用エネルギー利用実態調査……8
1. 対象エネルギー……8
2. 未利用エネルギーの導入実績と取得可能量の分析……8
2.1. 下水道エネルギー……8
2.2. 下水処理廃水の利用……19
2.3. 地熱エネルギー……22
2.4. 太陽エネルギー……30
2.5. 河川エネルギー……37
2.6. 風力エネルギー……40
2.7. ごみ焼却場の廃熱……46
2.8. その他……49
3. 未利用エネルギーの特性……52
3.1. 下水道……52
3.2. 地熱……52
3.3. 太陽……54
3.4. 河川……54
3.5. 風力……55
3.6. その他……56

第III章　道路融雪に必要なエネルギー量の検討……60
1. ロードヒーティング必要熱量算出方法……60
1.1. 融雪に必要な熱量……60
1.2. 路面の凍結防止に必要な熱量……60
1.3. 必要ヒーティング熱量……61
2. 降雪強度と融雪に必要なエネルギー量の試算……61
2.1. 降雪強度及び積雪密度の推定……61
2.2. 雪の温度……61

3. 必要放熱量……63
3.1. 融雪に必要なエネルギー量の試算……63
3.2. 凍結を防止するために必要なエネルギー量の試算……64
3.3. ロードヒーティングで必要となるエネルギー量……64

第IV章　未利用エネルギー利用融雪システムの熱需給バランス……66
1. 都市別のマクロ的な分析……66
1.1. 未利用エネルギーの試算の前提条件……66
1.2. 未利用エネルギーの賦存量……67
1.3. 消融雪に必要なエネルギー……68
1.4. 未利用エネルギーの充足率……69
2. 都市別のメッシュ分析……70
2.1. メッシュ分析の考え方……71
2.2. メッシュ分析の結果……73
3. まとめ……74

第V章　未利用エネルギー利用融雪システムの提案……75
1. 都市における未利用エネルギー利用融雪システム……75
2. ロードヒーティングにおいて必要となる加熱温度……76
2.1. 舗装部の熱抵抗……76
2.2. ヒーティング熱量……77
2.3. 放熱仕様及び必要温度水準の試算……77
3. コンクリート舗装版内の温度、熱応力……79
3.1. シミュレーションによる分析……79
3.2. 実験による舗装版内の温度分布……82
3.3. 結果……84
4. 蓄熱システム導入の効果分析……85
4.1. 導入効果の高い地域の抽出の考え方……85
4.2. 蓄熱システム導入の効果と課題……87
5. まとめ……91

第VI章　まとめと今後の課題……92
1. 平成１１年度の成果……92
2. 今後の課題……94
2.1. 未利用エネルギーの供給面からの分析……94
2.2. ユーザサイドの導入効果からの分析……94
2.3. 除雪事業全体の効果分析……94
3. まとめ……96

【付録】
付録－１　コンクリート舗装版に融雪ヒータを入れた場合のシミュレーション結果
付録－２　都市別の気象データ
付録－３　都市別のマクロ分析のデータ
付録－４　都市別のメッシュ分析データ

第I章　背景と調査の概要

1. 除雪における課題

機械除雪は、冬期の確実かつ効率的な道路交通確保手段として一般的に用いられている。しかし、一般交通の中で低速な作業となるため、しばしば道路の円滑な通行を阻害することがある。

1.1. 除雪による速度低下

除雪は、除雪機械によって、路面上に積もった雪を路側に移動し、走行路面を確保するものである。このような除雪機械は、右側が前になるように斜めに機械に取り付けられたブレードを路面に押し付けて、走行するようになっている。このように路側に押された雪は、高さ数十センチメートル、幅 1 メートル程度の雪山(ウインドロー)を形成する。交差点や出入り口では交通の障害になるため、ウインドローを作らないように、ブレードの左端に開閉可能な蓋(シャッターブレード)を付ける工夫がなされた機械もある。また、交差点では、交差する道路の状況に応じて、交差点の隅部を除雪するなど、細かな作業が求められる。インターチェンジの分合流部、路側の駐車帯などは、除雪する幅が大きく変化しているため、前後進など、さらに複雑な作業が求められている。



写真-1.1 挺団除雪

このような除雪では、除雪機械を一般車両が追い越すことは危険であることが多い。また、多車線道路においても、道路幅が除雪幅(ブレードの幅)より大きいため、複数の除雪車が前後し、一隊になって作業(挺団作業)することになるが、先行する除雪車によって作られるウインドローや、除雪された所と積雪の残った所の段差を乗り越える際の危険性から、追越は出来ないようにしている。このため、写真-1.1 に示すように作業中の除雪車の後ろに一般車両が渋滞することになり、除雪車の速度以上で交通を流すこと

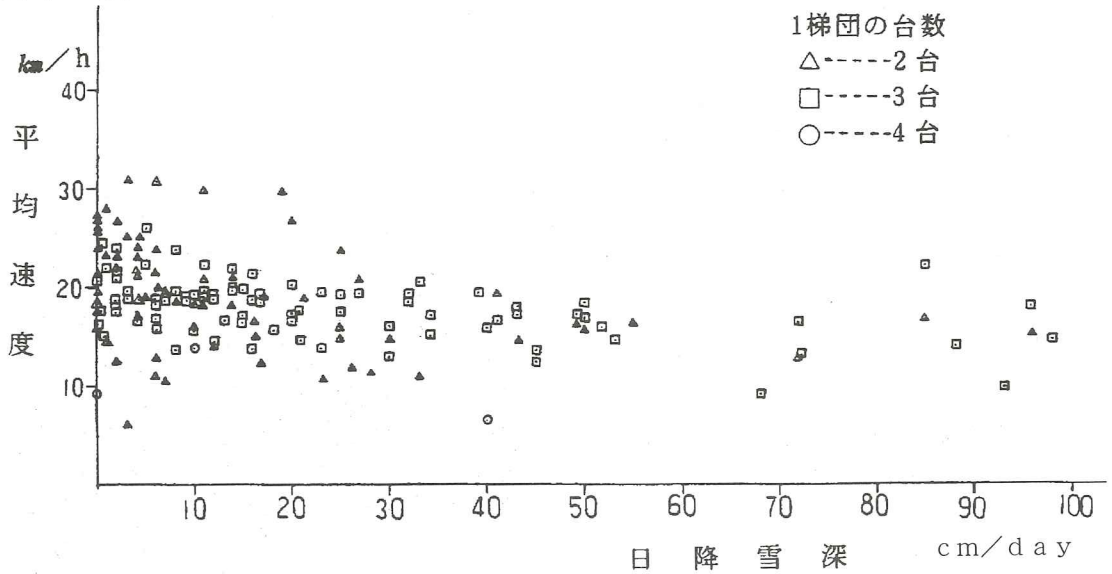


図-1.1　高速道路での作業速度(新雪除雪)

が出来なくなる。

このような除雪作業は、機械の性能としては 40km/h 程度まで作業が可能であるが、雪の量、放置車両、交差点等の作業、一般交通などによって制限されるために平均速度が低下する。高速道路での作業速度の詳細な記録[1)]によれば、最も高速作業が可能な除雪トラックにおいても、その平均作業速度は 20km/h 程度になっている(図-1.1)。また、路面に降った雪は、走行する自動車によって踏み固められ、圧雪となる。このような圧雪を除去するには、抵抗が増加するため 10～20km/h 前後の速度に低下する(図-1.2)。しかも、時には 10N/mm² 以上の強度になることがあり、そのような場合にはさらに低速の作業になる。

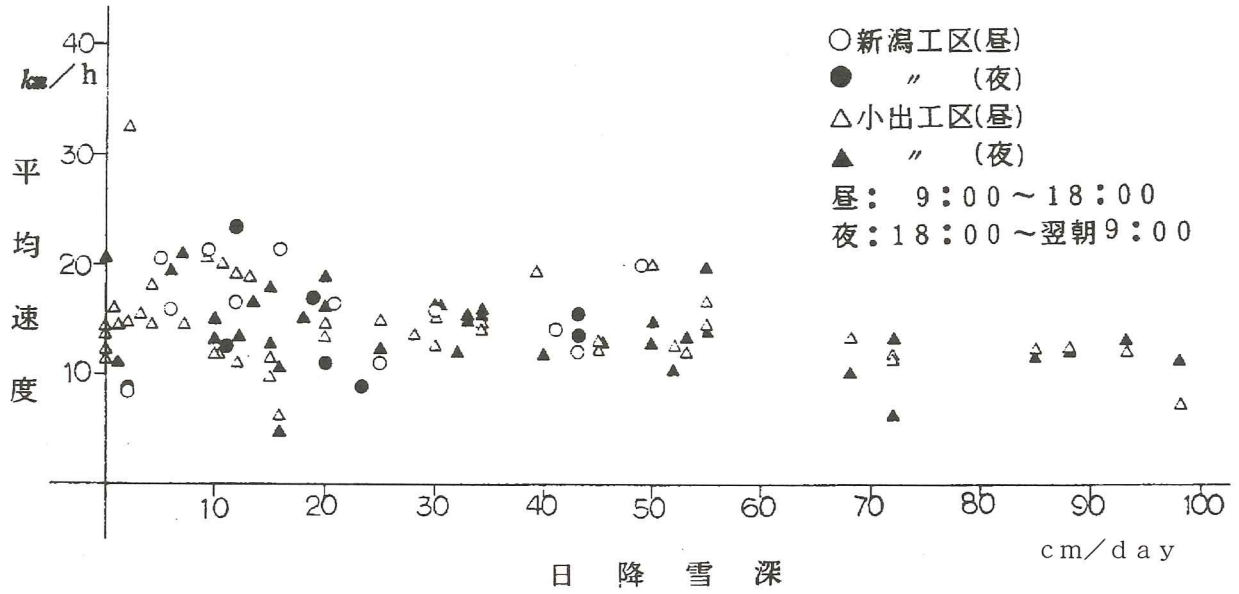


図-1.2　高速道路での作業速度(圧雪、除雪トラック)

1.2. 拡幅除雪、運搬排雪による交通障害

降雪が続くと、歩道に対する影響から路側に押し付けることが出来なくなるため、走行路面を確保するために歩道と車道の間に雪を積み上げたり、道路用地外へ雪を投雪する作業(拡幅作業)を行うことになる。しかし、積み上げられた雪により視界をさえぎったり崩れる恐れが発生することから、積み上げられる雪の量には限界がある。したがって積み上げられた雪を運搬し、排雪する作業(運搬排雪作業)が必要になる。拡幅作業や運搬排雪作業では、ロータリ除雪車が用いられるが、作業速度が遅く、十分な道路幅の確保されていない道路では大きな障害になる。拡幅作業では、ロータリ除雪車の横にダンプトラックが横付けされるため、さらに作業幅が広くなり、大型車両では通行困難になることもある(写真-1.2)。



写真-1.2 運搬排雪作業

このような拡幅作業では、投雪場所が人家などにより制限され、立体や平面の交差場所ではその前後のみに投雪場所が制限されるなど、作業上の制限があり、比較的制限の少ない高速道路においても 5km/h 以下の速度になる

(図-1.3)。運搬排雪では、ダンプトラックの積載量が少なく、入れ替えが頻繁に行われるため、さらに低速になる。

また、運搬排雪された雪は、大きな雪山になり、大都市近郊ではそのための用地確保が大きな課題になる。写真-1.3 は、札幌の一例であるが、場合によっては1箇所で数十万 m^3 になることもある。



写真-1.3 運搬排雪された雪の山

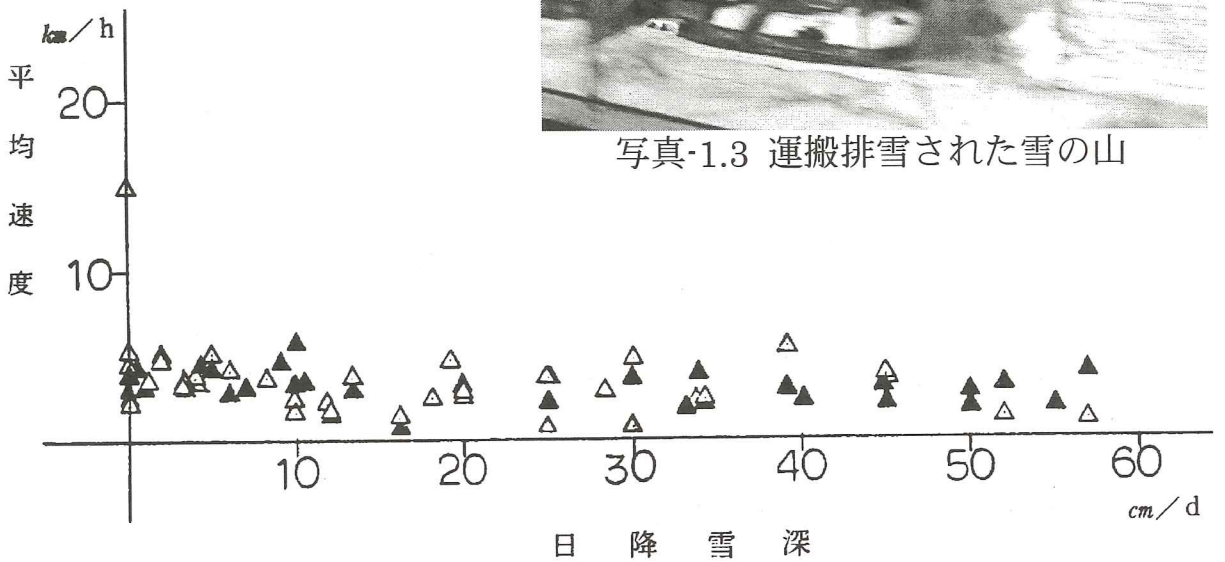


図-1.3　高速道路での作業速度(拡幅除雪)

2. 消融雪施設の課題

機械除雪作業は、確実に一定レベルを確保できるなど有利な工法であるが、上記の課題があるため、各種の道路消融雪施設が開発され、設置されている。消融雪施設は、積雪寒冷地特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法に基づいて指定された国道 4325.2km のうち、269.0km に設置されている。しかし、これらの施設には、実施上の課題や、十分な融雪能力を確保するための設計、運用上の課題がある。

2.1. 実施上の課題

融雪施設は、交差点や、立体交差におけるランプ、高架部などの除雪作業困難個所、凍結しやすい個所を消融雪するものである。これらは主として地下水の散水によるものであるが、近畿地方建設局管内など、比較的暖かい地方では、河川水を利用する事例もあるが、比較的寒い地域である新潟県では河川水の温度が冬期には 5℃程度以下になるなど、河川水の温度が低く、利用が困難である。地下水は、温度が十数度と暖かく、融雪効果も高い。しかし、一般の井戸への影響を避けるために深い井戸を掘削することが多く、また地盤沈下が発生する。近年、地下水の汲み上げが制限されるようになって、地盤沈下が少なくなったが、雪国においては、依然として深刻な問題になっている。

そこで、地下水が利用できない地域や環境への配慮から、電熱や地熱、太陽熱を利用した融雪施設が設置され始めている。このうち太陽熱を利用した施設は、図-1.4 に示すように、夏期に太陽熱で暖められた舗装の熱を、不凍液を蓄熱槽と舗装の間で循環させることによって蓄熱し、冬期の融雪に利用するものである。この方法では、ランニングコストが不凍液などを循環させるポンプの駆動電力のみと少ない利点がある。しかし、

降雪期までの数ヶ月に夏期の蓄熱量の約半分が自然放熱するため、蓄熱層は大規模なものが必要となり、設置場所は駐車場などに限られている。

地熱は、比較的温度が安定しており、広く採取可能であることから、多くの利用事例がある。しかし、大量に採取すると地盤そのものが冷えてしまうため、熱採取を断続的にするなどの工夫が必要になる。また、必ずしも消融雪に必要な熱量が確保できず、強度の降雪では全てを融雪できず、信頼性に課題があり、歩道などに限られている。

車道では、融雪の確実性が問題となるため、散水以外では電熱を利用する場合が多い。しかし、1車線、1メートルあたり1キロワットもの電気を消費するため、電力料金などのランニングコストが高いうえ、融雪電力の契約では条件次第では毎日一定時間の運転を停止する必要があることから、降雪時に運転できない場合がある。このような停止時刻と降雪が重なると、数時間以上に渡って圧雪が残るため、除雪の補助としての利用が限界である。また、大電力の消費に伴う地球温暖化ガスの排出対策も課題になる。

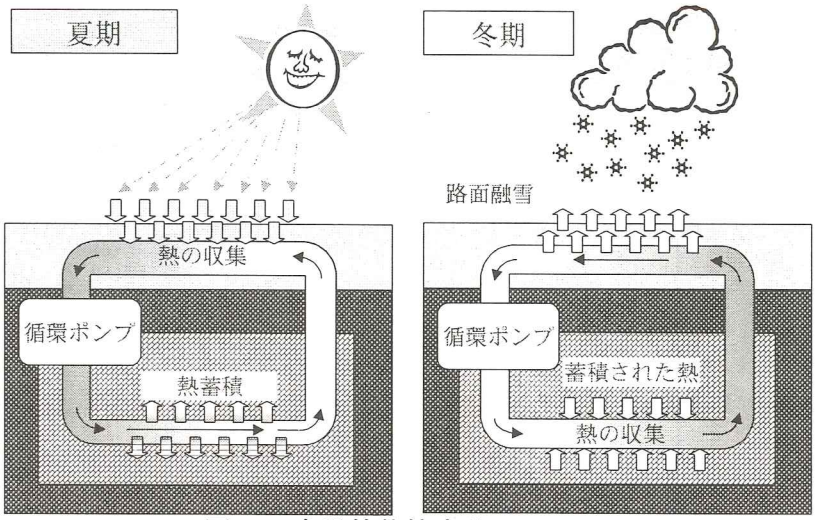


図-1.4 太陽熱蓄熱式融雪システム

2.2. 設計、運用上の課題

従来の融雪施設では、必ずしも十分な融雪は達成されていない。バス停における下水熱利用融雪施設では、必要な融雪能力よりも、むしろ熱エネルギーを有効に利用することに重点を置いた設計になっている。このため、降雪量の多い時にはその融雪に数日を要することもある。その他の積極的に熱を供給する方式においても、平均的な降雪を対象としているため、設計対象の降雪強度は2～3cm/hになっている。

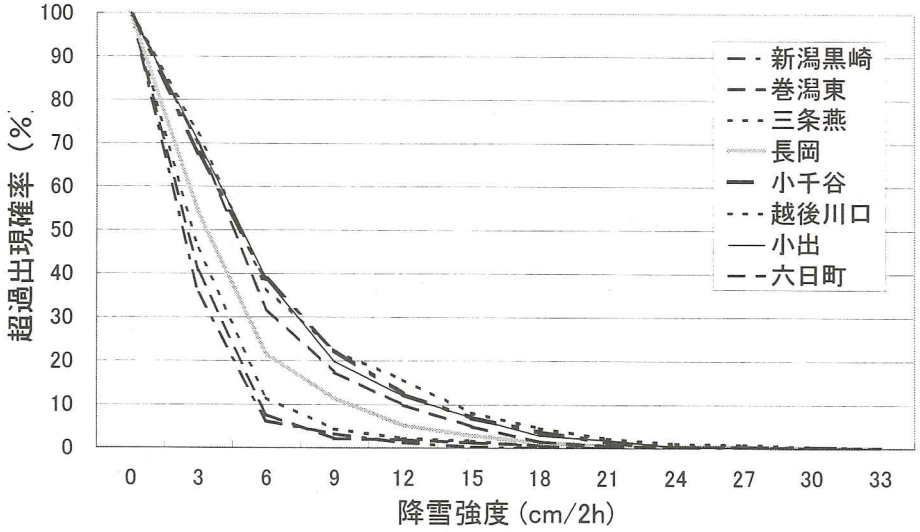


図-1.5 北陸道、関越道における降雪記録(昭和60年度)

しかし、昭和 60 年度の北陸道･関越道の新潟黒崎(現在の新潟西)･湯沢間の降雪記録[1]によれば、図-1.5 に示すように、降雪が見られたときには、1/2 以上の確率で、3cm/2h 以上の降雪強度になっている。そして、3～9cm/2h の降雪は、平地部(三条燕)では 47～56％の確率で 4 時間続き、34～55％の確率で 6 時間続く。これが、山間部(越後川口)ではそれぞれ、72～90％、61～73％と高くなる。また、3cm/2h 以上の降雪が夜間(気温が低下し、圧雪が成長しやすい。) に出現する確率は、平地部で 42％であるのに対し、山間部では 50％になっている。このように、平地部より山間部で高強度の降雪が継続する傾向にある[3]。

このため、一度強度の降雪があると長時間にわたって路面に圧雪が発生することになる。図-1.6 は、山間部に設置された電熱融雪施設の記録[2] である。これは本線に設置された事例であるため、確実な融雪放熱を確保する必要があり、地下水の確保が困難な地点であったため、電力利用による施設が計画された。しかし、融雪電力契約による運転の停止時間と降雪が重なったため、約 10 時間にわたって圧雪が発生した。機械除雪を補うための施設ではあったが、平均的な降雪強度が設計条件である施設では、高強度の降雪に対して不十分なことを示すものとなった。

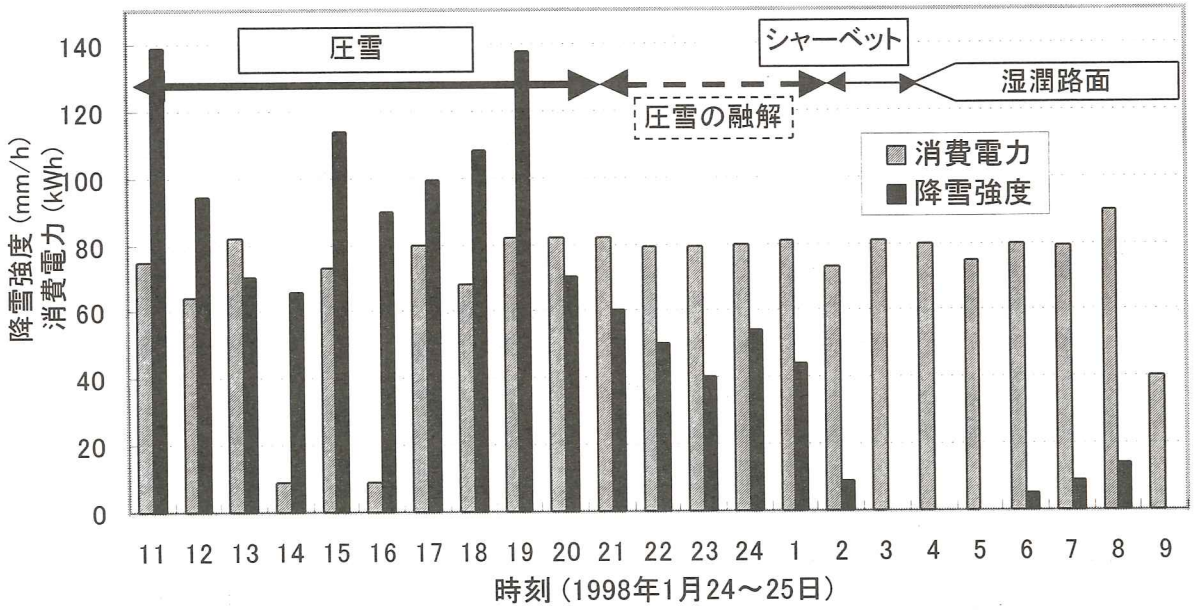


図-1.6 融雪能力を超える降雪における路面の状況

一方、舗装材であるセメント･コンクリートやアスファルト･コンクリートは、基本的に断熱材であることから、融雪施設の放熱部として大きな熱流束を得ることは容易でない。熱流束を大きくするには、加熱装置の被り厚を少なくする、加熱装置（配管）間隔を狭くする、加熱温度を高くするなどの方法が考えられる。被り厚は、施工性、耐久性の問題があり、5cm 以下にすることは困難である。間隔を狭くすると施設コストの上昇を招く。加熱温度を高くすると、特にセメント･コンクリートでは、熱応力によるクラックの発生率が高くなるといった多くの課題がある。さらに、十分な融雪のためには多量かつ確実な熱供給を必要としている。

3. 未利用エネルギー利用の必要性と可能性

機械除雪は、エネルギー消費および除雪効果の観点からも、冬期の道路交通確保の主要な手段である。しかし、上に例示したように、交通混雑時には障害となる課題が残っている。

一方、都市部においては、歩道側に除雪した雪を滞留する堆雪余裕幅が少ないことや、交通量が多いことなどから、融雪施設に対する高い需要があり、設置効果が大いに期待できる。そして、下水道などの廃棄している熱源が多く存在することが予想されることから、これら未利用の熱源を利用した融雪施設の実現性が高いと推定される。

そこで、表-1.1 に示した新エネルギーのうち、道路事業で利用事例がある太陽、風力、地熱を加えたエネルギー区分における融雪施設の実現性を検討することとした。

表-1.1 新エネルギーの区分における未利用エネルギーの位置付け

新エネルギー区分		新エネルギー形態	発電等活用システム
自然エネルギー	未利用エネルギー	太陽エネルギー	太陽光発電、太陽熱利用冷暖房・給湯
		風力エネルギー	風力発電
		海洋エネルギー	波力・潮力発電、海洋温度差発電
		地熱エネルギー	地熱発電、地熱利用熱供給
	未利用エネルギー	温度差エネルギー	河川水・海水等温度差発電
リサイクルエネルギー	未利用エネルギー	廃棄物エネルギー	ごみ焼却熱利用発電・熱供給、汚泥等焼却熱利用発電・熱供給
	未利用エネルギー	下水熱エネルギー	未処理水・処理水・汚泥等温度差エネルギー利用熱供給
	未利用エネルギー	群小都市廃熱	ビル廃熱・地下鉄・地下街廃熱・変電所・送電線廃熱利用熱供給
	未利用エネルギー	工場廃熱	工場間熱融通、LNG 冷熱利用発電・プロセス用熱供給、工場廃熱利用熱供給
高効率エネルギー利用	未利用エネルギー	天然ガスコージェネレーション	内燃力発電(ガスエンジン、ガスタービン) ＋熱回収(冷却水、排気ガス)利用冷暖房・給湯
	未利用エネルギー	燃料電池	リン酸型燃料電池コージェネレーション

注)枠囲みは、道路事業で利用事例のあるもの。NEDO 作を改良

4. 調査の概要

調査は、未利用エネルギー利用実態調査、賦存量調査、融雪需要量調査を行って、エネルギー需給バランスの分析を行った。また、冬期の道路では、融雪や路面凍結の防止に多くの熱量を必要としていると予想されるが、熱の難導体であるコンクリートやアスファルト合材で舗装された面からの放熱量が十分確保できるかを確認するため、コンピュータシミュレーションと模型実験を行った。本資料は平成１１年度の成果を基に以下の内容をとりまとめたものである。

4.1. 未利用エネルギー利用実態調査

道路融雪を中心として、未利用エネルギーの利用実態を調査し、利用効率、利用可能エネルギー量の原単位等を整理した。

4.2. 融雪等必要放熱量調査

道路面積、気象記録をもとに、凍結防止又は平均的な降雪時、最大降雪時に対応するための必要エネルギー量を調査した。この結果、従来の無散水融雪施設における路面からの放熱量は、時間降雪深 3～5cm に対応した 200～250W/m² であるが、10cm/h 以上の降雪に対応するためには 500～600W/m² 程度の放熱量が必要になる。

4.3. エネルギー需給バランス調査

対象とした未利用エネルギーについて、利用実態をもとに、賦存量の調査を行った。なお、調査は、積雪寒冷地の代表的な都市として、人口 10 万人以上の 31 市を対象とした。

都市毎の融雪等に必要な熱量と、賦存エネルギー量から、エネルギー需給バランスを分析し、さらに各都市を 1km メッシュに分割し道路について分析した。そのうち下水処理場などの大熱源については、そこからの熱の運搬も可能と仮定した。

4.4. フィージビリティスタディ

以上の検討結果をもとに、単体では不充分な熱源を利用し、高強度の降雪にも確実に

対応可能な融雪システムとして、ヒートポンプと蓄熱施設を組み合わせた融雪システムを提案した。本システムのフィージビリティ調査では、必要放熱量の実現性、蓄熱システム導入によるシステム適用範囲拡大の可能性を検証した。

融雪能力を得る放熱量を確保するためには、加熱温度を上げる、過熱体の設置間隔を狭くするなどの方法が考えられる。加熱温度を上げると、舗装体内部に応力が発生するため、コンクリートではクラックの可能性が問題になる。そこで、加熱温度の上限を明らかにするためのコンピュータシミュレーションと、その確認のための模型実験を行った。また、模型実験では、金属メッシュを入れることによる放熱効果向上についても実験した。

また、気象データを基に、蓄熱によって融雪が可能になる地域が拡大できることを、メッシュ分析に基づいて、確認した。さらに、コスト分析による効果評価方法を提案した。

1）日本道路公団:高速道路雪氷対策の機械作業に関する調査研究(その 2)、昭和 62 年 3 月、社団法人日本建設機械化協会
2）高瀬秀樹,大沢幸生:特殊ヒートパイプを用いた小エネルギー型融雪装置について,平成 10 年度北陸地方建設局管内技術研究発表会論文集
3）T.Muramatsu 他:Utilization of Wasted Energy in the Snowy Urban Areas, proceedings of 6th International Symposium on Cold Region Deveropment,2000.2

第II章　未利用エネルギー利用実態調査

1. 対象エネルギー

表-1.1 に示された未利用、未商用化エネルギーの内から、道路融雪における利用実態、都市部での賦存可能性を考慮し、次の７つの熱源を調査対象とした。

【調査対象とする未利用エネルギー】

①下水熱(未処理下水及び処理水)
②地熱
③太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ
④河川ｴﾈﾙｷﾞｰ
⑤風力ｴﾈﾙｷﾞｰ
⑥ごみ焼却場
⑦その他
　－地下鉄
　－変電所

2. 未利用エネルギーの導入実績と取得可能量の分析

融雪システム検討の基礎とするほか、都市部における賦存エネルギー量算定に必要な原単位を得ることを目的として、道路融雪等への未利用エネルギーの利用実態を調査した。

2.1. 下水道エネルギー

1) 設備の概要

(1) 下水道管きょ(未処理下水)の保有熱利用融雪システム

ヒートパイプを直接下水道管の内部から地上まで敷設し、下水道が保有する熱のみを移動・伝熱し、ロードヒーティングにより雪を溶かす設備である。下水道事業の補助事業として多くの導入実績がある。このうち、温度などの基礎データが入手可能であった、札幌市下水道局の実証システム事例等について分析した。

本設備は、以下の特徴を有している。

① 導入対象となる下水管きょは、φ＝２m以上の大口径幹線であり、既存マンホールを利用して熱を採取しているが、下水管渠と融雪部が離れていることによりマンホールを新設しているケースもある。

② ロードヒーティング熱源として用いる場合、発熱量は 60～100W/㎡と通常のロードヒーティングの設計値（北海道で 250W/㎡、その他地域で約 150～200W/㎡程度）よりも低い。ただし 24 時間連続的に採熱が可能であり、１日あたりの降雪強度 25～30cm/日程度の消融雪能力を有している。

③ 時間降雪深が 3cm 以上や長時間に渡る降雪があった場合、および外気温度が－２℃以下になると、完全に融雪するには２～３日間が必要となる。したがって融雪可能な降雪強度は１cm/h 程度となる。

④ 下水の熱源の温度は、平均温度で 10℃程度である。ただし、温度は流量を含め日変動が認められ、採熱管で取得可能な量は変動する。

⑤ 上記の理由によりヒートポンプを用いて 25～35℃の温水を製造、蓄積(蓄熱)し、250W/㎡の発熱条件を満たしている事例もある。

⑥ 採熱管にスケールが付着し、伝熱係数の低下が見られるが、その影響はわずかであり、１年間に１回程度清掃することにより解消可能である。

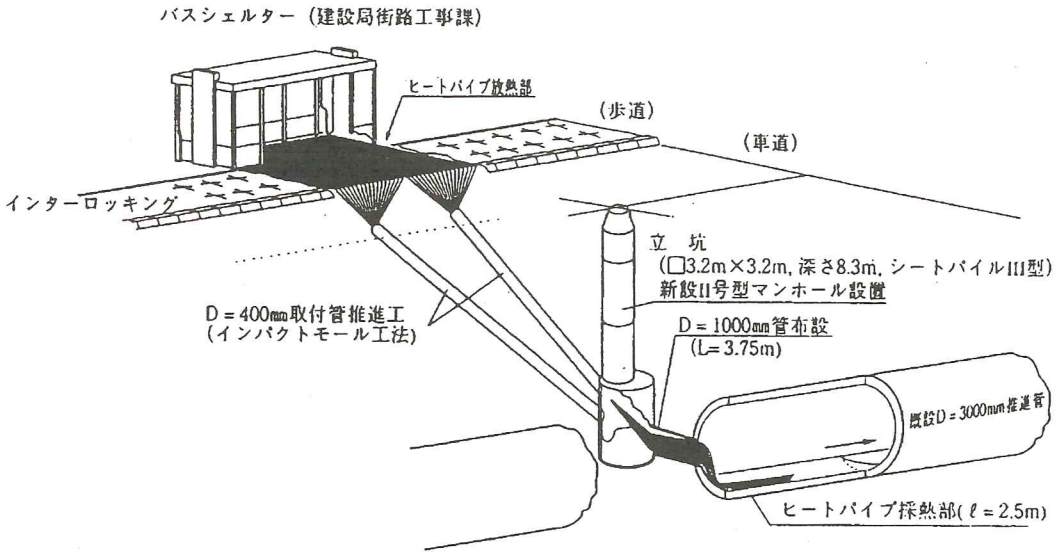


図-2.1 下水管渠を用いたロードヒーティングの事例
(コミュニティセンターバス停の例)[4)]

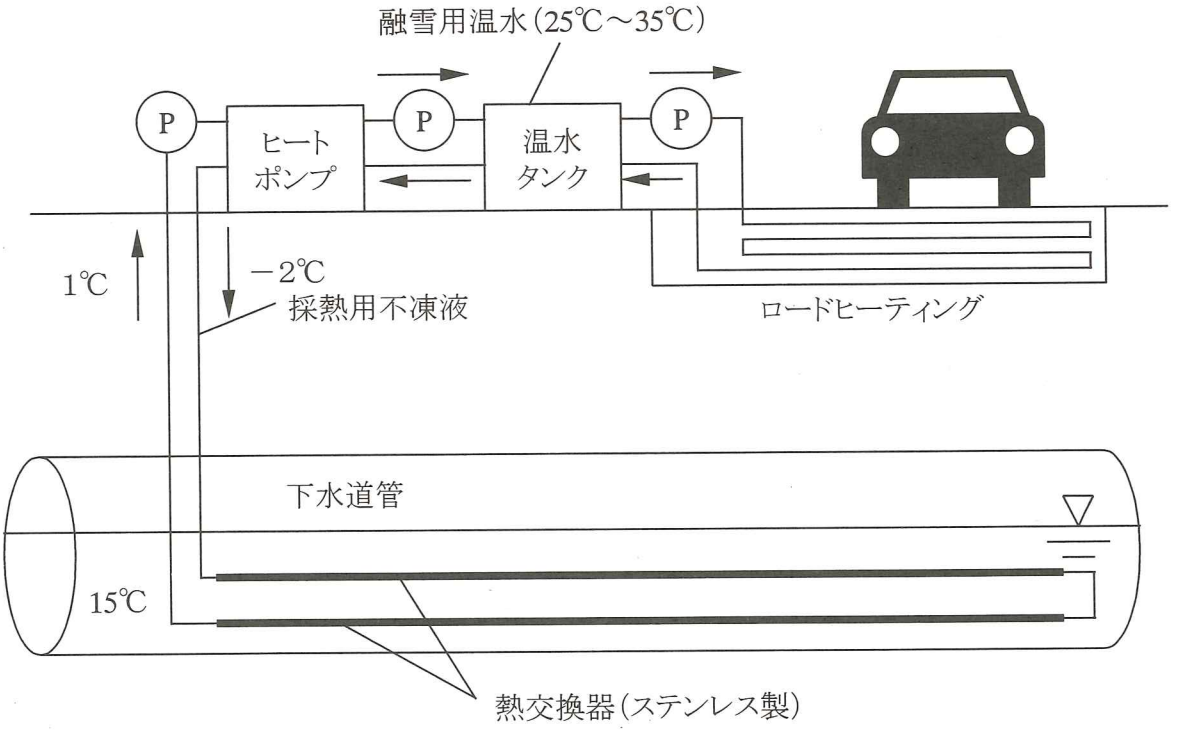


図-2.2　下水熱利用ヒートポンプ式ロードヒーティングの実例[4)]
（札幌市中央区交差点）

表 2.1　下水管渠熱利用の融雪システム事例(1)

主熱源			下水管渠	下水管渠	下水管渠	下水管渠
補助熱源				変電所(東北電力)		
用途			融雪(運搬投入)	地域冷暖房	ロードヒーティング	ロードヒーティング
施設名称			大通下水道管投雪施設	中川ポンプ場熱回収事業	江別アメニティ下水を利用したロードヒーティング	篠路コミュニティーセンター前バス停
実施主体			札幌市下水道局　建設部	岩手県土木部下水道課	北海道電力	札幌市下水道局建設中部工事課
実施場所			札幌市中央区大通西13丁目	岩手県盛岡市中川町	江別市水道庁舎内駐車場	北海道札幌市北区篠路3条8丁目及び2条9丁目「グリンピアしのろ」内の「コミュニティーセンター前」バス停2箇所
実施時期			1997年	1997年度	1997年	1997年
施設概要			管内を流れる未処理下水の熱エネルギーを利用し、ダンプトラックより雪を直接投入して融雪する施設(ロータリ設備付)	下水からヒートポンプを用いて熱を取り出し、その熱を地域冷暖房熱源(盛岡駅西口地区熱供給事業)として利用するもの	不凍液温度を35℃に維持するようON/OFF制御する。	下水管の外壁又は下水管内底部にヒートパイプの一端(採熱部)を設置し、他端(放熱部)を歩車道舗装内に埋設する
実用化段階			実用化	実用化	試験	実用化
採熱部	熱源		大口径下水道管	中川ポンプ場下水	ポンプ場下水	未処理下水(合流式下水管きょ Φ=3m) 流量平均0.12m/s
	温度	最低		12℃	8.7℃	7.7℃
		平均	15℃		11.2℃	11.6℃
		最高		23℃	13.6℃	15.8℃
	方法種別		既設下水管の熱を直接利用	蓄熱式ヒートポンプシステム	ヒートポンプ＋コイル式熱交換器	延長20～24m／φ26.5 ｺﾙｹﾞｰﾄ･ﾋｰﾄﾊﾟｲﾌﾟ(SUS304L) Σl＝762,710m
	装置数		1基	1基	1基	ヒートパイプ64本
	寸法		合流管渠(W3.1m×H3.1m)			l＝2.5m
	能力					
熱移送	方法･媒体		未処理下水	循環水	不凍液	ヒートパイプを取付管(内径 φ400に16本挿入)を通して地上と連結
	距離		大口径下水道管内	939m(φ400×2)		16.2mならびに10.8m
	保温		なし	なし		
蓄熱槽	蓄熱材･寸法･体積		なし		なし	なし
	熱交換パイプ		なし		なし	なし
	蓄熱量		なし		なし	なし
放熱部	放熱場所		既設下水管内		駐車場	歩道、バス停
	舗装					32本×2か所、15cm間隔 *インターロッキングブロック60mm *空練りモルタル25mm(被り分)
	放熱面積				100m²	歩道　約20m²(3.5m×4.65m) バス停内　約10m²×2か所(2.05×4.65m)
	放熱装置		合流管渠(W3.1m×H3.1m)		舗装版の下に放熱パイプを埋設	32本×2か所、15cm間隔
	放熱温度		15℃(未処理下水温度)	冷水7℃、温水48℃	35℃(温水槽)	
	放熱能力		1,400m³/日(年間8.4万m³)		184W/･m²	76W/m²
気象条件	降雪強度		3.6cm/h(最大降雪深)	2.7cm/h(最大降雪深)		24cm／日
	気温	最低	-5.6℃	-4.2℃		-18℃
		平均	-2.5℃	-0.7℃		-5.1℃
		最高	0.2℃	2.8℃		8℃
	風速		2.6m/S	3.1m/S		2.0m/S
効果			排雪現場の近くに融雪施設の設置できるため、トラックの台数の削減が可能	省エネルギー(30％、石油換算2,200m³)	路面平均温度:1.4℃ 凍結危険率(0℃以下＆水分):1.4% ランニングコスト:1,429円/m²年	ランニングコストは管の管理以外かからない
課題						縁石部分は一般歩道部と同様に積雪状態が続き、段差が発生。15cm/日程度でも融雪に3日程度かかる場合もあり、実際の融雪能力は計算値よりも小さい。
備考			現在は札幌市内1ヶ所だけの供用であるが、今後順次建設される予定である			･ヒートパイプ採熱部は、管底部の堆積物の影響を受けにくくするように設置する ･採熱部はパイプ長の10％以上で、放熱部に向かって上り勾配(2%以上)とする ･舗装熱伝導率は1.4(w/m･k)

参考文献４）及び６）～１４）より作成

表 2.1　下水管渠熱利用の融雪システム事例(2)

主熱源		下水管渠	下水管渠	下水管渠	下水管渠
補助熱源					
用途		ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング
施設名称		発寒地区におけるヒートパイプ調査	下水熱利用ヒートポンプ式ロードヒーティングシステム	地下道入口部ロードヒーティング	歩道融雪ロードヒーティング
実施主体		札幌市下水道局建設部計画課	北海道電力／総合研究所電気利用ｸﾞﾙｰﾌﾟ、札幌市建設局土木技術ｾﾝﾀｰ	山形建設事務所	青森土木事務所
実施場所		札幌市発寒地区（西区発寒10条13丁目）団地造成地域内の歩道ならびにバス停	札幌市中央区内交差点2箇所ならびに車両制動区域（南一条通と石狩街道の交差点）	地下道入口部	歩道融雪
実施時期		1995～1997年	1994年	1987年	1996年
施設概要		下水管の外壁又は下水管内底部にヒートパイプの一端（採熱部）を設置し、他端（放熱部）を歩車道舗装内に埋設する	下水道管内の熱交換器よりヒートポンプで採熱し、ロードヒーティング用の温水ポンプにて放熱部に移送	下水管の外壁又は下水管内底部にヒートパイプの一端（採熱部）を設置し、他端（放熱部）を歩車道舗装内に埋設する	下水管の外壁又は下水管内底部にヒートパイプの一端（採熱部）を設置し、他端（放熱部）を歩道舗装内に埋設する
実用化段階		調査	試験（実証システム）	試験施工	試験施工
採熱部	熱源	未処理下水（合流式下水管きょ Φ＝2.3m）、流量平均0.12m³/s	未処理下水（下水管きょ Φ＝1.5m）	未処理下水（合流式下水管きょ Φ＝2.5m）	未処理下水（合流式下水管きょ Φ＝2.5m）
	温度 最低	9℃(暖気)、10℃(下水)	8.3℃		
	温度 平均		15.2℃	9.5℃	10.2℃
	温度 最高	10℃(暖気)、12℃(下水)	21.9℃		
	方法種別	L7.1～11.2m／φ26.5（ステンレス製ヒートパイプ）	ヒートポンプ	ヒートパイプ	ヒートパイプ
	装置数	24本	2基		
	寸法	下水:平均2.6m(12本) 管渠内暖気:平均2.3m(12本)	下水道内部壁面採熱部18m（全長L20m／φ40） 平滑管＆高性能電熱管（ステンレス製）		
	能力		45kW(36000Kcal/h) ヒートポンプで25～26℃温水		
熱移送	方法･媒体	下水道幹線のマンホールから歩道までヒートパイプを布設	温水(0.1m³/min)	ヒートパイプ	ヒートパイプ
	距離	未処理下水 約4m 管きょ内の暖気 約1.7m			
	保温				
蓄熱槽	蓄熱材･寸法･体積	なし	・温水タンク 0.5m³(COP＝3.88)	なし	なし
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ	なし		なし	なし
	蓄熱量	なし		なし	なし
放熱部	放熱場所	歩道部	交差点、制動部	歩道（地下道入口）	歩道
	舗装	24本、15cm間隔 アスファルトならびにILB(インターロッキングブロック)舗装厚さともに6cm			
	放熱面積	歩道部 12.5㎡ (ｱｽﾌｧﾙﾄ 6.2㎡) (ILB 6.2㎡)	167㎡(交差点 85㎡、制動部 82㎡)	12㎡	39㎡
	放熱装置	24本、15cm間隔	15cm間隔、φ17(内径13) (特殊ナイロンパイプ)		
	放熱温度	9.4(下水)、3.6(暖気)			
	放熱能力	下水:As60W/㎡、ILB100W/㎡ 暖気:As28W/㎡、ILB 45W/㎡	250W/m²		
気象条件	降雪強度	35cm/48hで、12時間以上連続の積雪無し		約30cm/日	約30cm/日
	気温 最低	-12.8℃	-7.4℃	-5℃	-5℃
	気温 平均	-2.1℃			
	気温 最高	12.3℃			
	風速			2m/s以下	2m/s以下
効果		下水熱源では4～5時間で融雪(暖気では2～3日)	ロードヒーティングに必要なエネルギーの約70%を下水から取得	ランニングコストがかからない。またヒートパイプは、完全密閉で可動部をもたないため、メンテナンスフリーである。	ランニングコストがかからない。またヒートパイプは、完全密閉で可動部をもたないため、メンテナンスフリーである。
課題		・管きょ内の暖気からの採熱は、平均温度が3.6℃と未処理下水と比べ低く、熱量を十分に採熱できていない	・汚れによる伝熱係数の低下度合いは、約4割程度 ヒートポンプの生産熱量の低下は約1割		
備考		・インターロッキングブロックはアスファルトより発熱量が大きい。しかしアスファルトの方が日射量を吸収し易く、晴天日の日射の効果を加味すると両者に大きな融雪能力の差はない。	・下水水位の変動により、採熱管の伝熱係数が変化（下水の水位は早朝に低下し、昼夜間に高くなるが、全体的には安定しており、北海道の冬季においてもヒートポンプ用熱源として安定）		

参考文献５）及び１２）～１８）より作成

2) 原理

(1) ヒートパイプ･ヒーティングシステム

ヒートパイプは、液体の蒸発と凝縮の潜熱を利用した閉ループの伝熱体で、小さな温度差で大量の熱輸送が可能である。構造は図-2.3 に示す通りで、金属パイプの内部を真空にし、アンモニア、代替フロン等の作動液を少量封入したもので、勾配を与えた状態で低い方の一端を加熱することにより内部の作動液が蒸発し、蒸気は高速で位置的に高い他端へ移動する。ここで潜熱を放出して凝縮し、凝縮液は重力(又は、パイプの内側に貼り付けられた繊維の毛細管現象)により加熱部に戻る。この動作の繰り返しにより動力なしで熱の伝搬が行われる。

【長所】[19)]

① 下水、温泉水、地下水、地熱等の自然熱や廃熱を利用できるので、省エネルギー効果がある。

② 駆動部が無く、メインテナンスが極めて簡単である。また、ヒートパイプは独立しているので、万一故障が発生しても影響度が少ない。

③ ヒートパイプは、長手方向に温度が均一であり、融雪むらが生じにくい。

④ ヒートパイプは、完全密閉されている上、高強度で耐食性・耐久性に優れている。

⑤ ヒートパイプは、熱容量が小さいので、熱応答性に優れ、制御性に富む。

【短所】[19)]

① 他方式に比較して、多少であるが設置費が高い。

② ヒートパイプの布設勾配が２％以上必要である。

③ ヒートパイプの長さが 20m 程度と限定されるので、広い面積を融雪の対象とする場合、設置本数が多く必要である。（特注は 20m 超も可能）

④ 放熱部の温度は、採熱部の温度以上にはならない。

⑤ 不要なときも熱移動が休むことなく行われるため、熱源の温度低下を招くことがある。また、熱源への熱供給量以上には熱を利用できない。このため、パイプ中間部に電磁バルブを設け、熱移動を制御できるものが開発されている[20)]。

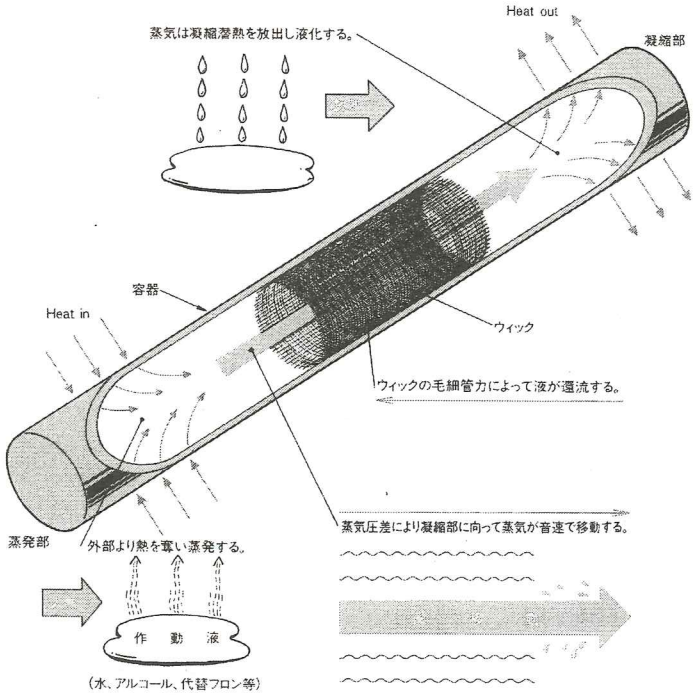


図-2.3 ヒートパイプの構造と作動原理[21)]

(2) 熱等価回路[19)]

ヒートパイプ・ヒーティングシステムの熱設計を行う場合、下図に示す様な熱等価回路としてモデル化することが可能である。以下、ヒートパイプを用いて路表面温度を 0.5℃に保つことを目的としたヒーティングシステムを想定して、熱等価回路の試算方法について記述する。

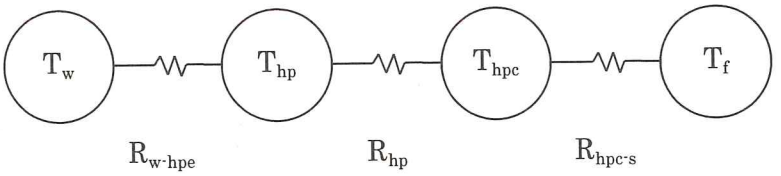


図-2.4 ヒートパイプ・ヒーティングシステムの熱等価回路

ここに、 T_w ：熱源温度　　T_{hpc} ：ヒートパイプ放熱部温度

T_{hp} ：ヒートパイプ採熱部温度　T_f ：路面温度

(3) 熱抵抗[19)]

全熱抵抗：R_{total} （℃/W）

全熱抵抗は以下のようにして定義される。

$$R_{total} = \frac{T_w - T_f}{q \cdot p \cdot L_c}$$

ここに、 R_{total} ：全熱抵抗（℃/W）　　T_w ：熱源温度（℃）

$R_{w\text{-}hpe}$ ：採熱部間の熱抵抗（℃/W）　T_f ：路面温度（℃）

R_{hp} ：ﾋｰﾄﾊﾟｲﾌﾟの熱抵抗（℃/W）　p ：ﾋｰﾄﾊﾟｲﾌﾟの布設幅（m）

$R_{hpc\text{-}s}$ ：舗装部の熱抵抗（℃/W）　L_c ：ﾋｰﾄﾊﾟｲﾌﾟの放熱部長さ(m)

q ：必要なヒーティング熱量（W/㎡）

この全熱抵抗は、次式のように３つの要素にわけて試算することが可能である。

$$R_{total} = R_{w\text{-}hpe} + R_{hp} + R_{hpc\text{-}s}$$

① 温水～ヒートパイプ採熱部間の熱抵抗：$R_{w\text{-}hpe}$ （℃/W）

$R_{w\text{-}hpe}$ は、温水の流速により決定され、次式より求める。

$$R_{w\text{-}hpe} = \frac{1}{A_{eo}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_w} + \gamma_w \right)$$

α_w ：温水の熱伝導率（W/㎡･℃）（1,162～1,305（W/㎡･℃））

：温水のレイノルズ数によって変化する

A_{eo} ：ヒートパイプ採熱部表面積（㎡）

ヒートパイプ外径 do（m）⇒do×π×採熱部の長さ

γ_w ：温水の汚れ係数（0.72×10^{-3}（㎡･℃/W 程度）

②R_{hp}は次式より求める。

$$R_{hp}=\frac{1}{2\pi\times\lambda_{SUS}\times L_e}\times\ln\frac{do}{di}+\frac{1}{\varepsilon_{hp}\times A_{ei}}+\frac{1}{\varepsilon_{hp}\times A_{ci}}+\frac{1}{2\pi\times\lambda_{SUS}\times L_c}\times\ln\frac{do}{di}$$

λ_{SUS} ：ステンレスの熱伝導率（W/･m℃）＝16（W/m･℃）
do ：ヒートパイプ外径（m）
di ：ヒートパイプ内径（m）
ε_{hp} ：ヒートパイプ内部熱伝達率（W/㎡･℃）＝1,200（W/㎡･℃）
A_{ei} ：ヒートパイプ採熱部内表面積（㎡）＝do×π×採熱部の長さ
A_{ci} ：ヒートパイプ放熱部内表面積（㎡）＝do×π×放熱部の長さ
L_e ：ヒートパイプ採熱部長さ（m）
L_c ：ヒートパイプ放熱部長さ（m）

③舗装部の熱抵抗：R_{hpc-s}（℃/W）

舗装部の熱抵抗は、舗装材料、ヒートパイプの布設ピッチ、埋設深さ等によって変化する。詳しくは、Ⅴ章を参照ください。

$$R_{hpc-s}=\frac{\sum(h_i/\lambda_i)}{A_{ho}\times\eta}$$

ここに、h_i ：舗装材料の厚さ（m）
λi ：舗装材料の熱伝達率（W/m･℃）
A_{ho} ：舗装１㎡当たりのヒートパイプ外表面積（㎡）
η ：布設幅と被りによる補正係数

3) 取得可能熱量の原単位

下水管きょから採取可能な熱量は、熱採取方法によって大きく異なる。ヒートパイプでは、温度差や熱源の変動に左右される。しかし、ヒートポンプを用いる場合には、熱源の水が凍らない範囲での取得が理論的には可能であるが、下水の生物処理機能を考慮した場合には、未処理下水の温度低下には限界がある。ここでは、ヒートパイプを利用した場合と、ヒートポンプを利用した場合とについて試算した。

(1)ヒートパイプ

ヒートパイプを用いて下水道管渠から取得可能なエネルギー量は、ヒートパイプの設置条件等によって大きく異なる。ここでは、過去に導入された次の事例に基づき、1箇所当たり30本のヒートパイプを設置する場合を想定する。

篠路コミュニティーセンター前バス停　32本/箇所
西区発寒地区　24本/箇所

さらに、これらの平均的な設置条件である次の条件を設定する。

ヒートパイプ採熱部：Le＝3.0(m)　舗装材料の厚さ：h_i＝0.10(m)
下水道の水温：T_w＝12(℃)　舗装材料の熱伝達率：λi＝0.75(As)
路面温度：T_f＝0.5(℃)　温水の熱伝導率：$\acute{a}_w$＝1200(W/･㎡℃)
ヒートパイプの布設幅：P=0.15(m)　ヒートパイプ外径：d_0＝0.0265(m)
ヒートパイプ内径：D_i＝0.0255(m)
温水の汚れ係数：$\gamma_w \fallingdotseq 0.72\times10^{-3}$（㎡･℃/W）

$$Q\text{（取得可能な熱量）}=\frac{T_w-T_{hpc}}{R_{w\text{-}hpe}+R_{hp}}$$

ここで、$R_{w\text{-}hpe}$：温水～ヒートパイプの熱抵抗

$$R_{w\text{-}hpe}=\frac{1}{A_{eo}}\cdot\left(\frac{1}{\alpha_w}+\gamma_w\right)$$

$$=\frac{1}{0.265\pi.2}\cdot\left(\frac{1}{1200}+0.72\times10^{-3}\right)$$

$$=0.031/Le$$

R_{hp}：ヒートパイプの熱抵抗

$$R_{hp}=\frac{1}{2\pi\times\lambda_{SUS}\times L_e}\times\ln\frac{do}{di}+\frac{1}{\varepsilon_{hp}\times A_{ei}}+\frac{1}{\varepsilon_{hp}\times A_{ci}}+\frac{1}{2\pi\times\lambda_{SUS}\times L_c}\times\ln\frac{do}{di}$$

$$=1.08\times10^{-2}/Le+3.17\times10^{-3}$$

ただし、T_{hpc}はヒートパイプの表面温度

よってヒートパイプ採熱部Ｌｅ＝３．０ｍ

$$Q_{hp}=\frac{12-T_{hpc}}{0.0171}$$　となる。

また、ヒートパイプの表面温度T_{hpc}は

$$T_{hpc}=\frac{Q_{hp}\times h/\lambda}{A_{ho}\times\eta}+T_f$$

ここでA_{ho}：舗装１㎡当たりのヒートパイプの外表面積（㎡）であり

A_{ho}　＝do×π/P

＝0.0265π/0.15

＝0.5547[㎡]

ηは、布設幅と被りによる補正係数　η＝1.6

よって$T_{hpc}=\frac{Q_{hp}\times0.10/0.75}{0.5547\times1.6}+0.5$

$=0.1502Q_{hp}+0.5$

したがってQ_{hp}＝68.7（W）[約 70W]

またこの時のヒートパイプの表面温度は

$T_{hpc}=0.1502Q_{hp}+0.5$

＝10.8（℃）

従って、下水道管渠を熱源としている事例では、ヒートパイプ１本当たりの利用可能熱量の原単位は 70W になり、１箇所から取得可能なエネルギー量は、次のようにして 2100W／箇所程度であると試算される。

ヒートパイプ１本分取得可能量×１箇所で布設可能な本数

＝70（W/本）×30（本）

＝2100（W/箇所）

(2) ヒートポンプ

ヒートポンプを利用して、強制的に熱を利用している事例の詳細な情報が得られなかった。ここではいくつかの前提をおいた上で、下水管きょからの最大の取得可能エネルギー量について試算した。

【前提条件】

①水温を５℃まで低下させることが可能とする。

②取得したエネルギー量をすべて利用可能とする。

【導入する管きょの仕様】

・温度は、平均 11.7（℃）

・流量は、平均で 0.12（m^3／秒）

次ﾍﾟｰｼﾞにモデルとした下水の基データを示す。

【試算式】

下記の式より取得可能なエネルギー量は、算出可能である。

Ｑ＝Ｃ（水の比熱）×ΔＴ（処理水との温度差）×Ｖ（平均流量）

Ｃ　（＝0.001GCal/m^3℃＝4186KW/m^3℃）

Ｖ　（m^3／秒）

ΔＴ（水温を５℃まで下げた場合の温度差）

よって

Ｑ＝4186（ｋW/m^3℃）×Ｖ（平均流量）×ΔＴ（＝Ｔ－５）

表-2.2　下水管きょから取得可能なエネルギー量の試算結果[4)]

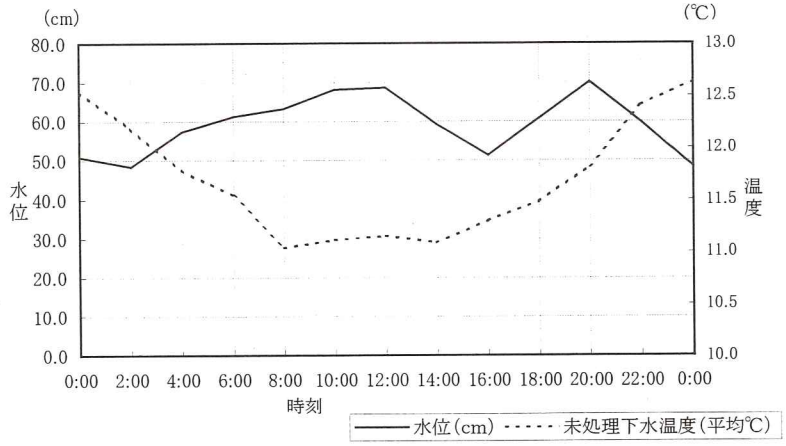
時間帯	流量（ｍ３／ｓ）	下水温度（℃）	ΔＴ（Ｋ）	取得可能熱量（ｋW／箇所）
０：００	０．１１	１２．５	７．５	３，４４０
２：００	０．０９	１２．２	７．２	２，５９２
４：００	０．０３	１１．８	６．８	８４８
６：００	０．０６	１１．５	６．５	１，６３６
８：００	０．１０	１１．０	６．０	２，５７７
１０：００	０．１５	１１．１	６．１	３，７７９
１２：００	０．１５	１１．１	６．１	３，８９２
１４：００	０．１６	１１．１	６．１	４，１６６
１６：００	０．１４	１１．３	６．３	３，７０８
１８：００	０．１３	１１．５	６．５	３，５７８
２０：００	０．１３	１１．８	６．８	３，８４３
２２：００	０．１８	１２．４	７．４	５，６８２
０：００	０．１１	１２．６	７．６	３，５９４
平均	０．１２	１１．７	６．７	３，３３３

注）最大５℃までエネルギーを取得可能であるとして試算した。

以上の結果、下水管きょのマンホール１箇所から試算上 850～5700KW 程度のエネルギーを獲得できる可能性があることが判明した。この値はヒートパイプを利用した場合の実績値と比較して数百倍の熱量に相当している。しかし、図－2.5 に示すとおり、最大と最小の比が６倍と日変動が大きく、早朝の取得可能量は大きく低下しており、蓄熱施設を導入しないと、早朝の降雪に対応した融雪が困難である。

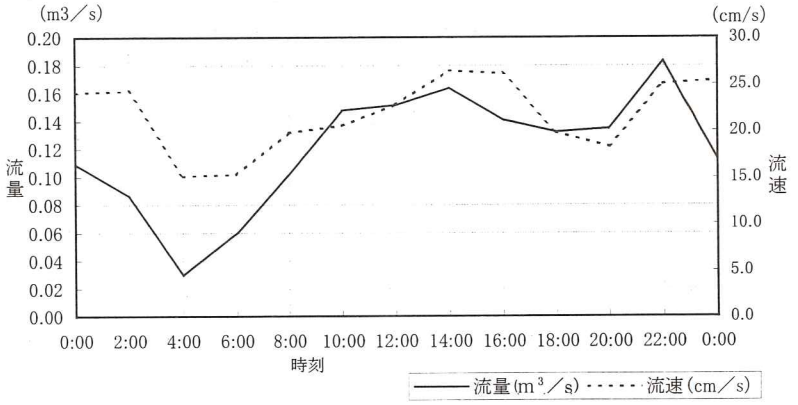
時刻	未処理下水温度（平均℃）	水位（ｃｍ）
0:00	12.5	50.9
2:00	12.2	48.4
4:00	11.8	57.3
6:00	11.5	61.2
8:00	11.0	63.2
10:00	11.1	68.1
12:00	11.1	68.6
14:00	11.1	59.3
16:00	11.3	51.4
18:00	11.5	60.7
20:00	11.8	70.1
22:00	12.4	59.7
0:00	12.6	48.4

図表　未処理下水温度と水位の関係



時刻	流速（cm／s）	流量（m^3／s）
0:00	24.0	0.11
2:00	24.2	0.09
4:00	15.1	0.03
6:00	15.3	0.06
8:00	19.8	0.10
10:00	20.5	0.15
12:00	22.7	0.15
14:00	26.4	0.16
16:00	26.1	0.14
18:00	19.8	0.13
20:00	18.3	0.13
22:00	25.0	0.18
0:00	25.3	0.11

図表　下水流速ならびに流量の関係



時刻	取得可能熱量（KW／個所）
0:00	3440
2:00	2592
4:00	848
6:00	1636
8:00	2577
10:00	3779
12:00	3892
14:00	4166
16:00	3708
18:00	3578
20:00	3843
22:00	5682
0:00	3594

図表　マンホール1箇所から理論的に取得可能な熱量

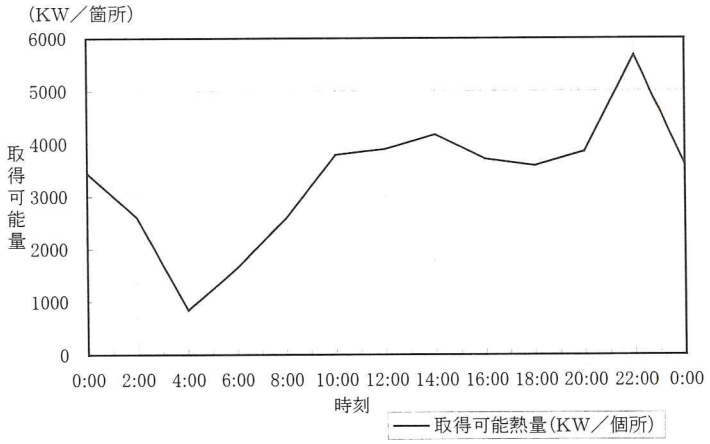


図-2.5 下水道管渠の流量・温度と取得可能な熱量[4)]

(3) 利用可能熱量の原単位

(1)ならびに(2)の計算結果から下水道管きょからの利用可能熱量の原単位を以下のように設定する。

管渠内の水位が変動しており、管渠を通過する未処理水全てを熱源には利用できないことから、理論的に求められたエネルギー取得最大量の１％にあたる 10kW/箇所のエネルギー量を管きょのマンホールより、取得可能であると設定する。

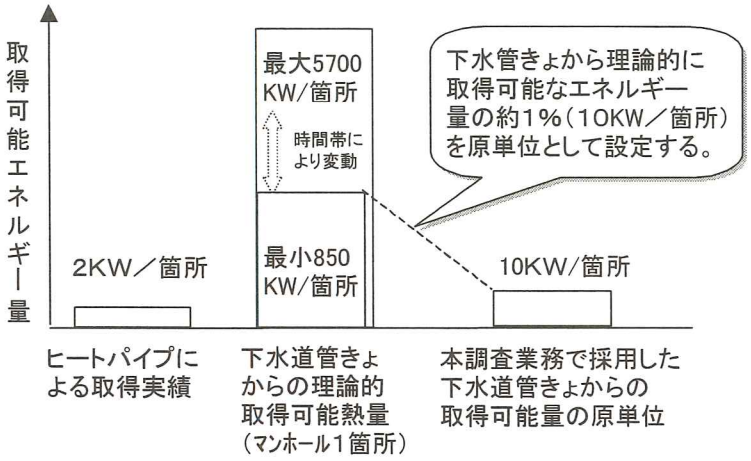


図-2.6　下水道管渠から取得可能なエネルギー量

なお、下水の住民一人あたりの排水量は、住宅・商業・工業の各地域により変化する。第Ⅳ章において１キロメッシュに分け分析を行っているが、このメッシュの分解能では、一部の大都市以外では、住宅・商業・工業の各地域を明確に切り分けすることが困難であった。このため、各地域から発生する排水は、人口一人あたり一定と設定して算出することとした。

表-2.3 汚水排出量の分類と原単位

		住宅地域	商業地域	工業地域
家庭汚水量	基礎家庭汚水	基礎家庭汚水量として1人1日平均0．2～0．3m^{3}で換算		
	営業汚水		営業水率0.6～0.8	営業水率0.2～0.5
工場排水量				業種により値が異なる
利用原単位		1	1．6～1．8	―

注）家庭汚水量は基礎家庭汚水（一般家庭からの汚水）と営業汚水（事業所、病院、その他の事業所からの汚水）とに分類される。このため商業営業汚水の原単位は、住宅地域と比較して以下のように 1.6～1.8 倍程度として設定される。

工場排水量は、業種により値が異なるため、過去の実績を調査して値を設定する必要がある。

2.2 下水処理廃水の利用

1) 設備の概要

下水処理場の処理水は、主として大規模融雪槽等の熱源として利用されている。大規模融雪槽は、大きな貯留水槽を設け、そこに搬送された雪を投入して消融する施設である。特に、札幌市の「雪さっぽろ２１計画」に関連して、調整池式や地下貯留式設備が事業化されている。また、地域冷暖房の熱源として利用している例もある。

・調整池式融雪槽

冬期には運搬排雪された雪を投入して融雪し、夏季には雨水・汚水の調整池として利用できる通年使用型の融雪槽で、下水処理水の保有熱量を利用して雪を融かす。平成５年に完成した札幌市厚別下水処理場の汚水調整池を利用した融雪槽が、全国で初の施設となった。また、札幌市では、この他に拓北下水処理場、手稲下水処理場を今後の事業可能地区としている。

・地下貯留式融雪槽（融雪管）

地下貯留式融雪槽（融雪管）は、合流式下水道の水質改善を目的とする雨水貯留管に、下水処理水を貯留し融雪槽として利用するものである。また、流雪溝へ送水する水源としても利用する計画がある。事業可能地区として、札幌市創成川地区が挙げられている。

・地域冷暖房の熱源

ヒートポンプと併用することにより、下水道の処理水が冷暖房熱源として利用されている。省エネ効果が３０％程度得られている

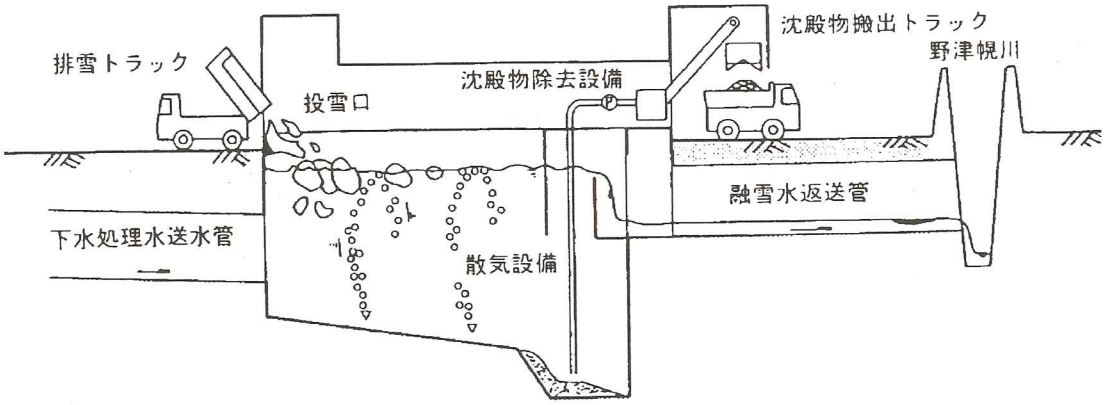


図-2.7 下水処理水を利用した融雪施設[7)]

表 2.4 下水処理水利用の融雪システム事例

主熱源			下水処理水	下水処理水	下水処理水	下水処理水
補助熱源						
用途			融雪(運搬投入)	融雪(運搬投入)	融雪(運搬投入)	ロードヒーティング
施設名称			厚別融雪槽(汚水調整池)	創成川融雪管(貯留管)	亀吉下水終末処理場	金沢市ロードヒーティング
実施主体			札幌市下水道局　建設部	札幌市下水道局　建設部	旭川市水道局	金沢市
実施場所			札幌市厚別下水処理場(札幌市厚別区厚別町山本1073－21)	札幌市東区東1丁目通(幌北線) (札幌市東区北28条東1丁目)	旭川市西部亀吉下水終末処理場	金沢市駅西地区
実施時期			1993年	1997年	1992年	1995(？)年
施設概要			白石区、厚別区からの排雪を処理 汚水調整池を改良し融雪槽として活用	融雪管(雨水貯留管)に処理水を送水し、上流端からダンプトラックの雪を直接投入して、融雪	亀吉下水終末処理場の散水ろ床を融雪槽に改良	金沢市城北水質管理センターから2km離れた地点に送水し、下水処理水を歩道に埋設した放熱管に流し融雪する
実用化段階			実用化	実用化	実用化	計画段階
採熱部	熱源		厚別処理場	創成川処理場	亀吉下水処理場	下水処理水
	温度	最低	13℃	12℃		
		平均	13.5℃	12.5℃		
		最高	14℃	13℃		
	方法種別		融雪槽に下水処理水を混合	融雪管(貯留管)に下水処理水を混合	融雪槽に下水処理水を混合	
	装置数		1基	1基	1基	
	寸法		8,000m³(全16,000m³) W5m × L42m × D6.5m × 3 × 2池(全4池)	槽容量 46,400m³		
	能力					
熱移送	方法・媒体		下水処理水	下水処理水	下水処理水	下水処理水
	距離		下水処理場内(数十m)	25km(23,500m³/日、φ5m)	下水処理場内(数十m)	2km φ100(流速0.3m/s)
	保温		なし	なし	なし	ガラスウール＆塩化ビニール
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		なし	なし	なし	
	熱交換パイプ		なし	なし	なし	
	蓄熱量		なし	なし	なし	
放熱部	放熱場所		融雪槽	融雪管	融雪槽	歩道
	舗装					
	放熱面積					
	放熱装置		8,000m³(全16,000m³) W5m × L42m × D6.5m × 3 × 2池(全4池)	槽容量 46,400m³		
	放熱温度		14℃(下水処理水温度)	12～13℃(下水処理水温度)	12～13℃(下水処理水温度)	8℃
	放熱能力		1,0000m³/日(年間60万m³/年)	2,100m³/日(年間12.6万m³/年) (計画:4,600m³/日)	1,100m³/日	
気象条件	降雪強度		3.6cm/時(最大降雪深)	3.6cm/時(最大降雪深)	8.6cm/時(最大降雪深)	
	気温	最低	−5.6℃	−5.6℃	−11.0℃	
		平均	−2.5℃	−2.5℃	−6.7℃	
		最高	0.2℃	0.2℃	2.8℃	
	風速		2.6m/S	2.6m/S	1.9m/S	
効果			60万m³の排雪場1箇所減	12.6万m³の排雪場1箇所減		
課題					既存の槽を有効利用しているため増設が難しく、住宅地に隣接しているため搬出時の交通が問題となり、能力をアップすることは難しい	既存の槽を有効利用しているため増設が難しく、住宅地に隣接しているため搬出時の交通が問題となり、能力をアップすることは難しい
備考			雪さっぽろ21計画の一環 冬期間に汚水調整池の水量が減少することから、融雪槽として活用	将来的に増設の計画あり。 (最終的に投雪口を3箇所設置)	将来的に増設の計画あり。 (最終的に投雪口を3箇所設置)	将来的に増設の計画あり。 (最終的に投雪口を3箇所設置)

参考文献６）～８）及び２２）～２５）より作成

2) 利用可能熱量の原単位

下水処理場から獲得可能なエネルギー量は、処理水との温度差により決定される。

Q＝C（水の比熱）×ΔT（処理水との温度差）×V（平均流量）

C　（＝0.001Gcal/m^3℃＝4186kW/m^3℃）

ΔT（利用可能な温度差を５℃として設定した）

V　（m^3／秒）

Q＝５（℃）×4186（kW/m^3℃）×V（日平均流量）

なお、V（日平均流量）は、各下水場における年平均の下水流量とする。

2.3 地熱エネルギー

1) 設備の概要[7)]

深さ 50m～150mの垂直ボーリング孔に、パイプ二重管構造のＢＨＥＳ(Borehole Heat Exchange System) などの熱交換器を設置し、舗装内に設置された放熱管との間で不凍液を循環させることにより地熱エネルギーを回収し、融雪放熱するシステムである。この地熱を活用したロードヒーティングのシステムは、建設省北陸地建、近畿地建、中国地建等で既に導入実用化されている。このシステムで利用されているヒートパイプの長さは 70～100mのものが多く、ボーリング工事の費用が高くなることが課題となっている。ボーリング費用が安価なボーリング長の短いタイプ（10～30m）のものも施工されている。

融雪能力としては、降雪強度 1～2cm/時まで対応しており、外気温が－10℃と低温になっても有効に作用していると報告されている。ただし、降雪強度が 2～3cm/時以上の降雪が続くと、積雪が見られるなど、融雪能力の不足が発生している。

ＢＨＥＳにおける熱移動の概念を以下に示す。冬季の場合、地盤温度は舗装体温度より相対的に高いため、循環水は路盤内のパイプ内を循環する間に舗装体に熱を放出して冷却され、熱交換杭に戻る。この熱を地盤内に埋設した熱交換用二重管に循環させることにより、再び加温されて舗装内の放熱管に導かれることにより、地熱を舗装材へと伝え、路面の融雪を行う。地下水の汲み上げ等は行わないため、地盤沈下等の環境問題を引き起こさないメリットがある。

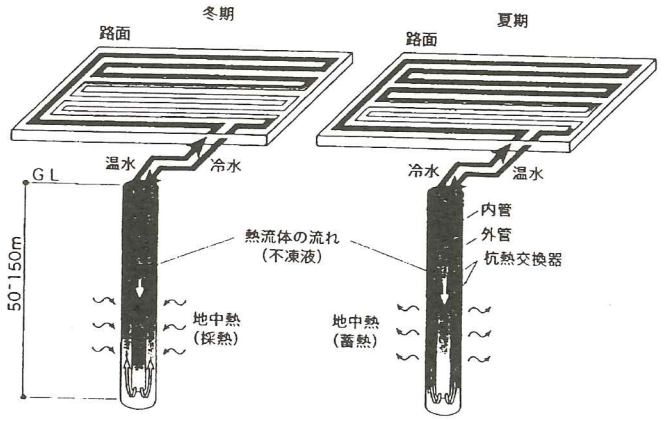


図-2.8BHES の作動原理[26)]

夏期には、太陽熱で舗装が暖められ、地盤温度が舗装体温度より相対的に低くなる。このため、不凍液の循環によって、上記と逆の熱の交換が行われ、熱交換杭内ではこの循環水から周囲地盤に向かって放熱し、地盤内に熱エネルギーが貯蔵される。この放熱により温度低下した循環水は再度舗装体に向かい、舗装体内部の熱エネルギーを吸収し、舗装体の昇温が緩和されるメリットが存在する。本システム導入による地熱温度の低下の対応策として、更に逆運転を行い、夏期の舗装体の熱を地中にもどすことも行われており、夏期の舗装体冷却効果も確認されている。

表 2.5　地熱利用の融雪システム事例(1)

主熱源			地熱	地熱	地熱	地熱
補助熱源						
用途			ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング
施設名称			新潟県水原町 国道49号線	岩手県二戸市ガイア融雪システム	横谷無水融雪システム	兵庫県美方郡 「八井谷チェーン着脱場」
実施主体			建設省新潟国道工事事務所	岩手県二戸市 (通産省H7年度 地域エネルギー開発利用モデル事業)	建設省中国地建三次工事事務所	近畿地建豊岡工事事務所
実施場所			新潟県北蒲原郡水原町山口町国道49号線歩道部	岩手県二戸市下り坂道1車線	一般国道54号双三郡布野村横谷地区ショートバイパス工事 縦断勾配が大きい山岳トンネル前後	兵庫県美方郡村町長福岡地区 一般国道9号「道の駅八千代」チェーン着脱場(歩道部)
実施時期			1995年	1995年	1995年	1996年
施設概要			ヒートパイプに防水型電磁弁をとりつけ、融雪が必要な時のみ採熱を行う。	DCHE3基 Downhole Coaxial Heat Exchanger	BHES	外径90mm、掘削長100mの樹脂製の2重管(12本)内に循環水を通し熱交換する掘削熱交換システム
実用化段階			試験施工	試験施工	実用	実用
採熱部	熱源		地熱	地熱	地熱	地熱
	温度	最低			13℃	
		平均	13℃	22.5℃(深度151m)	14℃(深度100m)	18℃
		最高			15℃	
	方法種別		コルゲート型パイプを地中に埋設 ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ径　Φ150	熱交換杭　3基	地中熱交換器 ・硬質ポリエチレン管の内側に小径のポリエチレン管を入れた二重構造	掘削杭熱交換システム 樹脂製の2重管(外管内径8.2cm、内管内径5cm)
	装置数		1穴にヒートパイプ2本挿入	ヒートポンプ(15KW)×1台 採熱部:ステンレス鋼管(外径8.9、内径8.3mm)	熱交換杭　33本	熱交換杭　12本
	寸法		埋設長:10m	埋設長:151m	埋設長:100m	埋設長:100m
	能力			媒体温度:25～30℃	4500W/本(1075cal/本) 冬期総採熱量12～18万kWh	5,683W/本(57W/m)
熱移送	方法・媒体		ヒートパイプ	循環水	不凍液(プロピレングリコール20%溶液)	循環水
	距離				222m(融雪管延長)	
	保温		なし	なし	なし	なし
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		なし	なし	なし	なし
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ		なし	なし	なし	なし
	蓄熱量		なし	なし	なし	なし
放熱部	放熱場所		歩道部	車道	車道	歩道部
	舗装		コンクリート	コンクリート	コンクリート	プレキャスト放熱板 (通常コンクリートの2倍の熱伝導率)＋アスファルト3cm舗装
	放熱面積		22㎡(2.5×8.8m)	266㎡(平均幅4m、延長65m)	1625㎡ (L158m×W7.5m、L65m×W7.5m)	310㎡
	放熱装置		埋設被り　80mm、埋設ピッチ20cm 放熱部長さ 4m	舗装版に放熱管を埋設	被り5cm、配管間隔100～150 溶融亜鉛メッキ鋼管(15A)	直径2cm(内径1.5cm)の放熱管 10cm間隔で路面に埋設
	放熱温度		1.0℃		1℃(最低気温が-10℃の場合)	6℃(融雪後3℃)
	放熱能力		108.8W/㎡(実績値)	192W／㎡ (システムの熱出力50kW)	70～90W/㎡	220W/㎡(融雪時) 100W/㎡(降雪前)
気象条件	降雪強度		20cm/日に対応 (設計降雪強度1.0cm/時間)	36cm/日 (設計降雪強度)	日降雪量20～25cm/日に対応	日降雪量36cm/日に対応
	気温	最低	－1.8℃(雪温度　－2.8℃)	－10℃	－10℃	
		平均			－3℃	
	風速		5m/S		3m/s	
効果				ランニングコスト760円/㎡/シーズン(電力2990円/㎡/シーズン、地下水無散水式融雪設備800円/㎡/シーズン)	*3,939W/本(39W/m) *気温-10℃まで凍結防止(路面≧0℃) *20cm/日(2cm/h)でも残雪有り	*外気温が0℃以下になっても路面温度を2～4℃以上に保っている *ランニングコスト(循環ポンプ)は安価
課題			ボーリング費用の低減 制御弁システムの改善	DCHE設置井戸の掘削費用が高いため、灯油や都市ガスに比べて4割程度高く、電熱線に比べて6～7割高い	循環液の温度が低いため、常時運転になり、機械の耐久性が問題 低運転コストだが、多数のボーリング工事等初期コストが問題	BHESの施工費が電熱式のロードヒーティングに比べて約2倍となる
備考			地熱をとり続けると地熱温度が低下するが、中断すると地熱温度は回復する。(従来型のヒートパイプでは、積雪の有無に関わらず熱を奪うため、地熱温度が低下し、利用できなくなる危険性があった)	(1)立地上の制約がほとんどなく、気候・気象条件に制約されず安定した運転が可能 (2)高成績係数(システム全体でCOP=3.4)	融雪配管の布設、接続工程短縮のため、工場で配管ブロックを組み立て、現地で接続するという方法を採用	平面的に狭い場所でも短期間で施工可能

参考文献２７）～３３）より作成

表 2.5　地熱利用の融雪システム事例(2)

主熱源			地熱	地熱	地熱	地熱
補助熱源						
用途			ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング
施設名称			駐車場融雪システム	無散水融雪設備中川峠	新潟県長岡市 西部丘陵内 国営越後丘陵公園	基礎杭利用による地熱融雪システム
実施主体			福井大学工学部　環境設計工学科	建設省近畿地建 福井工事事務所	建設省北陸地建 国営越後丘陵公園工事事務所	福井県雪対策 ・建設技術研究所
実施場所			福井大学内駐車場	福井県坂井郡金津町一般国道8号線中川峠散水融雪区間の流末にある横断歩道	公園内の歩道	福井県立大学職員住宅駐車場
実施時期			1997年	1997年	1998年	1993年
施設概要			BHES1本	熱交換舗装体と熱交換杭を水理的に閉回路で連結し、循環水が循環する	熱交換井4本を6mの間隔で設置	建物の支持のために地中に打ち込んだコンクリート製の基礎杭を熱交換器として利用
実用化段階			試験施工	試験施工	実用化	試験施工
採熱部	熱源		地熱	地熱	地熱	地熱
	温度	最低				
		平均			地盤温度(外管外壁温度)7.5℃	15.8℃
		最高				
	方法種別		熱交換杭 内管(Φ56mm、肉厚3mm)、外管(Φ90mm、肉厚4mm)	熱交換舗装体と熱交換杭は水理的に閉回路で連結され、循環水が循環する	外管:外面塩化ビニールライニング鋼管 内管:塩化ビニル管	ポリエチレン製管(外径 φ400、内径 φ270)
	装置数		熱交換杭　1本	熱交換杭8本(5m間隔) 循環水ポンプ(2.2kW)	熱交換杭　4本	熱交換杭45本 循環ポンプ 2.2kw、循環水量 0.24 m^3/min
	寸法		埋設長:70m	埋設長:100m	埋設長:25m	埋設長:35m
	能力		9,000W/本(129W/m)	6,242W/本(62W/m)	718W/本(29W/m)	1,920W/本(55W/m)
熱移送	方法・媒体		循環水	循環水(プロピレングリコール20%溶液)	循環水	循環水 循環ポンプ2.2KW×1台
	距離			60～70m		
	保温		なし	なし	なし	なし
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		なし	なし	なし	なし
	熱交換パイプ		なし	なし	なし	なし
	蓄熱量		なし	なし	なし	なし
放熱部	放熱場所		駐車場	横断歩道	公園内の歩道	駐車場
	舗装		コンクリート平板の上に30mmのアスファルト舗装をしている	コンクリート舗装版	表層:アスファルト舗装30mm	珪石骨材のコンクリート舗装の被り3cm (熱伝導率2.5W/mk)
	放熱面積		60㎡ (12×5m)	246㎡ (平均幅7m×延長35m)	幅2.1m×長さ24m＝50.4㎡	400㎡
	放熱装置		コンクリート平板(2.5m×2m×厚16cm)内部にΦ15mm鋼管を埋設	放熱管埋設深さ7センチ、埋設間隔10cm	100mmの基層コンクリートの表面に150mmピッチで布設	ポリエチレン製を10cm間隔
	放熱温度		(循環水温度9℃)	5℃以上(日中)		
	放熱能力		0.15kW/㎡(融雪時) 0.05～0.07kW/㎡(融雪終了時)	203W/㎡ (降雪時最大)	57W/㎡	216W/㎡程度
気象条件	降雪強度		2～3cm/hに対応		最大17cm/日の降雪量に対応	2cm/時
	気温	最低	−1℃	−5℃		
		平均		-1.8℃(設計外気温)		
		最高				
	風速					
効果			夏期の舗装体冷却効果および冬期の舗装体昇温効果に、それぞれ作用する	総採熱量18915kWh(2364kwh/本) 循環ポンプ消費エネルギーの約9倍 融雪路面は常に5℃以上を保持	比較的深度が浅い(25m)熱交換井のため、掘削等のイニシャルコストを抑えることができる	融雪能力　1.7～3.2センチ／時 周辺で積雪66センチを記録した際に、6センチ程度の積雪にとどまる。
課題			降雪強度が4～5cm/時となると融雪能力の不足がみられる	システムのメンテナンスの耐久性についての詳細検討が課題	取得可能なエネルギーが低レベルのため、豪雪地や放熱管埋設深が大きい車道に適用することは現状では難しい	取得可能なエネルギーが低レベルのため、豪雪地や放熱管埋設深が大きい車道に適用することは現状では難しい
備考			熱エネルギー抽出能力は、設置場所における地盤温度や地層の構成条件などの影響を受けるため、熱エネルギー抽出試験によって熱貫流率などを事前に見積ることが重要である	*地中熱の余熱運転による融雪効果(特に圧雪防止効果)が認められた *省スペースでの施工が可能なBHESの導入を決定した。	地盤温度の回復を図るため、運転18時間、停止6時間の運転サイクルにより採熱を実施	放熱管のかぶりを3cmと薄くした舗装面は、自家用車の駐車場として5年供用されたが、クラックなどの異常は見られない

参考文献３４）～３７）より作成

2) 原理[19, 34, 36)]

地熱の取得可能なエネルギー量は、次のような式により算出することが可能である。

$$Q = \frac{T_g - T_{in}}{R_{total}}$$

ここに:

Q:地中熱交換器 1m あたりで取得可能な熱量(W/m)

R_{total}:全熱抵抗(W/(m・℃))

T_g :地熱温度(℃)

T_{in} :媒体の温度(℃)

ここで全熱抵抗 R_{total} は、以下の４つの要素に分解され、次のような式によりモデル化可能である。

R_{total} ＝外管での熱抵抗＋温水の熱抵抗＋内管と外管との熱抵抗
＋外管と地盤との熱抵抗

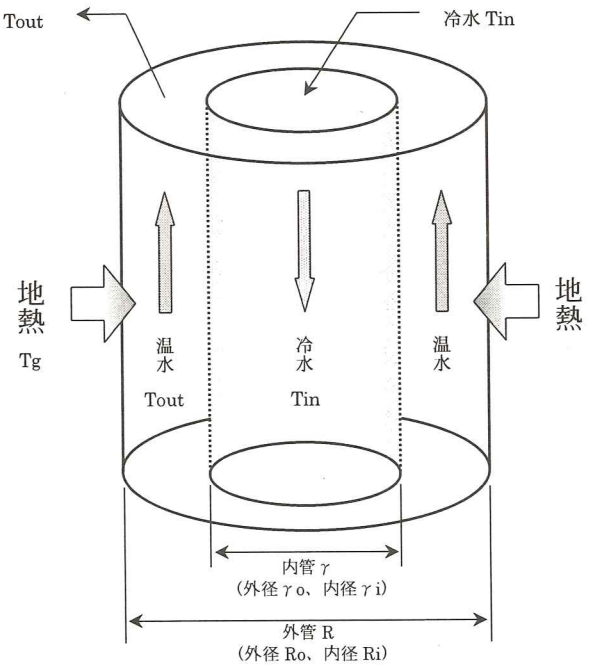


図-2.9　地熱の熱伝導のモデル図

このとき、

外管での熱抵抗＝$\frac{1}{2\pi\lambda_{out}} \ell_n \frac{R_o}{R_i}$

内管での熱抵抗＝$\frac{1}{2\pi\lambda_{in}} \ell_n \frac{r_o}{r_i}$

λ_{out}、λ_{in} ：外管ならびに内管自体の熱伝導率を示す。

流体の熱抵抗は、温水の速度（正確には、流体のレイノルズ数）の関数として、次式で与えられる。

$$\text{流体の熱抵抗} = \frac{1}{\text{流体の熱貫流率} \times \pi \times \gamma_{。}}$$

ここで液体（温水）の熱貫流率は、以下の実験式により算出することが可能である。

液体（温水）の熱貫流率＝－30.2＋227 $R_{eo}^{0.086}$ [W/㎡ k]

R_{eo}は外管と内管の間を流れる流体のレイノルズ数である。流体の速度が速くなるにつれ、流体の乱れが大きくなると熱貫流率が大きくなり、一方熱抵抗が小さくなることを示す。なお、流速とレイノルズ数との関係は、図-2.10 に示す関係が得られている。

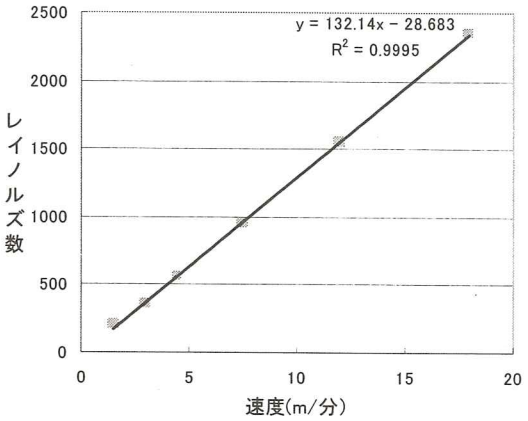


図-2.10　流速とレイノルズ数との関係

次に、外管と地盤の熱抵抗は、次式により算出される。

$$外管と地盤との熱抵抗＝\frac{1}{外管と地盤との熱貫流率\times\pi\times\gamma_o}$$

ここで、実験式より、外管と地盤の熱貫流率は、次式で与えられる。

外管と地盤の熱貫流率＝－9.8＋2.6Δ T_G　（7≦ T_G ≦14）

ここでΔ T_Gは、外管水温と地盤温度との温度差であり、

Δ T_G ＝（T_G － T_{out}）

となる

3) 利用取得可能熱量の原単位

【設定条件】

・地中埋設長さ 100m の地中熱交換器の導入を設定する。

・地熱温度は、地域により差があり、調査対象物件では 8～22℃であった。地熱の取得可能量の試算にあたって、地熱の温度を中間値の 15℃として設定した場合のエネルギー量の試算を行う

【仕様】

・融雪後の冷水温度をT_{in} ＝5℃とし、取得可能な温水温度T_{out}を試算する。

・地中熱交換杭の大きさ

- 外径γ_o＝90（肉厚 4 ミリ）、内径γ_o＝56（肉厚 3 ミリ）
- 材質　ステンレス（熱伝導率 16W/m℃）

・循環水の流量を 40m^3/分と設定する。

【計算式】

$$① 外管の熱抵抗＝\frac{1}{2\pi\lambda_{sus}}\ell_n\frac{R_o}{R_i}＝\frac{1}{2\times3.14\times16}\ell_n\frac{90}{82}＝9.26\times10^{-3}\ 〔℃m/W〕$$

② 内管の熱抵抗＝ $\frac{1}{2\pi\lambda_{sus}}\ell_n\frac{r_o}{r_i}=\frac{1}{2\times3.14\times16}\ell_n\frac{56}{50}=1.12\times10^{-3}$〔℃m/W〕

③ 流体の熱抵抗

外管中における流体の速度：Vは、

$$V=\frac{\text{流量}}{\text{断面積}}=\frac{40\times10^3\text{cm}^3/\text{分}}{28.16\text{cm}^3}=14.2\text{m/分}$$

となる。この時のレイノルズ数は1850程度であるから、流体の熱貫流率は次式より試算される。

$$\text{流体の熱貫流率}=-30.2+227R_{eo}^{0.086}$$
$$=-30.2+227\times(1850)^{0.086}$$
$$=131\text{〔W/m}^2\cdot\text{k〕}$$

流体の熱抵抗は

$$\text{流体の熱抵抗}=\frac{1}{\text{流体の熱貫流率}\pi\gamma_o}$$
$$=\frac{1}{131\times3.14\times0.056}$$
$$=4.34\times10^{-2}\text{〔℃m/W〕}$$

④ 外管と地盤の熱貫流率＝$-9.8+2.6\Delta T_G$

ここでΔT_Gは、外管水温と地盤温度との温度差であり

$\Delta T_G=(15-T_{out})$となる。

従って

$$\text{外管と地盤との熱抵抗}=\frac{1}{\text{外管と地盤との熱貫流率}\times\pi\times\gamma_o}$$
$$=\frac{1}{\left[-9.8+2.6(15-T_{out})\right]\times\pi\times0.090}$$
$$=\frac{1}{(29.2-2.6T_{out})0.2826}$$
$$=\frac{1}{8.25-0.734T_{out}}$$

また、外管水温T_{out}と1mあたりで取得可能な熱量Qとの関係は次のようになる。

Q×地中熱交換器の長さ（L=100）＝（T_{out}—T_{in}）×循管水の流量×比熱

$$Q=\frac{(T_{out}-5)}{100}\times40\times10^3\times60\times\frac{1}{860}\times1$$
$$=27.9T_{out}-139.5\quad[\text{W/m}]$$
$$T_{out}=\frac{1}{27.9}Q+5\quad[℃]$$

以上より、外管と地盤との熱抵抗は、次式により表わされる。

$$外管と地盤との熱抵抗＝\frac{1}{8.25-0.734\left(\frac{1}{27.9}Q+5\right)}$$

$$=\frac{1}{4.58-0.0263Q}$$

⑤ 1m あたりに取得可能なエネルギー量

①～④の計算結果を用いて

$$Q=\frac{1}{全熱抵抗}\ (T_g-T_i)$$

$$=\frac{15-5}{(9.26+1.12+43.4)\times10^{-3}+\frac{1}{4.58-0.0263Q}}$$

$$=\frac{10}{0.0538+\frac{1}{4.58-0.0263Q}}$$

この式を解くと

$Q=31.3$（W/m）

このとき$T_{out}=6.1$℃である。

以上と同様に、冷水の温度を設定してQとT_{out}を算定すると以下のようになる。

表-2.6　融雪後の冷水温度T_{in}が変化した場合の取得可能熱量の関係

融雪後の冷水温度 T_{in}（℃）	取得可能熱量 Q（W／m）	取得可能な温水温度 T_{out}（℃）
5	31．3	6．1
3	46．0	4．6
1	62．4	3．2

一方、実績調査の結果を表-2.7 に示す。

表-2.7　BHES の導入実績の仕様比較

名称	導入箇所	熱源温度	地中熱交換器		発熱量		
			本数	ヒートパイプ地中埋設長(m)	1本あたり(W/本)	m^2あたり(W/m^2)	mあたり(W／m)
新潟県水原町国道49号線	新潟県北蒲原郡水原町山口町国道49号線歩道部	13℃	1	10	2398	108.8(実績値)	240
駐車場融雪システム	福井大学内駐車場	(循環水温度9℃)	1	70	9000	150(融雪時) 50～70 (融雪終了時)	129
新潟県長岡市国営越後丘陵公園	公園内の歩道	地盤温度 (外管外壁温度) 7.5℃	4	25	718	57	29
無散水融雪設備中川峠	福井県坂井郡金津町一般国道8号線中川峠散水融雪区間の流末にある横断歩道		8	100	6242	203 (降雪時最大)	62
兵庫県美方郡「八井谷チェーン着脱場」	一般国道9号 兵庫県美方郡村町長福岡地区「道の駅八千代」チェーン着脱場及び歩道部	18℃(融雪で冷やされた循環水は3℃～6℃に昇温され、6℃程度で循環)	12	100	5683	220(融雪時) 100(降雪前)	57
横谷無水融雪システム	一般国道54号双三郡布野村横谷地区ショートバイパス工事縦断勾配が大きい山岳のトンネル前後	14℃ (深度100m)	33	100	3939	70～90	39
基礎杭利用による地熱融雪システム	福井県立大学職員住宅駐車場	15.8℃ (平均温度)	45	35m	1920	216程度	55

地熱の場合、試算式で示したように、還流する熱媒体の温度、地下の地熱の状況(温度及び地下水流等による熱供給)によって取得可能なエネルギー量が変化する。3)の試算より、熱交換井戸 1m あたり 30～62W 程度の熱量取得が可能であることが判明した。また、本調査対象とした過去の導入実例の場合も 29～240（W/m）と幅広い範囲となっている。

従って、試算にあたっては、100m の深さで BHES を 5m 間隔で複数本設置することを前提とする。設置本数が多い事例では 1m あたりの取得可能量は 50W/m で、試算結果の中間に相当する値になっている。そこで、１本あたり 5000W の熱量を取得可能として設定する。

2.4 太陽エネルギー

1) 施設の概要

太陽熱の利用方法としては、太陽熱により昇温散水を行うタイプが実用化されている。太陽電池を用いた太陽光発電は、北首都国道工事事務所で試験導入されているが消融雪に応用されている事例は、今のところ存在しない。以下この２つのシステムについて説明する。

(1) 太陽熱蓄熱システム

図-1.4 に示すように、夏期に太陽熱で暖められる舗装版を集熱器として太陽熱を集め、その熱を地中に輸送して地中の温度を上げて蓄熱しておき、冬期にその熱を利用して消融雪を行うシステムである。蓄熱槽として、土壌をそのまま利用する場合と、北陸地建や近畿地建の事例のように、熱貯蔵効率を高めた蓄熱槽(液体に蓄熱する場合と土に蓄熱する場合がある。)を設置する２タイプが存在する。

表 2.8 北陸地建の駐車場における事例[38)]

施工場所	一般国道８号 曽地チェーン脱着場 （平成５年度設置）	一般国道１７号 道の駅・ちぢみの里おぢや （平成８年度設置）
集熱・融雪面積	チェーン脱着場　600m^2	オンランプ　600m^2
設計時間降雪量	2.2cm/h	2.9cm/h
設計年降雪量	503cm/y	979cm/y
設計降雪時間	228.6h	337.6h
平均日最低気温	-1℃	-2.5℃
基本必要熱量	184W/m^2	211W/m^2
冬期間必要熱量	91GJ	102GJ
蓄熱土量	2,060m^3	2,440m^3
蓄熱土の熱容量	3.2MJ	3.5MJ
蓄熱・採熱管	SUS10A×500P (L=7,080m)	SUS10A×600P (L=6,330m)
集熱・放熱管	SUS15A×150P (L=600m)	SUS15A×150P (L=400m)
循環ポンプ	50A×2.2kw×４台	65A×5.5kw×1 台
断熱材	25cm 発砲スチロール(上部)	25cm 発砲スチロール(上部・周囲)
舗装	コンクリート(厚さ 25cm)	コンクリート(厚さ 25cm)

表 2.9　太陽熱利用の融雪システム事例

主熱源			太陽熱(蓄熱)	太陽熱(蓄熱)	太陽熱(蓄熱)	太陽熱(蓄熱)
補助熱源						河川水
用途			ロードヒーティング	ロードヒーティング	ロードヒーティング	散水融雪
施設名称			新潟県柏崎市曽地ﾁｪｰﾝ脱着場	新潟県小千谷市「ちぢみの里おぢや」	兵庫県美方郡「八井谷ﾁｪｰﾝ着脱場」	国道8号敦賀バイパスの田結インターソーラー融雪システム
実施主体			建設省北陸技術事務所 長岡国道工事事務所	建設省北陸技術事務所 長岡国道工事事務所	建設省近畿地建豊岡工事事務所 道路管理課	車道ならびに歩道
実施場所			一般国道8号曽地チェーン着脱場	一般国道17号道の駅・ちぢみの里おぢやオンランプ	一般国道9号 道の駅八千北チェーン着脱場(駐車場部)	建設省近畿地方建設局
実施時期			1993年	1996年	1996年	
施設概要			夏期に舗装版を集熱器として循環水で太陽熱を集め、地中の温度を上げて蓄熱 この地中熱を冬期間の降雪時に循環水によって舗装版に輸送して放熱・融雪	夏期に舗装版を集熱器として循環水で太陽熱を集め、地中の温度を上げて蓄熱 この地中熱を冬期間の降雪時に循環水によって舗装版に輸送して放熱・融雪	地下に鋼製及び鋳鉄製の熱貯蔵効率を高めた蓄熱槽及び集熱器を配置、この中に循環水を通し蓄熱した熱エネルギーで融雪	太陽エネルギーにより昇温散水を行い、取水量を低減させる環境問題に配慮した融雪設備
実用化段階			実用化	実用化	実用化	実用化
採熱部	熱源		太陽熱	太陽熱	融雪対象の放熱版より主として夏に集熱(冬期に路面温度上昇時は集熱運転)	ソーラー集熱器と温水ボイラーの併用
	温度	最低				
		平均				5℃(河川水温度)
		最高				
	方法種別		融雪対象の舗装版下の埋設管より採熱	融雪対象の舗装版下の埋設管より採熱	融雪対象の舗装版下の埋設管より採熱	融雪の回収水と河川水とを混合し、ソーラ熱により加熱
	装置数		融雪対象と同じ舗装版600㎡を集熱版として利用	融雪対象と同じ舗装版400㎡を集熱版として利用	融雪対象と同じ舗装版1120㎡を集熱版として利用	集熱器130㎡
	寸法		SGP15A×150(面積＝600㎡)	SGP15A×150(面積＝400㎡)	1120㎡	1.8㎡/ﾊﾟﾈﾙ×72ﾊﾟﾈﾙ
	能力					回収水　0℃、散水温度　5℃ 集熱量/全日射量＝0.36
熱移送	方法・媒体		循環ポンプ:50A×2.2Kw×4台	循環ポンプ:65A×5.5Kw×1台	太陽熱で暖められた水を循環ポンプにより循環	回収水と河川水をポンプにて移送 温水ポンプ　7.5KW×1台
	距離					
	保温		なし	なし	なし	なし
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		2060m³(3.2kJ/m³・℃) 地下5m	蓄熱土2440m³(3.5kJ/m3・℃) 地下5m	水2500m3:鋼製集熱槽(φ4.5m×L80m)鋳鉄製集熱槽(φ2.6m×L240m)、地下10m	太陽熱で加温(35～75℃)された河川水 集熱は秋頃から開始する
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ		SUS10A×500P(L＝7080m)	SUS10A×600P(L＝6330m)	Φ60.5ミリ、L＝318m×16本	
	蓄熱量		最大154.9GJ(必要量90.7GJ)	必要な熱量5.8GJ	15℃	36m3×4　槽
放熱部	放熱場所		チェーン脱着場	オンランプ	チェーン脱着場	インターチェンジ(車道ならびに歩道)
	舗装		コンクリート(厚さ25cm)	コンクリート(厚さ25cm)	プレキャスト放熱板 (通常のコンクリートの熱伝導率が2倍)	
	放熱面積		600㎡	400㎡	1120㎡	車道:2,530㎡、歩道:　480㎡
	放熱装置		SGP15A×150(面積＝600㎡)	SGP15A×150(面積＝400㎡)	被り:6cm(舗装厚:3cm)、10cm間隔、パイプ直径:2cm(内径1.5cm)	散水管一式を車道および歩道の路肩に設置
	放熱温度		2.5℃(路面温度)		12℃(融雪後6℃)	
	放熱能力		184W/㎡	211W/㎡	降雪後0.22kw/㎡(降雪前0.1kw/㎡)	12.6GJ/年
気象条件	降雪強度		2.2cm/h、503cm/年(年降雪時間223.6h)(降雪日の80%は降雪と同時に融雪)	2.9cm/h、979cm/年(年降雪時間337.6h)	3.0cm/h、45.8cm/日	15～21cm(月あたり累計降雪深さ)
	気温	最低	−1℃	−2.5℃		
		平均				
		最高				
	風速					
効果			蓄熱部温度:夏期27.5℃、12月中旬22℃	蓄熱部温度:夏期27.5℃、12月中旬22℃	夏期の冷却効果:通常舗装が55℃に対し無散水舗装では38℃(17℃の温度差)	
課題			降雪強度3cm/h以上でも対応可能 厳しい気象条件ではイニシャルコストが他に比べて高く、3cm/hが限界	降雪強度3cm/h以上でも対応可能 厳しい気象条件ではイニシャルコストが他に比べて高く、3cm/hが限界	維持コストは極めて少ない(電熱線式の約17分の1)が、初期投資が大きく、トータルコストでは、まだ若干高い状況	蓄熱槽通気筒からの蒸気熱を制御することにより、蓄熱槽周りの外気温(室温)低下を抑制することが課題
備考			畜熱土壌の断熱材として25cmの発泡スチロールを利用(上部のみ)	畜熱土壌の断熱材として25cmの発泡スチロールを利用(上部及び周囲)	・畜熱土の上部と周囲に断熱材として25cmの発泡スチロールを利用 2時間で12cmの降雪にも対応した	熱源施設にとっては、熱効率を高めることが省エネ化を図る上で最も重要である。

参考文献３３）及び３８）～４０）より作成

(2) 太陽光発電

太陽光発電を融雪に利用している例は実用化されていない。参考として、光発電システムを道路施設に利用した事例を示す。

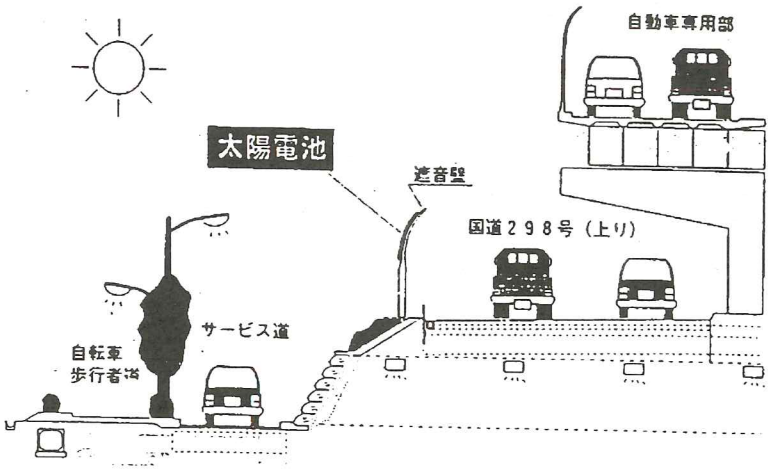


図-2.11 太陽光発電利用の道路施設の事例[41)]

表 2.10 太陽光発電利用の事例

主熱源			太陽光発電	太陽光発電
補助熱源				
用途			道路照明	融雪
施設名称			太陽エネルギー活用道路照明	八戸地方における融雪
実施主体			遮音壁を利用した太陽光発電	理論
実施場所			建設省北首都国道工事事務所	八戸工業大学
実施時期			1995年	1996年
施設概要			ソーラーシステムを遮音壁一体に設置し、道路照明に利用。	太陽光発電の電力により、融雪施設を利用
実用化段階			試験施工	計画
採熱部	熱源		遮音壁に直接に太陽電池を布設	遮音壁に直接に太陽電池を布設
	温度	最低		
		平均		
		最高		
	方法種別		太陽電池、インバータ	
	装置数		太陽電池 150枚(インバータ 10kW) 設置面積100㎡	太陽電池 150枚(インバータ 10kW) 設置面積100㎡
	寸法		L40m×H2.5m	
	能力		最大1300kWh(1月)最少 300kWh(6月)	太陽光発電効率:1㎡あたり50W
熱移送	方法・媒体		電力として移送	
	距離			
	保温		なし	
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		なし	
	熱交換パイプ		なし	
	蓄熱量		なし	
備考			遮音壁の有効利用として壁面に太陽電池を設置遮音壁と一体感のある取付け構造とし、景観に考慮	冬期間、積雪寒冷地方では、曇空が多く、なかなか日が射すことがない。しかし、太平洋岸では概して、日の照る地域が見られる。

参考文献４１、４２）より作成

(3) 太陽熱蓄熱型浅層地中熱利用融雪施設

夏期に豊富に得られる太陽の熱エネルギーと、熱伝導率が小さく熱拡散が遅い土の熱学的特性を利用したもの。夏期に舗装版を集熱器として太陽熱を集め、循環水によりその熱を地中に輸送して蓄熱する。太陽エネルギーを蓄積する場合、舗装から蓄熱槽に蓄える場合の効率と、蓄熱した後に利用するまでの間に自然放熱する損失の２つの因子を考慮する必要がある。

① 舗装版から蓄熱槽に蓄える場合の効率

$$\text{蓄熱効率}（\eta）= \frac{\text{蓄熱量}}{\text{舗装に供給された太陽エネルギー量の積}}$$

② 蓄熱時の自然放熱量Q

融雪可能蓄熱量＝蓄熱終了時の蓄熱量－(運転終了時～冬期の自然放熱量Q)

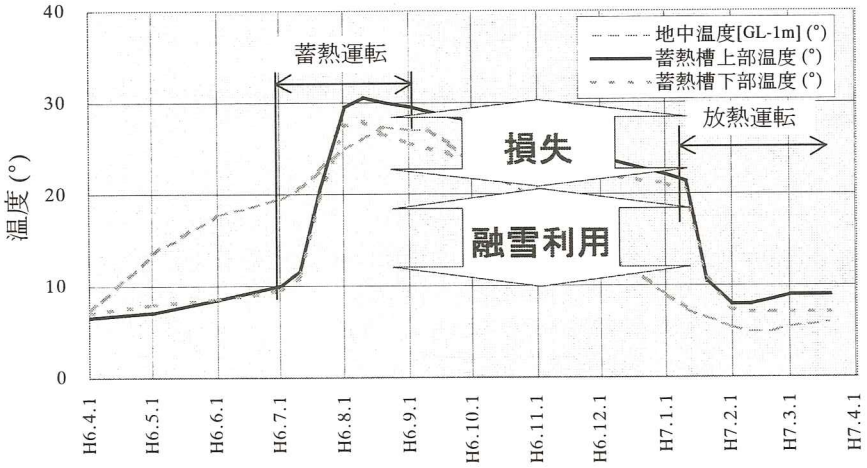


図-2.12 蓄熱効果の計測事例[43)]
(北陸地方建設局 国道８号曾地チェーンベース)

(4) 太陽電池による発電

太陽電池の発電効率は、現在約１０％程度である。

したがって、

発電量＝日射エネルギー（冬期の平均）×太陽電池面積×変換効率（１０％）

として算出可能である。

2) 可能取得量

一般国道８号の新潟県柏崎市曽時チェーン脱着場所の事例を用いて、取得可能量について分析する。

この事例では、７月の上旬から約２ヶ月間蓄熱運転を行っている。蓄熱部温度がピークになるまでの期間は約１ヶ月程度であり、夏期に蓄熱部の温度は平均27.5℃まで上昇、その後、降雪直前で22℃程度となっている。以下、エネルギー効率の試算を行う。

① 舗装盤から蓄熱層に蓄える場合の効率

当システムでは、最大蓄熱量は１５４．９ＧＪを７月の１ヶ月間で蓄積している。このことから、舗装版から蓄熱槽に蓄える場合の効率は次式により算出される。

$$\text{蓄熱効率}（\eta）= \frac{\text{蓄熱量}}{\text{舗装に対する太陽エネルギー量(=日射量×舗装面積×日数)}}$$

$$= 3700 \times 10^4 \div (4.01 \times 10^3 \times 600 \times 30)$$
$$= 51\%$$

ここで

蓄熱量：１５４．９ＧＪ

日射量：７月における北陸地域の太陽エネルギーの１日あたり日射量平均値は１７ＭＪ／㎡

対象舗装面積：６００㎡

日数：３０日（蓄熱のピーク熱量に達するまでに必要な日数）

②蓄熱時の自然放熱量Q

図-2.12 の事例では、下図に示したように、蓄熱したエネルギーの４２％が利用までに自然放出されている。

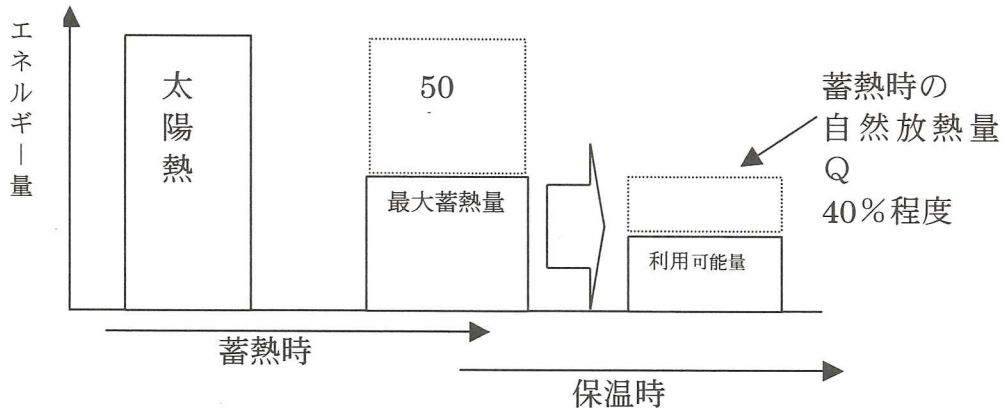


図-2.13　太陽熱を用いた蓄熱システムのエネルギー効率の概念図

3) 利用可能熱量の原単位

太陽エネルギーの日当たり日射量の月平均値は、表-2.10 に示すようになっている。これらが全て利用できるわけではなく、利用方法によって、利用可能エネルギー量は異なってくる。

(1) 太陽熱蓄熱型浅層地中熱利用融雪施設

２）の結果から、冬期における取得可能な原単位を次のように設定する。

- 蓄熱する量を１ヶ月の日射量と同じ量として設定する。
- 舗装版で取得した日射量のうち蓄積可能なエネルギー量を５０％と設定する。
- 融雪運転するまでに自然放出される量を４０％とする。
- 蓄熱した熱については、冬季の５ヶ月間（＝150 日）間で連続して放熱することとする。

(2) 太陽電池による発電

表-2.11　太陽エネルギーの日積算量の実績[44)]

県名	地域名	地点名	地点別の全天日射量の日積算量の月別平均値(MJ/m²)												
			1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	最大月
北海道	札幌市	札幌	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	函館市	函館	6.5	9.3	12.5	15.1	17.3	17.0	15.7	14.4	12.0	9.8	6.2	5.0	17.3
	小樽市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	旭川市	旭川	5.5	8.7	12.7	14.8	17.2	18.3	17.7	15.2	12.3	8.4	5.0	4.3	18.3
	室蘭市	(函館)	6.5	9.3	12.5	15.1	17.3	17.0	15.7	14.4	12.0	9.8	6.2	5.0	17.3
	釧路市	(根室)	7.2	10.7	14.3	15.8	17.7	17.3	16.4	14.9	12.8	10.3	7.0	5.7	17.7
	帯広市	帯広	7.6	11.2	14.9	16.7	18.3	16.7	15.1	14.0	12.3	10.5	7.2	6.1	18.3
	北見市	(北見枝幸)	4.5	8.8	12.6	16.6	14.2	15.4	12.5	14.7	11.9	8.4	5.2	3.8	16.6
	苫小牧市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	江別市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
青森県	青森市	青森	5.4	8.0	12.1	15.3	17.9	18.4	17.4	16.5	13.1	9.9	5.8	4.3	18.4
	八戸市	八戸	7.7	10.2	12.6	15.9	15.5	16.4	16.1	16.6	13.4	10.8	7.1	6.5	16.6
	弘前市	(青森)	5.4	8.0	12.1	15.3	17.9	18.4	17.4	16.5	13.1	9.9	5.8	4.3	18.4
岩手県	盛岡市	盛岡	7.1	9.8	12.9	15.1	17.4	16.3	15.4	15.0	11.6	9.7	6.7	5.5	17.4
秋田県	秋田市	秋田	4.7	7.4	11.7	15.2	17.1	17.6	16.7	17.1	13.1	10.0	5.8	3.9	17.6
山形県	山形市	山形	7.0	11.0	13.0	15.8	18.7	15.4	16.1	17.6	13.5	10.7	6.3	6.3	18.7
	鶴岡市	(山形)	7.0	11.0	13.0	15.8	18.7	15.4	16.1	17.6	13.5	10.7	6.3	6.3	18.7
	酒田市	酒田	4.7	8.3	10.6	16.1	17.1	15	16.3	19.7	14.4	11.4	5.1	4.3	19.7
新潟県	新潟市	新潟	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
	長岡市	(新潟)	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
	上越市	(新潟)	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
富山県	富山市	富山	6.2	9.1	11.7	17.5	19.0	16.0	18.4	18.8	13.2	11.9	5.5	5.6	19.0
	高岡市	(富山)	6.2	9.1	11.7	17.5	19.0	16.0	18.4	18.8	13.2	11.9	5.5	5.6	19.0
石川県	金沢市	(輪島)	4.3	6.5	11.3	16.2	18.7	17.2	17.1	17.6	12.8	10.4	6.2	4.1	18.7
	小松市	(輪島)	4.3	6.5	11.3	16.2	18.7	17.2	17.1	17.6	12.8	10.4	6.2	4.1	18.7
福井県	福井市	福井	5.9	8.1	11.5	15.3	17.9	16.2	16.5	17.2	12.9	10.5	7.2	5.3	17.9
長野県	長野市	(松本)	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
	松本市	松本	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
	上田市	(松本)	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
鳥取県	鳥取市	(米子)	6.4	8.3	11.2	17.9	19.7	15	19.2	18.9	15.5	11.9	6.9	6.8	19.7
島根県	松江市	(米子)	6.4	8.3	11.2	17.9	19.7	15	19.2	18.9	15.5	11.9	6.9	6.8	19.7

出所)理科年表
地点名の(　)内は一致する都市がなかったため近い町のデータで代用

発電量＝日射エネルギー（冬期の平均）×太陽電池面積×変換効率（１０％）
として算出できる。ただし、実績や道路の遮音壁の状況等から、太陽電池の設置方法としては、車道に沿って２ｍの太陽電池を設置することが現実的である。

4) 導入上の課題

太陽蓄熱システムは、比較的高い温度が獲得可能であり、降雪強度は２cm/ｈ以上でも対応可能である。しかし、気象条件が厳しい地域では特にイニシャルコストが他の融雪工法に比べて高くなることから、現状システムで経済性等を考慮すると、設計降雪強度が 3cm/h までの地域を適用範囲とすることが望ましい。

蓄熱槽からの放熱は比較的少ない。すなわち、図-2.11 によれば、ほぼ一定の勾配で温度が低下しており、16 週間で４０％のロスがあることから、１週間では 3%弱の放熱にとどまっていることになる。蓄熱槽は、長期間ではエネルギーロスが大きくなるが、比較的簡単な断熱であっても、短期間であれば、有効な蓄熱が可能である。

今後、普及拡大を図るためには、イニシャルコストの削減や、蓄熱槽における自然放熱量を減少するために、断熱構造の改良が課題となる。都市部においては、小面積での

建設技術が必要になる。また、配管の切り替えによって、夏期の蓄熱に、冬期間の熱補給を組み合わせることによって、全体的な効率を向上することも検討に値する。

2.5 河川エネルギー

1)施設の概要

温暖な地域においては、河川水を地域冷暖房熱源として利用する例が多数存在する。積雪地域においても、ヒートポンプを併用して河川水より熱を回収している事例が、富山県に1例ある。これは、いたち川を利用した地域冷暖房であり、河川エネルギーをヒートポンプによって、効率よく熱を回収または放出して温水、冷水をつくり地域導管を通して供給している。

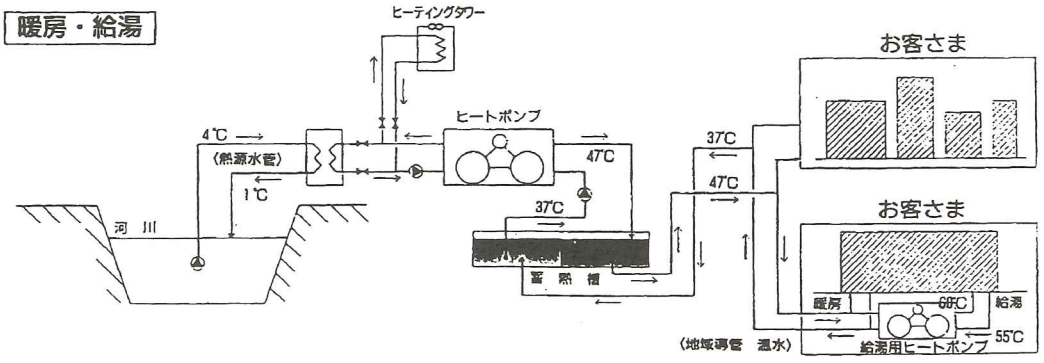


図-2.14　河川水エネルギーの利用例（富山駅北地区熱供給施設）[45)]

表-2.12　河川水を利用したエネルギー利用の事例[45)]

主熱源			河川水
補助熱源			
用途			地域冷暖房
施設名称			富山駅北地区熱供給施設
実施主体			北陸アーバン株式会社
実施場所			富山駅北地区
実施時期			1996年
施設概要			河川利用温度差　3℃（4℃の河川水を熱源としてお湯（37→47℃）を製造し、1℃の水を河川に戻している。）
実用化段階			実用化
採熱部	熱源		河川水(いたち川)(取水量:Aプラント0.22m³/s、Bプラント0.090.22m³/s)
	温度	最低	
		平均	4℃
		最高	
	方法種別		給湯昇用ヒートポンプ (4℃の河川水から3℃の温度差分熱採取)
	装置数		Aプラント:2300㎡、1台、Bプラント:300RT/1台
	寸法		
	能力		Aプラント0.35W、Bプラント:0.78Gcal/h
熱移送	方法・媒体		河川水
	距離		
	保温		なし
蓄熱槽	蓄熱材・寸法・体積		2960m³と1460m³の蓄熱槽を設置
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ		
	蓄熱量		
放熱部	放熱場所		地域冷暖房施設
気象条件			
効果			空気熱源と比較して10%、石油熱源と比較して22%の省エネ効果がある。
課題			
備考			河川水を活用した熱供給事業としては日本海側で初めてである

2) 原理[49)]

河川水が保有する熱量のうち利用できるエネルギー量は、ヒートポンプ等により河川水から吸熱したり、河川水に放熱するエネルギー量になる。従って、河川水が保有するエネルギー賦存量は、河川水の利用温度差と流量によって決定され、次式により求めることができる。

ただし、河川水との熱交換器部分で凍結が起こると、熱効率が大きく低下するため、凍結させない範囲での利用になる。さらに、大量の河川水全てにわたって利用することも困難である。なお、河川水の温度低下は、場合によっては河川の生態系に影響する場合があり、十分な検討が必要である。

$$E = \Delta t \times V \times C - Qh$$

ここに、
- E： 取得可能量 〔GJ〕
- Δt：河川水の利用温度差（3～5℃） 〔℃〕
- V： 河川流量 〔m^3／h〕
- C： 河川水の比熱 〔GJ／m^3・C〕
- Qh：ヒートポンプで投入した熱量 〔MW〕

3) 利用可能熱量の原単位

富山駅北地区における熱供給施設の実績記録より、河川水から回収したエネルギー量（Q）は、次のようになっている。

$$Q = \Delta t \times \Delta V \times C$$
$$= 3 \times 792 \times 0.004$$
$$= 9.504 \text{〔GJ／h〕}$$

ここに、
- t：河川水の利用温度差 3 〔℃〕
- ΔV：取得した流量 792 〔m^3／h〕
- C：比熱 0.004 〔GJ／m^3・℃〕

また、ヒートポンプの運転のために、Qh=0.35〔MW〕を投入して、37℃の温水を製造している。

以上により、当該の地域冷暖房システムでは、冬季に河川水より正味 2.4（＝2.38－0.3） MWの熱量を獲得している計算となり、ヒートポンプの性能 COP＝7.9（＝2.38÷0.3）となっている。

この実績に基づき、調査対象とした都市を流れる一級河川水について、利用可能熱量の原単位の試算を行う。ここでの試算の前提条件は、次の通りである。

－エネルギー取得する河川水の量は、冬季の流量平均の１％とする。
－利用する河川水の温度差は、富山駅北地区の熱供給施設と同様に 3℃とする。
－ヒートポンプの性能を 7.9 とし、この投入熱量は除外する。

すなわち、取得可能量は、

$$E = \Delta t \times \Delta V \times C - Qh$$
$$= 3 \times 0.01 \times V \times 0.004 \left(1 - 1/7.9\right)$$
$$= 10.48 \times 10^{-5} V \text{〔MW〕}$$

となる。ただし、V〔m^3／h〕は利用水量である。

4) 導入上の課題

河川水を熱源とするためには、十分な利用温度差を確保可能であることが必要となる。北海道など気候が厳しい地域における河川では、水温が低い場合もあるため、十分な調査が必要である。また、技術的には、現状の技術でほぼ対応可能であるが河川水利用に関する技術開発要素として、以下のような項目が挙げられる。

- ヒートポンプ効率の向上
- 泥、ゴミの除去技術の改善
- 設備の腐食対策技術の向上
- 河川生物付着対策技術の向上
- 河川の生態系への影響回避又は低減

2.6 風力エネルギー

1) 施設の概要

風力発電が消融雪設備に導入された事例としては、猪苗代町の国道49号線のフィールド試験例がある。その他、日本における風力エネルギーの開発は、昭和53年以降、主として通産省のサンシャイン計画（平成５年以降はニューサンシャイン計画）において、風力発電システムの技術開発を進められてきた。昭和56年度から61年度まで三宅島において100kW級風力発電プラントの研究を実施し、さらに、平成２年度から大型風力発電システムの技術開発として図-2.15に示すような開発が検討されている。

我が国の導入実績は、平成９年度６月末時点で約15,000kWとなっている。そのほとんどは、国（NEDO）、電力会社または地方自治体が試験研究用または風力利用のデモンストレーションとして設置したものである。



図-2.15 日本における風力発電施設の主要実績及び計画[47)]

表-2.13　風力エネルギー利用の事例

主熱源			風力発電	風力発電	風力発電
補助熱源					ディーゼル発電
用途			ロードヒーティング	道路維持管理用電源（LED発光矢羽根）	独立電源
施設名称			国道49号 風力発電	省エネルギー型道路維持管理	八丈島風力発電システム
実施主体			東北地建郡山国道工事事務所	北海道開発局	八丈町
実施場所			猪苗代町中山トンネル付近	北海道	八丈富士公共育成牧場
実施時期			1999年	1998年	1997年
施設概要			猪苗代町付近で発生するブリザードと呼ばれる冬期間の地吹雪や、強風を電気エネルギーに変えることでロードヒーティング（消融雪設備）に利用する	風力発電機で充電された電力を利用したLED自発光矢羽根	風力発電システムは定格風速12.5m/s 4台で最大出力20kw、バッテリー充電およびディーゼル発電機によって複合化
実用化段階			フィールド試験	調査	試験
採熱部	熱源		プロペラ式発電機	風車	風車
	温度	最低			
		平均			
		最高			
	方法種別		プロペラ式（3枚羽根）風力発電	風車（3枚翼、アップウインド型）発電機	風車（2枚翼、アップウインド型）発電機
	装置数		1基	10基	4基
	寸法		プロペラ径29.7m プロペラ中心高31.5m	ロータ直径　1.14m	ロータ直径　5m、タワー9m
	能力		定格出力250kW、定格発電風速15.5m/s	定格出力300W(風速12.5m/s、起動風速3m/s)	定格出力5kW／基（風速12.5m/s、起動風速4.5m/s）、耐風速　60m/s
熱移送	方法･媒体		電力として移送	電力として移送	電力として移送
	距離				
	保温		なし	なし	なし
蓄熱槽	蓄熱材･寸法･体積		路盤ならびに路側蓄熱	なし	なし
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ			なし	なし
	蓄熱量			なし	なし
放熱部	放熱場所		車道（160m）		
	舗装		電熱方式（電熱ﾋｰﾃｨﾝｸﾞ）と蓄熱方式（路盤蓄熱、路側蓄熱）の3種類		
	放熱面積				
	放熱装置		6.5kW×32枚		
	放熱温度				
	放熱能力		年間推定発電量 約700MW		
風速			年平均5m／s		
効果			・年間推定発電量約700MW（設備稼動率32%）（ロードヒーティング130MWh/年、その他580MWh/年） ・冬期の91%融雪、（蓄熱により99%可能）	・年間推定発電量約700MW（設備稼動率32%）（ロードヒーティング130MWh/年、その他580MWh/年） ・冬期の91%融雪、（蓄熱により99%可能）	起動風速3m/s 発電コスト10円／kWh
課題			風切り音55dB程度の低減 無風状態での凍結防止対策	風切り音55dB程度の低減 無風状態での凍結防止対策	導入当初、風車振動、発電出力、機械的取付部等の問題発生。修理、復旧後、良好。 動的変動荷重を配慮した設計が必要
備考			・電熱方式は、供給開始後、立ち上がりが早いが、充分な蓄熱で同等性能 ・停止後、電熱方式は約2時間で融雪効果低下（蓄熱方式は約15～18時間） ・年間蓄熱を行えば、設備利用率は100%可能だが、電熱式が有利 ・電熱は、制御が簡単で、融雪設備及び舗装費の双方において有利	・電熱方式は、供給開始後、立ち上がりが早いが、充分な蓄熱で同等性能 ・停止後、電熱方式は約2時間で融雪効果低下（蓄熱方式は約15～18時間） ・年間蓄熱を行えば、設備利用率は100%可能だが、電熱式が有利 ・電熱は、制御が簡単で、融雪設備及び舗装費の双方において有利	数年前まで風力発電のコストは18円以上 利用可能な風況の良い場所が限定される

参考文献４８）～５０）より作成

2)風力エネルギーの分布

日本国内における風力エネルギーの賦存量については、1980～1981 年に通産省資源エネルギー庁が各都道府県を通じて基礎調査を行っている。図-2.16 は、その調査結果を元に都道府県別に地図上に表したもので、円の大きさは期待量を示す。

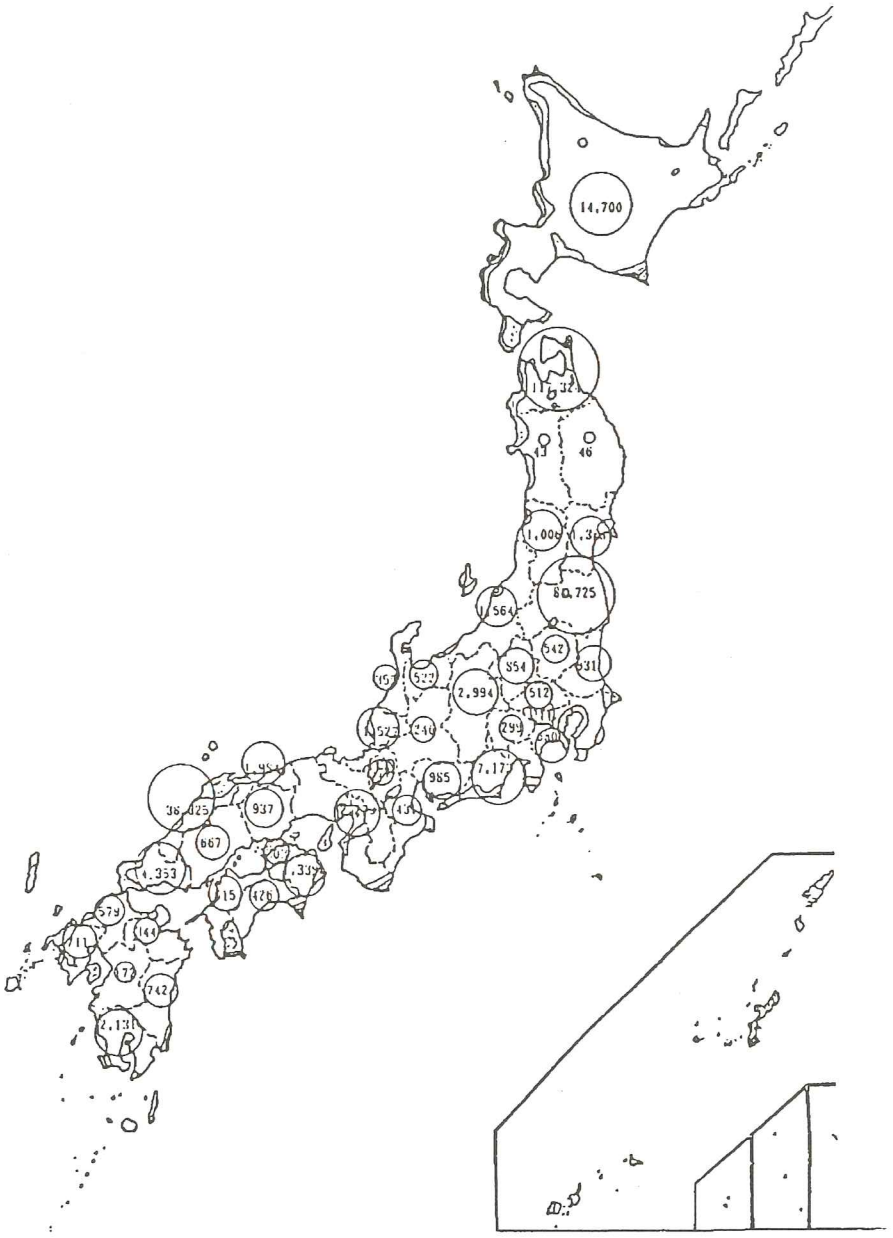


図-2.16　都道府県別風力エネルギー賦存量（単位：１０Gcal／年）[46)]

また、風力発電は平均風速が 5m/s 程度以上ないと効率が悪くなるといわれている。そこで、図-2.17 に示す国内の年平均風速の分布図によれば、エネルギー期待量の大小と有望風況地点とは必ずしも一致していない。国内では、年間平均風速が 4m/s(地上10m)を超える強風地域はさほど多くなく、鹿児島県南部、四国西部、伊豆半島南部および北海道西部などが比較的平均風速が高い有望風況地点と推測される。融雪として風力を利用する場合、風況の良い場所に限定される。

本調査では、冬季における平均風力が５m以上の都市を対象として、導入可能性量について試算する。

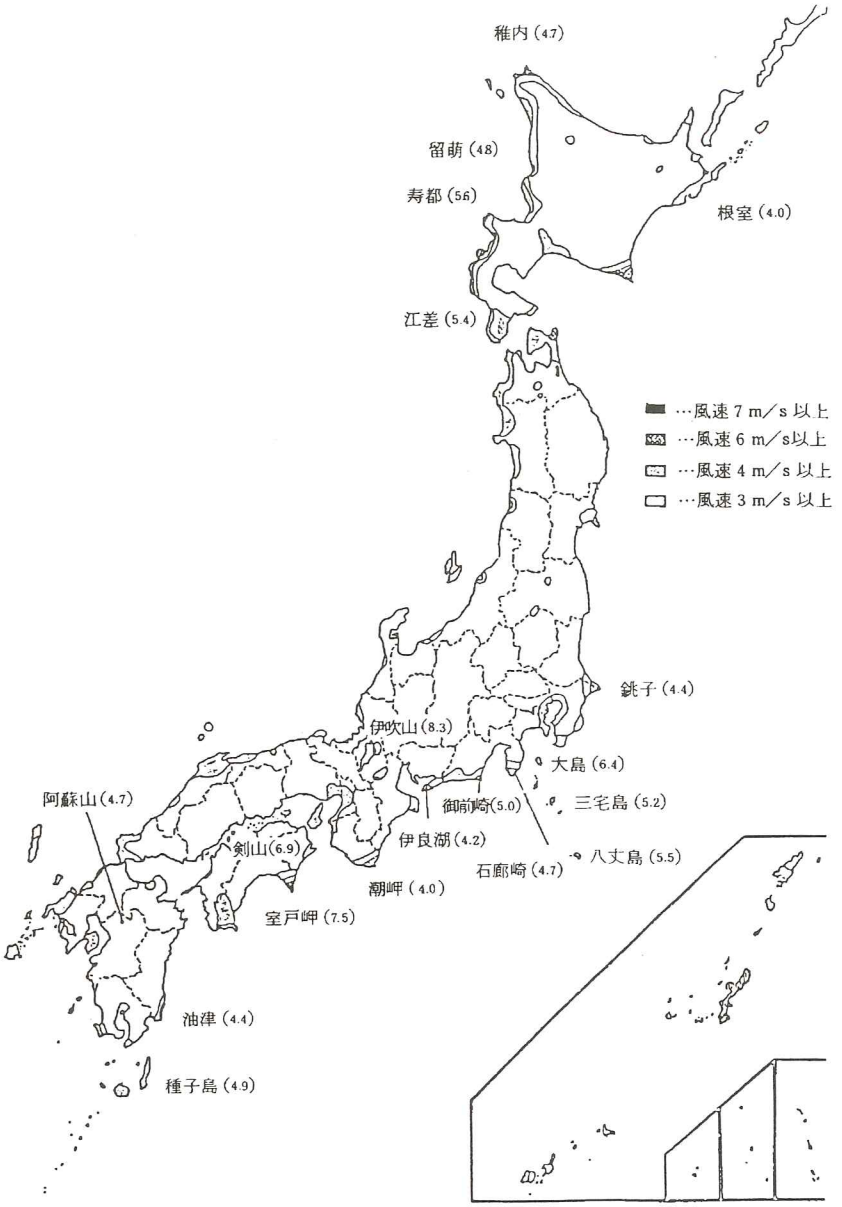


図-2.17　国内の年平均風速（地上１０m）分布[46)]

3)利用可能量の原単位

道路融雪に利用した例が少ないことから、猪苗代町の国道 49 号での導入実績データから、原単位を設定する。

・図-2.18 の風車１台、１月あたり 59,814kWh の発電が可能（平均風速 5.1m/s）

・１日あたり 1,994 kWh　＝　1.7146（Gcal/日）

＝　83（kW）

・製作メーカ　NORDEX（ドイツ）
・定格出力　250kW
・定格発電風速　15.5m/s
・年間推定発電量　約700MW（設備稼働率32%）
・発電電圧　415V
・相数　3相
・系統連系　有（電力会社配電線）
・発電機形式　誘導発電機
・起動方式　ソフトスタート
・定格回転数　39.5RPM
・定格風速　15.5m/s
・100m地点の騒音　50.6dB（風速8m/s時）
・カットイン風速　3m/s
・カットアウト風速　25m/s

表 2.14 月別風力発電量[49, 51]

風量調査月	平均風速(m/s)	発電電力量(kWh)	設備利用率(%)
1	7.2	102,423	55.1
2	6.2	76,178	45.3
3	6.7	88,633	47.7
4	6.2	84,859	47.1
5	5.4	68,588	36.9
6	4.4	44,728	24.8
7	3.8	35,370	19.0
8	3.6	28,843	15.5
9	3.1	23,636	13.1
10	3.5	34,696	18.7
11	5.6	70,527	39.2
12	4.9	59,283	31.9
計	60.6	717,764	—
平均	5.1	59,814	32.8

(注)　設備利用率 = 発電電力量÷最大発電電力量×100(%)

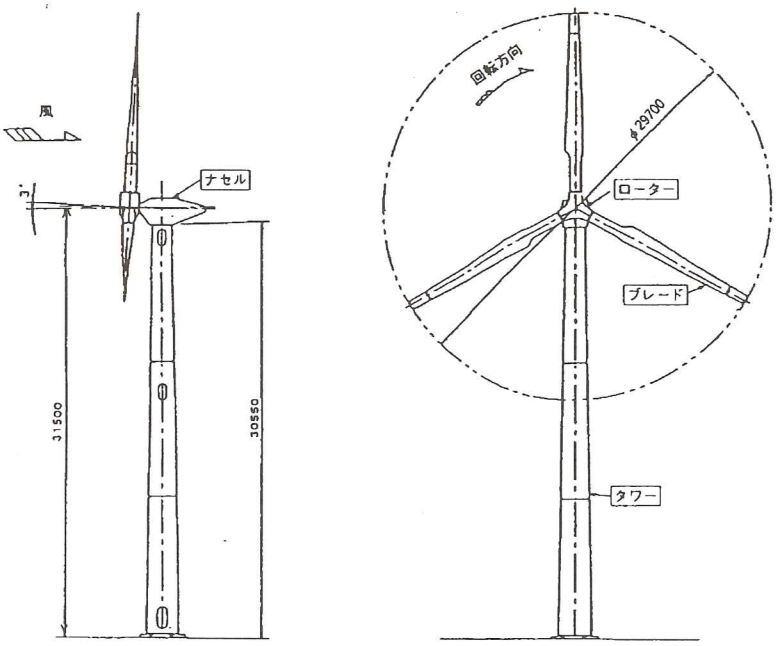


図-2.18 猪苗代湖での風力発電施設[48]

4)導入上の課題[52]

(1) 風況、気象条件の特殊性

日本は山国であり、下記のような理由から、導入地域はある程度限定される。

・大気の乱れが欧米より大きい
・台風による暴風が多い
・コストが立地地点の風況に依存する
・有望立地地点と居住地域が隣接場合、導入においてはシステムの信頼性・耐久性の向上、低騒音化等の技術開発が必要である。

(2) 信頼性の向上と発電コストの低減化

中・小型機は、商用化されてきているが、ピッチ角制御不良、ヨー旋回装置不良といった各種の故障等信頼性に課題がある。信頼性、耐久性、保守性等に係る要素技術の開発とともに、コスト低減のため、大型機の開発（土地利用効率の向上と保守運転費の低減）、タワーの軽量化等の技術開発を行うことが重要である。風力発電の課題としては、以下の項目が挙げられている。

- 風の可変性に柔軟に対応できる機能を備えること。
  - ✓ 自動偏向装置、旋回速度抑制装置など
- 低い風速でも効率良く発電すること。
  - ✓ 地域用途に合わせた軽量機の開発
- 居住区地域近郊での住民への十分な配慮。
  - ✓ 回転翼、ギヤ、軸系からの騒音
  - ✓ 鳥獣保護に対する配慮は翼の設計、機器設計
- 風車の回転数限界は抑え気味にして強風時の安全性を高めること。
  - ✓ 突風発生率が高い日本では限界風速を抑え危険な運転回避（振動騒音抑制）が要求される

2.7 ごみ焼却場の廃熱

1) 施設の概要

清掃工場のごみ焼却余熱の利用は、発電、温水プールなど種々の分野で実用化されている。ごみの焼却による排ガスは、900℃程度と温度が高いことから熱利用は容易で、かつ設備の定期検査時期を除いて安定供給されるという特長を有しており、エネルギー利用の面から質の高い未利用エネルギーといえる。

清掃工場の廃熱は、今回検討しようとした熱源の中でもっとも高温である。融雪に利用する上では、温度を低下させる必要がある。また、高温のままでは蓄熱の際のロスも大きくなると予想される。しかし、発電すれば、熱のままで移送するよりも効率的に遠方まで輸送でき、融雪への利用方法の自由度が高くなる利点がある。

焼却余熱を利用して消融雪を行った実績として、札幌市で平成6年度に稼働した発寒融雪槽がある。この設備は冬季に流入する雨水がない雨水調整池を融雪槽として利用し、熱源として最寄りの発寒清掃工場からの余熱を利用している。また、産業廃棄物の焼却余熱を利用して、消融雪を行う動きもある。しかし技術的にまだ研究段階である。

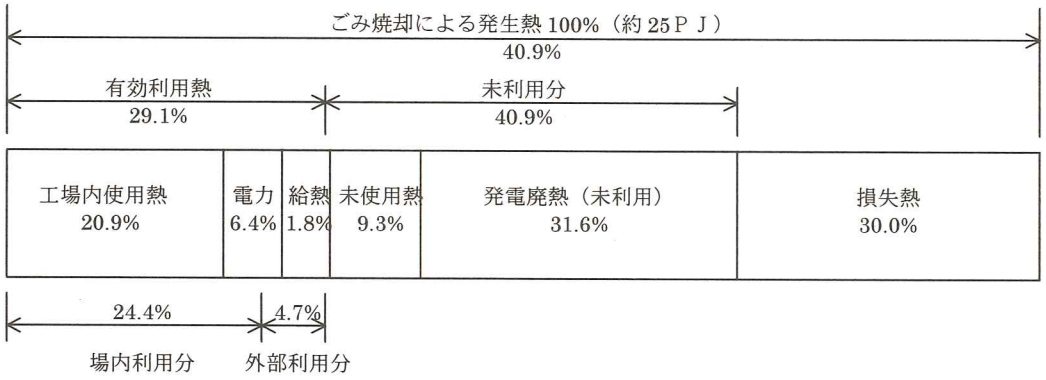


図-2.19 ゴミ焼却場の廃熱利用状況(東京都の 13 工場平均、平成 2 年)[53)]

表-2.15　ゴミ焼却場の廃熱エネルギー利用の事例

主熱源			廃棄物処理施設	廃棄物処理施設
補助熱源				
用途			融雪(運搬投入)	融雪(運搬投入)
施設名称			発寒融雪槽	廃棄物燃焼熱融雪システム
実施主体			札幌市下水道局建設部	資源エネルギー活用事業協同組合
実施場所			札幌市西区発寒14条14丁目	旭川市
実施時期			1994年	1998年
施設概要			余熱発電後の蒸気(133℃)を用いて、熱交換器により40℃程度の温水にして、発寒雨水調整池を利用して融雪する(ダンプトラックによる直接投雪)	小型乗用車廃タイヤ400本/回又は廃プラスチック類5000kg/回等1,500kg/日(10m³の炉)で燃焼させ廃熱利用
実用化段階			実用化	試験
採熱部	熱源		発寒清掃工場	廃棄物処理工場
	温度	最低		
		平均	133℃	
		最高		
	方法種別		熱交換器を用いて40℃の温水を製造	廃棄物のガス化燃焼装置の冷却熱を消融雪の熱源として利用
	装置数		1基	1基
	寸法		1,900m³(W14m×L17m×D8m)×1池 投雪口 ： 3投雪口	W3.5×L6.0×D3.5m
	能力		利用可能熱量5.8MW	1.27MW
熱移送	方法･媒体		熱交換器／温水	温水
	距離			
	保温		なし	なし
蓄熱槽	蓄熱材･寸法･体積		なし	なし
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ		なし	なし
	蓄熱量		なし	なし
放熱部	放熱場所		融雪槽	融雪槽
	舗装			
	放熱面積			
	放熱装置		約40℃に加温した水を水槽内に噴射し融雪する	温水を融雪槽の中に混合して融雪
	放熱温度		40℃	
	放熱能力		132,000m³/年 (2,200m³/日×運転日数60日)	350～1,000m³/日
気象条件	降雪強度		3.6cm/h(最大降雪深)	8.6cm/h(最大降雪深)
	気温	最低	-5.6℃	-11.0℃
		平均	-2.5℃	-6.7℃
		最高	0.2℃	2.8℃
	風速		2.6m/S	1.9m/S
効果			雪堆積場不足の解決に貢献	小規模雪堆積場にプラント設置し、地域分散処理により、除排雪ダンプカーの移動距離短縮、燃料費節約、渋滞回避
課題				
備考			合施設として、夏季は雨水調整池、冬季は融雪槽として利用するものである	厚生省通達のダイオキシン排出規制値を下回ったことにより、実用化のめど 今後小型化を進め、2000年の事業化 旭川市は、自然エネルギーやリサイクルエネルギーの活用方法を提言した

参考文献６），７），５４），５５）より作成

2) 利用可能熱量の原単位

利用可能熱量の算出にあたって、実績より平均的な基礎数値を設定する。すなわち、

- ごみの焼却熱には、幅が存在するが、ここでは平均値である 9.6MJ/kg とする。
- ごみ１ｔを燃焼することにより得られる熱量は、

  9.6MJ/kg　×　1000kg　＝　9.6Gcal／ｔ
- ごみ焼却場においては、発電や熱損失により、余熱として利用できる量は、全体の 40％程度である。

とする。従って、利用可能熱量（Q）は、

Q＝日平均ごみ処理量（ｔ／日）×9.6（GJ／ｔ）×40％

＝日平均ごみ処理量（ｔ／日）×3.84（ＧＪ／ｔ）

となる。よって、日当たり利用可能熱量Ｑ（ｋＷ）は、

Q(kW)＝日平均ごみ処理量（ｔ／日）×44.574（kW/ｔ）

となる。

2.8 その他

その他としては、都市施設である地下鉄や近年都市部の地下に建設されている変電所の廃熱がある。

1) 地下鉄廃熱

(1) 施設の概要

1982 年に札幌市で地下鉄換気の排気を、ヒートポンプの熱源として利用し、駅舎の暖房とロードヒーティングを行ったのが最初の試みであり、その後同様のシステムは札幌市の数ヵ所で導入されている。比較的大規模な利用としては、1989 年に同じく札幌市において地下鉄の排熱を地域冷暖房の熱源として利用したシステムが導入された。

(2) 利用可能熱量の原単位

今回調査した結果、北海道電力より、札幌市の地下鉄排気塔における熱交換で得られる熱量として、表-2.15 のエネルギーが得られた。これによれば、駅舎の排気風量と温度より回収可能量を推計すると、地下鉄１・２号線（28 駅）合わせ 1.99 $\times 10^6$W（＝1.5$\times 10^4$ Gcal/年）と試算され、１駅当たり 7.1$\times 10^4$W（＝524Gcal/年）に相当する。

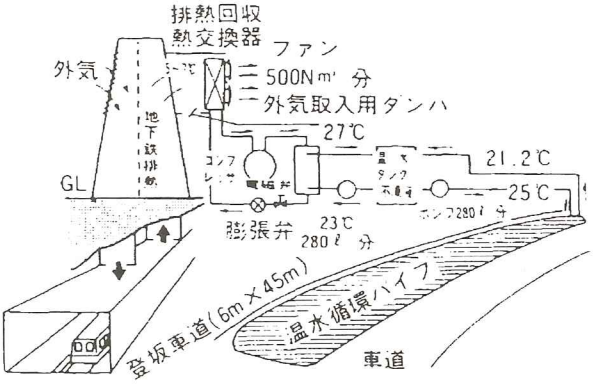


図-2.20　地下鉄廃熱利用の道路融雪システム[56)]

表-2.16　地下鉄から利用可能な熱量[56)]

			設定風量 (m^3／h)	回収可能風量(KW)
南北線	さっぽろ	北	90, 500	368
		南	41, 200	167
	計		131, 700	535
	大通	A	149, 400	607
		B	141, 100	573
		C	77, 300	314
		D	42, 300	172
	計		410, 100	1, 666
	すすきの		21, 600	87
	計		563, 400	2, 288
	さっぽろ	A･B	74, 000	300
	大通	A･B	113, 900	463
	すすきの	A･B	60, 500	245
	計		248, 400	1, 008
合計			811, 800	3, 296

表-2.17　地下鉄の廃熱エネルギー利用の事例[56)]

主熱源			地下鉄
補助熱源			なし
用途			ロードヒーティング
施設名称			札幌市道幌平橋通り(左岸)
実施主体			北海道電力
実施場所			札幌市道幌平橋通り(左岸)
実施時期			1987、88年
施設概要			排気塔から排出される地下鉄排熱を排熱回収熱交換器により回収し、温水タンクの不凍液をヒートポンプで加温する。
実用化段階			試験導入
採熱部	熱源		地下鉄の排熱
	温度	最低	
		平均	5～7℃
		最高	
	方法種別		地下鉄の排熱空気から熱交換器によりエネルギーを取得
	装置数		1基
	寸法		
	能力		3．3MJ
熱移送	方法･媒体		不凍液
	距離		
	保温		なし
蓄熱槽	蓄熱材･寸法･体積		なし
	熱交換ﾊﾟｲﾌﾟ		なし
	蓄熱量		
放熱部	放熱場所		登坂車道
	舗装		
	放熱面積		6m×45m＝270㎡
	放熱装置		温水循環パイプ(内径13mm)
	放熱温度		路面温度2.7℃
	放熱能力		
気象条件	降雪強度		2.5cm/h
	気温	最低	
		平均	
		最高	
	風速		
効果			路面表面温度の平均値は、2．7℃に制御され、効率的に凍結防止効果を計ることができた。

2)変電所

(1) 施設の概要[46)]

変電所の排熱を周辺ビルや地域冷暖房熱源として利用する事例は、表-2.18 に示すように、多数存在する。しかし現状のところ、消融雪の熱源として利用されている事例は存在していない。

表-2.18 変電所廃熱利用事例

施工者	施工場所	廃熱源	利用方法	施工面積
東京電力	新橋ビル 内幸町ビル	北新橋変電所 及び地中線 60MVA	・ビルの冷暖房 ・給湯 ・ヒートポンプ熱源	46,200m^2
東京電力	東電渋谷支社	北渋谷変電所	・ビルの冷暖房 ・給湯 ・ヒートポンプ熱源	
東京電力	新川地区	永代橋変電所 変圧器:275/66KV 300MVA×２台 分岐ﾘｱｸﾄﾙ:175KV 150MVA×２台	新川地区冷暖房熱源（一部）	
東京電力	銀座２、３丁目地区	銀座変電所 変圧器:22/6.6KV 10MVA×２台	銀座２、３丁目地区冷暖房熱源（一部）	
中部電力	電気文化会館	広小路変電所 変圧器:33/6.6KV 15/20MVA ×2 台	電気分科会館給湯用 (40～50℃)	
中部電力	ワシントンホテル長野	千歳町変電所 変圧器:77/6.6KV 20/26MVA ×2 台	ワシントンホテル給湯予熱用	
中部電力	壁変電所（屋外）	壁変電所 変圧器:77/6.6KV 20/26MVA ×2 台	構内道路の融雪用	

変電設備の効率は一般に 99.5～99.9％と非常に高いが、電気事業用の変圧器は、その容量および出力が大きいことから、トータルではかなりの変圧器損失（熱）が発生している。変圧器の内部温度が上昇すると絶縁劣化や絶縁破壊を起こすなど運転に支障を来すため、容量の大きい変圧器は、通常絶縁油を循環させて発熱を吸収し、この絶縁油を何らかの方法で冷却している。この絶縁油の冷却には空冷または水冷方式が採用されており、その排熱温度は、およそ 30～50℃程度である。

この変電所の排熱は、年間を通じて安定している（発電容量の 0.1～0.2％程度）ことから、消融雪設備の熱源に利用できる可能性が存在すると判断される。

(2) 利用可能熱量の原単位

設備容量の熱損失の実績データを以下に示す。熱損失として、0.15％の損失が発生している。

表-2.19 変電所の廃熱量[46)]

電　圧 (kV)	容　量 (MVA)	無負荷損 (kW)	負荷損 (kW)	全損失 (kW)	容量に対する損失 (%)
77/ 6.9	20	17	127.5	144.5	0.085～0.72
154/ 77	200	122.3	627.7	750	0.061～0.375
275/154	300	186	930	1116	0.062～0.372
500/275	1000/3	69	621	690	0.021～0.21

本調査では、表-2.19 の平均値である設備容量の 0.15％の熱を、変電所の損失により発生する利用可能エネルギー量とする。

Q（kW）＝電力容量（M KVA)×0.0015

3. 未利用エネルギーの特性

以上の実績に基づき、未利用エネルギーの熱源温度、利用可能量とこれらの年、日変動の状況等の特性について整理する。

3.1. 下水道

下水道の温度は、気温の変動と比較して年間を通じて安定しており、12～23℃の間で推移している。

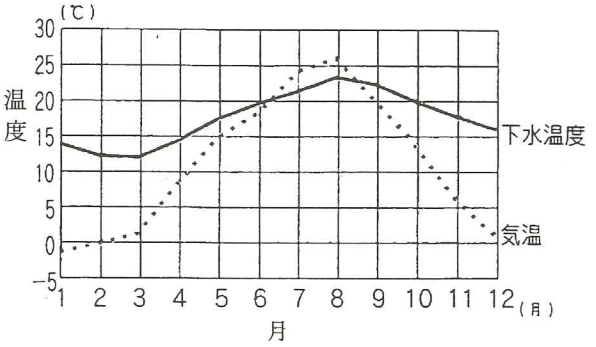


図-2.21 下水温度と気温の年変動の事例[45)]

冬期間は、日中の流量が増加し、温度が低下する傾向が見られる。これは、低温の融雪水が下水道に流入するためと考えられる。また、人の活動が低下する早朝に流量が最低になっている。この結果、１日単位での時間変化は、図-2.22 に示すように、早朝に最小となり、融雪水が流入しなくなる夕･夜間に最大となるが、その他の時間帯はほぼ一定の熱量が利用可能である。すなわち、

- 深夜から明け方にかけ流量が減少していき、日常の活動が活発となる昼間で増加する水量の変動が発生している。
- 日中においては、流量の上昇に伴って温度が 1.5℃程度低下し、この結果、利用可能熱量はほぼ横ばいになっている。

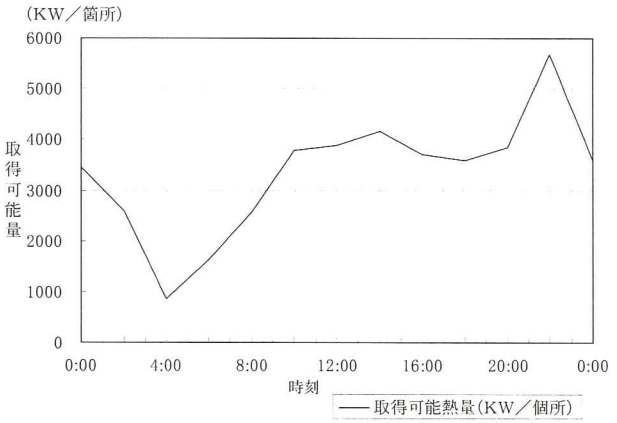


図-2.22　マンホール１箇所から取得可能なエネルギー量の日変動の例[4)]

3.2. 地熱

地熱温度は、10m以上の深さになると年間を通じて、温度が安定している特徴がある。このため安定熱源として、融雪用熱源として利用されている。ボーリング深さと温度との関係は、図-2.23 に示したように、深くなるほど地熱温度が高くなっている。

この熱分布は、地質の条件や、地下水脈の存在により、取得可能なエネルギー量は異なる。このような変化があるため、導入時には、事前調査を十分に実施することが必要である。

地熱温度には、表-2.20 に示すような地域特性があり、北海道地方では地熱温度が低くなっている。

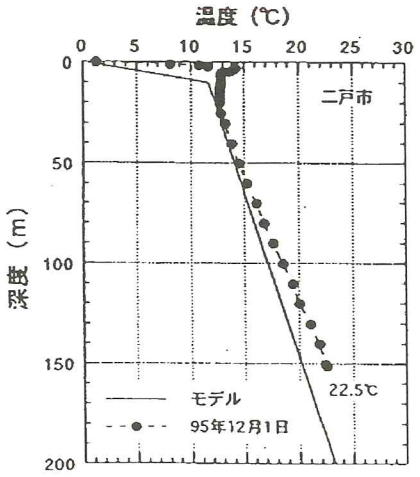


図-2.23 深度と地熱温殿関係[28)]

表-2.20 検討対象都市における地下水温度(地熱温度)[7)]

都道府県	市町村	地下水温度	採水深度	都道府県	市町村	地下水温度	採水深度
		℃	m			℃	m
北海道	釧路	10～12	20～250	新潟	新潟	15～18	70～150
〃	旭川	11～12	40～60	〃	長岡	15～18	70～150
〃	札幌	10～12	80～120	〃	高田	15～17	90～150
〃	函館	15～17	40～80	富山	富山	15～18	50～90
青森	青森	14～17	60～130	〃	高岡	15～18	50～100
〃	弘前	14～17	50～180	石川	金沢	15～16	50～160
秋田	秋田	16～19	80～120	福井	福井	17	90～95
山形	酒田	14～15	80～150	長野	松本	12～14	30
〃	山形	15～18	80～120	岐阜	岐阜	15～16	60～100
岩手	盛岡	15～17	50～90	滋賀	長浜	15～17	90～120
〃	一ノ関	15～18	50～100	京都	京都	16～17	30～80
宮城	古川	16～18	50～90	兵庫	尼崎	16～18	30～60
〃	仙台	14～18	30～100	鳥取	鳥取	17～18	30～50
福島	福島	15～16	50～90	山口	防府	16～18	60～90

〈出所〉新編防雪工学ハンドブック（(社）日本建設機械化協会）

3.3. 太陽

取得可能なエネルギー量は月により変化する。特に、冬と夏では、日射量の差が大きい。取得可能は日中に限られ、また融雪の熱が必要な降雪の場合、熱を直接利用することもできない。このため太陽エネルギーを利用する場合、蓄熱システムを導入することのメリットは極めて大きい。

太陽電池については、太陽光の入射方向に正対させることが最も効率的である。入射角度の変動に伴って、発電量が大きく変動する極地の調査結果[58]において、正対させる制御電力を考慮すると、垂直方向については固定し、水平方向について制御することが最も効率的である。我国においても、太陽電池を太陽に正対させる制御は顕著な効果をもたらさないと推定される。

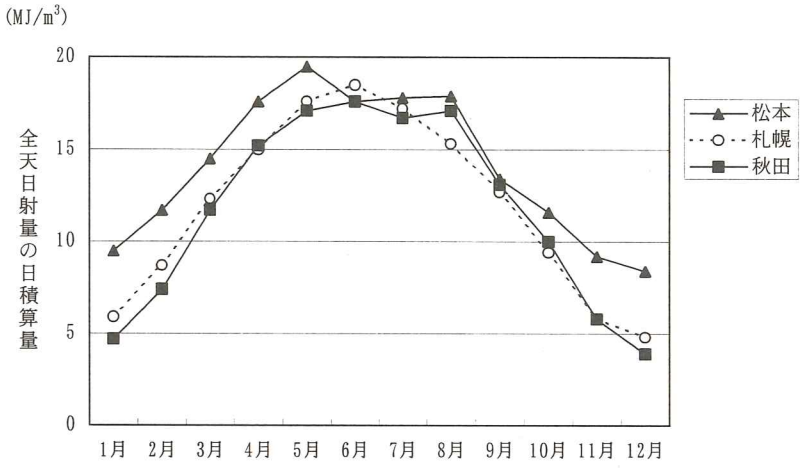


図-2.24　太陽エネルギー獲得可能量の年変動[44]

3.4. 河川

河川の水量についても、季節により差が見られる。特に雪解けの４月から５月には水量が多くなり、冬は減少する傾向が見られる。

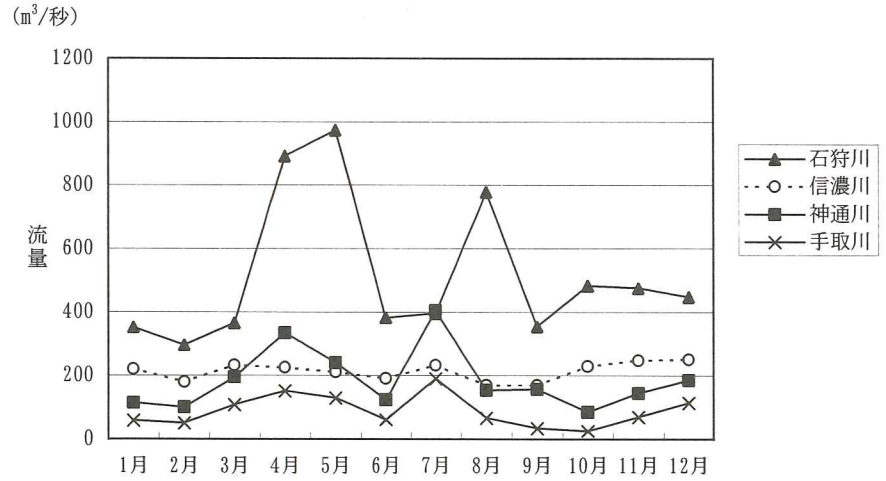


図-2.25　河川の水量の推移[57]

また、河川水の温度は地域によって大きく異なっており、北海道では凍結直前まで低下し、北陸地方でも5℃程度まで低下している。

表-2.21 河川水の温度の年変動[46)]

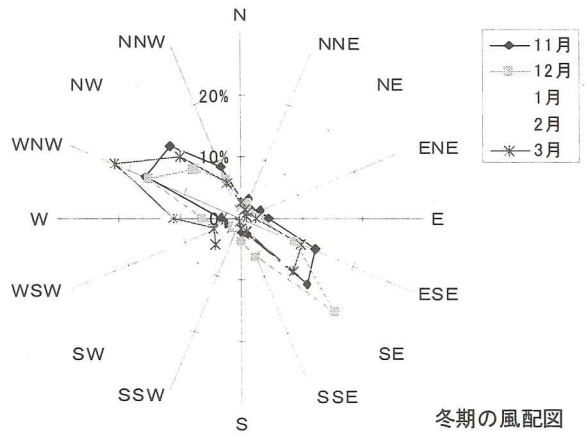
	河川名	1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月	
北海道	石狩川（石狩大橋）	0.1		0.2		0		—		8.6	9.1	16.0		17.0		21.2		21.0		11.0		5.8		2.0	
	石狩川（砂川橋）	0.6 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	—		7.8 8.9 12.0 11.0	9.1 6.1 13.0 10.0	17.0 15.7	17.5 15.0	18.5 17.5	19.5 17.0	21.2 19.8	21.7 17.6	19.0 18.0	19.0 16.5	10.2 10.6	10.6 9.6	4.7 4.2	5.0 3.5	1.9 0	1.9 0
	十勝川（幕広）	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	6.5 6.0	6.0 4.0	14.0 12.5	15.0 10.0	15.0 14.0	18.0 11.5	15.0 16.0	17.0 14.0	21.0 18.5	22.0 17.0	18.0 18.0	21.5 16.0	10.0 12.0	14.0 10.0	9.5 9.5	13.0 8.0	0.0 0.5	2.0 0.0
	天塩川（中川捕獲場）	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2.9 4.5	4.5 3.6	4.6 4.8	4.6 4.8	9.0 10.4	9.5 10.4	20.5 22.0	21.5 18.2	22.0 26.2	23.3 22.6	18.8 19.2	19.5 17.9	7.8 10.5	10.5 9.0	7.8 7.0	9.1 6.6	1.0 1.0	1.5 1.0
東北	岩木川（五所川原）	1	1	1 2 -0.7	-0.2 0	4	5.5	6	8	14	16	18	19.5	25 23 22	24 21	20	20	22 21.0	23	16	12	12	9	5 5.0 5.0	6.0 5.0
	米代川（鷹巣）	0.05	0.2	1.0 0 -0.4	1.0 0	4.0	9.0	6.0	2.0	12.0	13.0	12.0	18.5	27.0	21.1	20.5 20.0 20.5	21.5 17.0	22.0	16.3	13.0	12.8	10.5	7.6	5.0	4.8
	雄物川（雄物川橋）	0.5	0.5	0.0 0.0 0.5	0.0 0.0	2.0	1.5	9.0	6.0	12.0	12.0	19.0	14.0	22.0	19.0	27.0 24.0 19.0	26.0 22.0	20.0	15.5	19.0 13.0	16.5	11.5	7.0	6.0	6.0
	最上川（高屋）	1.0		0.0		4.5		6.2		12.0		16.0		22.5 28.0 26.0	25.5 28.0	19.0		20.0		13.0		7.0		5.5	
	北上川（藤橋）	-0.3		1.7 1.4	1.9 1.1	3.8		10.9		12.0		17.5		23.5		21.0 19.3	20.3 19.5	20.8		13.4		8.0		3.8	

（注）1．月別の測定値には当該月に測定したものを全て記載している。従って、使用上、留意すること。
2．単位：℃

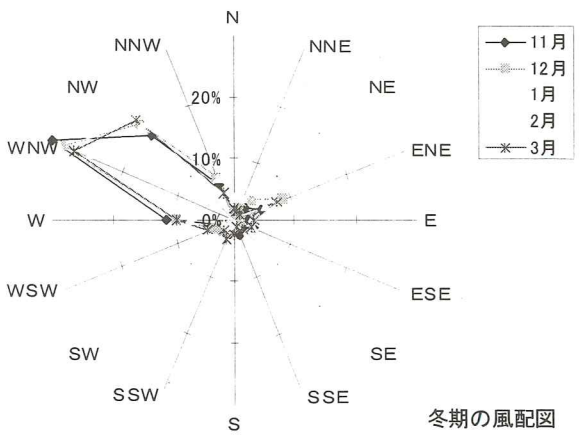
	河川名	1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月	
東北	阿武隈川（黒岩）	3.0 2.0	5.0	2.0 2.0 5.0 2.0 2.0	2.0 2.0 2.0 4.0	7.0 10.0	11.0	14.0 13.0	15.0	18.0 17.0	15.0	25.0 21.0	18.0	25.0	30.0	27.0 30.0 22.0	27.0 29.0	21.0	20.0	17.5	16.0	13.0	13.0	8.5	6.5
関東	那珂川（野口）	6.3	4.0	4.3 3.5	5.0 1.8	8.2	8.5	16.0	12.0	18.2	18.2	17.2	28.5	27.0	26.7	23.4 21.5	20.7 21.4	20.1	20.5	16.6	17.7	14.1	14.1	8.9	9.5
	利根川（栗橋）	4.0 6.5	5.4	2.0 3.0	2.0 3.0	7.5 9.5	10.0	5.0 7.0	6.0	14.0 18.0	16.0 15.0	21.0 20.0	22.0	26.0 23.0	24.0	25.0 25.0	25.0 25.0	24.0 25.0	26.0	17.0 18.5	18.0	16.0 16.0	16.0 16.0	10.0 7.0	13.0
	多摩川（多摩河原橋）	6.8 7.5	7.7 7.1	7.6 6.3 4.2 2.2	7.8 5.3 3.9 3.2	12.4 11.8	12.4 10.6	19.0 15.4	18.4 16.0	21.5 17.0	22.7 13.5	21.7 21.5	21.6 20.0	19.8 21.5	23.0 20.0	31.0 29.8 26.0 24.8	31.5 27.4 25.7 25.3	25.0 24.5	26.0 22.6	18.3 19.0	20.0 16.0	20.8 19.6	21.2 19.1	11.8 11.5	12.5 10.5
	富士川（身延橋）	6.0	5.5	7.0	8.6	11.0	15.0	14.5	14.5	17.5	20.0	22.5	23.5	22.0	22.0	23.0	24.0	21.0	21.5	18.3	19.0	13.4	13.6	9.0	10.0
北陸	阿賀野川（山科）	4.5		3.2		4.7		12.0		10.0		19.0		22.0		25.6		22.5		16.0		15.0		9.0	
	信濃川（屋島橋）	5.0		4.0		8.0		9.3		14.5		19.2		20.3		22.0		20.5		17.2		10.5		4.5	
	信濃川（帝石橋）	2.0		2.0		6.0	6.0	9.5		12.0		18.0 15.0 16.3 18.5	18.0 17.2 16.5	22.5		24.0		19.5	19.2	14.1		10.8 11.0 11.2 11.7	10.8 11.0 12.0	3.5	
	黒部川（愛本橋）	4.0		4.0	-3.2	6.2		7.2		7.9	7.8	8.8		11.8	12.1	14.5	13.0	14.7		10.2	11.4	11.7	9.0	8.2	
	神通川（有沢橋）	—		2.5		6.1		—		14.0		16.0		22.5		23.7		20.1		16.5		10.2		8.4	
	庄川（雄神橋）	2.7		5.8	1.8	6.4		9.0		12.0	12.2	15.0		17.6	22.0	22.5	21.5	21.9		18.0	16.3	13.5	11.2	8.5	

3.5. 風力

風力は、時間により大きく変化する。特に日本においては風量と風向が大きく変化している。検討対象となった31都市においては、平均風速が5m/sを超えるのは2都市のみであった。



酒田市の風配図



室蘭市の風配図

図-2.26　風速が５m以上の地域における風向図の比較[58)]

3.6. その他

1) ごみ焼却場

一年間を通じて、24 時間連続稼働し、ゴミの発生量の年変動も少ないため、エネルギーの量は年間を通じて安定している。取得可能な熱の温度は 100℃以上の水蒸気であり、エネルギーのレベルは、未利用エネルギーの中で最も高い。

2) 地下鉄

地下鉄の運行時間に廃熱が発生し、夜間の排熱量は減少しており、日変動が多きい。

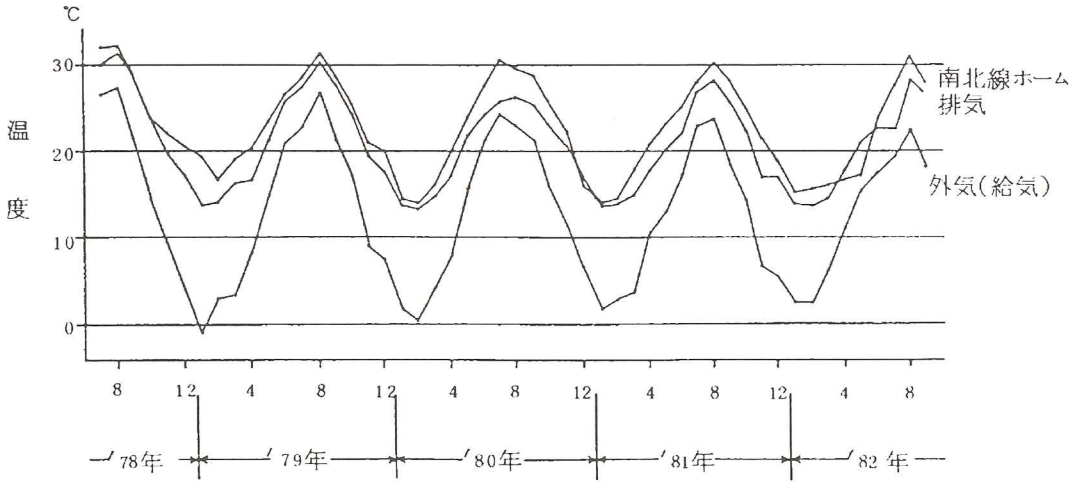


図-2.27 札幌大通駅における月平均温度の変化[46)]

3) 変電所

電力の発電力と比例して排熱が発生する。電力消費に比例するため、日中が多く、夜間が少ない日変動を描くものと予想される。

以上の未利用エネルギーの変動特性をまとめると表-2.22 のようになる。時間による熱源の変動が大きい熱源としては、太陽熱や風力が挙げられ、変動が少ない熱源としては、地熱やごみ焼却場熱が位置づけられる。

表-2.22　エネルギー源の変動の比較と取得可能温度の比較

	変動量の比較		冬季における利用可能な温度レベル	消融雪設備としての特性
	年間変動	日変動		
下水道	中	小	12℃	人口の密集している都市中心部において熱量を獲得しやすい特徴がある。
地熱	小	小	12～15℃	年間を通じて安定的な熱源である。しかし賦存量は場所により大きく異なる。
太陽	大	大	7～22℃（蓄熱を用いた場合）	日ならびに年の変動が大きいことから、蓄熱槽を用いた利用が前提となる。
河川	中	小	温度差3℃	ヒートポンプの利用が前提となる。
風力	大	大	発電としての利用	風量が多く、安定している地域は日本国内で限定される。
ごみ焼却場	小	小	100℃以上	比較的高温度での利用が可能。
地下鉄	中	中	15℃程度	地下鉄のある札幌市での利用に限定される
変電所	中	中	30℃程度	1日または年間での変動はあるが、比較的安定的な熱源である。

4）板倉淑文・菊池俊貴，未処理下水熱を利用したヒートパイプによる融雪能力調査，＃３５下水道研究発表会講演集，　1998
5）渡辺伸央,下水熱利用ヒートポンプ式ロードヒーティングシステムの開発,日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集,1995
6）高松康廣・川端 隆，下水道を利用した融雪槽について，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集,1999
7）日本機械工業連合会，未利用エネルギーを活用したオンサイト型融雪システムに関する調査研究報告書 平成９年度（日本機械工業連合会Ｓ）,1998
8）渋谷外茂雄，都市を支える地下ネットワーク 下水道 除雪における下水道技術 札幌市，土木施工,1997
9）熱利用下水道モデル事業（中川ポンプ場熱回収事業），岩手県土木部下水道課 岩手県北上川上流流域下水道事務所作成資料
１０）渡辺伸央，ヒートポンプ利用下水採熱システムの開発 江別アメニティ下水を利用したロードヒーティングの運転結果について，寒地技術論文・報告集，1998
１１）地崎淳宏・鈴木博道,下水道熱利用の施工例,社団法人日本下水道協会,1998
１２）渡辺伸央，下水熱用ヒートポンプ式ロードヒーティングシステムの開発，北海道電力株式会社総合研究所研究年報，1996
１３）渡辺伸央，都市開発と電気加熱 下水熱を利用したヒートポンプ式ロードヒーティングシステムの開発について，エレクトロヒート，1996

１４）坂倉淑文，下水熱利用によるロードヒーティング，月刊下水道 Vol.21 No.11
１５）下水熱利用バス待合所ヒーティングシステム，藤倉電線㈱技術資料 ヒートパイプ実験検討書，1992.2
１６）下水熱利用ヒーティングシステム，㈱フジクラ技術資料 熱計算書，1994.8
１７）ヒートパイプによる下水熱利用ヒーティングシステム，㈱フジクラ技術資料，1997.7
１８）下水熱利用ヒートパイプ式融雪システム，㈱フジクラ，1998.2
１９）ヒートパイプ式融雪・凍結防止システムの概要，下水道局工事部計画課作成資料
２０）上村弘ほか:地熱熱源バルブ付きヒートパイプ融雪システムの開発,＃１１寒地技術シンポジウム,1995
２１）ヒートパイプ，フジクラヒートパイプカタログ
２２）厚別融雪槽，札幌市下水道局作成資料
２３）札幌市下水道局 厚別融雪槽 説明資料
２４）吉田雅光，下水処理水を利用した大型融雪槽計画，寒地技術論文・報告集，1996
２５）若林宏明 他，下水（生下水・処理水）熱を利用する融雪システムの開発，水，1996
２６）森山和馬・林拓男・田中雅人，地中熱利用の BHES 融雪システム，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
２７）植村祥一・尾楠雅樹，地中熱交換杭を利用した無散水融雪システムについて，
２８）盛田耕二，大地と太陽を熱源とするガイア融雪システムの開発，燃料及燃焼 第64巻（1997）第6号，
２９）盛田耕二，大地の熱的機能を利用した融雪システムの開発,ENERGY,1997.11
３０）盛田耕二，雪と付き合う 大地の恵みを雪国の暮らしに活かす，日本エネルギー学会誌，1997
３１）竹下清文，横谷無散水融雪システムについて，建設省技術研究会報告，1997
３２）竹下清文，横谷無散水融雪について，中国地方建設局管内技術研究会論文集，1996
３３）福原輝幸・坂本信弘・石野圭史郎・森井和弘，国道９号道の駅での地中熱利用の融雪設備施工事例，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
３４）竹内正紀 他，基礎杭利用による地熱融雪システム，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
３５）植村祥一・尾楠雅樹，福井工事事務所管内における融雪システム施工事例について，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
３６）渡邊洋・吉田輝人・宮原 均・福原輝幸，熱交換掘削杭を利用した国道８号線中川峠の無散水融雪システム，土木学会第53回年次学術講演会，
３７）桑原賢二・上村靖司・戸井田隆行・千場良信・梅村晃由，地盤採熱条件の厳しい地域における浅層地熱利用熱交換井路面融雪システムの施行事例，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
３８）渡辺渡・小松崎通雄・大川戸貴浩，太陽熱蓄熱型浅層地中熱利用融雪施設の融雪能力と設計の考え方，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
３９）川崎和来・山下良男・福原輝幸，地中熱利用無散水融雪システムによる八井谷パーキング場の路面冷却効果，土木学会第53回年次学術講演会
４０） 一般国道９号 道の駅ハチ北，豊岡工事事務所作成パンフレット
４１）太陽エネルギー活用道路照明，建設省関東地方建設局北首都国道工事事務所作成パンフレット
４２）堅田 豊，省エネルギー型道路維持管理に関する調査，北海道開発局作成資料

４３）浅層地中熱利用融雪システム，建設省 北陸地方建設局作成資料
４４）理科年表 国立天文台編 机上版，丸善㈱，1999
４５）富山駅北地区熱供給施設建設工事，北陸アーバン㈱，
４６）最新 未利用エネルギー活用マニュアル，オーム社，1992
４７）新エネルギー便覧（資源エネルギー庁編），財団法人 通商産業調査会，1999
４８）三浦真紀・高橋敏彦，風力エネルギーによる道路消融雪について，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
４９）風力発電によるロードヒーティング［猪苗代地区］，建設省東北地方建設局 郡山国道工事事務所作成資料
５０）糸川政孝・尾楠雅樹，風力熱交換システムの開発，近畿技術事務所作成資料
５１）門脇孝男，風力発電設備の導入について 設備計画と機種選定，都市と廃棄物，1996
５２）工藤長正，風力発電事業の現状と今後の課題，エヌイージー・ミーコン㈱作成資料
５３）石川禎昭，ごみ焼却排熱有効利用の現状と展望，都市と廃棄物，1996
５４）伊勢哲郎，エコ燃料による消融雪システムの研究開発 サーマル・リサイクルシステム，寒地技術論文・報告集，1997
５５）伊勢哲郎 他，可燃性廃棄物を燃料とした可反式消融雪システムの開発，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集，1999
５６）伊藤光雄，特集 未利用エネルギーのポテンシャル 地下鉄排熱利用の現状と課題，省エネルギー，1990
５７）流量年表（建設省河川局編），日本河川協会
５８）気象庁年報（気象庁監修），財団法人 気象業務支援センター
５９）Guy D.Williams:Melting Solor Potential for Energy Generation in Cold Regions,Prceedings of 6th International Symposium on Cold Region Development,2000.2

第III章　道路融雪に必要なエネルギー量の検討

第Ⅱ章において、都市部には未利用エネルギー(有用な廃熱)が多く存在することが明らかになった。一方、従来設置されてきた融雪設備は、時間当たり 2～3cm 程度の平均的な降雪に対応するよう、200～250W/m² 程度の放熱量で設計されている。このため、場合によっては 10 時間以上にわたって圧雪状態になるなど、道路融雪施設としては不充分な設計になっていた。

そこで、道路本線において未利用エネルギーを利用した融雪施設を検討するには、降雪状況等の気象の変動に対応した施設設計の可能性を見極める必要がある。そこで、均一な舗装版を想定した熱伝達式に基づく加熱温度と放熱･融雪熱の検討に基づき、道路の融雪あるいは凍結防止に必要な熱量を算定するものである。

検討対象は、融雪施設の設置効果、下水道を始めとした熱源の確保を考慮し、積雪寒冷地域の、人口 10 万人以上の 31 市とした。

1. ロードヒーティング必要熱量算出方法[19)]

ロードヒーティング施設は、道路上に降り積もる雪を溶かすとともに、気温の低下によって路面が凍結することを避けるものである。従って、ロードヒーティングの必要熱量は、道路表面の凍結防止に必要な熱量と路上積雪の融雪に必要な熱量を比較し大きな値をヒーティング熱量とする必要がある。

1.1. 融雪に必要な熱量

融雪に必要な熱量 Q_m（W/㎡）は、路上の積雪を 0℃まで暖める熱量と、これを溶かすための融解熱の和になる。従って、次式で求められる。

$$Q_m = S \cdot 10^{-2} \cdot \rho_s \cdot \{H_m + C_s \cdot (0 - T_s)\}$$

ここで、
- S：降雪量（cm/s）
- ρ_s：雪の密度（kg/m³）（地域により 80～120（kg/m³））
- H_m：雪の融解熱（J/kg）＝0.335×10^6（J/kg）
- T_s：雪の温度（℃）
- C_s：雪の比熱（J/kg･℃）＝2.09×10^3（J/kg･℃）

1.2. 路面の凍結防止に必要な熱量

路面の凍結防止に必要な熱量 Q_f（W/㎡）は、外気による冷却に抗して路面を 0℃以上に保持するための熱量として求められる。したがって、次式で求められる。

$$Q_f = \alpha_f \times (T_g - T_a)$$

ここで、$\alpha_f = \alpha_c + \alpha_r$

- α_f：対流及び輻射による路表面熱伝達率（W/㎡･℃）
- α_c：対流による路表面熱伝達率（W/㎡･℃）
  風速５m 以下の場合、以下の式により求められる。
  $\alpha_c = 5.81 + 3.95 V_a$
  V_a：風速（m/s）
- α_r：輻射による路表面熱伝達率（W/㎡･℃）

T_g：路表面温度（℃）
T_a：外気温度（℃）

1.3. 必要ヒーティング熱量

必要ヒーティング熱量Q（W/㎡）は、Q_fとQ_mを比較し、大きい方を選択する。この時、加熱装置から下層の路盤等への熱ロスを考慮して、若干の余裕を見込むことが必要となる。

Q＝（Q_f又はQ_m）・φ

ここに、φ：余裕度（＝1.1～1.2）

2. 降雪強度と融雪に必要なエネルギー量の試算

ここでは、基礎となる降雪の深さと雪の密度の推定方法を示した後に、融雪に必要なエネルギー量の試算を行う。

2.1. 降雪強度及び積雪密度の推定

降雪強度の記録は公開されたものがほとんどない。また、降雪強度を自動計測する技術開発が行われたこともあったが、地域特性に合わせたキャリブレーションが必要なことから普及しなかった。

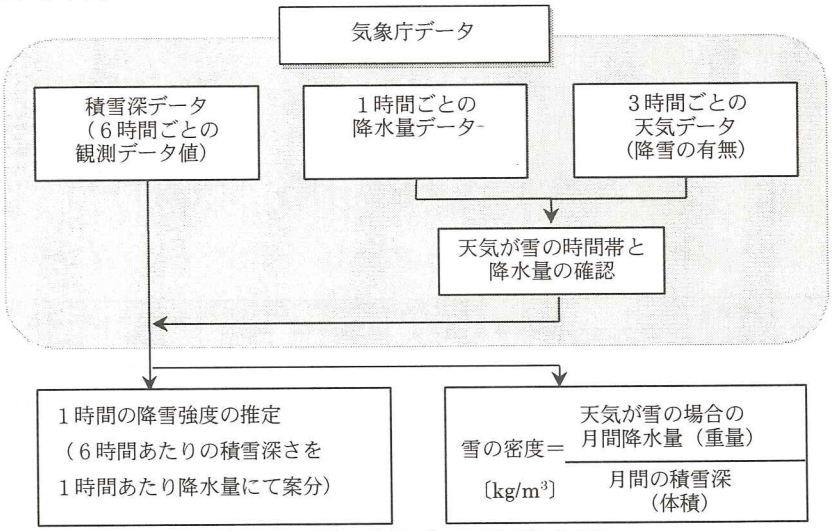


図-3.1　降雪強度の推計方法

そこで、気象庁が観測し、公開しているデータをもとに、図-3.1に示す考え方により1時間あたりの降雪の深さ、ならびに雪の密度について推定を行った。なお、基礎となるデータとしては、最近の5ヵ年で比較的雪の多かった1996年11月～1997年3月までの5ヵ月間のデータを用いている。

この事例を、図-3.2～3.3に例示する。他の都市については、付録-2に示す。

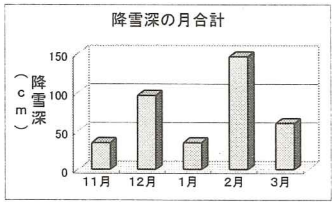
2.2. 雪の温度

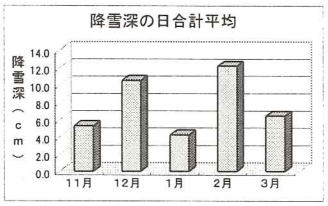
降下中の雪は、上層の低温の空気を含んでおり、温度が低い。降り積もった当初はこの低い温度を保っているが、次第に周囲の大気温に近づいていく。そして、内部で融解が始まると0℃になる。このため、積雪した雪の温度は、外気の温度と0℃の間に分布することになり、変化の影響を受けにくい。

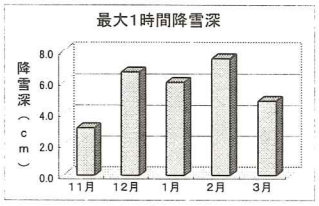
このような状況は、図-3.4 の実測例に現れている。融解対象となる積雪は、舗装面に降り積もった薄い層で、路面に接している部分であるから、気温よりは高く、0℃よりは低いと推定される。そこで、この観測データに基づき、融解する対象となる積雪の温度は、ﾏｲﾅｽ１℃として設定した。

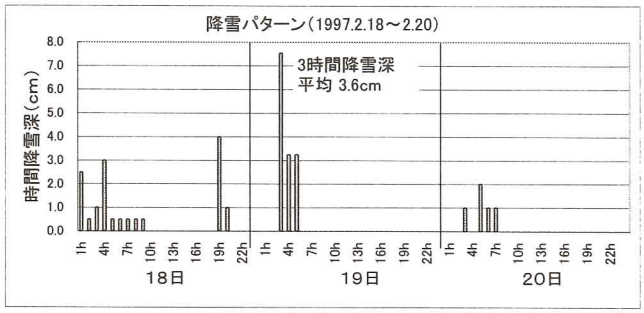
札幌市

	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m³）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	6.9	0.9	4.1	7	35	5.3	3.1	2.60	102
１２月	2.2	-3.6	-0.7	9	96	10.5	6.7	2.47	64
１月	0.2	-5.6	-2.5	8	35	4.2	6.0	2.27	84
２月	1.1	-4.6	-1.8	12	146	12.2	7.5	2.75	64
３月	3.6	-3.4	0.2	9	60	6.4	4.8	2.96	78
							平均	2.6	78









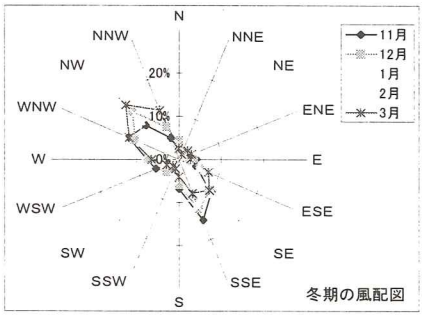
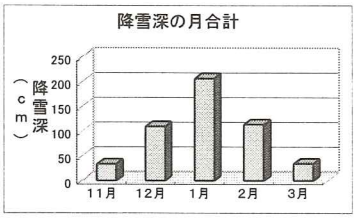
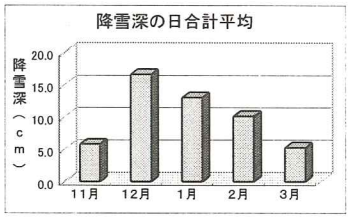


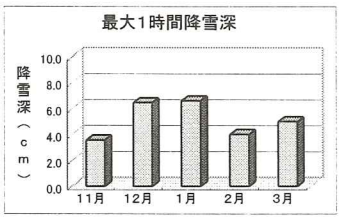
図-3.2　降雪、気象記録分析結果(札幌市)

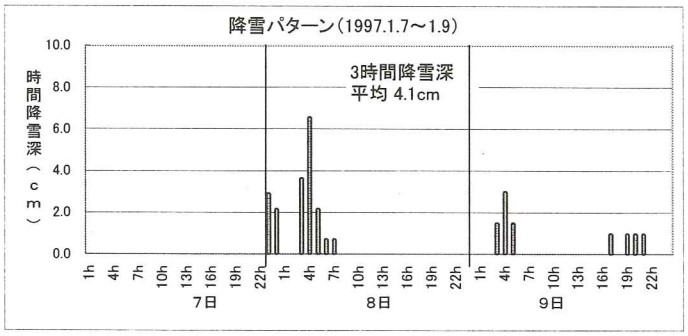
青森

	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m³）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	9.5	3.2	6.4	6	34	5.8	3.6	4.12	73
１２月	5.3	-1.5	1.8	7	110	16.6	6.4	3.71	45
１月	2.5	-2.3	0.0	16	207	13.0	6.6	4.47	46
２月	2.9	-1.8	0.6	11	114	10.1	4.0	4.37	51
３月	6.6	-0.9	2.8	7	35	5.3	5.0	4.94	51
							平均	4.3	53









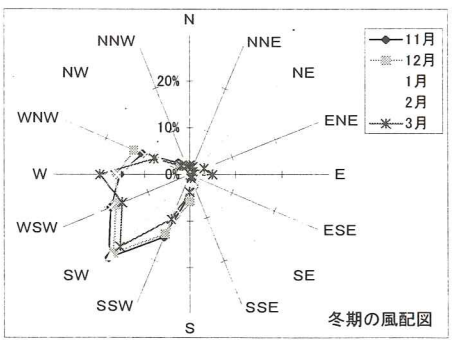
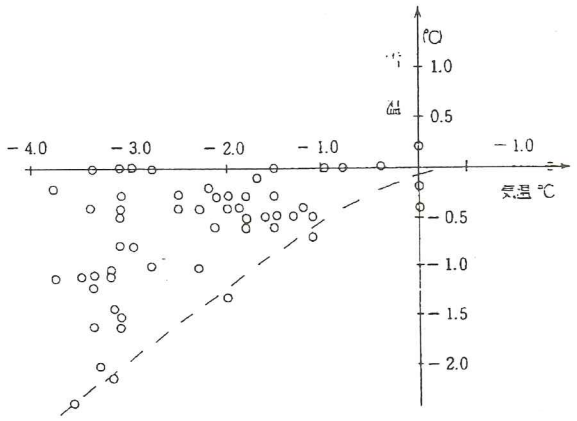
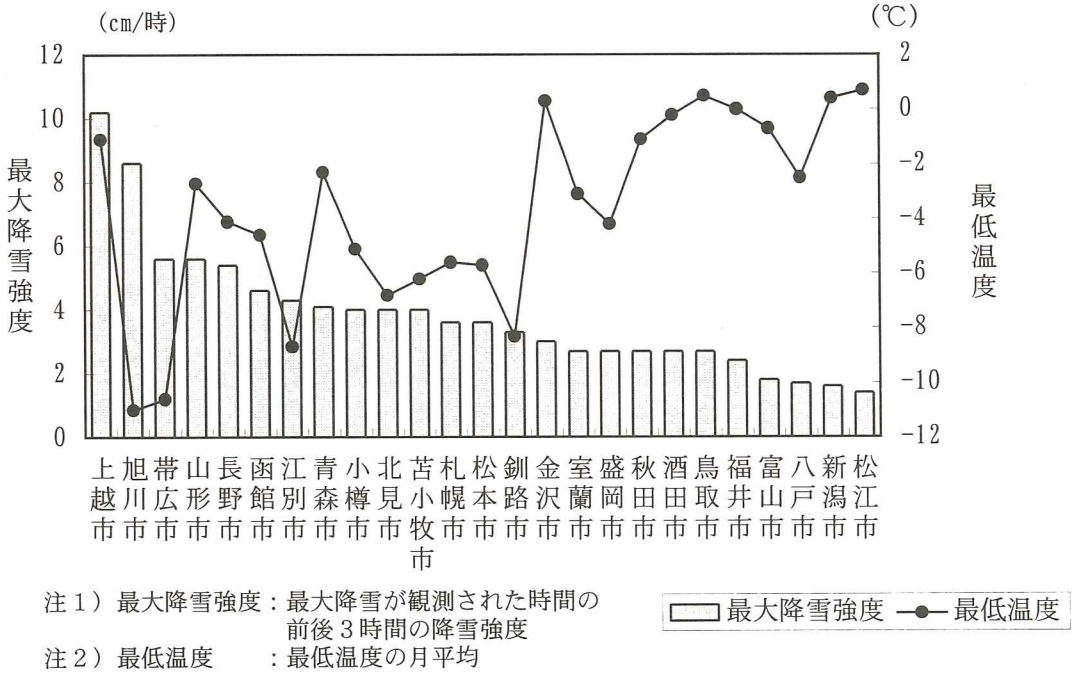


図-3.3　降雪、気象記録分析結果(青森市)



（昭和52年新潟県北魚沼郡湯ノ谷村および53年度新潟県津川町での測定）

図-3.4 積雪の温度と気温の計測例[58)]



注１）最大降雪強度：最大降雪が観測された時間の前後３時間の降雪強度
注２）最低温度　　：最低温度の月平均

図-3.5　調査対象都市の最大降雪強度と最低温度の関係

3. 必要放熱量

3.1. 融雪に必要なエネルギー量の試算

上記のデータに基づき次の２つのケースを設定して、融雪に必要なエネルギー量の試算を行った。調査対象都市の最大降雪強度と最低気温は、図-3.5 に示すようになっている。

ケース１）平均降雪パターン

降雪が観測された場合の平均的な降雪強度を想定する。ここでは、１ヶ月間の降雪の深さを１ヶ月間に降雪が観測された累計時間で除して算出した。

ケース２）最大降雪パターン

1996 年 10 月から 1997 年 3 月の間に観測された最大の時間降雪強度と同じ降雪パターンを想定する。ここでは最大の時間降雪強度が観測された時間の前後も含めた３時間の降雪強度の降雪を想定している。

3.2. 凍結を防止するために必要なエネルギー量の試算

路面からの対流による放熱の熱伝達係数 αc は、風速に比例し、一般的には風速が 5m/s 未満であることから、下記の式により求められる。

$$\alpha c = 5.81 + 3.95 \times \text{風速}$$

また、路面からの輻射による放熱の熱伝達係数 αr は、外気温度と路面温度によって定まり、路面温度を雪が融解している状態の+0.5℃とすると下記の式となる。

$$\alpha r = 5.41/(0.5 - \text{外気温度}) \times (2.735^4 - (273/100 + \text{外気温度}/100)^4)$$

したがって、路面からの放熱量(0.5℃以上に保って、凍結しないために供給すべき熱量)は、余裕率を 15％とすると下記の式となる。

$$Q = (\alpha c + \alpha r) \times (0.5 - \text{外気温度}) \times 1.15$$

この方式によって、各都市の凍結防止に必要なエネルギー量を算出するには、風力データと最低温度が必要となる。ここでは、図-3.2～3 に例示した気象記録から平均風量データと最低温度を用いて試算した。

3.3. ロードヒーティングで必要となるエネルギー量

上記の結果からロードヒーティングを行う上で必要なエネルギーの試算結果を図-3.6 及び表-3.1 に示す。

北海道のような寒冷地域では、凍結防止に必要な熱量が大きく、平均降雪に必要な熱量を上回る都市が多い。特に気温低下が激しく、風速も高い帯広市などでは、凍結防止に必要な熱量が平均降雪であっても、最大降雪の融雪に必要な熱量に匹敵する 250W/㎡以上となるなど、大きな熱量が凍結防止に必要になっている。

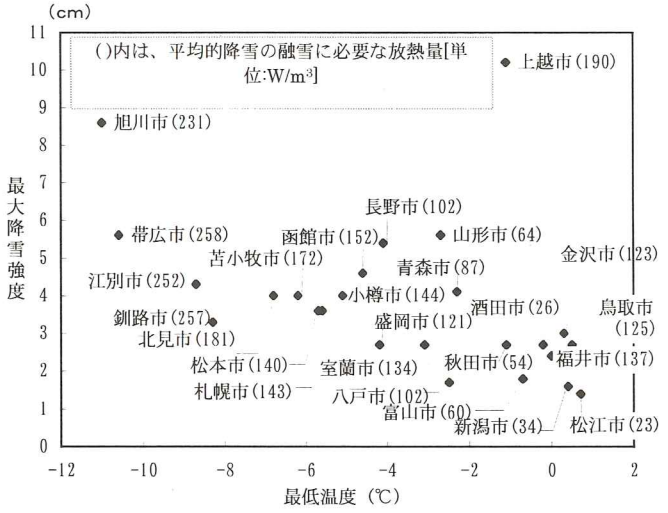


図-3.6　各都市の最大降雪強度、最低気温の関係と平均的降雪の融雪に必要なエネルギー量

表-3.1 都市別の融雪等に必要となる路面放熱量

	都市名 ( )はデータを準用した都市	①融雪に必要な熱量(注1)					②凍結防止に必要な熱量(W/㎡)					必要放熱量 (W/㎡)	
		降雪深		雪密度 (kg/m3)	必要熱量(W/㎡)		外気温度 (最低平均温度℃)	平均風速 (m/S)	路面熱伝達率				
		日平均 (cm/日)	最大降雪深 (cm/時)		平均降雪 (注2)	最大降雪 (注3)			αc	αr		平均	最大
北海道	札幌市	12.2	3.6	78	37	263	-5.6	2.6	16.1	4.3	143	143	263
	函館市	9.8	4.6	54	21	233	-4.6	4	21.6	4.3	152	152	233
	小樽市	11.2	4.0	59	26	221	-5.1	3.1	18.1	4.3	144	144	221
	旭川市	15.5	8.6	45	27	362	-11.0	1.9	13.3	4.2	231	231	362
	室蘭市	8.1	2.7	86	27	217	-3.1	5.6	27.9	4.3	134	134	217
	釧路市	16.9	3.3	76	50	235	-8.3	3.9	21.2	4.2	257	257	257
	帯広市	18.0	5.6	53	37	278	-10.6	2.6	16.1	4.2	258	258	278
	北見市	7.7	4.0	61	18	228	-6.8	2.9	17.3	4.3	181	181	228
	苫小牧市	7.5	4.0	53	16	199	-6.2	3.1	18.1	4.3	172	172	199
	江別市	14.6	4.3	48	27	193	-8.7	3.5	19.6	4.2	252	252	252
青森県	青森市	16.6	4.1	53	34	203	-2.3	4.3	22.8	4.4	87	87	203
	八戸市	7.3	1.7	66	19	105	-2.5	4.9	25.2	4.4	102	102	105
	弘前市(青森)	16.6	4.1	53	34	203	-2.3	4	23	4	87	87	203
岩手県	盛岡市	10.9	2.7	47	20	119	-4.2	3.1	18.1	4.3	121	121	121
秋田県	秋田市	6.6	2.7	50	13	126	-1.1	4.9	25.2	4.4	54	54	126
山形県	山形市	11.4	5.6	43	19	225	-2.7	1.8	12.9	4.4	64	64	225
	鶴岡市(酒田)	6.4	2.7	104	26	263	-0.2	5.0	25.6	4.4	24	26	263
	酒田市	6.4	2.7	104	26	263	-0.2	5	25.6	4.4	24	26	263
新潟県	新潟市	7.6	1.6	115	34	172	0.4	4.2	22.4	4.4	3	34	172
	長岡市(注４)	13.7	4.0	115	61	431	0.4	4.2	22.4	4.4	3	61	431
	上越市(高田)	46.0	10.2	106	190	1012	-1.1	2.4	15.3	4.4	36	190	1012
富山県	富山市	11.7	1.8	131	60	221	-0.7	3.1	18.1	4.4	31	60	221
	高岡市(富山)	11.7	1.8	131	60	221	-0.7	3.1	18.1	4.4	31	60	221
石川県	金沢市	23.1	3.0	137	123	385	0.3	4.8	24.8	4.4	7	123	385
	小松市(金沢)	23.1	3.0	137	123	385	0.3	5	25	4	7	123	385
福井県	福井市	21.3	2.4	165	137	371	0.0	2.9	17.3	4.4	12	137	371
長野県	長野市	9.7	5.4	54	20	273	-4.1	2.3	14.9	4.3	102	102	273
	松本市	11.3	3.6	57	25	192	-5.7	2.4	15.3	4.3	140	140	192
	上田市(松本)	11.3	3.6	57	25	192	-5.7	2	15	4	140	140	192
鳥取県	鳥取市	17.8	2.7	180	125	455	0.5	3.5	19.6	4.4	14	125	455
島根県	松江市	3.3	1.4	180	23	236	0.7	3.7	20.4	4.4	9	23	236

注1)雪の温度は、外気温度に関わらず－1℃として設定した。
注2)降雪が観測された場合の平均的な降雪強度を想定する
注3)最大の降雪強度が観測された時間の前後も含めた3時間の降雪を想定している。
注4)防災科学研究所資料の積雪データ、新潟市の気温データを用いた。

５８）散水消雪施設設計施工マニュアル，新潟県融雪技術協会，1990.8

第IV章　未利用エネルギー利用融雪システムの熱需給バランス

車道本線へ適用できる融雪施設の検討にあたって、高強度の降雪に対応できる熱源の確保が可能であるか検証することとした。ここでは、実績に基づいた原単位を用いて各都市の熱源の賦存量の推定を行い、対流と輻射を考慮した必要熱量とのエネルギー需給バランスを検証した。

なお、需給バランスは、積雪寒冷特別地域内にある人口 10 万人以上の 31 都市について、調査対象とした各未利用エネルギーの賦存量を試算した。分析にあたり次の２つのアプローチにより分析を実施した。

・都市別のマクロ的なエネルギー賦存量の分析
　未利用エネルギーの取得の条件を設定し、Ⅱ章で試算した原単位を用いて推計を行った。
・キロメッシュ内におけるエネルギー賦存量の分析
　各都市を１キロのメッシュに分割し、主要な道路を含むメッシュについて推計を行った。

1. 都市別のマクロ的な分析

1.1. 未利用エネルギーの試算の前提条件

試算するにあたって次のような前提条件を設定した。なお、個別の試算に用いた基礎データならびに試算結果を巻末の付録- 3に示す。

① 下水道処理場
各下水処理場の処理水の保有熱から温度差Δｔ＝５℃を活用するとして試算した。

② 廃棄物処理場
廃棄物の焼却熱で、発電等を行った後の排ガスを熱源として試算した。

③ 下水道管渠
口径が２メートルの管きょのマンホールから、熱を 10KW／箇所の熱回収するとして試算した。ただし、マンホール数は、５０ｍに一箇所として推定。東京都の場合、全管路延長（1 万 5000 キロ）あたりのマンホール数（４６万個）から、距離は３２ｍ／個となる。口径が大きい場合、距離が長くなることから、50m／個として設定した。

なお、都市部における下水道管渠からの最大取得エネルギーも推計した。ここでは、下水道処理場に流入する下水道温度が 12℃であり、ここから２℃（下水道処理場への流入下水道温度は、10℃程度以上であることが望ましいことから、この差の２℃と設定）の温度差によるエネルギーを最大利用可能量であるとして試算を行った。

④ 地熱
道路延長の 10％の地域に５メートル間隔で、深さ 100mの地中熱交換杭を設置するとして試算した。

⑤ 太陽熱
一般国道の車道の舗装を集熱版として用いた場合を想定して試算した。光発電については、路側に高さ 2m のパネルを設置することとした原単位を用いている。

⑥ 河川

冬期における河川水の１％を取水し、保有熱から３℃の熱をヒートポンプによりくみ上げて利用するとして試算した。

⑦ 風力

平均風速５m以上の地区において、道路に沿って 500m間隔で猪苗代の導入事例と同様の設備を導入するとして試算した。

⑧ その他

ｉ）変電所

変電に伴う熱損失から得られる熱量を、変電容量の 0.15％として試算した。

ii） 地下鉄廃熱

札幌市の実績データを用いた。

1.2. 未利用エネルギーの賦存量

都市ごとの獲得可能な未利用エネルギー量の試算結果を表-4.1 に示す。また、未利用エネルギーの構成比率を比較すると下水処理場のエネルギーが最も多く、次いで廃棄物、太陽熱、河川エネルギー、下水道管渠の順番となっている。

表-4.1 エネルギー賦存量

県	市レベル	未利用エネルギー量(KW)									(別掲 注)
		下水処理場	廃棄物	下水道管きょ	地熱	太陽熱	河川	風力	その他 (内容)	合計	潜在的な下水道エネルギー量
北海道	札幌市	204,796	58,663	8,224	14,680	38,277	380		2,725 変電所+地下鉄	327,745	81919
	函館市	18,027	12,615	314	2,840	5,334	0			39,130	7211
	小樽市	12,809	2,062	301	4,590	7,338	0		450 変電所	27,550	5124
	旭川市	29,569	7,559	1,763	7,880	13,156	8,339			68,266	11828
	室蘭市	9,241	3,777	239	2,310	4,604	0	1,080	627 変電所	21,878	3696
	釧路市	19,508	0	686	3,890	6,430	2,887			33,401	7803
	帯広市	6,990	7,916	961	2,540	4,926	6,520			29,852	2796
	北見市	11,409	0	808	3,370	5,089	1,735			22,412	4564
	苫小牧市	16,478	8,611	491	7,140	15,547	0		510 変電所	48,777	6591
	江別市	10,555	4,238	513	2,930	5,235	42,421		450 変電所	66,341	4222
青森県	青森市	19,123	12,156	555	8,870	13,932				54,636	7649
	八戸市	8,319	11,321	446	4,570	6,599	3,712			34,966	3327
	弘前市	9,382	11,949	0	1,620	2,606	3,188			28,745	3753
岩手県	盛岡市	7,061	10,488	1,112	7,250	11,755	8,159			45,824	2824
秋田県	秋田市	16,299	14,897	349	4,630	8,342			1,650 変電所	46,167	6520
山形県	山形市	6,956	9,927	451	5,610	9,612	1,454			34,010	2782
	鶴岡市	4,443	4,546	332	7,270	9,408	6,959			32,958	1777
	酒田市	5,117	4,181	49	6,230	9,474	9,167	8,890		43,108	2047
新潟県	新潟市	61,212	13,359	1,327	7,470	13,711	24,754			121,833	24485
	長岡市	21,535	9,098	583	9,810	16,062	42,867			99,955	8614
	上越市	1,996	7,104	51	5,760	7,994				22,905	798
富山県	富山市	24,024	18,427	1,132	5,380	9,436	16,159			74,558	9610
	高岡市	10,689	6,642	390	3,250	6,696	6,691			34,359	4276
石川県	金沢市	39,849	17,727	648	5,170	10,038	8,741		4,200 変電所	86,373	15939
	小松市	585	3,502	100	7,380	8,806	2,521			22,894	234
福井県	福井市	34,036	10,121	611	6,250	10,802	17,048			78,868	13615
長野県	長野市	13,844	12,729	633	8,680	14,208	9,785			59,880	5538
	松本市	22,410	8,139	281	3,660	5,644	7,795			47,928	8964
	上田市	4,552	5,087	0	2,990	4,324	3,563			20,515	1821
鳥取県	鳥取市	10,243	6,596	303	3,680	6,294	5,115			32,232	4097
島根県	松江市	0	5,725	34	6,330	9,231				21,321	0
合計		661,058	309,162	23,689	174,030	300,908	239,961	9,970	10,612	1,729,390	264423
構成比率		38%	18%	1%	10%	17%	14%	1%	1%	100%	

注）都市部の下水道管きょから、2℃の熱量を取得した場合の潜在的な熱量

なお、ヒートポンプを用いれば、下水道管渠からの利用可能熱量は非常に大きくなる。下水道管渠は、主要な道路に幹線が設置されている場合が多く、有望な熱源であるといえる。

都市によって異なるが、上位２種類の熱源で、全熱源の 70％以上を占める都市が多く、熱源を複合化させる場合でも、２種類程度で効果が発揮できるものと考えられる。

都市により賦存する未利用エネルギー量の構成には違いが見られる。札幌市など、下

水道の普及率が高い都市では下水処理場の賦存エネルギー量が多くなっている。江別市（石狩川）、長岡市（新信濃川）、新潟市（信濃川）などの大型河川が存在する都市では、河川からの賦存エネルギー量が多くなっている。

表-4.2 未利用エネルギー賦存量の構成比

県	市レベル	下水処理場	廃棄物	下水道管きょ	地熱	太陽熱	河川	風力	その他
北海道	札幌市	57%	16%	11%	4%	11%	0%	0%	1%
	函館市	45%	31%	4%	7%	13%	0%	0%	0%
	小樽市	45%	7%	5%	16%	26%	0%	0%	2%
	旭川市	39%	10%	11%	11%	18%	11%	0%	0%
	室蘭市	41%	17%	5%	10%	20%	0%	5%	3%
	釧路市	54%	0%	9%	11%	18%	8%	0%	0%
	帯広市	21%	24%	14%	8%	15%	19%	0%	0%
	北見市	45%	0%	15%	13%	20%	7%	0%	0%
	苫小牧市	33%	17%	5%	14%	31%	0%	0%	1%
	江別市	15%	6%	4%	4%	8%	62%	0%	1%
青森県	青森市	34%	21%	5%	16%	25%	0%	0%	0%
	八戸市	23%	31%	6%	12%	18%	10%	0%	0%
	弘前市	33%	42%	0%	6%	9%	11%	0%	0%
岩手県	盛岡市	14%	21%	11%	14%	24%	16%	0%	0%
秋田県	秋田市	34%	31%	4%	10%	18%	0%	0%	3%
山形県	山形市	19%	28%	6%	16%	27%	4%	0%	0%
	鶴岡市	13%	13%	5%	21%	28%	20%	0%	0%
	酒田市	12%	10%	1%	14%	22%	21%	21%	0%
新潟県	新潟市	48%	11%	5%	6%	11%	20%	0%	0%
	長岡市	21%	9%	3%	10%	16%	42%	0%	0%
	上越市	9%	31%	1%	25%	35%	0%	0%	0%
富山県	富山市	30%	23%	7%	7%	12%	21%	0%	0%
	高岡市	30%	19%	5%	9%	19%	19%	0%	0%
石川県	金沢市	45%	20%	3%	6%	11%	10%	0%	5%
	小松市	3%	15%	2%	32%	38%	11%	0%	0%
福井県	福井市	42%	12%	4%	8%	13%	21%	0%	0%
長野県	長野市	22%	20%	5%	14%	23%	16%	0%	0%
	松本市	46%	17%	3%	7%	12%	16%	0%	0%
	上田市	22%	25%	0%	15%	21%	17%	0%	0%
鳥取県	鳥取市	31%	20%	4%	11%	19%	15%	0%	0%
島根県	松江市	0%	27%	1%	30%	43%	0%	0%	0%
平均		36%	17%	6%	10%	17%	13%	1%	1%

ただし下水処理場の熱を道路消融雪に利用する場合は、融雪が必要とされる道路までの熱輸送方法を検討する必要がある。

1.3. 消融雪に必要なエネルギー

Ⅲ章で、平均降雪時と最大降雪時における融雪に必要な路面放熱量についての試算を行った。この値に、各都市の道路面積を乗じることによって、必要な融雪等のエネルギー量が算出できる。

消融雪に必要なエネルギーの算出は、平均的な降雪と最大降雪について行った。結果を表-4.3 に示す。

表-4.3　都市別の消融雪に必要となるエネルギー量の試算結果[59)]

道県名	都市名	道路面積(万㎡)			長さ(km)	消融必要エネルギー		消融雪に必要となるエネルギー量（kW）（注３）					
						ケース1	ケース2	ケース1			ケース2		
		車道部	歩道部	合計		(注1)	(注2)	車道部	歩道部	合 計	車道部	歩道部	合 計
北海道	札幌市	278.69	41.01	319.70	146.8	143	270	398059	58575	456634	753648	110900	864548
	函館市	40.16	8.59	48.75	28.4	152	238	61037	13062	74099	95489	20435	115924
	小樽市	51.02	8.29	59.31	45.9	144	227	73433	11931	85364	115617	18785	134402
	旭川市	93.33	14.41	107.74	78.8	231	385	215641	33292	248934	359174	55451	414626
	室蘭市	34.88	2.85	37.73	23.1	134	220	46594	3810	50405	76816	6282	83097
	釧路市	45.84	6.19	52.03	38.9	257	257	117971	15932	133903	117971	15932	133903
	帯広市	34.49	6.84	41.33	25.4	258	294	89126	17669	106795	101551	20132	121683
	北見市	39.51	5.74	45.25	33.7	181	237	71369	10369	81738	93511	13586	107097
	苫小牧市	111.60	14.91	126.51	71.4	172	205	191945	25647	217593	228680	30556	259236
	江別市	36.87	3.86	40.73	29.3	252	252	92998	9738	102736	92998	9738	102736
青森県	青森市	97.80	11.58	109.38	88.7	87	205	85512	10127	95639	200593	23756	224349
	八戸市	49.25	5.86	55.11	45.7	102	149	50160	5968	56128	73590	8756	82346
	弘前市	18.34	2.23	20.58	16.2	87	205	16037	1953	17990	37619	4582	42202
岩手県	盛岡市	85.80	10.78	96.57	72.5	121	121	103732	13029	116761	103968	13059	117026
秋田県	秋田市	62.51	8.76	71.27	46.3	54	142	33992	4765	38757	88555	12413	100968
山形県	山形市	65.44	9.80	75.23	56.1	64	228	41587	6226	47813	149097	22320	171418
	鶴岡市	61.28	6.75	68.03	72.7	26	262	15833	1744	17578	160311	17662	177974
	酒田市	62.43	8.56	70.99	62.3	26	262	16132	2211	18343	163333	22385	185718
新潟県	新潟市	102.83	7.86	110.69	74.7	34	171	34760	2656	37416	175630	13419	189049
	長岡市	119.11	13.95	133.06	98.1	61	431	72656	8511	81167	513355	60137	573493
	上越市	58.16	3.01	61.17	57.6	190	1012	110707	5728	116435	588559	30451	619010
富山県	富山市	64.46	7.16	71.62	53.8	60	221	38473	4274	42747	142452	15824	158276
	高岡市	46.51	6.72	53.23	32.5	60	221	27903	4032	31935	102776	14851	117627
石川県	金沢市	71.48	6.45	77.93	51.7	123	385	87917	7937	95854	275186	24844	300031
	小松市	59.42	4.85	64.26	73.8	123	385	73080	5959	79040	228748	18653	247401
福井県	福井市	78.22	7.46	85.67	62.5	137	371	107156	10215	117371	290181	27662	317843
長野県	長野市	89.30	14.49	103.79	86.8	102	273	90752	14728	105480	243778	39563	283341
	松本市	35.08	4.68	39.76	36.6	140	192	48951	6524	55476	67361	8978	76339
	上田市	26.54	4.41	30.95	29.9	140	192	37028	6157	43185	50953	8473	59426
鳥取県	鳥取市	41.16	7.28	48.44	36.8	125	455	51451	9104	60555	187283	33138	220420
島根県	松江市	59.12	9.24	68.36	63.3	23	236	13557	2119	15676	139528	21806	161334

ケース１）　平均降雪パターン
降雪が観測された場合の平均的な降雪強度を想定する。
ここでは、１ヶ月間の降雪の深さを１ヶ月間に降雪が観測された累計時間で割って算出した。

ケース２）　最大降雪パターン
1996年10月から1997年3月の間に最大１時間降雪深が観測された降雪パターンを想定する。
最大の時間降雪強度が観測された時間の前後も含めた３時間の降雪強度の降雪を想定している。

1.4. 未利用エネルギーの充足率

以上の結果を踏まえ、消融雪に必要なエネルギー量と都市ごとの利用可能な未利用エネルギー量の試算結果の比較を行った。この結果、必要エネルギー量との比較図を、平均的な降雪については図-4.1 に、最大降雪については図-4.2 に示す。さらに、詳細なデータを表-4.4 に示す。

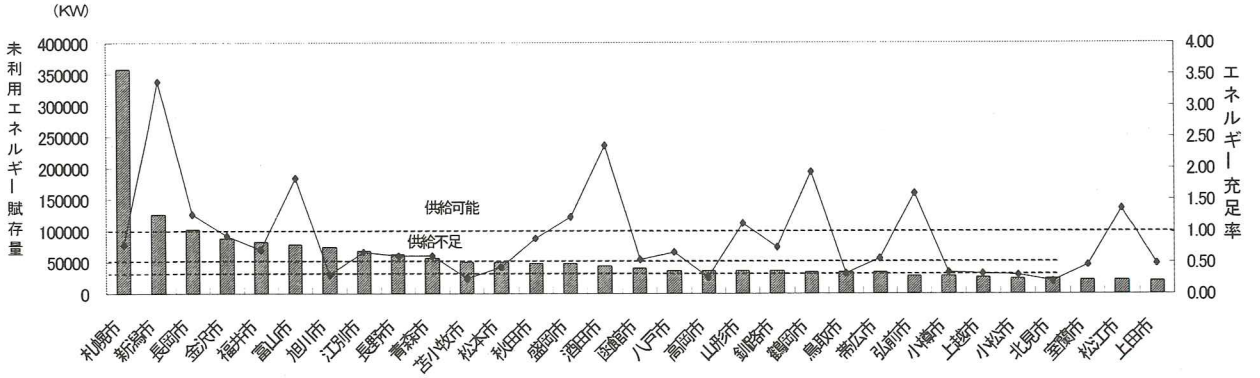


図-4.1　未利用エネルギー賦存量とエネルギー充足率（平均降雪時）

平均降雪パターンの場合には、９都市で供給可能で全エネルギーを供給すれば、必要なエネルギーを供給可能である。最大降雪パターンにおいては全ての都市で、供給可能エネルギー量が必要エネルギー量を満たすことが出来ない。しかし、最大降雪パターンの場合においても、需給率が 50％以上（１日分のエネルギーを蓄積すれば対応可能）な都市が５つ、需給率が 33％以上（２日分のエネルギーを蓄積すれば対応可能）の場合が６都市存在している。

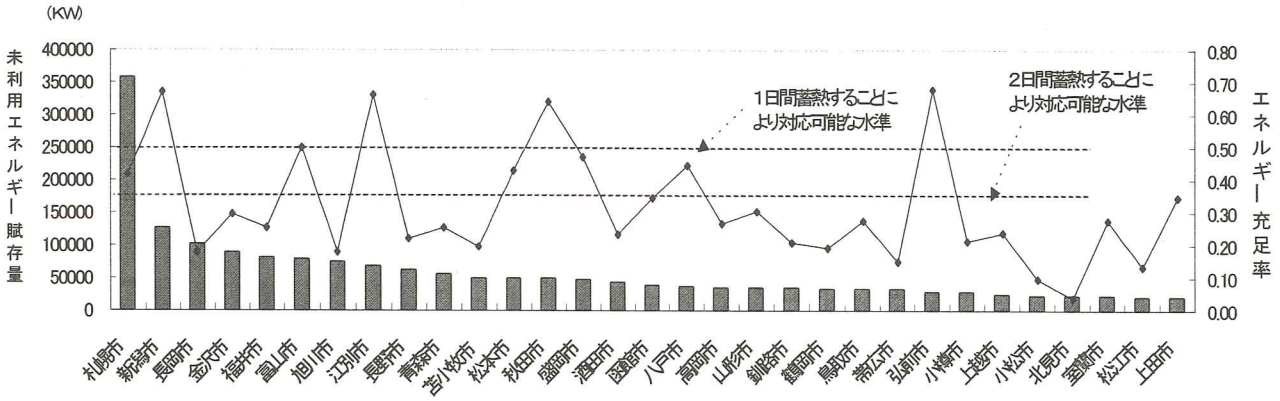


図-4.2　未利用エネルギー賦存量とエネルギー充足率（最大降雪時）

表4.4　都市別の消融雪必要エネルギーの充足率

道府県名	都市名	消融雪必要エネルギー		未利用エネルギー量賦存量		エネルギー充足率(注1		必要蓄積日数（注2）			
		平均降雪時 (KW)	最大降雪時 (KW)	全エネルギー (KW)	熱量上位2種類 (KW)	平均降雪時	最大降雪時	全エネルギー		熱量上位2種類	
								平均降雪時	最大降雪時	平均降雪時	最大降雪時
		A	B	C	D	(=C/A)	(=C/B)	(=A/C)	(=B/C)	(=A/D)	(=B/D)
北海道	札幌市	456634	864548	358684	263459	0.79	0.41	1.27	2.41	1.73	3.28
	函館市	74099	115924	40312	30642	0.54	0.35	1.84	2.88	2.42	3.78
	小樽市	85364	134402	28683	20147	0.34	0.21	2.98	4.69	4.24	6.67
	旭川市	248934	414626	74897	42725	0.30	0.18	3.32	5.54	5.83	9.70
	室蘭市	50405	83097	22778	13845	0.45	0.27	2.21	3.65	3.64	6.00
	釧路市	133903	133903	35980	25939	0.27	0.27	3.72	3.72	5.16	5.16
	帯広市	106795	121683	33467	14905	0.31	0.28	3.19	3.64	7.16	8.16
	北見市	81738	107097	25453	16499	0.31	0.24	3.21	4.21	4.95	6.49
	苫小牧市	217593	259236	50625	32025	0.23	0.20	4.30	5.12	6.79	8.09
	江別市	102736	102736	68271	52976	0.66	0.66	1.50	1.50	1.94	1.94
青森県	青森市	95639	224349	56725	33054	0.59	0.25	1.69	3.96	2.89	6.79
	八戸市	56128	82346	36643	19640	0.65	0.44	1.53	2.25	2.86	4.19
	弘前市	17990	42202	28745	21331	1.60	0.68	0.63	1.47	0.84	1.98
岩手県	盛岡市	116761	117026	50006	22242	0.43	0.43	2.33	2.34	5.25	5.26
秋田県	秋田市	38757	100968	47481	31196	1.23	0.47	0.82	2.13	1.24	3.24
山形県	山形市	47813	171418	35707	19539	0.75	0.21	1.34	4.80	2.45	8.77
	鶴岡市	17578	177974	34207	16678	1.95	0.19	0.51	5.20	1.05	10.67
	酒田市	18343	185718	43294	18641	2.36	0.23	0.42	4.29	0.98	9.96
新潟県	新潟市	37416	189049	126826	85966	3.39	0.67	0.30	1.49	0.44	2.20
	長岡市	81167	573493	102148	64402	1.26	0.18	0.79	5.61	1.26	8.90
	上越市	116435	619010	23097	15098	0.20	0.04	5.04	26.80	7.71	41.00
富山県	富山市	42747	158276	78816	42451	1.84	0.50	0.54	2.01	1.01	3.73
	高岡市	31935	117627	35828	17386	1.12	0.30	0.89	3.28	1.84	6.77
石川県	金沢市	95854	300031	88810	57576	0.93	0.30	1.08	3.38	1.66	5.21
	小松市	79040	247401	23272	16186	0.29	0.09	3.40	10.63	4.88	15.28
福井県	福井市	117371	317843	81166	51085	0.69	0.26	1.45	3.92	2.30	6.22
長野県	長野市	105480	283341	62260	28052	0.59	0.22	1.69	4.55	3.76	10.10
	松本市	55476	76339	48985	30549	0.88	0.64	1.13	1.56	1.82	2.50
	上田市	43185	59426	20515	9639	0.48	0.35	2.10	2.90	4.48	6.17
鳥取県	鳥取市	60555	220420	33374	16839	0.55	0.15	1.81	6.60	3.60	13.09
島根県	松江市	15676	161334	21449	15561	1.37	0.13	0.73	7.52	1.01	10.37
合　計		2849543	6762844	1818504	970220	0.64	0.27	1.57	3.72	2.94	6.97

注1）エネルギー充足率　＝　各都市に賦存する未利用エネルギー量　÷　消融雪に必要なエネルギー量
注2）蓄積に伴う熱損失は考慮していない。

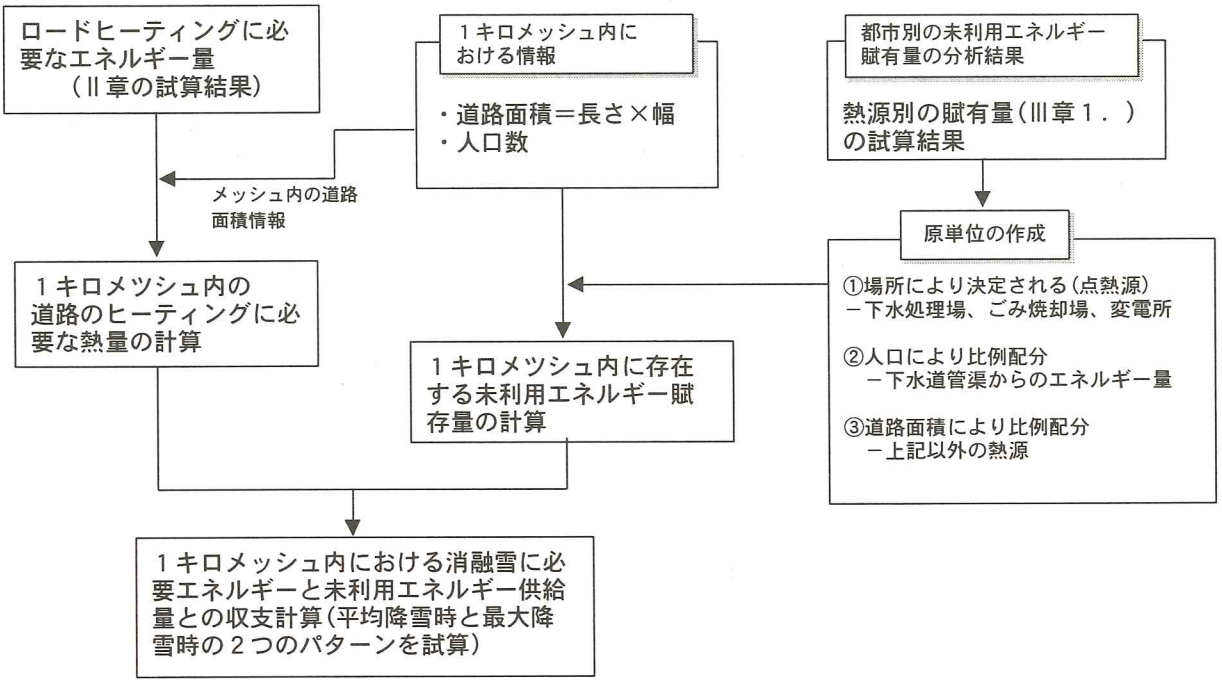
また、表-4.4に示したように、上位2種類の熱源からの供給量を数日蓄積するのみで、各都市の降雪を融雪可能なエネルギー量になっている。長野市や上越市をのぞけば、10日程度以下の蓄熱で融雪が可能である。この蓄熱期間は、従来の蓄熱槽でも、蓄熱保存中の熱損失が無視できる期間で、蓄熱による融雪システムの実現が可能と考えられる。

2. 都市別のメッシュ分析

都市全体でみても、未利用エネルギーが消融雪に必要なエネルギーと比較して、十分な賦存量があると推定できた。そこで、具体の実施個所を選定したり、より現実的な適用可能性を検討するため、各都市においてメッシュ分析を行うこととした。

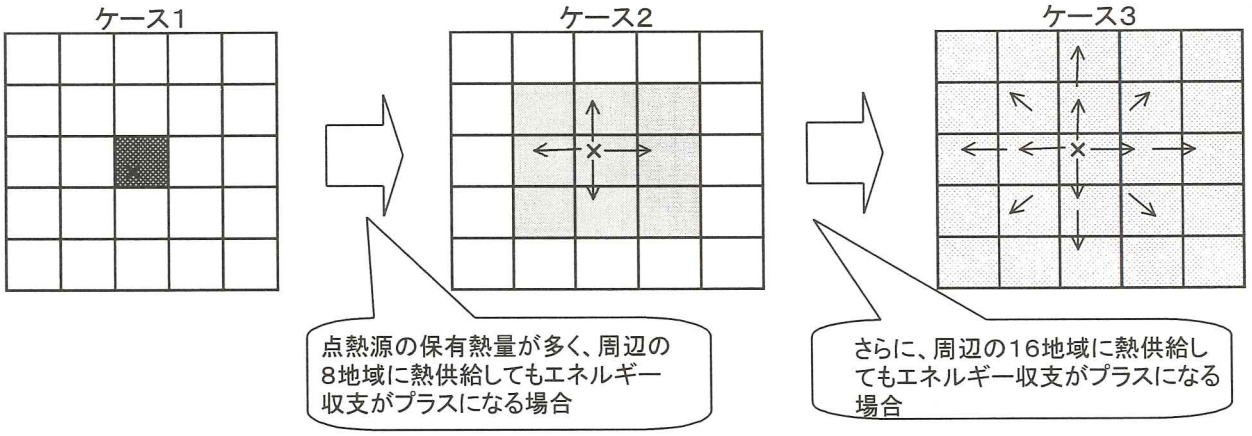
2.1. メッシュ分析の考え方

各都市を１ｋｍのメッシュに分割し、道路を含むメッシュについて、それぞれの区域内の未利用エネルギー賦存状況と道路の消融雪に必要なエネルギー量を次に示した手順により計算した。この分析により未利用エネルギーの適応可能性の高い地域を１キロメッシュの分解能で抽出することが可能である。



図－4.3　メッシュ分析の考え方

なお、下水処理場、ごみ焼却場、変電所の３つの熱源（点熱源）は、エネルギー供給可能量が多いため、近隣の地域にまでエネルギーの供給が可能である。本シュミレーションにおいては、以下に示した考え方に従って、未利用エネルギーを周辺地域にまで輸送すると設定して試算した。

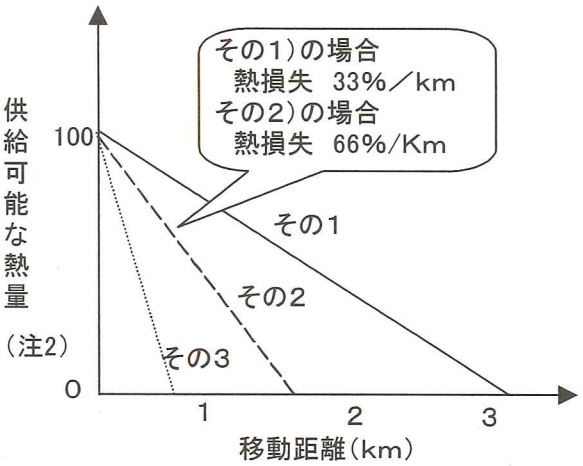


注）メッシュの間で熱の移動を行う場合、熱損失が20%発生すると設定している。

図-4.4　点熱源からの熱の移動の考え方

すなわち、図-4.4 に示すように、点熱源が存在するメッシュにおいて余裕がある場合には隣接する８メッシュに対して供給することとする。さらに余裕がある場合には、さらに隣接する 16 メッシュに供給することとする。

なお、点熱源から熱を移動する場合、大気中に一部の熱が放出され熱損失が発生する。さらにポンプの投入エネルギー量を考慮すると供給可能な熱量は距離が遠くなるにつれて小さくなる。断熱処理しなかった場合の熱損失は、図-4.5 に示したように 1 km あたり 33％以上の熱損失が発生する。ここでは、断熱を施すことによりメッシュ間の移動に伴う熱損失を 20％に抑えられることとした。



注1）温度10℃、外気温度0℃の条件で輸送した場合を想
注2）輸送する熱量から、輸送用熱量と熱損失を差し引い
正味利用可能性のある熱量（断熱は行っていない）
注3）輸送管の熱損失（Δh）により3つのケースを想定
その1）Δh＝50Pa／m
その2）Δh＝100Pa／m
その3）Δh＝200Pa／m

図-4.5　輸送距離と熱損失の関係[60)]

この場合、熱源のエネルギー量を 100 とすると、周囲のメッシュへ供給したときのエネルギー量は図-4.6 のようになる。このため、供給可能範囲は、周囲の１５メッシュが上限になる。

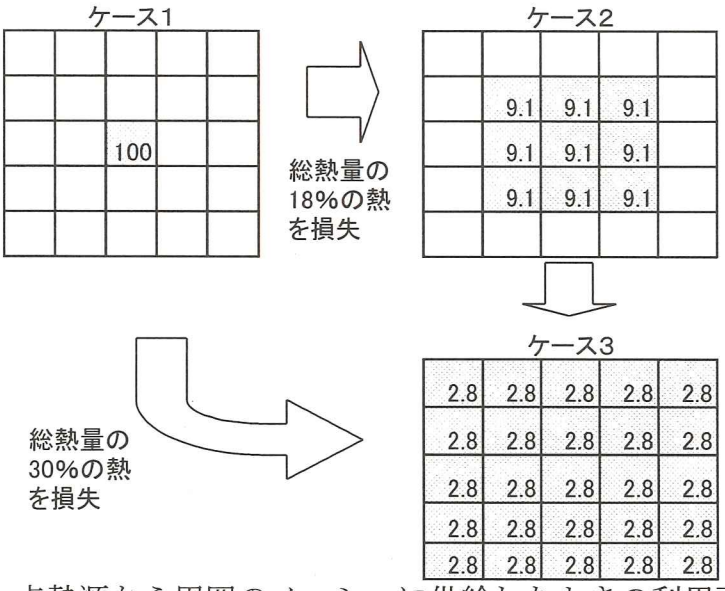
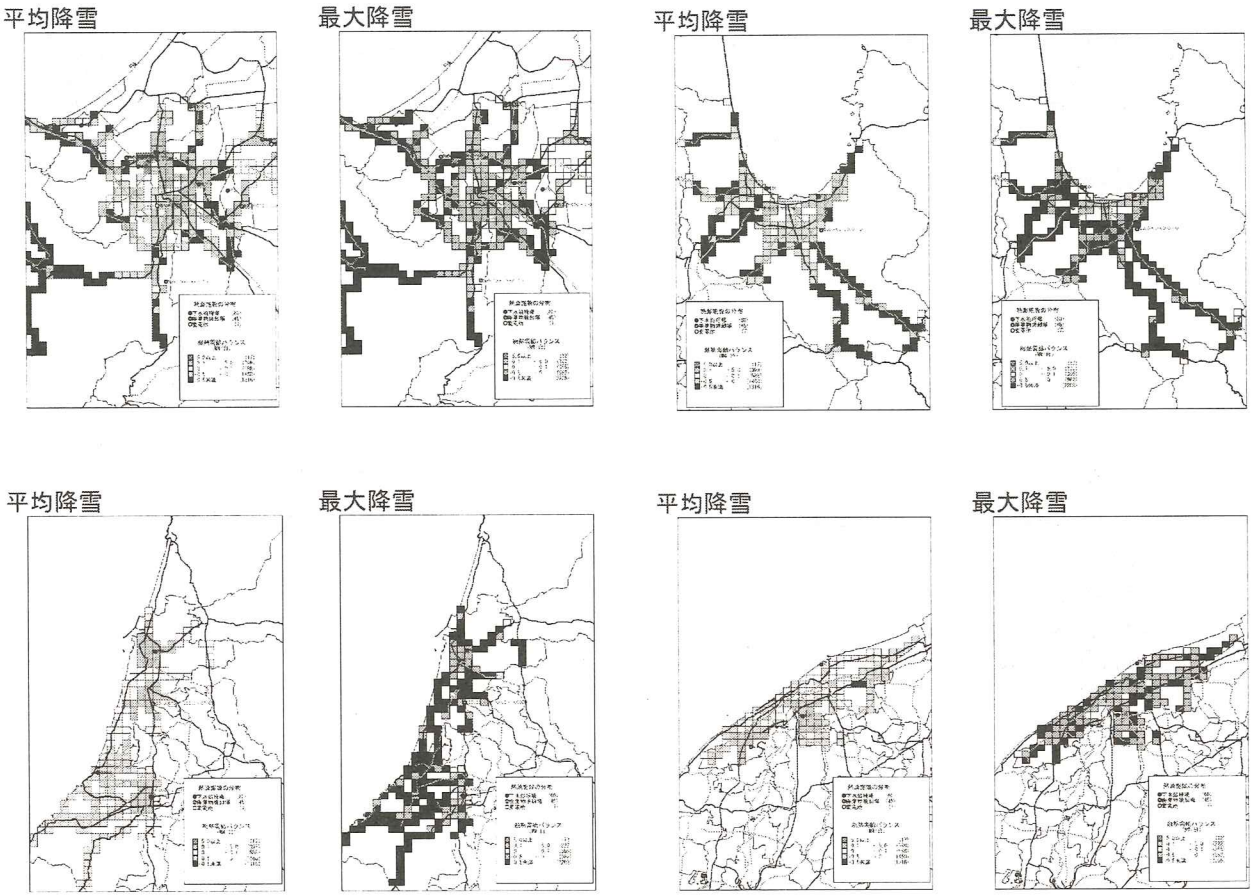


図-4.6　点熱源から周囲のメッシュに供給したときの利用可能熱量

2.2. メッシュ分析の結果

対象地域を１キロ単位のメッシュごとに分割し、それぞれのメッシュ内に賦存する未利用エネルギーと融雪に必要なエネルギー量との比較を行った。この算出結果の例を図-4.7 に示す。他の都市を含め、全分析結果を付録- 4 に示す。



(a) 札幌市　(b) 青森市
(d) 酒田市　(e) 新潟市

図-4.7　メッシュ分析結果の例

以上の結果から以下の事項が明らかとなった。

- 融雪に必要なエネルギー量をメッシュ内の未利用エネルギーのみで供給可能な地域は、点熱源が存在するメッシュと、人口密度が高く下水道管きょからのエネルギーが取得可能な都市部中心地域である。
- メッシュ内に下水処理場やごみ焼却場などの熱源が存在する地域では、そのメッシュ内の道路への降雪に十二分に対応可能であることが判明した。しかし、下水処理場やごみ焼却場は、市街地区の周辺地域に位置している。これらの熱源を有効に活用するためには、熱を移動するとともに蓄熱システムの活用を行うことが望ましい。
- 降雪量が少ない地域においては、市街地区においてエネルギー供給がプラスになっているメッシュが確認された。これは都心部の人口集中地域において、下水道管渠から取得した未利用エネルギーの供給が寄与している。
- 平均的な降雪には対応できるが、最大降雪には対応できないメッシュについては、蓄熱によって最大降雪に十分対応できるものと推定される。
- 具体の事業実施個所の選定にあたっては、時間降雪深や気温などの気象状況、

歩行者交通、道路交通などの調査を行い融雪施設の設置効果の検証を行うとともに、実施地点における熱供給可能施設の熱供給可能量、日変動、年変動などの調査、蓄熱槽設置可能個所の調査、地下水流の調査などを行う必要がある。

3. まとめ

以上の試算結果から以下の事項が明かとなった。

(1) 設定した平均降雪パターンの場合、31都市中9都市において融雪に必要なエネルギー量を全て未利用エネルギーで供給できる可能性がある。しかし、最大降雪パターンの場合、未利用エネルギーだけで融雪に必要なエネルギー量を供給可能な都市は存在しなかった。

(2) 最大降雪パターンの場合においても、需給率が50%以上（1日分のエネルギーを蓄積すれば対応可能）な都市が5つ、需給率が33%以上（2日分のエネルギーを蓄積すれば対応可能）の場合が6都市存在している。

(3) 1キロメッシュに分割して、融雪に必要なエネルギー量と取得可能な未利用エネルギーの需給バランスを推計した。この結果、以下の地域においては、エネルギー供給量がプラスとなった。

- 下水道管きょからのエネルギーが多く取得可能な都市の中心地域
- ごみ焼却場、下水処理場などの大規模な点熱源が存在する地域

５９）道路交通サンセス

６０）落藤 澄，寒冷地における都市排熱および未利用エネルギーの活用と評価，空気調和・衛生工学 第69巻 第10号

第V章　未利用エネルギー利用融雪システムの提案

都市に賦存する未利用エネルギーは、道路の融雪に十分匹敵する供給量があることが判明した。また、短期間の最大降雪強度に対応することはできなくても、平均的な降雪強度に対応できる地域があることから、蓄熱施設の利用によって道路融雪が可能になるものと推定される。

そこで、具体の融雪システムのイメージを提案し、そのフィージビリティを検討する。ここで、本システムを道路に適用する場合の最も大きな課題である融雪能力については、表-3.1 に試算結果が示されているように、必要放熱量は、従来の実績を大きく上回るものとなっている。例えば、上越市(高田)での高強度の降雪に対応する放熱量は 1kW/m² になり、従来の施設の放熱量(200W/m² 程度)を大幅に超えるため、放熱施設の設計可能性について検証した。さらに、本システムにおける蓄熱効果、簡単なコスト分析も行い、フィージビリティ及び効果を検討した。

1. 都市における未利用エネルギー利用融雪システム

これまでの検討結果から、図-4.1 に示すような、蓄熱装置を組み合わせた融雪施設を提案する。この融雪システムにおいては、蓄熱槽のエネルギーが最大降雪に対応する蓄熱量を維持できるよう、複数の熱源から常時蓄熱しておく。降雪が始まると、蓄積された熱エネルギーを利用して融雪運転を行うことになる。

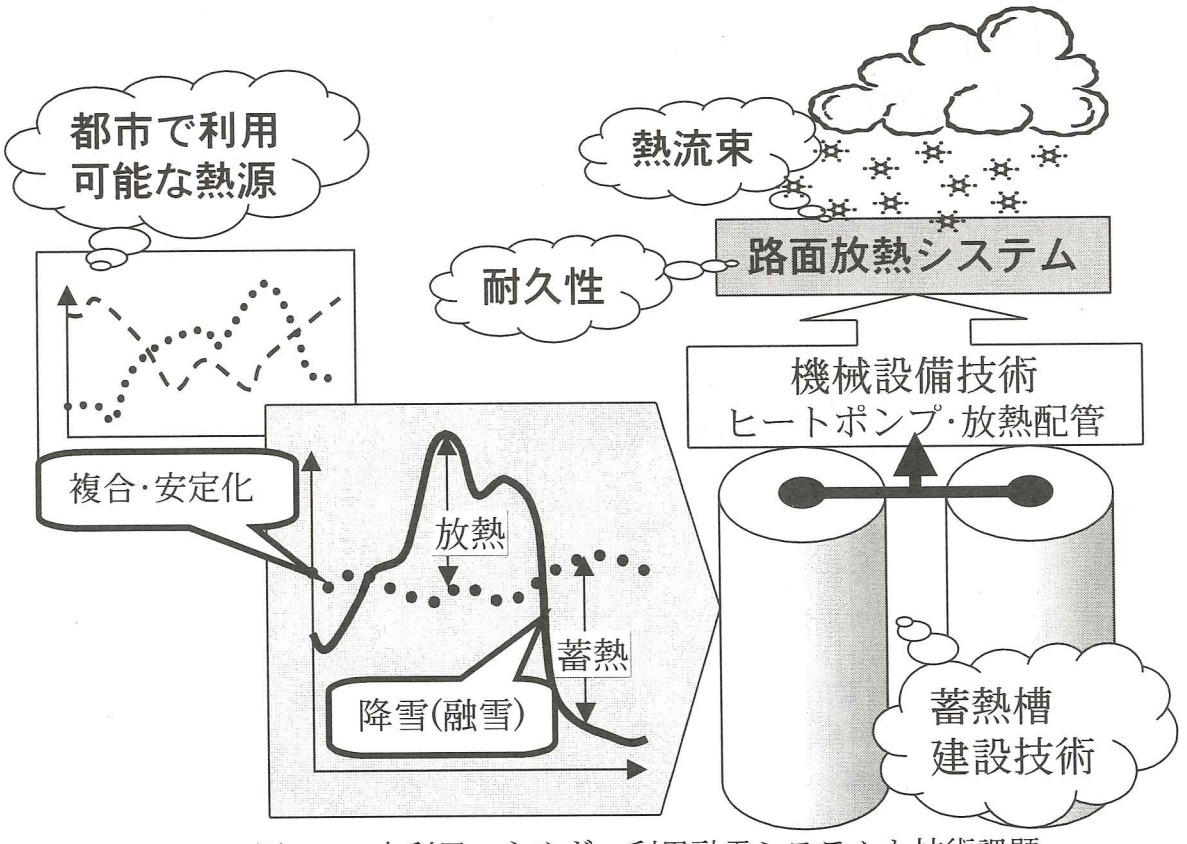


図-5.1　未利用エネルギー利用融雪システムと技術課題

非常に厳しい時期であっても、連続した降雪と次の連続した降雪との間には数日に渡って穏やかな気候が続く。この間に蓄熱して、次の降雪に備えることが可能である。そこで、蓄熱槽の規模は、各地域での連続する降雪の融雪に必要な熱量から、その間に熱

源から供給可能な熱量を差し引いた熱量を蓄積できるように設計する。ここで、「各地域での連続する降雪」とは、降雪が始まってから融雪が必要なくなるまでの間に融雪しなければならない降雪である。

蓄熱槽は、都市部での用地確保が困難であることから、都市公園などの狭い用地で建設可能なものとして、深礎形式の蓄熱槽を提案する。この蓄熱槽は、比較的小面積で設置できること、近年の深礎施工技術の向上によって施工単価が低下していること、熱交換パイプを縦に設置でき、万一破損した場合であっても、上部で破損配管をショートカットすれば復旧が容易であることから、従来の蓄熱槽に比べて有利と考える。

さらに、従来は、不等沈下を防止し、均一に充填するために、良質の砂などを蓄熱材としていたが、深礎方式では、下水処理施設などから発生する泥土などを利用した流動化処理土を蓄熱材として充填する。これによって、廃泥が活用でき環境に配慮した施工も可能になる。また、流動化処理土に発泡剤を混入することによって、気泡を多く含んで断熱効果に優れた蓄熱体を構築することも可能である。

このシステムを実現するためには、下記の項目が課題となる。

- 都市で利用可能な熱源を複合化し、熱供給の安定性、確実性を向上する技術
- 道路の融雪に十分な熱量を放熱する技術
- 大量の放熱による熱などに抗して、舗装の耐久性を確保する技術
- 低コストで大容量の蓄熱槽建設技術

熱源については、下水を中心とした熱源が有効であるとの結論が得られているので、耐久性を考慮した放熱についての検討と蓄熱の効果分析、システムのコスト分析によって、本システムのフィージビリティを検討する。

2. ロードヒーティングにおいて必要となる加熱温度

図-5.2 に示すような舗装断面を想定し、加熱による路面からの放熱量の変化を試算した。

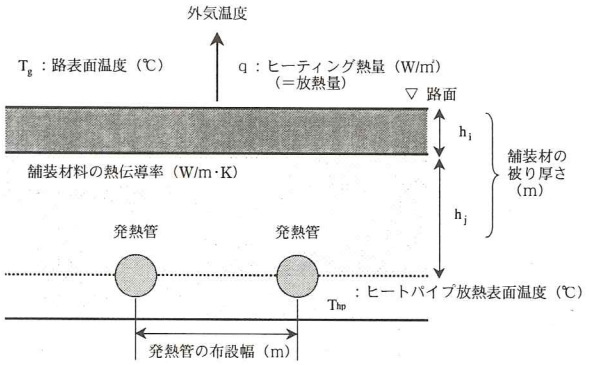


図-5.2　標準的なロードヒーティング施設の断面

2.1. 舗装部の熱抵抗

舗装部の熱抵抗は、舗装材料、ヒートパイプの布設ピッチ、埋設深さ等によって変化する。すなわち、舗装部の熱抵抗は次式で得られる。

$$R_{hpc\text{-}s} = \frac{\sum(h_i/\lambda_i)}{A_{ho} \times \eta}$$

ここに、$R_{hpc\text{-}s}$　：舗装部の熱抵抗（℃/W）

h_i　：舗装材料の厚さ（m）

λi　：舗装材料の熱伝達率（W/m･℃）

A_{ho}　：舗装１㎡当たりのヒートパイプ外表面積（㎡）
η　：布設幅と被りによる補正係数

ただし、

布設幅	＝0.15m	被り	＝0.05 mの時	η	＝1.17
	＝0.15m		＝0.075mの時		＝1.6
	＝0.20m		＝0.112mの時		＝1.7
	＝0.20m		＝0.125mの時		＝1.75

表-5.1　舗装材料の熱伝導率

舗装材料	熱伝導率（W/m･℃）
コンクリート	1.4
アスファルト	0.75
砂	0.6
モルタル	0.6
インターロッキングブロック	1.4
TX コンクリート	1.4
SF コンクリート	1.6

2.2. ヒーティング熱量

ヒーティング熱量は次式により求められる。

$$q = \sum \frac{\lambda_i}{h_i} \times \frac{A_{co}}{P} \times (T_{hp} - T_g) \times \mu$$

ここに、

q　：ヒーティング熱量（W/㎡）
λ　：舗装材料の熱伝導率（W/m･K）
h_i　：舗装材の被り（m）　　（m）
A_{co}　：ヒートパイプ放熱部面積（単位長さ当たり）（㎡/m）
P　：ヒートパイプ布設幅　　（m）
T_{hp}　：ヒートパイプ放熱表面温度（℃）
T_g　：路表面温度（℃）
μ　：ヒーティング補正係数（布設間隔と被りによる）

2.3. 放熱仕様及び必要温度水準の試算

Ⅰ章で分析した未利用エネルギーの過去の導入実績を参考にして、道路の舗装条件を表-5.2 の８ケースに分類した。それぞれの道路舗装と放熱管の設置条件の違いにより、融雪を行う上で必要となる温水の温度水準についての試算結果を示す。

表-5.2　放熱仕様によるタイプ分け

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
布設幅(cm)	15	20	10	15	20	10	20	25
舗装の厚さ(cm)	5	10	5	5	5	10	10	10
舗装材料種類	アスファルト	アスファルト	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート
補正係数	1.17	1.7	1.17	1.17	1.17	1.7	1.7	1.7

その他条件）　きさ　R=2.5センチで共通

試算の結果、図-5.3 に示すように、かなり強度の降雪にも対応できる放熱が可能であるとの結果が得られた。

- 配管温度(＝未利用エネルギーの温度)が 10℃の場合、放熱量は計算上、50～257W／㎡前後となっている。このように放熱条件（放熱部のかぶり厚さ、配管ピッチ等）により、放熱量は大きく変化する。比較的低温の未利用エネルギー活用するためには、放熱部門の開発検討が重要となる。
- 降雪強度が厳しい地域（放熱熱量が 250W/㎡以上）に導入するためには、配管温度を一定温度水準以上に保つことが必要である。温水が 20℃の場合、ケース 3 からケース 6 の施工条件で放熱量が 250W/㎡以上の水準となっている。
- アスファルト舗装では、加熱温度を 35℃まで上げても 300W/m² 程度であるが、コンクリート舗装では、ほぼ 2 倍の 600 W/m² 以上の放熱が可能である。
- 加熱体の設置間隔を狭くすれば放熱量は大きくできる。しかし、舗装コストが大きくなる欠点がある。
- 加熱温度を大きくすれば放熱量を大きくすることができる。しかし、温度応力による舗装のひび割れ等、耐久性の検討が必要である。

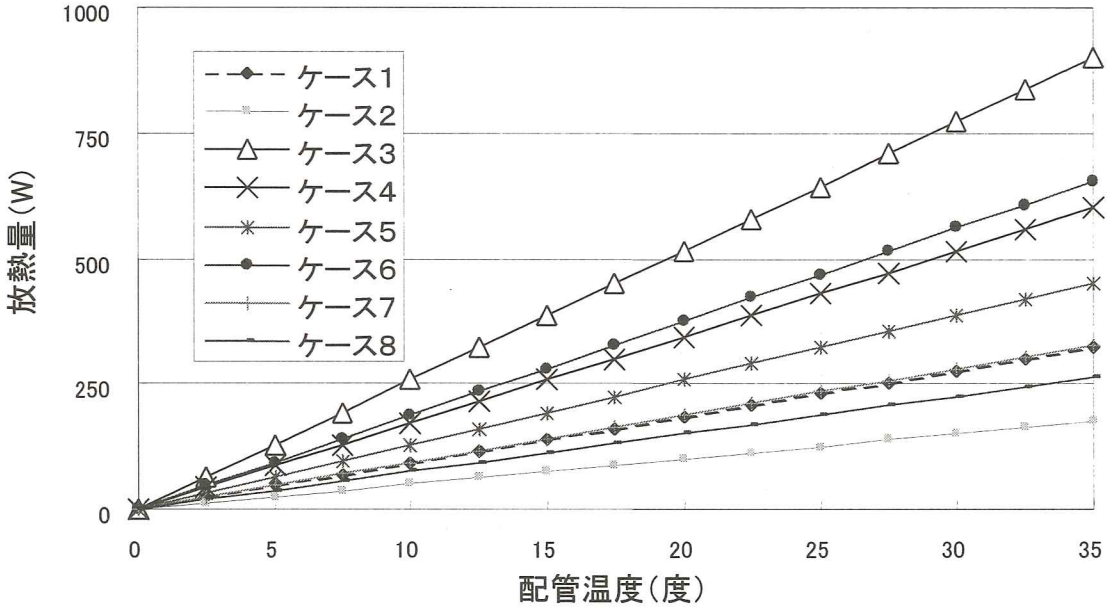


図-5.3 配管温度と放熱量

しかし、従来の加熱温度に比べて高温であることから、熱による舗装版内の応力分析を行って耐久性を確認するとともに、温度分布の分析を行って均一な温度分布を想定した本検討の妥当性を検証する必要がある。

さらに、加熱体の設置間隔を狭くすることはコスト上昇を招くので、放熱量を向上させる他の方法の可能性について検証する必要がある。この方法としては、過熱体と接し、熱を分散させるための鋼製のメッシュを埋設する方法が考えられる。

また、アスファルト舗装では、熱抵抗が大きいために、コンクリート舗装に比べて放熱量が 1/2 程度になっている。アスファルトの熱抵抗を低減することは困難であるが、骨材に鉄鋼スラグを用い、単一粒度のために発生する間隙にはモルタルを注入する半撓み性舗装にすることによって、熱抵抗を減じるなどの工夫を検討することが考えられる。ただし、比重が重いことなどによるコスト面等の欠点をおぎなうことが鍵になると考える。

3. コンクリート舗装版内の温度、熱応力

舗装版内の温度分布は、過熱体の近傍で熱く、不均一になっていることが想定される。このため、上記の放熱計算が適用できないことが想定される。また、被り厚さ 5cm で、加熱温度 35℃のときでも、路面に雪があるとすると舗装表面の温度は 0℃になる。この時、温度勾配が 7℃/cm と非常に大きく、舗装版内の温度が高く、表面が冷やされることによって、舗装表面に引っ張り応力が発生し、クラックが発生する恐れがある。

そこで、コンクリート内部の温度分布や熱応力についてコンピュータシミュレーションを行うこととした。さらに、模型実験を行って、シミュレーションの適切さを確認し、シミュレーションでは困難な、鋼製メッシュの放熱向上効果の検証を行うこととした。

3.1. シミュレーションによる分析

コンクリート舗装版内の所定位置に埋設された融雪ヒータの発熱によるコンクリート版内の温度分布および温度応力を所定条件においてシミュレーションし，それぞれの設定条件と温度分布，温度応力との関連性について検討した。

温度分布および温度応力の解析方法は，コンクリート舗装版を軸方向に無限長と仮定して 2 次元有限要素法（Finite Element Method, FEM）を適用した。温度分布および温度応力の解析条件（コンクリート舗装版の諸元，コンクリートの物性，境界条件等）は表-5.3 の通りである。なお、版縁は断熱境界としている。

1) シミュレーションの前提条件

表-5.3 シミュレーションの条件設定

内　容		検討対象値および検討ケース		備　考
コンクリート版の諸元	版厚（cm），t	30	1 水準	
	かぶり厚さ（cm），D	5，10	2 水準	純かぶり
	ヒータ間隔（cm），d	10，15，20	3 水準	ヒータ中心間距離
	ヒータ温度（℃），T	15，20，25，30，35，40，50	7 水準	ヒータ壁面にて一定
	ヒータ外径（cm）	1.5	1 水準	
境界条件	版表面温度（℃）	0.0	1 水準	
	風速（m/s）	5.0	1 水準	
	熱伝達率（W/m²・℃）	18.6	1 水準	風速に応じて，算出
	版裏面温度（℃）	15.0	1 水準	温度固定
コンクリート物性	熱伝導率，λ（W/m・℃）	1．4	1 水準	標準的な値
	熱拡散率，h^2（m^2/sec）	8×10^{3}	1 水準	標準的な値
	比熱，c（W・sec/kg・℃）	0.7×10^{3}	1 水準	標準的な値
	密度，ρ（kg/m^3）	2350	1 水準	標準的な値
	熱膨張率，α（1/℃）	10.0×10^{-6}	1 水準	標準的な値
	弾性係数，E（N/mm^2）	2.5×10^{4}	1 水準	標準的な値
検討総水準数			42 水準	

注）$h^2=\lambda/(\rho\cdot c)$，　　$h^2\fallingdotseq0.39\times10^{-6}\times\lambda$

シミュレーションの結果の一例を図-5.4 に、各ケースの表面温度について、表-5.4 に示す。

表-5.4 シミュレーションによる表面温度

かぶり厚さcm		5						10					
ヒータ間隔cm		10		15		20		10		20		25	
		最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
温度℃	15	7.5	7.8	6.4	7.2	5.5	7.6	5.6	5.6	5.0	5.1	5.1	5.4
	20	10.0	10.3	8.4	9.5	7.3	10.1	7.5	7.5	6.6	6.7	6.8	7.1
	25	12.5	12.8	10.4	11.8	9.2	12.6	9.3	9.3	8.2	8.3	8.3	8.9
	30	15.0	15.4	12.4	14.1	10.8	15.1	11.1	11.1	9.7	9.9	10.0	10.6
	35	17.4	17.9	14.5	16.4	12.5	17.6	13.0	13.0	11.3	11.5	11.7	12.4
	40	20.5	19.9	16.5	18.7	14.3	20.2	14.8	14.8	12.9	13.2	13.2	14.1
	50	24.8	25.6	24.8	25.6	19.9	26.8	18.5	18.5	16.1	16.4	15.0	16.0

2) 温度応力によるひび割れ

シミュレーションにおいては、５～10ｃｍの間隔で数十℃の温度差が発生することによって生じる温度ひび割れの有無の確認を行った。この結果を表-5.5 に示す。

温度ひび割れ指数が１以下になるとひび割れが発生する可能性がある。本シミュレーションの結果、計算上ヒータ温度が 20～25℃になるとひび割れが発生する可能性があることを示している。

表-5.5 シミュレーションによるひび割れ指数

かぶり厚さcm		5			10		
ヒータ間隔cm		10	15	20	10	15	20
温度℃	15	1.6	1.6	1.6	1.2	1.7	1.4
	20	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0
	25	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
	30	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7
	35	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	40	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5
	50	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4

注）表中の網掛けは、ひび割れ指数が1.0以下（ひび割れ発生の可能性がある）を示す。

なお、本シミュレーションでは、拘束条件を“外部拘束しない”として試算を行っている。一方、“両端を拘束”した場合、コンクリート舗装版の表面で発生する応力が打ち消され、表面ひび割れの発生が抑制される可能性がある。また、加熱温度によっては、舗装版全体が上方に反る方向に変形する力が加わるのに対し、通貨車両による過重が加わったり、表面が冷却されて収縮力が加わることなどによる応力の検討も必要と考える。以上のことから、ヒータ温度を 20℃以上として用いる場合には、今後、フィールド試験を実施し、耐久性について確認することが望ましい。

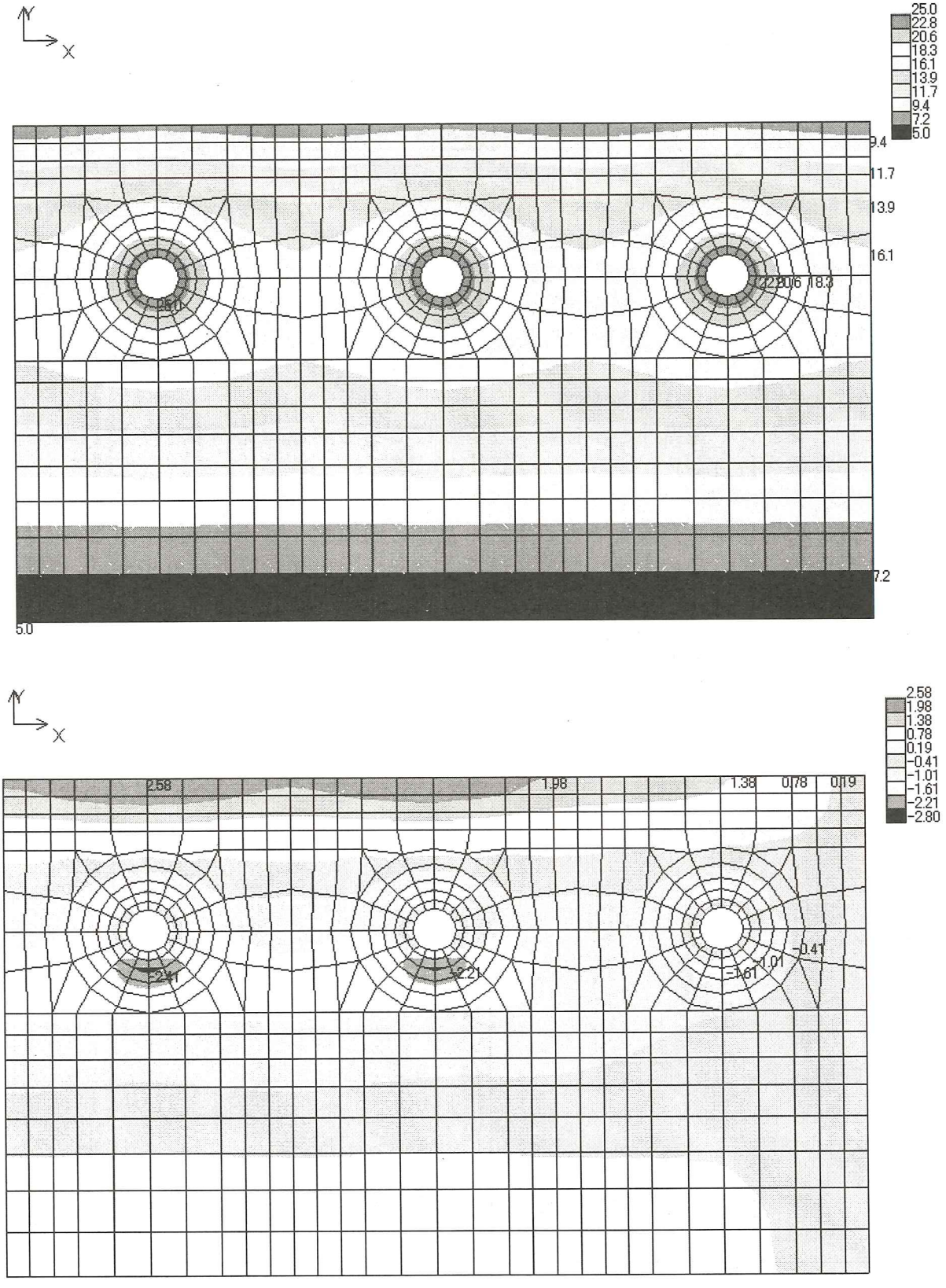


図-5.4　シミュレーション結果(被り 10cm、ヒータ間隔 20cm、加熱温度 20℃)
上段　温度分布
下段　応力分布

3) まとめ

以上の結果、以下の事項が明らかになった。

- かぶり厚が薄くなると、表面の温度が大きくなって、融雪能力が高くなる。かぶり厚さ以外が同一条件であっても、2～10℃程度の差が発生している。
- かぶり厚さ一定として、ヒータ間隔を狭くしたときの表面温度の上昇は大きくなっている。しかし、ヒータ間隔が大きくなるにつれて、同一表面上での最大温度と最小温度との差が大きくなる傾向があり、ヒータ間隔を狭くした方が融雪能力は高くなり、むらが出ないと想定される。
- 加熱体設置間隔を狭くすれば表面温度のむらが少なく、ひび割れの発生が懸念される25℃を超える加熱温度30℃以下であれば1℃程度の差になっており、均一と推定して得られた放熱量の結果(図-5.3)は妥当なものと推定される。

3.2. 実験による舗装版内の温度分布

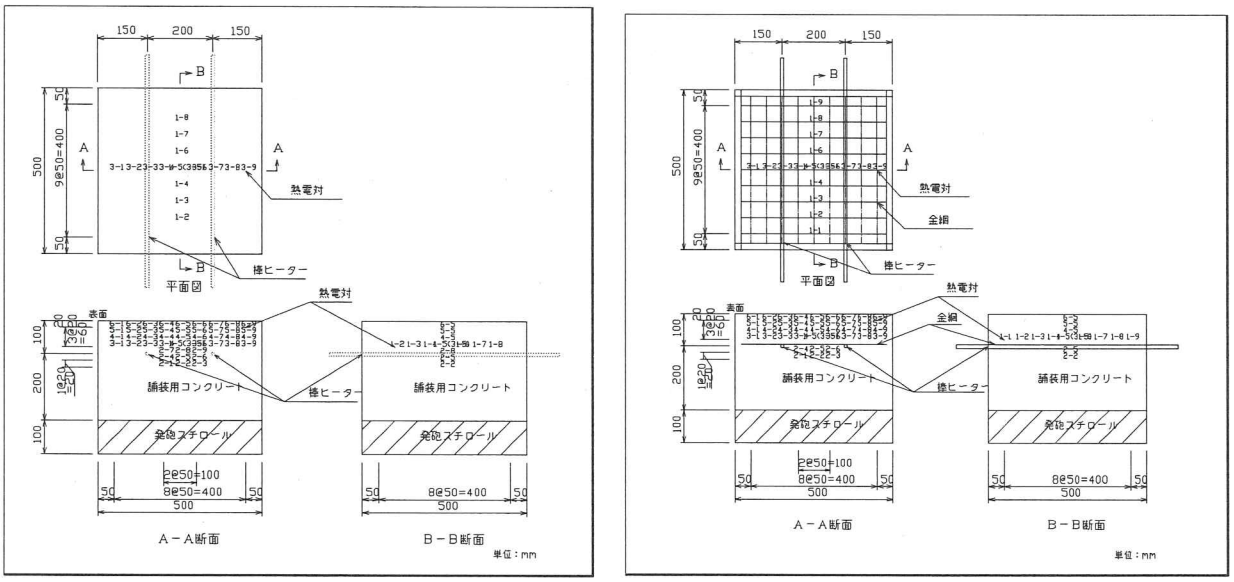
シミュレーションの妥当性と、金属メッシュによる放熱量向上効果を検証するため、模型による実験を行った。

1) 供試体及び実験条件

模型では、実際の舗装を模擬することとしたが、温度センサーを設置するために、粗骨材の粒径を小さくした。実験に使用したコンクリートの配合設計を表-5.6に、試験体の構造を図-5.5に示す。

表-5.6　コンクリートの配合

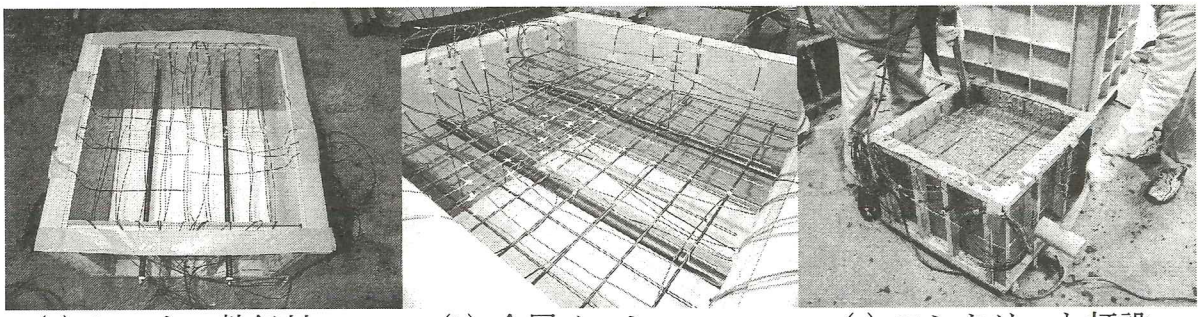
粗骨材粒径	5～15mm
呼び強度	35
スランプ	6.5
水セメント比	43.0%



(a) 供試体A　　(b) 供試体B

図-5.5　実験供試体

供試体作成時の状況を、写真-5.1 に示す。



(a) ヒータ、熱伝対　(b) 金属メッシュ　(c) コンクリート打設

写真-5.1　供試体の製作

加熱条件は、コンピュータシミュレーションにおいて 20～25℃でクラックの発生が懸念されたので、15～30℃で計画した。外気温度は、凍結防止を想定して 0℃に設定した。しかし、30℃でもクラックの発生が見られなかったことから、40℃まで昇温することとした。また、外気温度が 0℃の状態では、加熱条件 25℃での試験体表面の温度が 6℃以上に達したことと、温度勾配が少ないためにクラック発生の検証ができないことから、外気温度を下げて、表面温度を 0℃近くに下げた条件を加えた。

実験状況を写真-5.2 に示す。また、実験終了時のクラック発生状況を写真-5.3 に示す。

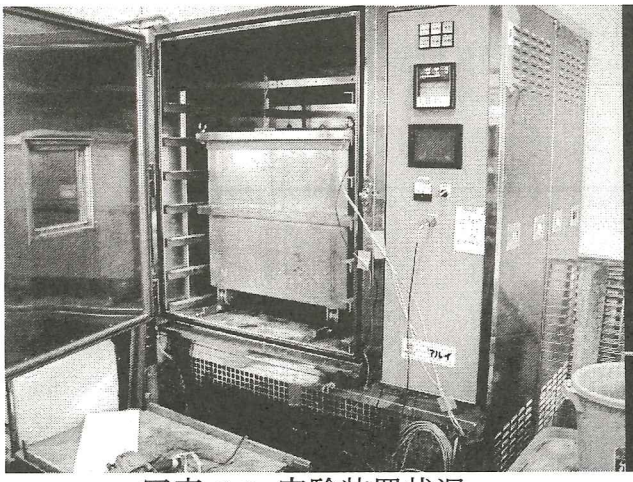


写真-5.2 実験装置状況

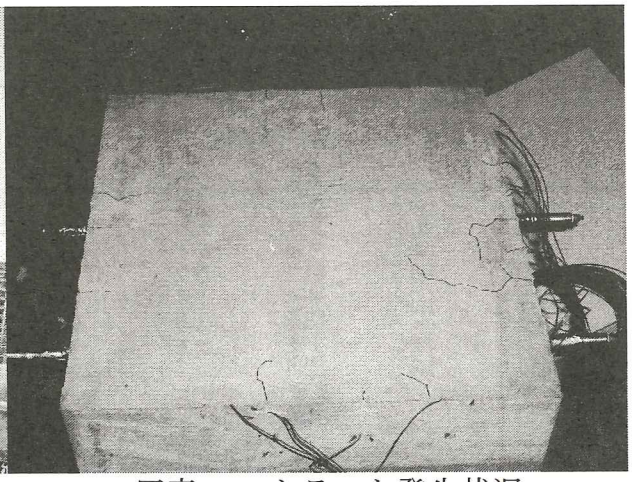


写真-5.3 クラック発生状況

なお、温度センサーは白金熱電対を用い、表面から 20mm 間隔で設置した。横方向の間隔は、30mm とした。

2) 実験結果

(1) 温度分布

図-5.4 に相当する実験結果を図-5.6 に示す。

表面直下 20mm の温度は 5.6～8.7℃、表面温度は 2.4～5.1℃になっている。シミュレーション結果の表面温度は 6.6～6.7℃となっているが、図-5.4 で表面直下 20mm 付近の温度が 9℃前後になっていること、実験では図の右側から冷気が循環しているために冷却効果が大きいことを考慮すると、シミュレーション結果と実験結果は良く一致しているといえる。

(2) メッシュの効果

加熱体の間隔を狭くすると、熱の供給量が大きくなることに加え、過熱体の間での温度低下が少ないことが、放熱量の向上に寄与していると推定される。また、舗装面へ向けての放熱部の面積を広げるために、過熱体を逆三角形の断面にした事例で、熱効率が向上したとの報告もある。

そこで、加熱体に写真-5.1 の(b)に示すような金属メッシュを取り付けた場合の実験を行った。この場合の温度分布を図-5.7 に示すが、図-5.6 と比較して、ヒータの中間部の温度が表面に至るまで、1℃以上の上昇が見られる。これは、ヒータ間隔を狭くした場合に相当しており、放熱効果向上方策として有効性が確認できた。

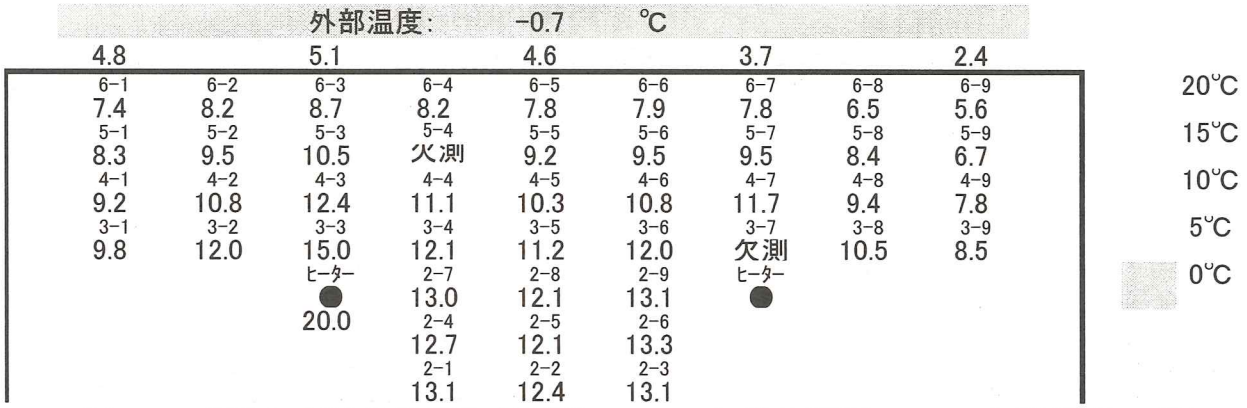


図-5.6　実験における温度分布(被り 10cm、加熱体間隔 20cm、加熱温度 20℃)

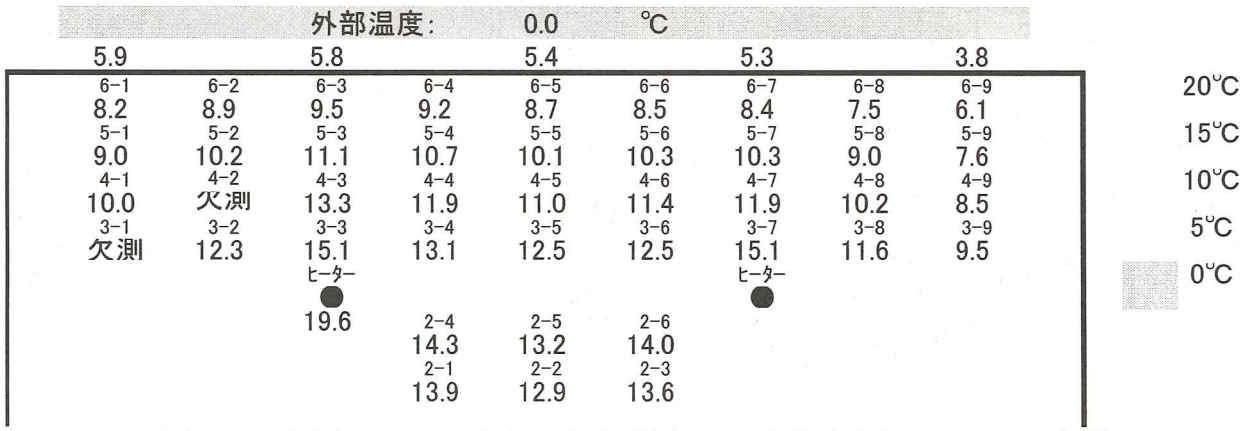


図-5.7　金属メッシュを設置した場合の温度分布(図-5.6 と同一条件)

また、メッシュを設置すると、舗装体の強度も高くすることができる。さらに、実際の舗装用コンクリートで使用される粗骨材の最大粒径 40mm にも対応可能な 50mm メッシュで効果が得られたことから、実用性も高いと考える。

3.3. 結果

シミュレーションによる温度分布と実験による温度分布は良く対応しており、シミュレーションの精度が高いことを確認できた。また、表面温度のばらつきが少ないことから、均一と想定した放熱量の計算で、十分実用的な放熱量の予測が可能であるといえる。

シミュレーションにおけるひび割れ指数は、養生時の温度応力に対するものであるため、養生の完了したコンクリートに対するものとしては安全側に過ぎている。しかし、コンクリート舗装であり、加熱体を設置しているため、打ち換えコストが大きく、高い耐久性が求められていることから、25℃程度を加熱の上限とすることが現実的と考える。

4. 蓄熱システム導入の効果分析

未利用エネルギーは、いずれも、時刻などによって利用可能熱量が変動し、大きいときでも想定される強度の降雪を融雪するために必要な熱量を供給する熱量がない。しかし、降雪は連続するものでなく、長期的には降雪を融雪できる熱量を有する場合があり、降雪の合間に蓄熱すれば、未利用エネルギーの活用による融雪が可能になると想定できる。また、単一の熱源では、賦存エネルギーの 1/2 以下である都市が多いが、上位の 2 熱源では、6 割以上になり、都市によっては 8 割を占めることがある。

このように、未利用エネルギーを利用して、強度の大きい降雪に対応する上で、蓄熱システムを適用することが有効であると考えられる。また、蓄熱システムを導入すると、複数の熱源から熱を供給できるため、複数の熱源の熱を利用することが容易になる。このような蓄熱システムを導入するシステムに関し、以下の 2 点についてフィージビリティスタディーを行う。

- 導入効果の高い地域の抽出の考え方
- 蓄熱システムの導入上のメリットと課題

4.1. 導入効果の高い地域の抽出の考え方

本調査結果から、最大降雪強度になると多くの地域において融雪に必要となるエネルギーの供給量が不足することが明かとなった。しかし、図-5.8 に示したような蓄熱槽システムを導入することによって、最大降雪強度の降雪時でも対応可能な地域が存在している。

最大降雪強度と降雪の頻度によって降雪パターンを分類することが可能である。この 2 つにより地域を分類した場合、蓄熱システムの導入効果が大きいのは、図-5.9 に示した領域に属す地域である。さらに未利用エネルギーの賦存量を考慮することによって、適応可能な地域の選定が可能である。

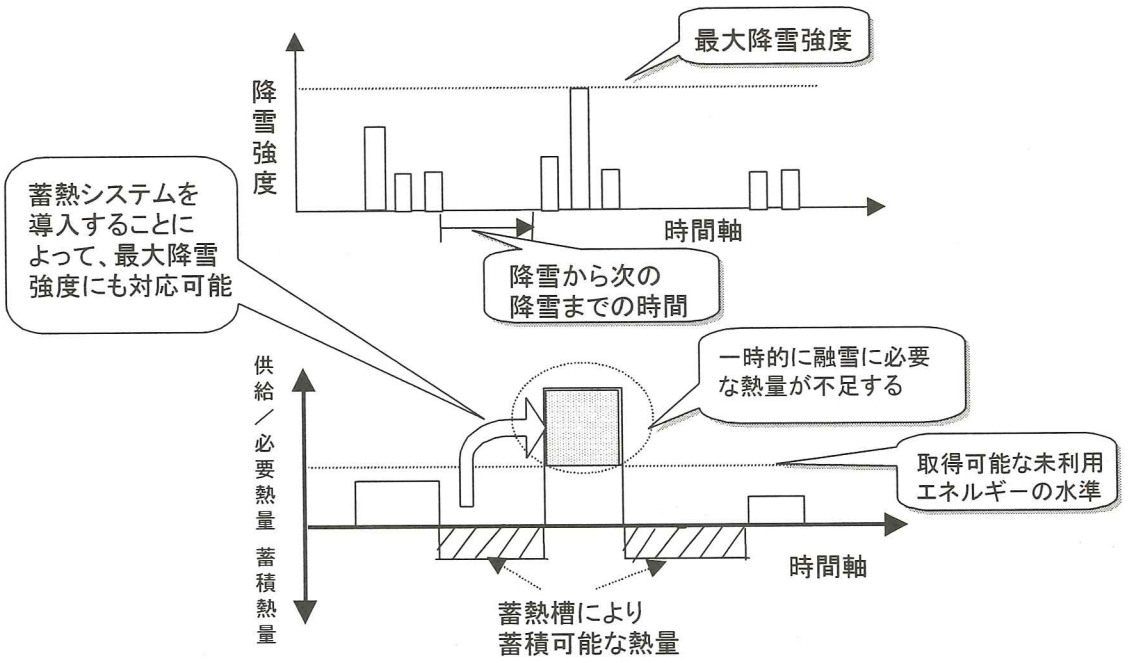


図-5.8 降雪休止期間における蓄熱の効果

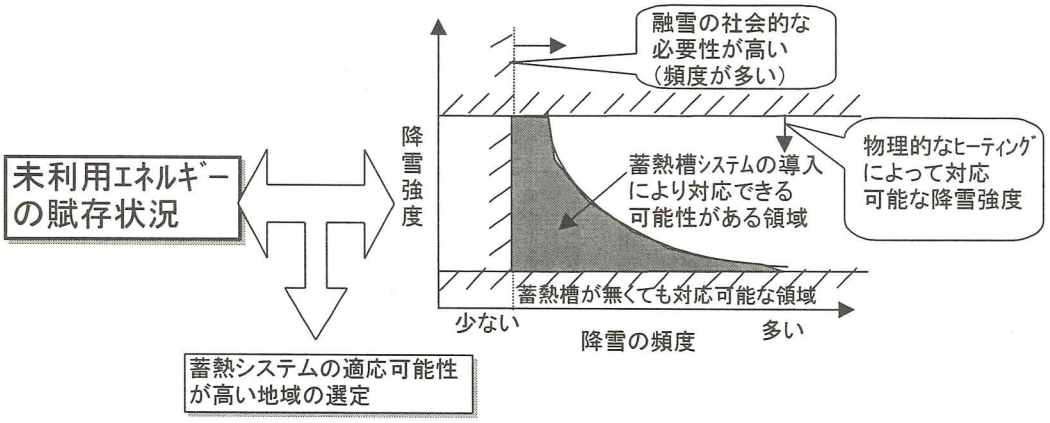


図-5.9 蓄熱システム導入効果の高い地域

このように、雪が断続的に降る特性を考慮すれば、降雪状況に応じた蓄熱装置導入効果によって、図-5.10 に示すように、適応可能性のある地域を４種類に分類することが可能である。各領域は、降雪パターンと取得可能な未利用エネルギーのレベルによって、図-5.11 に示すように分類される。この中で領域Ⅱ（平均降雪パターンにおいてエネルギー供給が充足しているが、最大降雪パターンではエネルギー供給が不足するケース）において、蓄熱槽システムを導入することにより効果が得られる可能性が高い。都市別のメッシ

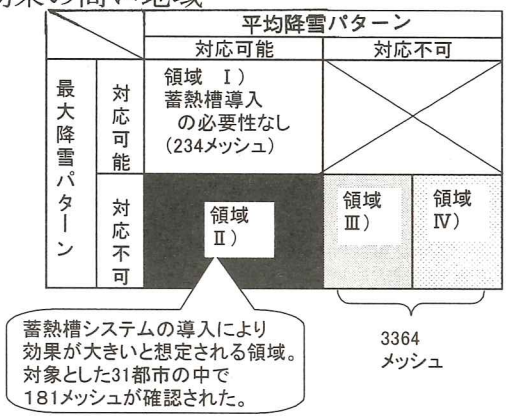


図-5.10 蓄熱装置導入効果の分類

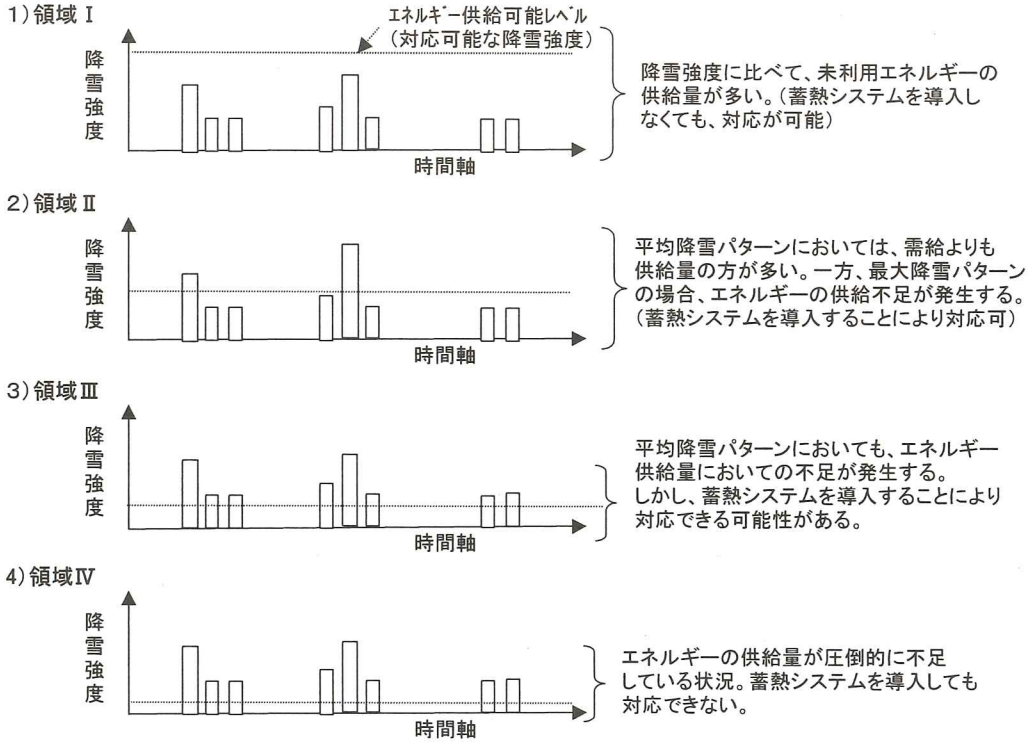


図-5.11 降雪パターンと熱源特性による蓄熱装置導入効果の分類

ュ分析結果により、領域Ⅱの地域が全国に約 180 メッシュ存在することが明らかとなった。

また、今回は十分なデータが得られなかったことから、領域Ⅲについては特定することができなかった。今後、各メッシュの詳細なデータを得ることができれば、効果が期待できる領域Ⅲの範囲が特定できるものと考える。

したがって、31 都市の全 3779 メッシュのうち、415 メッシュにおいて未利用エネルギーを利用した融雪施設が効果的であると推定されたが、下水道熱の利用効率の向上など、施設効率の向上によって、さらに多くの地域において適用が可能になると推定される。

4.2. 蓄熱システムの導入の効果と課題

未利用エネルギーを活用した蓄熱システムの導入によって、以下に示した導入効果が期待される。

①コストの低減
　未利用エネルギーを用いるため、ランニングコストが安価となる。

②環境負荷の低減
　化石燃料使用量が減少するため地球温暖化ガスの発生を抑制可能である

③積雪による社会経済のマイナス影響の低減
　積雪に伴う交通の混乱の回避や除雪車の出動に伴って発生する交通渋滞の回避により、積雪に伴う社会地域へのマイナスの影響を緩和することが可能となる。

一方、蓄熱システムの導入上のデメリットとしては、イニシャルコストが高くなることが挙げられる。ここでは蓄熱システムを導入のメリットについて検討した後、今後の蓄熱システム導入上の課題についてまとめる。

1) コスト

融雪施設との比較対象となる機械除雪に関わる年間のランニングコストを図-5.12 の計算フローにより試算する。

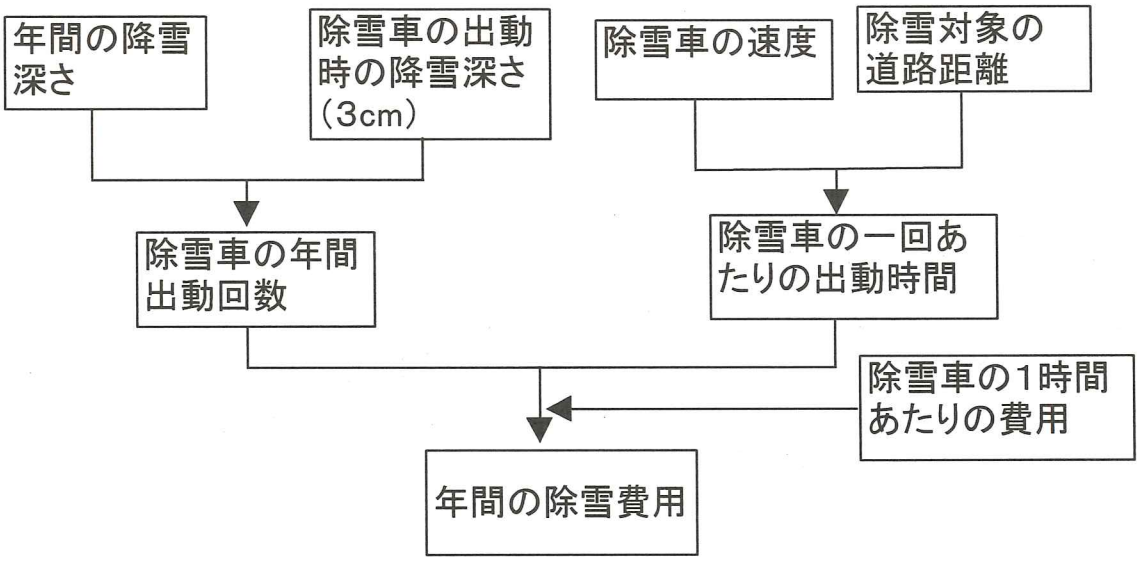


図-5.12　機械除雪費用の推計フロー

このフローによって試算した除雪費用を表-5.7 に示す。

表-5.7　都市別の年間除雪費用試算結果[61)]

道県名	都市名	年間降雪深（cm/年）（A）	道路延長km）（注1（B）	平均車線数（注2）（C）	年間出動回数（回/年）（注3）（D=A÷3）	1出動作業時間（時間/回）（注4）（E=B÷速度×C）	年間総出動時間（F=D×E）	年間除雪費用（万円）（注5）（G=F×単価）	道路面積（万㎡）（G）	除雪投資単価（円/㎡）（H=F÷G）
北海道	札幌市	372	146.8	5.1	124	149	18430	62663	278.686	225
	函館市	253	28.4	3.8	84	21	1806	6141	40.158	153
	小樽市	536	45.9	3.0	179	27	4862	16531	51.023	324
	旭川市	736	78.8	3.2	245	50	12212	41520	93.331	445
	室蘭市	106	23.1	4.0	35	19	657	2235	34.876	64
	釧路市	85	38.9	3.1	28	24	693	2355	45.835	51
	帯広市	150	25.4	3.6	50	18	920	3127	34.488	91
	北見市	506	33.7	3.1	169	21	3554	12083	39.508	306
	苫小牧市	87	71.4	4.2	29	60	1726	5869	111.601	53
	江別市	629	29.3	3.4	210	20	4122	14016	36.865	380
青森県	青森市	500	88.7	2.9	167	52	8693	29556	97.797	302
	八戸市	54	45.7	2.9	18	26	473	1608	49.252	33
	弘前市	500	16.2	3.0	167	10	1630	5543	18.341	302
岩手県	盛岡市	153	72.5	3.2	51	46	2334	7934	85.795	92
秋田県	秋田市	187	46.3	3.6	62	33	2078	7066	62.51	113
山形県	山形市	221	56.1	3.1	74	35	2571	8741	65.436	134
	鶴岡市	146	72.7	2.2	49	33	1590	5407	61.275	88
	酒田市	146	62.3	2.7	49	33	1620	5509	62.43	88
新潟県	新潟市	72	74.7	3.7	24	55	1316	4475	102.831	44
	長岡市	395	98.1	3.2	132	64	8364	28438	119.108	239
	上越市	450	57.6	2.7	150	31	4653	15819	58.158	272
富山県	富山市	139	53.8	3.2	46	34	1593	5416	64.458	84
	高岡市	139	32.5	3.8	46	25	1149	3907	46.505	84
石川県	金沢市	98	51.7	3.7	33	38	1245	4234	71.477	59
	小松市	98	73.8	2.1	33	32	1035	3519	59.415	59
福井県	福井市	107	62.5	3.3	36	42	1488	5059	78.216	65
長野県	長野市	172	86.8	2.7	57	48	2730	9284	89.296	104
	松本市	67	36.6	2.6	22	19	418	1421	35.084	40
	上田市	67	29.9	2.4	22	14	316	1075	26.538	40
鳥取県	鳥取市	60	36.8	3.0	20	22	439	1493	41.161	36
島根県	松江市	27	63.3	2.5	9	32	284	965	59.122	16
						合計	95002	323008	2121	

注1）都市部周辺の国道を対象としており、直轄及び道県の管轄している道路の一部が対象となっている。
注2）車線数は、1車線の幅員を3．75mとした場合の平均車線数
注3）降雪深さが3cmで1回出動するとして設定（規定上は、5ｾﾝﾁであるが、実績データから推定した）
注4）平均除雪速度は、5km/時とする
注5）1回の出動に、1車線あたり、除雪グレーダ1台（単価 2万4000円/時・台）と除雪トラック0．5台（2万円/時・台）を想定

各地域の除雪費用は、図-5.13 に示すように、30~750 円／㎡となる。この試算では、除雪対象を都市部周辺の国道に限定しているため、各国道工事事務所の除雪費用よりも小さな値となっている。また、平均速度が実際よりも小さくなっており、算出方法の改良が必要と考える。

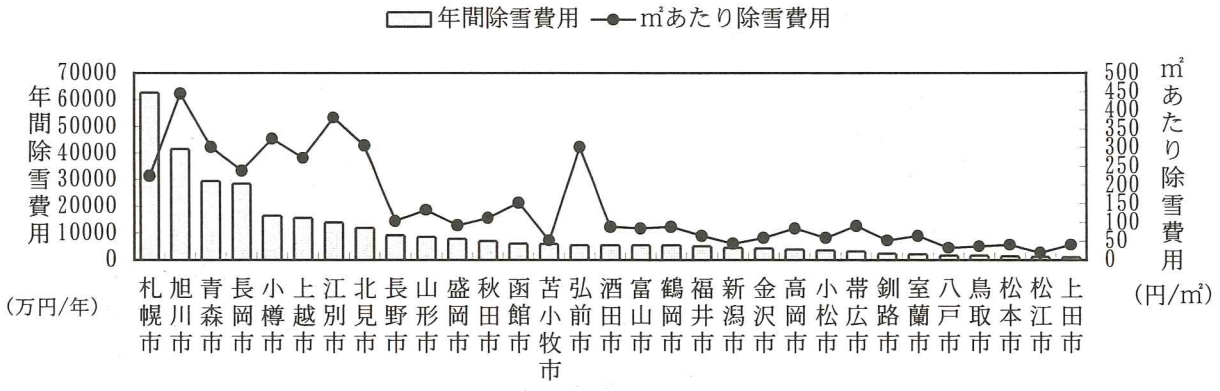


図-5.13　都市別の除雪費用の試算結果

電熱線を用いたロードヒーティングの消融雪費用と、ポンプやヒートポンプなどの補

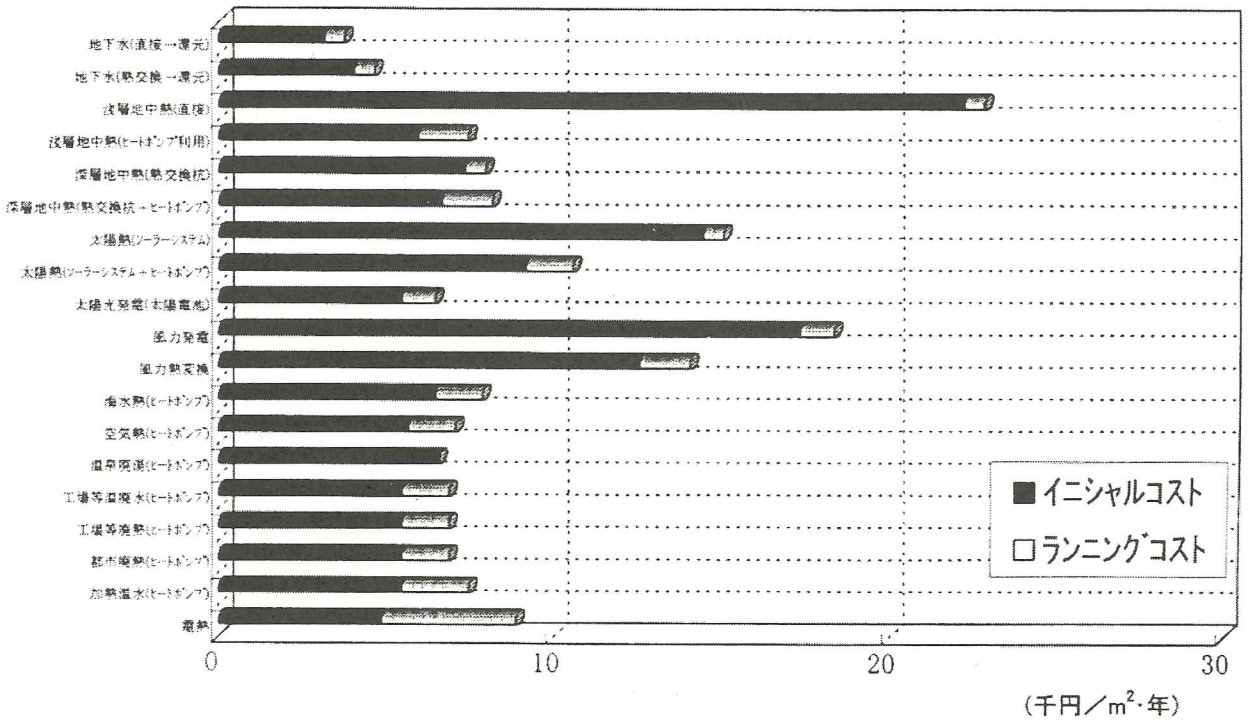
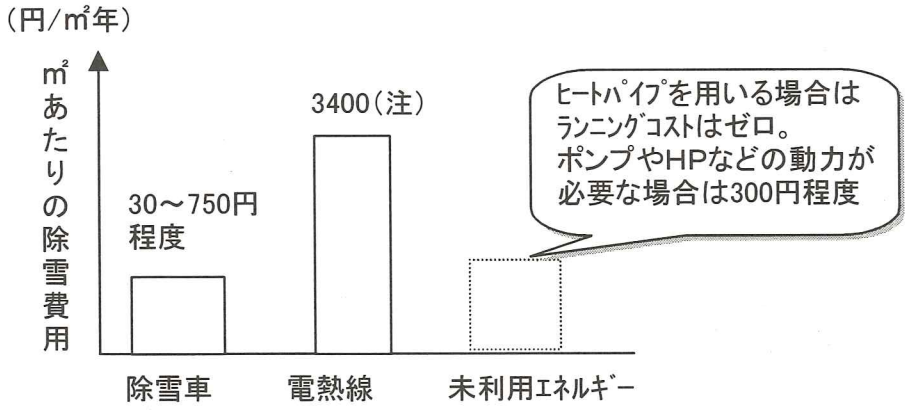


図-5.14 各種融雪施設のコスト比較[62)]

助動力を用いた場合の未利用エネルギーシステムのコストを図-5.14に示す。

ヒートパイプを用いた未利用エネルギーシステムの場合、ランニングコストはほとんどかからないことから、除雪費用分がほぼそのまま蓄熱システムの導入メリットになる。また、補助動力を用いた場合、除雪車を用いた場合よりもコストが高くなる場合もあるが、電力など従来の融雪施設と比較して低コストになる可能性がある。



注)電熱線の費用は、200W/m²で年間1000時間稼動を想定

図-5.15 単位面積当たり除雪、融雪費用の比較

このように、未利用エネルギーを利用した消融雪設備は、従来の方式と比較してランニングコストが安価になると推定される。しかし、イニシャルコストが高くなることが導入する上での課題として指摘されている事例が多い。例えば、蓄熱システムを用いた設備のイニシャルコストは、電熱式のロードヒーティングと比較して、４～５倍程度高くなると考えられ、普及促進を図る上での障壁となる可能性が高い。

表-5.8　既存の蓄熱システム設備と電熱方式のイニシャルコストの比較

	設備範囲	価格	ロードヒーティングの仕様		
			面積	㎡あたり価格	発熱状況
蓄熱システムの導入事例（国道8号線曽地チェーン脱着場）	蓄熱部分（2060m³）工事	7400万円	600㎡	18万円/㎡	184W/㎡
	その他（舗装版工事等）	3600万円			
		合計1億1000万円			
電熱式ロードヒーティング（参考）	舗装版＋電熱線工事	5400万円	1300㎡	4万円/㎡	200W/㎡程度

電熱式と比較して
4～5倍程度
イニシャルコストが高い

今後、安価に施工可能な工法開発を進めイニシャルコストの大幅な削減を図るとともに、“ライフサイクルコスト”＋“社会への波及効果”を考慮して、導入メリットの高い地域を選定した上で、事業化をすすめることが重要になると思われる。

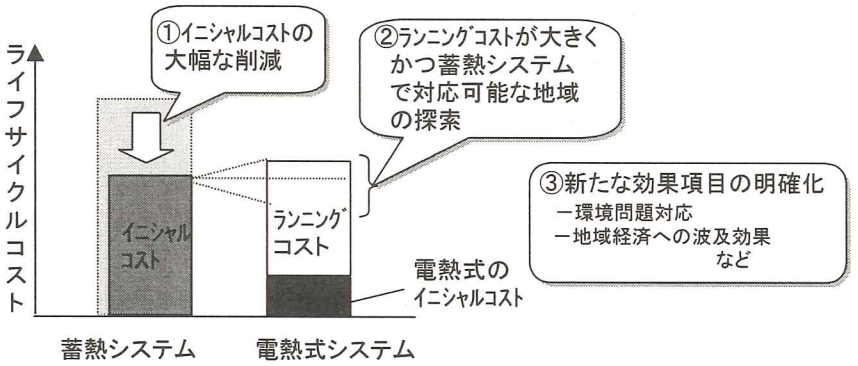


表-5.9 未利用エネルギーを使用することにより削減可能な二酸化炭素排出量

		除雪車	ロードヒーティングに必要なエネルギー量	ヒートポンプを用いた未利用エネルギー量（注４）
対象都市の合計	必要なエネルギー量	6.7×10^{9}ｋＪ	1.7×10^{12}ｋＪ	0.2×10^{12}ｋＪ
	二酸化炭素発生量（注３）	1.3×10^{5}ｋｇ	1.7×10^{8}ｋｇ	2.1×10^{7}ｋｇ
m^2あたり平均値	必要なエネルギー量	315.9ｋＪ	80.2×10^{3}ｋｇ	9.4×10^{3}ｋｇ
	二酸化炭素発生量	$6.1\times10^{-3}m^3$	8.0ｋｇ	1。0ｋｇ

注1）前ページで設定した除雪車の運転に必要な軽油量をエネルギー換算した。
　燃費は、1Kmあたり0．27ﾘｯﾄﾙとした。1時間あたり、1.2ﾘｯﾄﾙが消費される。
　（1車線あたり、ｸﾞﾚｰﾀﾞ1台、ﾄﾗｯｸ0.5台を設定）
　1ﾘｯﾄﾙあたり、0.98KWhとして換算した。
注2）ロードヒーティングを全道路で実施時に必要なエネルギー量
　降雪を融雪するのに必要なエネルギー量として
　1cmの降雪深に対して93Wh/㎡のエネルギーを投入したとして試算
　なお、ロードヒーティングの場合の熱源を電力としている。
注3）軽油のCO_2換算は、0.187kg-C／10^4J
　ロードヒーティングは電力を熱源とした場合を想定
　CO2換算は、0..10kg-C/10^4J
注4）未利用エネルギーを利用するにあたり、ヒートポンプを用いることを想定している。
　ヒートポンプの性能をCOP＝7．9として設定した。
注5）面積は、全ページの道路2121万m^2を用いている

2) 環境負荷の低減

未利用エネルギーを用いることにより、地球温暖化の要因となる二酸化炭素の発生量を抑制することが可能である。各都市において除雪車の燃料として利用されている軽油消費量と、全ての道路においてロードヒーティングを実施した場合に必要な電力エネルギーを試算し、二酸化炭素の発生量の抑制効果を算出した(表-5.9)。未利用エネルギーを利用することによって電力を熱源としたロードヒーティングと比較して、二酸化炭素の削減に大きく寄与することが可能である。

近年、暖房運転におけるガスヒートポンプの高効率が注目され、従来の欠点であった騒音が小さくなったことで、更に効率的な施設設計が可能になりつつある。業界規格をJIS化する取り組みも最終段階に入っており、普及が期待される。

3) 積雪による社会経済のマイナス効果の低減

積雪による地域経済のマイナス効果として、次のような項目がある。消融雪設備を導入することにより、これらの影響を低減することが可能である。これらの定量的な効果分析は、除雪投資全体の投資効果分析とも関連し、重要な課題と考える。

①積雪に伴って発生する交通混乱の発生
- -積雪における交通事故の増加
- -積雪に伴う交通量平均速度の低下

②除雪車の出動に伴って発生する交通渋滞の発生
- -朝夕のラッシュ時の渋滞助長

③積雪により生じる地域経済への波及効果
- -物流を中心とした地域経済への影響
- -交通速度減少に伴う時間的な損失 など

5. まとめ

以上の検討の結果、未利用エネルギーを蓄熱し、降雪時に放熱するシステムの有効性が確認できた。今後の課題として、以下の事項が明らかになった。

- 融雪に必要なエネルギーの全てを、未利用エネルギーの利用と蓄熱設備によって供給可能な地域がある。ただし、具体の適用可能性については、各地域の詳細なデータが必要である。
- 最大降雪強度に対応する融雪熱量を路面から放熱する施設の設計が可能であるが、長期的な耐久性評価技術、一般的なアスファルト舗装における熱抵抗低減技術の開発が必要である。
- 加熱体の設置間隔を狭くする方法や温度を上げる方法にかえて、金属メッシュを設置することにより、放熱効果を高めることができるが、定量的評価のためのシミュレーション技術の開発が必要である。
- 設置効果を定量的に把握するためには、道路交通への影響調査･分析手法の開発、機械除雪投資額の把握など、具体の区間を設定した分析が必要である。
- 道路交通への影響分析については、除雪投資全体の課題として、今後取り組むべき重要課題である。

６１）増川直美，シミュレーションによる国道除雪作業出動基準の評価，土木学会年次学術講演会講演概要集 第４部，1987
６２）石平貞夫，自然未利用エネルギー利用融雪システムの事例と傾向，自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集,1999

第Ⅵ章　まとめと今後の課題

1. 平成１１年度の成果

各章で以下のような結果が得られ、未利用エネルギー利用融雪システムは十分フィージビリティがあり、コスト･環境の両面で効果が期待できる。

第Ⅱ章の未利用エネルギー導入実績から次のことが判明した。

- 未利用エネルギーは、清掃工場や変電所を除き、比較的低温であるが、エネルギー量は大きい。
- ヒートポンプを利用して昇温することで、未利用エネルギーの利用可能性が高まる。
- 都市固有の熱源は、人の活動によって変動し、日、年での変動が大きい。例えば、下水道管渠ならびに地熱では、年ならびに１日あたりのエネルギーレベルの時間変動が小さく安定している。
- 地熱を除く自然エネルギーも、年ならびに１日あたりの変動が大きいものの、夏場に高い温度レベルの熱が確保でき、太陽熱を蓄熱するシステムを導入することにより、冬のロードヒーティングに利用することも可能である。
- 年間・日変動が大きい未利用エネルギーであっても、蓄熱システムを用いることによって有効活用の可能性が拡大する。

第Ⅲ章の必要融雪熱量の試算結果から次のことが判明した。

- 各地域の最大降雪時のパターンを分析すると、24 時間均一に降雪するのではなく２～３時間程度の比較的短時間に集中的に降雪しているケースが多い。
- ロードヒーティングによる消融雪設備として有効に機能するためには、短期的に降雪強度が 8～10cm/h の融雪能力を保有していることが望ましい。
- 各都市において必要な融雪能力を発揮するためには、250～1,000W/㎡の発熱が必要となる。

第Ⅳ章の熱需給バランスの分析結果から次のことが判明した。

- 最大降雪パターンの条件では、ほとんどの都市及び箇所において単位時間のエネルギー量は不足している。
- 上位 2 種類の熱源で全体の 70％程度になっており、蓄熱の上限である 10 日程度の蓄熱期間で、融雪に必要な熱量をまかなえる箇所は多い。
- エネルギー量が豊富に存在する下水処理場やごみ焼却場の近傍地域では、融雪するのに十分なエネルギー量が存在している。
- 平均降雪パターンにおいて、エネルギー供給量がプラスであっても、最大降雪パターンになるとエネルギーが不足する箇所が多数存在している。これらのメッシュでは、蓄熱システムを用いることにより、有効な融雪システムを構築できる可能性がある。

第Ⅴ章のフィージビリティ分析結果から次のことが判明した。

- 未利用エネルギーを蓄熱し、降雪時に放熱するシステムの有効性が確認できた。
- 気温にもよるが、10cm/h 程度以上の降雪に対応する路面放熱施設の設計は可能

である。

- 放熱施設の設計には、均一な分布を想定した簡易な手法でも十分可能だが、温度応力などの確認のためには、有限要素法による解析が有効である。
- 除雪に関する投資効果分析手法･技術の開発が待たれる。

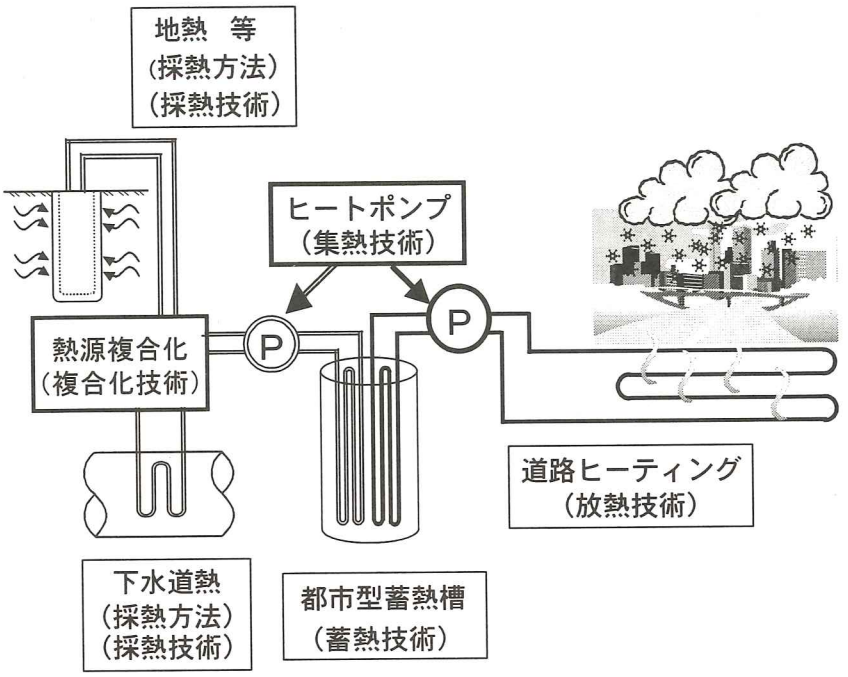


図-6.1　想定される融雪システム

今後は、実際の適用個所の選定に向けて、多雪地帯であること、主要な国道の近くに下水処理場などの熱源が豊富であること、自動車及び歩行者の交通量が多く導入効果が高いこと、運搬排雪量が多く融雪による効果が高いことなどの観点から調査を進める必要がある。これらの条件を満たす都市としては、札幌、青森、長岡、富山などが挙げられるが、近年の降雪が多い状況から、青森、札幌が有力と考えられる。熱源としては下水を中心とすることが最も現実的かつ有効で、図-6.2 に示すように、それぞれの施設管理者の技術を生かした取り組みが待たれる。

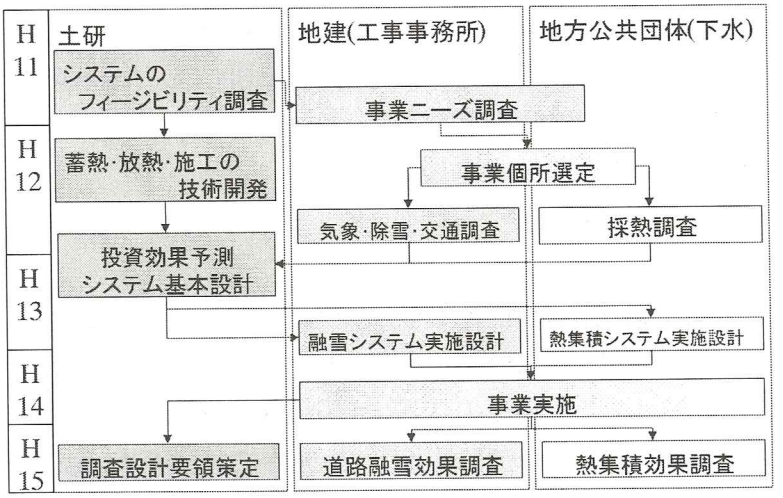


図-6.2　全体研究計画

2. 今後の課題

平成１１年度の調査業務によって、１キロメッシュレベルで未利用エネルギーを熱源とした蓄熱システム導入の上で有望なメッシュが抽出された。平成１２年度は実際に未利用エネルギーを熱源とする蓄熱システムのフィールドでの適応地点を選定するにあたり、さらに精度の高い調査が必要である。導入地点の選定のアプローチ方法としては、1.に示した観点のほか、以下に示す２つの視点から分析する方法を提案する。

2.1. 未利用エネルギーの供給面からの分析

本調査業務から抽出された有望なメッシュについて、さらに詳細な未利用エネルギーの供給可能量についての分析を行う。

- 未利用エネルギーの供給可能量の確認(100m程度のメッシュ)
- 蓄熱システムの設置可能性の確認（現地調査）
- 熱移動ならびに蓄熱の技術のシミュレーション分析　など

2.2. ユーザサイドの導入効果からの分析

1) ランニングコストの分析

調査対象地域の除雪費用の現状値について調査を行う。

2) コスト以外の導入メリットの分析

・交通の質の向上
（平均速度の向上、交通渋滞の緩和）
・交通安全上から見た効果
・交通弱者対応から見た効果
など

導入メリットの項目の抽出を行うとともに、各地域の施策の中で重視している内容に基づきウエート付けを行う。

3) 地域経済面に対する波及効果

経済効果分析モデルを開発して、蓄熱システム整備の導入に対して、交通･経済･住民等への波及効果の試算を行う。このモデルはユーザサイドの見地にたった一般均衡分析モデルとし、社会基盤整備に関して国民や県民等への波及効果を算定することが望まれる。このような分析には、消融雪施設が道路交通を通じて、地域の経済、社会へ及ぼす効果を把握する必要があり、他の雪寒対策事業との比較も必要で、除雪事業全体の効果分析と整合したものでなければならない。

2.3. 除雪事業全体の効果分析

除雪は、地域の社会･経済活動を支える重要な事業である。しかし、その経済的な投資効果について分析した事例はない。除雪に係る費用についても、実態はまとめられているが、気象、道路構造、道路交通等の状況と関連図けられた整理は十分とはいえない。

道路管理は、図-6.3 に示すように、平時と異常時に分けられる。降雪は、全国あるいは通年といった観点からは異常時に分類されるが、雪国の生活にとっては、毎年必ず起

こる側面があり、平時の現象といった側面を持つ。また、異常降雪のように、まれに起こる大量の降雪や、雪崩といった現象は、雪国にとっても災害として認識されており、地域経営、日常生活、日常業務といった平時の側面と、リスク･マネージメントといった異常時対応の側面の両面を考慮する必要がある。

このため、通常の降雪での交通への影響を少なくし、安全かつ円滑な交通を確保する

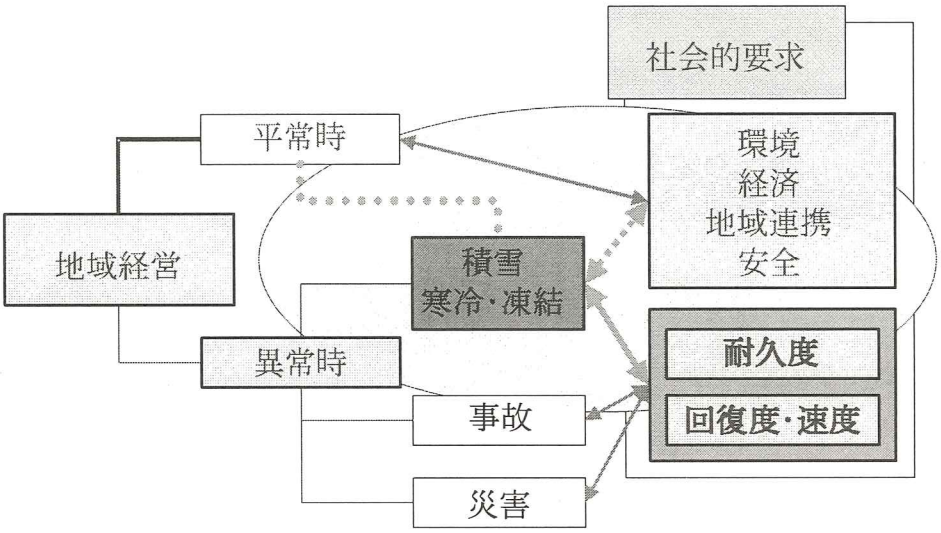


図-6.3　除雪(積雪、寒冷･凍結)の位置付け

ことが第一になる。そして、突然交通止めを防止したり、雪崩等の災害防止と災害発生時のネットワーク確保といった、リスクマネージメントの観点からの計画的管理が求められる。さらには、定量的なサービスレベルあるいは管理水準に基づいた道路除雪計画の理論的裏づけ、雪国での生活実感を反映した事業展開が求められる。

そこで、除雪事業において目的となっている「円滑な冬期交通の確保」の具体的、定量的な目標設定と、実現方策の検討が必要である。特に、道路利用者に提供すべきサービスレベルの十分な議論に基づき、経験に基づく除雪の計画と実施から、科学的な気象実態と予測に基づく除雪事業の計画的実施への転換が必要と考える。

冬期間のサービス低下は、降雪等による視程の障害、路面の摩擦係数の低下、路面の圧雪等による交通容量、旅行速度、走行性の低下、路面状況の変化に起因する事故等に対する滑り止め装置の装着といった安全対策の必要性など直接的な影響のほか、旅行時間が不安定になるなど、快適な道路利用を阻害する形で現れる。これらの道路サービスの低下に対しては、降雪を見て事後対応的に機械除雪を実施するだけでなく、除雪出動判断に必要な情報の収集と提供、冬期の気象特性に応じた道路利用者への情報提供、道路ネットワーク確保に必要な道路管理者相互の連携といった除雪にかかわる情報システムの整備(IT を活用したナレッジマ･ネージメント、リスク･マネージメントなど)と、道路構造令に規定された堆雪帯の整備などの道路構造面の検討を含め、総合的な対策が求められる。

降雪強度は、地域によって異なる出現確率を持ち、降雪強度が強くなるに従ってサービスレベルが低下する。降雪に対して強い道路構造と維持管理体制があれば、このサービスレベルの低下量は少なくなり、耐久度が高いといえる。また、回復速度が速く、一

旦低下しても、除雪出動などにより早期に回復することができる。ユーザからは、サービスレベルの指標を動向速度、交通容量(混雑度)などの形で認識し、その耐久度と回復速度が大きな課題となる。

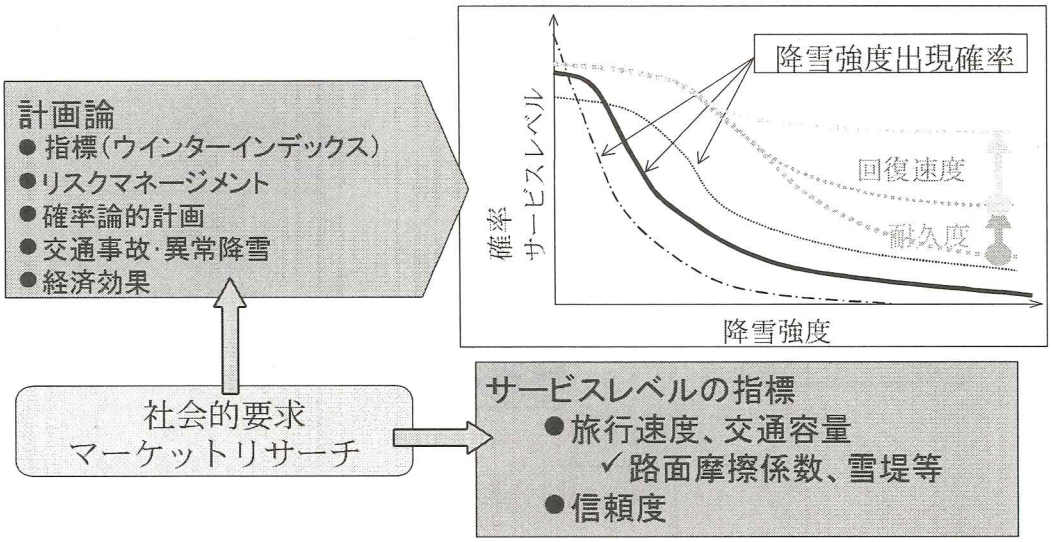


図-6.4除雪計画論とサービスレベルのイメージ

サービスレベルまたは管理水準と、気象条件などの冬期の状況(ウインターインデックス)とを関連付けた議論が可能になる。冬期の状況が予測できれば、着実な計画の考え方(計画論)をまとめることができ、より計画的かつ円滑な冬期道路管理の実現が可能になる。

ここで、サービスレベルや計画論は、道路利用者の満足度を上げる手段や道具であり、社会的要求を反映したものでなければならない。従って、路面摩擦係数などの、管理者にとって重要だが目に見えない指標よりは、走行速度、混雑度などのユーザが把握しやすい指標が重要になると考える。また、同じような降雪量であれば同じ程度のサービスレベルを提供するといった信頼度も重要な指標になると考えられる。

3. まとめ

未利用エネルギーは、下水を中心とした都市施設に多量に存在しており、冬期の降雪を融雪したり、気温低下による凍結を防止するに十分な熱量を有していることが判明した。しかし、変動幅が大きく、常時豊かな熱量を利用できるものではなく、降雪がやんでいる時間も熱を利用する必要があることから、蓄熱施設の導入が前提となる。また、降雪強度は時間 10cm を超えることがあり、このような強度の降雪に対しては、大量の放熱を必要としている。従来の施設に比べて放熱量を 2 倍以上にする必要があり、実現可能であるが、加熱温度を上げることは、舗装の耐久性の観点から限界があり、過熱体の設置間隔の狭小化、放熱用金属メッシュの導入などをあわせて行う必要がある。

新熱源利用融雪システムは、熱源から蓄熱槽へ熱を汲み上げ、蓄熱槽に蓄積された熱を道路舗装に供給するシステムになる。蓄熱槽は、深礎と同様に建設され、縦に熱交換パイプを設置する。これにより、都市公園などに比較的小面積で設置でき、熱交換パイプが万一破損しても、上部で破損配管をショートカットすれば復旧が容易で、従来の蓄熱槽に比べて有利と考える。さらに、良質の砂に換えて下水処理施設などから発生する

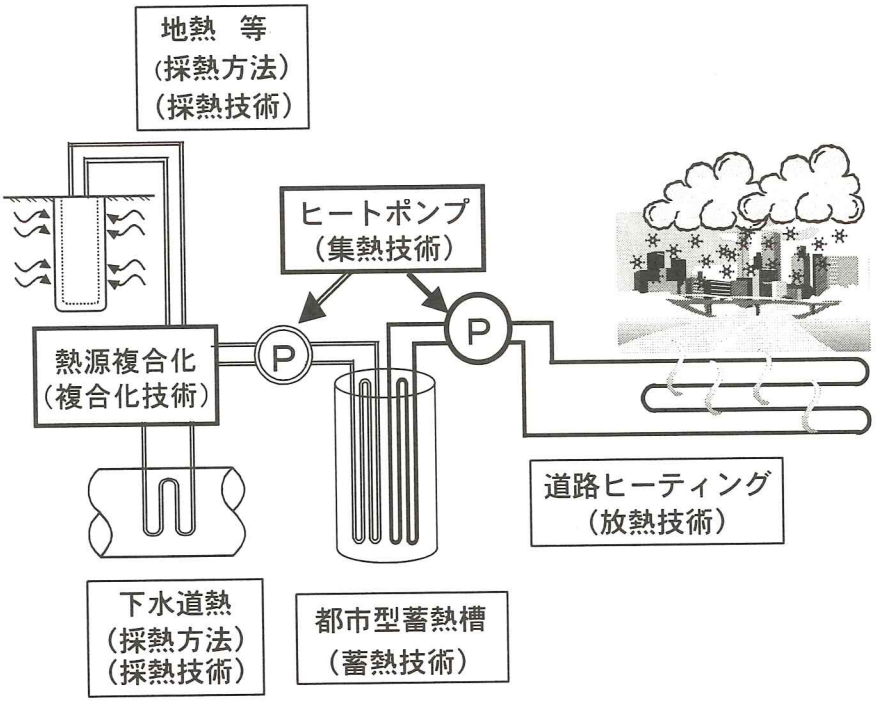


図-6.5　想定される融雪システム

泥土などを利用した流動化処理土を蓄熱材として充填でき、環境に配慮した施工が可能になる。また、流動化処理土に発泡剤を混入することによって、気泡を多く含んで断熱効果に優れた蓄熱体を構築することも可能である。

しかし、従来の施設に比べて、蓄熱槽の建設などイニシャルコストが増大し、ヒートポンプの運転に必要なランニングコストも少なくないが、積雪寒冷の厳しい大都市では、冬期の平均旅行速度が時速十数 km と、東京 23 区に匹敵する厳しさになっており、利便性、安全性向上効果は、大きなものが期待できる。このため、除雪に係る投資効果を、定量的に評価する新たな取り組みが必要である。

どんな雪でも交通を確保するといった意味での信頼は、地域の方々にとって大変重要ではあるが、社会ニーズが多様化した今日では、それら多様化したニーズに対し、社会的コンセンサスに基づいた取り組みが求められている。未利用エネルギーを用いた道路融雪設備は、従来のスポット的な融雪設備によるボトルネック対策、作業の効率化を目指したものから、地域やユーザの満足度を高める手段になり得るものである。本報告書が、消融雪設備がその効果を評価され、社会･経済の発展に資するものになる一助となれば幸いである。

付　録　1

コンクリート舗装版に融雪ヒータを入れた場合のシュミレーション結果

1．目的

コンクリート舗装版内の所定位置に埋設された融雪ヒータからの発熱に起因して発生するコンクリート版内の温度分布および温度応力を所定条件においてシミュレーションし，それぞれの設定条件と温度分布，温度応力との関連性について検討する．

2．解析方法

温度分布および温度応力の解析方法は，コンクリート舗装版を軸方向に無限長と仮定して**2次元有限要素法（Finite Element Method, FEM）**を適用する．

本解析は，㈱計算力学研究センター社「コンクリートの非線形温度応力解析プログラム」（以下，ASTEA－MACSと称する）を用い，有限要素法（FEM）に拠る非定常温度分布計算及び熱応力計算を行うものである．

3．解析条件

温度分布および温度応力の解析条件（コンクリート舗装版の諸元，コンクリートの物性，境界条件等）は表－1，2のとおりである．**版縁は断熱境界**とする．また，**拘束**は，不均一な温度分布に拠る**内部拘束のみ**考慮することとする（構造体の**外部拘束**は考慮しない）

表－1．コンクリート舗装版の諸元および境界条件

内　容		検討対象値および検討ケース		備　考
コンクリート版の諸元	版厚（cm），t	30	1水準	
	かぶり厚さ（cm），D	5，10	2水準	純かぶり
	ヒータ間隔（cm），d	10，15，20	3水準	ヒータ中心間距離
	ヒータ温度（℃），T	15，20，25，30，35，40，50	7水準	ヒータ壁面にて一定． 50℃条件にて限界以上であることが判明した場合には，限界温度近傍を追加する．
	ヒータ外径（cm）	1.5	1水準	
境界条件	版表面温度（℃）	0.0	1水準	
	風速（m/s）	5.0	1水準	
	熱伝達率（$W/m^2 \cdot ℃$）	18.6	1水準	風速に応じて，算出
	版裏面温度（℃）	5.0	1水準	温度固定

1．目的

コンクリート舗装版内の所定位置に埋設された融雪ヒータからの発熱に起因して発生するコンクリート版内の温度分布および温度応力を所定条件においてシミュレーションし，それぞれの設定条件と温度分布，温度応力との関連性について検討する．

2．解析方法

温度分布および温度応力の解析方法は，コンクリート舗装版を軸方向に無限長と仮定して**2次元有限要素法（Finite Element Method, FEM）**を適用する．

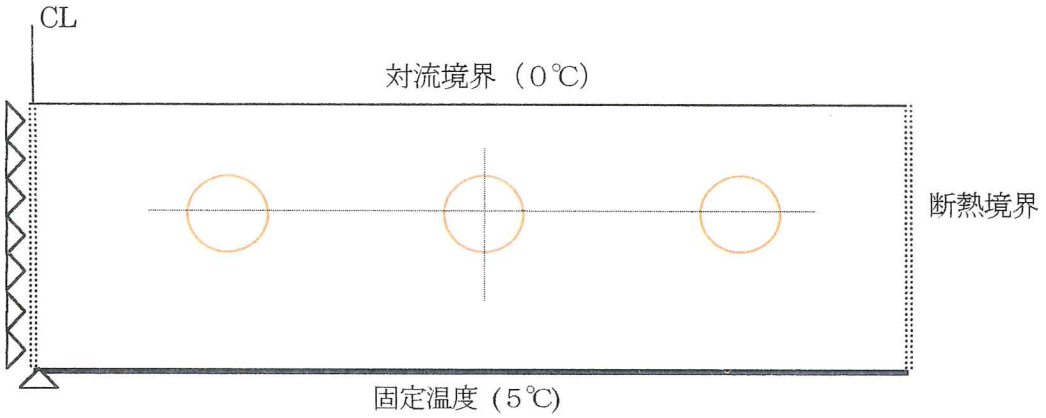
本解析は，㈱計算力学研究センター社「コンクリートの非線形温度応力解析プログラム」（以下，ASTEA－MACS と称する）を用い，有限要素法（FEM）に拠る非定常温度分布計算及び熱応力計算を行うものである．

3．解析条件

温度分布および温度応力の解析条件（コンクリート舗装版の諸元，コンクリートの物性，境界条件等）は表－1，2のとおりである．**版縁は断熱境界**とする．また，**拘束**は，不均一な温度分布に拠る**内部拘束のみ**考慮することとする（構造体の**外部拘束**は考慮しない）

表－1．コンクリート舗装版の諸元および境界条件

内　容		検討対象値および検討ケース		備　考
コンクリート版の諸元	版厚（cm），t	30	1水準	
	かぶり厚さ（cm），D	5，10	2水準	純かぶり
	ヒータ間隔（cm），d	10，15，20	3水準	ヒータ中心間距離
	ヒータ温度（℃），T	15，20，25，30，35，40，50	7水準	ヒータ壁面にて一定．50℃条件にて限界以上であることが判明した場合には，限界温度近傍を追加する．
	ヒータ外径（cm）	1.5	1水準	
境界条件	版表面温度（℃）	0.0	1水準	
	風速（m/s）	5.0	1水準	
	熱伝達率（$W/m^2 \cdot ℃$）	18.6	1水準	風速に応じて，算出
	版裏面温度（℃）	5.0	1水準	温度固定



図－１.２.解析モデル

５．解析結果

本解析結果を図－１０～３１に示す.

１）温度分布の解析結果は，各検討水準において，ヒータの保温養生によりコンクリート舗装版内の温度分布が定常状態になる２４時間後とした．その時の舗装版表面部における最高温度および最低温度を表－３に示す.

２）温度応力の解析結果は，温度分布の結果と同様に２４時間後の解析結果とした．また，発生応力については，版の外部拘束は考慮しないため，版上縁Ｘ軸方向に大きな引張応力が発生し，これが略主応力と等しいため，本解析結果はＸ軸方向の応力について検討した.
本解析結果を表－４～５にそれぞれ示す.

３）温度ひび割れ発生の評価は，土木学会 「コンクリート標準示方書・施工編」に示されている温度ひび割れ指数を用いた.
温度ひび割れ指数値は，その値が大きいほどひび割れが発生しにくく，また，小さいほど発生しやすいことを意味する．一般に温度ひび割れ指数が小さいほど発生するひび割れの数が多く，その幅も大きくなる傾向にある．すなわち温度ひび割れ指数は,次式に示すコンクリートの強度と応力の比で求めることができる.

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t)$$

ここに、$I_{cr}(t)$：材齢ｔ日における温度ひび割れ指数
$\sigma_t(t)$ ：材齢ｔ日における水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値
$f_t(t)$ ：材齢ｔ日におけるコンクリートの引張強度で、養生温度を考慮 して求める

・ひび割れを防止したい場合	１．５以上
・ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	１．２以上
・ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	０．７以上

表－３．コンクリート舗装版表面の温度結果（℃）

かぶり厚さ cm		5						10					
ヒータ間隔 cm		10		15		20		10		20		25	
		最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
温度 ℃	15	7.5	**7.8**	6.4	**7.2**	5.5	**7.6**	5.6	**5.6**	5.0	**5.1**	5.1	**5.4**
	20	10.0	**10.3**	8.4	**9.5**	7.3	**10.1**	7.5	**7.5**	6.6	**6.7**	6.8	**7.1**
	25	12.5	**12.8**	10.4	**11.8**	9.2	**12.6**	9.3	**9.3**	8.2	**8.3**	8.3	**8.9**
	30	15.0	**15.4**	12.4	**14.1**	10.8	**15.1**	11.1	**11.1**	9.7	**9.9**	10.0	**10.6**
	35	17.4	**17.9**	14.5	**16.4**	12.5	**17.6**	13.0	**13.0**	11.3	**11.5**	11.7	**12.4**
	40	20.5	**19.9**	16.5	**18.7**	14.3	**20.2**	14.8	**14.8**	12.9	**13.2**	13.2	**14.1**
	50	24.8	**25.6**	24.8	**25.6**	19.9	**26.8**	18.5	**18.5**	16.1	**16.4**	15.0	**16.0**

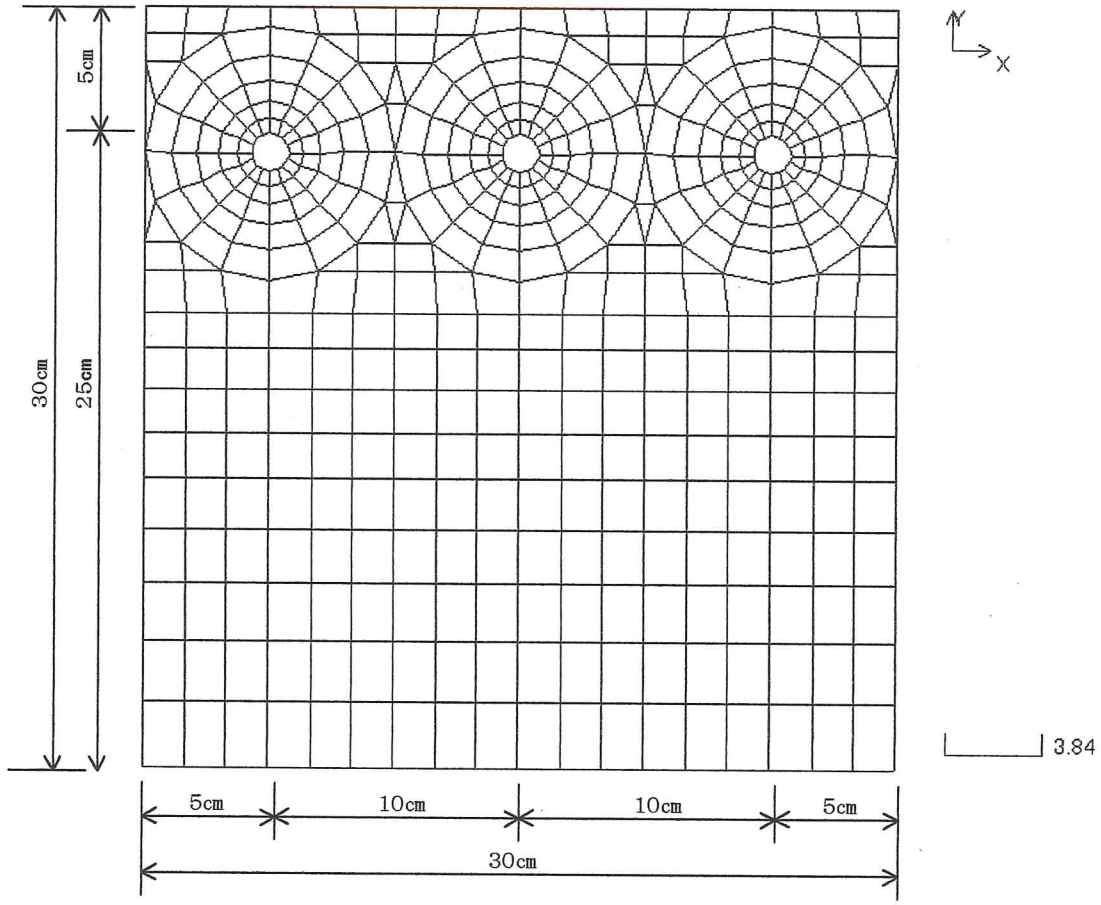
表－４．コンクリート舗装版上縁部の応力（X軸方向）

かぶり厚さ cm		5			10		
ヒータ間隔 cm		10	15	20	10	**15**	20
温度 ℃	15	1.30	1.32	1.34	1.68	1.25	1.46
	20	1.78	1.80	1.86	1.88	1.75	2.02
	25	2.26	2.29	2.33	2.41	2.24	2.58
	30	2.74	2.78	2.89	2.94	2.74	3.08
	35	3.22	3.27	3.31	3.47	3.23	3.70
	40	3.70	3.75	3.81	4.01	3.73	4.26
	50	4.66	4.96	4.55	5.07	4.71	5.55

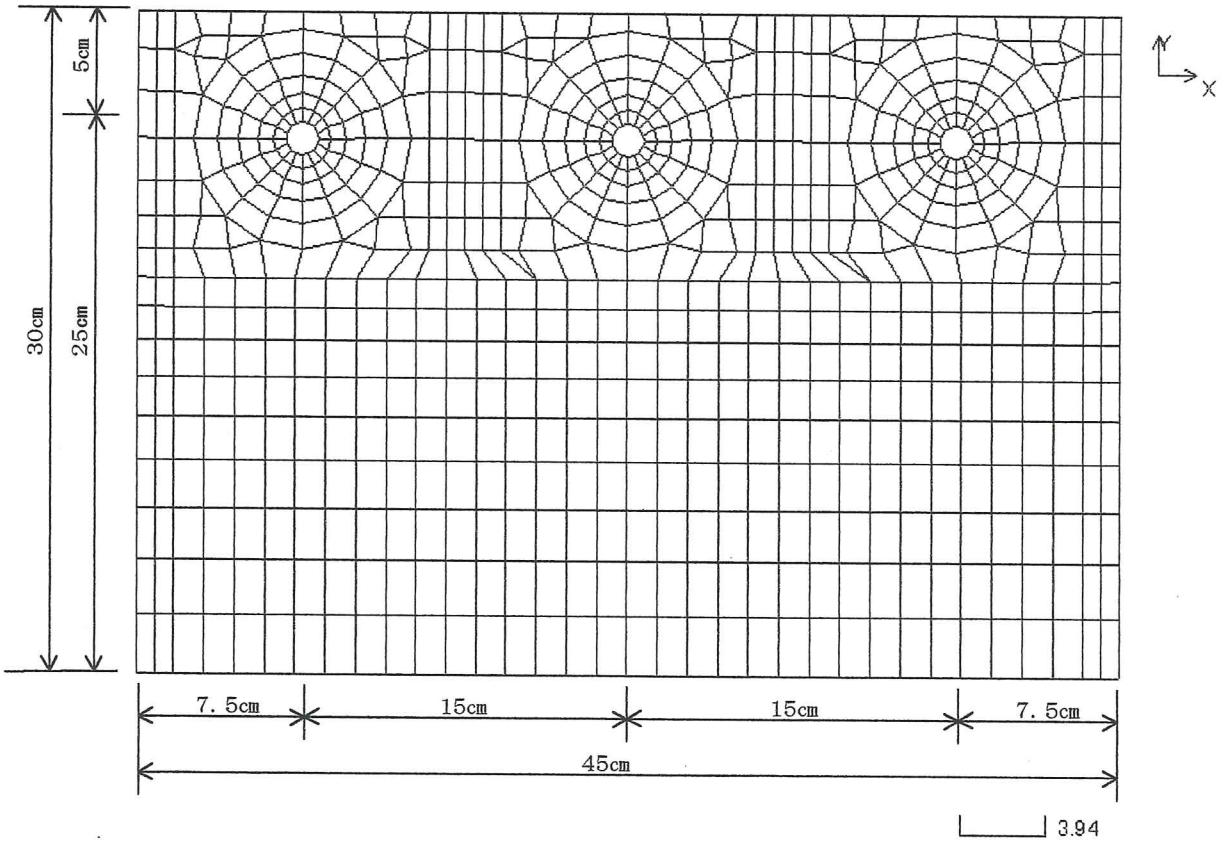
表－５.ひび割れ指数

かぶり厚さ cm		5			10		
ヒータ間隔 cm		10	15	20	10	**15**	20
温度 ℃	15	1.6	1.6	1.6	1.2	1.7	1.4
	20	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0
	25	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
	30	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7
	35	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	40	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5
	50	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4

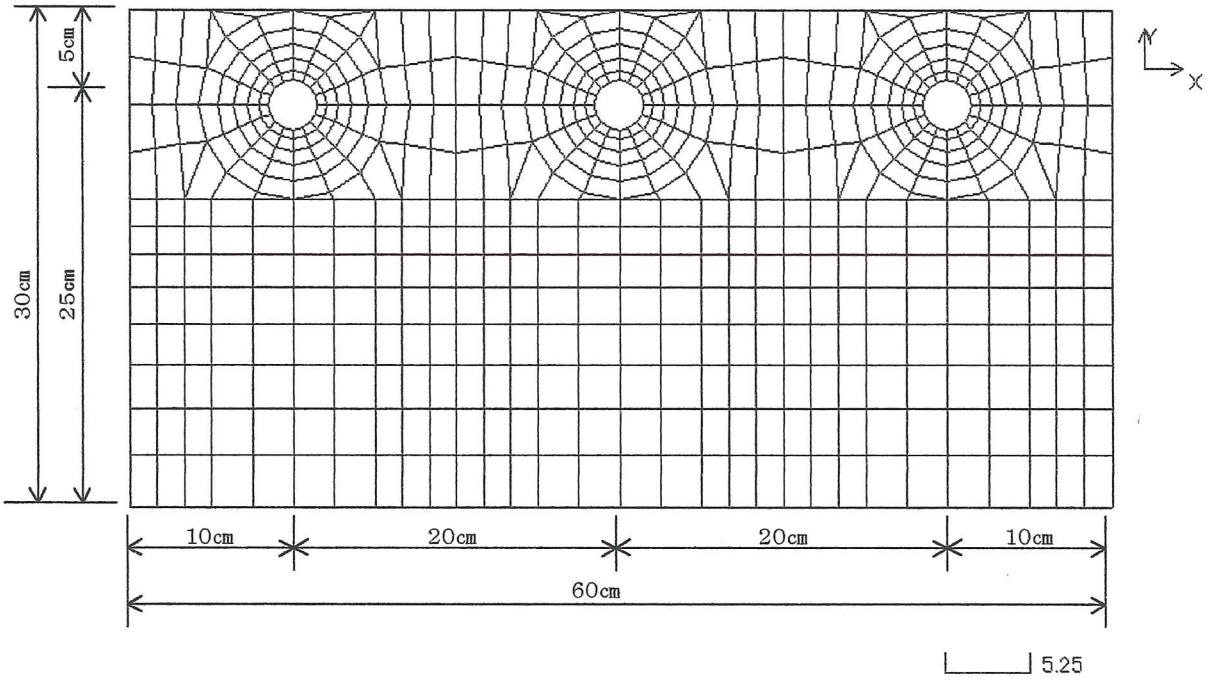
注）表中の網掛けは，ひび割れ指数が１.０以下を示す.



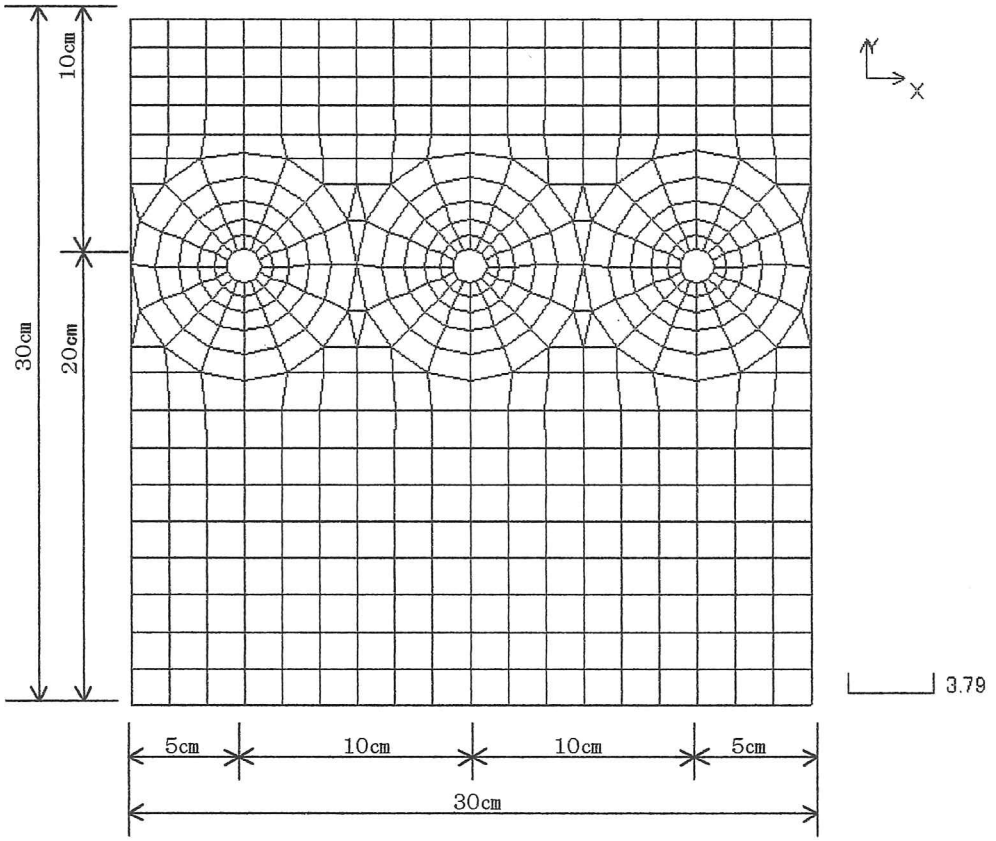
図－２.要素分割図「かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm」



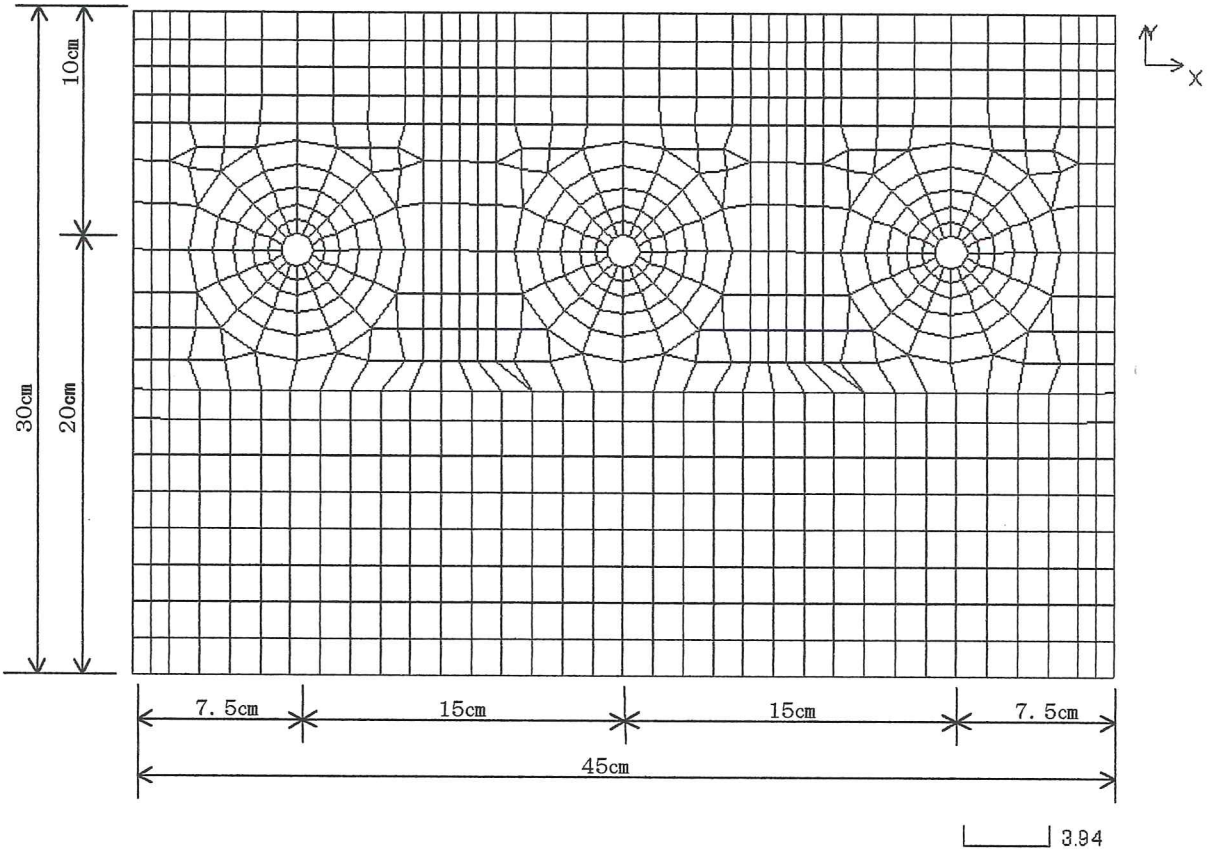
図－３．要素分割図「かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm」



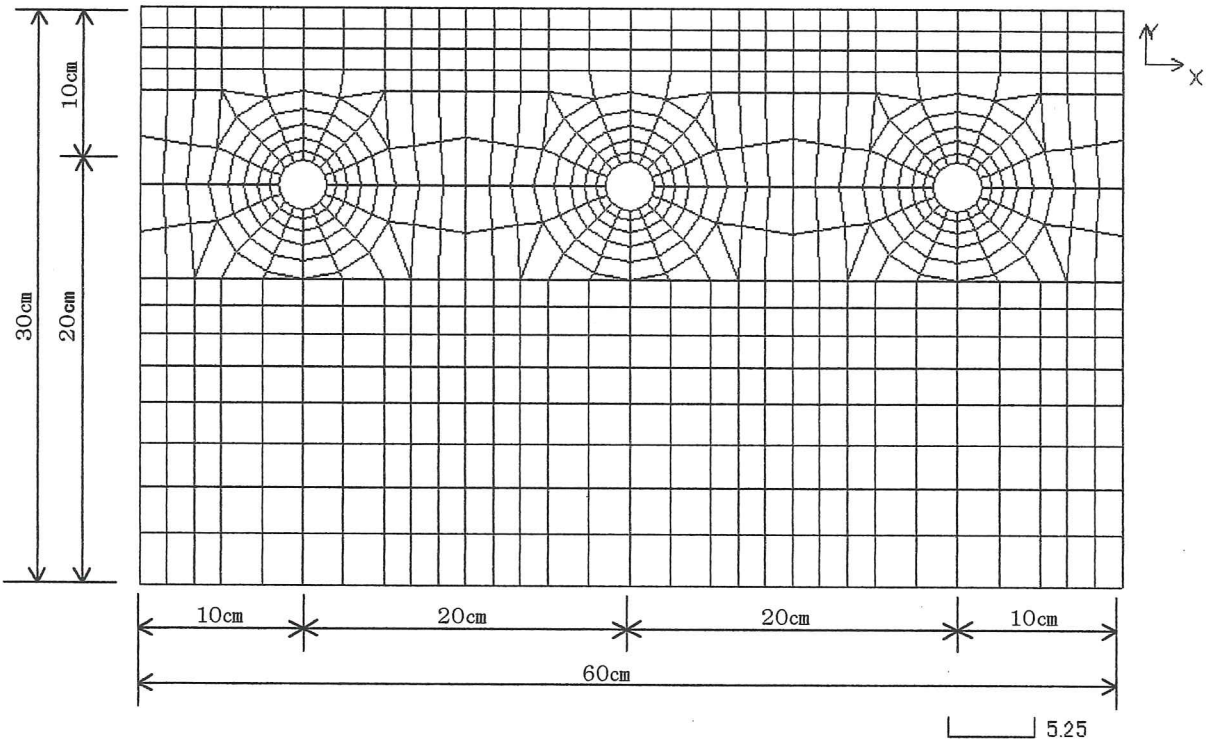
図－４．要素分割図「かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm」



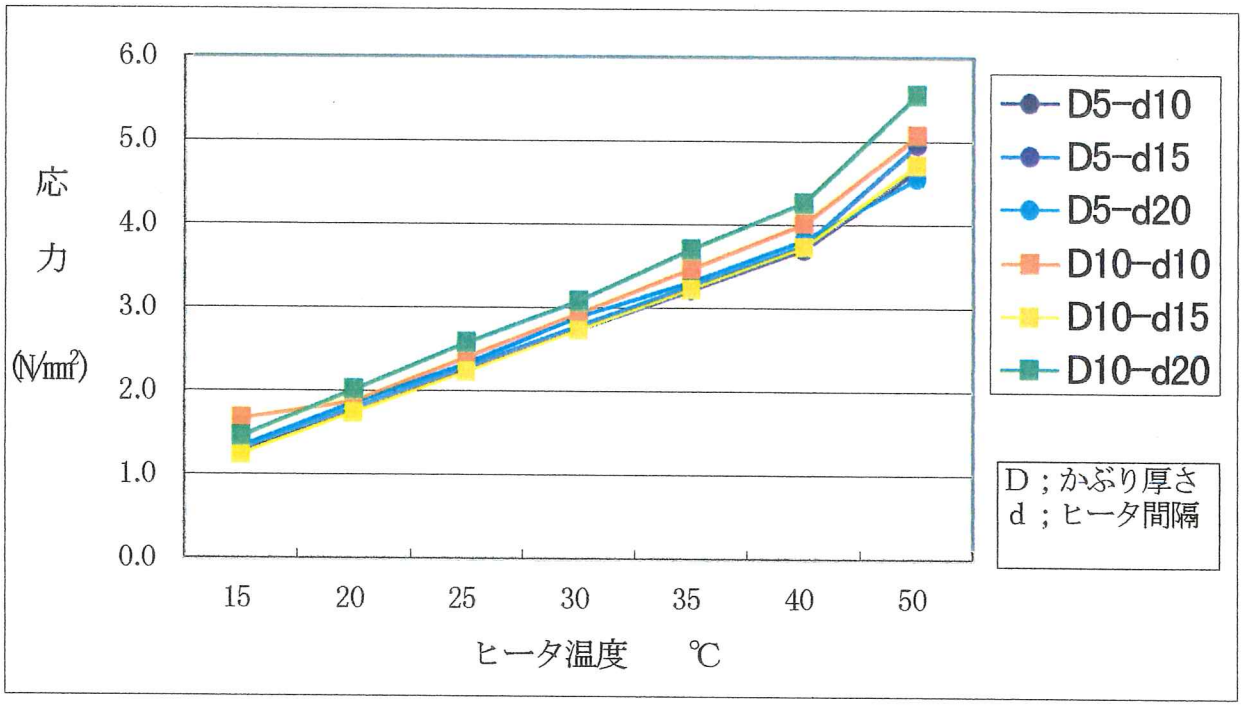
図－５．要素分割図「かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm」



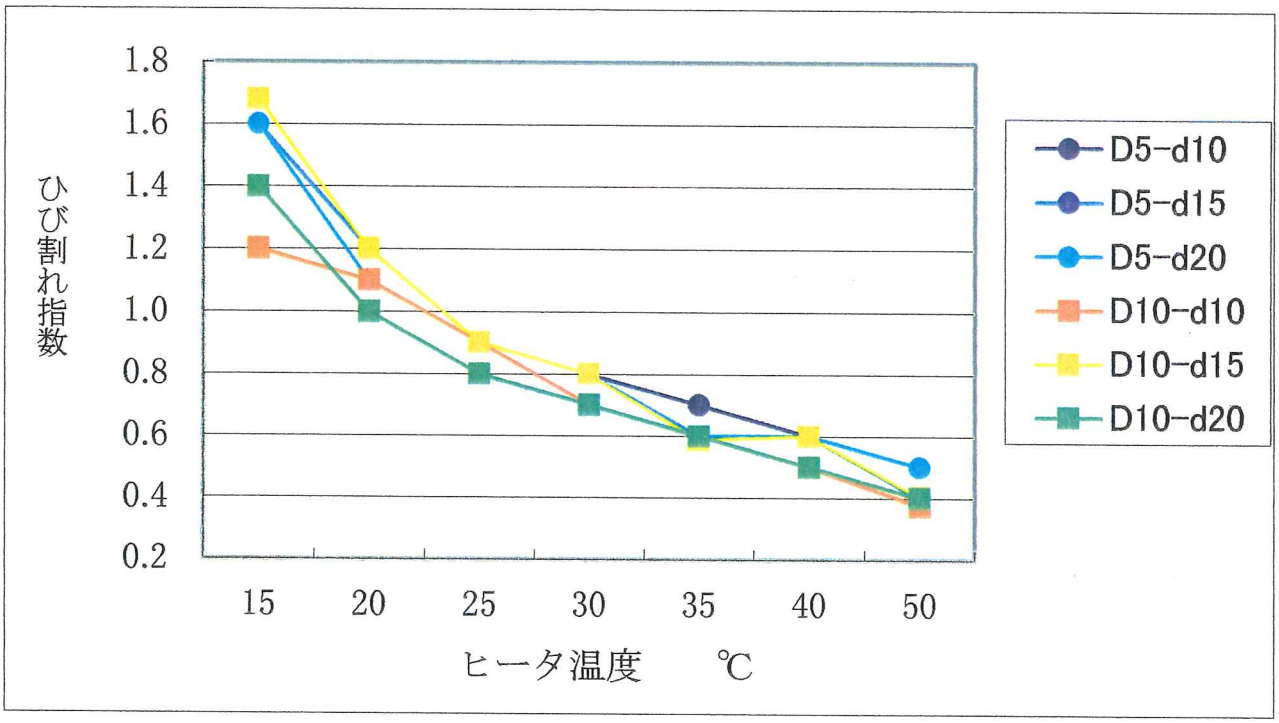
図－６．要素分割図「かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm」



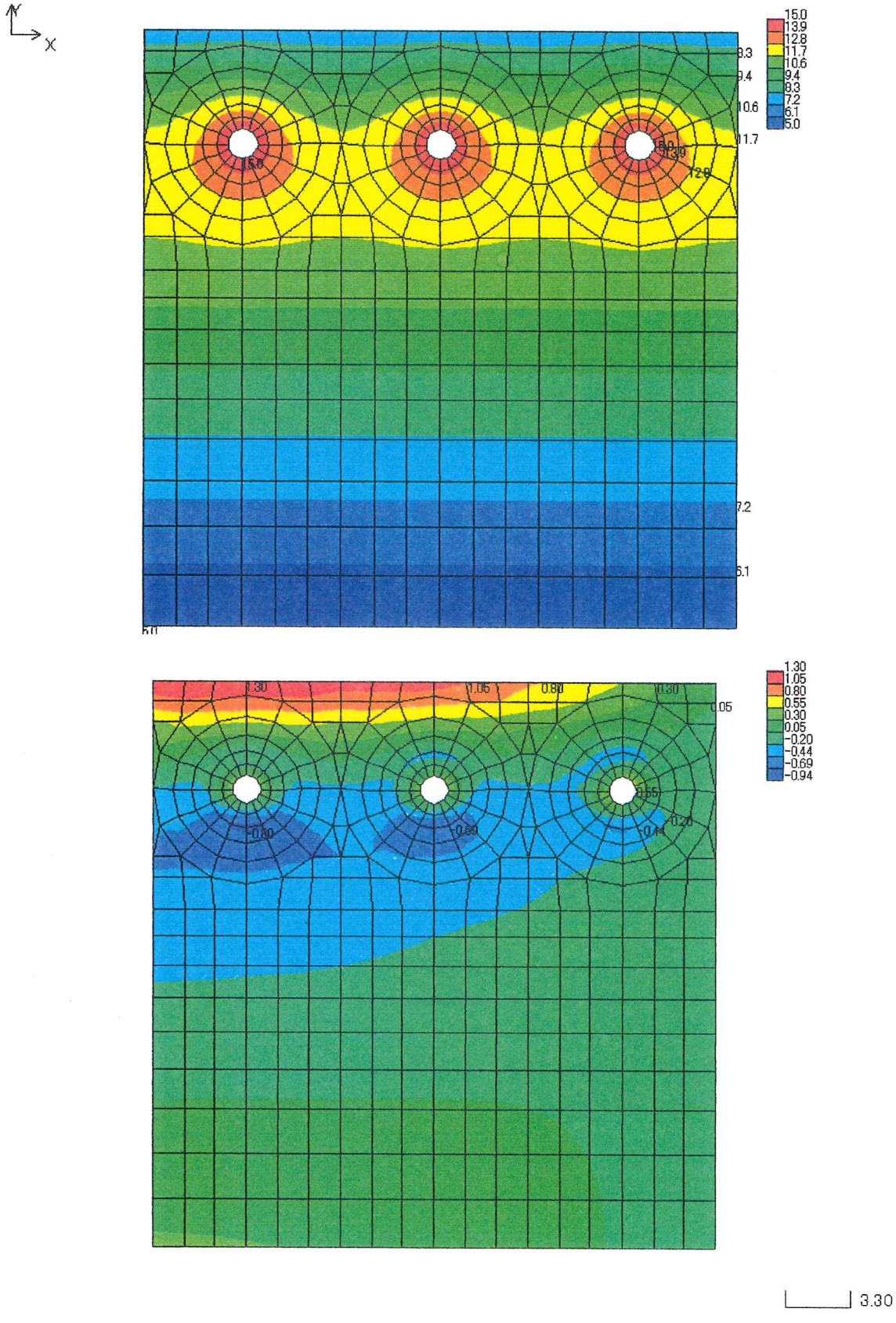
図－７．要素分割図「かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm」



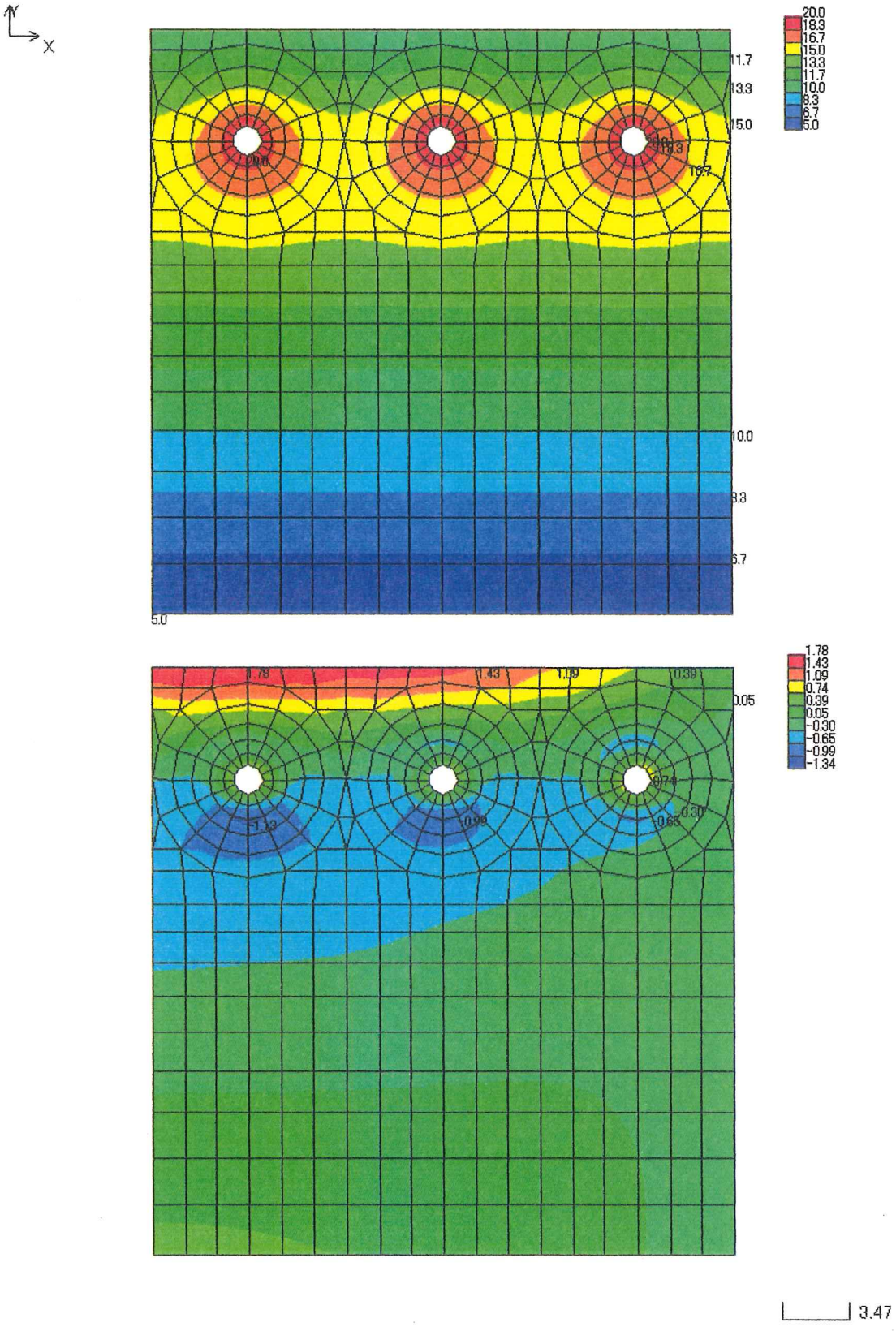
図－８.応力とヒータ温度等の関係



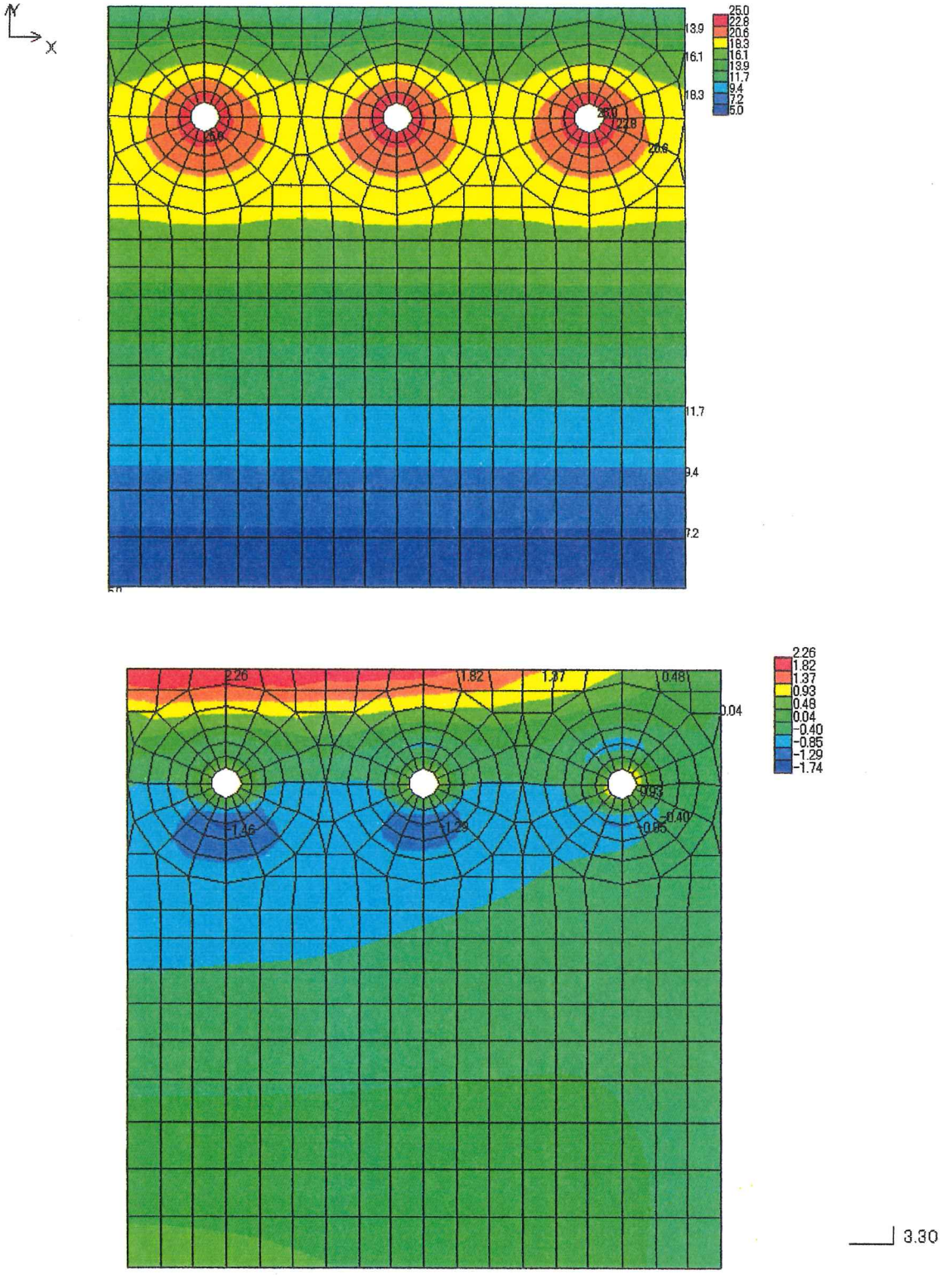
図－９.ひび割れ指数とヒータ温度等の関係



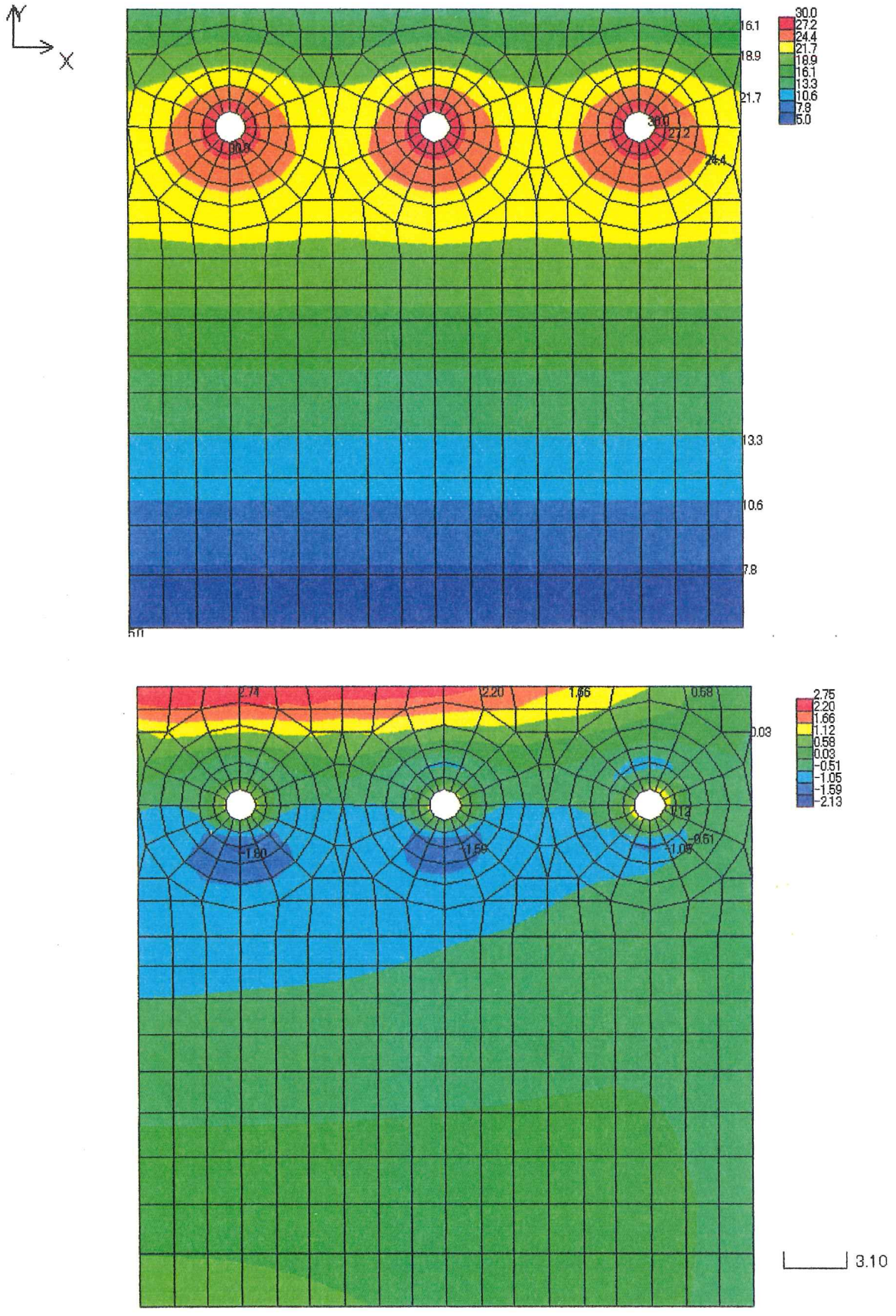
図－１０.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



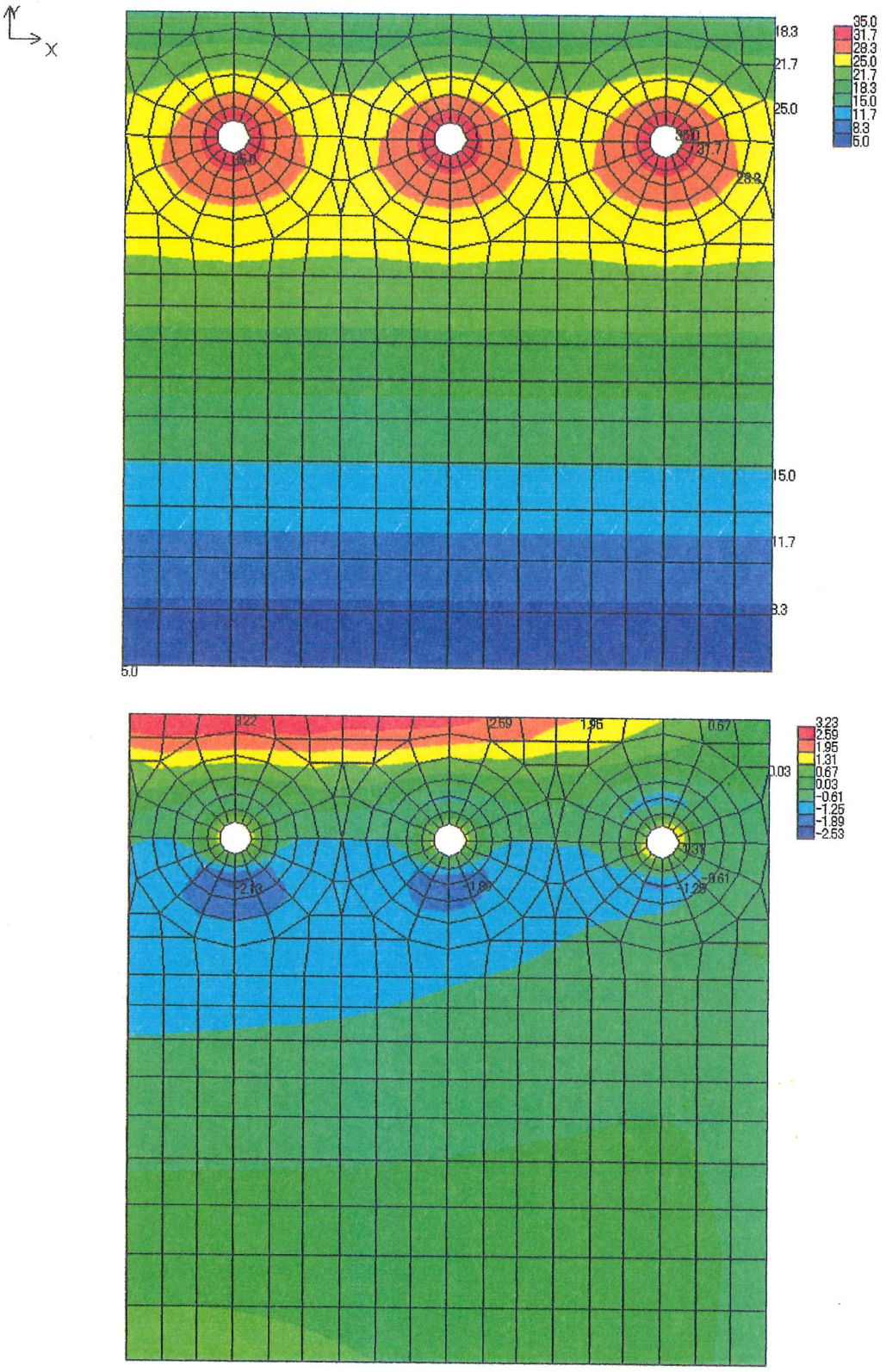
図－１１.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



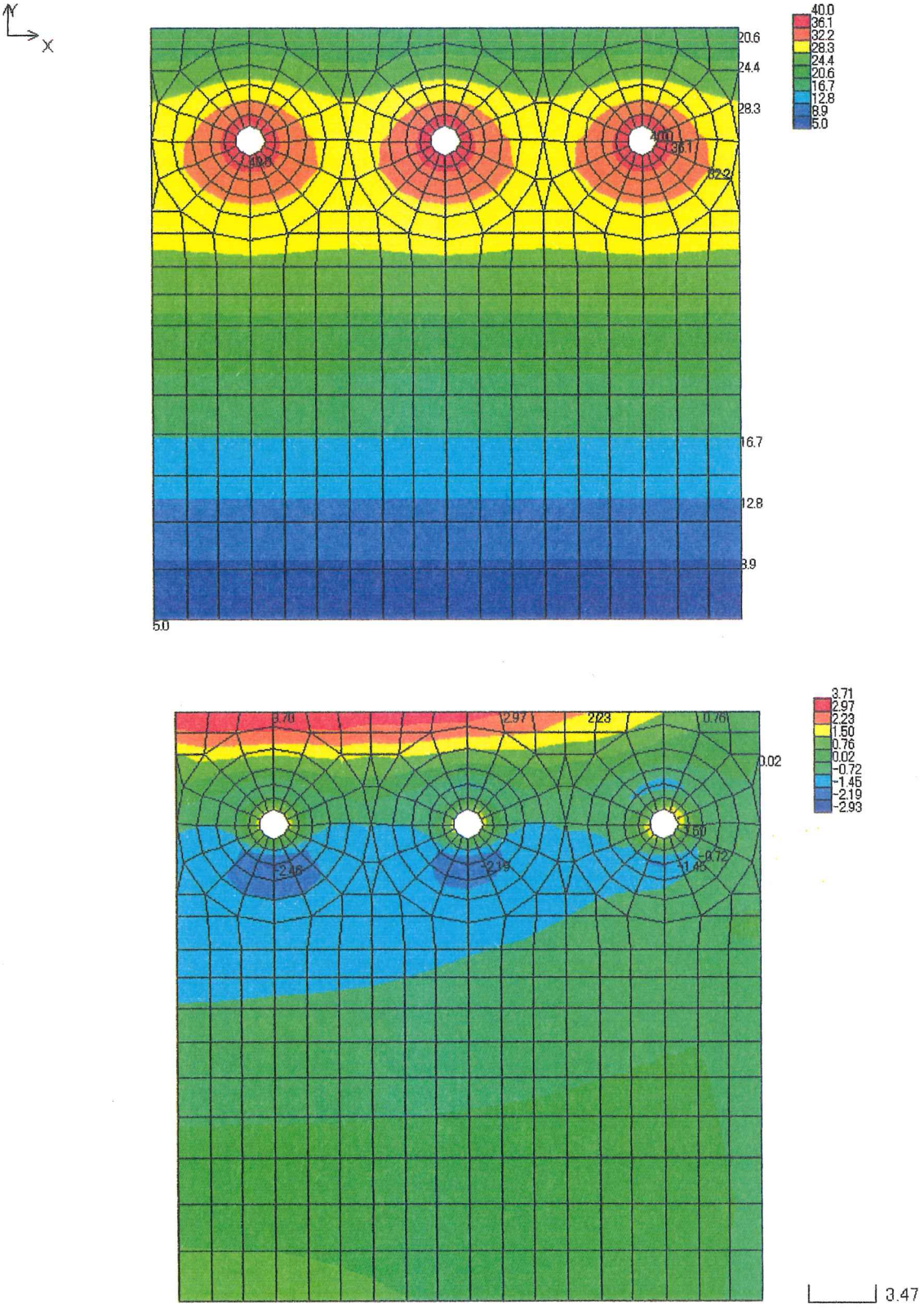
図－１２.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



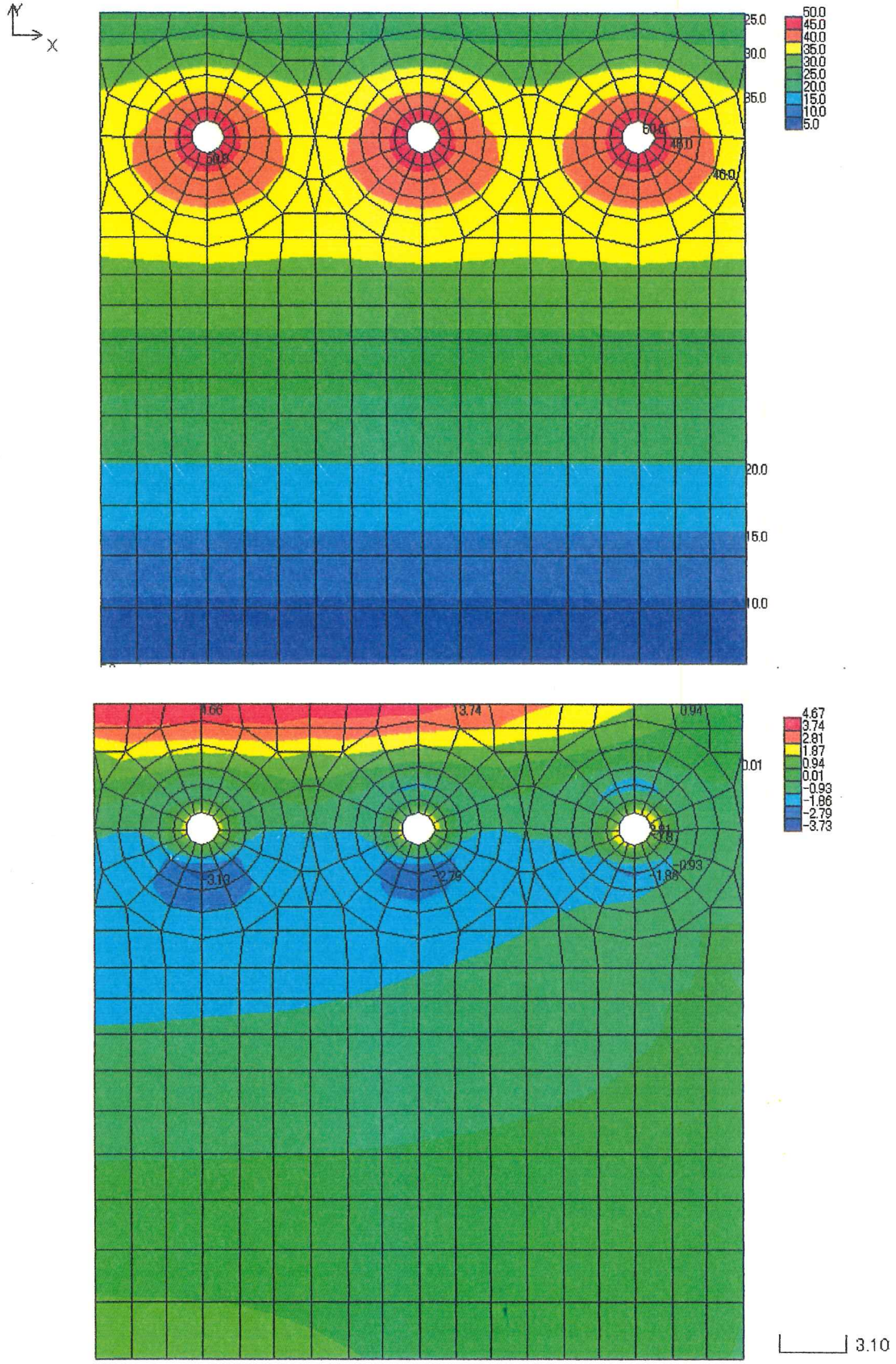
図－１３.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



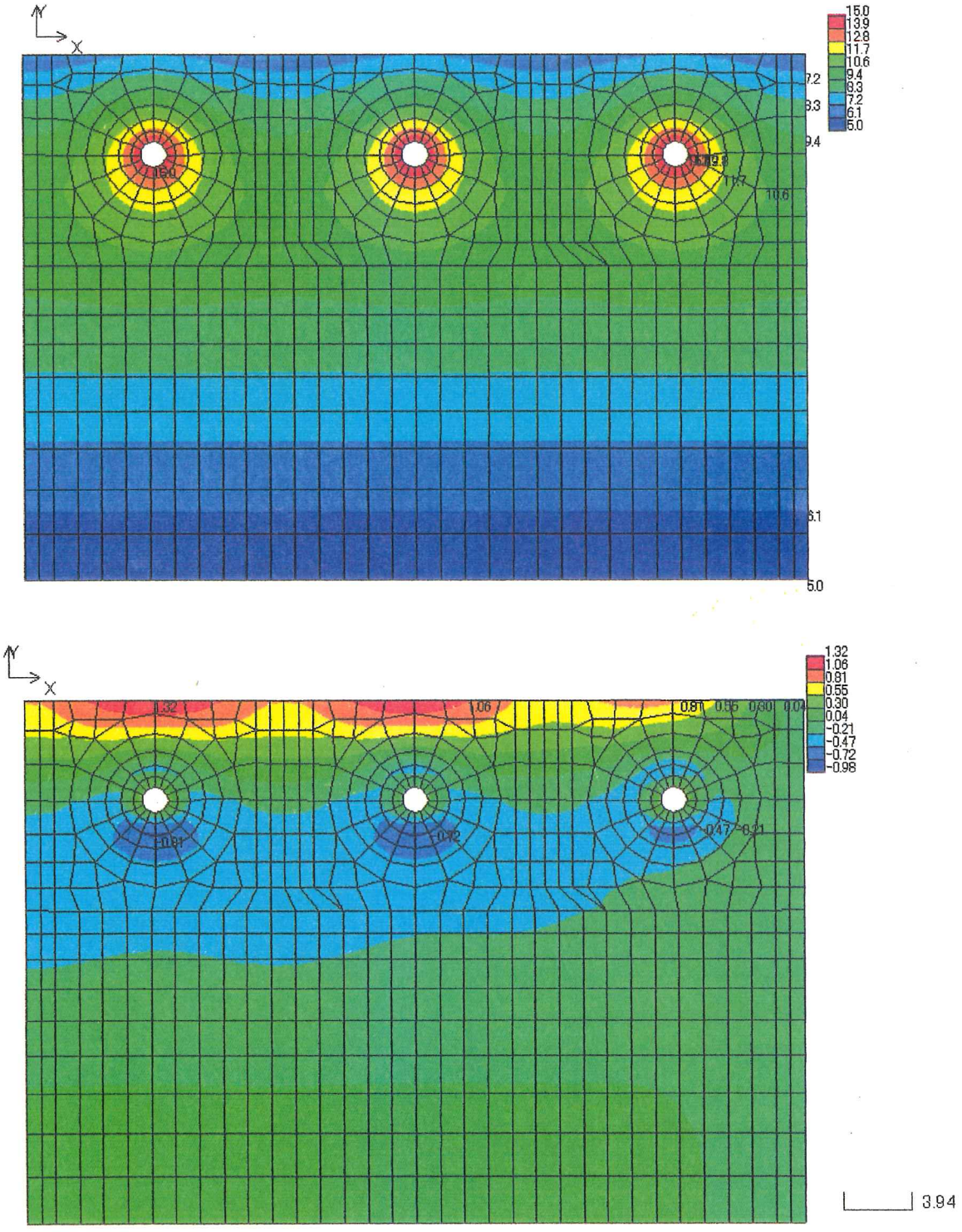
図－１４.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



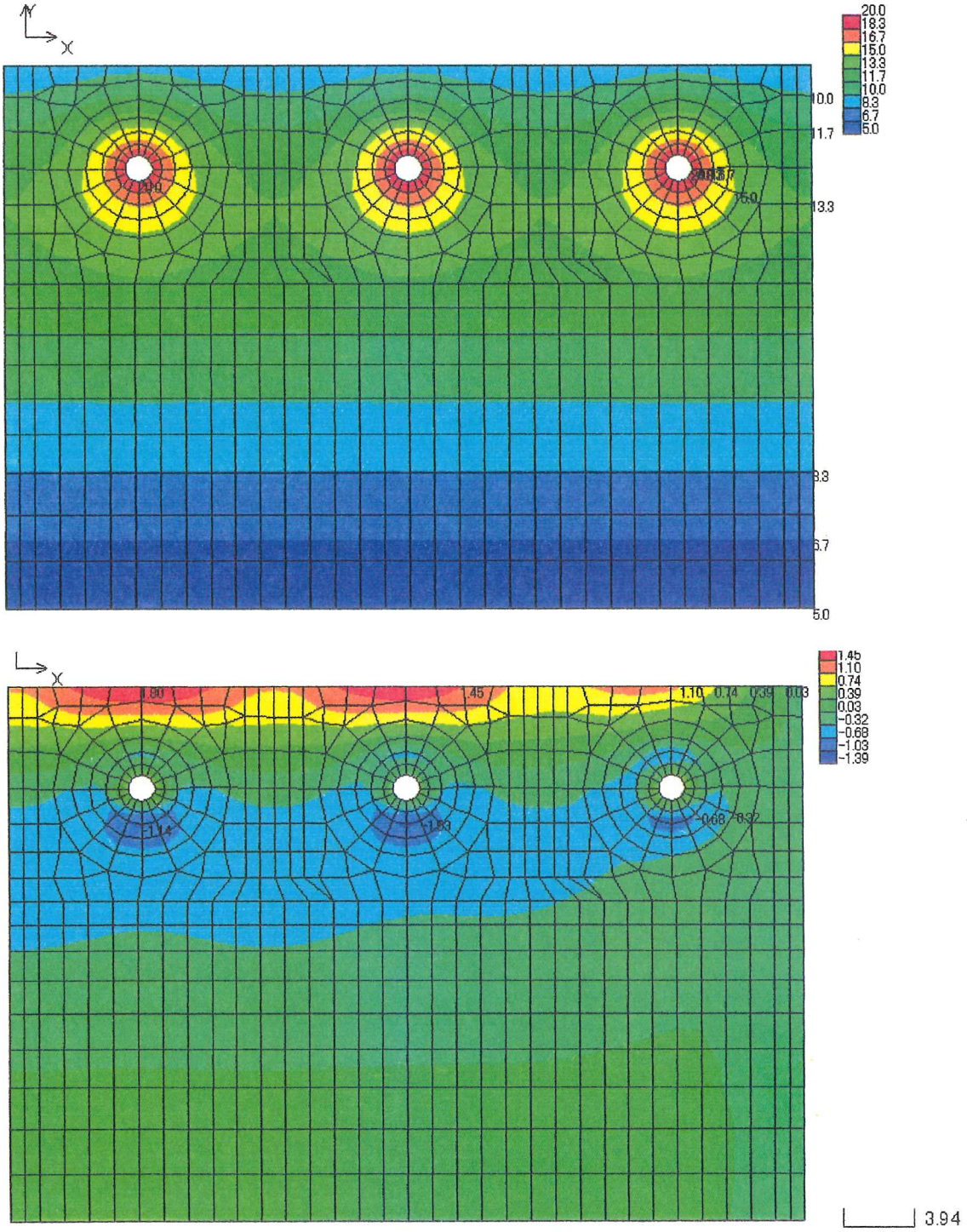
図－１５.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



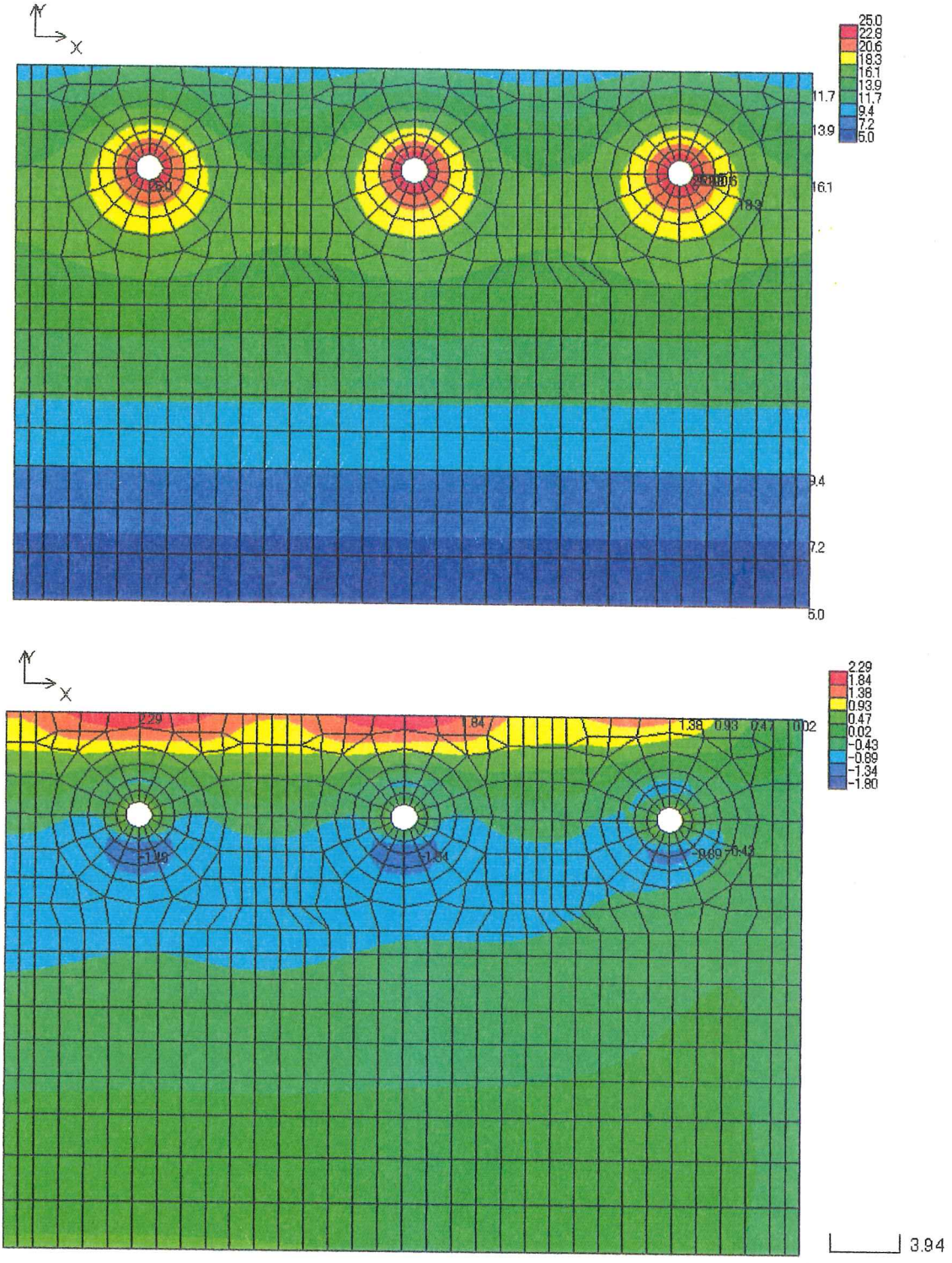
図－１６.かぶり５cm，ヒータ間隔１０cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



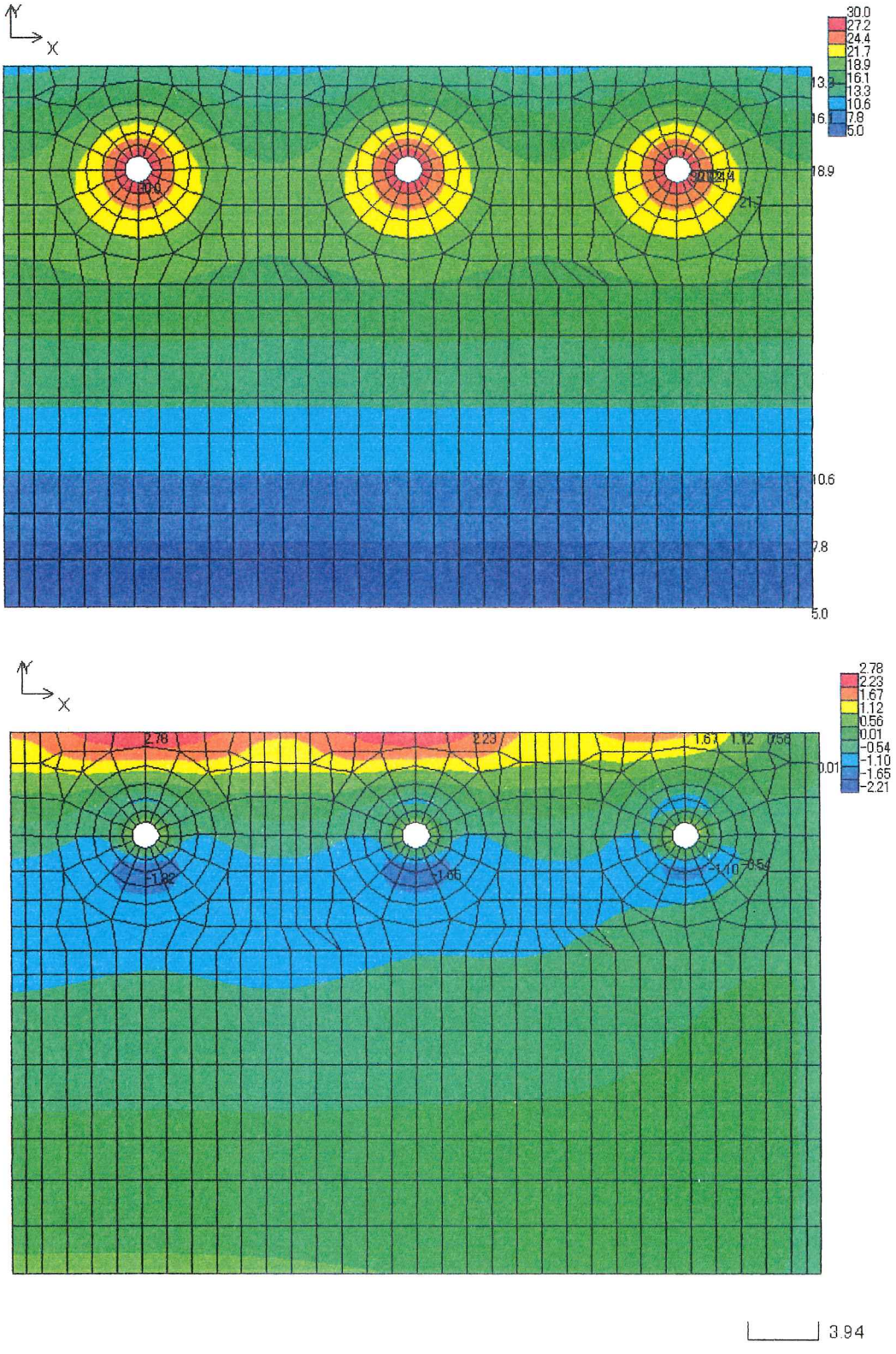
図－１７.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



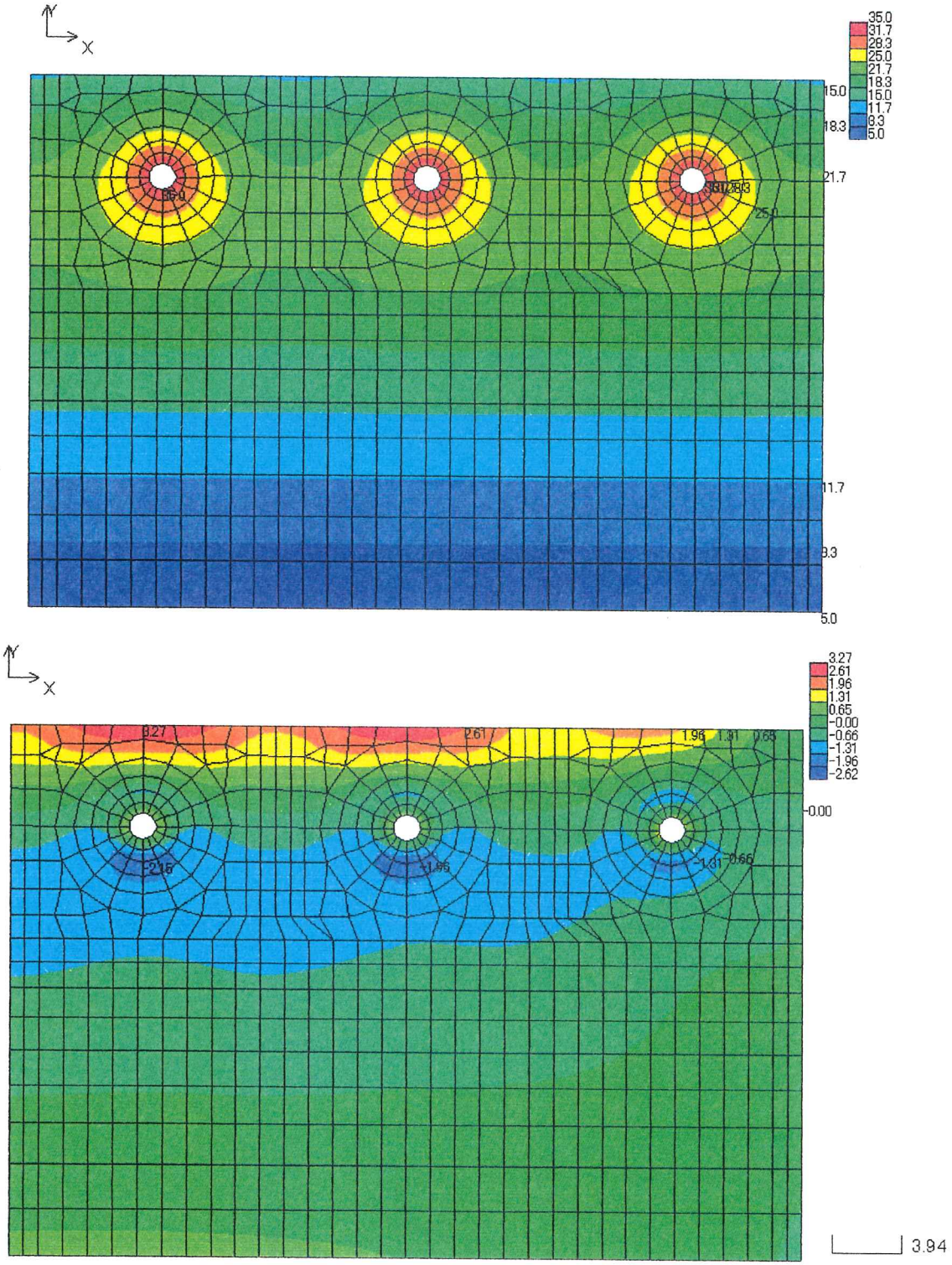
図－１８.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



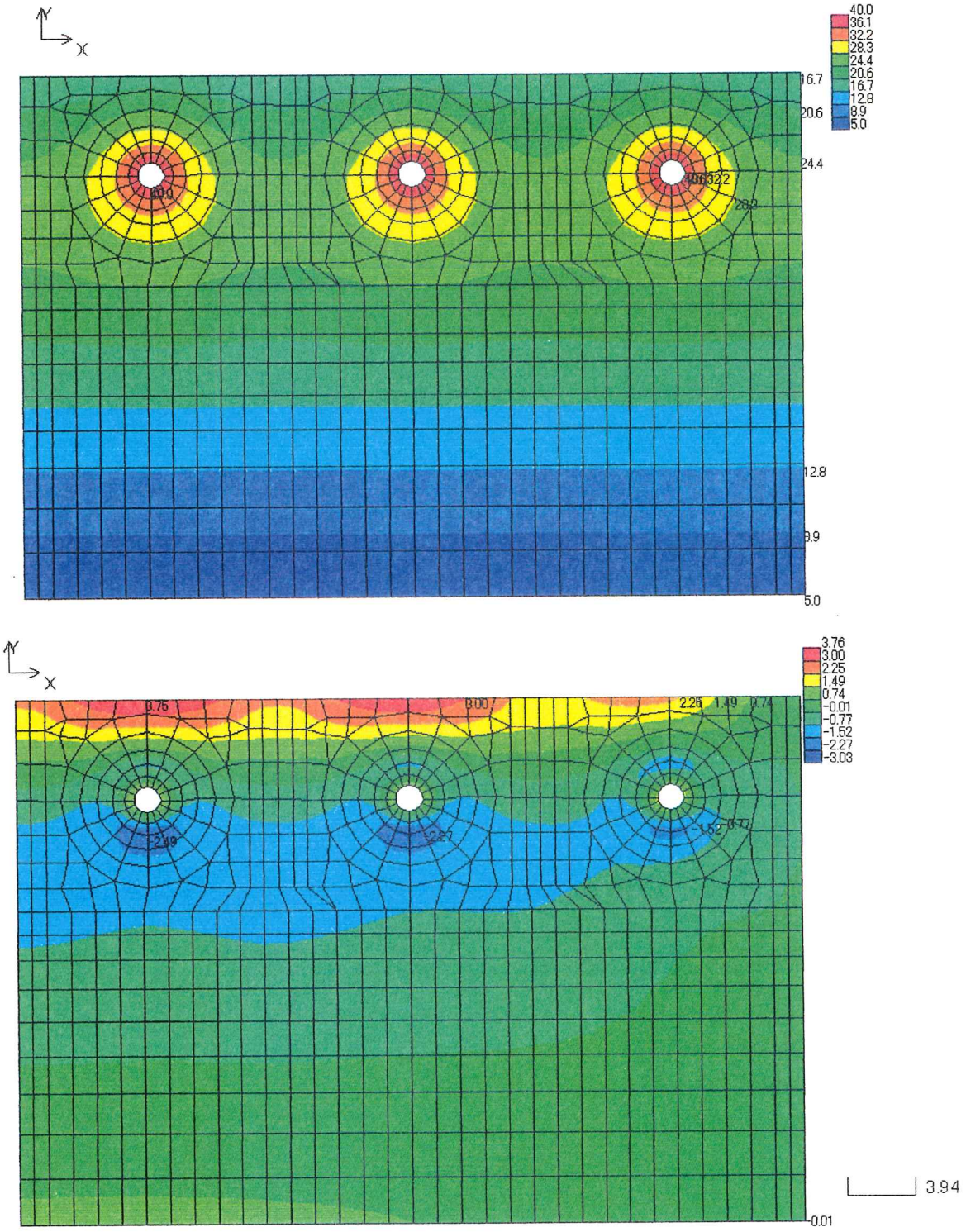
図－１９.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



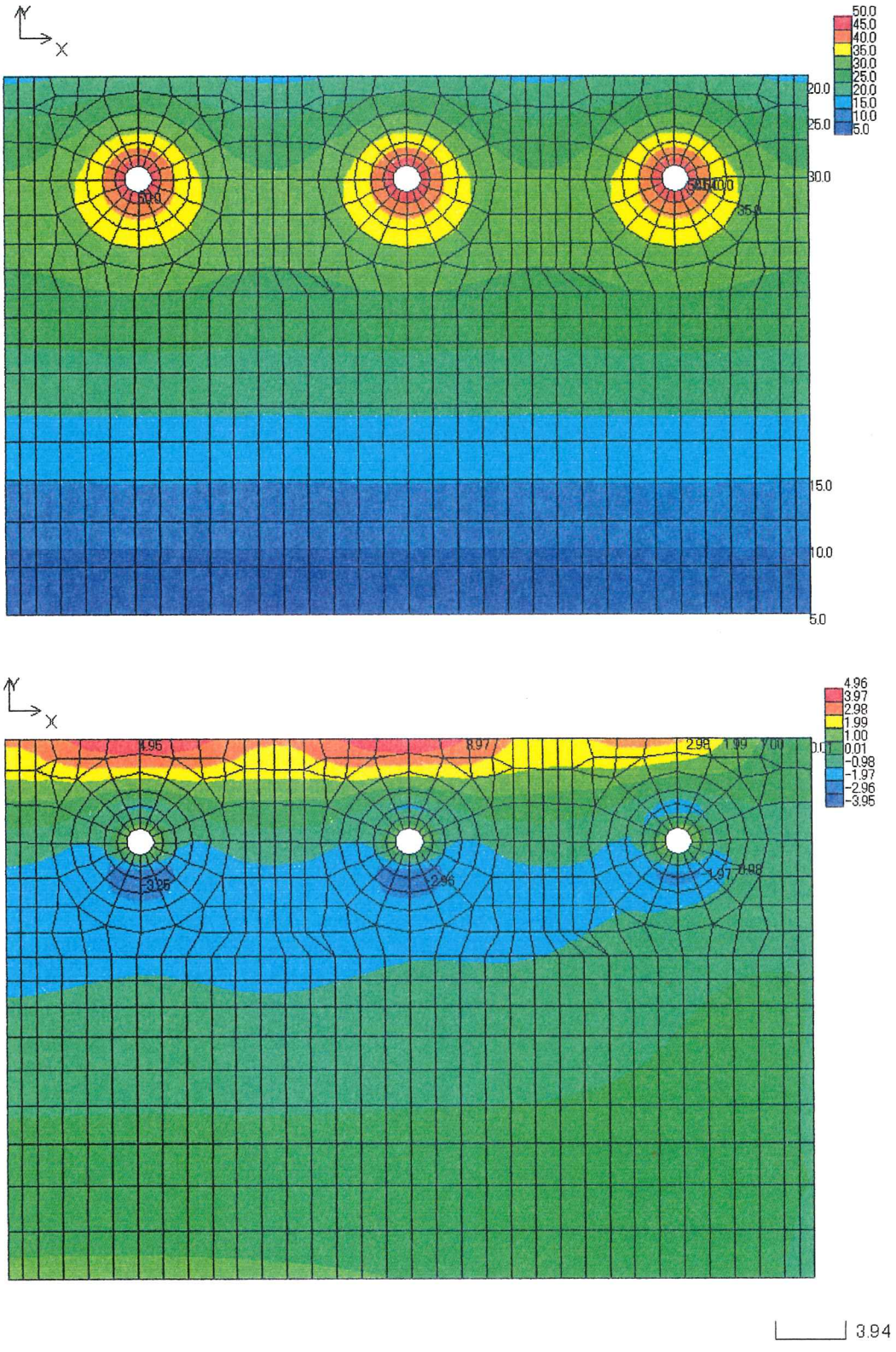
図－２０.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



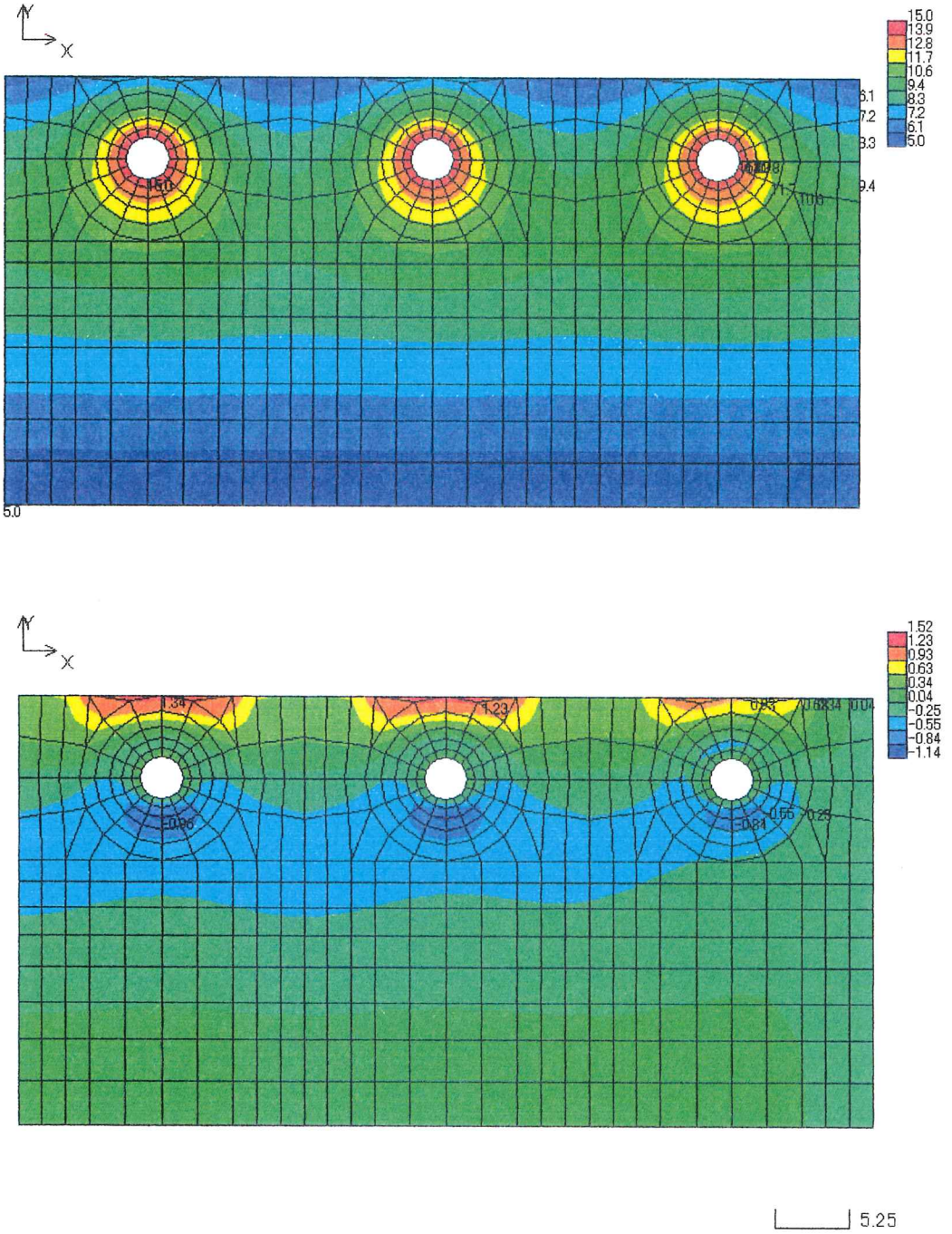
図－２１.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



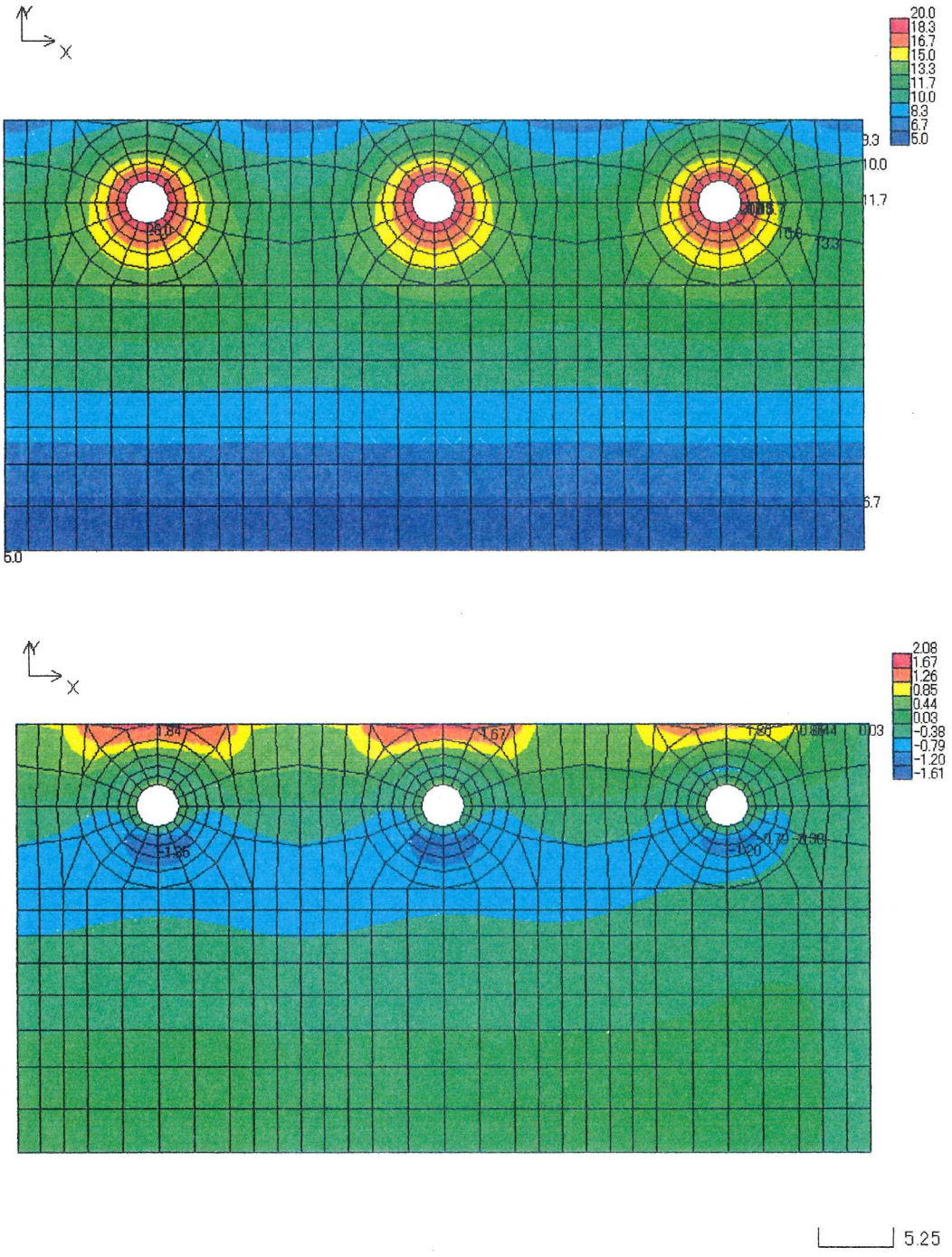
図－２２.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



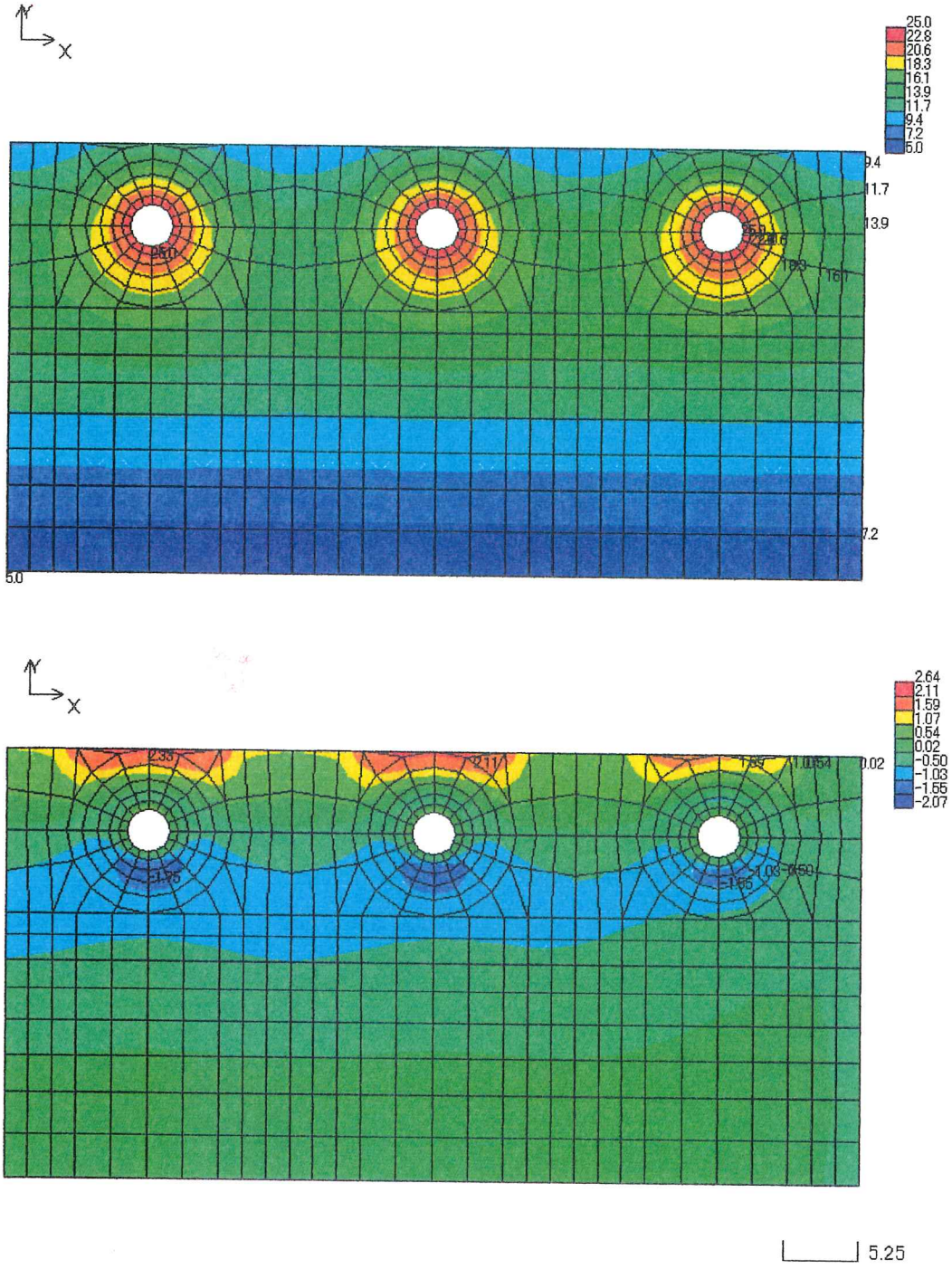
図－２３.かぶり５cm，ヒータ間隔１５cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



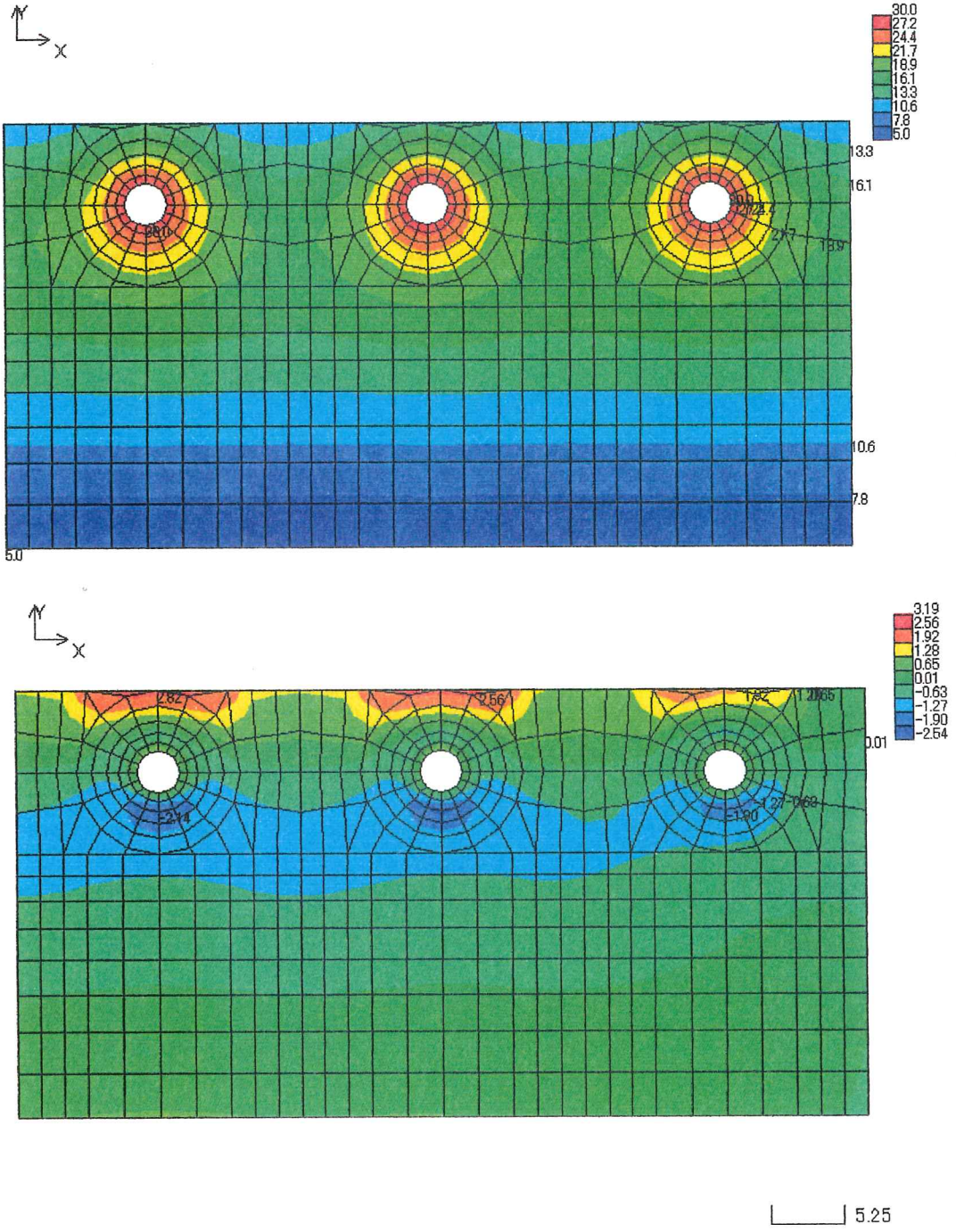
図－２４.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



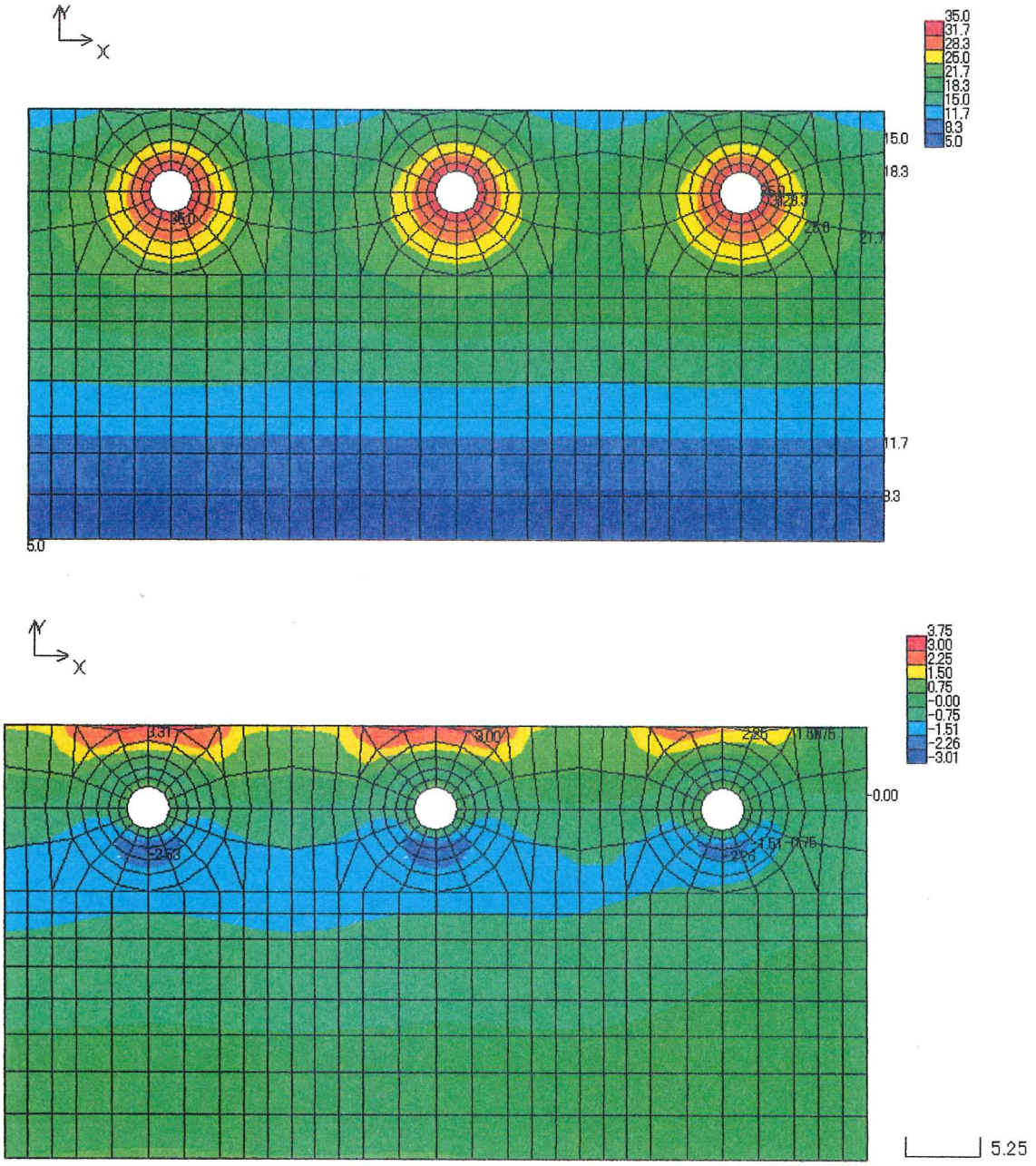
図－２５.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



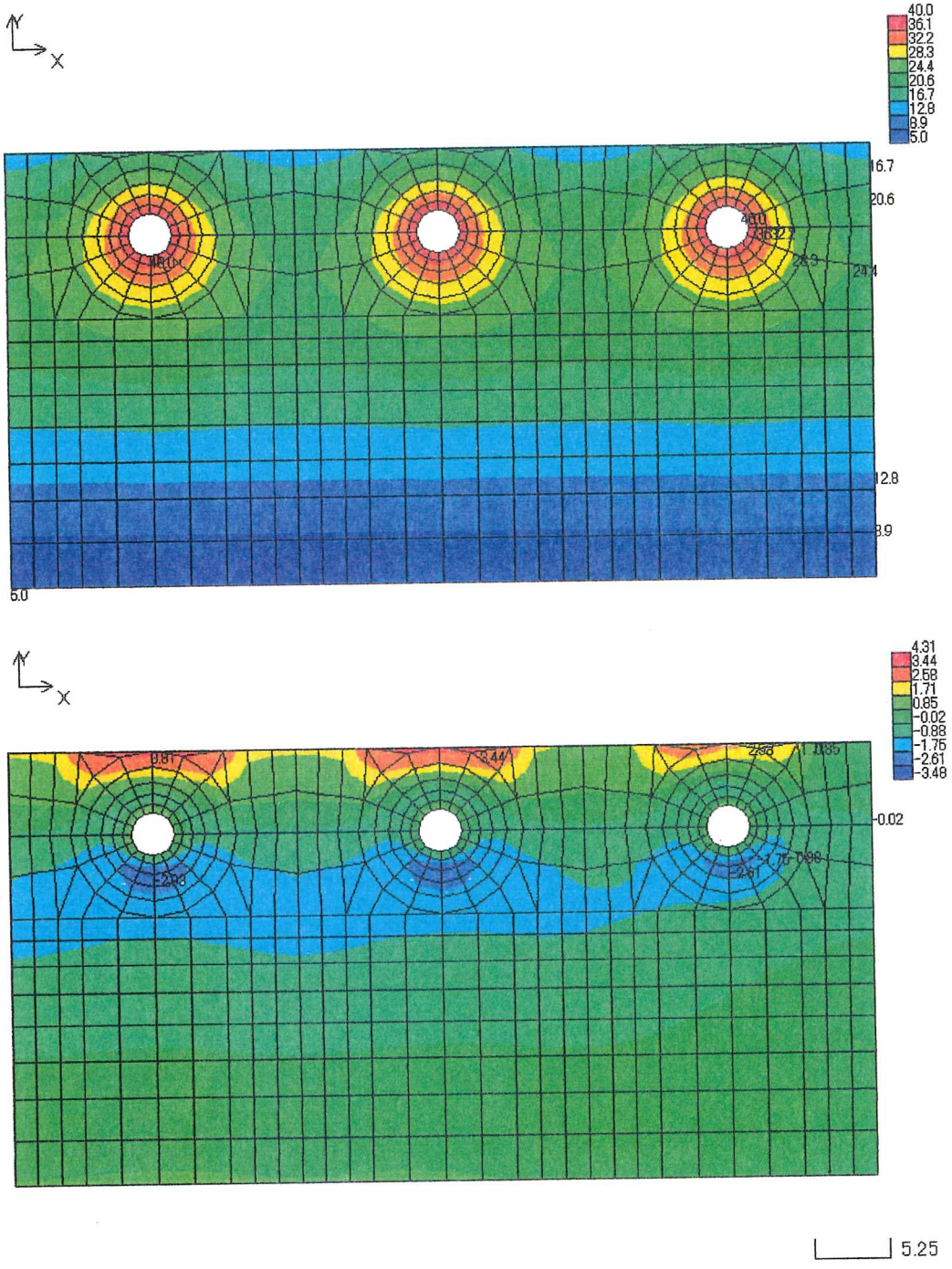
図－２６.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



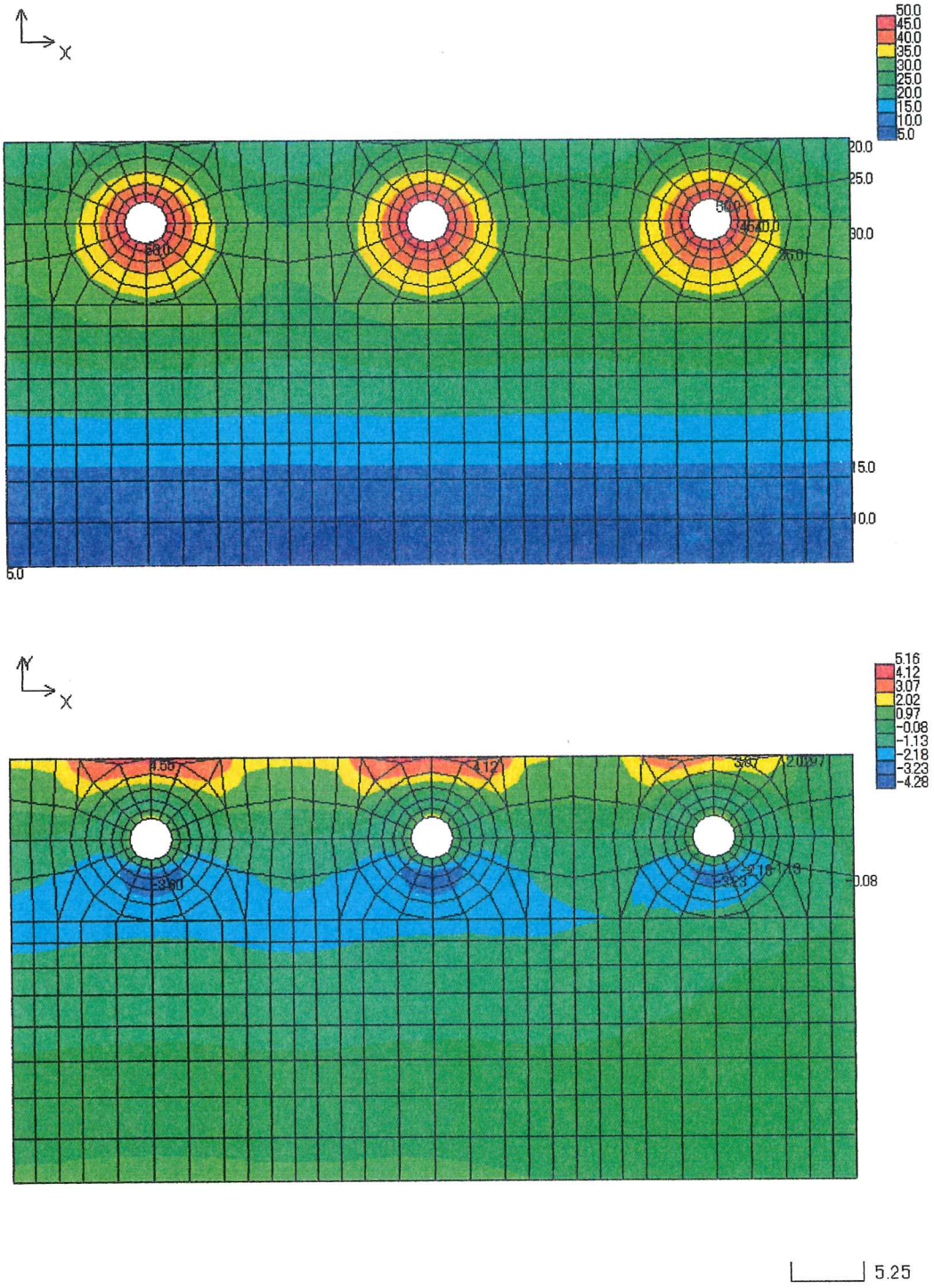
図－２７.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



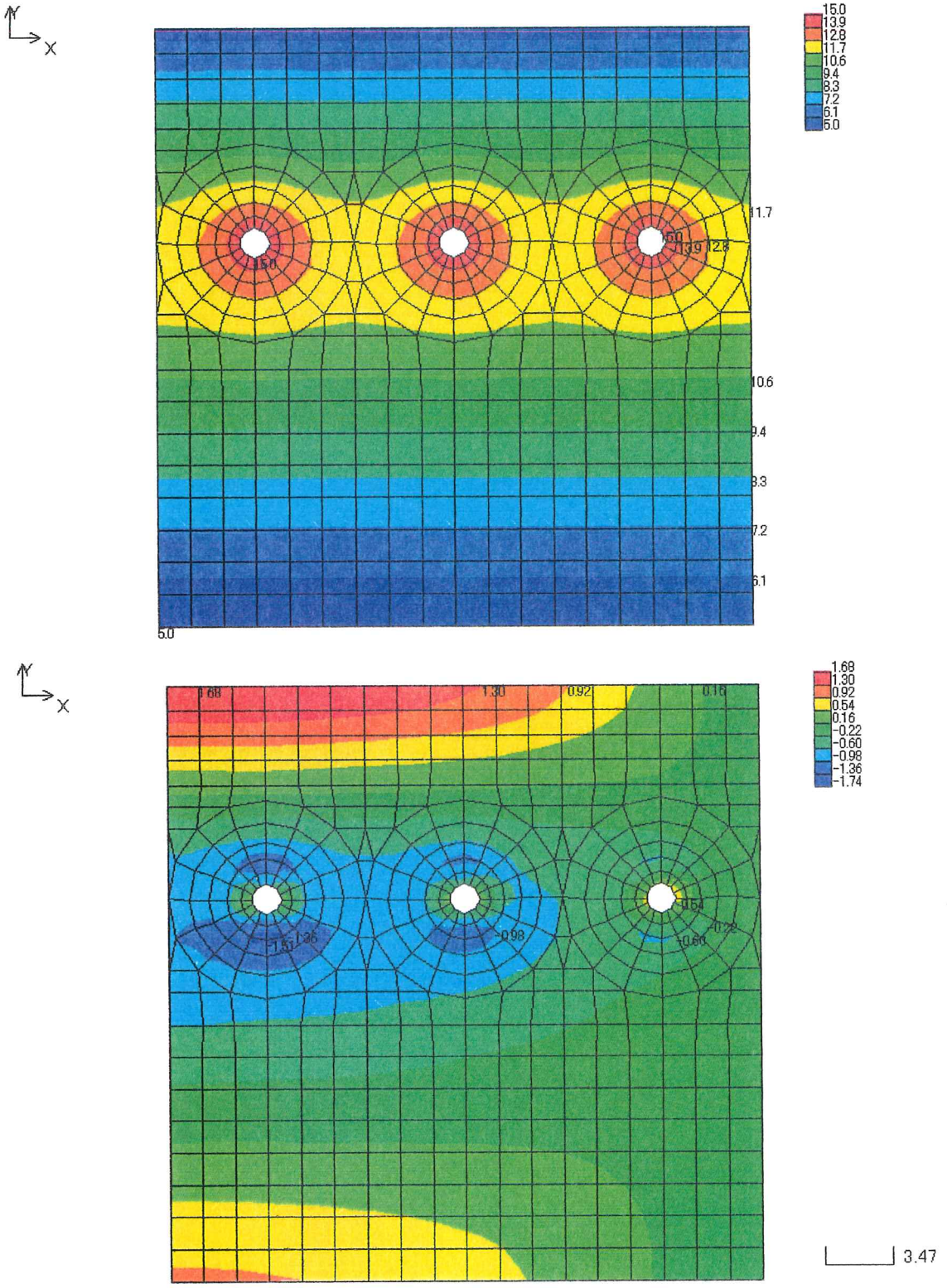
図－２８.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



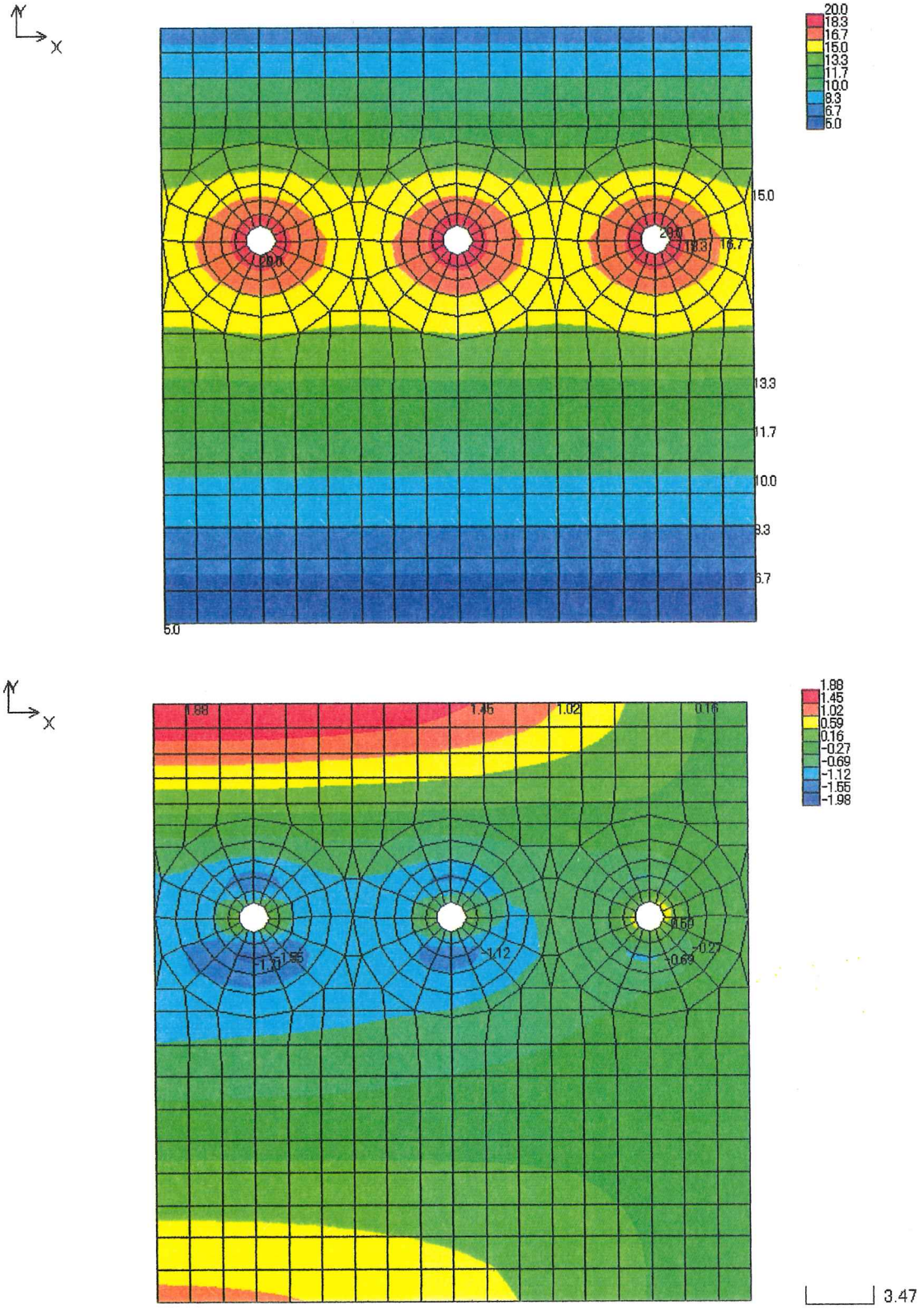
図－２９.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



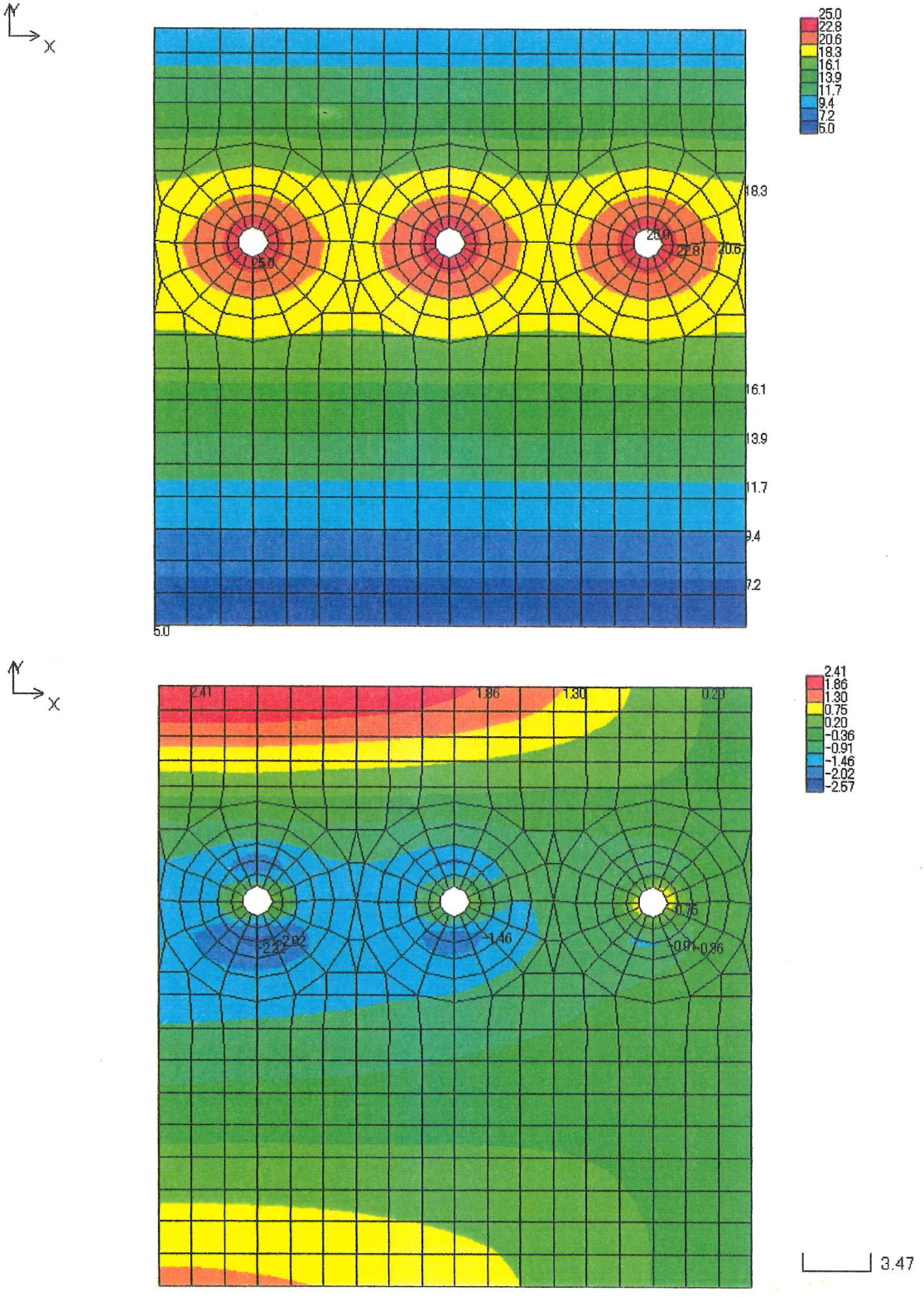
図－３０.かぶり５cm，ヒータ間隔２０cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



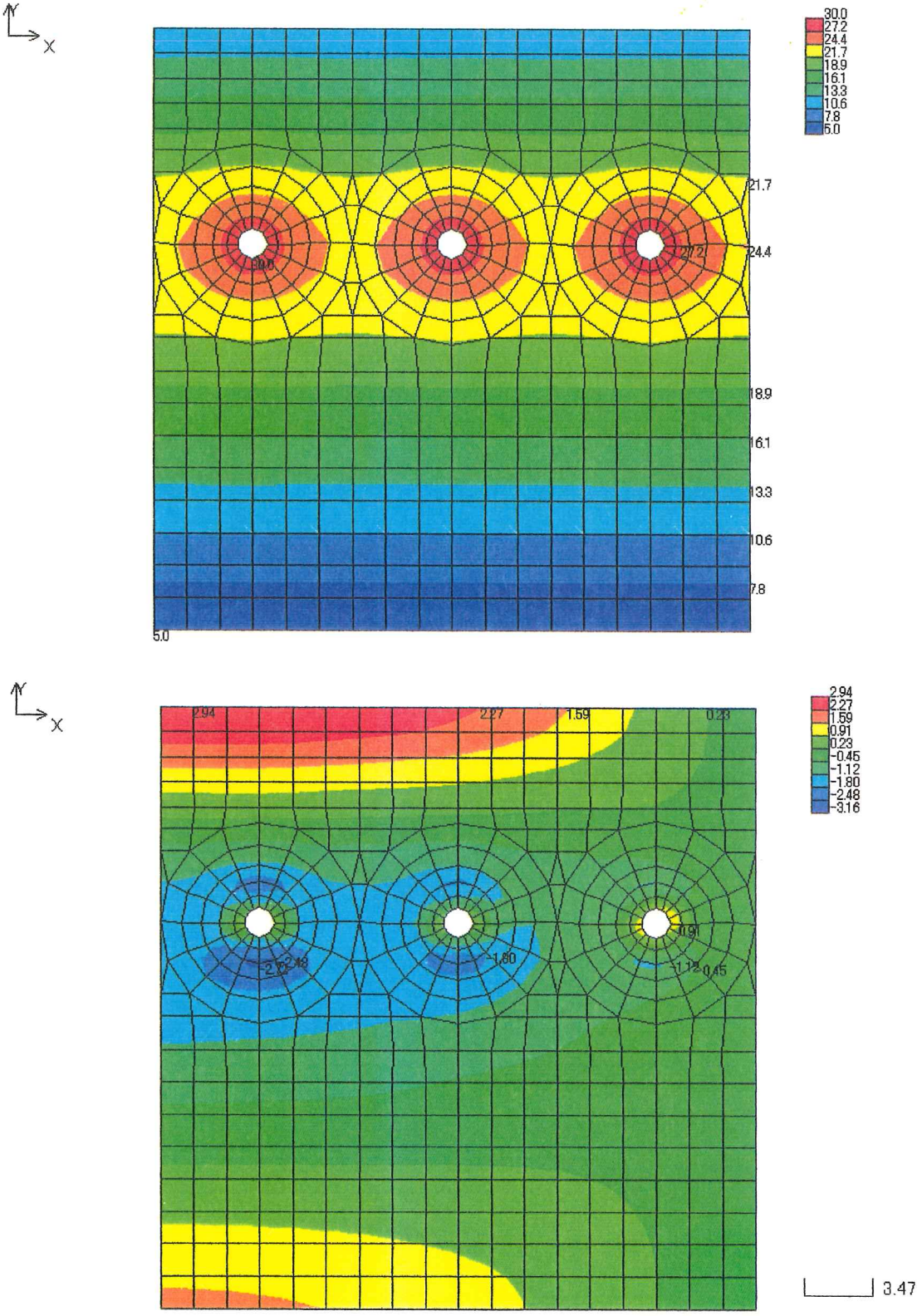
図－３１.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



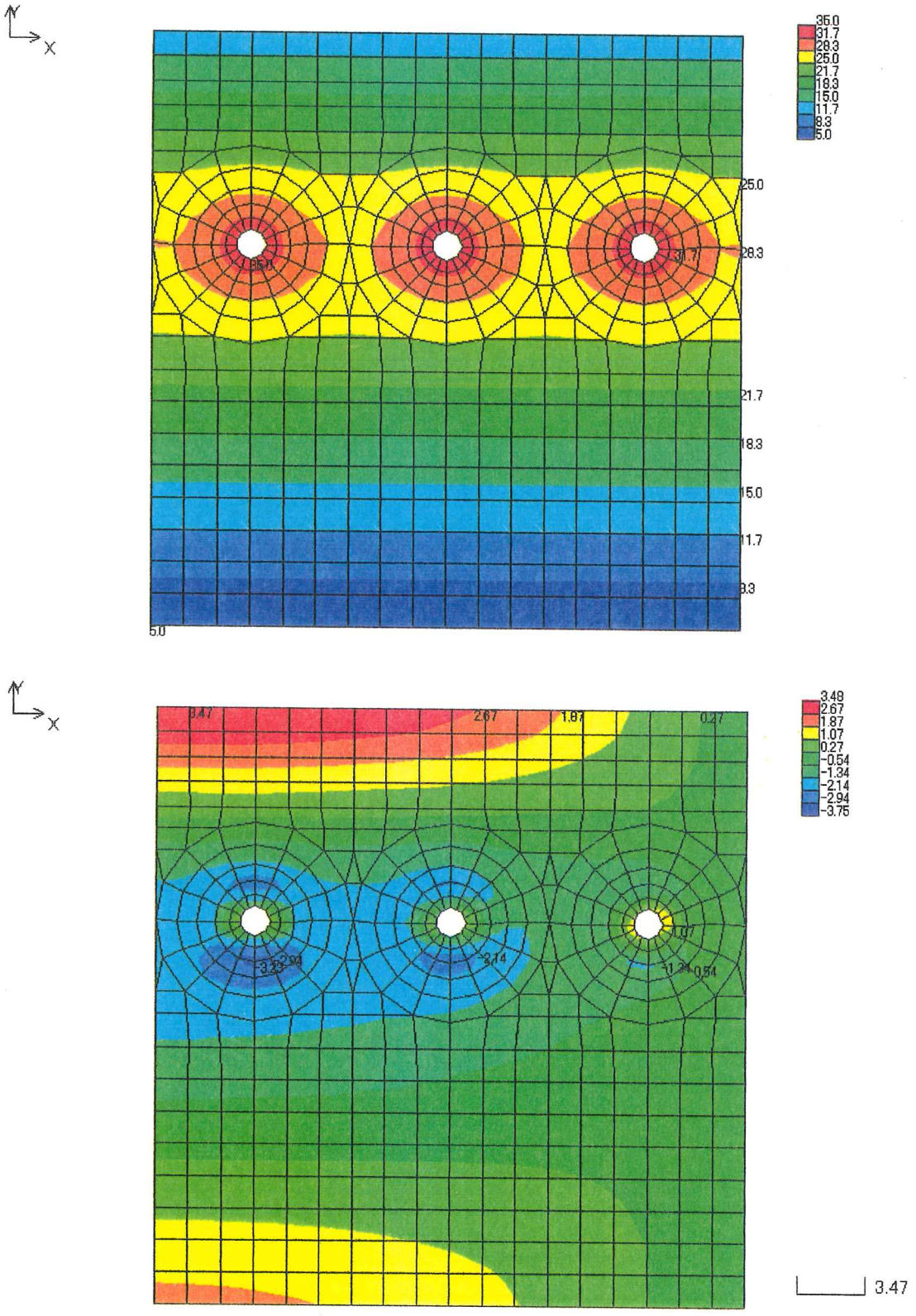
図－３２.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



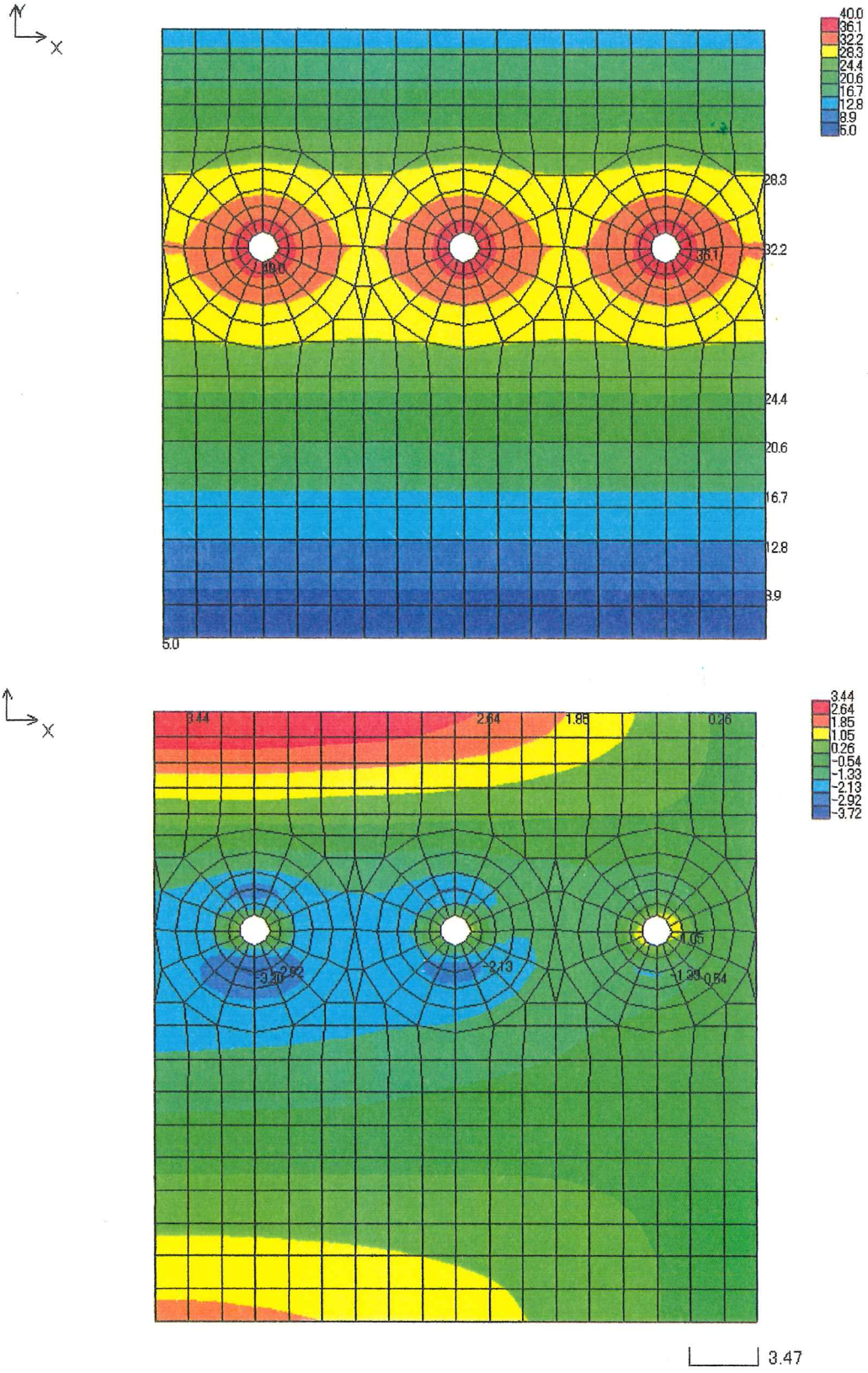
図－３３.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



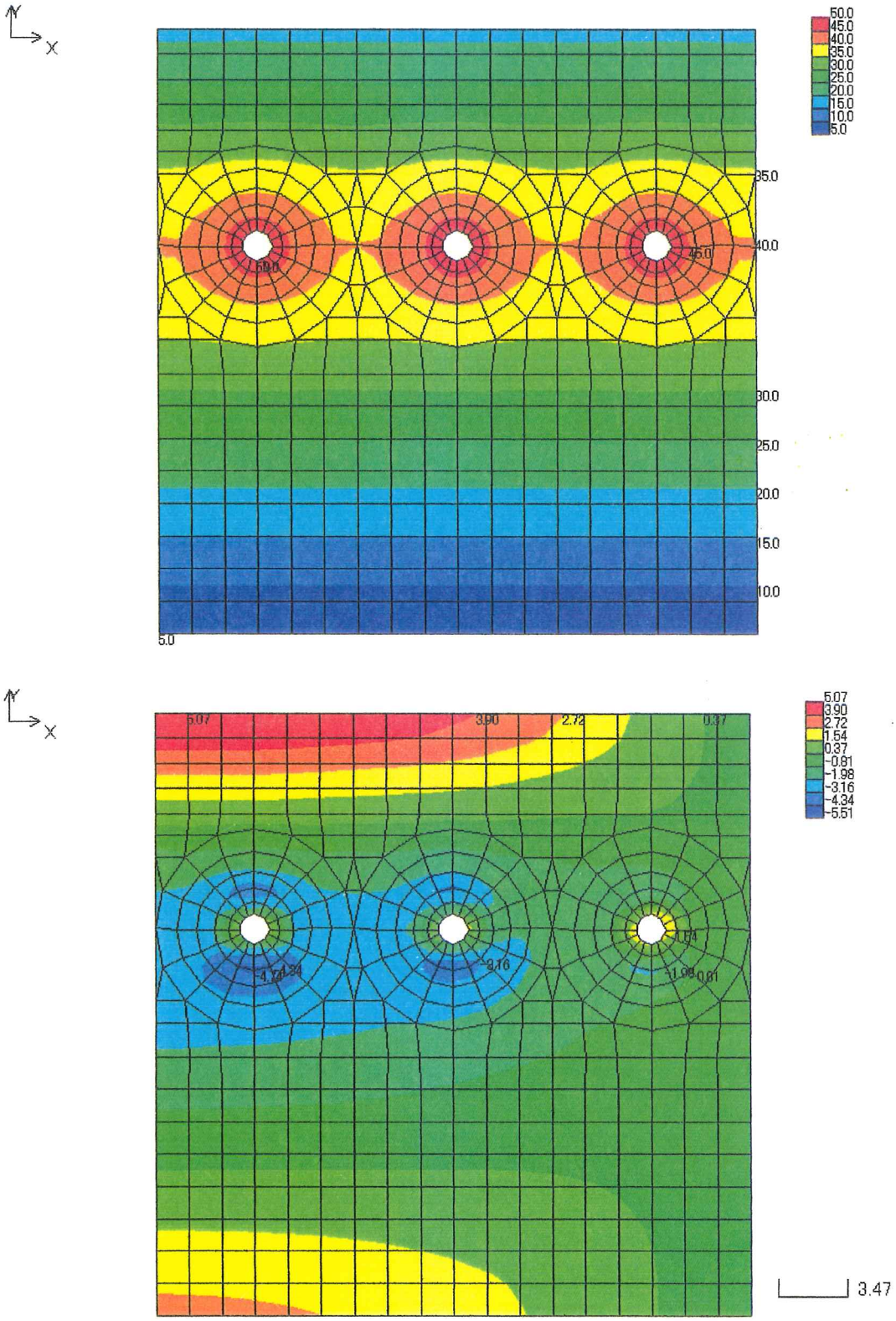
図－３４.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



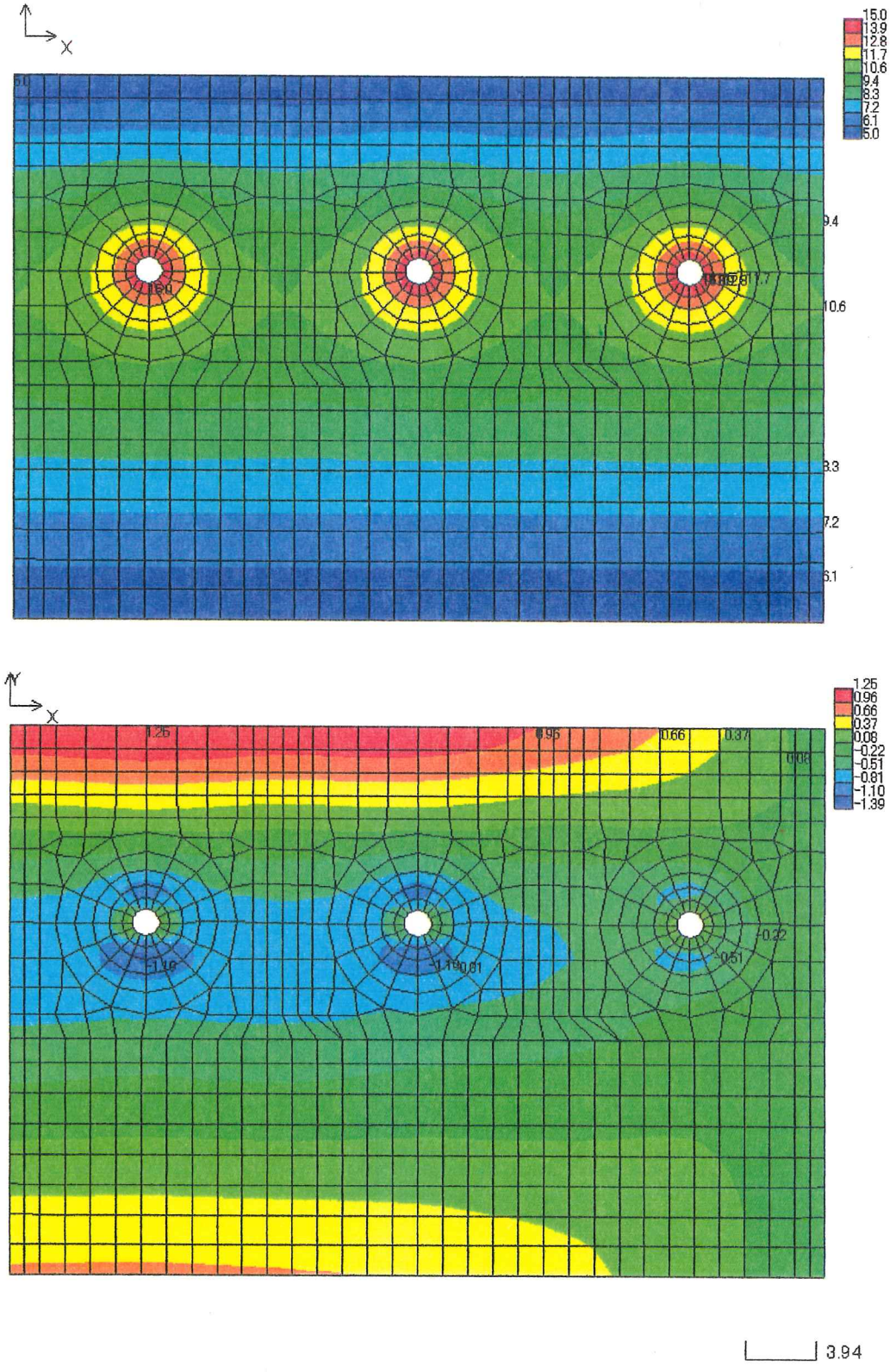
図－３５.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



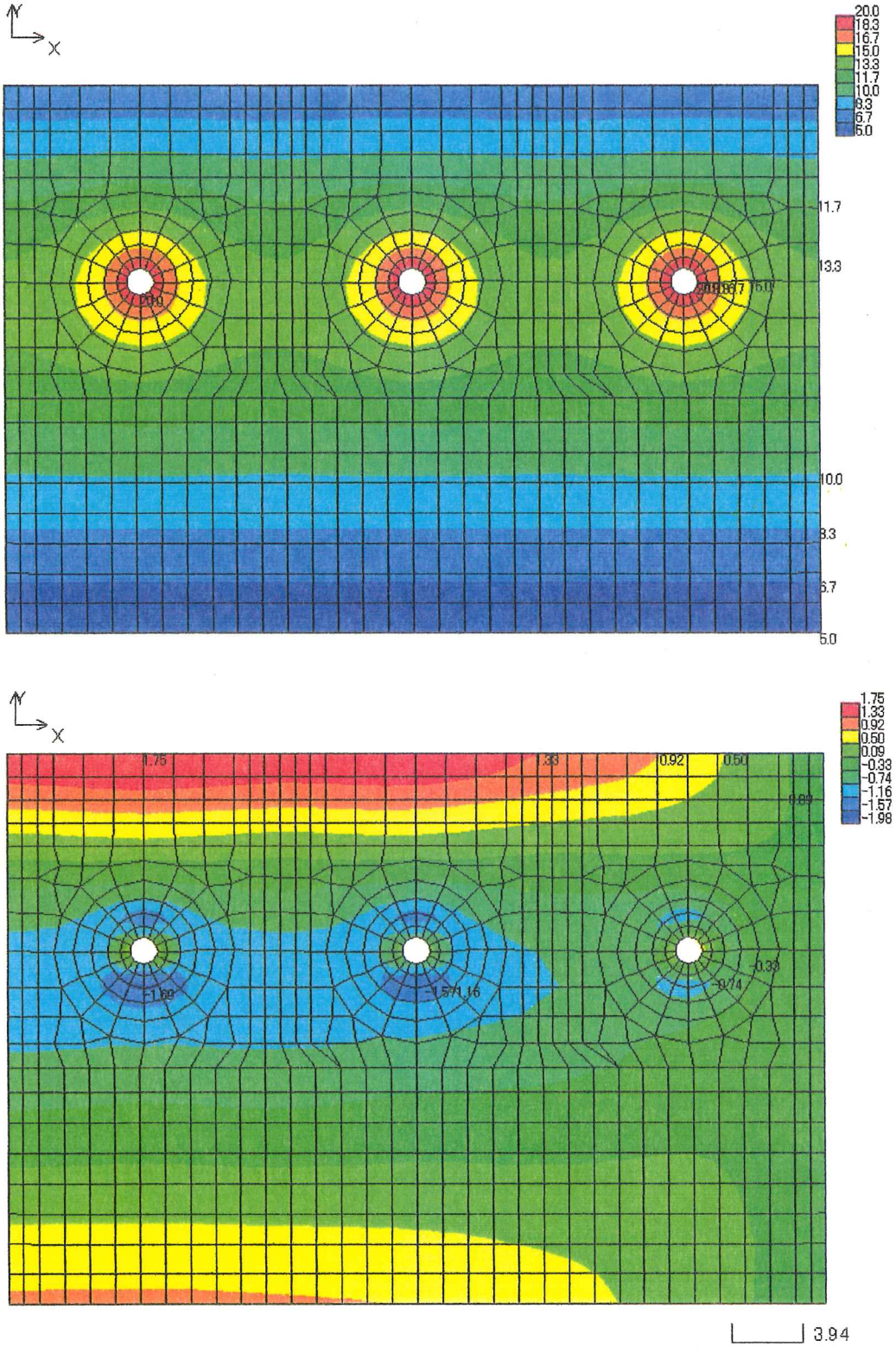
図－３６.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



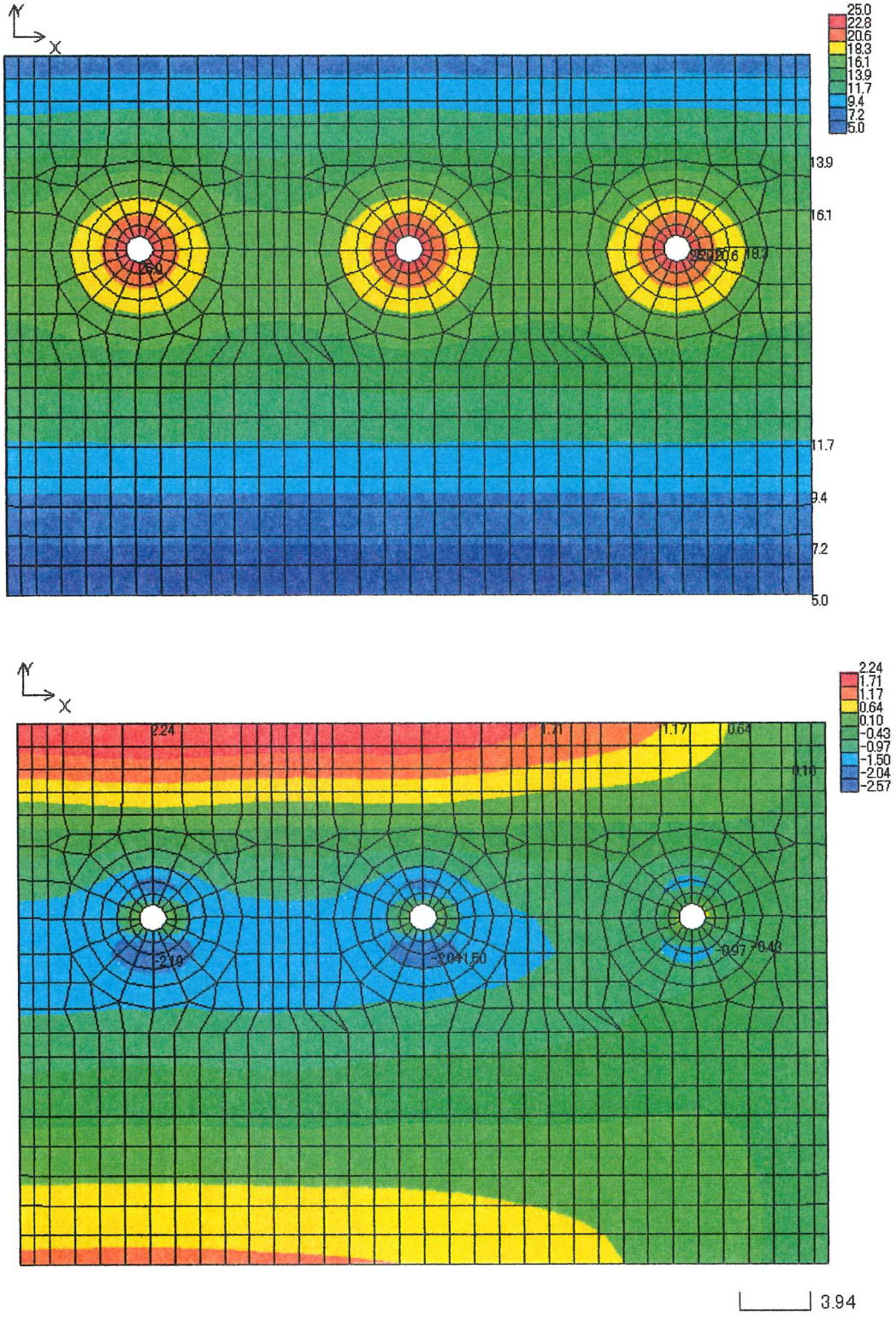
図－３７.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



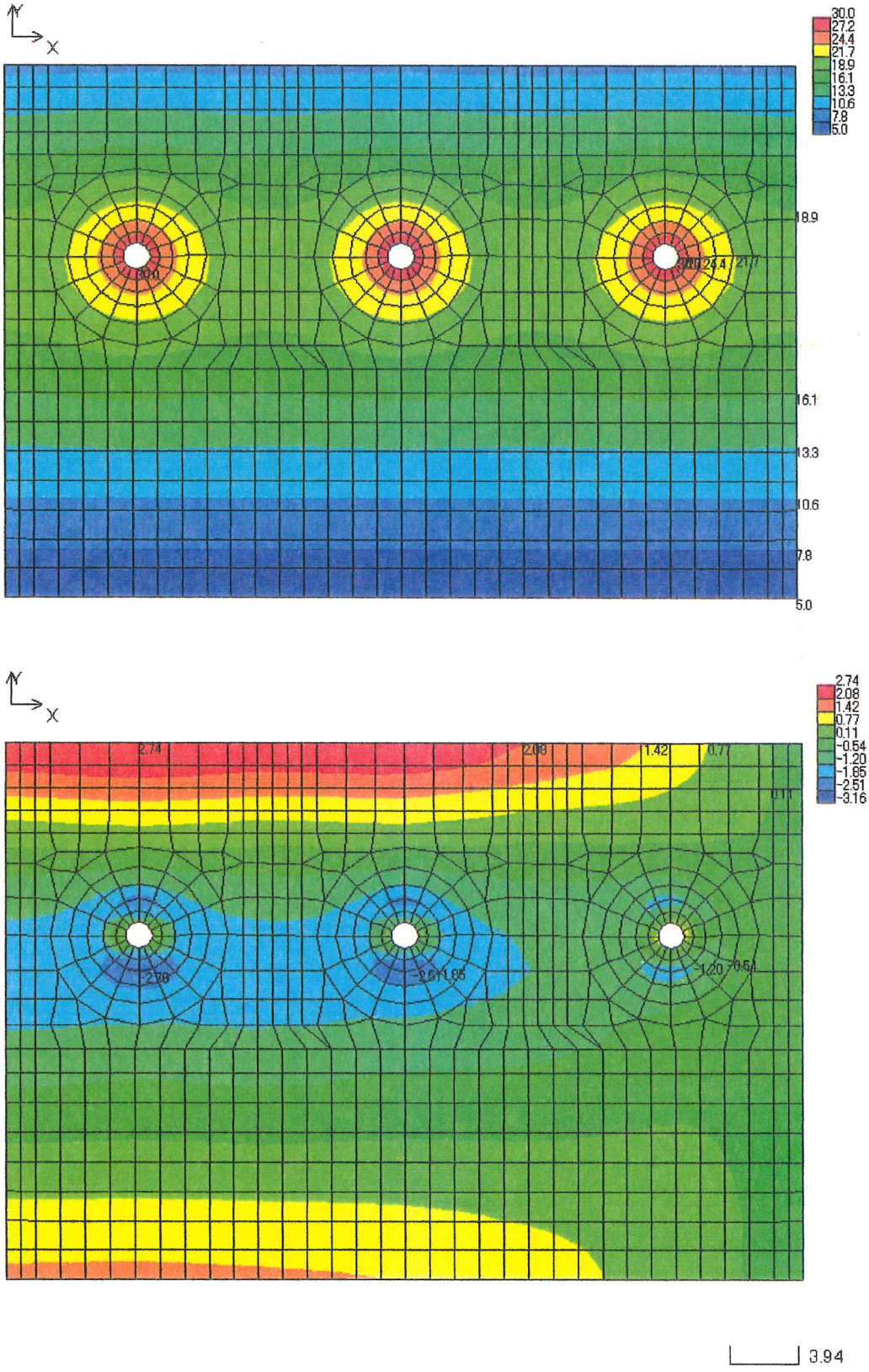
図－３８.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



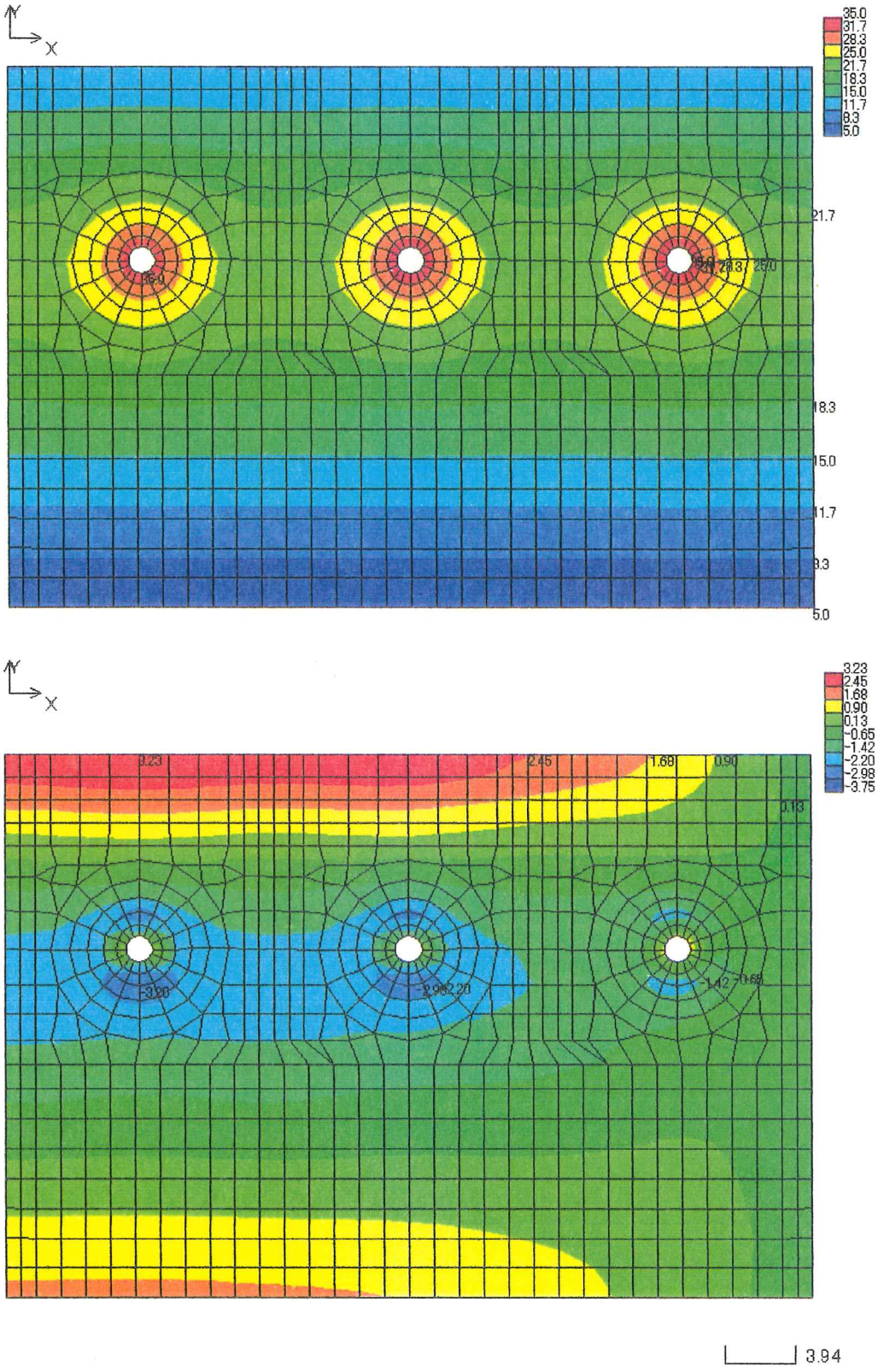
図－３９.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



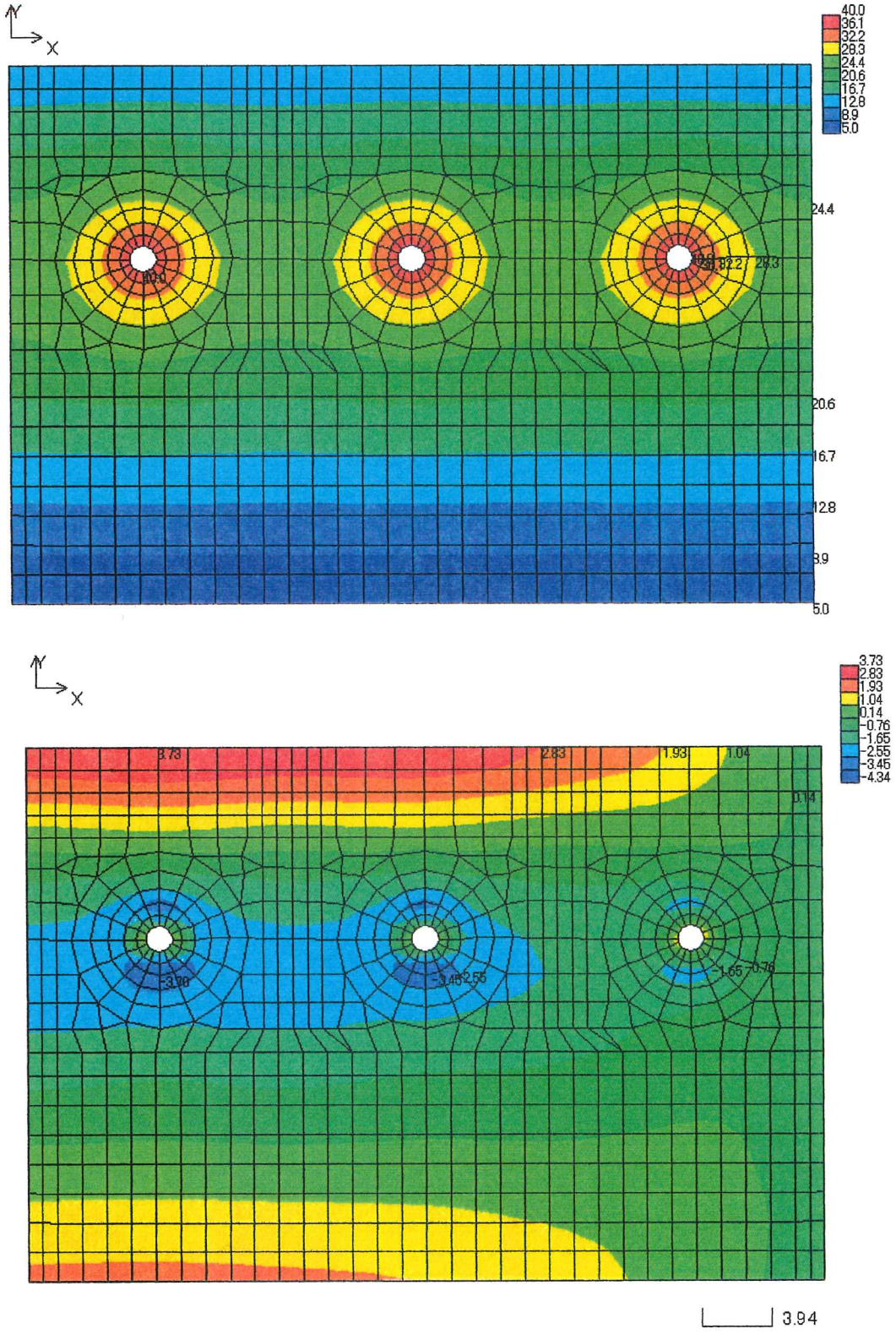
図－４０.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



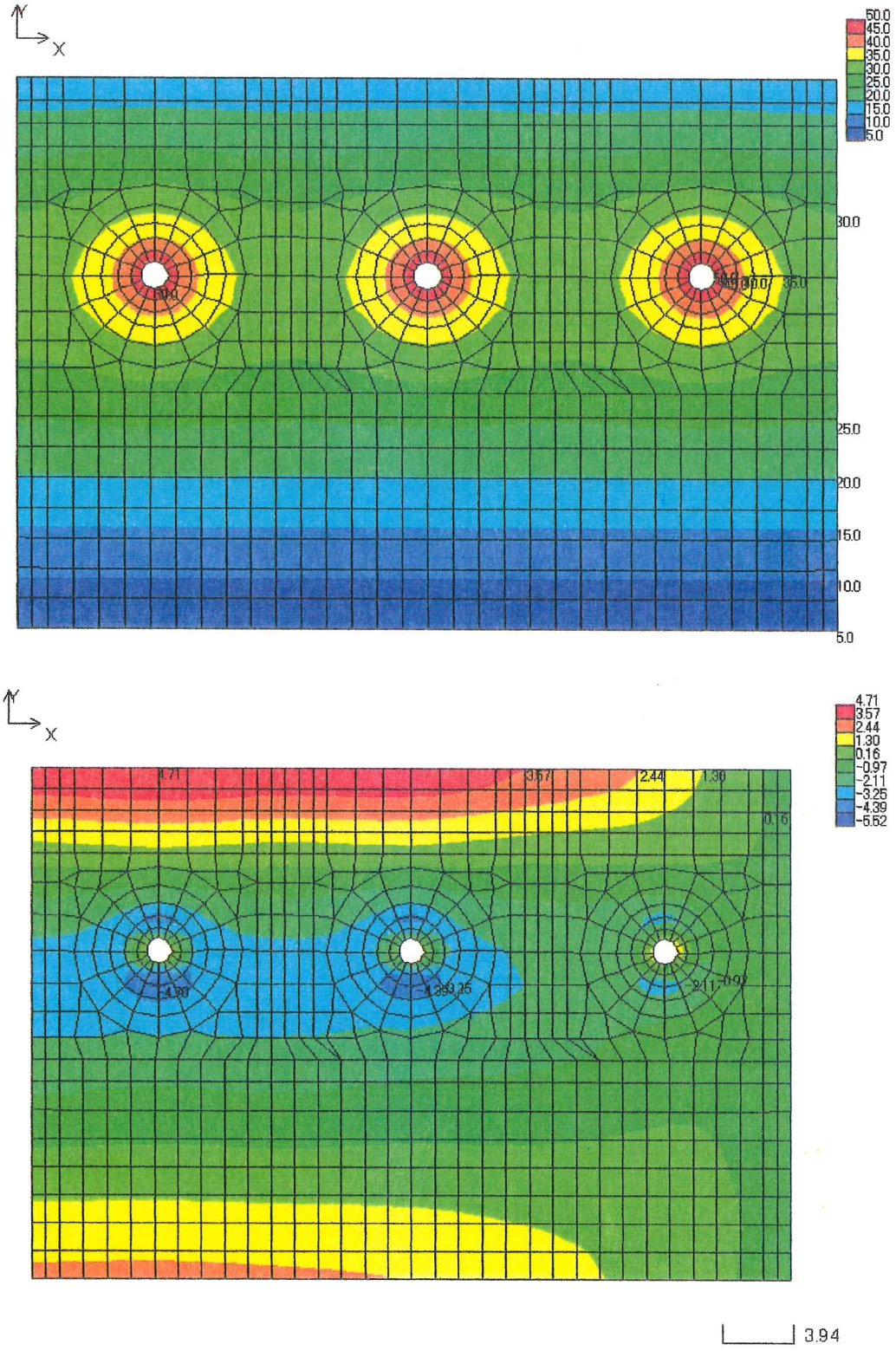
図－４１.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



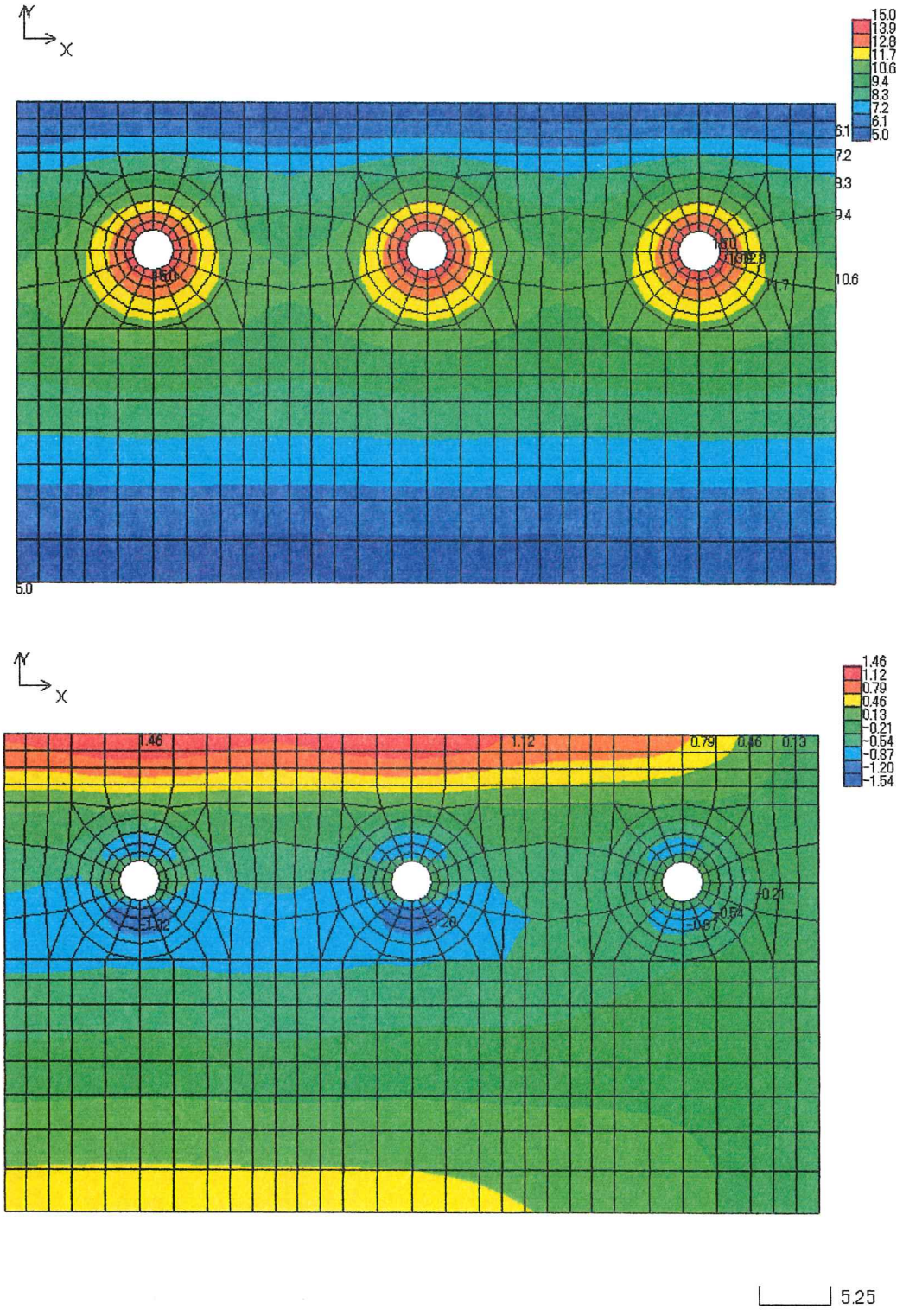
図－４２.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



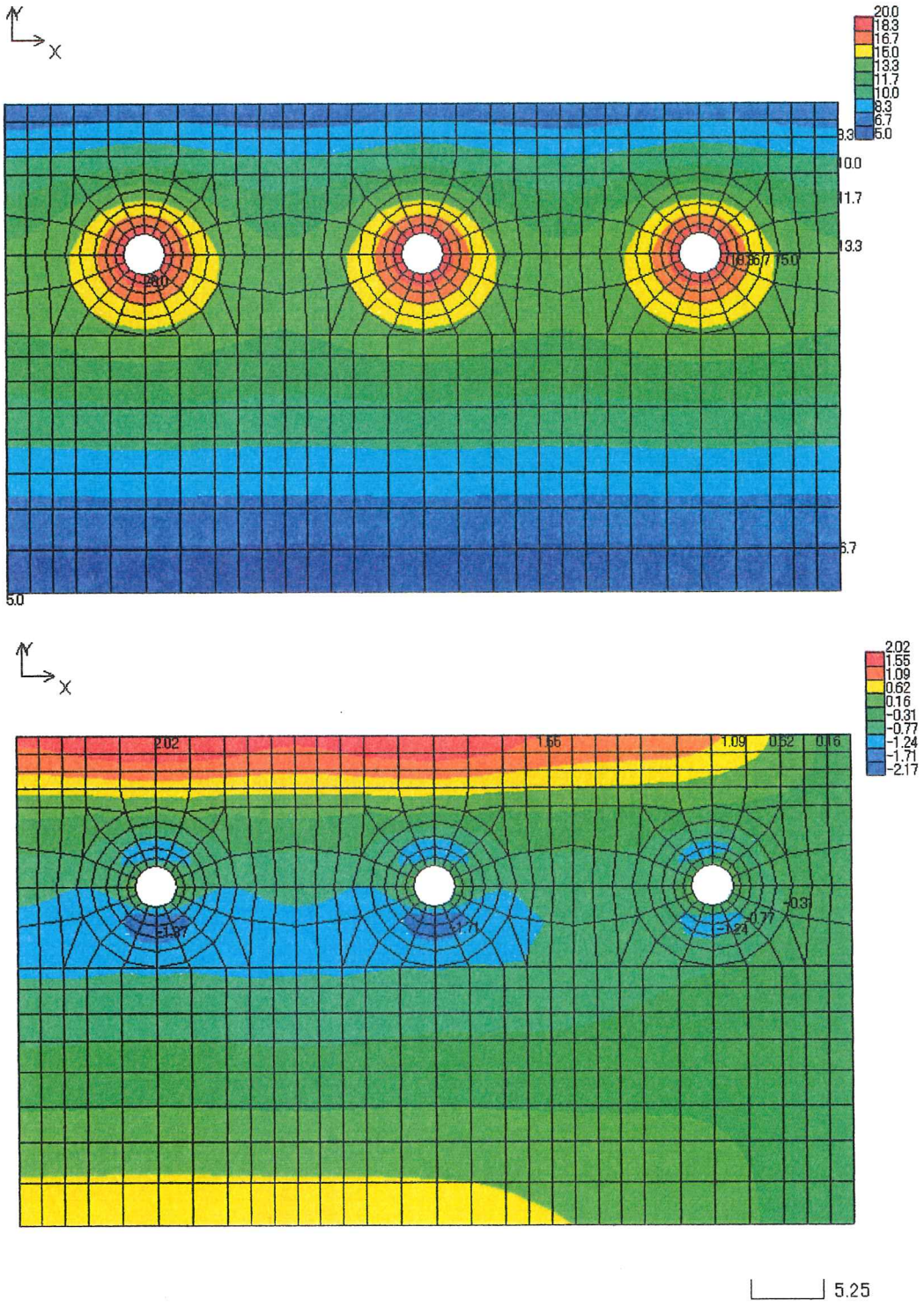
図－４３.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



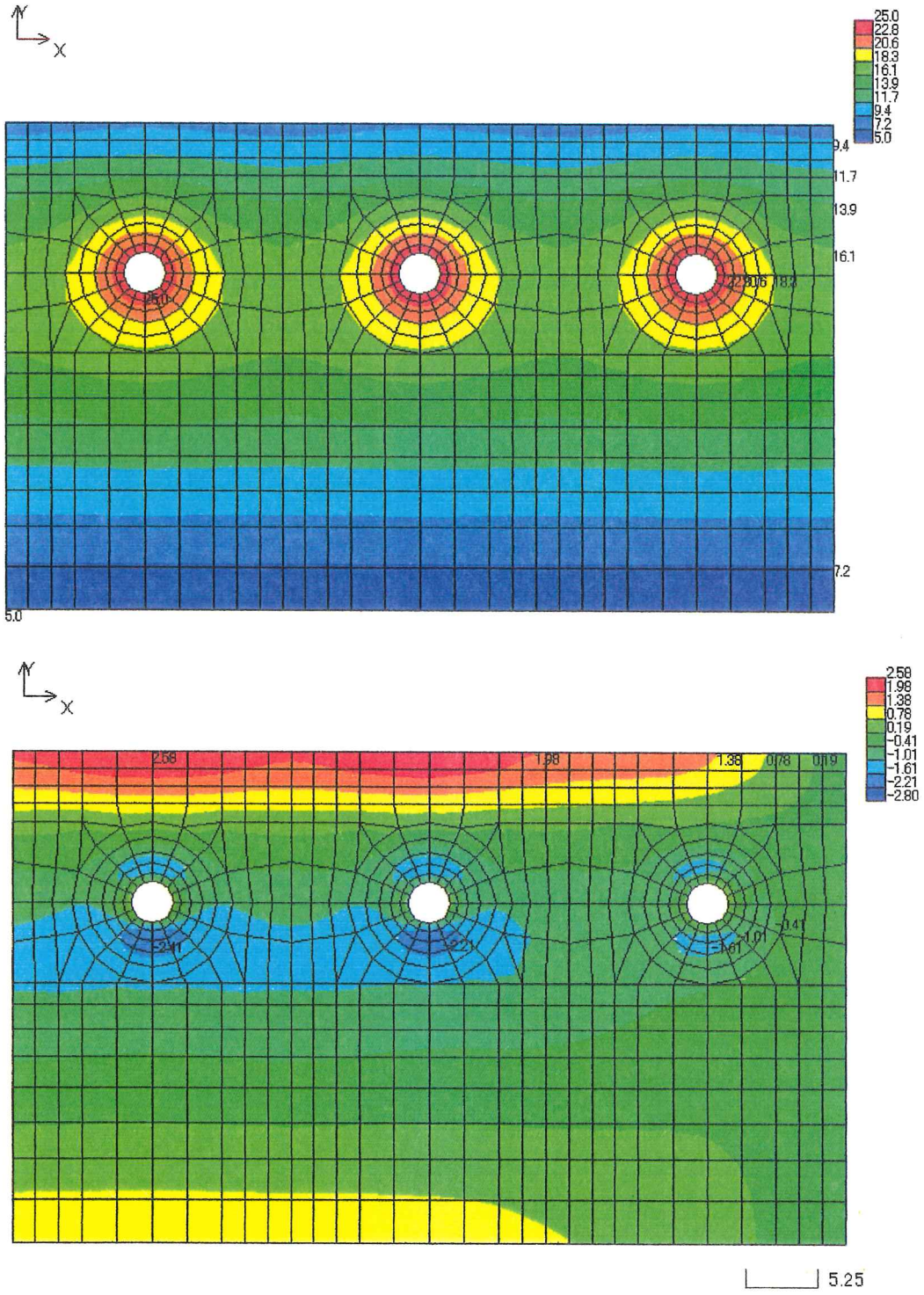
図－４４.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



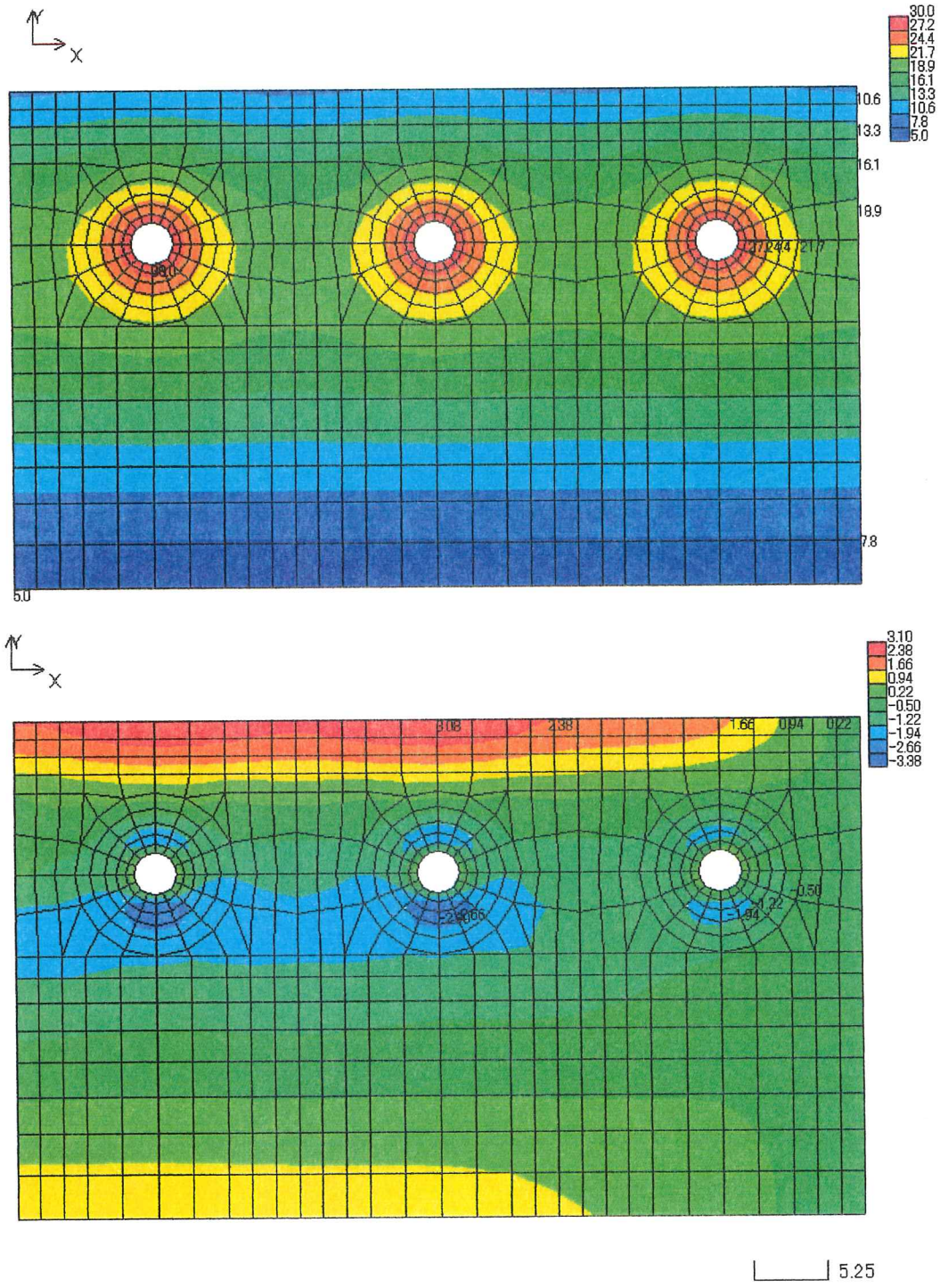
図－４５.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度１５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



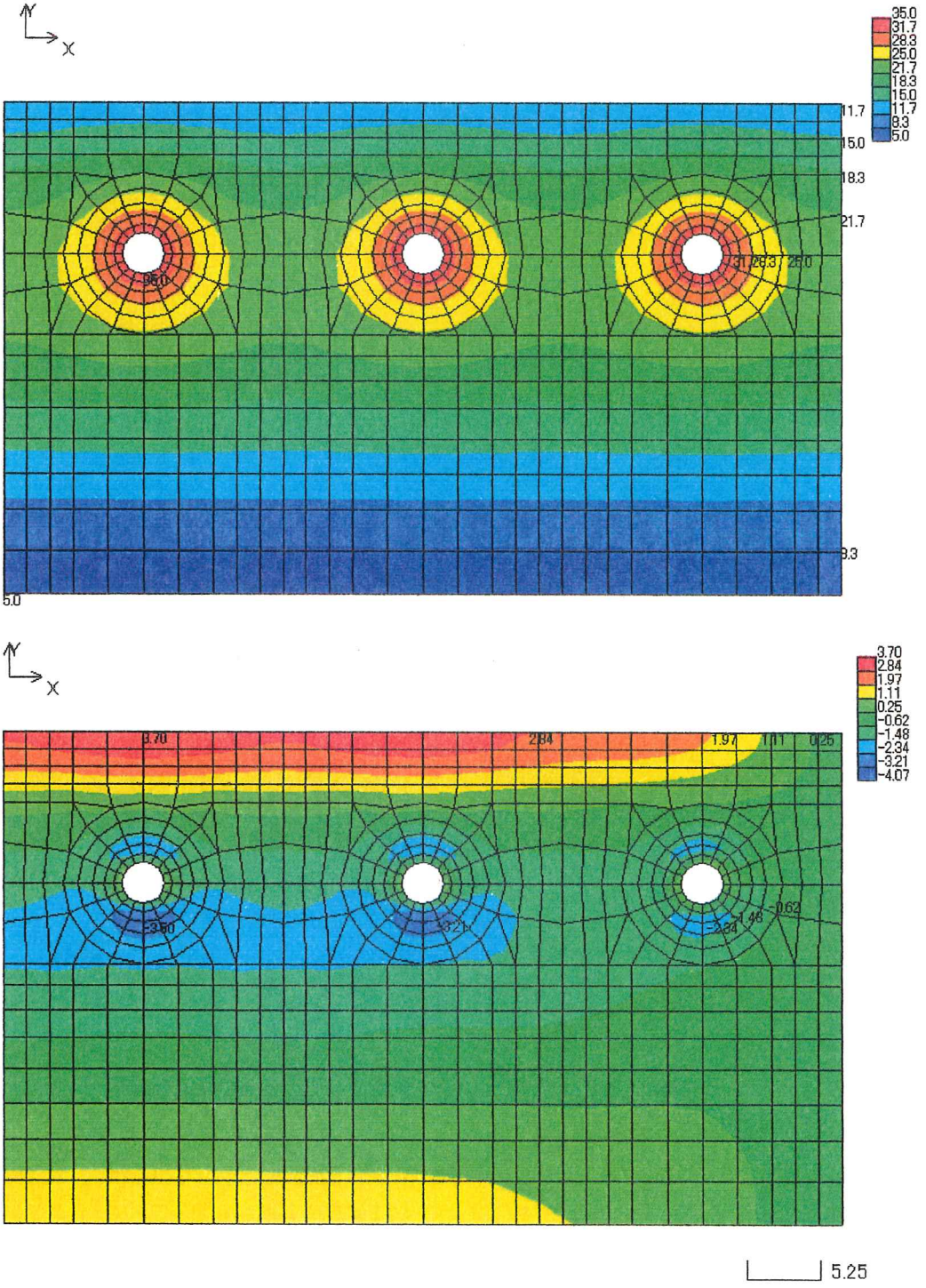
図－４６.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度２０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



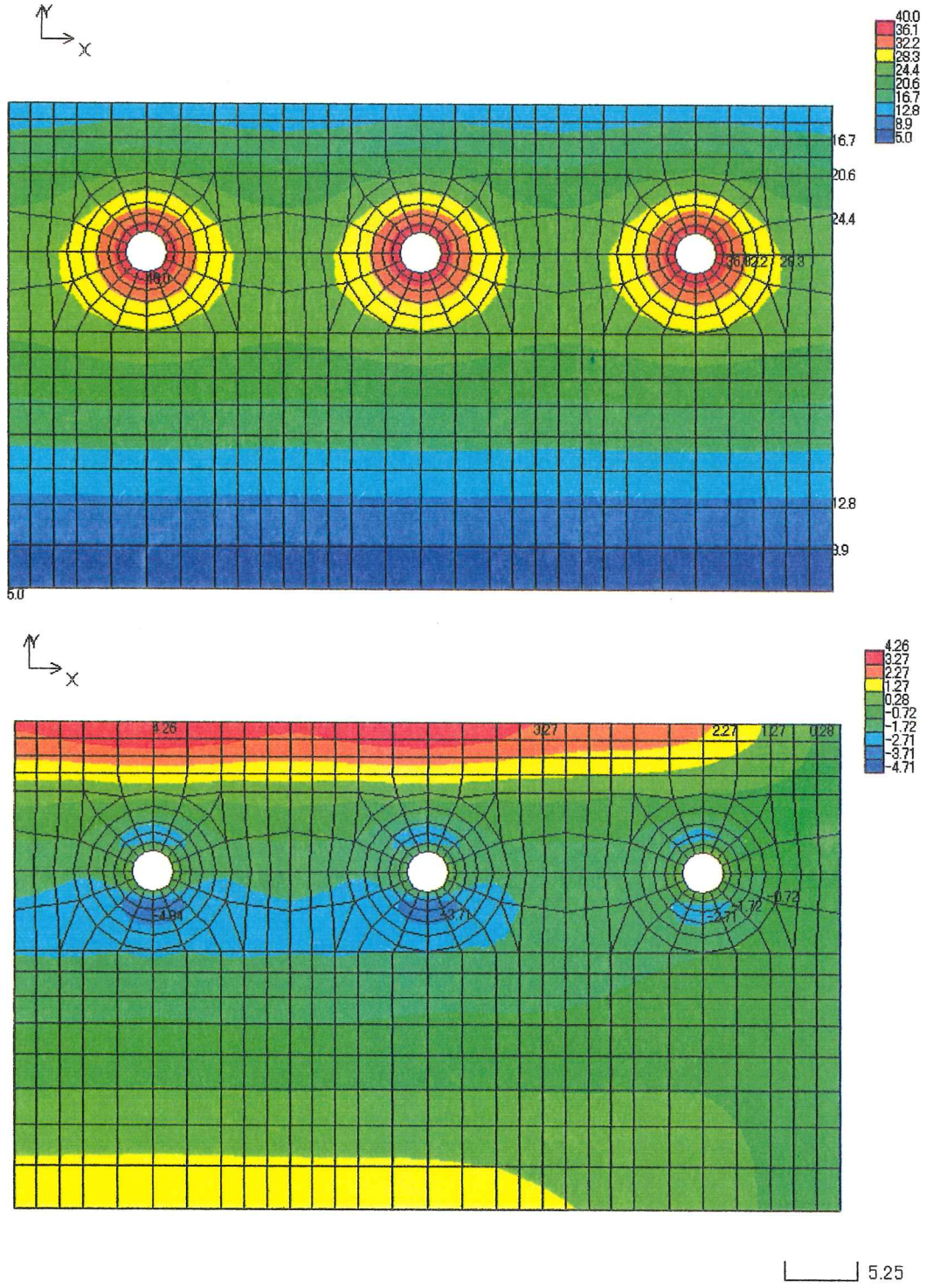
図－４７.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度２５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



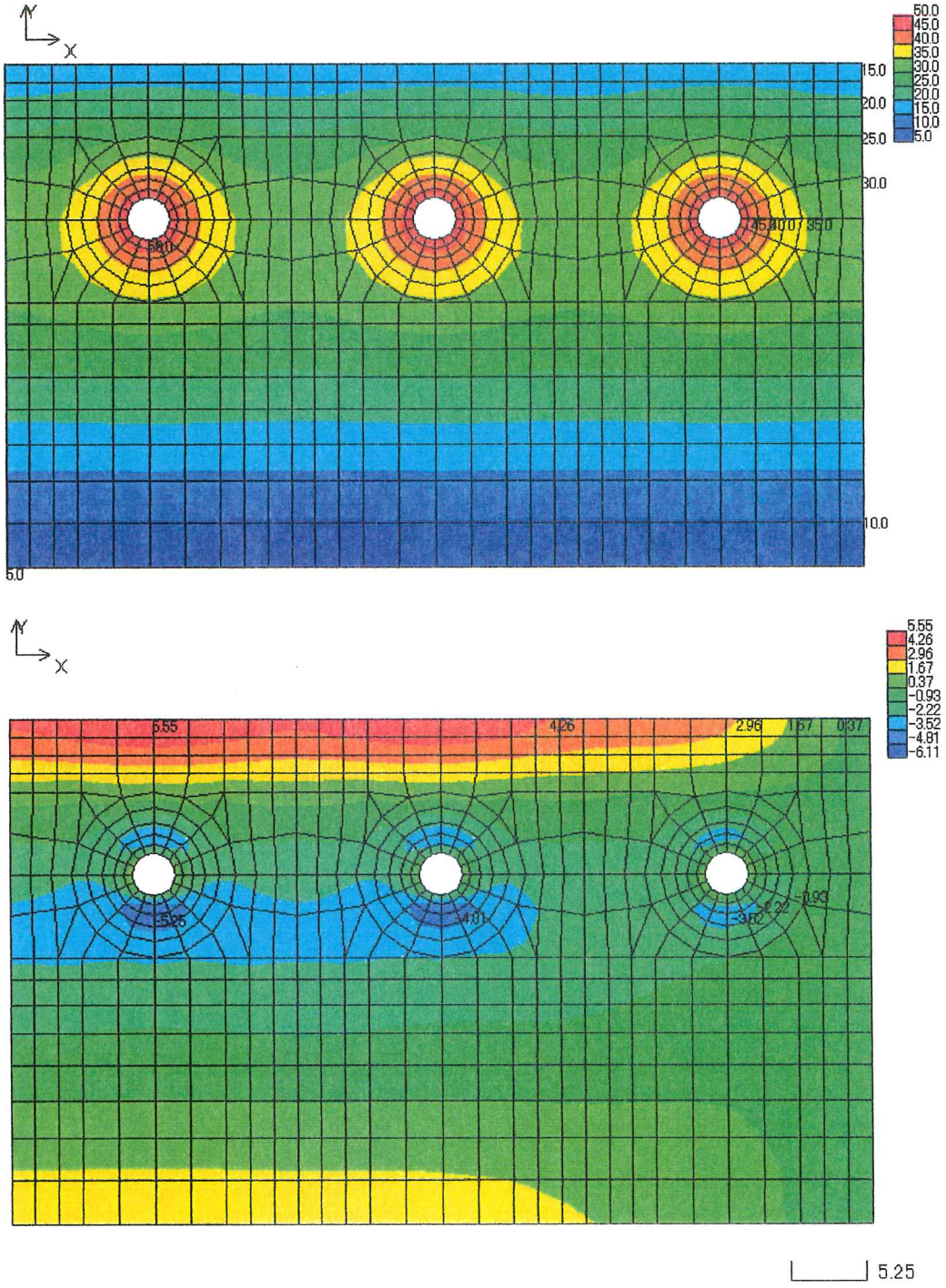
図－４８.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度３０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



図－４９.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度３５℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



図－５０.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度４０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」



図－５１.かぶり１０cm，ヒータ間隔２０cm，温度５０℃「温度(上段)・応力分布(下段)」

添付資料

２次元（FEM）温度応力解析「その２」

１．目的

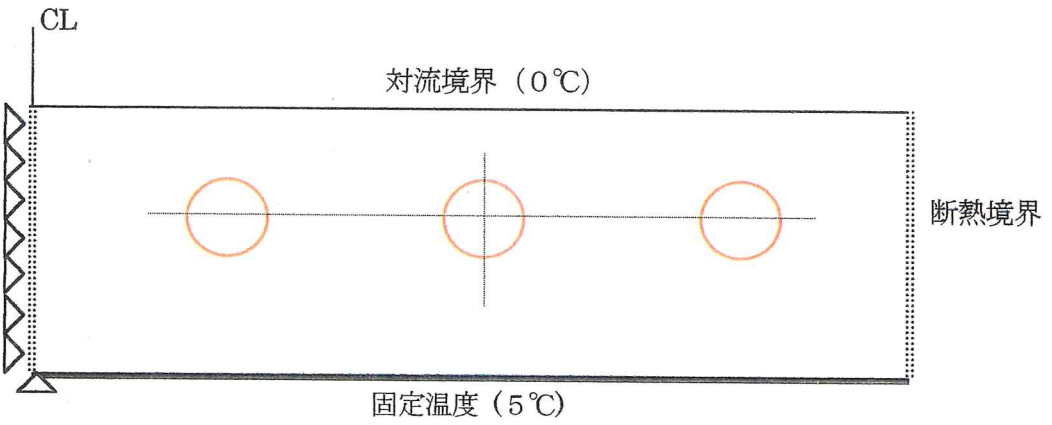
コンクリート舗装版のかぶり厚さ１０cmについて，強度特性や拘束条件の違いによる応力の発生に関して検討する．

２．解析条件

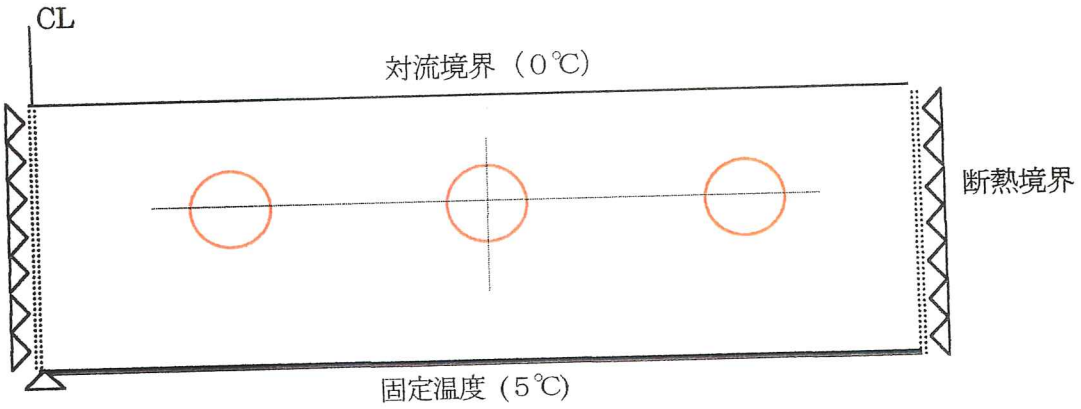
１）解析水準(表中参照)

①拘束条件については，図－１に示す内部拘束モデルと図－２に示す外部＋内部拘束の２通りとする．内部拘束モデルは，前回までの解析と同様な条件である．

②コンクリートの特性値は，土木学会より算出した値（圧縮強度：35N/mm^2）および過去の実績値（圧縮強度：30N/mm^2）とした．



図－１．内部拘束モデル(基本)



図－２．外部＋内部拘束モデル

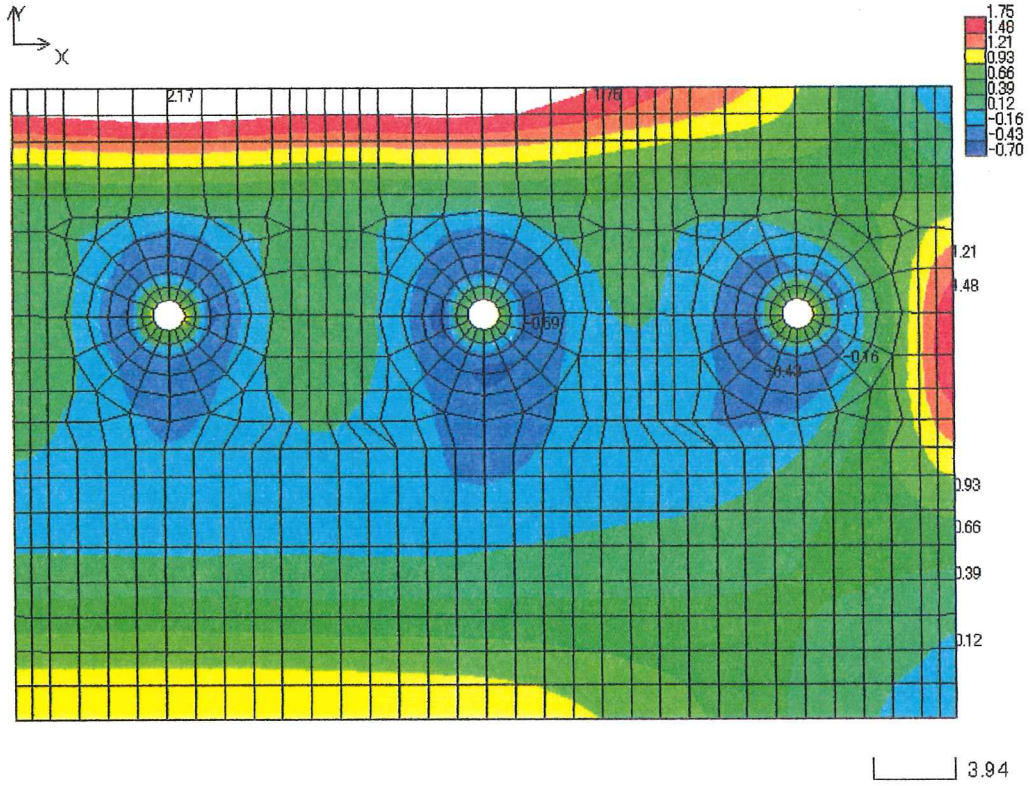
３．解析結果

１）本解析では，外部拘束を考慮している水準が多く，最大応力の発生する位置および方向が異なるため主応力について検討した．
図－１～５および表－１の応力は，材齢２４時間での主応力を示す．

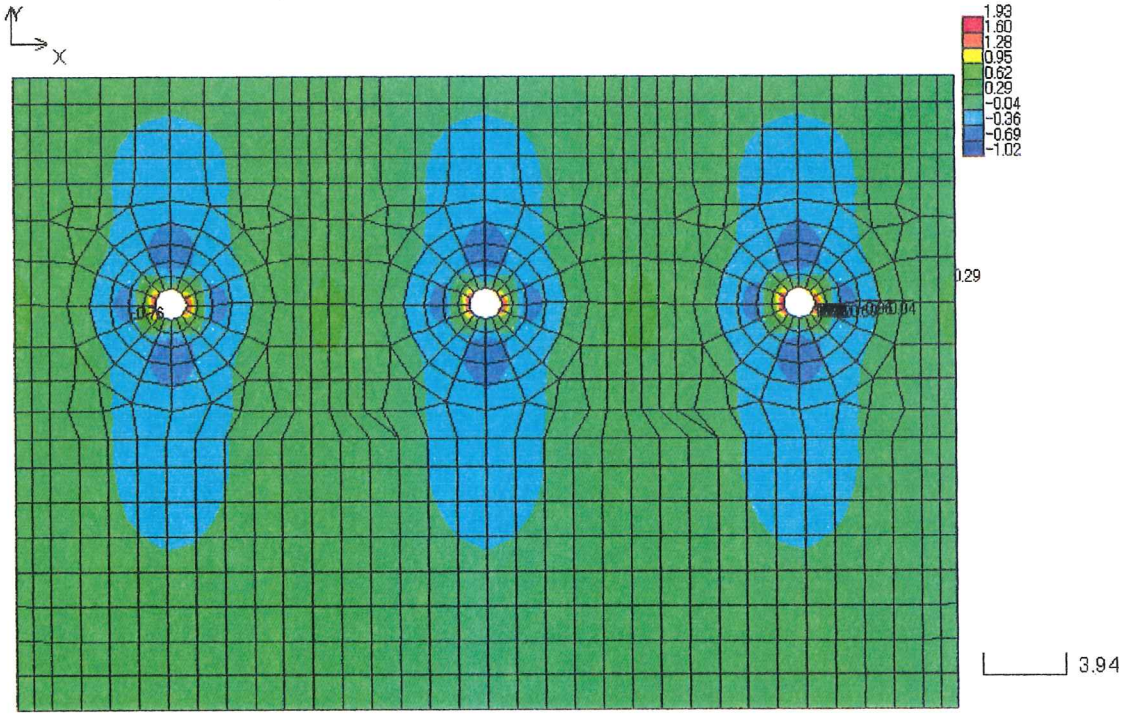
２）拘束条件の違いにより，最大引張応力の発生する位置が相違し，内部拘束の場合は，舗装版が反りの状態となるため，表面部が最小ひび割れ指数となる．
一方，外部＋内部拘束の場合は，ヒータ付近が最小ひび割れ指数となる．

表－１．かぶり厚さ１０cmによる応力とひび割れ指数

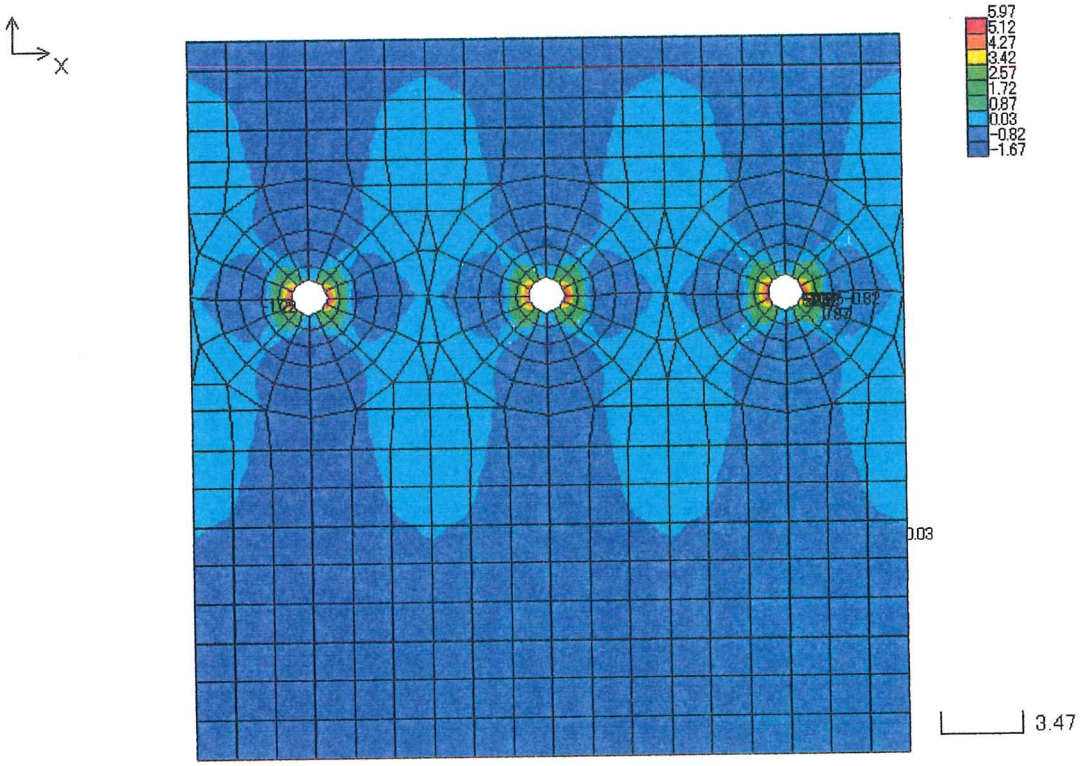
曲げ強度			４．５N/mm^2				４．５N/mm^2			
圧縮強度			３０N/mm^2（実績値）				３５N/mm^2（土木学会）			
引張強度			２．５N/mm^2				２．１N/mm^2			
静弾性係数			２９×１０^3 N/mm^2				３０×１０^3 N/mm^2			
ヒータ間隔　cm			１０		１５		１０		１５	
拘束状態			内部	内・外	内部	内・外	内部	内・外	内部	内・外
温度 ℃	２５	応力	2.17	—	—	—	2.41	2.59	2.24	1.93
		指数	1.2	—	—	—	0.9	0.8	0.9	1.1
	５０	応力	—	—	—	—	4.01	5.97	4.71	1.67
		指数	—	—	—	—	0.4	0.4	0.4	1.3



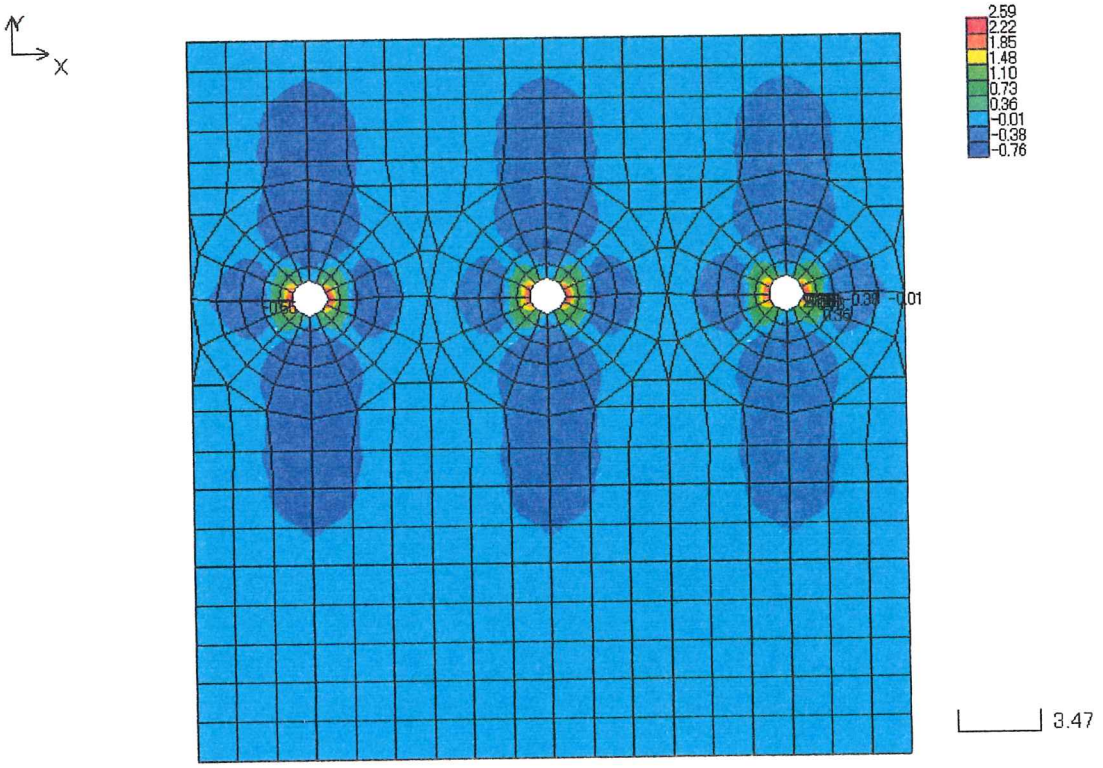
図－５２.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度２５℃「主応力分布」
「Fc=29 kg/mm ^{2}」



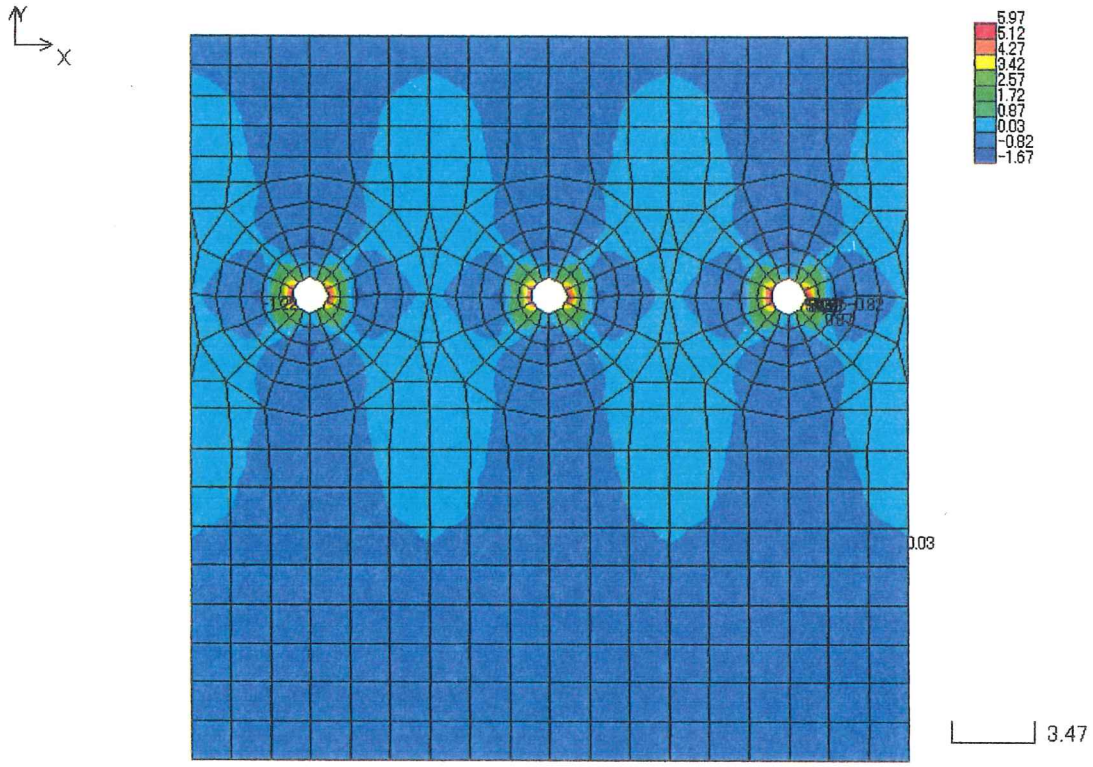
図－５３.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度２５℃「主応力分布」
「Fc=29 kg/mm ^{2}」「両端拘束」



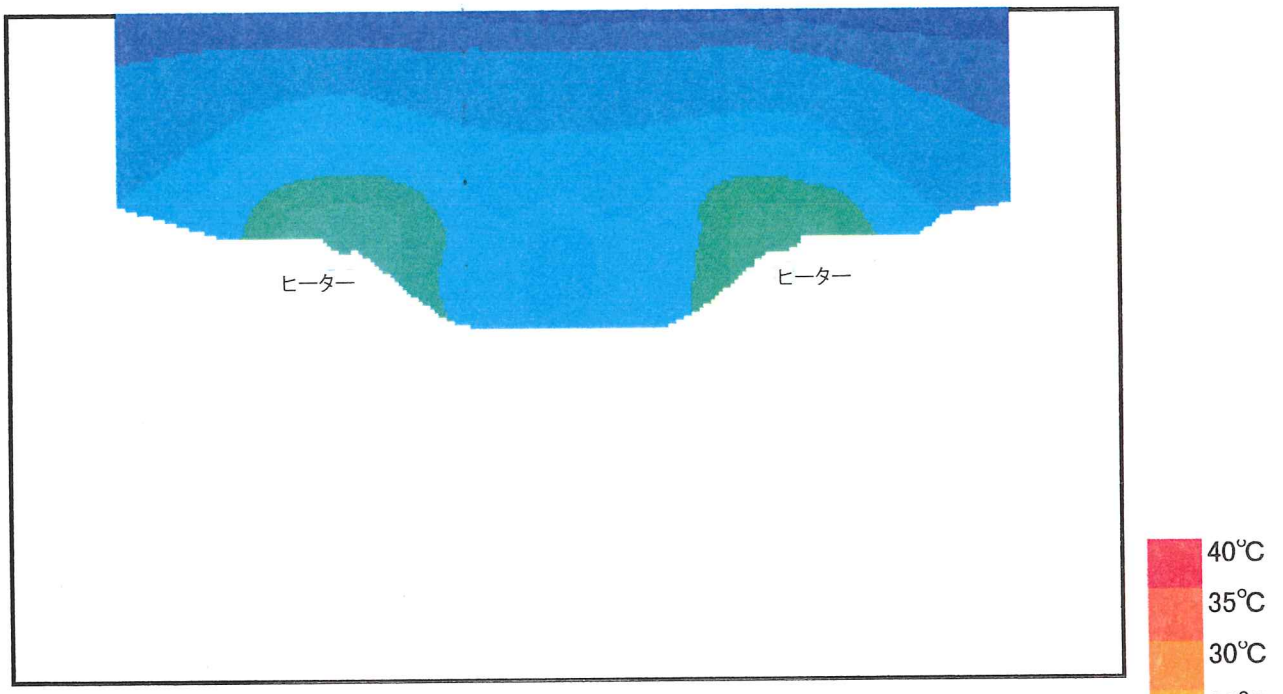
図－５４.かぶり１０cm，ヒータ間隔１５cm，温度５０℃「主応力分布」
「Fc=30 kg/mm ^{2}」「両端拘束」



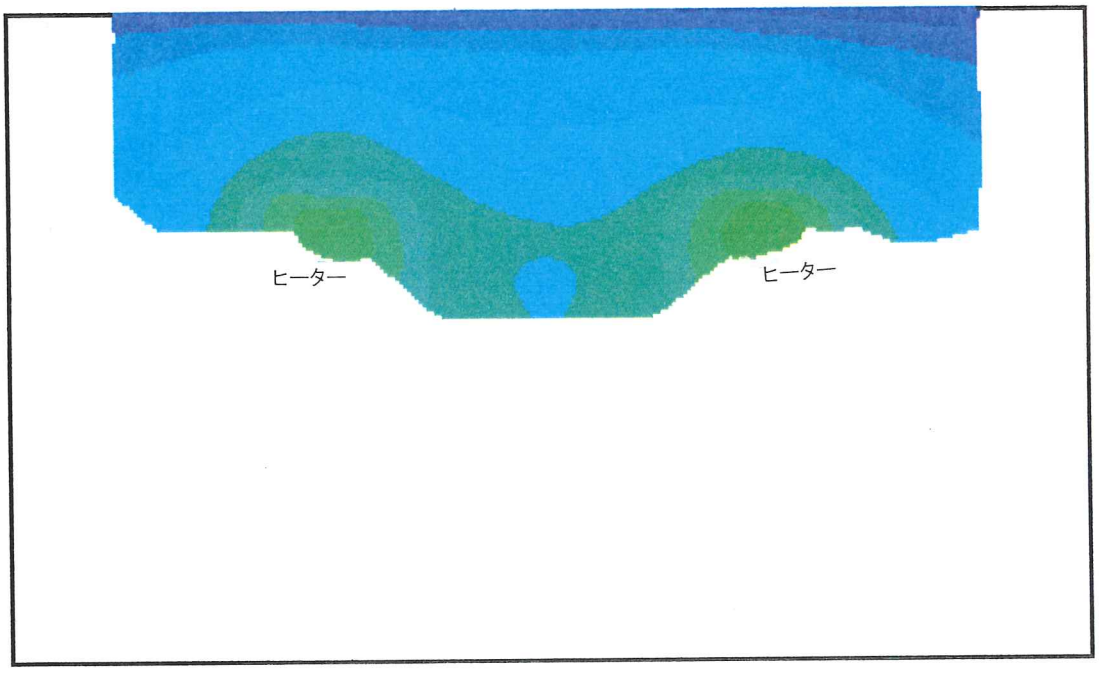
図－５５.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度２５℃「主応力分布」
「Fc=30 kg/mm ^{2}」「両端拘束」



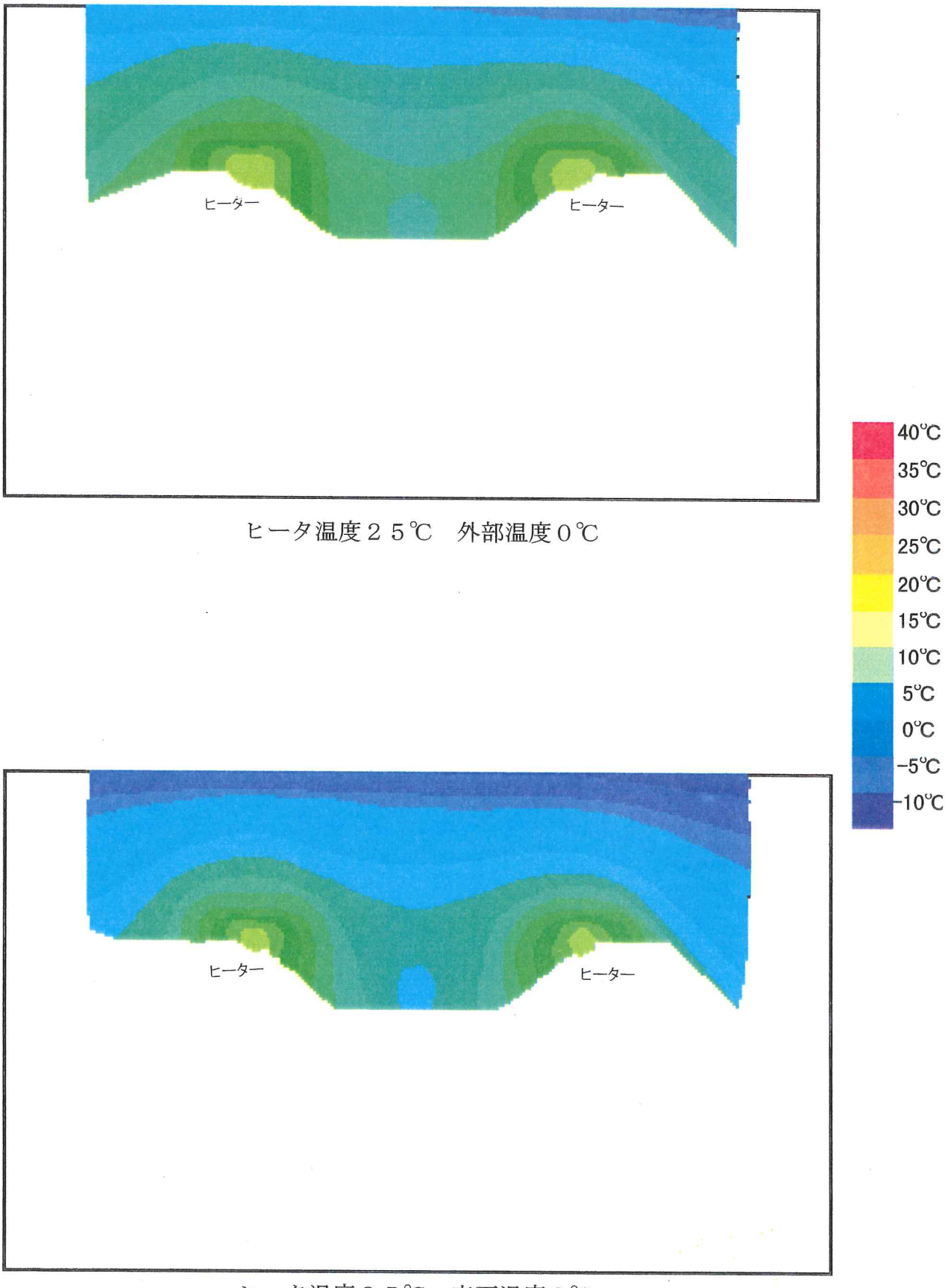
図－５６.かぶり１０cm，ヒータ間隔１０cm，温度５０℃「主応力分布」
「Fc=30 kg/mm ^{2}」「両端拘束」



ヒータ温度１５℃　外部温度０℃

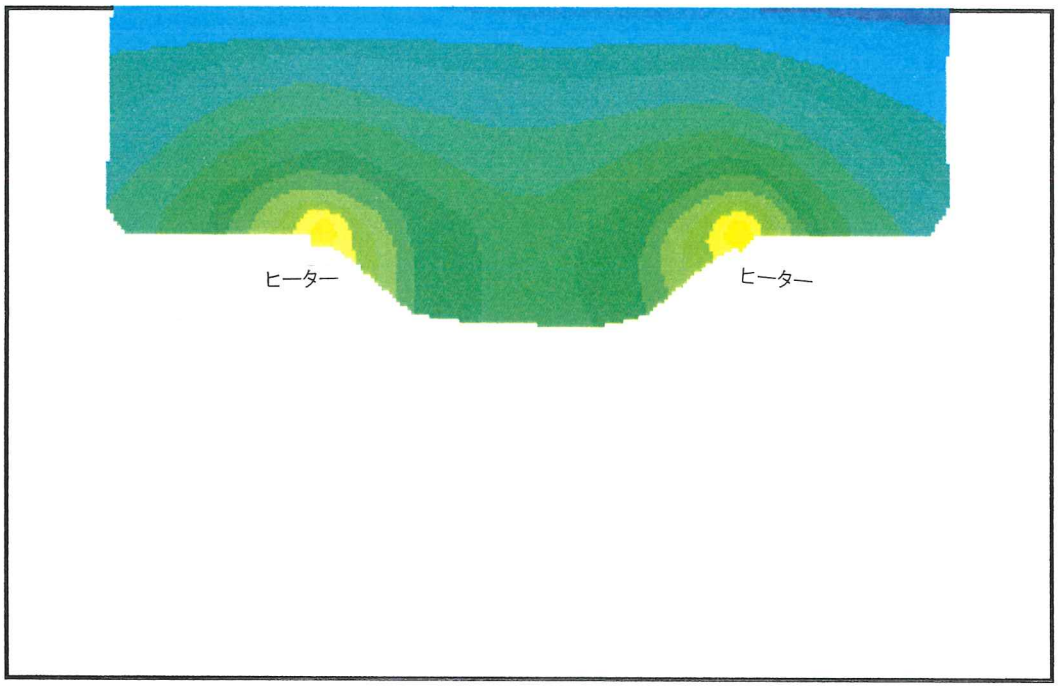


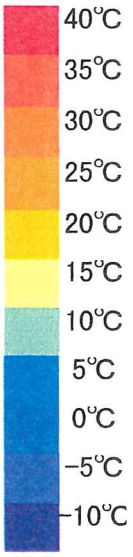
ヒータ温度２０℃　外部温度０℃



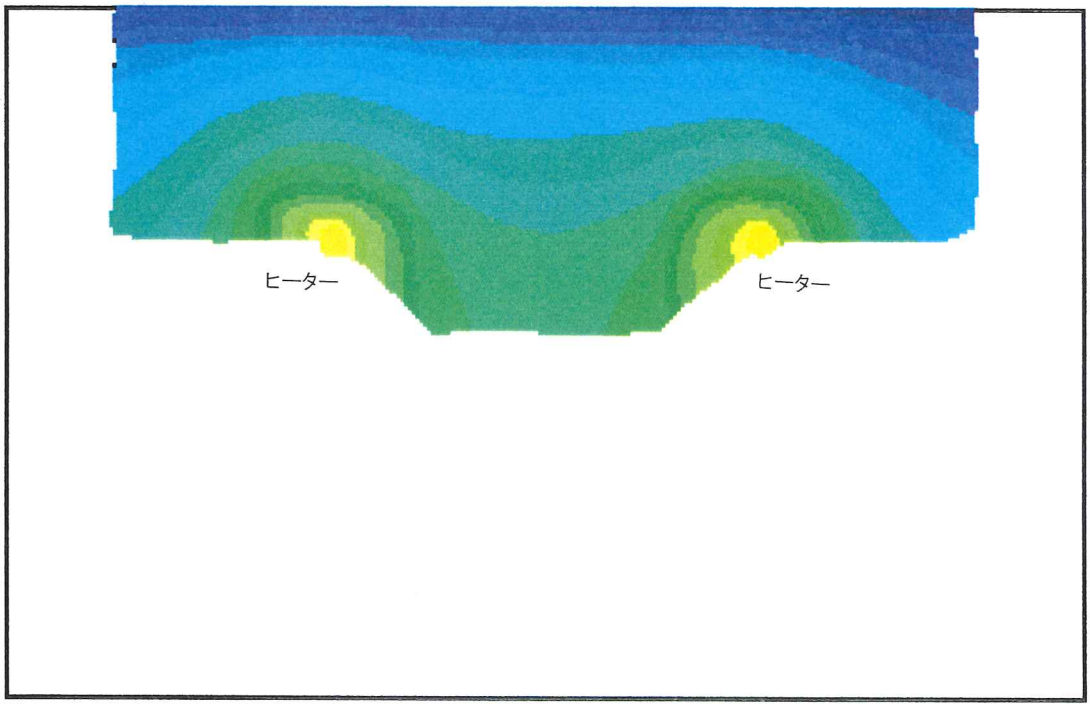
ヒータ温度２５℃　外部温度０℃

ヒータ温度２５℃　表面温度０℃

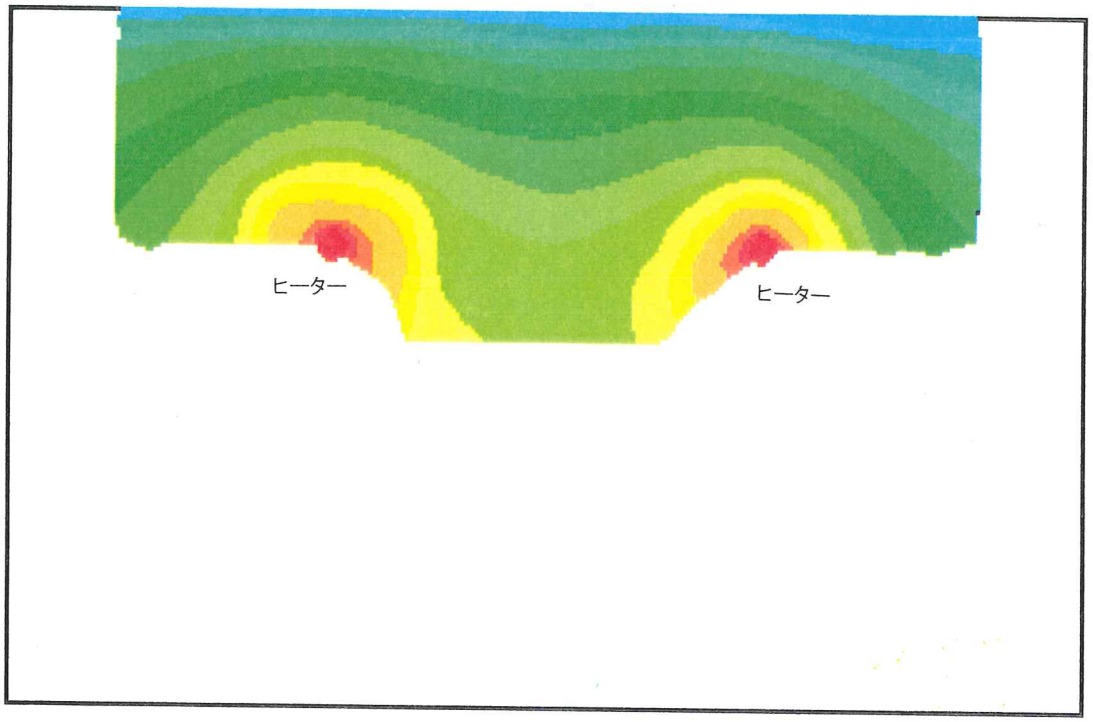


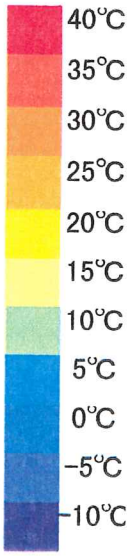


ヒータ温度３０℃　外部温度０℃

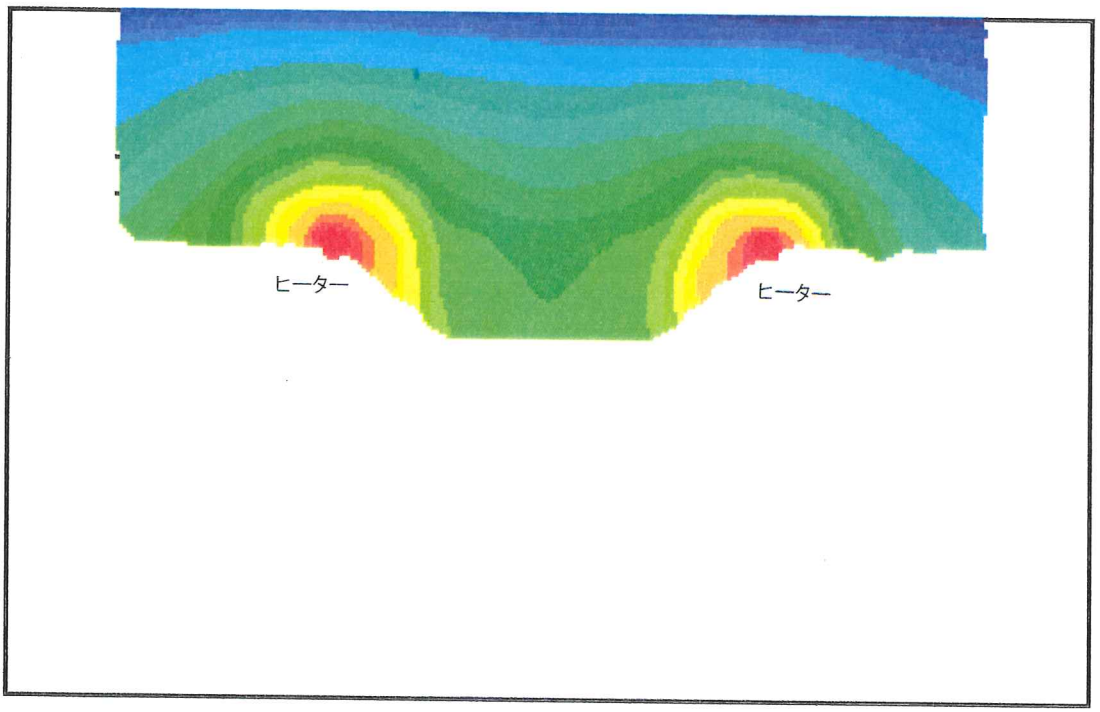


ヒータ温度３０℃　表面温度０℃

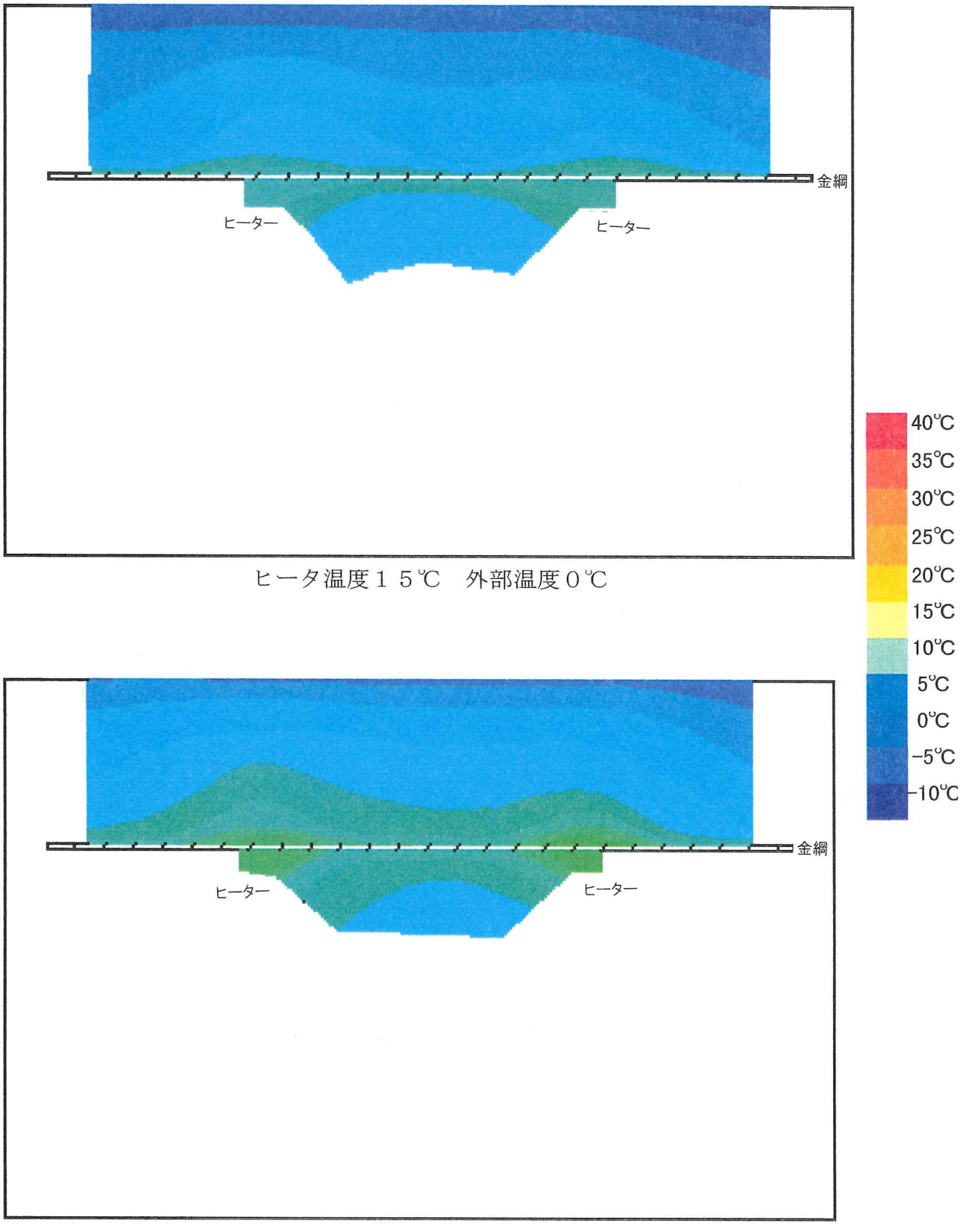




ヒータ温度４０℃　外部温度０℃

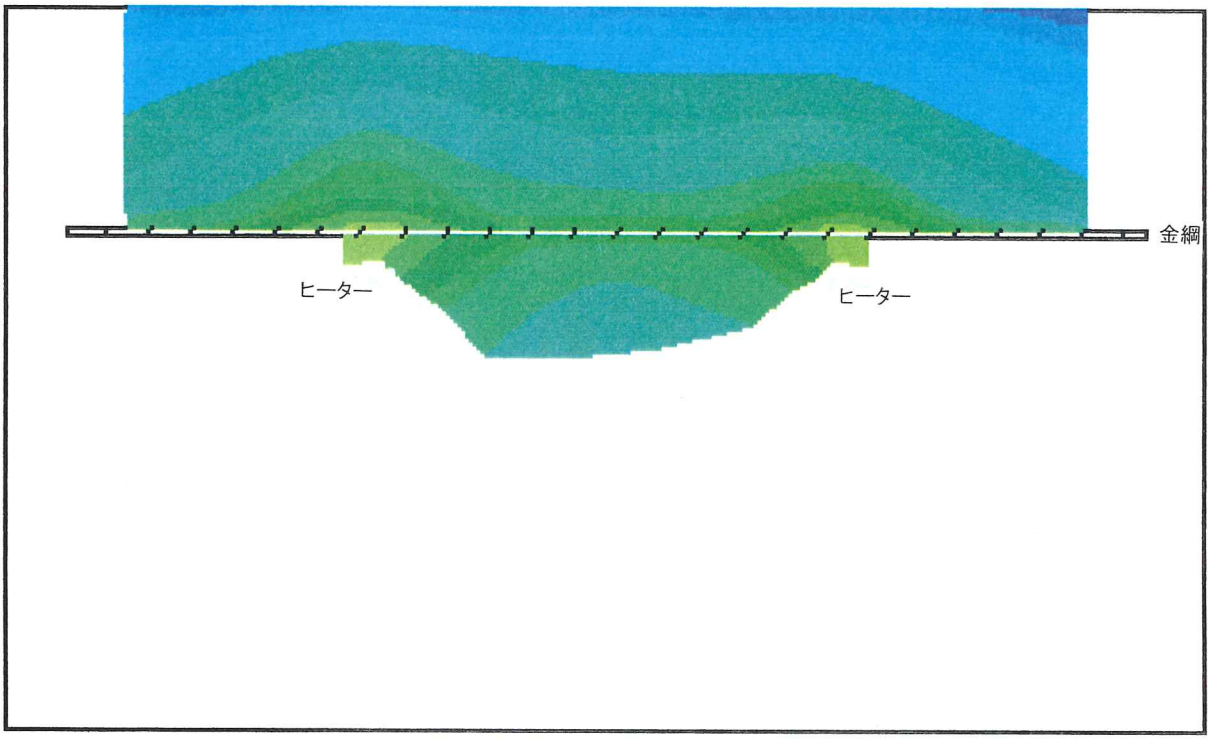


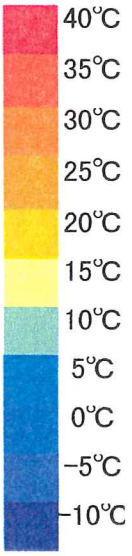
ヒータ温度４０℃　表面温度０℃



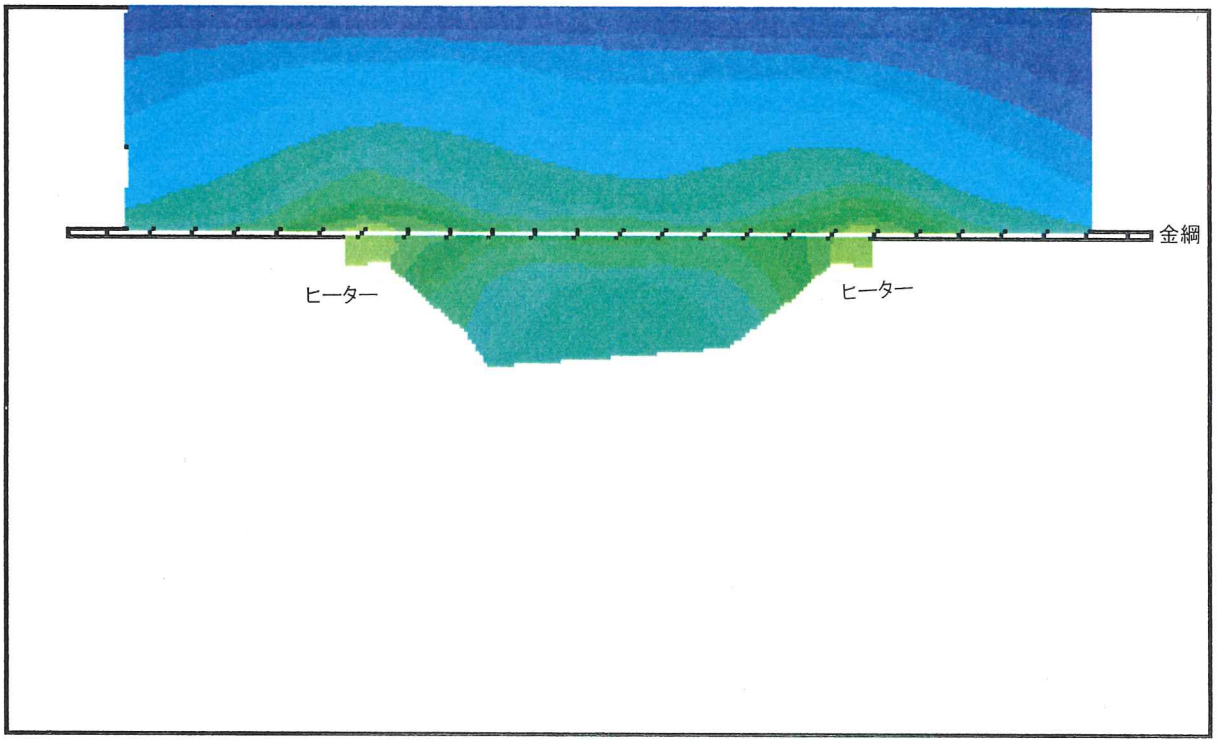
ヒータ温度１５℃　外部温度０℃

ヒータ温度２０℃　外部温度０℃

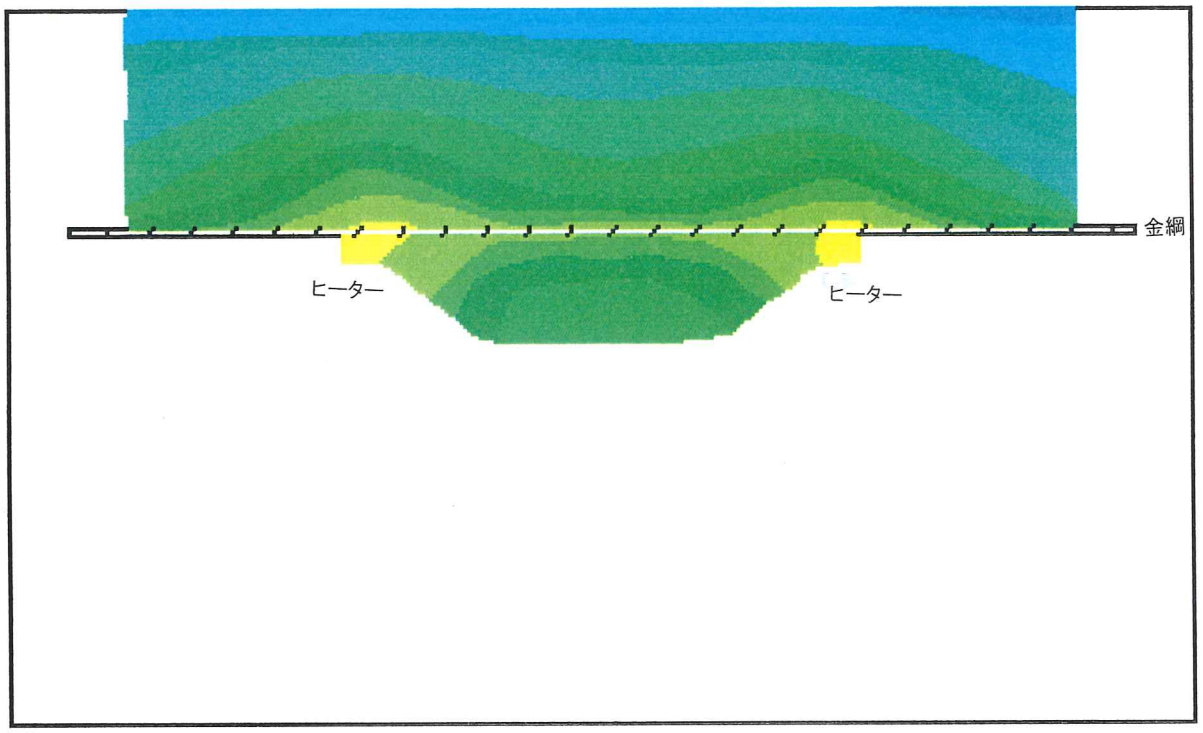




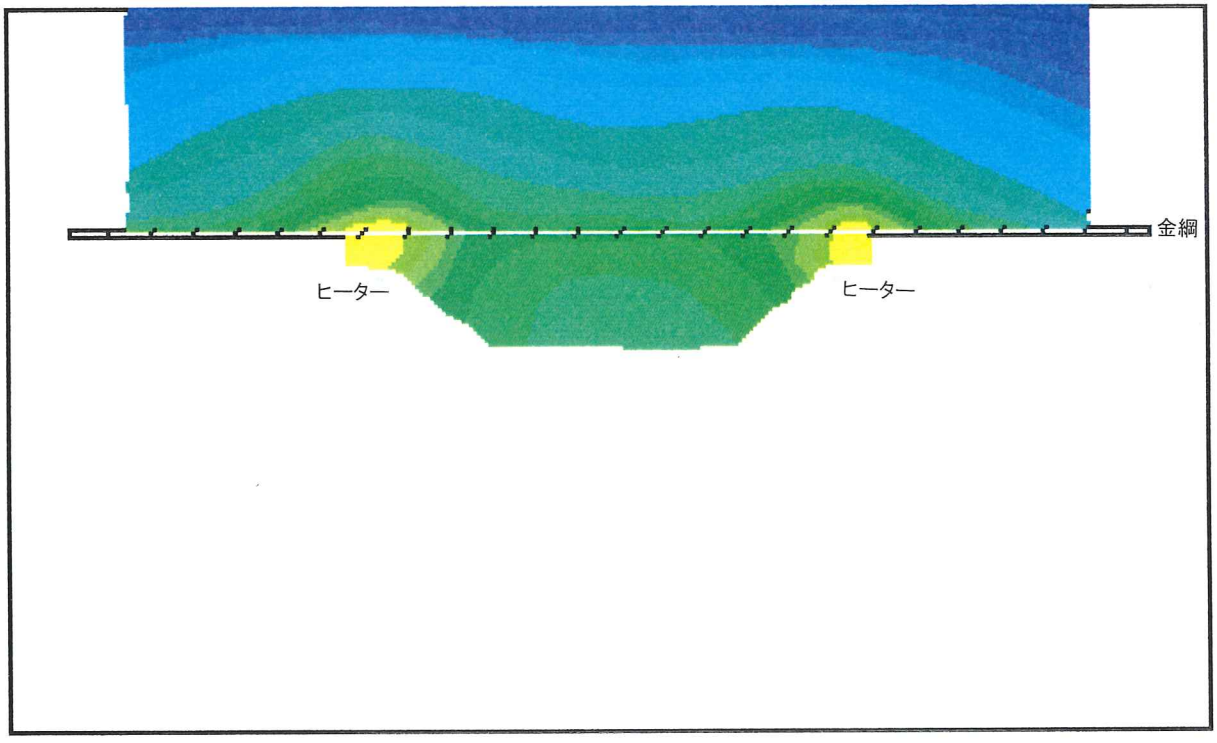
ヒータ温度２５℃　外部温度０℃



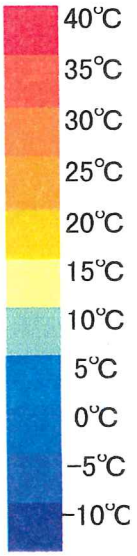
ヒータ温度２５℃　表面温度０℃

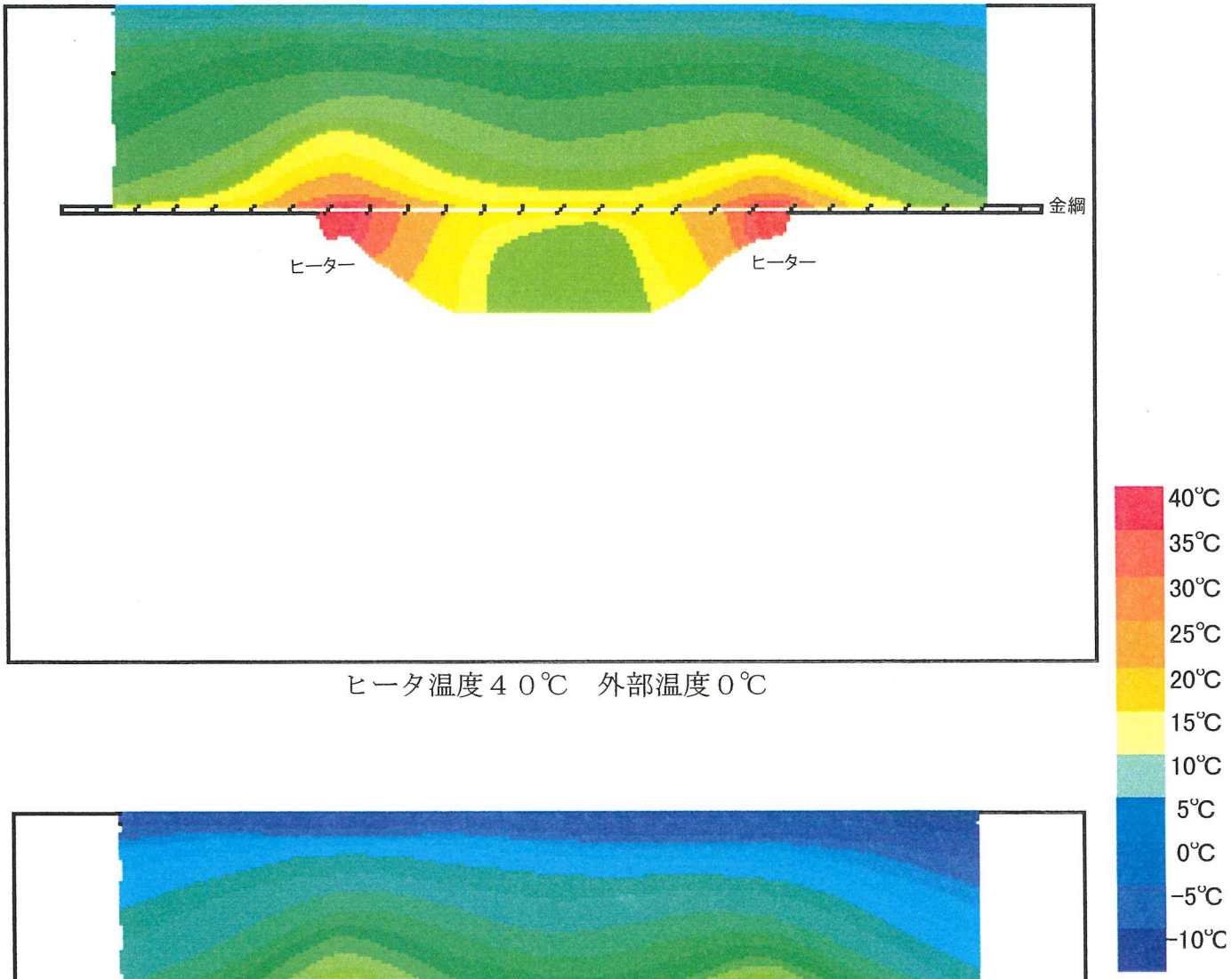


ヒータ温度３０℃　外部温度０℃

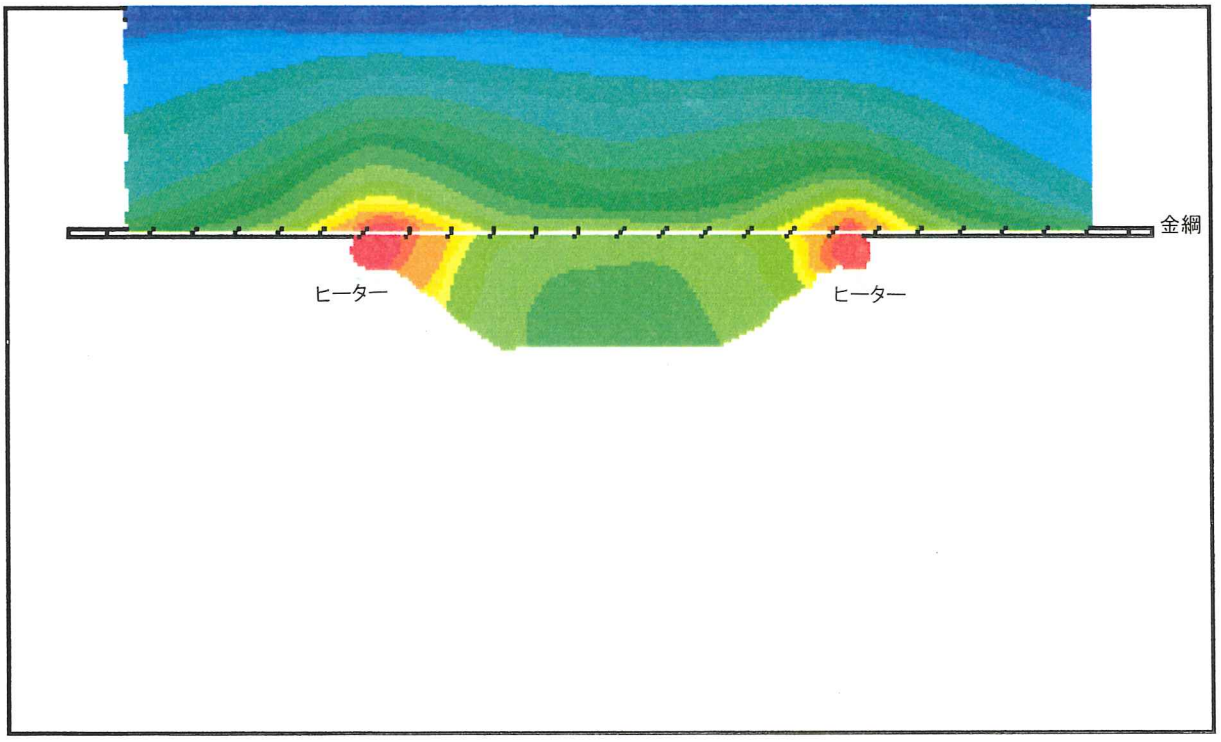


ヒータ温度３０℃　表面温度０℃





ヒータ温度４０℃　外部温度０℃



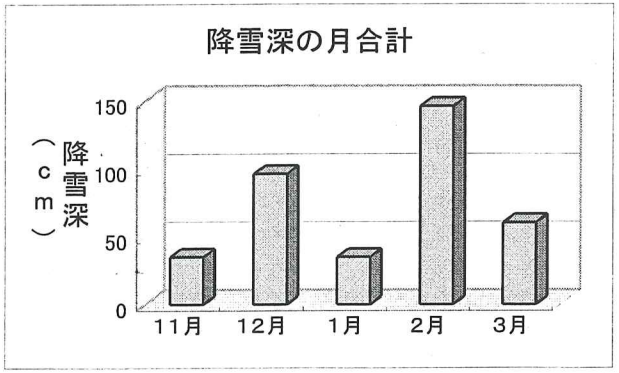
ヒータ温度４０℃　表面温度０℃

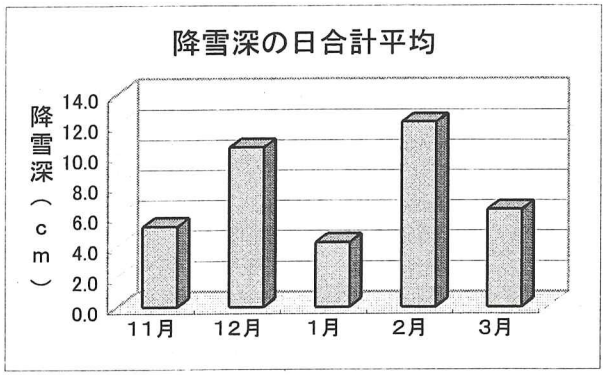
付　録　2

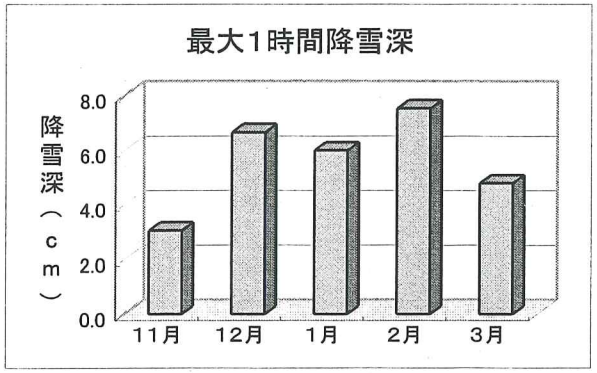
都市別の気象データ

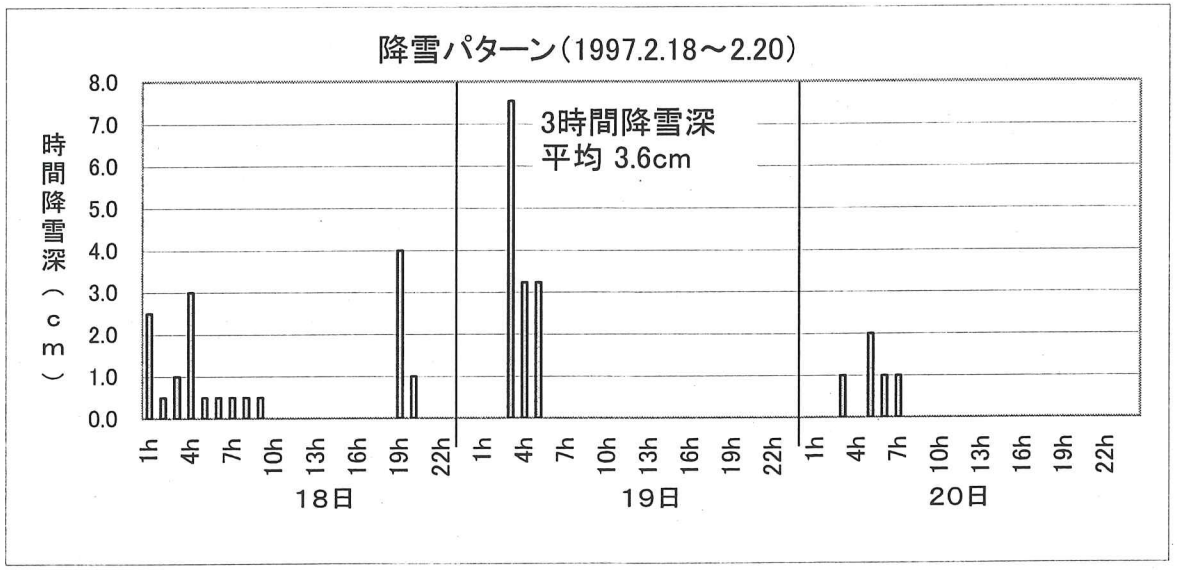
札幌市

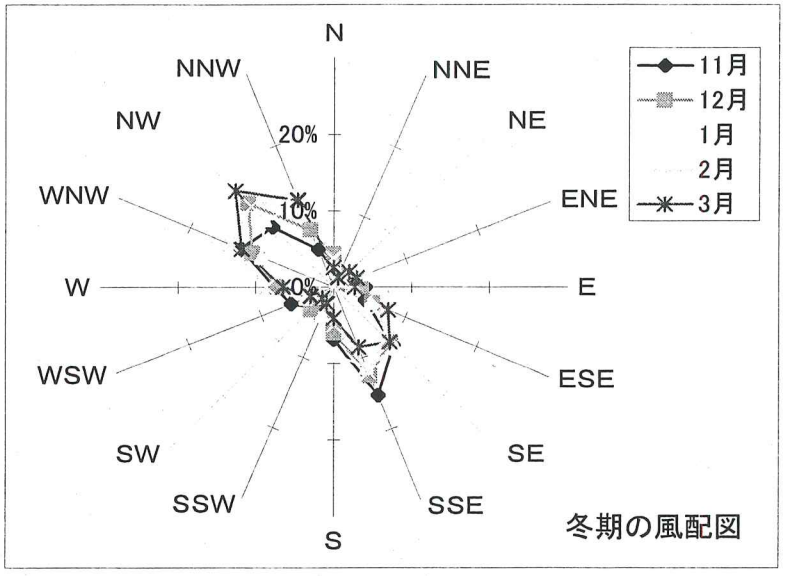
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	6.9	0.9	4.1	7	35	5.3	3.1	2.60	102
１２月	2.2	-3.6	-0.7	9	96	10.5	6.7	2.47	64
１月	0.2	-5.6	-2.5	8	35	4.2	6.0	2.27	84
２月	1.1	-4.6	-1.8	12	146	12.2	7.5	2.75	64
３月	3.6	-3.4	0.2	9	60	6.4	4.8	2.96	78
							平均	2.6	78





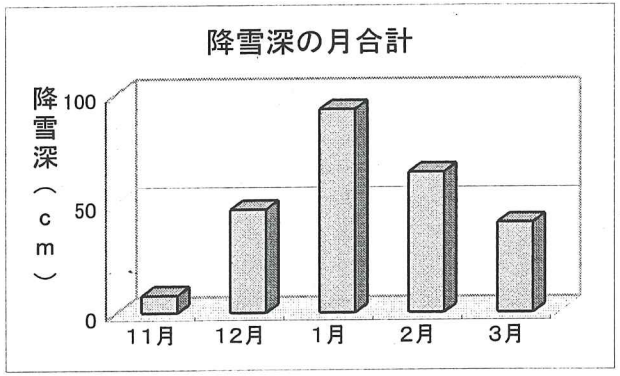


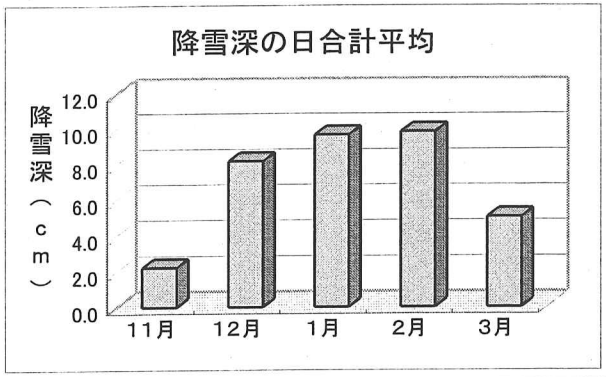


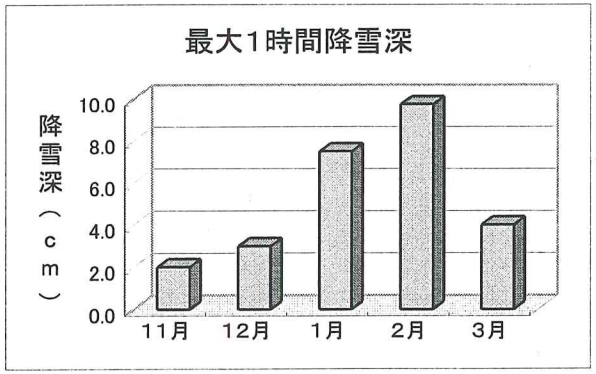


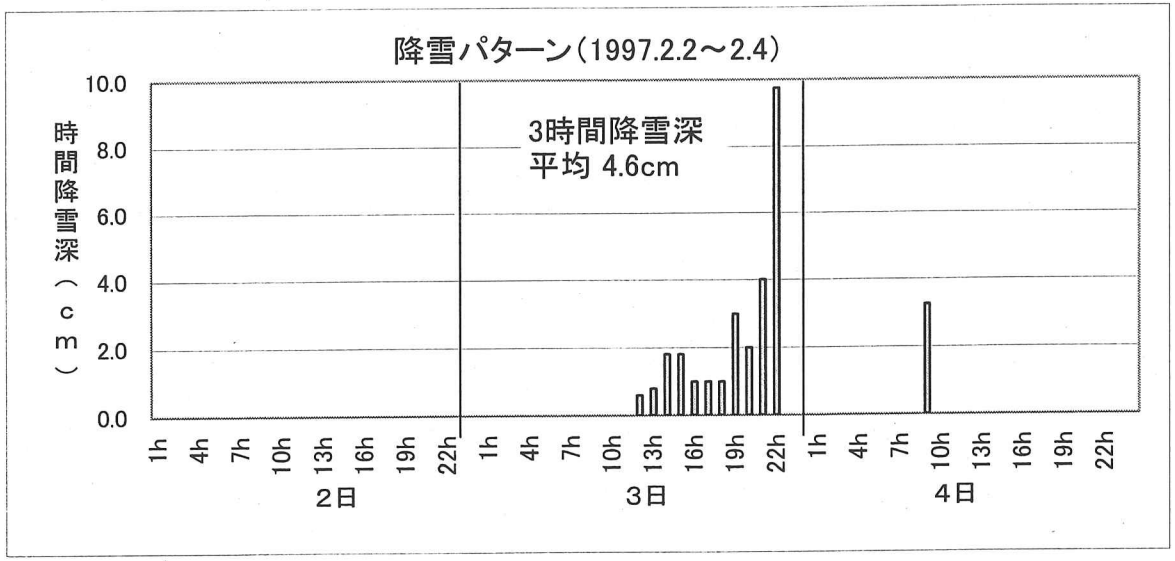
函館市

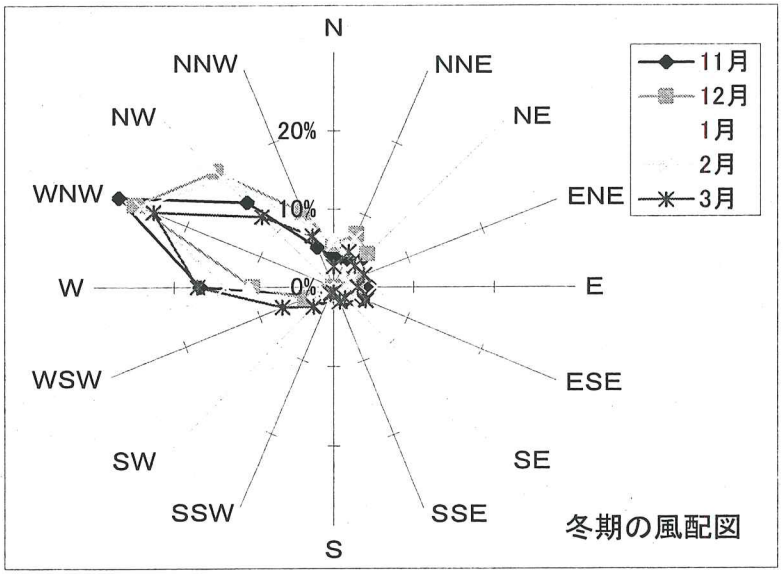
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	7.9	1.1	4.8	4	8	2.2	2.0	4.24	81
１２月	3.3	-3.9	-0.1	6	47	8.2	3.0	3.64	30
１月	1.6	-4.6	-1.3	10	93	9.7	7.5	3.95	33
２月	2.1	-3.9	-0.8	7	64	9.8	9.8	3.90	57
３月	4.7	-3.2	1.1	8	41	5.0	4.0	4.29	70
							平均	4.0	54





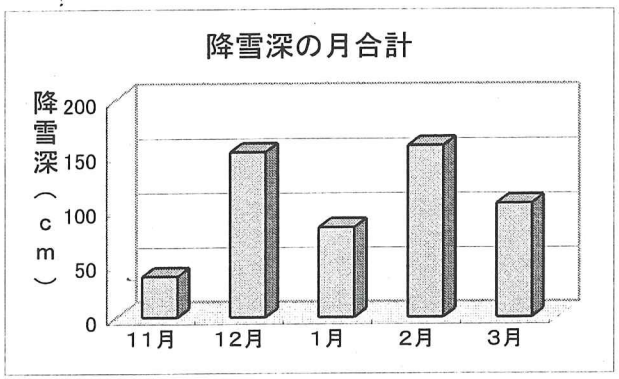


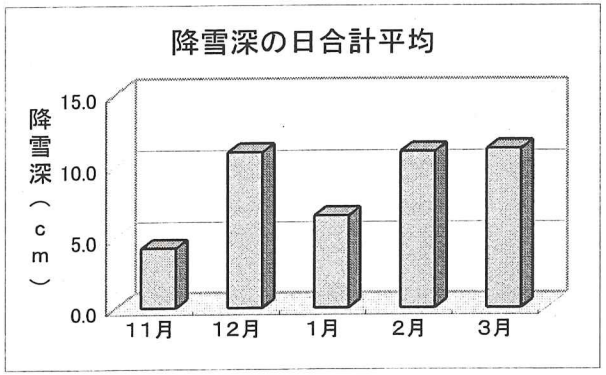


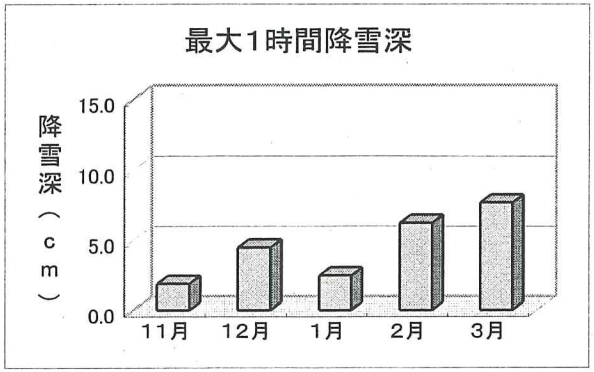


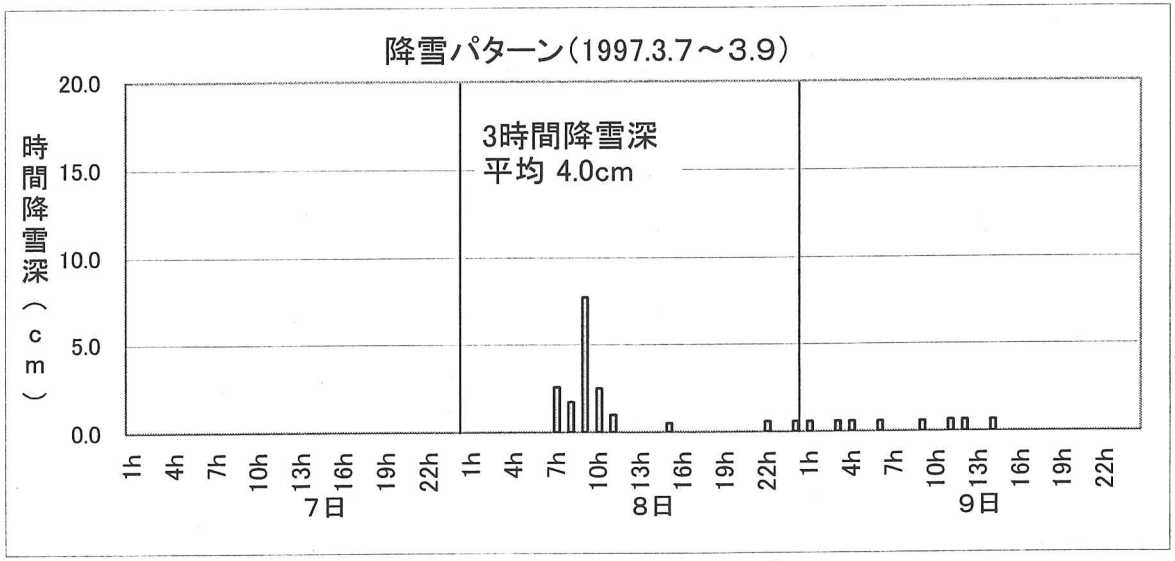
小樽市

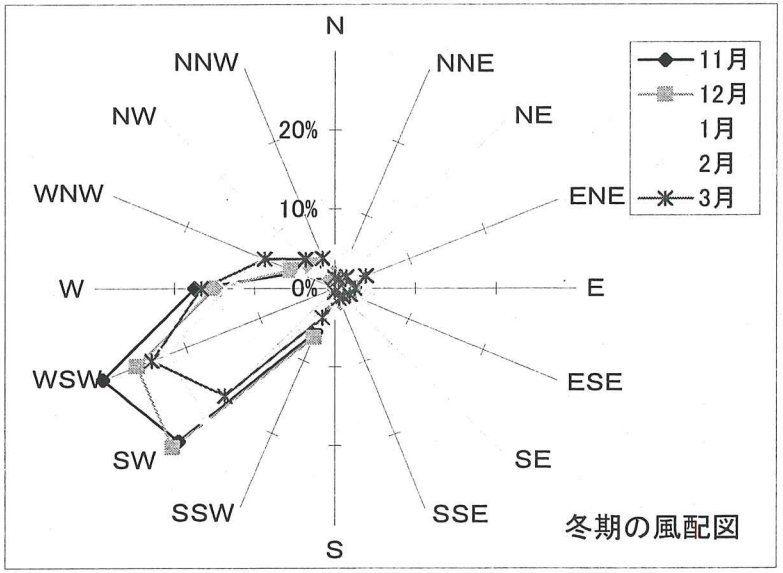
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	6.5	0.8	3.7	9	38	4.2	1.9	3.41	-
１２月	1.5	-3.8	-1.2	14	152	11.0	4.5	2.93	70
１月	0.3	-5.1	-2.3	13	83	6.5	2.5	2.84	36
２月	0.9	-3.7	-1.5	14	158	11.0	6.3	3.32	69
３月	3.1	-3.3	0.0	9	105	11.2	7.7	3.23	62
							平均	3.1	59





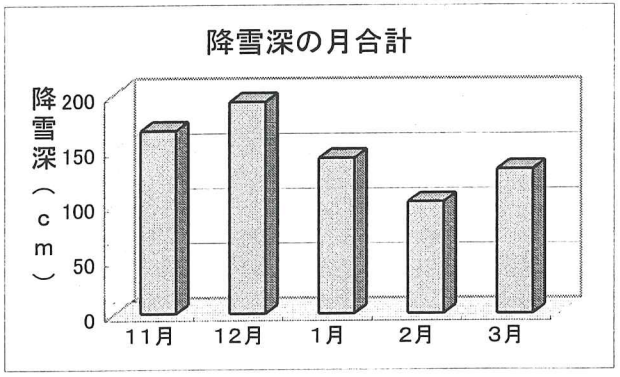


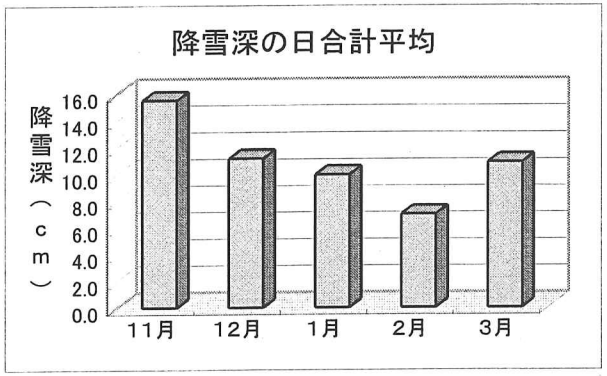


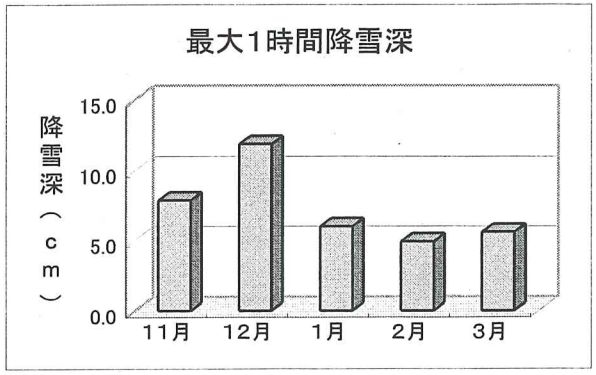


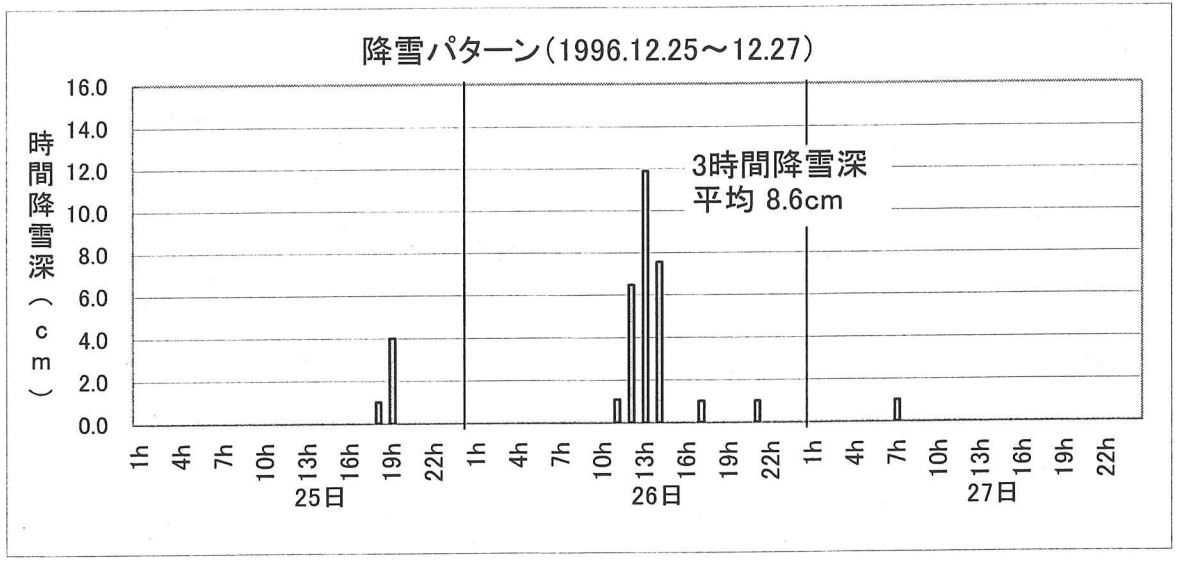
旭川市

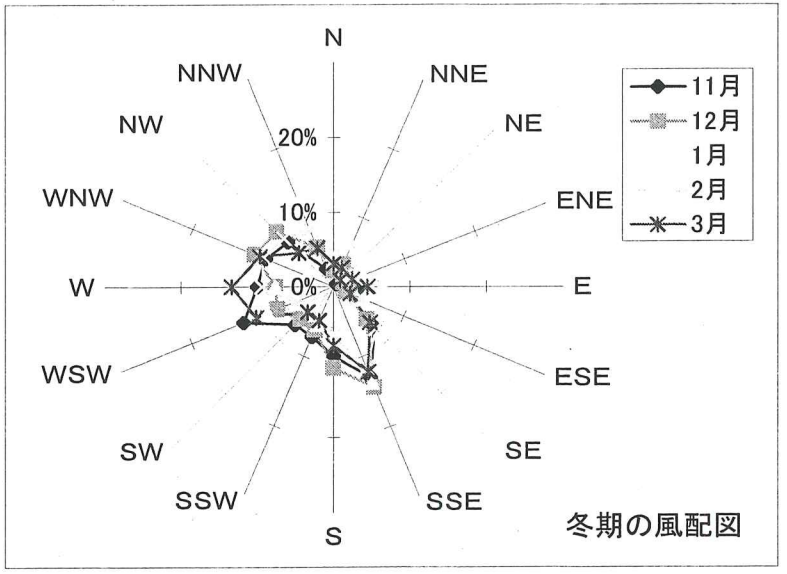
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	4.4	-2.2	1.1	11	167	15.5	7.9	2.06	55
１２月	-1.0	-8.1	-4.2	17	193	11.2	11.9	1.84	44
１月	-2.8	-11.0	-6.7	14	142	10.0	6.0	1.70	42
２月	-0.6	-8.2	-4.7	15	102	7.0	4.9	1.72	42
３月	2.2	-7.1	-2.2	12	132	10.9	5.6	2.35	44
							平均	1.9	45





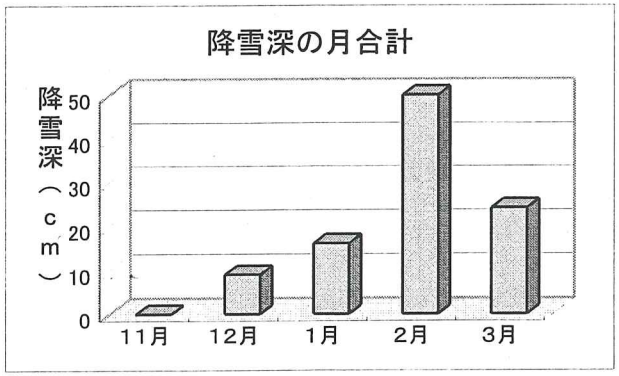


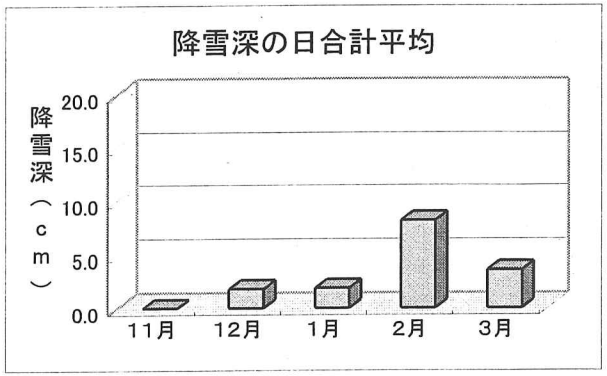


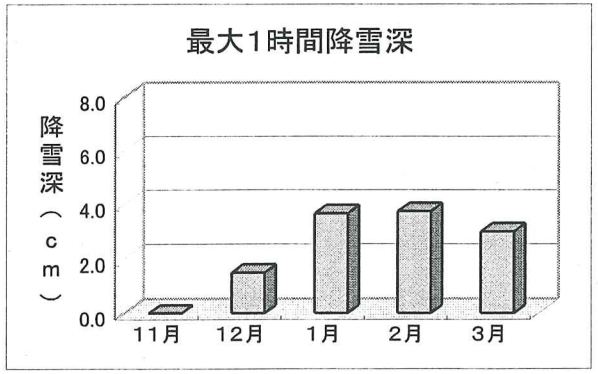


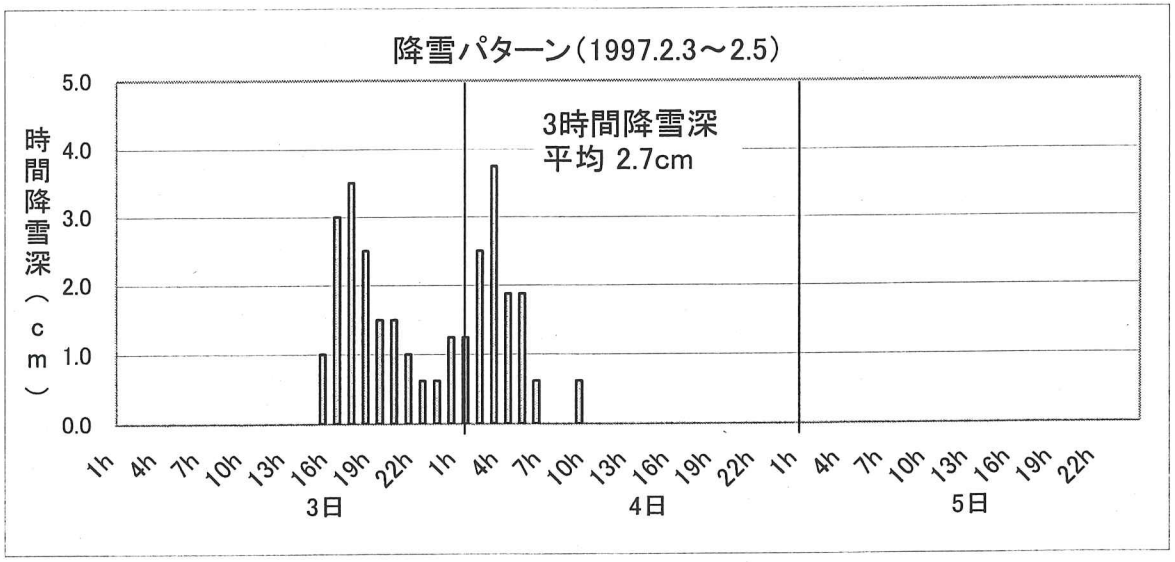
室蘭

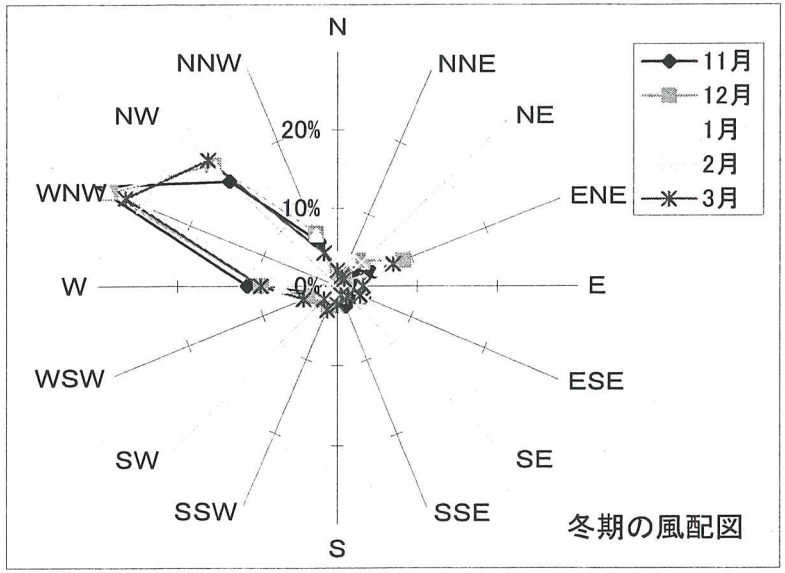
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	7.4	2.7	5.7	5	0	0.0	0.0	6.47	-
１２月	3.1	-1.6	0.9	5	9	1.8	1.5	5.60	127
１月	1.2	-3.1	-0.8	9	16	1.9	3.7	5.68	71
２月	1.1	-2.2	-0.6	7	57	8.1	3.8	4.95	97
３月	3.5	-2.0	0.5	7	24	3.6	3.0	5.24	47
							平均	5.6	86





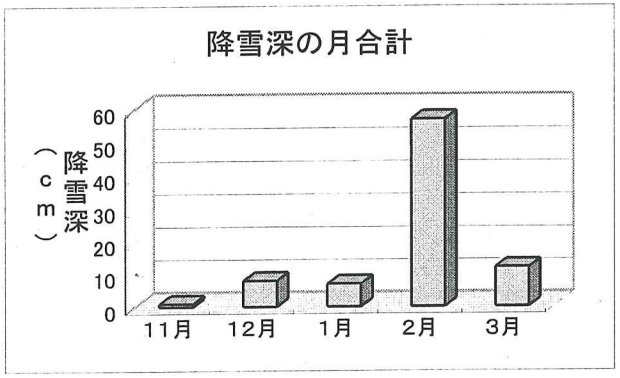


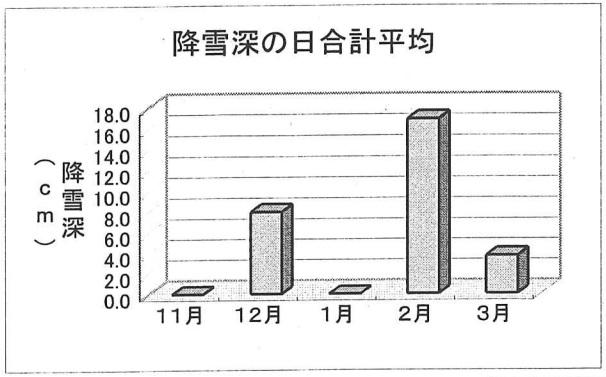


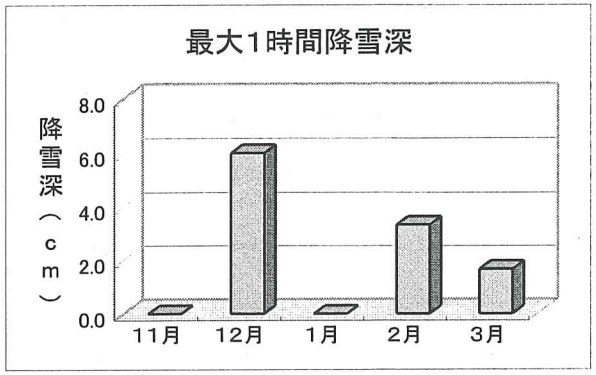


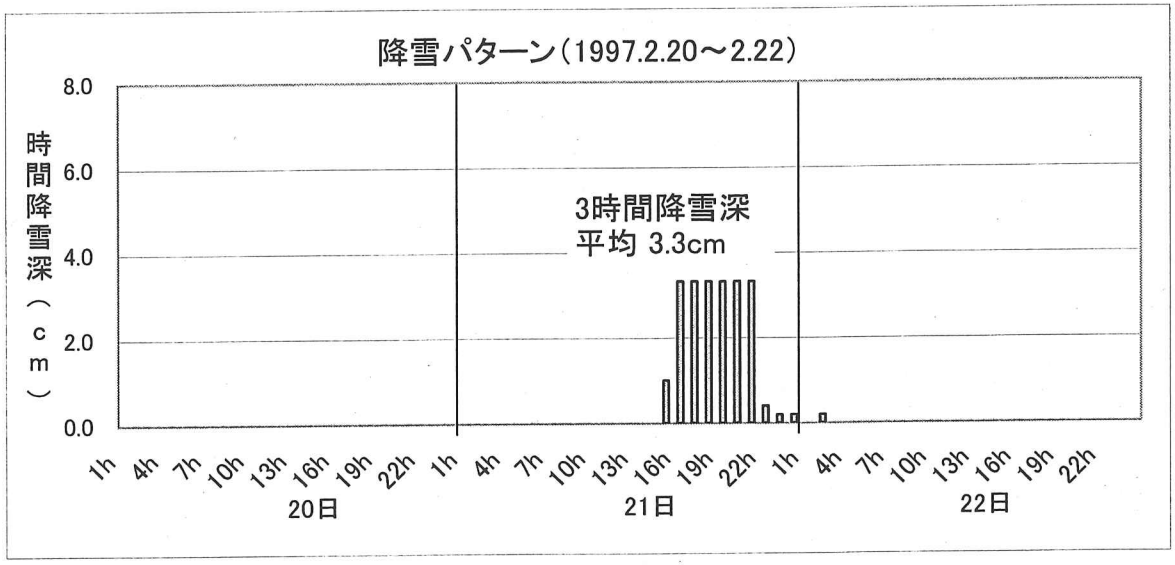
釧路市

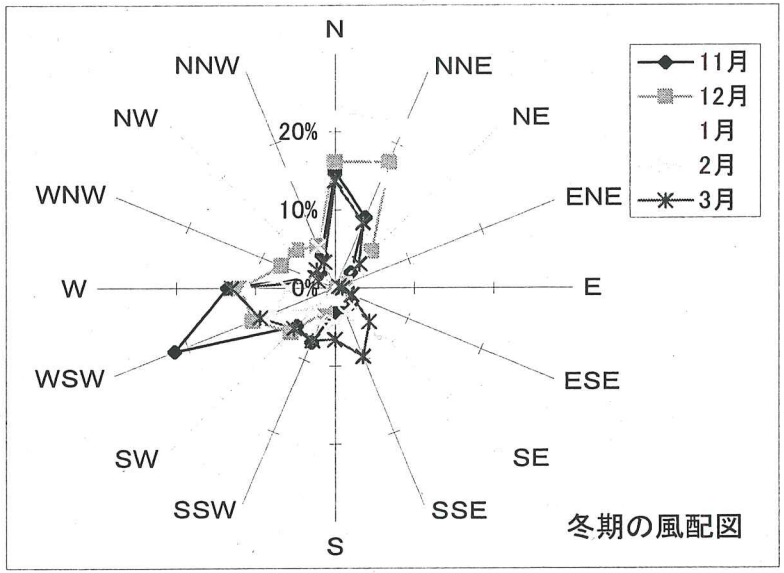
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	7.0	-0.8	3.8	1	1	0.0	0.0	4.26	-
１２月	2.4	-5.6	-1.2	1	8	8.0	6.0	3.26	-
１月	0.3	-7.9	-3.5	2	7	0.0	0.0	4.01	-
２月	0.1	-8.3	-3.9	3	57	16.9	3.3	3.84	64
３月	2.2	-5.6	-1.3	3	12	3.7	1.7	4.17	87
							平均	3.9	76





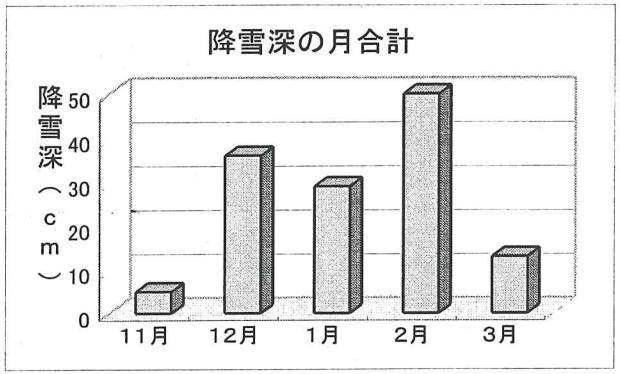


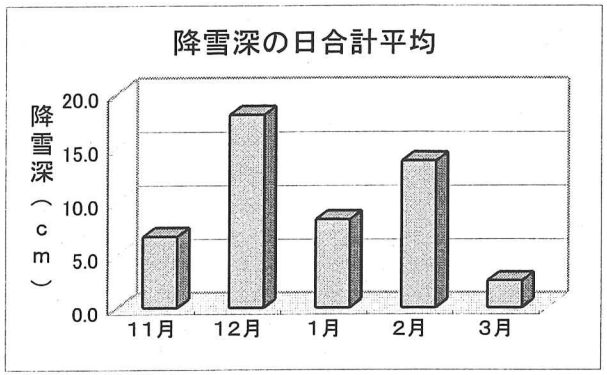


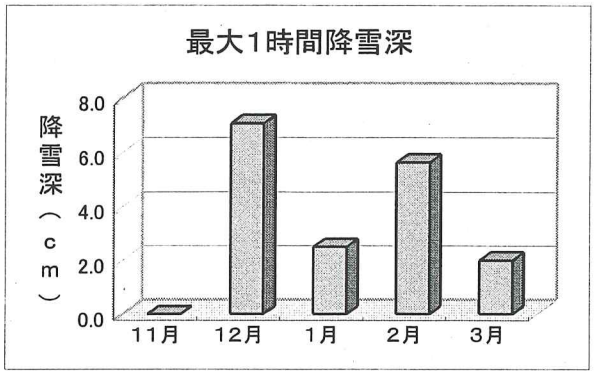


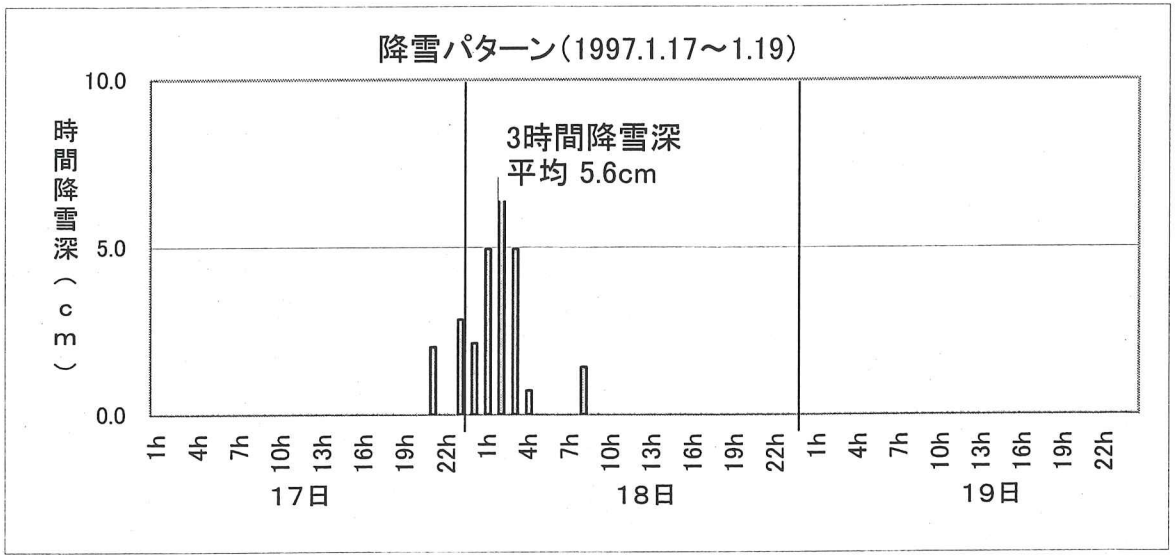
帯広

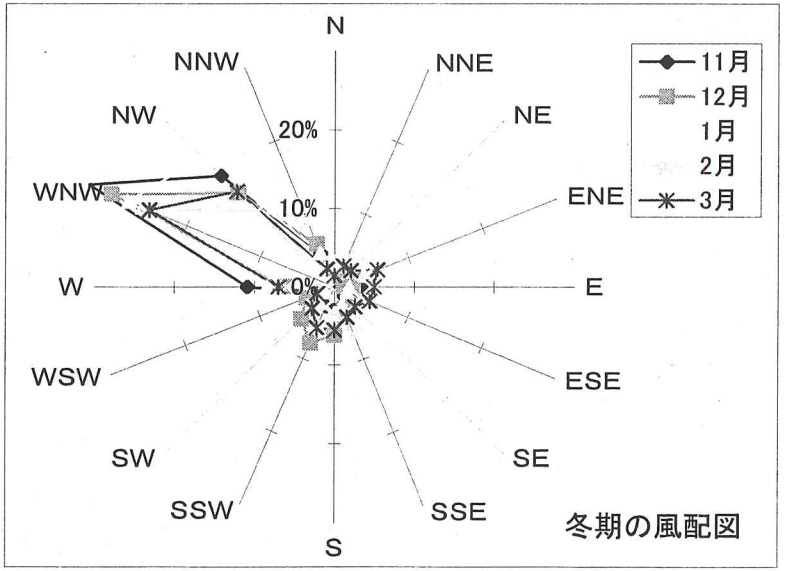
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	6.7	-1.3	2.7	1	5	6.7	0.0	2.90	-
１２月	0.8	-8.3	-3.5	2	36	18.0	7.1	2.55	54
１月	-0.7	-10.6	-5.2	4	29	8.3	2.5	2.57	48
２月	0.1	-10.6	-5.3	5	67	13.7	5.6	2.42	58
３月	3.8	-6.2	-1.1	5	13	2.5	2.0	2.79	50
							平均	2.6	53





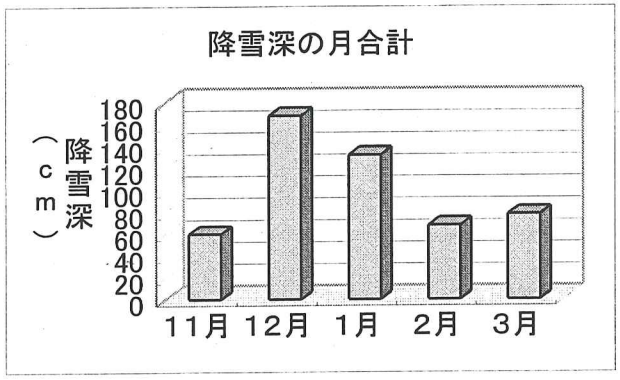


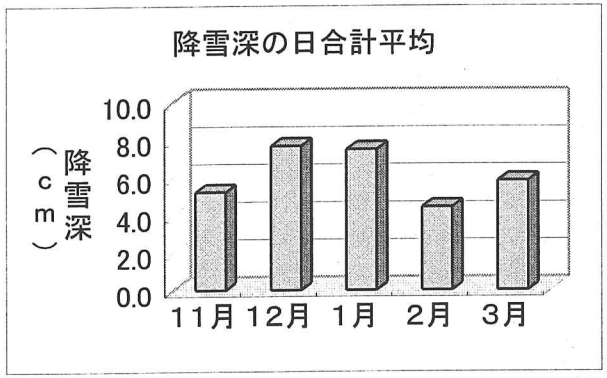


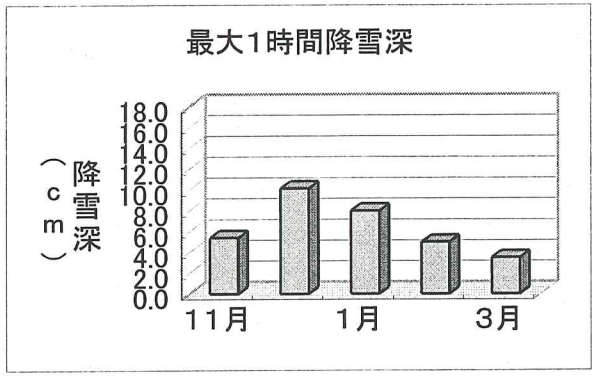


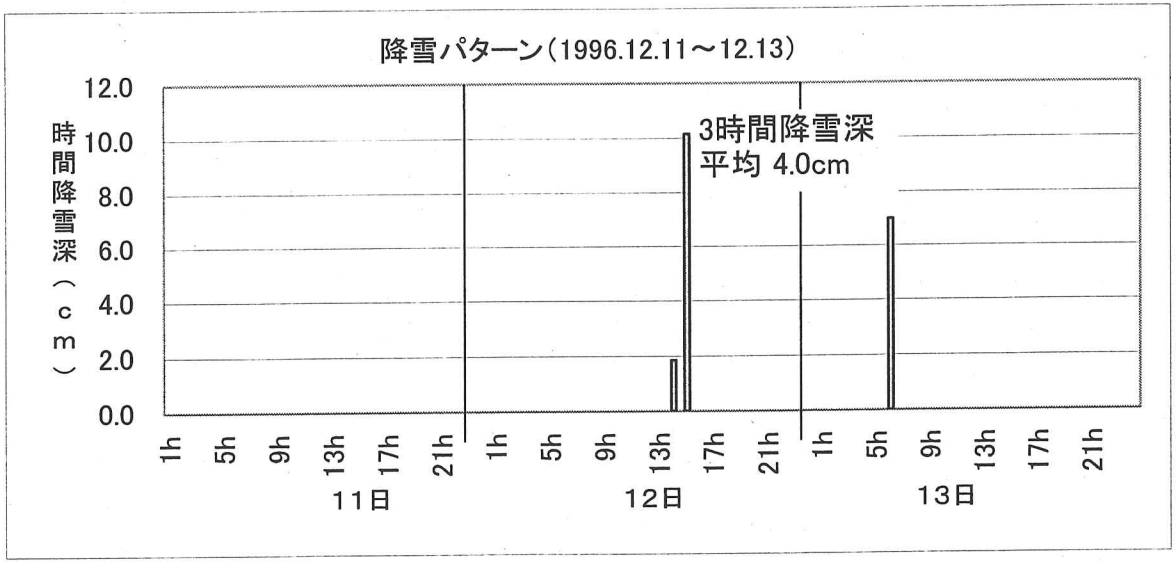
北見

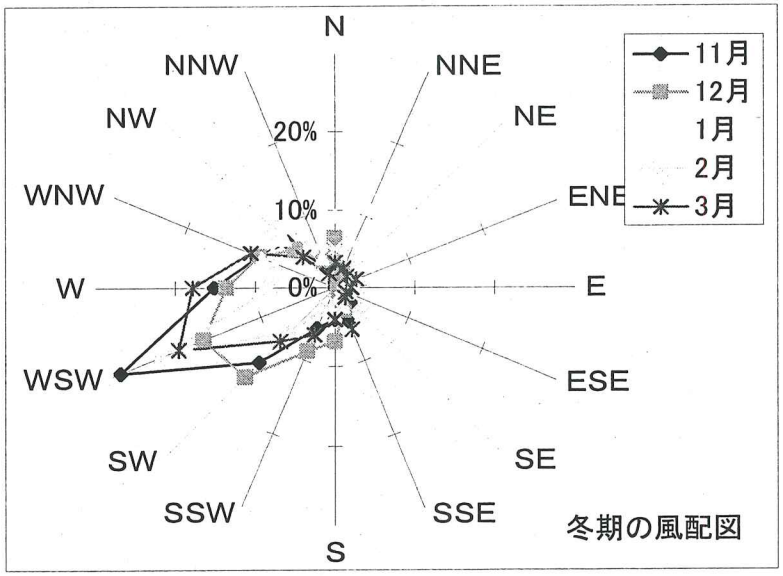
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m³）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	4.6	-1.3	1.6	12	60	5.2	5.4	2.81	85
１２月	-0.9	-6.2	-3.4	22	168	7.7	10.2	2.59	59
１月	-2.3	-6.7	-4.1	18	132	7.5	8.0	3.22	56
２月	-1.5	-6.8	-4.4	15	68	4.4	5.0	2.98	51
３月	1.1	-6.0	-2.3	13	78	5.8	3.5	3.00	56
							平均	2.9	61





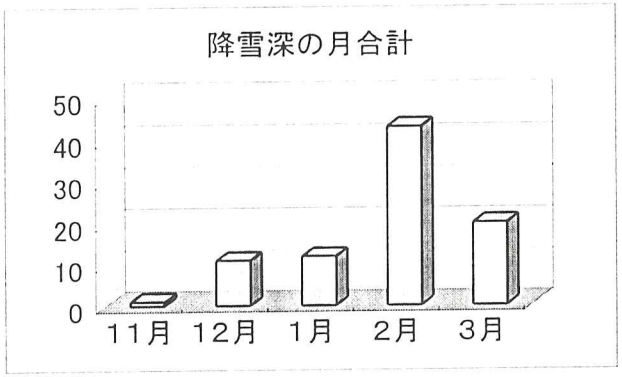


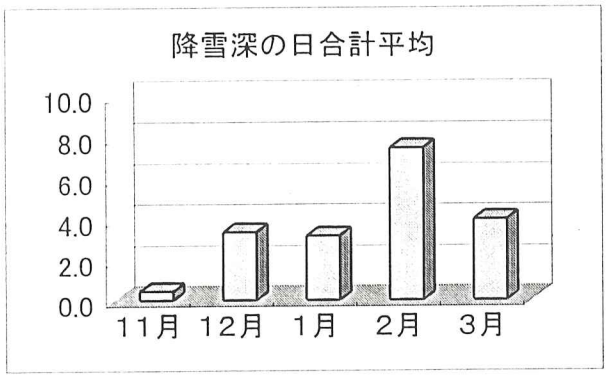


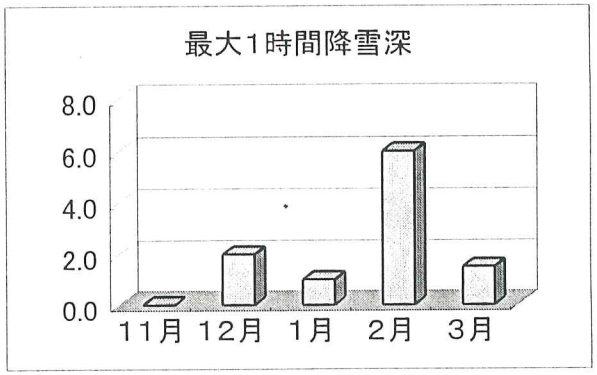


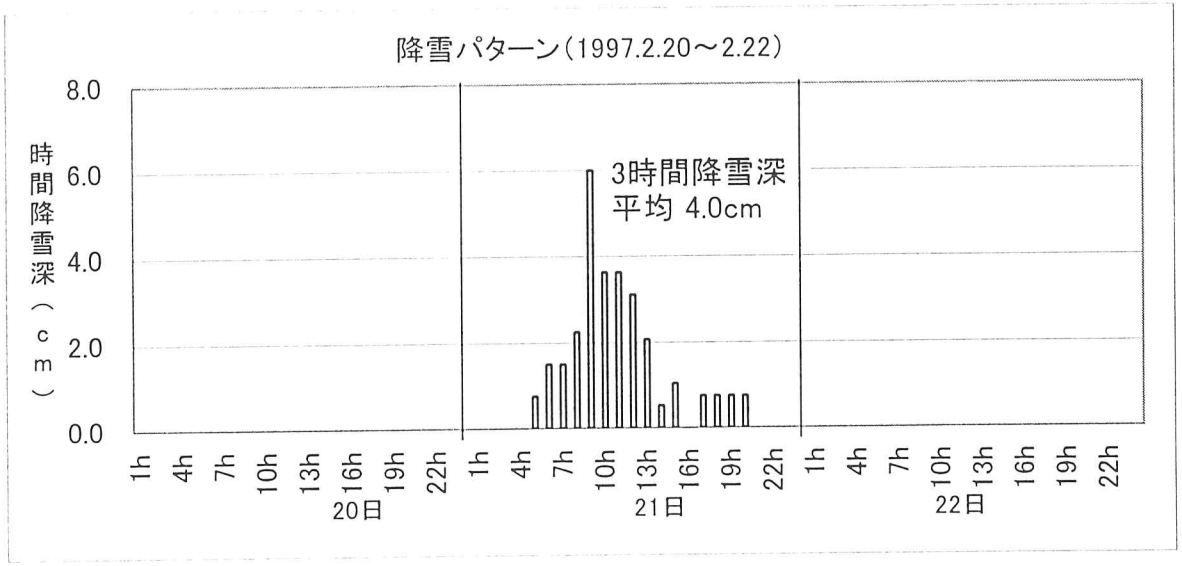
苫小牧

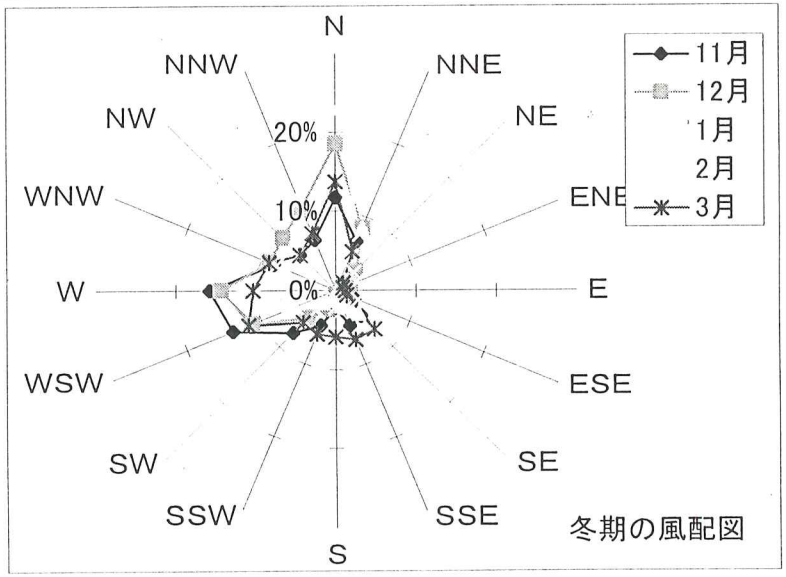
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m³）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	7.6	-0.1	4.2	2	1	0.4	0.0	3.19	-
１２月	3.0	-4.8	-0.7	3	11	3.4	2.0	2.73	18
１月	1.1	-6.0	-2.3	4	12	3.2	1.0	3.35	29
２月	1.3	-6.2	-2.4	6	43	7.5	6.0	3.23	88
３月	3.9	-4.5	0.0	5	20	4.0	1.5	3.25	75
							平均	3.1	53





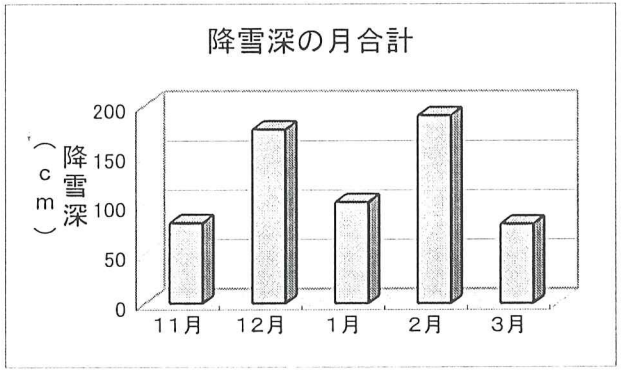


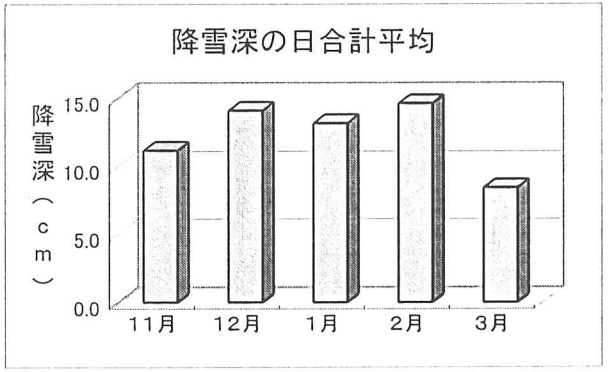


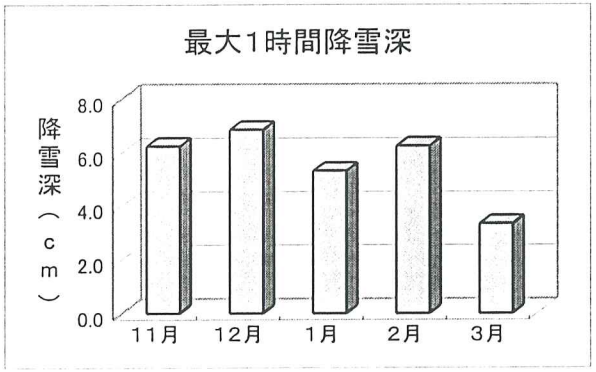


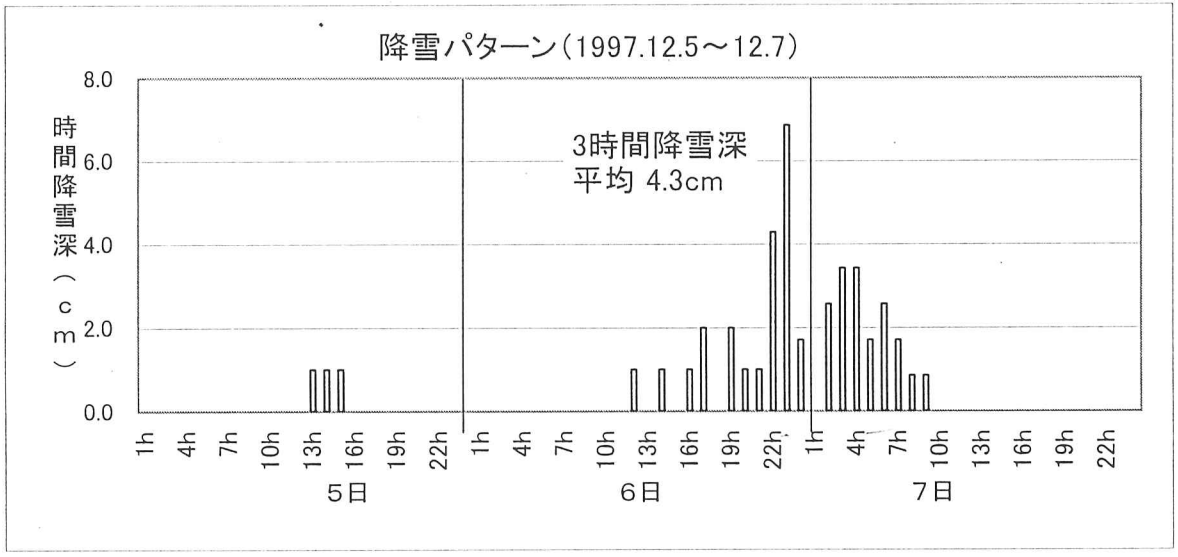
岩見沢

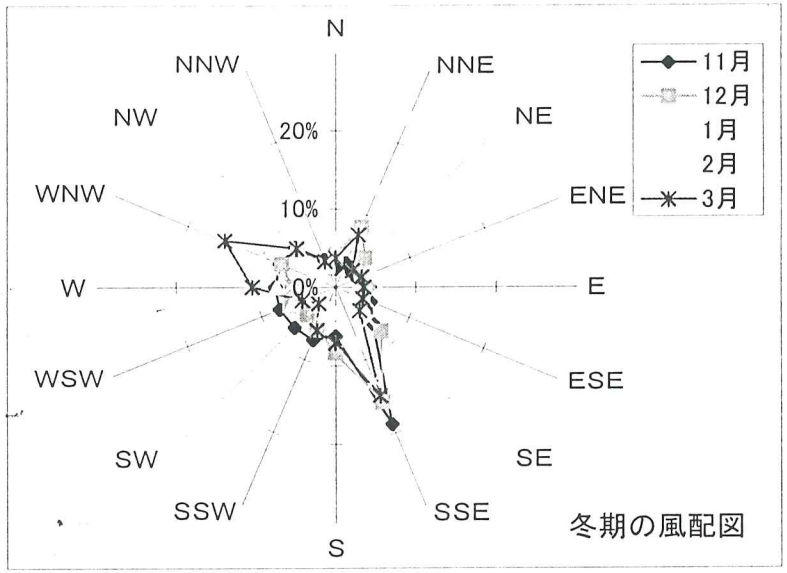
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	5.8	-0.3	2.9	7	81	11.2	6.3	3.57	54
１２月	1.0	-5.8	-2.3	13	176	14.1	6.9	3.09	42
１月	-1.7	-8.7	-4.9	8	102	13.2	5.3	3.46	48
２月	-0.3	-6.7	-3.6	13	190	14.6	6.3	3.36	43
３月	2.5	-5.1	-1.2	10	80	8.4	3.3	3.84	51
							平均	3.5	48





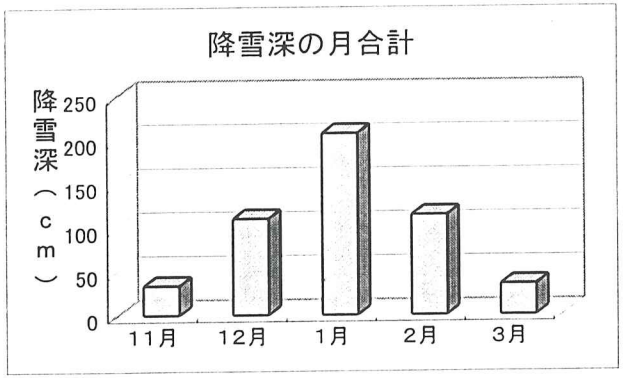


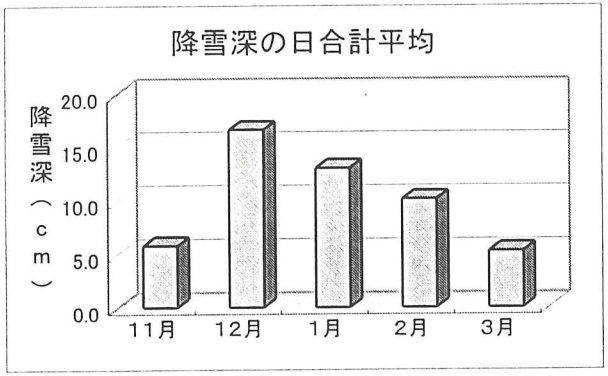


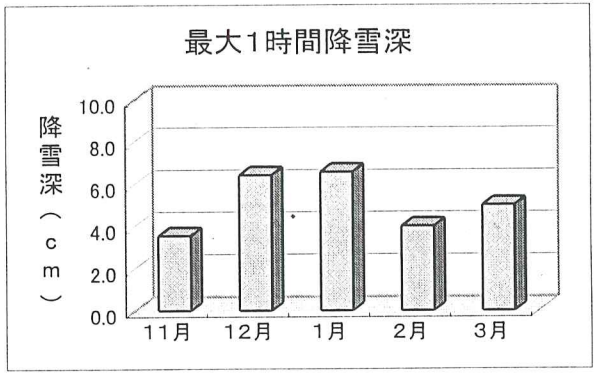


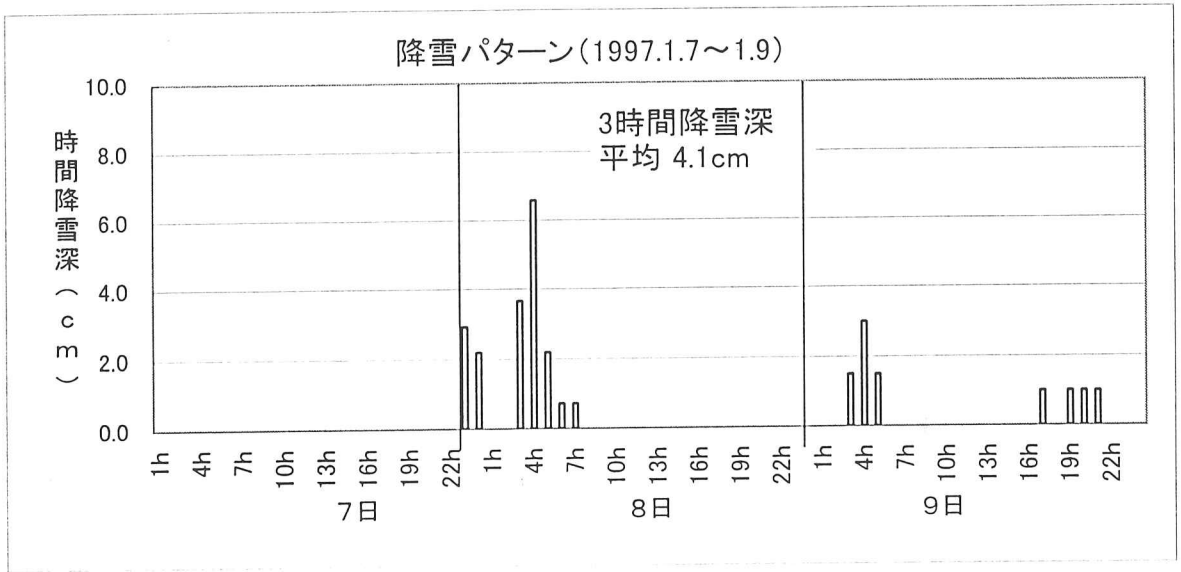
青森

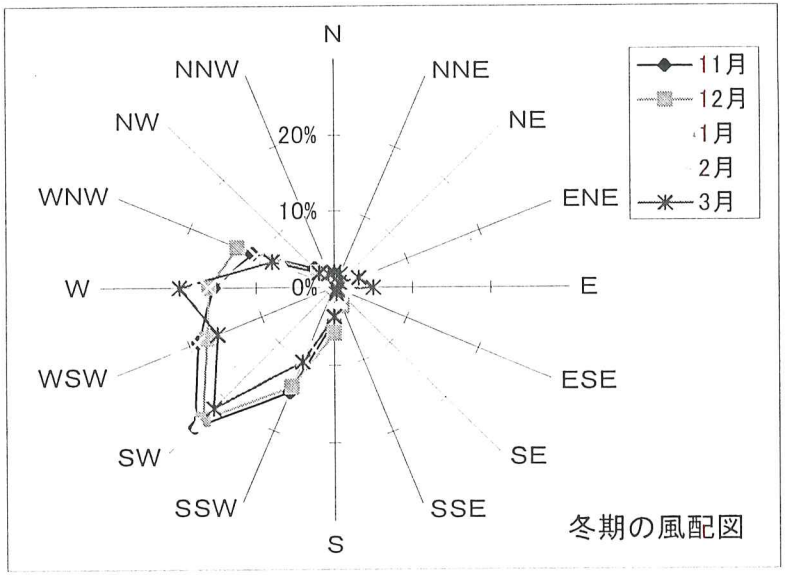
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	9.5	3.2	6.4	6	34	5.8	3.6	4.12	73
１２月	5.3	-1.5	1.8	7	110	16.6	6.4	3.71	45
１月	2.5	-2.3	0.0	16	207	13.0	6.6	4.47	46
２月	2.9	-1.8	0.6	11	114	10.1	4.0	4.37	51
３月	6.6	-0.9	2.8	7	35	5.3	5.0	4.94	51
							平均	4.3	53





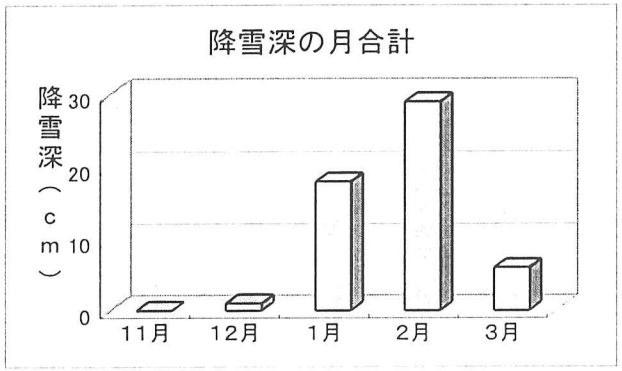


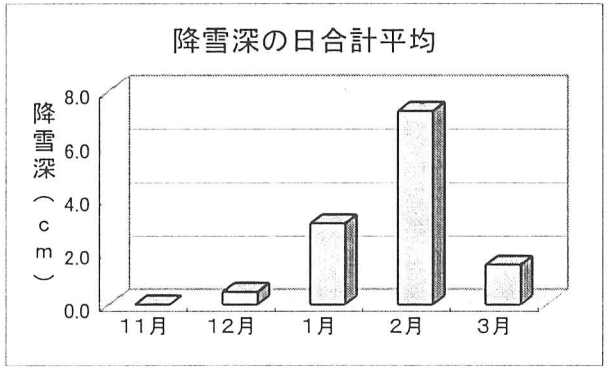


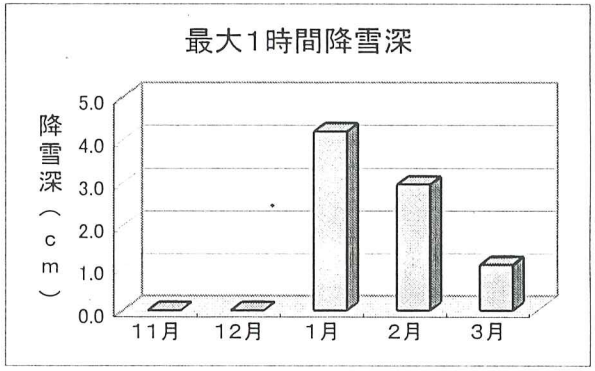


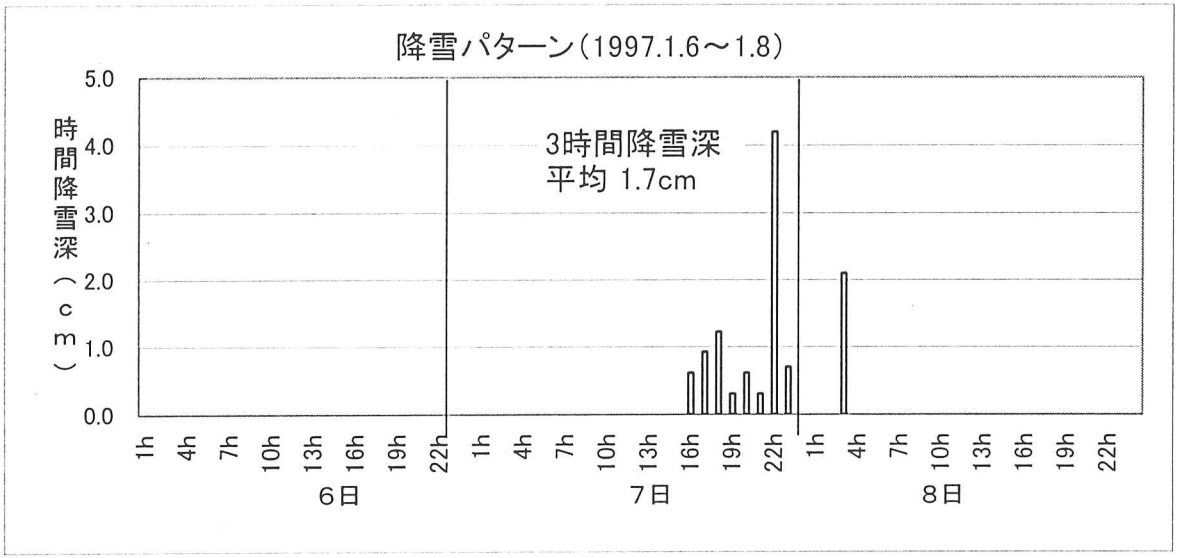
八戸市

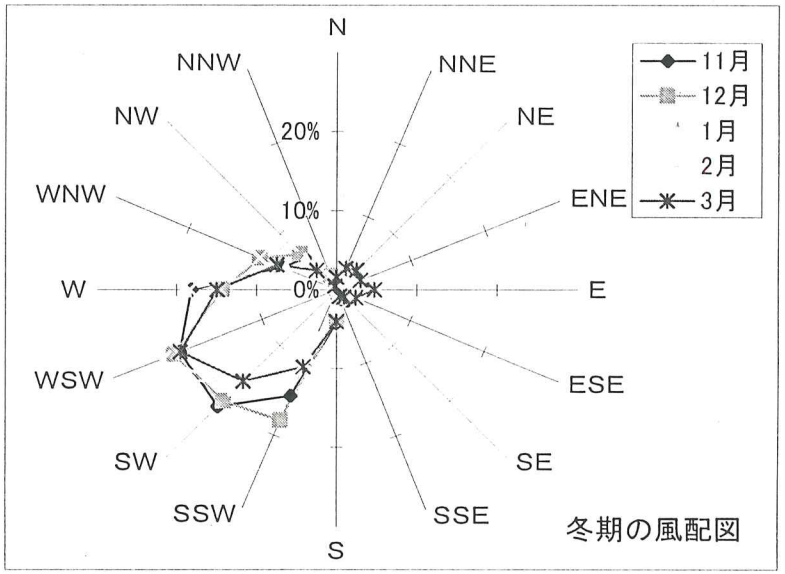
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	10.0	2.9	6.5	1	0	0.0	0.0	4.54	―
１２月	6.0	-1.8	2.0	2	1	0.5	0.0	4.31	50
１月	3.4	-2.4	0.3	6	18	3.1	4.2	5.26	69
２月	3.6	-2.5	0.7	4	29	7.3	3.0	5.12	79
３月	7.1	-1.4	2.9	4	6	1.5	1.1	5.18	175
							平均	4.9	93





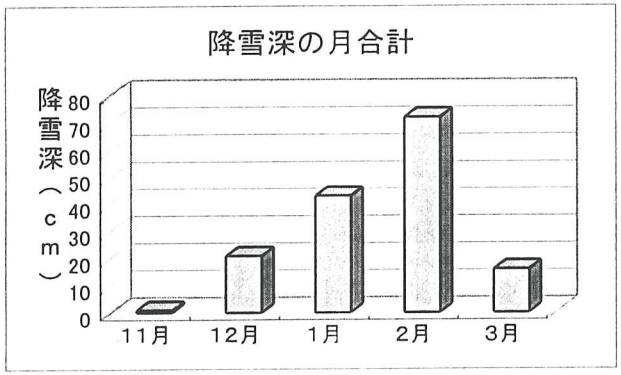


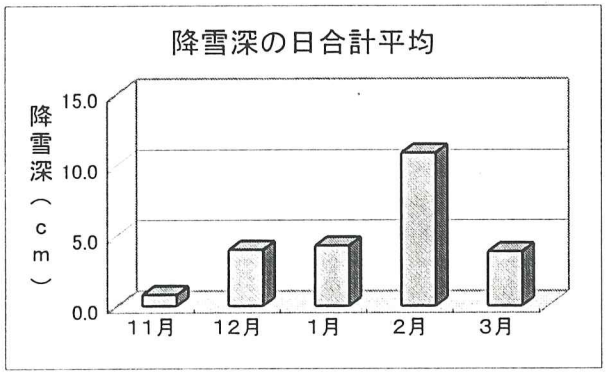


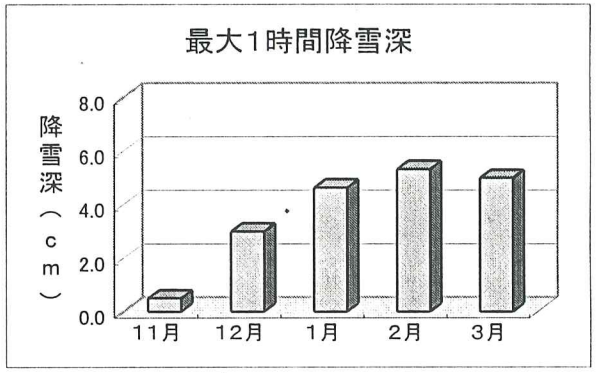


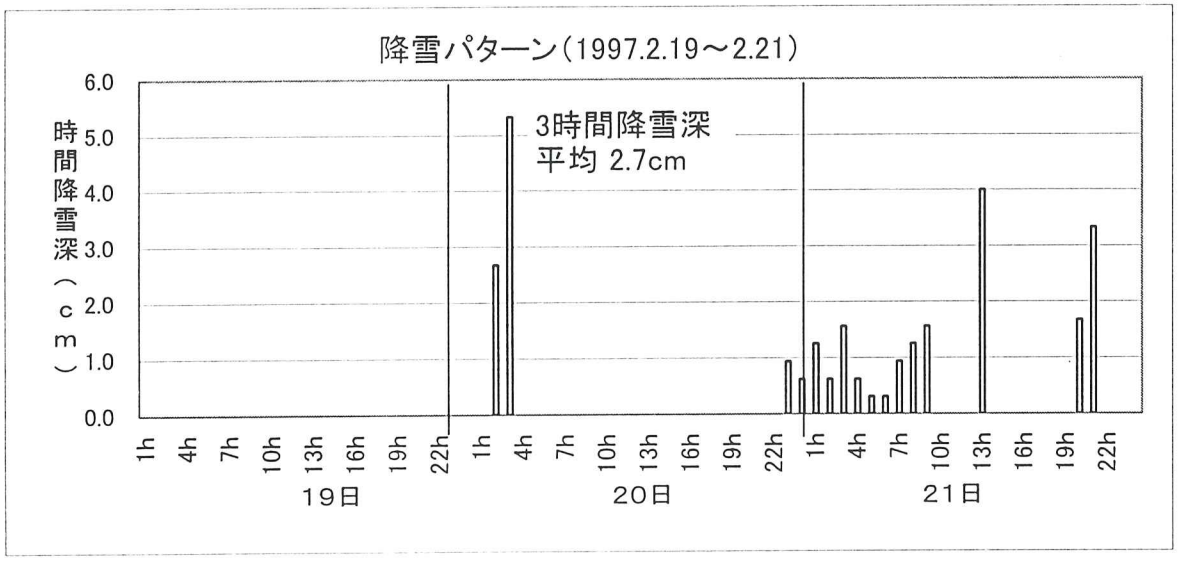
盛岡

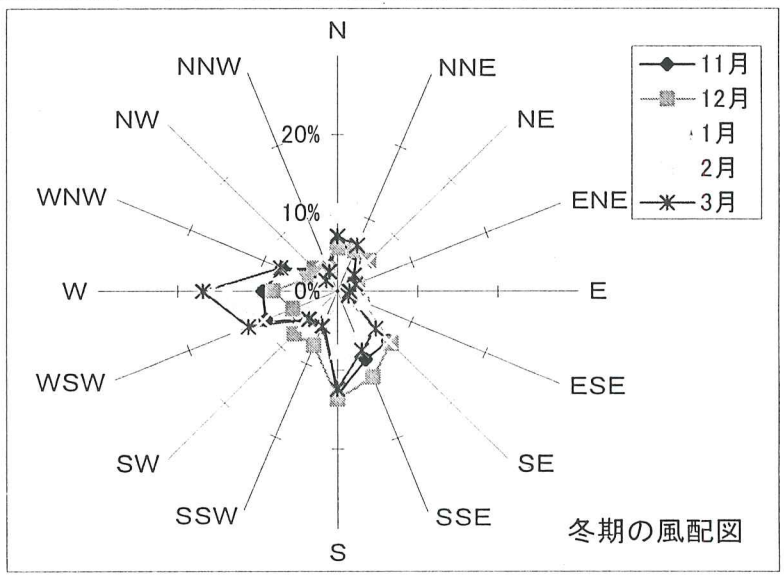
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	9.5	1.8	5.7	1	1	0.8	0.5	2.91	—
１２月	4.8	-2.2	1.1	5	21	4.0	3.0	2.34	54
１月	2.5	-3.8	-0.8	10	43	4.3	4.6	3.16	46
２月	2.8	-4.2	-0.7	7	72	10.9	5.3	3.10	51
３月	7.8	-1.9	2.7	4	16	3.9	5.0	3.82	37
							平均	3.1	47





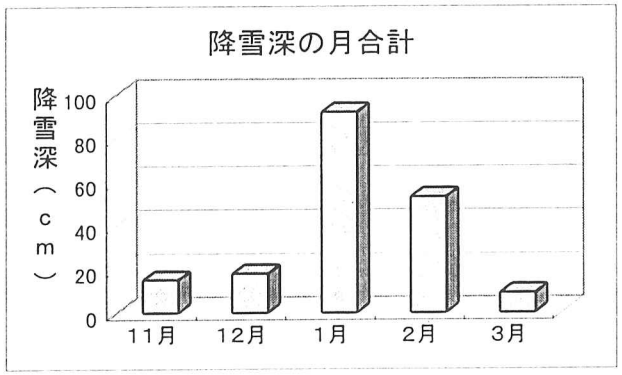


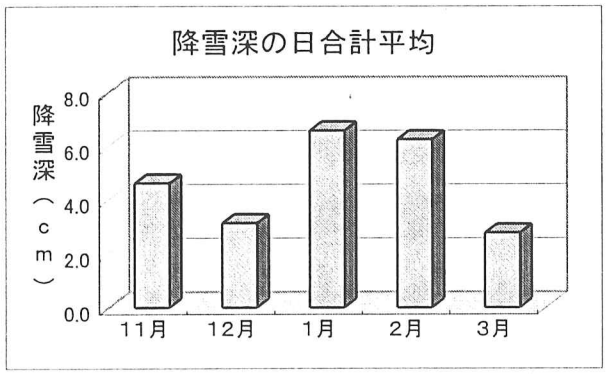


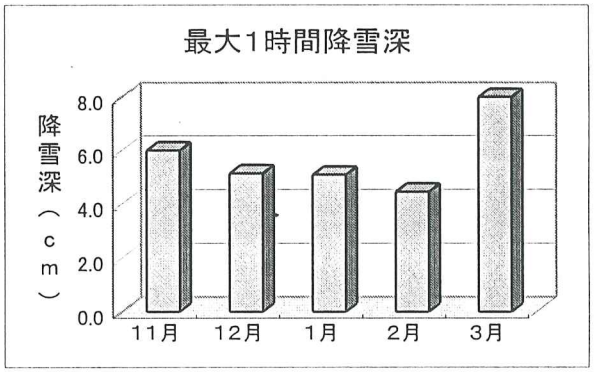


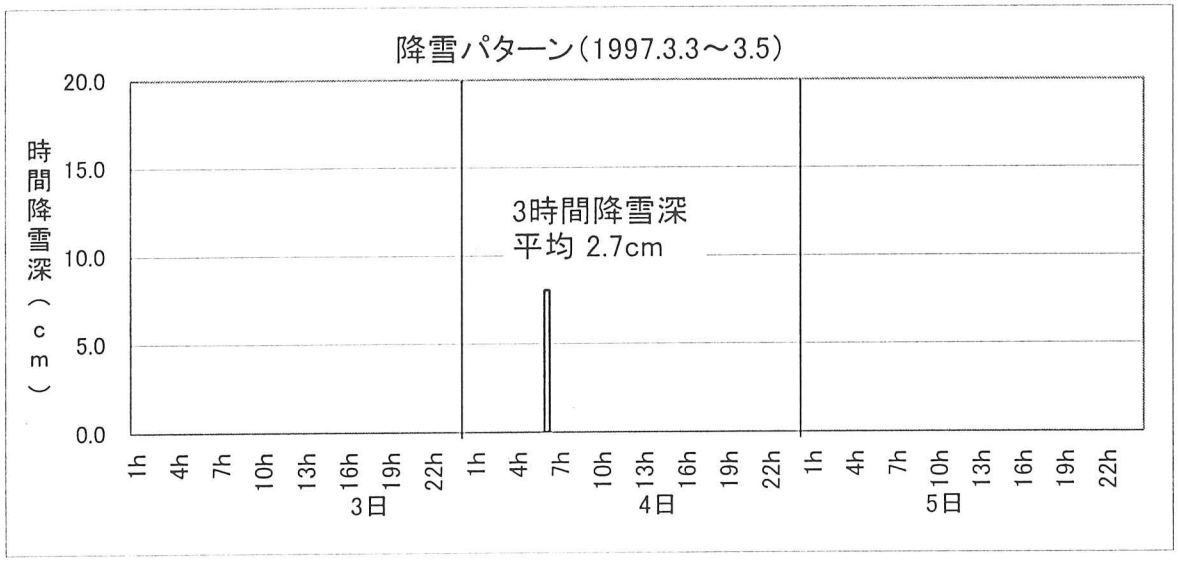
秋田

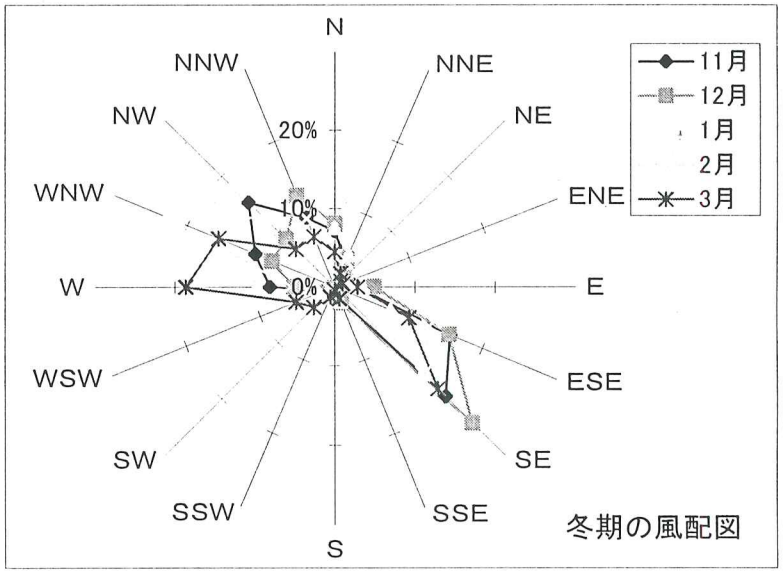
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	10.5	4.1	7.6	3	15	4.6	6.0	4.71	100
１２月	5.8	0.2	2.8	6	18	3.1	5.1	4.26	55
１月	3.1	-1.0	1.0	14	92	6.6	5.1	5.27	46
２月	3.5	-1.1	1.3	9	53	6.2	4.5	5.02	50
３月	7.8	0.0	3.9	3	9	2.8	8.0	5.10	27
							平均	4.9	56





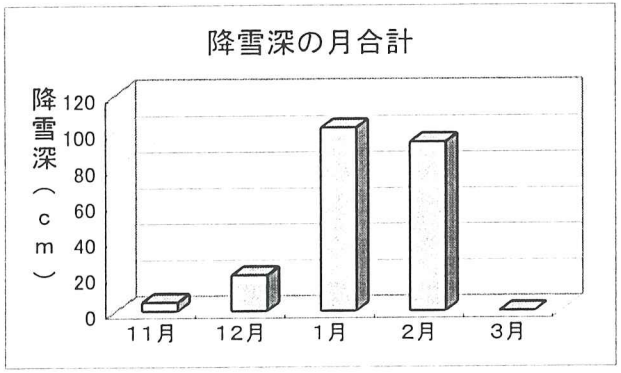


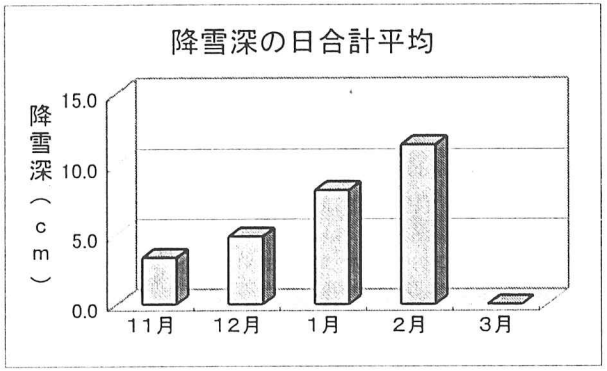


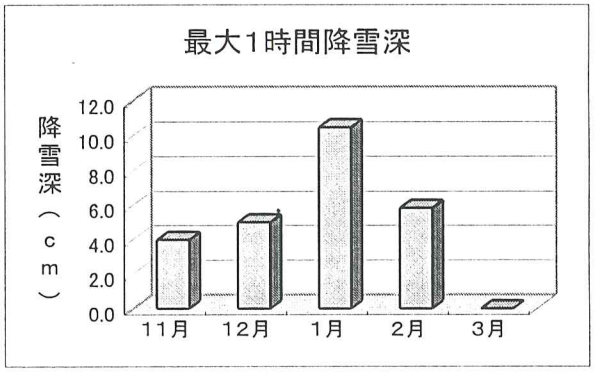


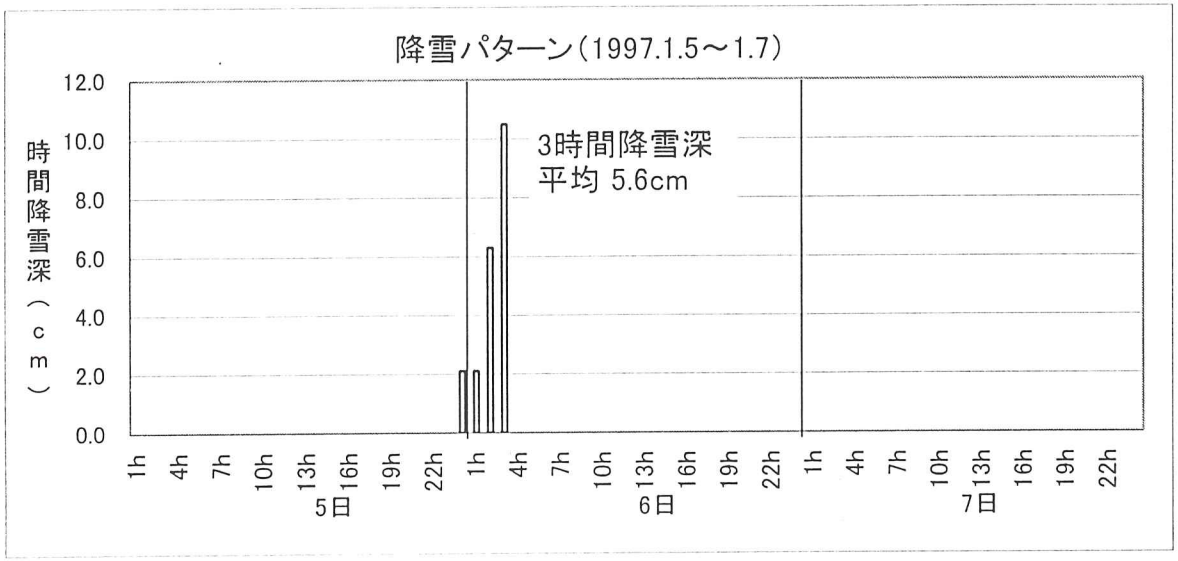
山形市

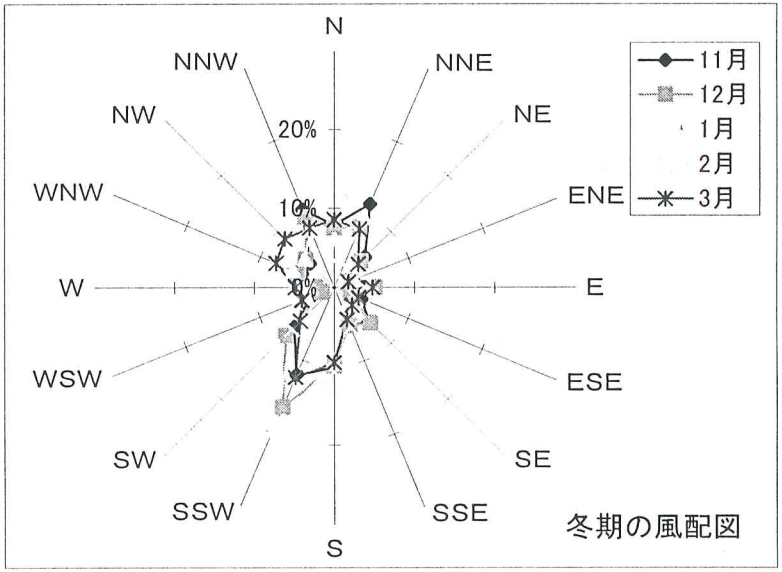
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	10.9	3.5	7.3	2	5	-3.3	4.0	1.66	50
１２月	6.9	-0.3	3.0	4	20	4.8	5.0	1.75	52
１月	3.6	-2.1	0.5	13	102	8.2	10.5	1.72	29
２月	3.8	-2.7	0.5	8	94	11.4	5.8	1.82	40
３月	9.5	0.1	4.5	1	0	0.0	0.0	2.21	-
							平均	1.8	43





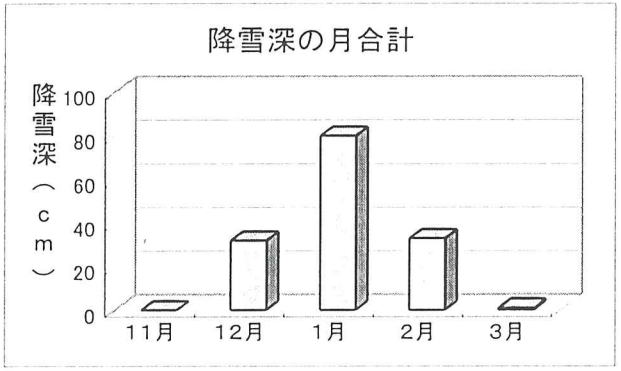


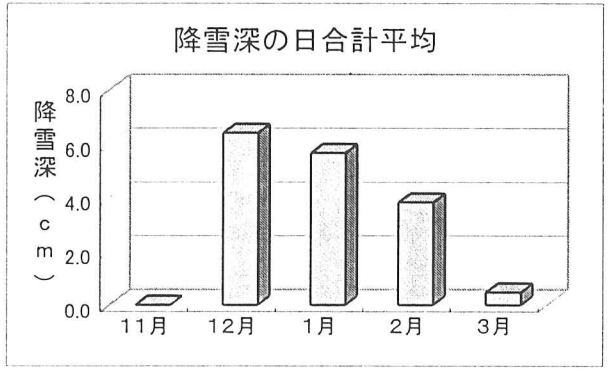


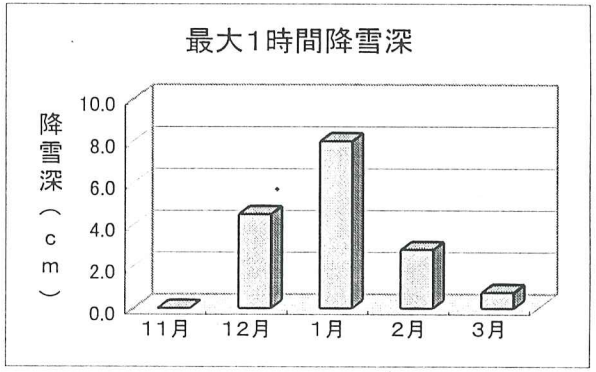


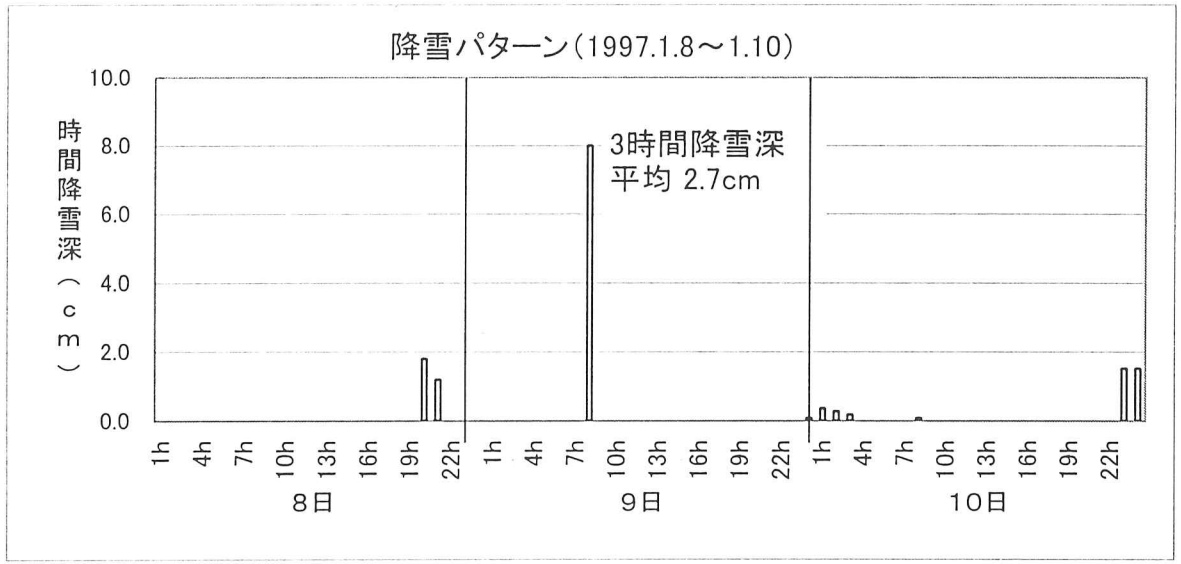
酒田

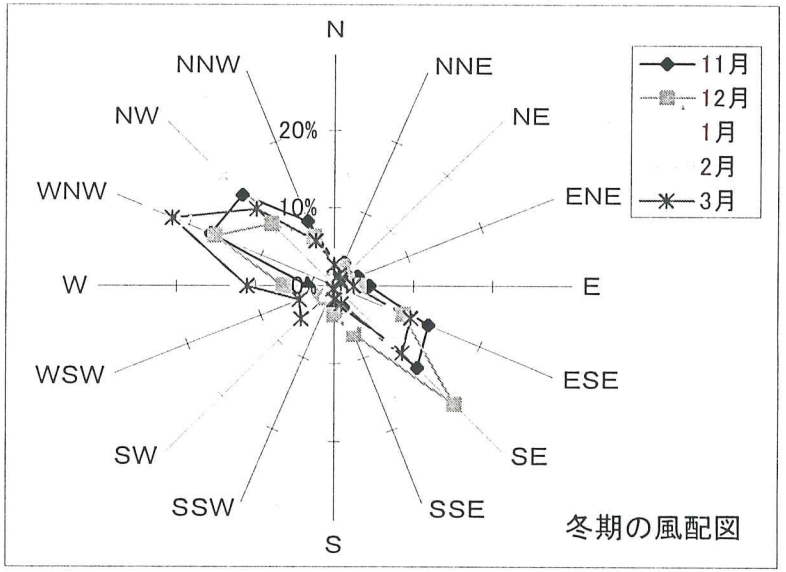
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	11.7	5.7	9.0	2	0	0.0	0.0	4.74	—
１２月	7.6	1.8	4.6	5	32	6.4	4.5	4.55	101
１月	4.5	0.3	2.3	14	80	5.7	8.0	5.57	105
２月	4.7	-0.2	2.6	9	33	3.8	2.8	5.48	107
３月	8.7	1.6	5.1	2	1	0.5	0.8	4.85	—
							平均	5.0	104





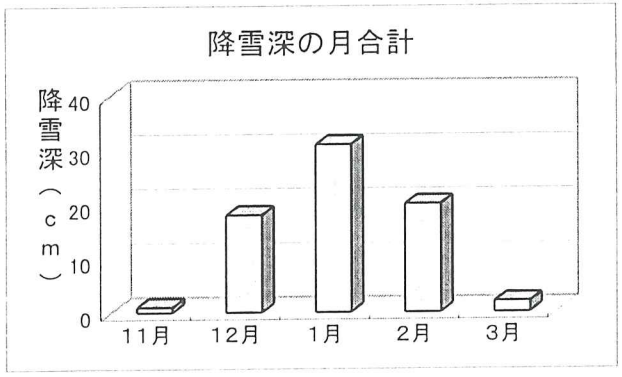


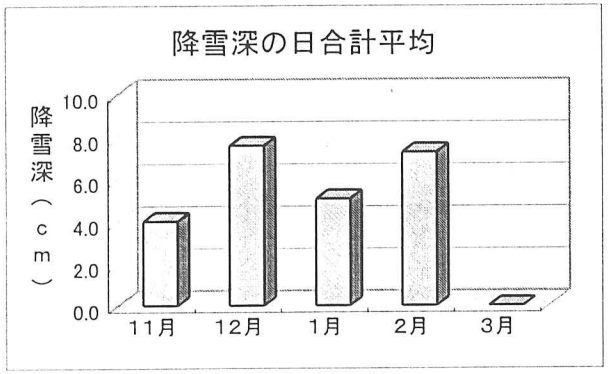


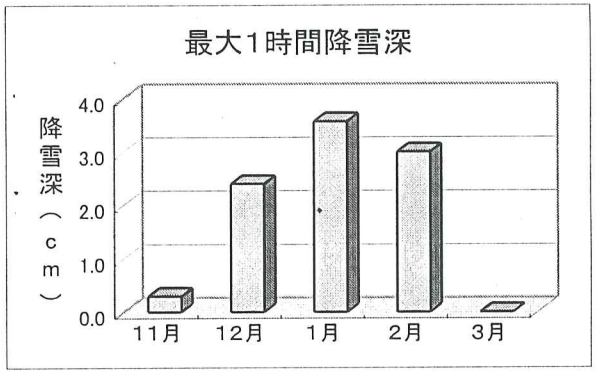


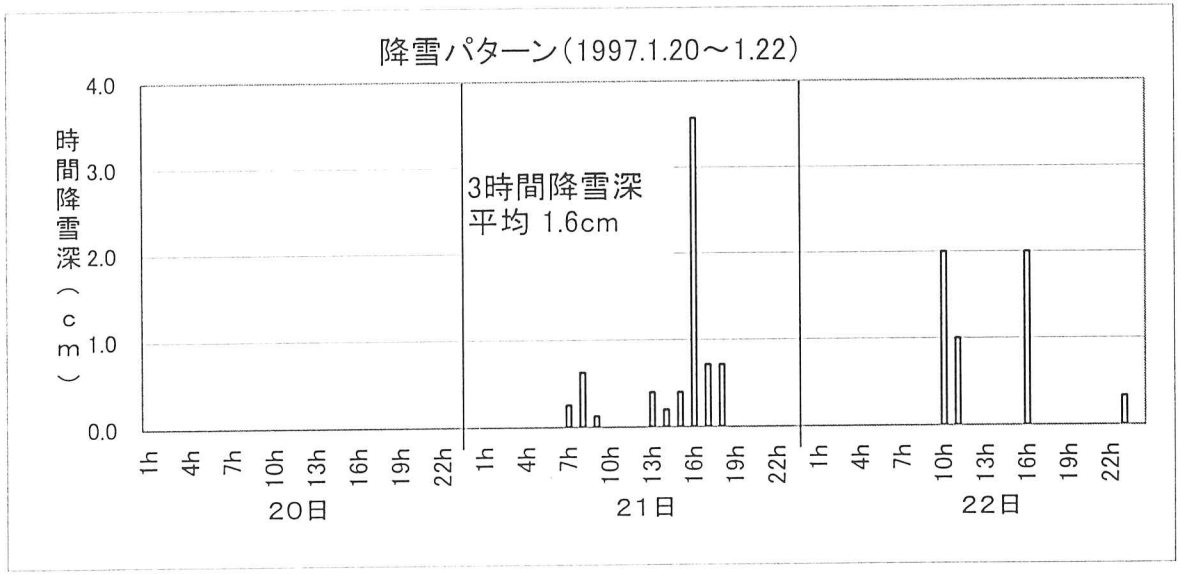
新潟

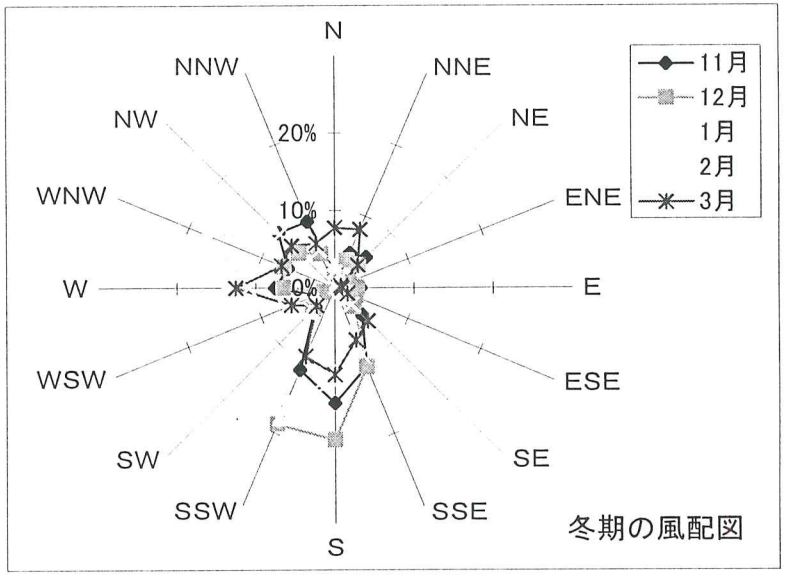
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	12.7	6.9	10.4	0	1	4.0	0.3	3.64	—
１２月	8.4	2.9	5.6	2	18	7.6	2.4	3.76	155
１月	6.1	1.2	3.5	6	31	5.1	3.6	5.07	140
２月	6.2	0.4	3.5	3	20	7.3	3.0	4.51	50
３月	9.8	2.7	6.3	0	2	0.0	0.0	3.96	—
							平均	4.2	115





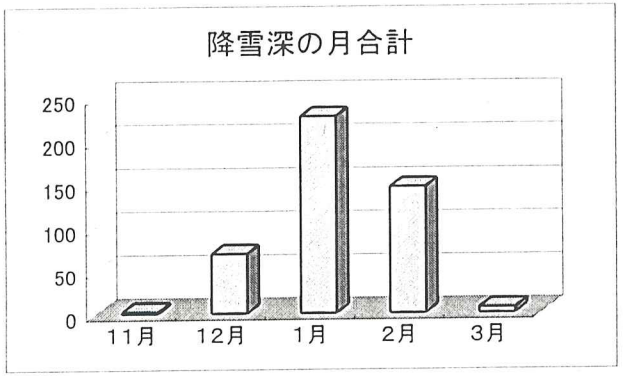


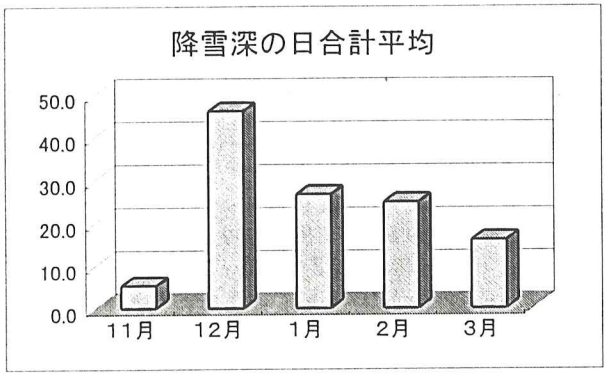


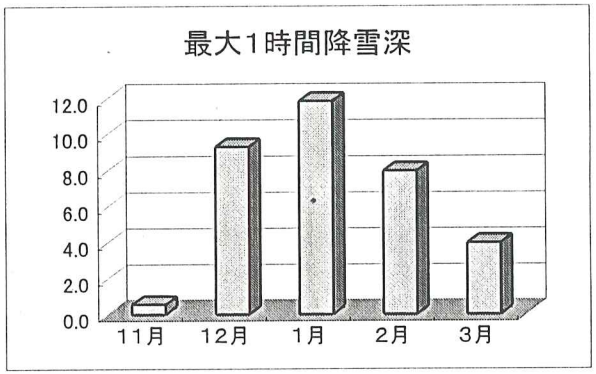


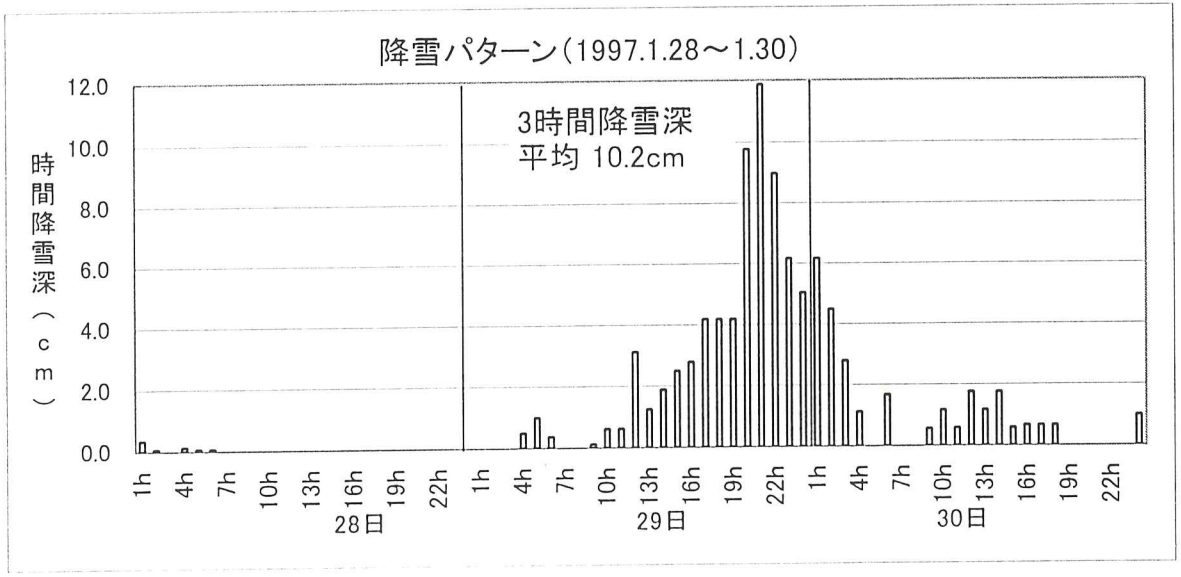
高田

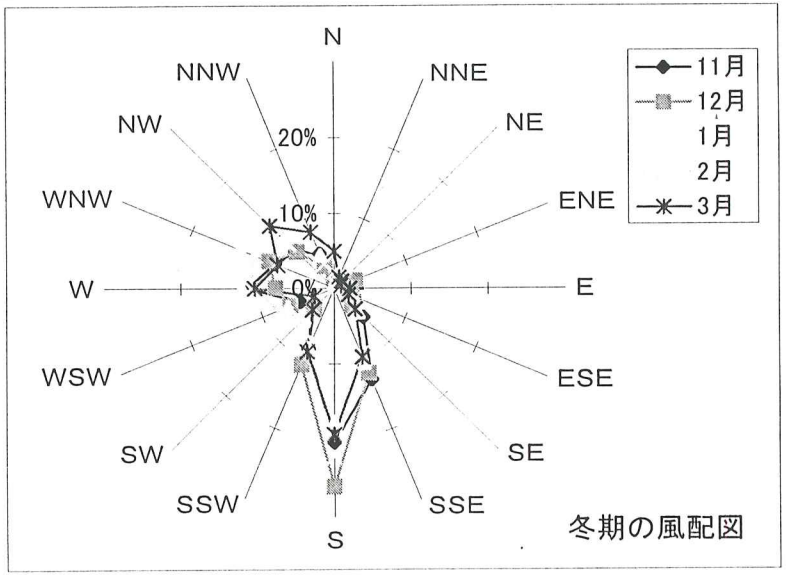
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	13.2	6.1	9.9	0	2	5.3	0.6	2.14	―
１２月	9.7	2.1	5.6	2	69	46.0	9.3	2.39	129
１月	5.9	0.0	2.7	9	227	26.7	11.9	2.67	110
２月	5.8	-1.1	2.2	6	146	24.9	8.0	2.61	78
３月	11.5	1.5	6.4	0	6	16.0	4.0	2.35	―
							平均	2.4	106





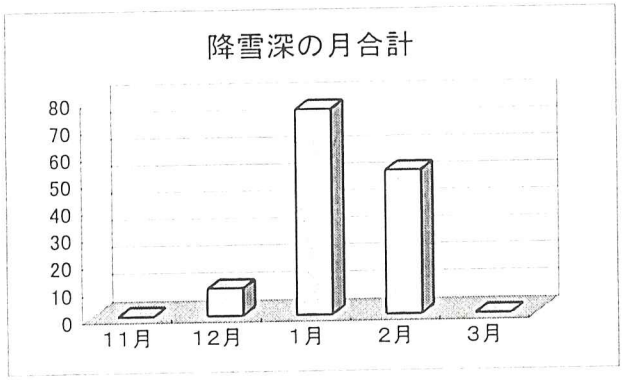


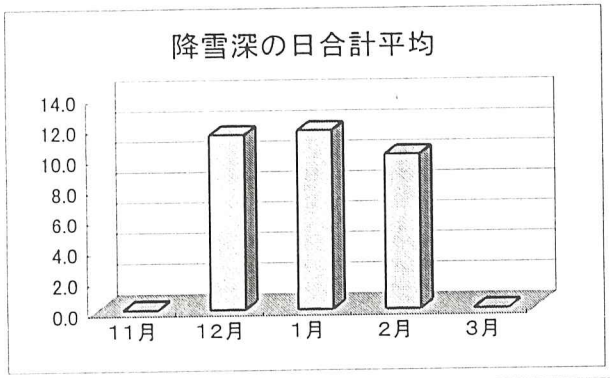


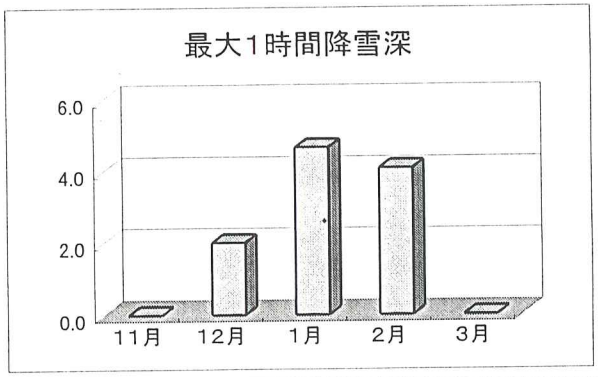


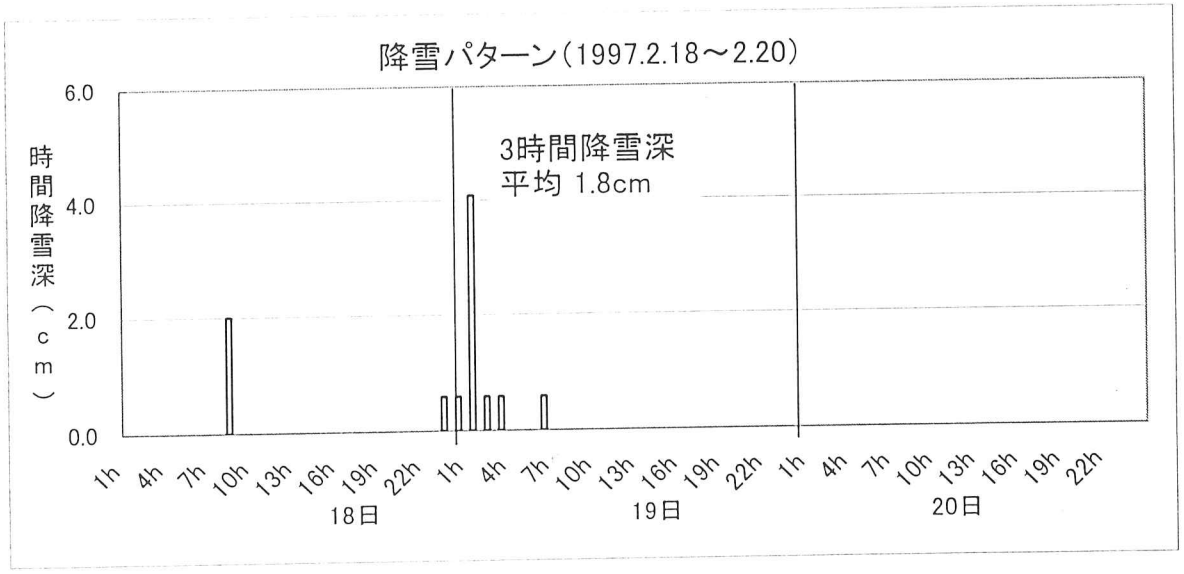
富山

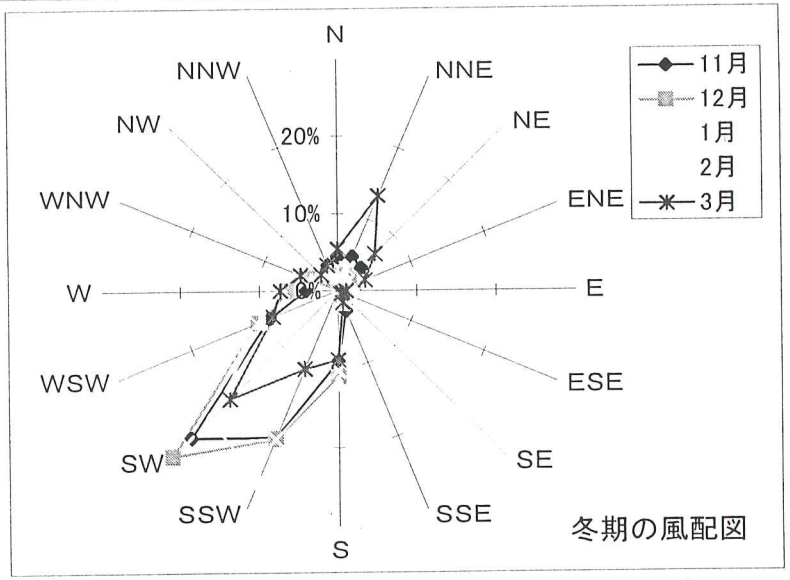
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	13.3	6.9	10.4	0	0	0.0	0.0	2.82	—
１２月	9.7	2.7	6.0	1	10	11.4	2.0	3.00	—
１月	6.1	0.4	3.0	7	76	11.7	4.7	3.09	159
２月	6.4	-0.7	2.8	5	53	10.1	4.1	2.99	103
３月	11.9	2.6	7.3	0	0	0.0	0.0	3.49	—
							平均	3.1	131





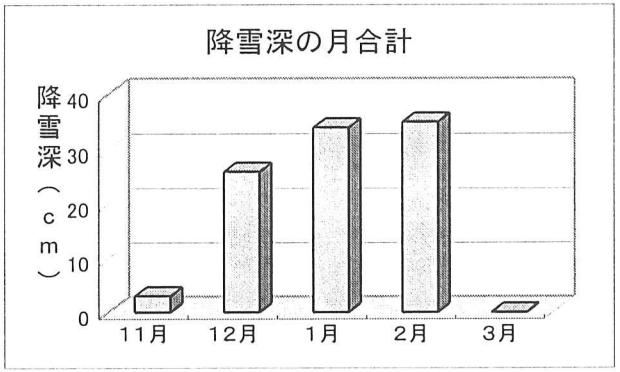


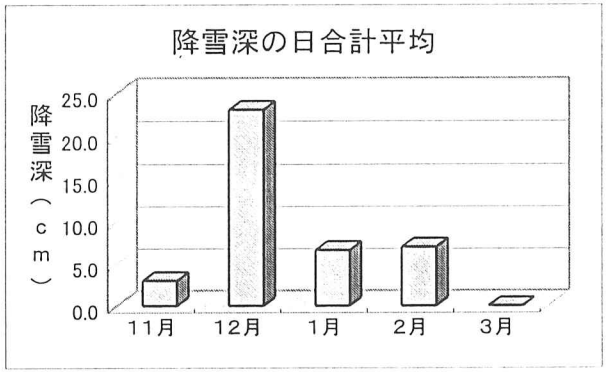


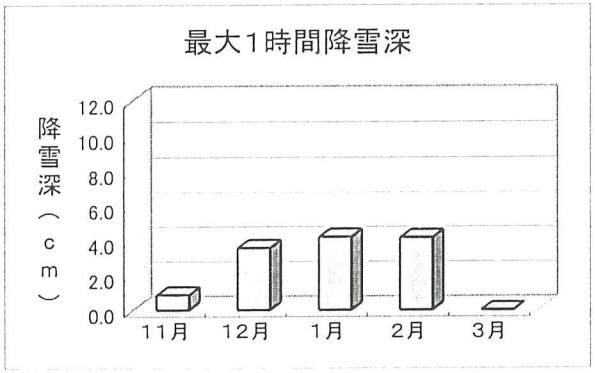


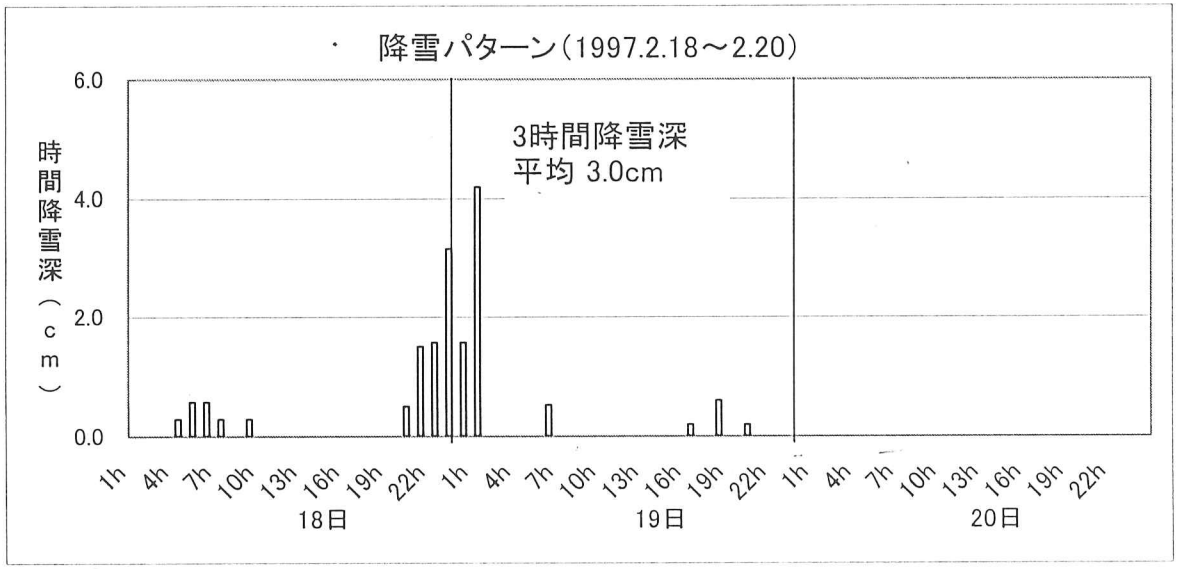
金沢

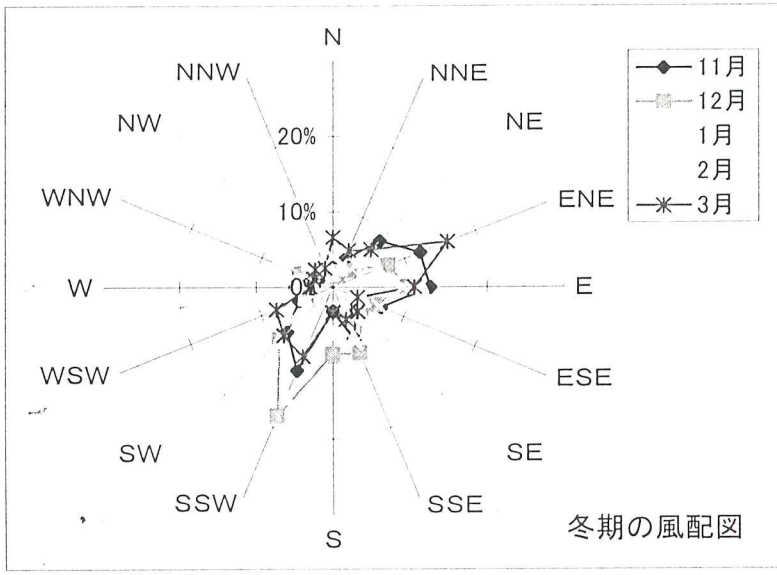
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	13.9	7.5	11.2	0	3	3.0	0.9	4.43	－
１２月	10.2	3.5	6.8	1	26	23.1	3.6	4.80	276
１月	6.4	1.1	3.9	5	34	6.6	4.2	5.36	183
２月	6.2	0.3	3.7	5	35	7.0	4.2	4.65	137
３月	12.0	3.2	7.8	1	0	0.0	0.0	4.67	－
							平均	4.8	199





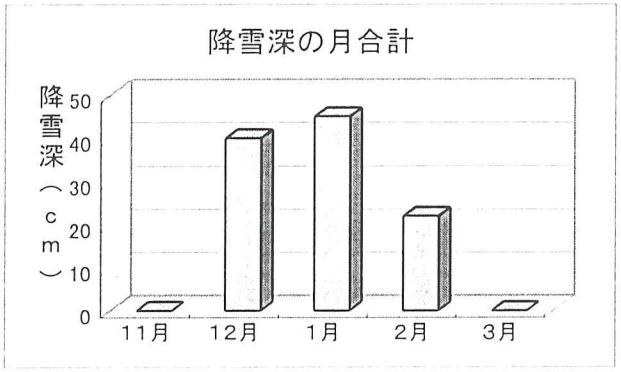


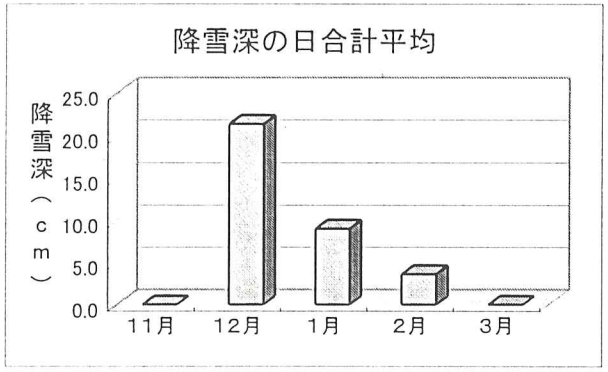


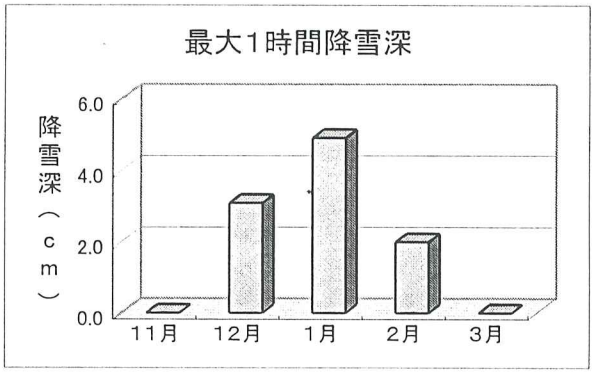


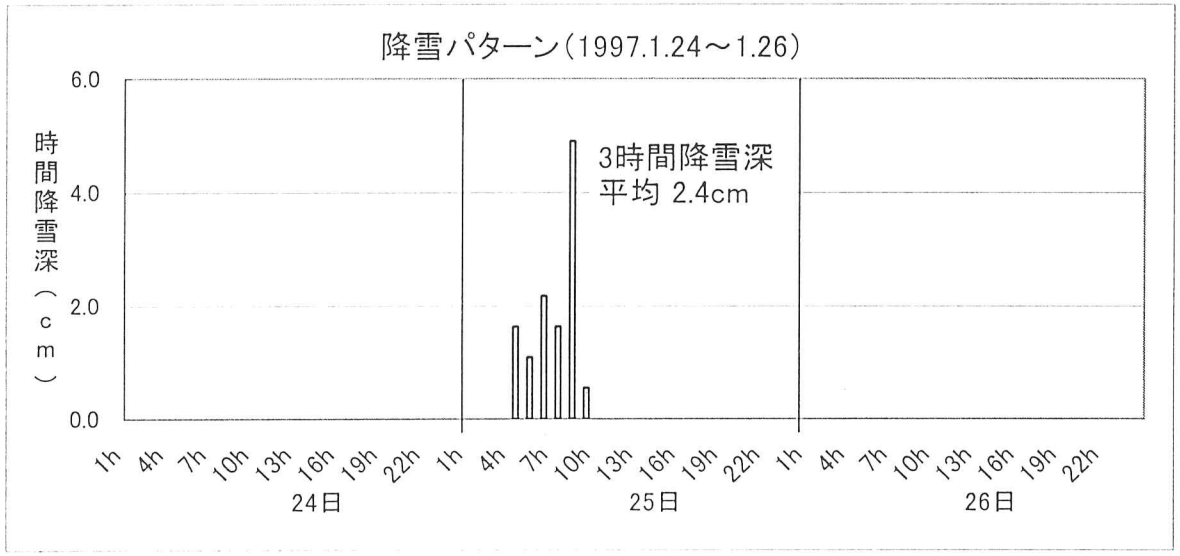
福井

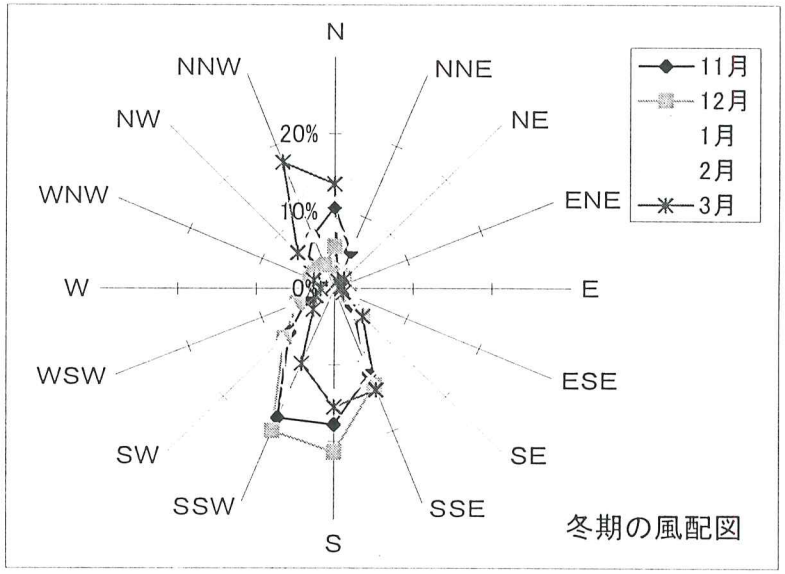
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	14.3	7.1	11.0	0	0	0.0	0.0	2.65	－
１２月	9.5	2.3	5.6	2	40	21.3	3.1	2.65	181
１月	6.5	0.7	3.4	5	45	9.0	4.9	2.82	148
２月	6.3	0.0	3.2	6	22	3.6	2.0	2.96	240
３月	12.5	2.9	7.8	0	0	0.0	0.0	3.24	－
							平均	2.9	190





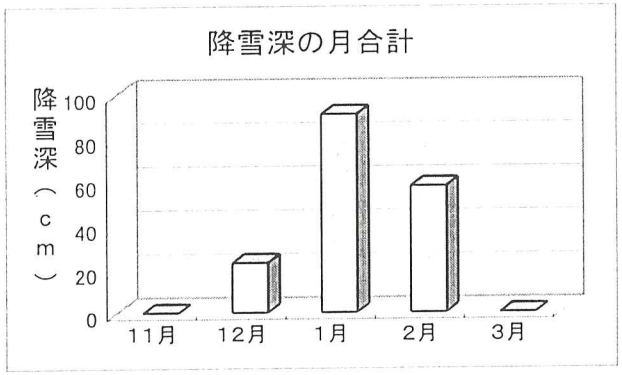


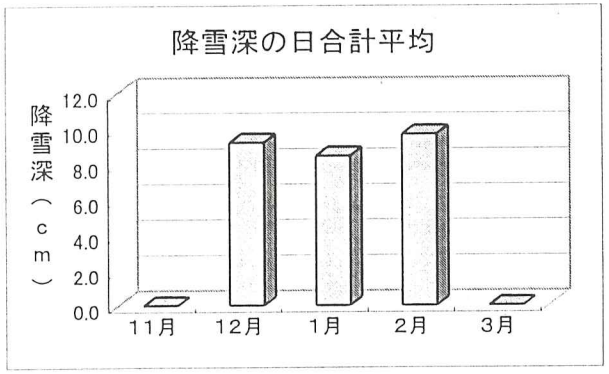


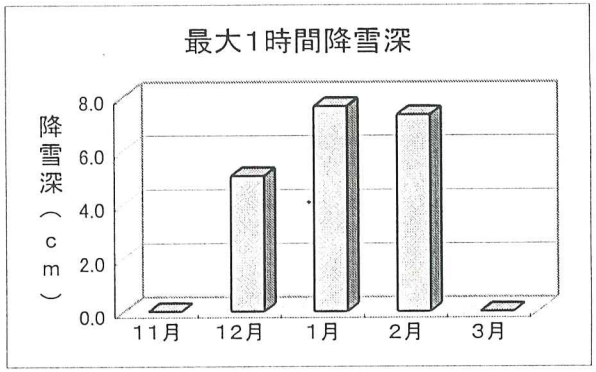


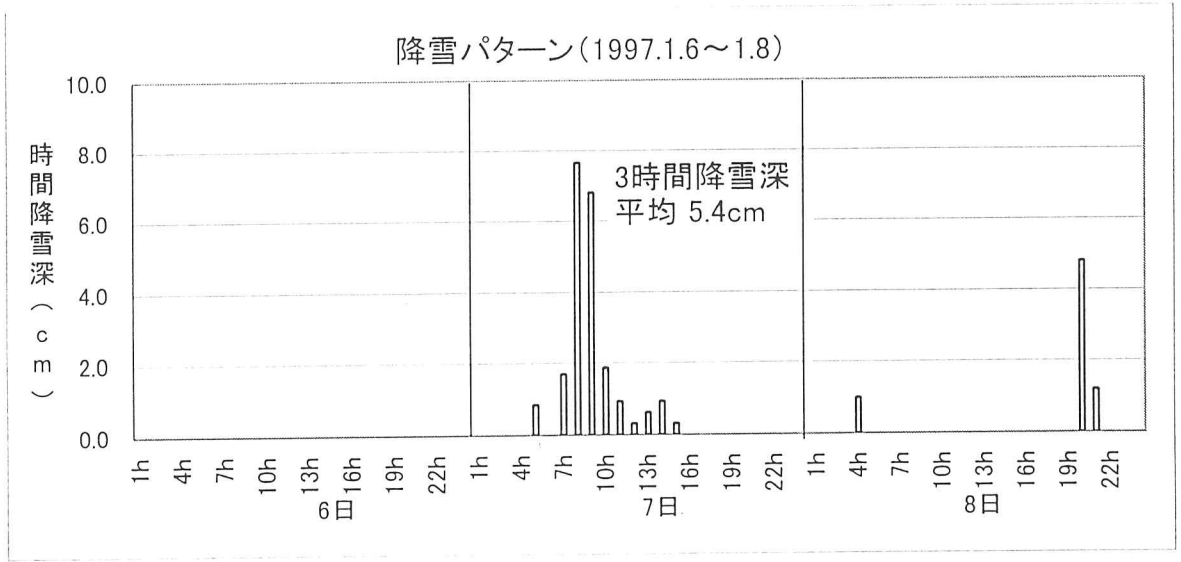
長野

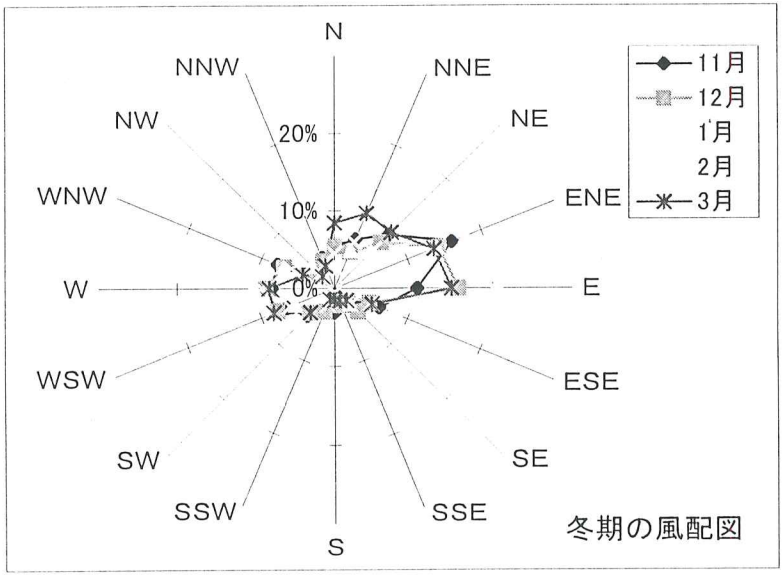
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	11.7	3.5	7.7	0	0	0.0	0.0	2.21	—
１２月	7.3	-1.4	2.6	3	23	9.2	5.1	2.02	67
１月	3.1	-4.0	-0.6	11	91	8.5	7.7	2.09	55
２月	3.8	-4.1	-0.4	6	58	9.7	7.3	2.17	39
３月	10.8	-0.6	4.8	1	0	0.0	0.0	2.96	—
							平均	2.3	54





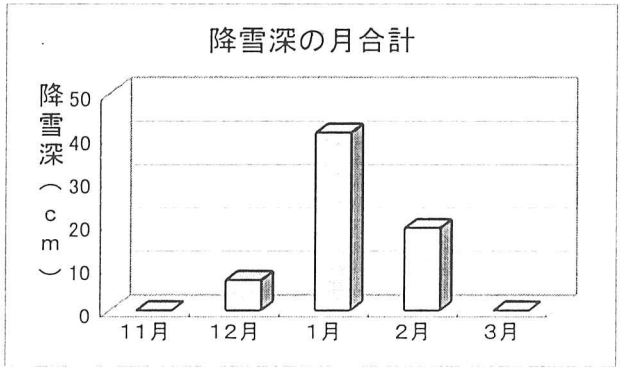


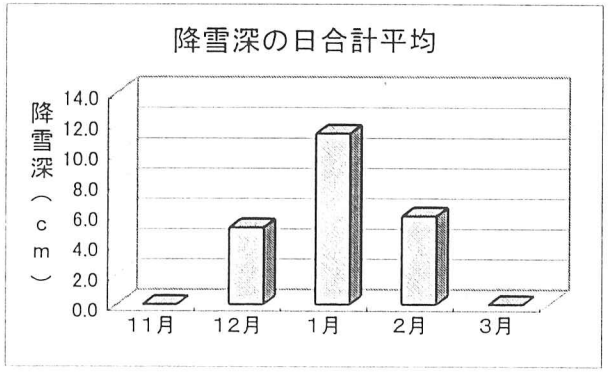


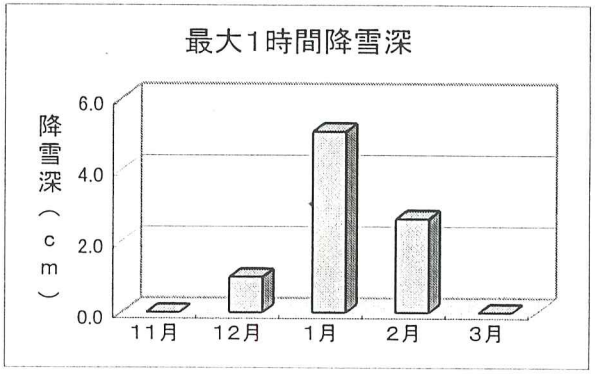


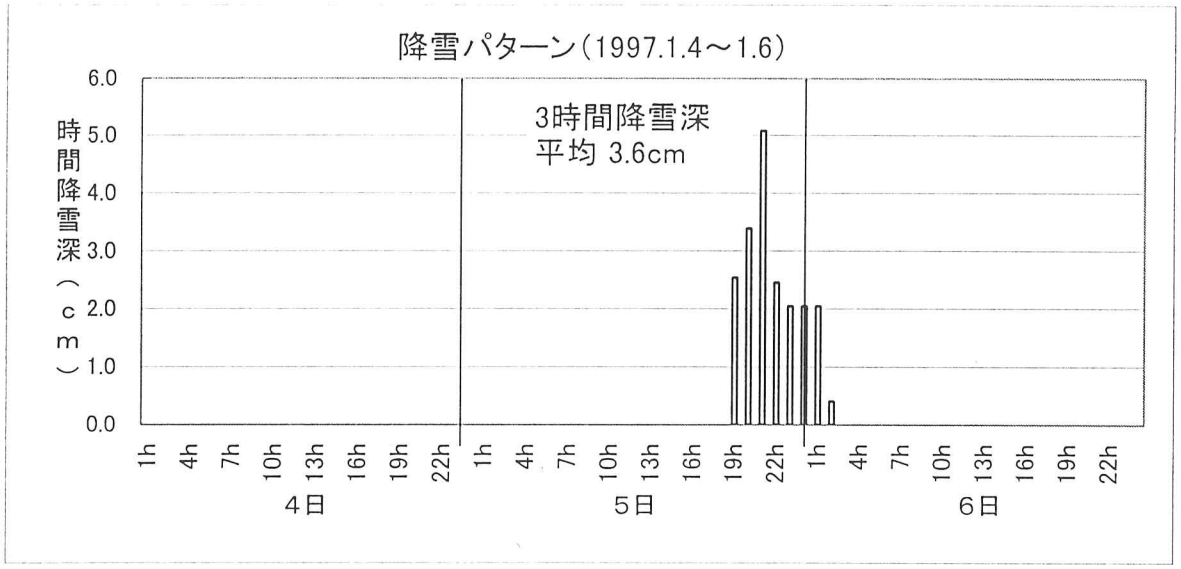
松本

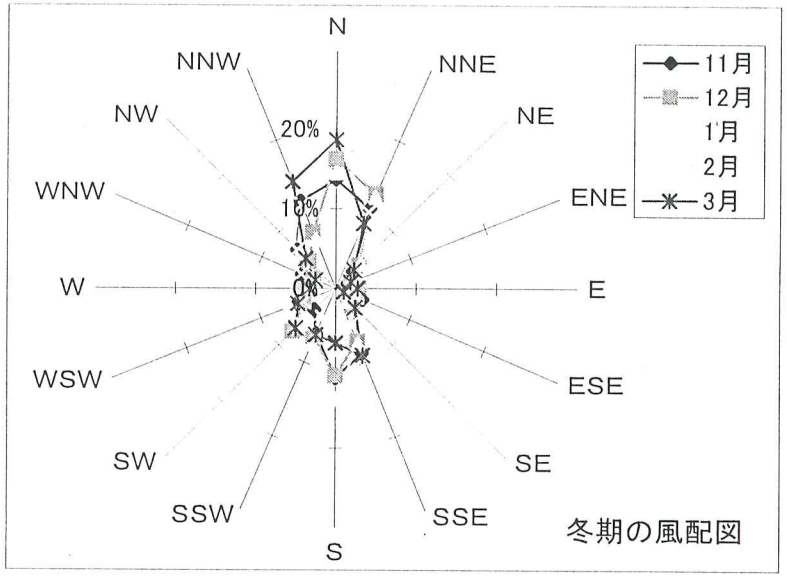
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	12.4	2.7	7.7	0	0	0.0	0.0	2.37	—
１２月	8.3	-2.7	2.3	1	7	5.1	1.0	2.17	28
１月	4.2	-5.7	-0.8	4	41	11.3	5.1	2.49	65
２月	5.6	-5.1	-0.2	3	19	5.8	2.6	2.34	78
３月	11.9	-1.2	5.1	0	0	0.0	0.0	2.75	—
							平均	2.4	57





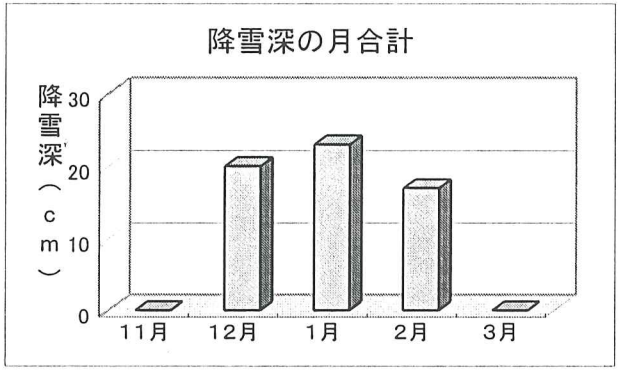


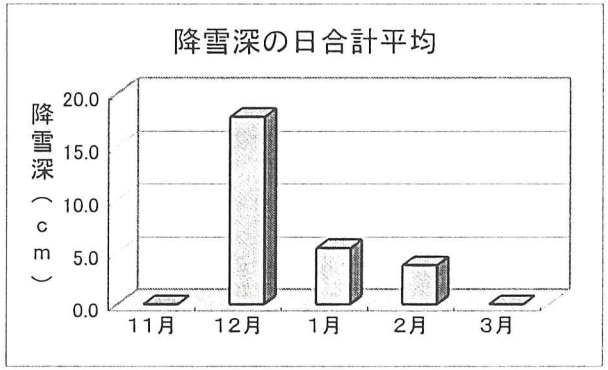


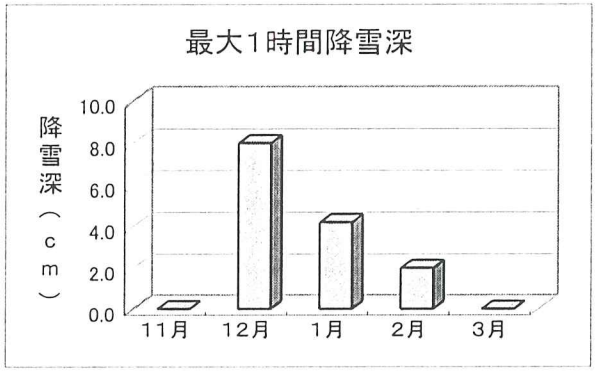


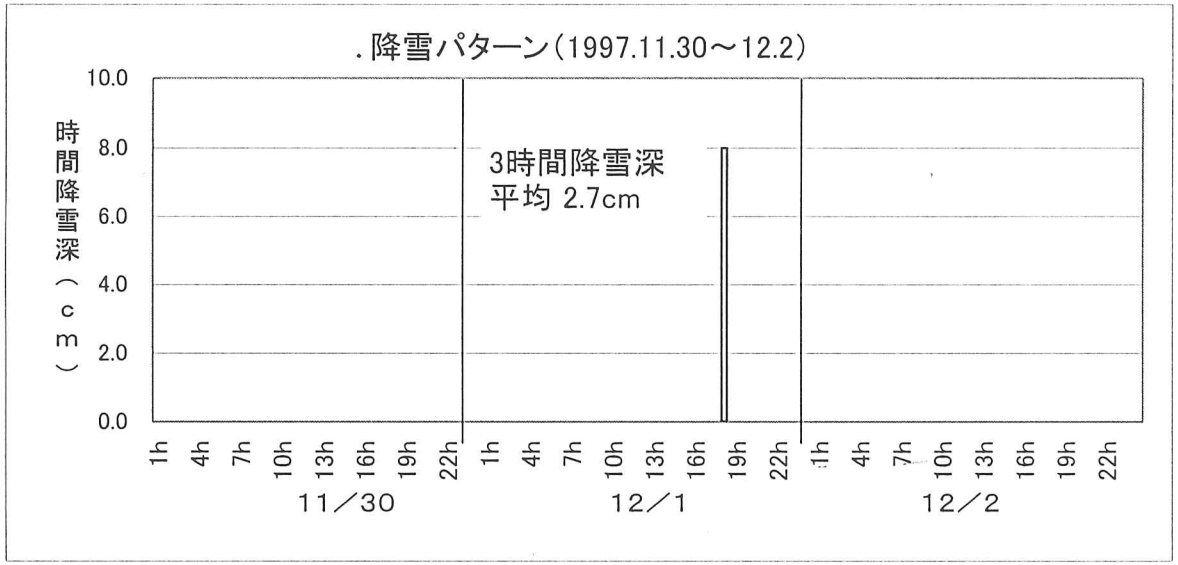
鳥取

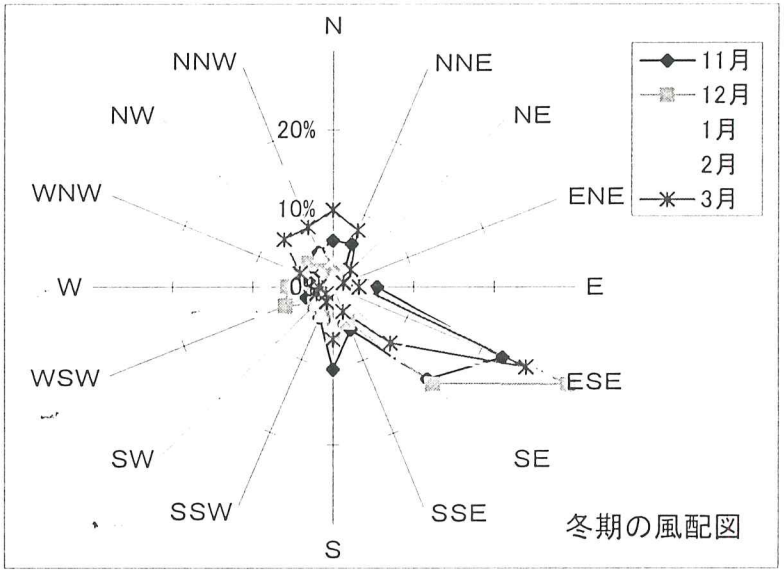
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	15.5	7.6	11.9	0	0	0.0	0.0	3.19	－
１２月	11.5	3.0	7.1	1	20	17.8	8.0	3.34	112
１月	7.8	1.3	4.3	4	23	5.4	4.2	3.67	176
２月	7.6	0.5	4.3	5	17	3.8	2.0	3.84	252
３月	13.6	2.8	8.3	0	0	0.0	0.0	3.40	－
							平均	3.5	180





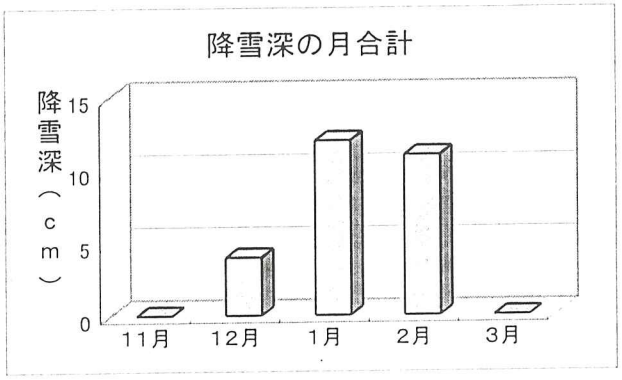


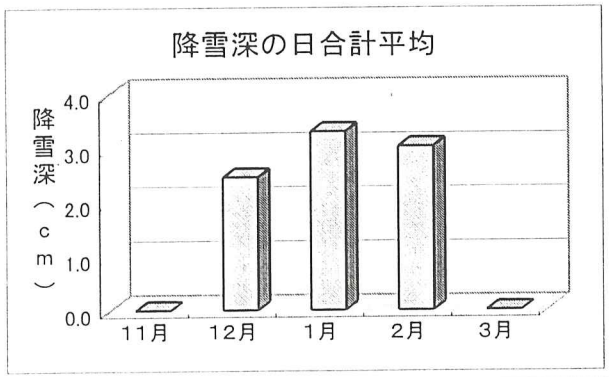


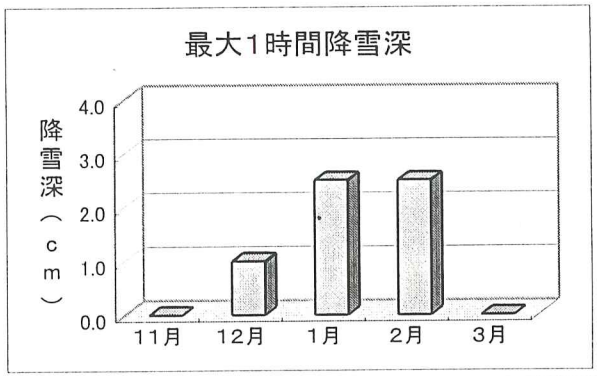


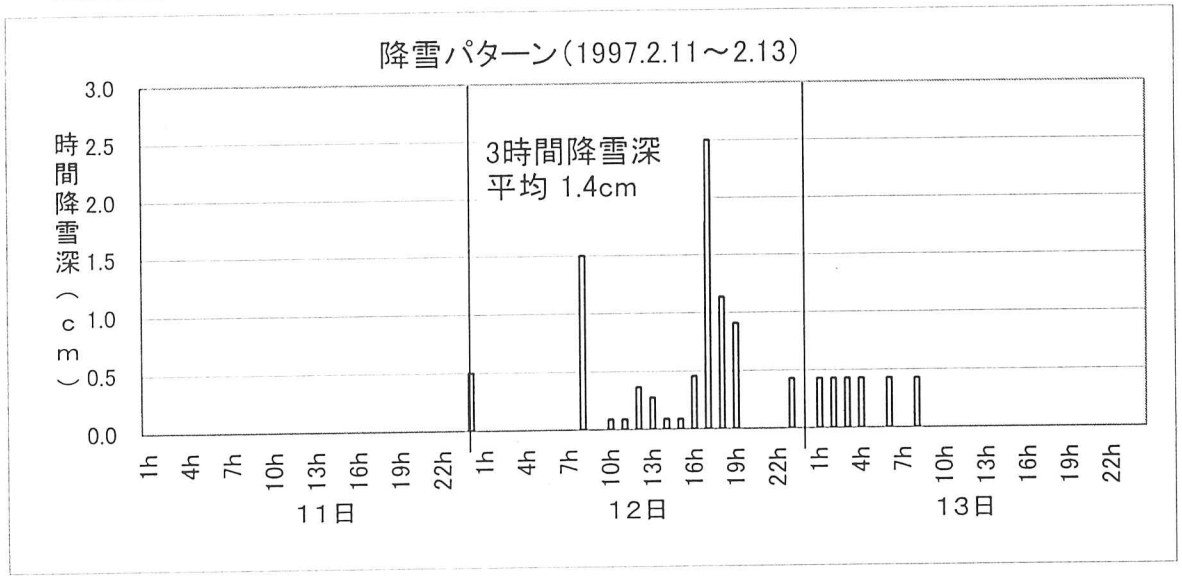
松江

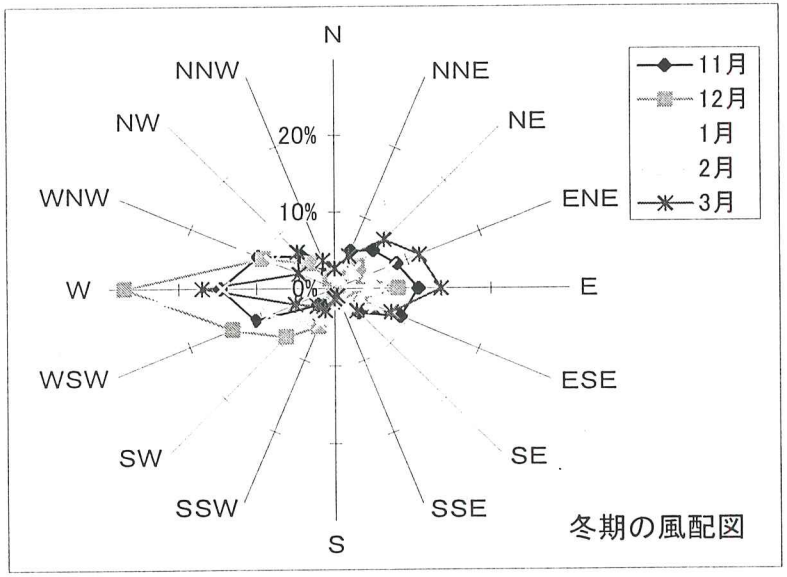
	日平均気温（℃）			降雪日数	降雪深の月合計（cm/月）	降雪深の日合計平均（cm/日）	最大１時間降雪深（cm/時）	平均風力（m/s）	雪の密度（kg/m^3）
	最高平均	最低平均	１日平均						
１１月	14.8	7.6	11.6	0	0	0.0	0.0	3.31	—
１２月	11.1	3.1	6.7	2	4	2.5	1.0	3.69	—
１月	7.7	1.0	4.2	4	12	3.3	2.5	4.55	225
２月	7.7	0.7	4.3	4	11	3.0	2.5	3.57	345
３月	13.6	3.8	8.7	0	0	0.0	0.0	3.55	—
							平均	3.7	285











付　録　3

都市別のマクロ分析のデータ

図表　未利用エネルギーの賦存状況

県	市レベル	未利用エネルギー量(KW)								
		下水処理場	廃棄物	下水道管きょ	地熱	太陽熱	河川	風力	その他　（内容）	合計
北海道	札幌市	204,796	58,663	8,224	14,680	38,277	380		2,725　変電所+地下鉄	327,745
	函館市	18,027	12,615	314	2,840	5,334	0			39,130
	小樽市	12,809	2,062	301	4,590	7,338	0		450　変電所	27,550
	旭川市	29,569	7,559	1,763	7,880	13,156	8,339			68,266
	室蘭市	9,241	3,777	239	2,310	4,604	0	1,080	627　変電所	21,878
	釧路市	19,508	0	686	3,890	6,430	2,887			33,401
	帯広市	6,990	7,916	961	2,540	4,926	6,520			29,852
	北見市	11,409	0	808	3,370	5,089	1,735			22,412
	苫小牧市	16,478	8,611	491	7,140	15,547	0		510　変電所	48,777
	江別市	10,555	4,238	513	2,930	5,235	42,421		450　変電所	66,341
青森県	青森市	19,123	12,156	555	8,870	13,932				54,636
	八戸市	8,319	11,321	446	4,570	6,599	3,712			34,966
	弘前市	9,382	11,949	0	1,620	2,606	3,188			28,745
岩手県	盛岡市	7,061	10,488	1,112	7,250	11,755	8,159			45,824
秋田県	秋田市	16,299	14,897	349	4,630	8,342			1,650　変電所	46,167
山形県	山形市	6,956	9,927	451	5,610	9,612	1,454			34,010
	鶴岡市	4,443	4,546	332	7,270	9,408	6,959			32,958
	酒田市	5,117	4,181	49	6,230	9,474	9,167	8,890		43,108
新潟県	新潟市	61,212	13,359	1,327	7,470	13,711	24,754			121,833
	長岡市	21,535	9,098	583	9,810	16,062	42,867			99,955
	上越市	1,996	7,104	51	5,760	7,994				22,905
富山県	富山市	24,024	18,427	1,132	5,380	9,436	16,159			74,558
	高岡市	10,689	6,642	390	3,250	6,696	6,691			34,359
石川県	金沢市	39,849	17,727	648	5,170	10,038	8,741		4,200　変電所	86,373
	小松市	585	3,502	100	7,380	8,806	2,521			22,894
福井県	福井市	34,036	10,121	611	6,250	10,802	17,048			78,868
長野県	長野市	13,844	12,729	633	8,680	14,208	9,785			59,880
	松本市	22,410	8,139	281	3,660	5,644	7,795			47,928
	上田市	4,552	5,087	0	2,990	4,324	3,563			20,515
鳥取県	鳥取市	10,243	6,596	303	3,680	6,294	5,115			32,232
島根県	松江市	0	5,725	34	6,330	9,231				21,321
合計		661,058	309,162	23,689	174,030	300,908	239,961	9,970	10,612	1,729,390
構成比率		38%	18%	1%	10%	17%	14%	1%	1%	100%

図表　下水処理場における未利用エネルギー賦存量の試算結果

県	地域	名称	住所	年間処理水量 (m^3/日)	日平均処理水量 (m^3/日)	利用可能ｴﾈﾙｷﾞｰ(KW)	
						下水処理場内(注1)	潜在的な都市内取得可能(注2)
北海道	札幌市	創成川	札幌市北区麻生町8	46,048,550	126,160	30556	12222.42061
北海道	札幌市	篠路拓北	札幌市北区あいの里4条10	2,302,030	6,307	1528	611
北海道	札幌市	伏古川	札幌市東区伏古8条1	18,016,120	49,359	11955	4782
北海道	札幌市	豊平川	札幌市白石区菊水元町8条3	69,241,530	189,703	45946	18378
北海道	札幌市	厚別	札幌市厚別区厚別町山本645-18	42,017,430	115,116	27881	11152
北海道	札幌市	新川	札幌市西区八軒9条西7	72,542,900	198,748	48137	19255
北海道	札幌市	手稲	札幌市手稲区手稲山口265-8	54,241,128	148,606	35992	14397
北海道	札幌市	定山渓	札幌市南区定山渓温泉東1	4,222,250	11,568	2802	1121
北海道	函館市	南部	函館市金堀町10-2	27,167,251	74,431	18027	7211
北海道	小樽市	中央	小樽市色内3-12-3	17,371,413	47,593	11527	4611
北海道	小樽市	銭函	小樽市銭函3-165	1,836,655	5,032	1219	487
北海道	小樽市	蘭島	小樽市蘭島1-3-1	95,171	261	63	25
北海道	旭川市	亀吉	旭川市亀吉1条3丁目	13,036,852	35,717	8651	3460
北海道	旭川市	西部	旭川市神居町忠和287	31,523,940	86,367	20918	8367
北海道	室蘭市	崎守	室蘭市崎守町98	1,037,810	2,843	689	275
北海道	室蘭市	蘭東	室蘭市寿町3-18-59	12,888,690	35,311	8552	3421
北海道	釧路市	古川	釧路市古川町7-4	22,261,230	60,990	14772	5909
北海道	釧路市	白樺	釧路市益浦4-8-11	2,460,190	6,740	1632	653
北海道	釧路市	大楽毛	釧路市星が浦南6-9-27	4,678,160	12,817	3104	1242
北海道	帯広市	帯広川	帯広市東11条南2	10,533,333	28,858	6990	2796
北海道	北見市	北見	北見市春光町6-8-35	17,194,320	47,108	11409	4564
北海道	苫小牧市	高砂	苫小牧市高砂町1-4-22	11,394,230	31,217	7561	3024
北海道	苫小牧市	西町	苫小牧市元町3-5-3	12,029,340	32,957	7982	3193
北海道	苫小牧市	勇払	苫小牧市字勇払166-2	1,409,806	3,862	935	374
北海道	江別市	江別	江別市工栄町1	15,906,300	43,579	10555	4222
青森県	青森市	八重田	青森市八重田1-1-1	24,590,980	67,373	16318	6527
青森県	青森市	戸山	青森市大字戸山字荒井37	1,529,230	4,190	1015	406
青森県	青森市	新田	青森市新田3-1-1	2,697,930	7,392	1790	716
青森県	八戸市	東部	八戸市江陽3-1-111	12,536,500	34,347	8319	3327
青森県	弘前市	弘前	弘前市大字津賀野字浅田269-3	14,138,950	38,737	9382	3753
岩手県	盛岡市	中川原	盛岡市東安庭2-8-3	9,172,960	25,131	6087	2435
岩手県	盛岡市	松園	盛岡市西松園1-1-1	1,467,732	4,021	974	390
秋田県	秋田市	八橋	秋田市八橋字八橋191	24,563,500	67,297	16299	6520
山形県	山形市	山形	山形市田端55	10,270,997	28,140	6815	2726
山形県	山形市	流通センター	山形市流通センター1-3-1	211,783	580	141	56
山形県	鶴岡市	鶴岡	鶴岡市宝田3-21-1	6,367,524	17,445	4225	1690
山形県	鶴岡市	湯野浜	鶴岡市大字湯野浜字浜泉488	327,764	898	217	87
山形県	酒田市	酒田	酒田市東泉町2-1-1	7,712,000	21,129	5117	2047
新潟県	新潟市	船見	新潟市船見町1-3850-2	14,844,810	40,671	9850	3940
新潟県	新潟市	中部	新潟市太右エ衛門新田1422-3	77,402,192	212,061	51361	20544
新潟県	長岡市	第一	長岡市寿3-4-3	32,454,080	88,915	21535	8614
新潟県	上越市	上越	上越市木田１－１－３	3,008,315	8,242	1996	798
富山県	富山市	浜黒崎	富山市浜黒崎18	35,546,600	97,388	23587	9435
富山県	富山市	水橋	富山市水橋辻ヶ堂101	657,699	1,802	436	175
富山県	高岡市	四屋	高岡市四屋632-1	13,771,799	37,731	9138	3655
富山県	高岡市	伏木	高岡市伏木磯町1-10	2,337,178	6,403	1551	620
石川県	金沢市	城北	金沢市浅野本町ホ131	38,827,288	106,376	25764	10306
石川県	金沢市	西部	金沢市東力町ハ272	18,922,939	51,844	12557	5023
石川県	金沢市	臨海	金沢市湊3-5-8	2,302,430	6,308	1528	611
石川県	小松市	中央	小松市鶴ヶ島町甲1	881,316	2,415	585	234
福井県	福井市	境	福井市菅谷1-1-1	13,438,210	36,817	8917	3567
福井県	福井市	日野川	福井市黒丸町3-1	37,855,360	103,713	25119	10048
長野県	長野市	東部	長野市大字大豆島字東沖4330	20,863,413	57,160	13844	5538
長野県	松本市	宮渕	松本市宮渕本村8-1	25,599,762	70,136	16987	6795
長野県	松本市	両島	松本市両島3-1	8,172,152	22,389	5423	2169
長野県	上田市	上田	上田市大字秋和字川原田29	6,860,232	18,795	4552	1821
鳥取県	鳥取市	秋里	鳥取市秋里903	14,668,926	40,189	9734	3893
鳥取県	鳥取市	末垣	鳥取市美萩野3-1	388,742	1,065	258	103
鳥取県	鳥取市	千代水	鳥取市晩稲30	378,769	1,038	251	101

注1）下水道処理上内での利用エネルギー。利用温度差を5℃と設定。
Q(未利用ｴﾈﾙｷﾞｰ熱量)＝日平均処理量(立米／日)×0.2422(KW/立米)

注2）都市内での潜在的な利用可能エネルギー量。
流入温度が12℃であり、2℃を利用可能であるとして設定した。
Q(未利用ｴﾈﾙｷﾞｰ熱量)＝日平均処理量(立米／日)×0.09688(KW/立米)

図表　廃棄物焼却場における未利用エネルギー賦存量の試算結果

県	地域	名称	住所	炉形式(t/d)		年間廃棄物処理量(t)	利用可能エネルギー量(KW)
北海道	札幌市	札幌市発寒〔＊4,900kW〕	札幌市西区発寒15条14丁目1-1	全連	600	156,651	19130
	札幌市	札幌市発寒第2	札幌市西区発寒15条14丁目1-2	全連	300	44,093	5385
	札幌市	札幌市厚別〔＊1,400kW〕	札幌市厚別区東3条1丁目1-1	全連	600	147,979	18071
	札幌市	札幌市駒岡〔＊4,900kW〕	札幌市南区真駒内602	全連	600	131,643	16076
	函館市	函館市日之出	函館市日之出町26-2	全連	240	44,997	5495
	函館市	函館市日之出清掃工場〔＊1,600kW〕	函館市日の出町26-2	全連	180	58,305	7120
	小樽市	小樽市じん芥焼却場	小樽市天神2-8-1	准連	80	16,882	2062
	旭川市	旭川市近文清掃工場	旭川市近文町13	全連	280	61,899	7559
	室蘭市	室蘭市御崎町廃棄物焼却場	室蘭市御崎町1-75-58	全連	120	30,928	3777
	帯広市	帯広市ほか十三町村複合事務組合帯広清掃	帯広市西23条北4-1	全連	240	64,820	7916
	苫小牧市	苫小牧市清掃センター〔＊750kW〕	苫小牧市字糸井402-4	全連	350	70,510	8611
	江別市	清掃センター	江別市工栄町14-3	全連	150	34,703	4238
青森県	青森市	青森市三内清掃工場	青森市大字三内字丸山240	全連	180	34,341	4194
	青森市	青森市梨の木清掃工場	青森市大字駒込字深沢1175	全連	450	65,202	7963
	八戸市	八戸地域広域市町村圏事務組合八戸清掃第一工場	八戸市大字櫛引字取場石1-1	全連	300	48,550	5929
	八戸市	八戸地域広域市町村圏事務組合八戸清掃第二工場	八戸市大字櫛引字取場石1-1	全連	300	44,152	5392
	弘前市	弘前地区環境整備事務組合弘前中央清掃工場	弘前市大字町田字筒井6-3	全連	240	58,328	7123
	弘前市	弘前地区環境整備事務組合弘前南部清掃工場	弘前市小金崎字川原田54	全連	140	39,519	4826
岩手県	盛岡市	盛岡市門清掃工場	盛岡市門字川原道7-2	全連	150	37,752	4610
	盛岡市	盛岡市三ツ割清掃工場	盛岡市三ツ割字櫃石22	全連	180	48,128	5877
秋田県	秋田市	秋田市御所野事業所	河辺郡河辺町豊成字虚空蔵大台滝	全連	200	54,304	6632
	秋田市	秋田市御所野事業所	河辺郡河辺町豊成字虚空蔵大台滝	全連	300	67,678	8265
山形県	山形市	山形市立谷川清掃工場	山形市大字漆山字中川原4019－7	全連	180	42,658	5209
	山形市	山形市半郷清掃工場	山形市蔵王半郷字八小路1738	全連	180	38,634	4718
	鶴岡市	鶴岡市ほか6町村衛生処理組合ごみ焼却場	鶴岡市宝田3丁目13-6	准連	165	37,228	4546
	酒田市	酒田地区クリーン組合ごみ焼却施設	酒田市広栄町三丁目133	准連	180	34,233	4181
新潟県	新潟市	新潟市新田清掃センター〔＊1,900kW〕	新潟市笠木字潟向3644-1	全連	360	109,391	13359
	長岡市	長岡地区衛生処理組合寿事業所	長岡市寿3-6-1	全連	180	34,142	4169
	長岡市	長岡地区衛生処理組合鳥越事業所	三島郡三島町大字鳥越甲2818	全連	150	40,355	4928
	上越市	上越地域広域行政組合第1クリーンセンター	上越市大字東中島2588	全連	140	38,944	4756
	上越市	上越地域広域行政組合第2クリーンセンター	上越市東中島	准連	98	19,226	2348
富山県	富山市	富山地区広域圏事務組合富山地区広域圏ク	中新川郡立山町末三賀103-4	全連	600	150,893	18427
	高岡市	環境クリーン工場	高岡市長慶寺640	全連	270	54,388	6642
石川県	金沢市	金沢市東部クリーンセンター〔＊3,000kW〕	金沢市鳴和町ヤ127	全連	250	55,101	6729
	金沢市	金沢市西部クリーンセンター〔＊1,300kW〕	金沢市東刀町ハ25	全連	350	90,062	10998
	小松市	環境美化センター	小松市大野町信三郎谷	准連	150	28,680	3502
福井県	福井市	福井市クリーンセンター〔＊1,600kW〕	福井市寮町50-41	全連	345	82,880	10121
長野県	長野市	長野市清掃工場〔＊1,300kW〕	長野市大豆島字大境7119-1	連	450	104,237	12729
	松本市	松本市清掃センター	松本市大字島内9833-2	全連	300	66,648	8139
	上田市	上田地域広域行政事務組合上田クリーンセンター	上田市天神3丁目11-31	全連	200	41,654	5087
鳥取県	鳥取市	神谷清掃工場	鳥取市西今在家228	全連	270	54,013	6596
島根県	松江市	松江地区広域行政組合南工場	松江市矢田町250-69	准連	150	20,490	2502
	松江市	松江地区広域行政組合北工場	八束郡鹿島町大字上講武3005-1	全連	200	26,394	3223

出所)(財)日本環境衛生センター　廃棄物処理事業施設年報
廃棄物処理年間(環境産業新聞社)

注)　ごみの焼却熱　2300Kcal/Kgと設定。
回収可能のエネルギーを焼却熱の40%と設定した。
Q(未利用ｴﾈﾙｷﾞｰ熱量)＝日平均処理量(t／日)×44.574(W/t)

図表　下水道管きょの設置状況

県	地方公共団体名	管径別延長(m)		
		600未満	600～2,000未満	2,000以上
北海道	札幌市	6,270,235	1,049,465	195,818
	函館市	881,037	142,627	7,478
	小樽市	500,727	52,062	7,172
	旭川市	1,374,213	151,960	41,972
	室蘭市	306,040	39,458	5,698
	釧路市	982,542	188,886	16,323
	帯広市	869,584	148,703	22,878
	北見市	714,472	146,247	19,247
	苫小牧市	896,692	194,459	11,696
	江別市	637,115	116,149	12,215
青森県	青森市	549,902	72,645	13,221
	八戸市	408,291	84,872	10,613
	弘前市	387,465	36,772	
岩手県	盛岡市	1,103,301	239,258	26,467
山形県	山形市	648,101	95,731	10,737
	鶴岡市	264,926	25,119	7,909
	酒田市	116,875	27,771	1,175
長野県	長野市	809,522	100,786	15,063
	松本市	904,142	53,313	6,686
	上田市	239,843	16,848	
秋田県	秋田市	764,585	76,005	8,315
新潟県	新潟市	794,024	221,077	31,603
	上越市	147,979	19,511	1,214
	長岡市	873,653	152,743	13,882
富山県	富山市	1,158,722	73,857	26,950
	高岡市	591,964	80,142	9,296
福井県	福井市	743,015	81,336	14,540
石川県	金沢市	1,519,241	89,045	15,423
	小松市	133,567	17,973	2,388
鳥取県	鳥取市	380,610	66,520	7,226
島根県	松江市	305,979	25,125	810

図表　下水道管きょにおける未利用エネルギー賦存量の試算結果

県	市	径2m以上の管路の延長距離（m）	未利用エネルギーの取得地点数（箇所）	取得可能な未利用エネルギー量（KW）
北海道	札幌市	195,818	3,916	39,164
	函館市	7,478	150	1,496
	小樽市	7,172	143	1,434
	旭川市	41,972	839	8,394
	室蘭市	5,698	114	1,140
	釧路市	16,323	326	3,265
	帯広市	22,878	458	4,576
	北見市	19,247	385	3,849
	苫小牧市	11,696	234	2,339
	江別市	12,215	244	2,443
青森県	青森市	13,221	264	2,644
	八戸市	10,613	212	2,123
	弘前市	0	0	0
岩手県	盛岡市	26,467	529	5,293
秋田県	秋田市	8,315	166	1,663
山形県	山形市	10,737	215	2,147
	鶴岡市	7,909	158	1,582
	酒田市	1,175	24	235
新潟県	新潟市	31,603	632	6,321
	長岡市	13,882	278	2,776
	上越市	1,214	24	243
富山県	富山市	26,950	539	5,390
	高岡市	9,296	186	1,859
石川県	金沢市	15,423	308	3,085
	小松市	2,388	48	478
福井県	福井市	14,540	291	2,908
長野県	長野市	15,063	301	3,013
	松本市	6,686	134	1,337
	上田市	0	0	0
鳥取県	鳥取市	7,226	145	1,445
島根県	松江市	810	16	162

注1）Φ＝2m以上の管きょのマンフォールを対象
注2）マンホール1箇所あたり10KWのエネルギー取得が可能であるとして試算
注3）マンホール数は、50m間隔として推計

図表　地熱エネルギーの賦存量の試算結果

県	市レベル	道路距離(km)		合計	BHES設置数		地熱エネルギー賦存量(KW)	
		DID	非DID		1%(ケース1)	10%(ケース2)	(ケース1)	(ケース2)
北海道	札幌市	91.4	55.4	146.8	294	2936	1468	14680
	函館市	17.7	10.7	28.4	57	568	284	2840
	小樽市	19.2	26.7	45.9	92	918	459	4590
	旭川市	31.4	47.4	78.8	158	1576	788	7880
	室蘭市	16.6	6.5	23.1	46	462	231	2310
	釧路市	11.3	27.6	38.9	78	778	389	3890
	帯広市	14.3	11.1	25.4	51	508	254	2540
	北見市	6.6	27.1	33.7	67	674	337	3370
	苫小牧市	12.6	58.8	71.4	143	1428	714	7140
	江別市	10.2	19.1	29.3	59	586	293	2930
青森県	青森市	14.8	73.9	88.7	177	1774	887	8870
	八戸市	15.6	30.1	45.7	91	914	457	4570
	弘前市	3.1	13.1	16.2	32	324	162	1620
岩手県	盛岡市	26.5	46	72.5	145	1450	725	7250
秋田県	秋田市	18.7	27.6	46.3	93	926	463	4630
山形県	山形市	22.5	33.6	56.1	112	1122	561	5610
	鶴岡市	10.1	62.6	72.7	145	1454	727	7270
	酒田市	8.9	53.4	62.3	125	1246	623	6230
新潟県	新潟市	45.6	29.1	74.7	149	1494	747	7470
	長岡市	15.2	82.9	98.1	196	1962	981	9810
	上越市	5	52.6	57.6	115	1152	576	5760
富山県	富山市	14.9	38.9	53.8	108	1076	538	5380
	高岡市	12.7	19.8	32.5	65	650	325	3250
石川県	金沢市	14.2	37.5	51.7	103	1034	517	5170
	小松市	2.3	71.5	73.8	148	1476	738	7380
福井県	福井市	6.3	56.2	62.5	125	1250	625	6250
長野県	長野市	20.8	66	86.8	174	1736	868	8680
	松本市	17.4	19.2	36.6	73	732	366	3660
	上田市	13.7	16.2	29.9	60	598	299	2990
鳥取県	鳥取市	10.5	26.3	36.8	74	736	368	3680
島根県	松江市	26.1	37.2	63.3	127	1266	633	6330

注1)ケース1　1%の道路に沿ってBHES(地熱エネルギー回収用孔)を5m間隔で設置
　ケース2　　同上　　10%　　同上
注2)1つのBHESより5KW/本のエネルギーが回収できるとして試算した。

図表　風力エネルギーの賦存量の試算結果

県	市レベル	道路の状況			冬期の風力(m/s)	風力エネルギー賦存量試算		
		長さ(km)	長さ内訳(km)			風力導入有効性(注1)	風車設置可能数(注2)	ｴﾈﾙｷﾞｰ量(KW)
			DID	非DID				
北海道	札幌市	146.8	91.4	55.4	2.6	×		
	函館市	28.4	17.7	10.7	4.0	×		
	小樽市	45.9	19.2	26.7	3.1	×		
	旭川市	78.8	31.4	47.4	1.9	×		
	室蘭市	23.1	16.6	6.5	5.6	○	13	1080
	釧路市	38.9	11.3	27.6	3.9	×		
	帯広市	25.4	14.3	11.1	2.6	×		
	北見市	33.7	6.6	27.1	2.9	×		
	苫小牧市	71.4	12.6	58.8	3.1	×		
	江別市	29.3	10.2	19.1	3.5	×		
青森県	青森市	88.7	14.8	73.9	4.3	×		
	八戸市	45.7	15.6	30.1	4.9	×		
	弘前市	16.2	3.1	13.1	NA	×		
岩手県	盛岡市	72.5	26.5	46	3.1	×		
秋田県	秋田市	46.3	18.7	27.6	4.9	×		
山形県	山形市	56.1	22.5	33.6	1.8	×		
	鶴岡市	72.7	10.1	62.6	NA	×		
	酒田市	62.3	8.9	53.4	5.0	○	107	8890
新潟県	新潟市	74.7	45.6	29.1	4.2	×		
	長岡市	98.1	15.2	82.9	NA	×		
	上越市	57.6	5	52.6	2.4	×		
富山県	富山市	53.8	14.9	38.9	3.1	×		
	高岡市	32.5	12.7	19.8	NA	×		
石川県	金沢市	51.7	14.2	37.5	4.8	×		
	小松市	73.8	2.3	71.5	NA	×		
福井県	福井市	62.5	6.3	56.2	2.9	×		
長野県	長野市	86.8	20.8	66	2.3	×		
	松本市	36.6	17.4	19.2	2.4	×		
	上田市	29.9	13.7	16.2	NA	×		
鳥取県	鳥取市	36.8	10.5	26.3	3.5	×		
島根県	松江市	63.3	26.1	37.2	3.7	×		

注1）平均風速が5m以上の地区のみを導入対象とした。

注2）風車（定価出力250KW、プロペラ長　30m）を、非DID地区の道路に1台/500m間隔で設置した場合を想定

図表　地下変電所における未利用エネルギー賦存量の試算結果

県	地域	名称	住所	出力（KVA）	利用可能ｴﾈﾙｷﾞｰ(KW)
北海道	札幌市	南九条変電所	札幌市中央区南九条西８丁目	490000	735
北海道	室蘭市	室蘭変電所	室蘭市高砂町５－２－１	418000	627
北海道	苫小牧市	苫小牧変電所	苫小牧市豊川町１－２－８	340000	510
北海道	江別市	北江別変電所	江別市対雁１－２	300000	450
北海道	小樽市	西小樽変電所	小樽市塩谷３丁目	300000	450
石川県	金沢市	加賀変電所	金沢市上辰巳町８－５８	2800000	4200
秋田県	秋田市	秋田変電所	秋田市下新城大字青先字群沢１７３	1100000	1650

注）設備容量の０．１５％が損失になるとして試算。
Q（KW）＝電力容量（KVA）×0.0015

図表　太陽エネルギーの日積算量の実績

県名	地域名	地点名	地点別の全天日射量の日積算量の月別平均値(MJ/㎡・日)												
			1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	最大月
北海道	札幌市	札幌	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	函館市	函館	6.5	9.3	12.5	15.1	17.3	17.0	15.7	14.4	12.0	9.8	6.2	5.0	17.3
	小樽市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	旭川市	旭川	5.5	8.7	12.7	14.8	17.2	18.3	17.7	15.2	12.3	8.4	5.0	4.3	18.3
	室蘭市	(函館)	6.5	9.3	12.5	15.1	17.3	17.0	15.7	14.4	12.0	9.8	6.2	5.0	17.3
	釧路市	(根室)	7.2	10.7	14.3	15.8	17.7	17.3	16.4	14.9	12.8	10.3	7.0	5.7	17.7
	帯広市	帯広	7.6	11.2	14.9	16.7	18.3	16.7	15.1	14.0	12.3	10.5	7.2	6.1	18.3
	北見市	(北見枝幸)	4.5	8.8	12.6	16.6	14.2	15.4	12.5	14.7	11.9	8.4	5.2	3.8	16.6
	苫小牧市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
	江別市	(札幌)	5.9	8.7	12.3	15.0	17.6	18.5	17.2	15.3	12.7	9.4	5.8	4.8	18.5
青森県	青森市	青森	5.4	8.0	12.1	15.3	17.9	18.4	17.4	16.5	13.1	9.9	5.8	4.3	18.4
	八戸市	八戸	7.7	10.2	12.6	15.9	15.5	16.4	16.1	16.6	13.4	10.8	7.1	6.5	16.6
	弘前市	(青森)	5.4	8.0	12.1	15.3	17.9	18.4	17.4	16.5	13.1	9.9	5.8	4.3	18.4
岩手県	盛岡市	盛岡	7.1	9.8	12.9	15.1	17.4	16.3	15.4	15.0	11.6	9.7	6.7	5.5	17.4
秋田県	秋田市	秋田	4.7	7.4	11.7	15.2	17.1	17.6	16.7	17.1	13.1	10.0	5.8	3.9	17.6
山形県	山形市	山形	7.0	11.0	13.0	15.8	18.7	15.4	16.1	17.6	13.5	10.7	6.3	6.3	18.7
	鶴岡市	(山形)	7.0	11.0	13.0	15.8	18.7	15.4	16.1	17.6	13.5	10.7	6.3	6.3	18.7
	酒田市	酒田	4.7	8.3	10.6	16.1	17.1	15	16.3	19.7	14.4	11.4	5.1	4.3	19.7
新潟県	新潟市	新潟	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
	長岡市	(新潟)	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
	上越市	(新潟)	5.1	7.4	11.0	15.2	17.6	16.8	16.9	16.9	12.3	9.6	5.9	4.4	17.6
富山県	富山市	富山	6.2	9.1	11.7	17.5	19.0	16.0	18.4	18.8	13.2	11.9	5.5	5.6	19.0
	高岡市	(富山)	6.2	9.1	11.7	17.5	19.0	16.0	18.4	18.8	13.2	11.9	5.5	5.6	19.0
石川県	金沢市	(輪島)	4.3	6.5	11.3	16.2	18.7	17.2	17.1	17.6	12.8	10.4	6.2	4.1	18.7
	小松市	(輪島)	4.3	6.5	11.3	16.2	18.7	17.2	17.1	17.6	12.8	10.4	6.2	4.1	18.7
福井県	福井市	福井	5.9	8.1	11.5	15.3	17.9	16.2	16.5	17.2	12.9	10.5	7.2	5.3	17.9
長野県	長野市	(松本)	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
	松本市	松本	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
	上田市	(松本)	9.5	11.7	14.5	17.6	19.5	17.6	17.8	17.9	13.4	11.6	9.2	8.4	19.5
鳥取県	鳥取市	(米子)	6.4	8.3	11.2	17.9	19.7	15	19.2	18.9	15.5	11.9	6.9	6.8	19.7
島根県	松江市	(米子)	6.4	8.3	11.2	17.9	19.7	15	19.2	18.9	15.5	11.9	6.9	6.8	19.7

出所)理科年表
地点名の(　)内は一致する都市がなかったため近い町のデータで代用

図表　太陽エネルギーの賦存量の試算結果

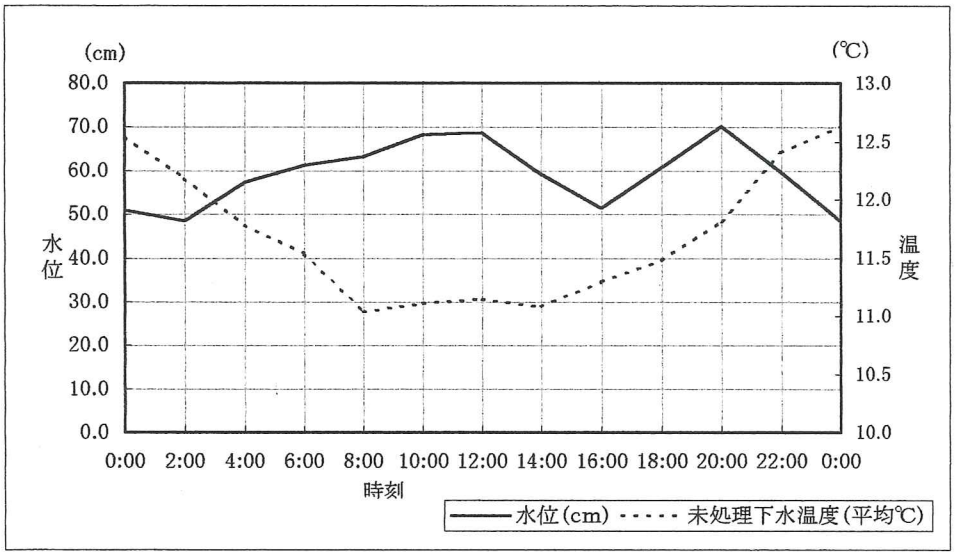
県	市レベル	道路の状況			日射エネルギー量データ		太陽エネルギーの取得可能量試算結果（KW）					
		道路面積（㎡）		長さ（km）	夏季蓄積可能量（MJ/㎡）	冬季平均日射量（MJ/㎡/日）	車道部を集熱板とした場合		太陽電池を設置した場合		太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ合計	
		車道部	歩道部				車道の1％	車道の100％	車道の1％	車道の100％	車道の1％	車道の100％
北海道	札幌市	2,786,860	410,090	146.8	555	7.50	357	35729	25	2548	383	38277
	函館市	401,580	85,940	28.4	519	7.90	48	4815	5	519	53	5334
	小樽市	510,230	82,900	45.9	555	7.50	65	6541	8	797	73	7338
	旭川市	933,310	144,090	78.8	549	7.24	118	11836	13	1320	132	13156
	室蘭市	348,760	28,520	23.1	519	7.90	42	4181	4	422	46	4604
	釧路市	458,350	61,900	38.9	531	8.98	56	5622	8	808	64	6430
	帯広市	344,880	68,370	25.4	549	9.40	44	4374	6	552	49	4926
	北見市	395,080	57,400	33.7	498	6.98	45	4545	5	544	51	5089
	苫小牧市	1,116,010	149,120	71.4	555	7.50	143	14308	12	1239	155	15547
	江別市	368,650	38,600	29.3	555	7.50	47	4726	5	509	52	5235
青森県	青森市	977,970	115,820	88.7	552	7.12	125	12470	15	1461	139	13932
	八戸市	492,520	58,600	45.7	498	8.82	57	5666	9	933	66	6599
	弘前市	183,410	22,340	16.2	552	7.12	23	2339	3	267	26	2606
岩手県	盛岡市	857,950	107,760	72.5	522	8.40	103	10345	14	1409	118	11755
秋田県	秋田市	625,100	87,620	46.3	528	6.70	76	7624	7	718	83	8342
山形県	山形市	654,360	97,960	56.1	561	8.72	85	8480	11	1132	96	9612
	鶴岡市	612,750	67,510	72.7	561	8.72	79	7941	15	1467	94	9408
	酒田市	624,300	85,560	62.3	591	6.60	85	8523	10	951	95	9474
新潟県	新潟市	1,028,310	78,570	74.7	528	6.76	125	12542	12	1169	137	13711
	長岡市	1,191,080	139,530	98.1	528	6.76	145	14527	15	1535	161	16062
	上越市	581,580	30,090	57.6	528	6.76	71	7093	9	901	80	7994
富山県	富山市	644,580	71,600	53.8	570	7.62	85	8487	9	949	94	9436
	高岡市	465,050	67,200	32.5	570	7.62	61	6123	6	573	67	6696
石川県	金沢市	714,770	64,530	51.7	561	6.48	93	9263	8	775	100	10038
	小松市	594,150	48,450	73.8	561	6.48	77	7700	11	1107	88	8806
福井県	福井市	782,160	74,560	62.5	537	7.60	97	9702	11	1099	108	10802
長野県	長野市	892,960	144,920	86.8	585	10.66	121	12067	21	2141	142	14208
	松本市	350,840	46,760	36.6	585	10.66	47	4741	9	903	56	5644
	上田市	265,380	44,130	29.9	585	10.66	36	3586	7	738	43	4324
鳥取県	鳥取市	411,610	72,830	36.8	591	7.92	56	5619	7	674	63	6294
島根県	松江市	591,220	92,400	63.3	591	7.92	81	8071	12	1160	92	9231

車道部を集熱板とした場合）　取得可能エネルギー量＝夏季蓄熱可能量×面積×蓄熱効率（30%）÷（150日×２４時間×3600秒）
太陽電池を設置した場合）　取得可能エネルギー量＝冬季平均日射量　×　距離　×　太陽電池高さ（２m）×効率（１０%）÷（24時間×3600秒）

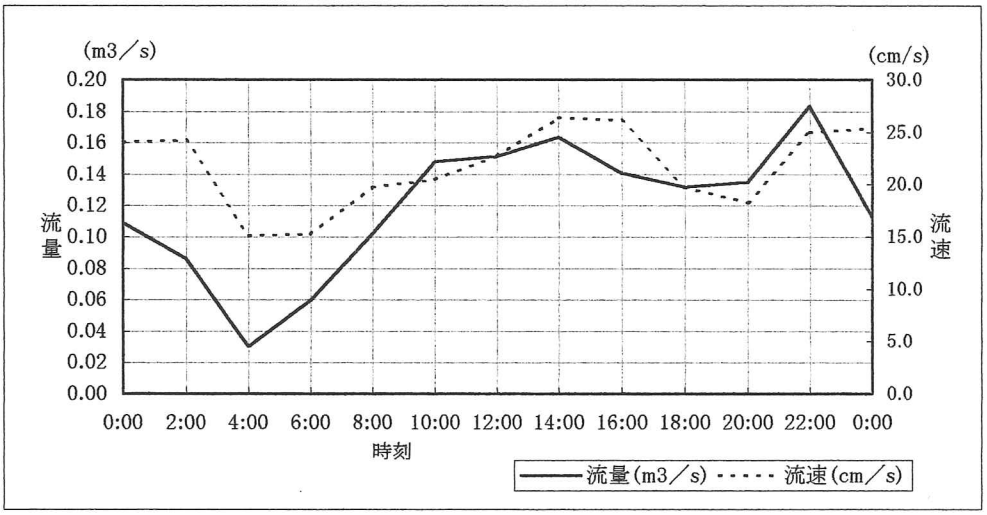
図表　主要河川の流量の月別平均月量（立米/秒）と取得可能エネルギー量

市	川	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均	冬季（5ヶ月平均）	河川からの取得可能ｴﾈﾙｷﾞｰ（KW）
札幌市	豊平川	1.37	1.82	2.32	21.31	49.07	8.64	3.21	16.71	2.85	2.63	8.11	3.72	10.15	3.468	380
旭川市	石狩川	57.10	53.69	71.68	238.30	328.78	154.73	85.07	164.94	65.75	109.46	108.80	88.89	127.27	76.032	8339
江別市	石狩川	351.27	295.43	365.39	891.32	973.15	381.78	395.26	778.05	353.47	481.84	474.85	446.99	515.73	386.786	42421
帯広市	十勝川	41.65	38.78	47.32	77.02	161.70	112.89	65.00	165.96	104.90	109.96	86.00	83.49	91.22	59.448	6520
北見市	常呂川	7.87	8.57	16.24	31.03	23.00	15.79	9.78	29.51	15.69	18.38	24.72	21.68	18.52	15.816	1735
弘前市	岩木川	12.14	12.11	37.27	69.34	44.69	7.89	11.23	19.50	13.18	29.50	40.81	43.03	28.39	29.072	3188
山形市	須川	9.22	13.39	19.50	19.85	16.20	31.32	25.79	10.41	17.14	7.23	10.66	13.52	16.19	13.258	1454
酒田市	赤川	59.63	44.68	86.74	161.77	171.69	114.32	135.17	30.36	41.56	81.12	115.91	110.95	96.16	83.582	9167
盛岡市	北上川	39.11	36.41	88.01	106.69	122.88	103.41	83.32	60.41	112.31	50.56	97.40	111.05	84.30	74.396	8159
長野市	信濃川（犀川）	67.12	69.45	85.39	136.28	180.91	105.72	284.32	106.05	113.33	74.50	99.99	124.16	120.60	89.222	9785
高岡市	小矢部川	63.52	60.63	55.21	63.89	58.44	53.95	101.36	47.29	56.05	36.94	60.65	65.05	60.25	61.012	6691
小松市	梯川	25.00	16.85	24.32	22.83	17.30	6.05	33.44	14.04	8.00	4.38	21.41	27.33	18.41	22.982	2521
福井市	九頭龍川	110.88	89.65	114.60	139.55	116.73	54.02	181.48	105.45	74.60	31.25	65.23	120.87	100.36	100.246	10994
福井市	日野川	60.66	56.63	57.58	39.86	49.64	17.54	44.17	29.15	17.39	13.95	42.54	58.58	40.64	55.198	6054
鳥取市	千代川	33.80	38.92	68.68	49.88	50.03	43.06	180.87	74.71	89.41	29.72	36.03	55.78	62.57	46.642	5115
富山市	神通川	113.78	99.82	194.45	333.88	239.07	123.04	404.27	153.00	155.90	84.73	143.66	184.98	185.88	147.338	16159
釧路市	釧路川	19.15	19.86	27.85	31.48	29.38	30.46	22.51	29.35	28.48	30.81	32.01	32.73	27.84	26.32	2887
八戸市	馬渕川	17.82	17.50	42.65	69.04	43.17	50.74	31.81	24.22	46.75	32.64	34.34	56.93	38.97	33.848	3712
鶴岡市	赤川	50.07	41.01	77.14	129.62	124.27	60.45	84.65	4.59	20.84	43.62	76.26	72.77	65.44	63.45	6959
新潟市	信濃川	220.03	179.22	232.17	223.91	210.35	190.20	232.37	168.11	169.33	228.12	246.94	250.17	212.58	225.706	24754
長岡市	新信濃川	312.64	275.84	551.01	879.86	691.42	376.28	624.59	299.30	334.56	256.38	344.35	470.42	451.39	390.852	42867
上田市	千曲川	29.75	27.47	35.49	67.06	38.59	41.08	47.72	25.47	48.16	29.13	32.78	36.93	38.30	32.484	3563
金沢市	手取川	58.31	49.85	107.85	151.36	129.09	60.48	190.07	66.69	33.74	25.41	69.35	113.14	87.95	79.7	8741
松本市	犀川	55.20	49.75	60.75	122.93	167.84	94.79	235.17	90.01	86.13	59.68	77.47	112.19	100.99	71.072	7795

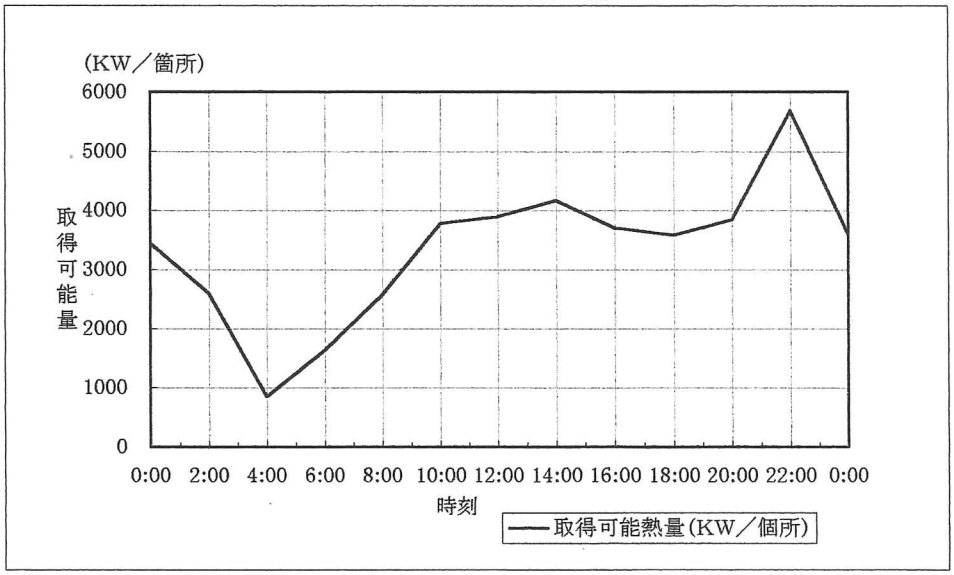
注1）調査対象都市を流れる一級河川を対象としている。
注2）データ出所は、建設省河川局編　流量年表　平成9年版
注3）利用原単位は、Δt＝3℃として、河川流量の1%からエネルギーを回収するとして試算



図表　下水流速ならびに流量

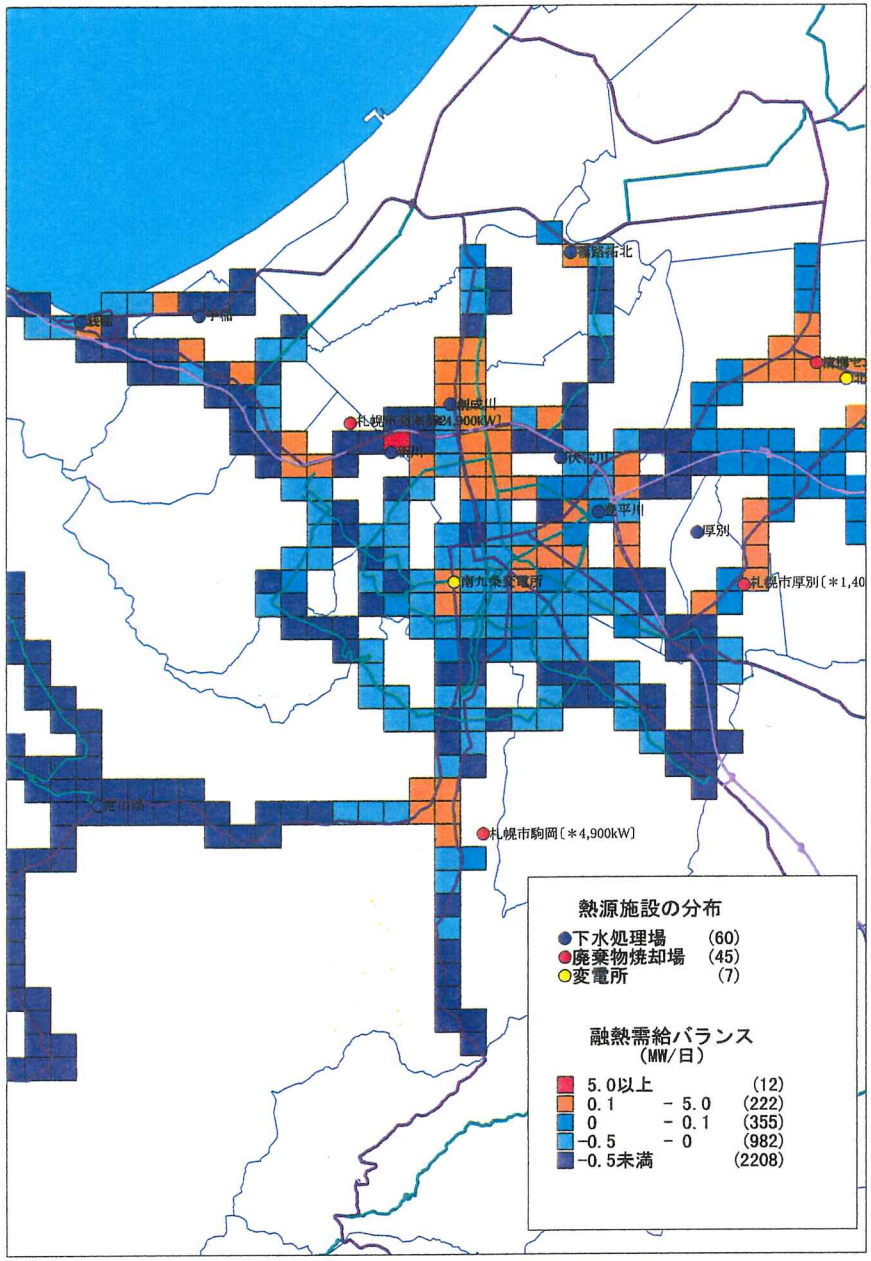


図表　マンホール1箇所から取得可能な熱量

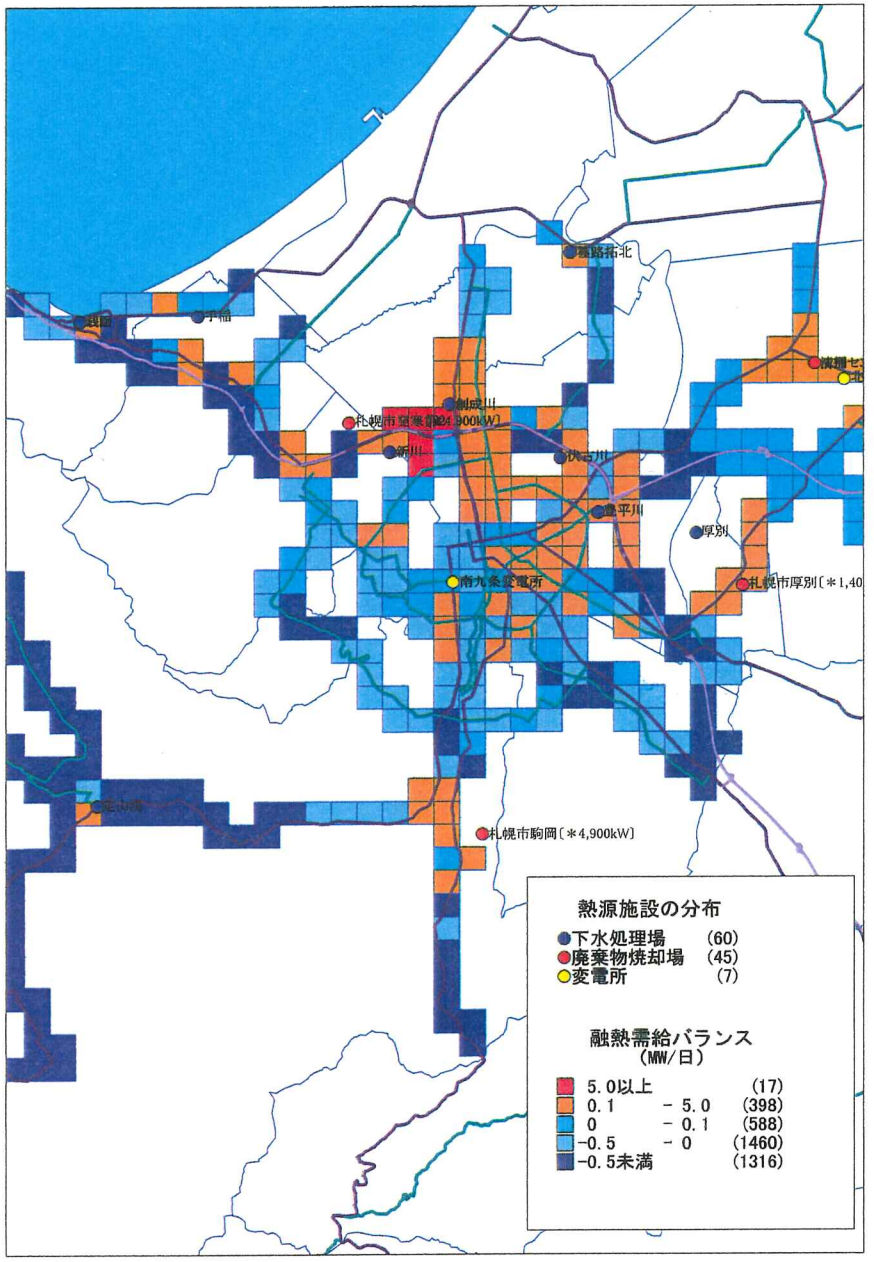


付　録　4

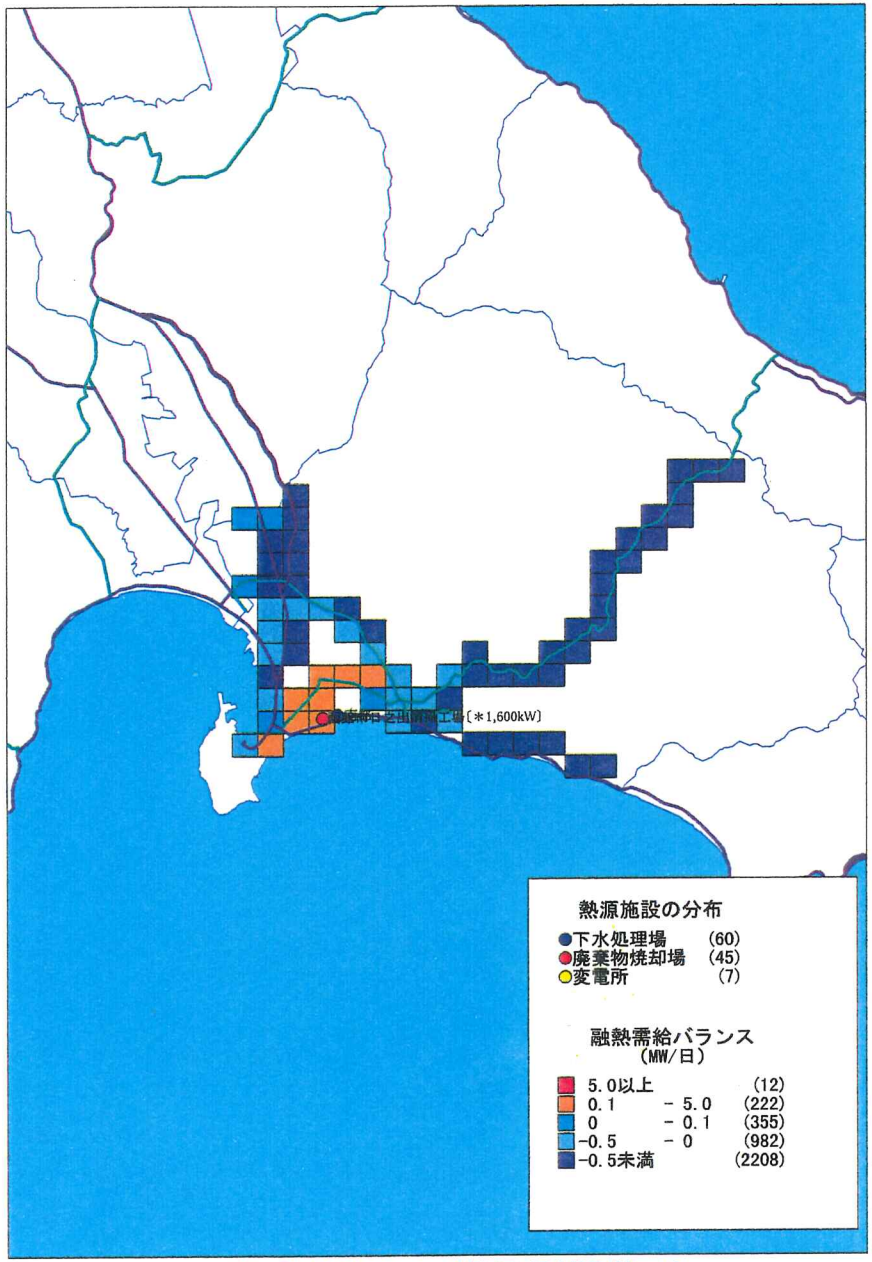
都市別のメッシュ分析データ



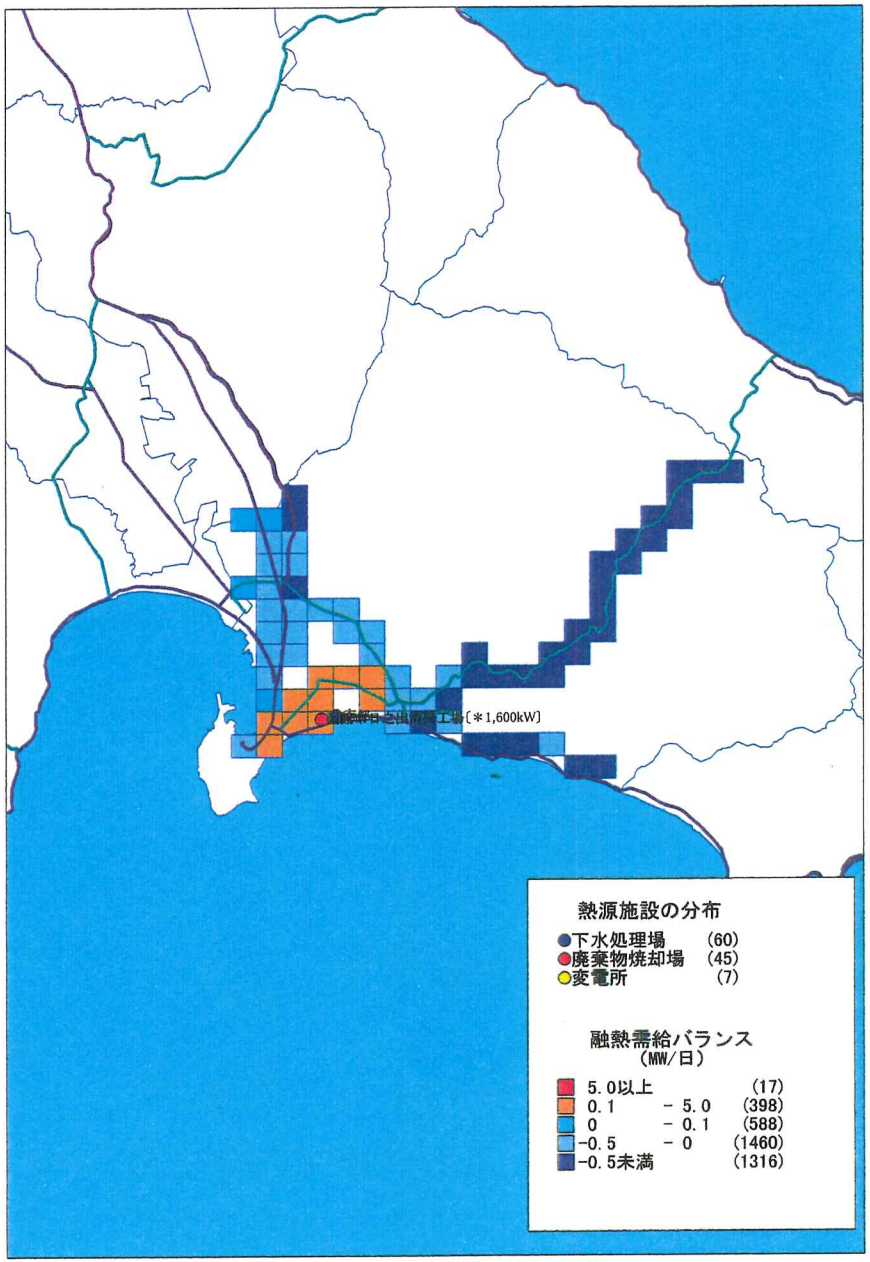
図表　札幌におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



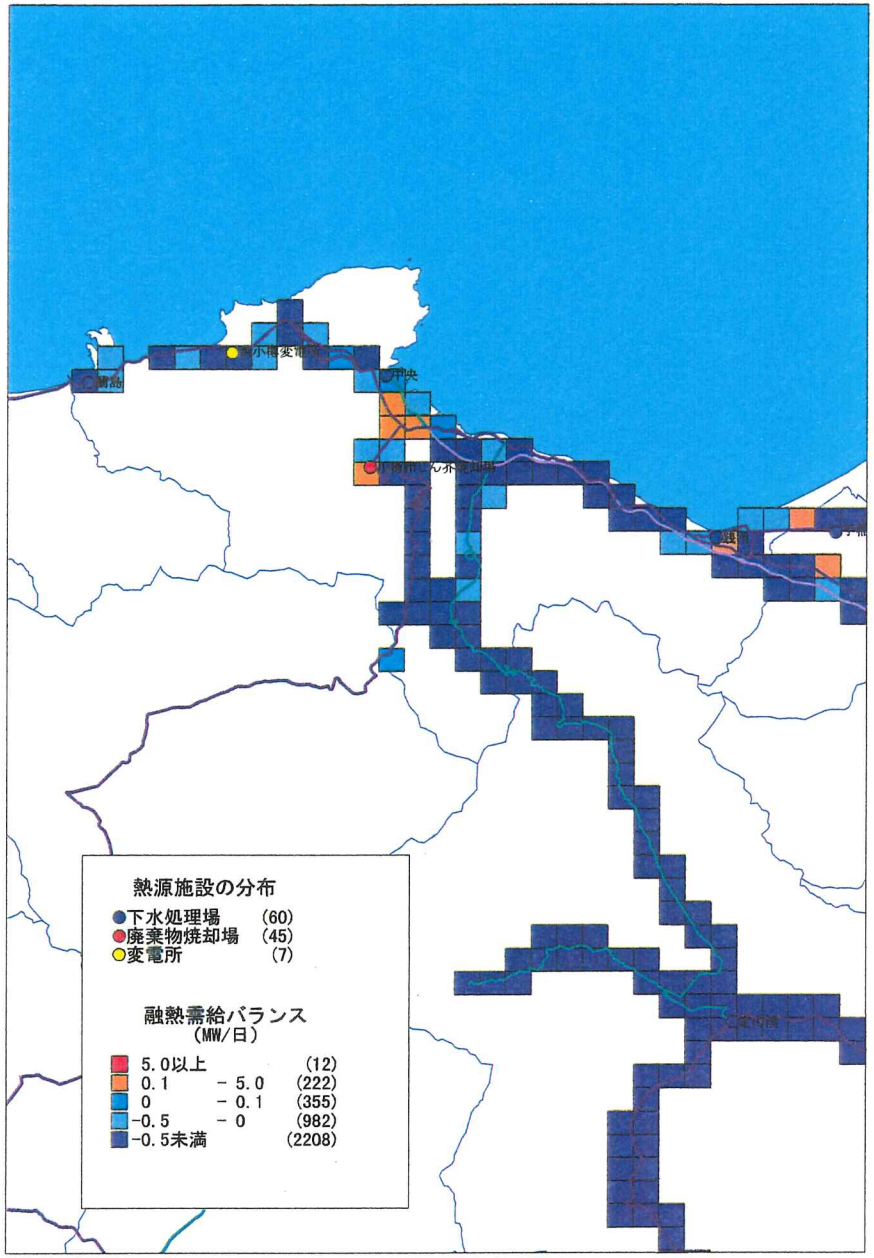
図表　札幌におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



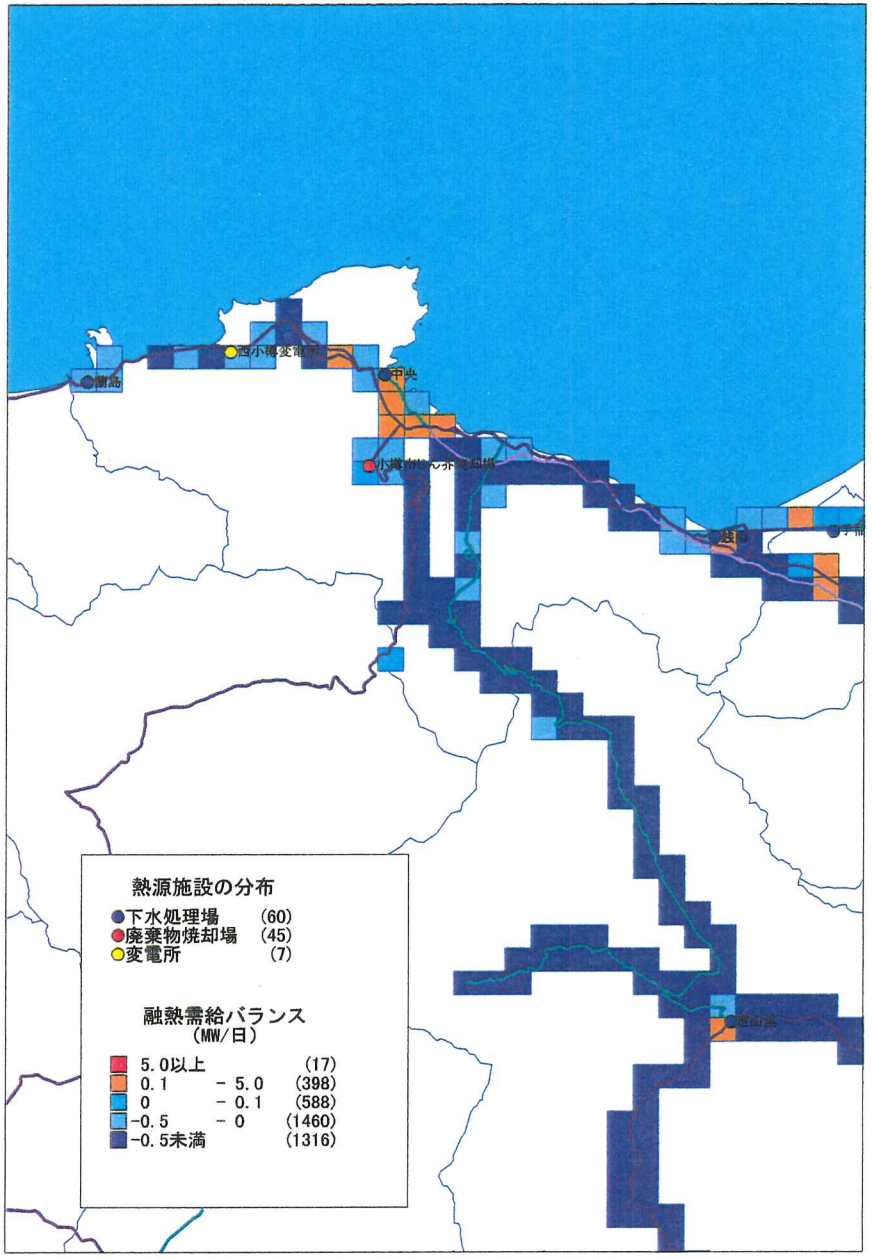
図表　函館におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



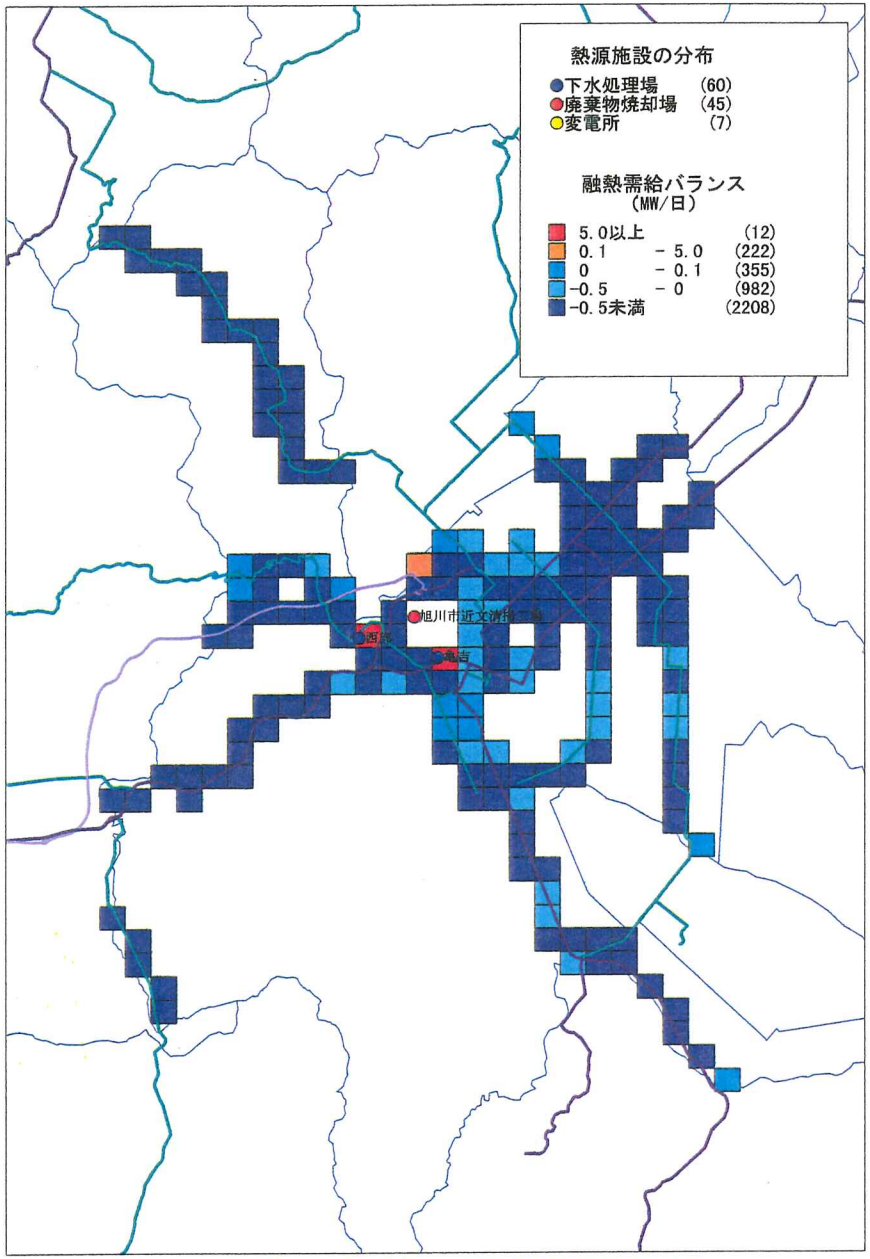
図表　函館におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



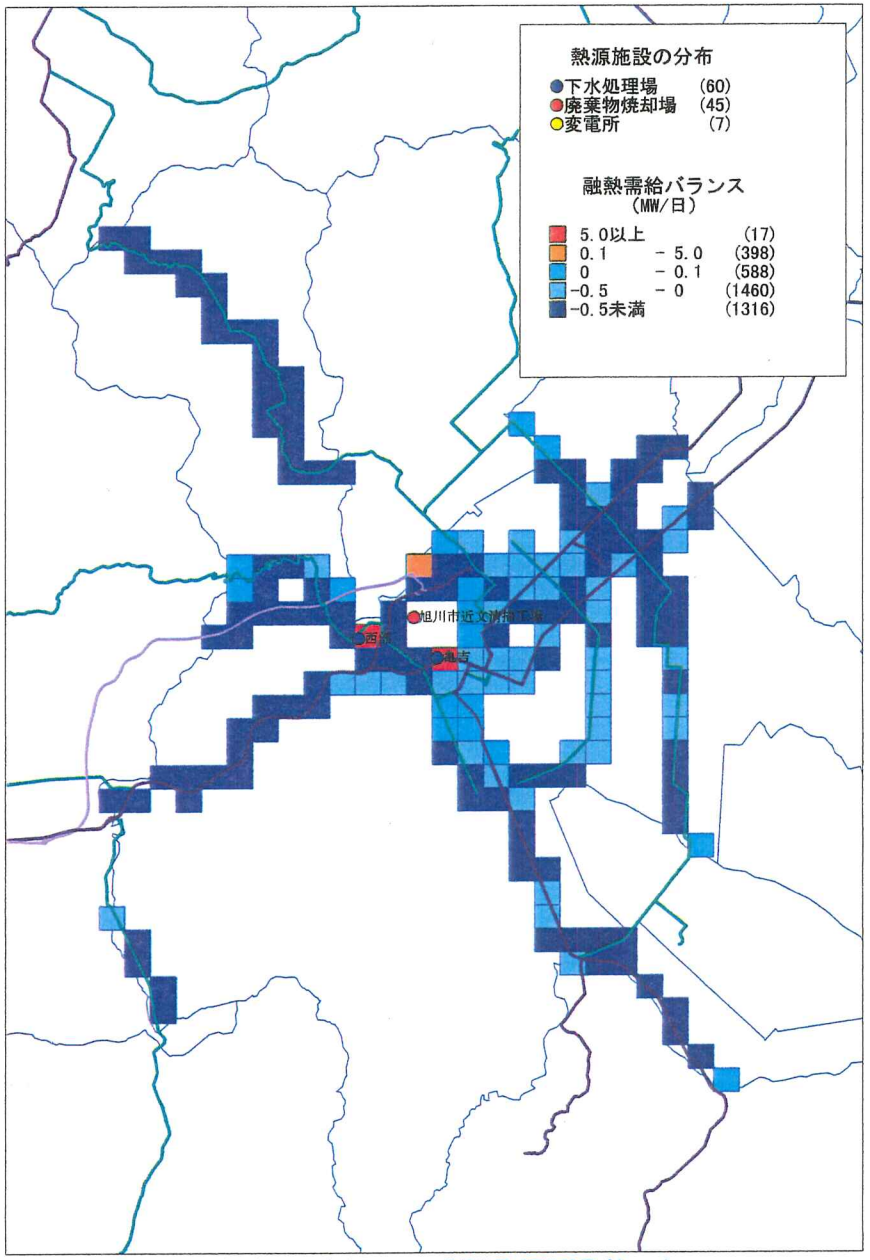
図表　小樽におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



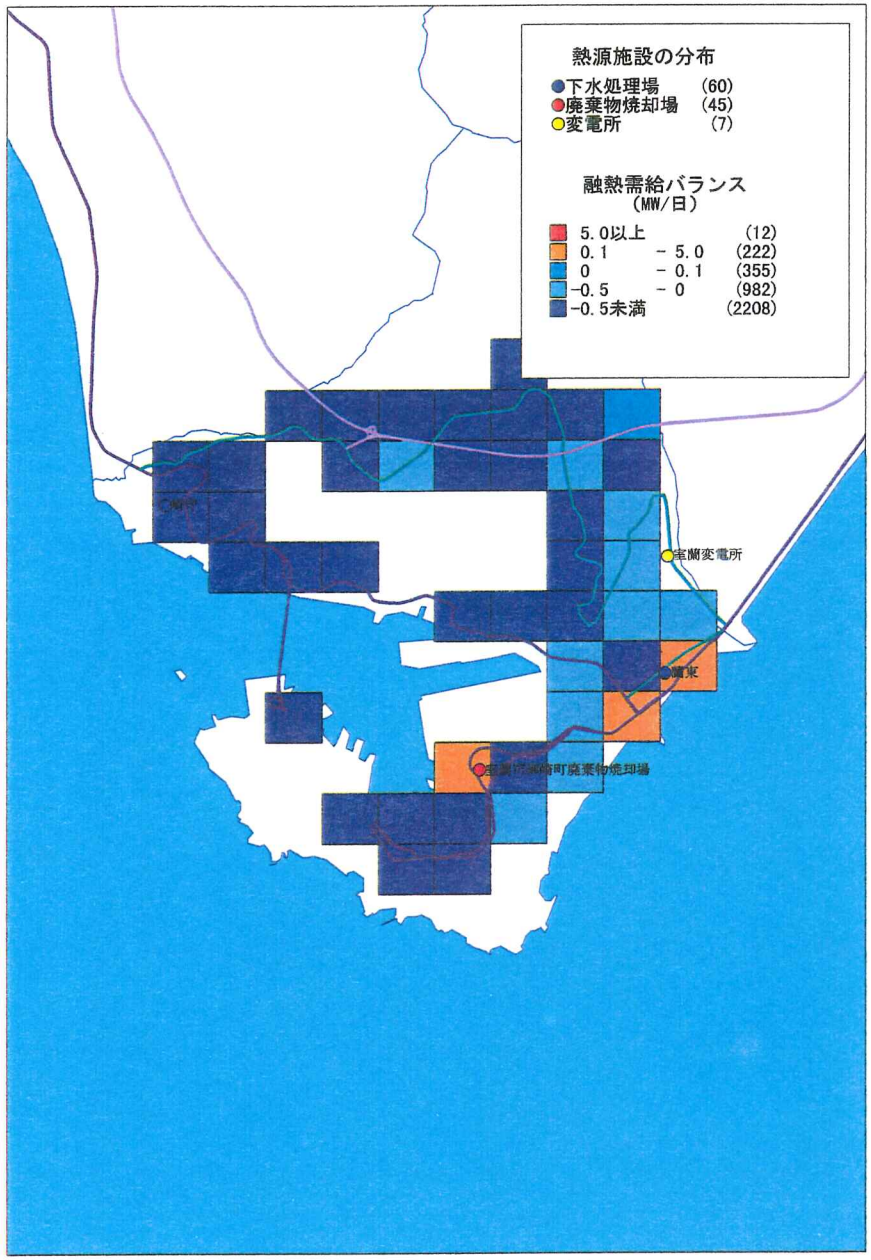
図表　小樽におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



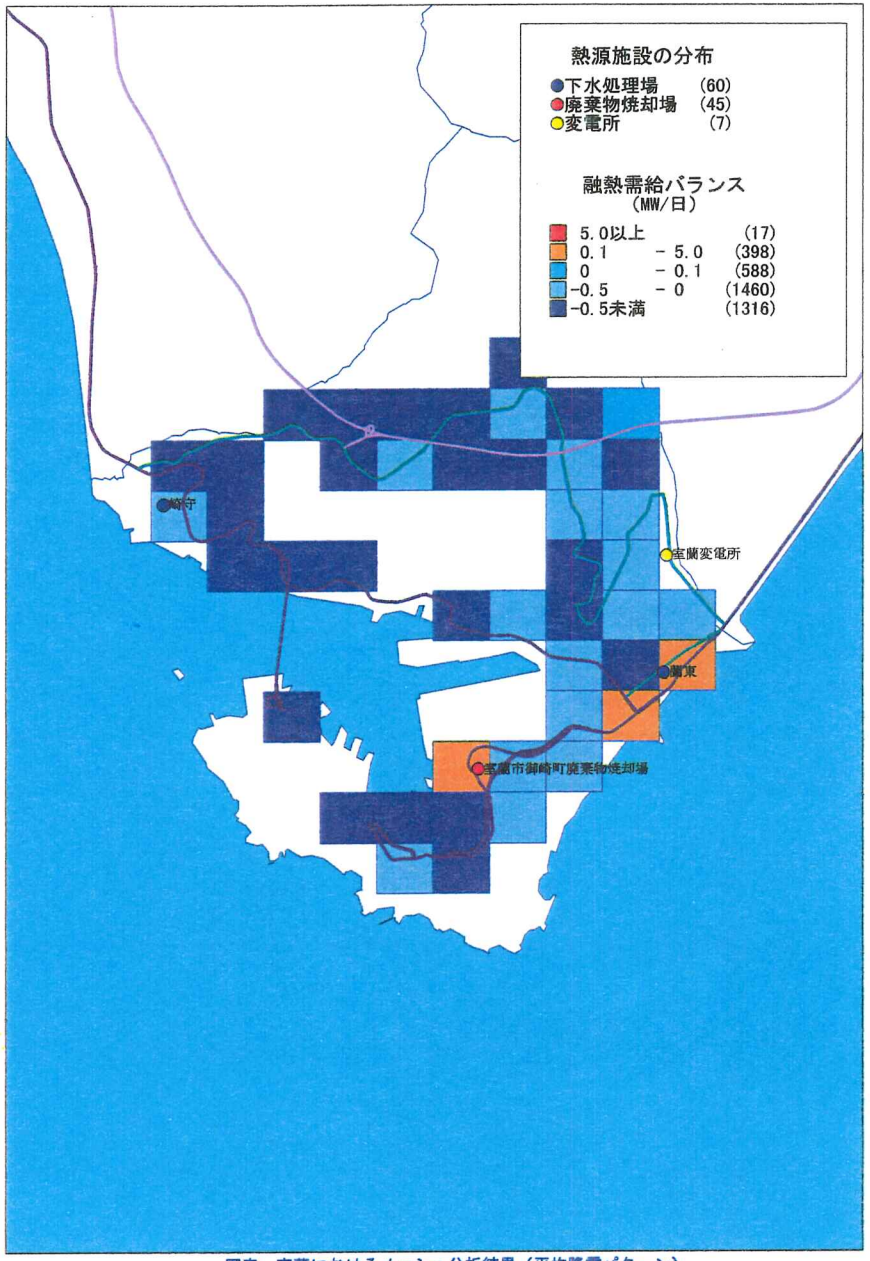
図表　旭川市におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



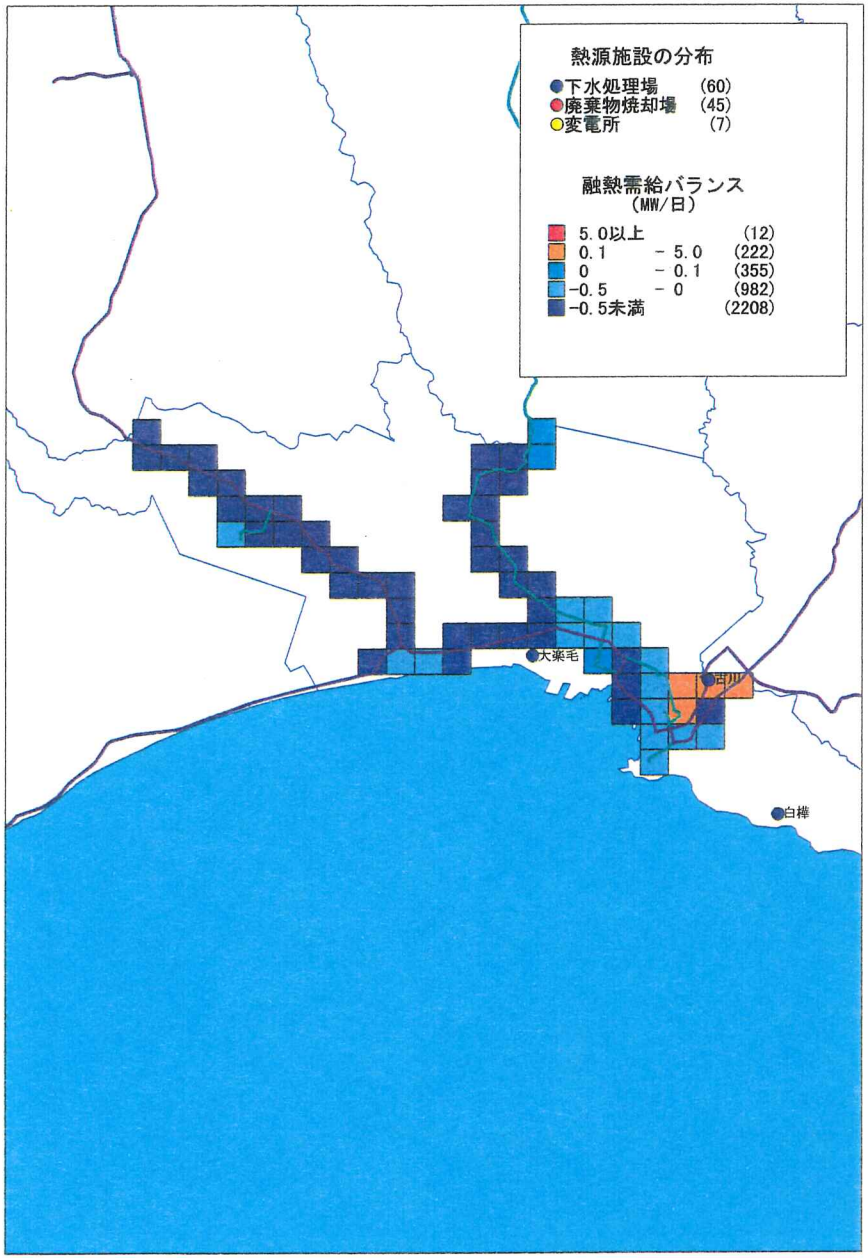
図表　旭川市におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



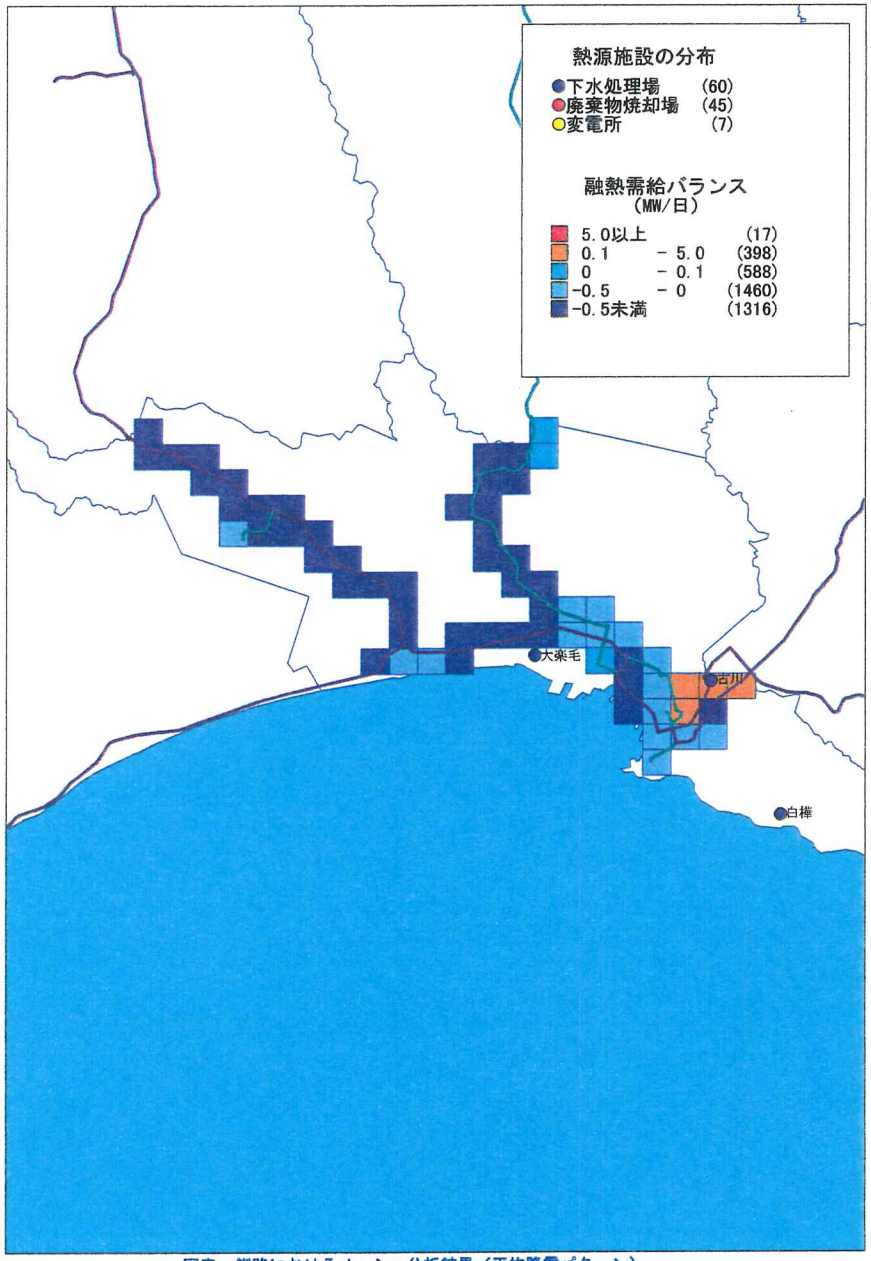
図表　室蘭におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



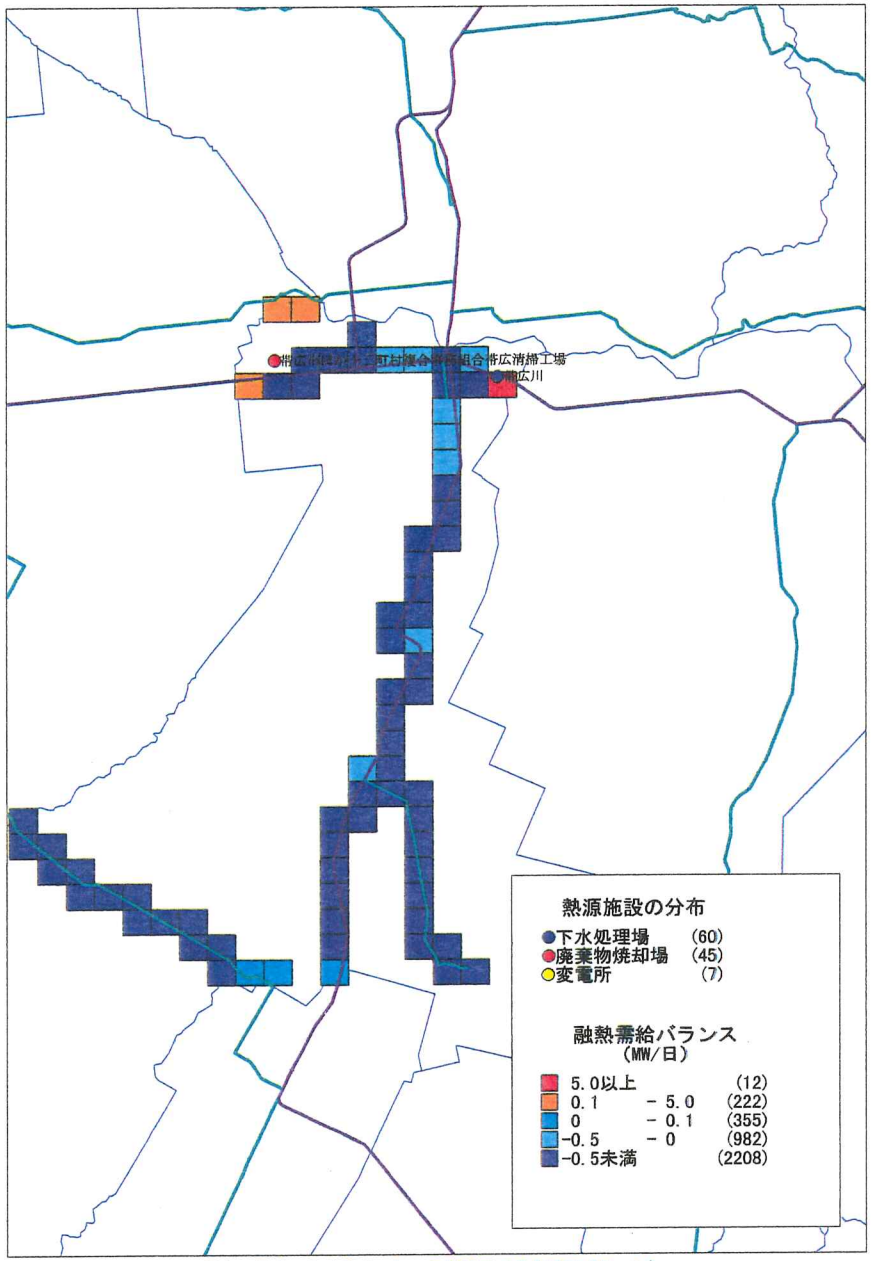
図表　室蘭におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



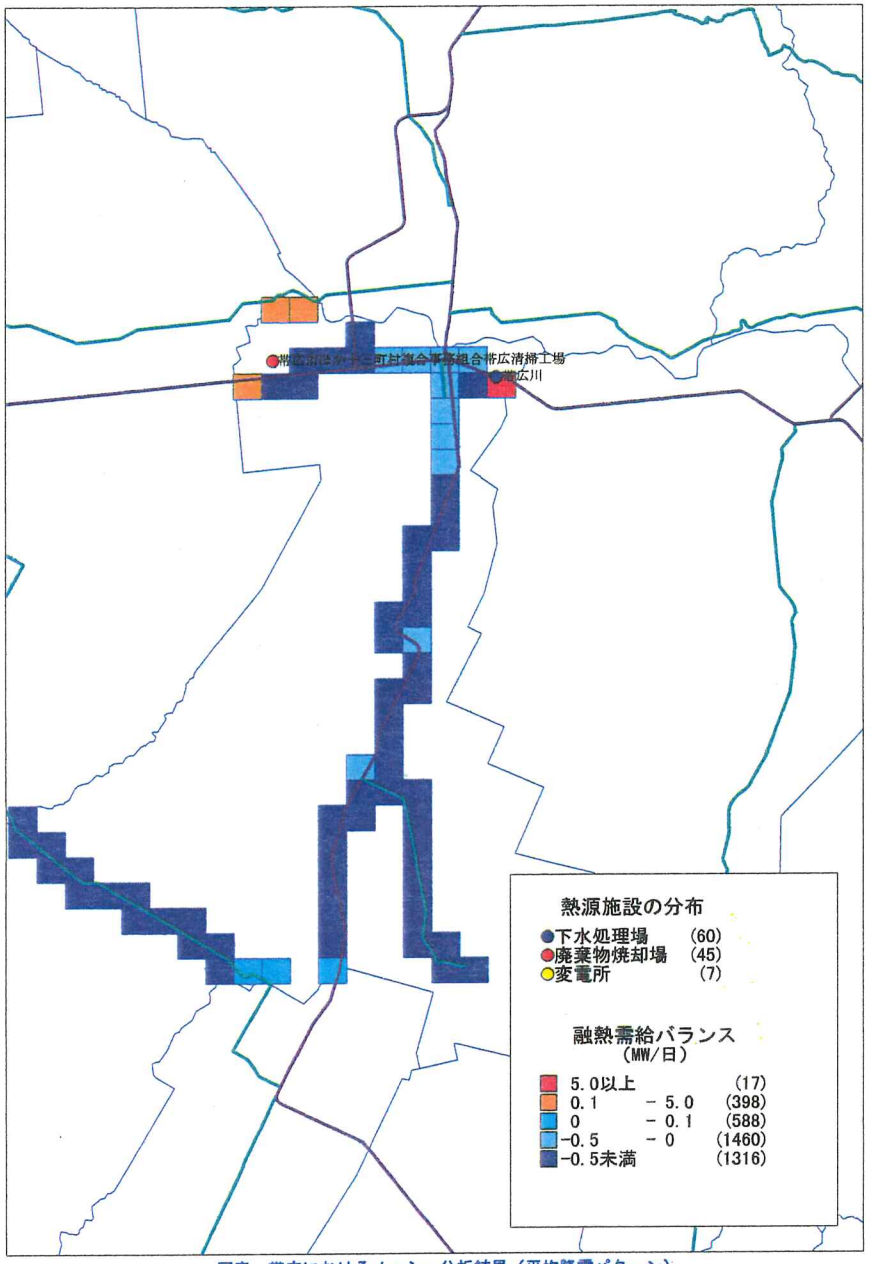
図表　釧路におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



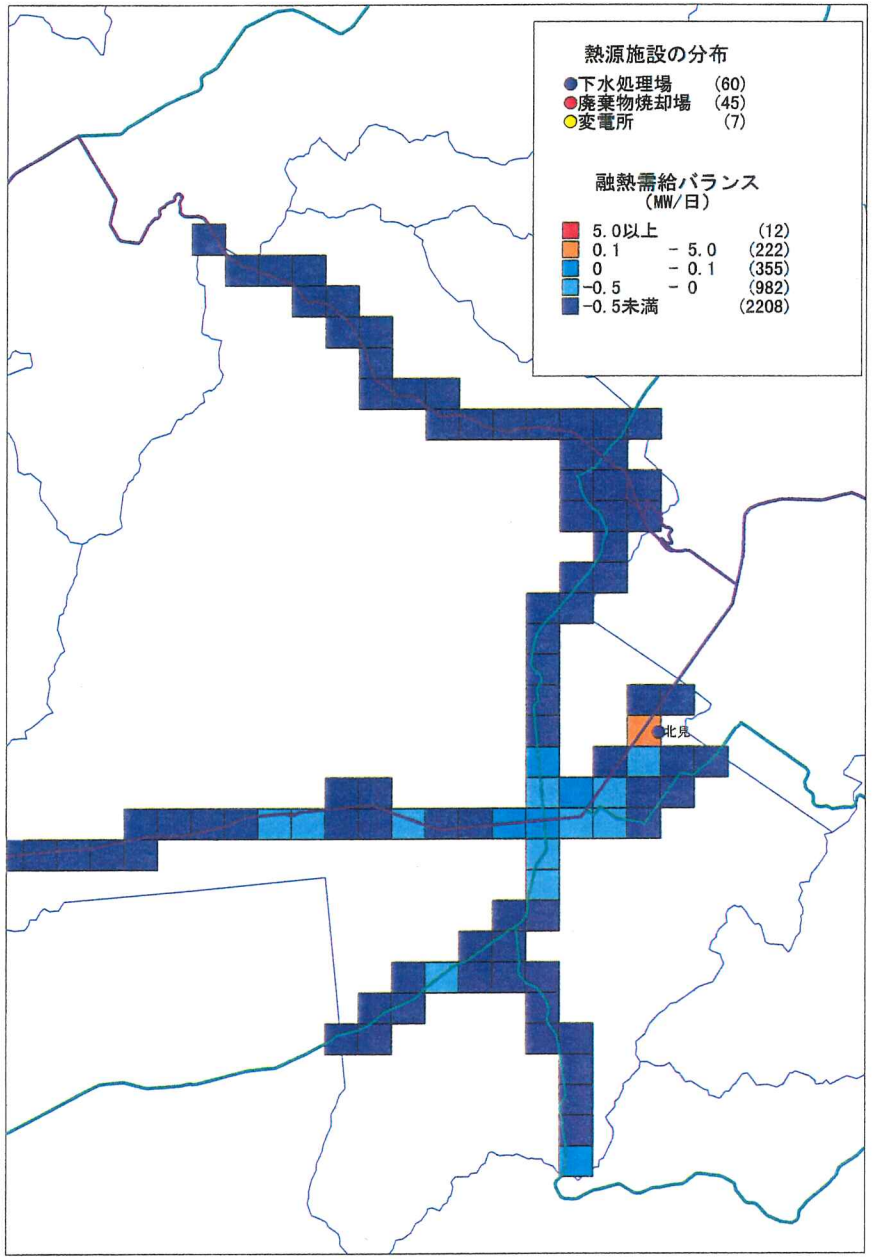
図表　釧路におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



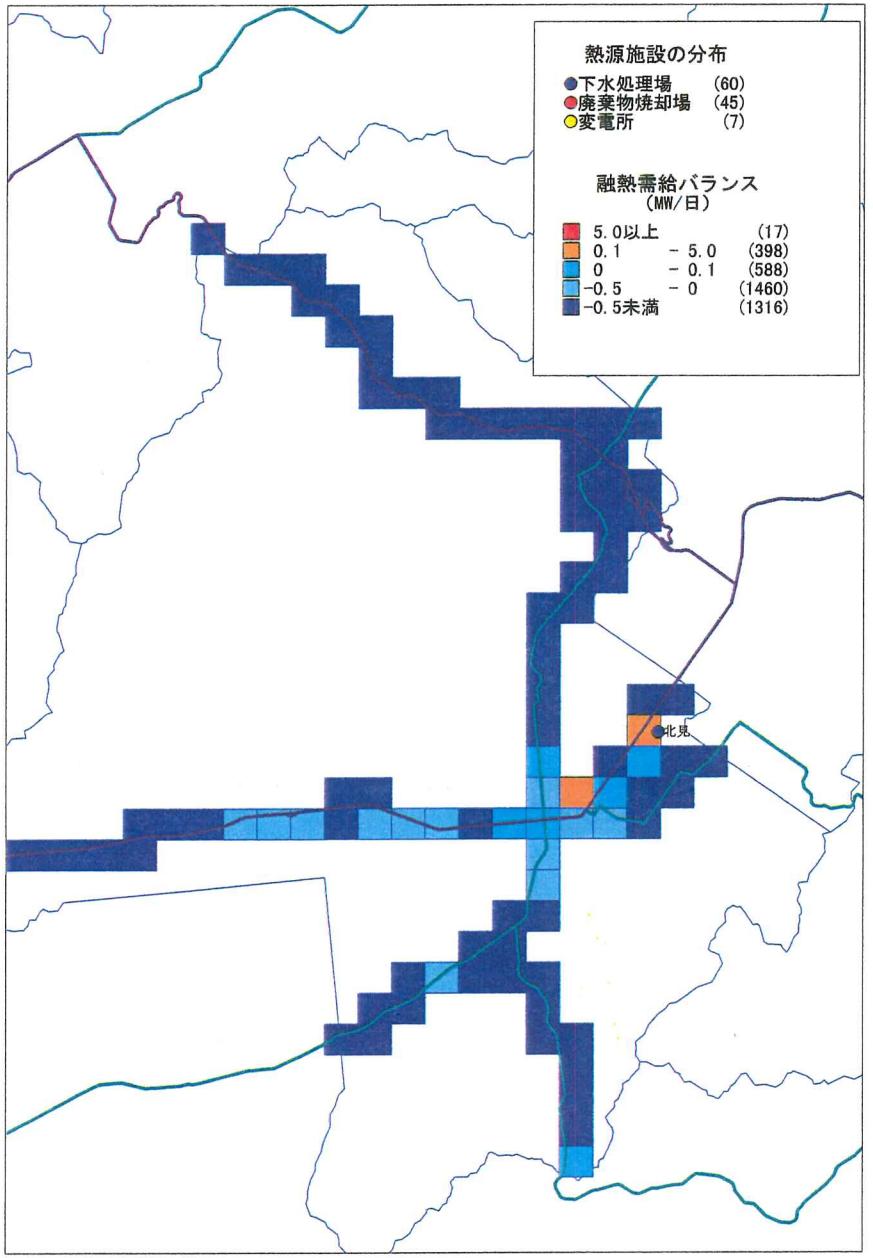
図表　帯広におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



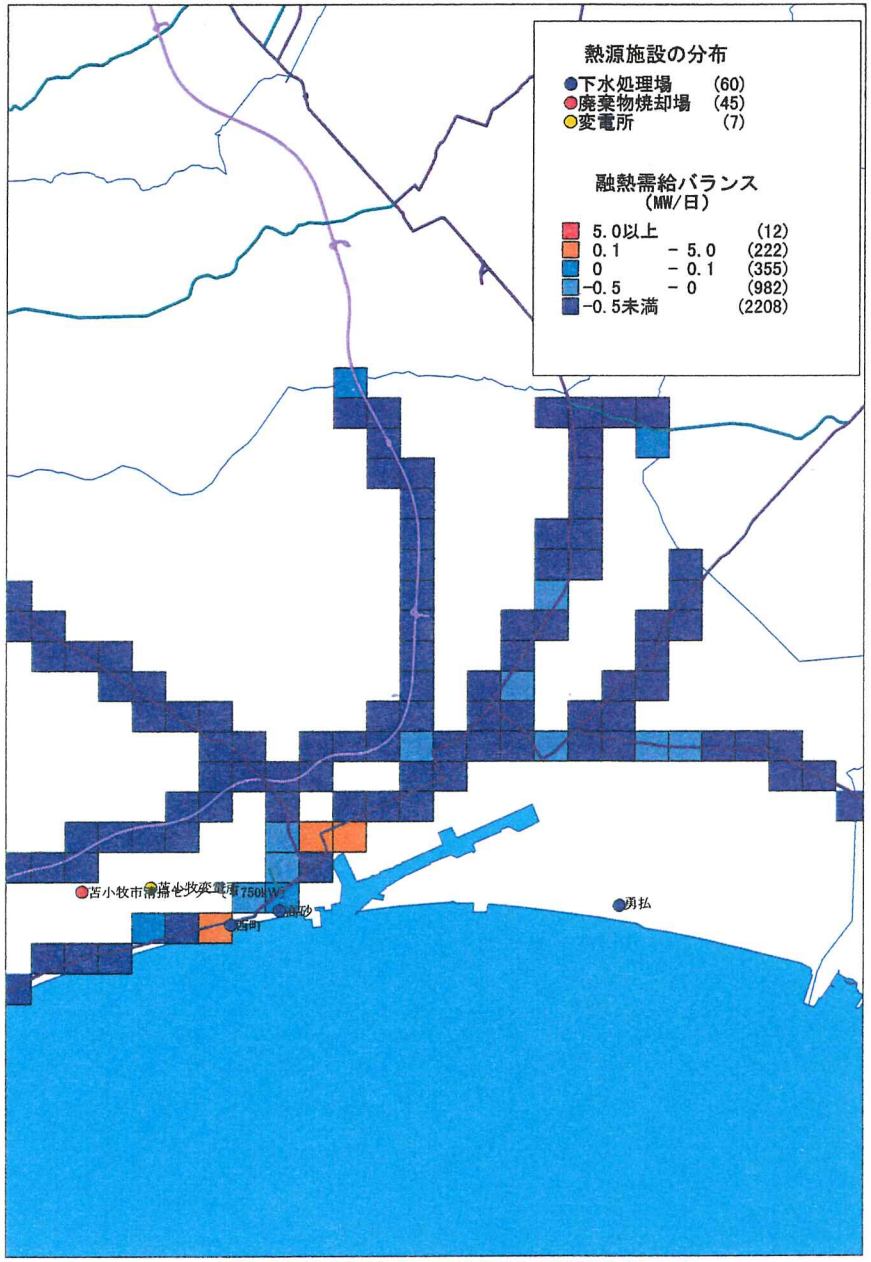
図表　帯広におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



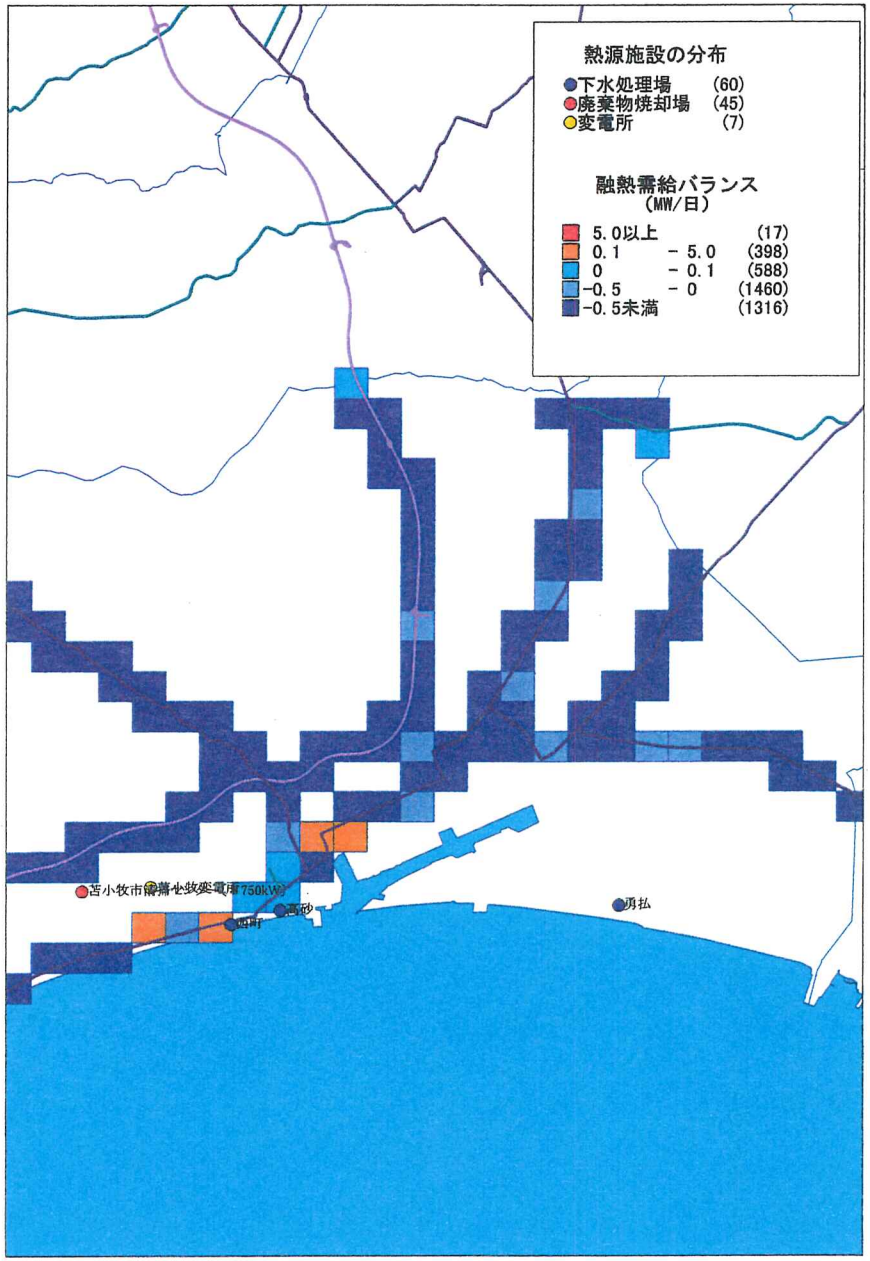
図表　北見におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



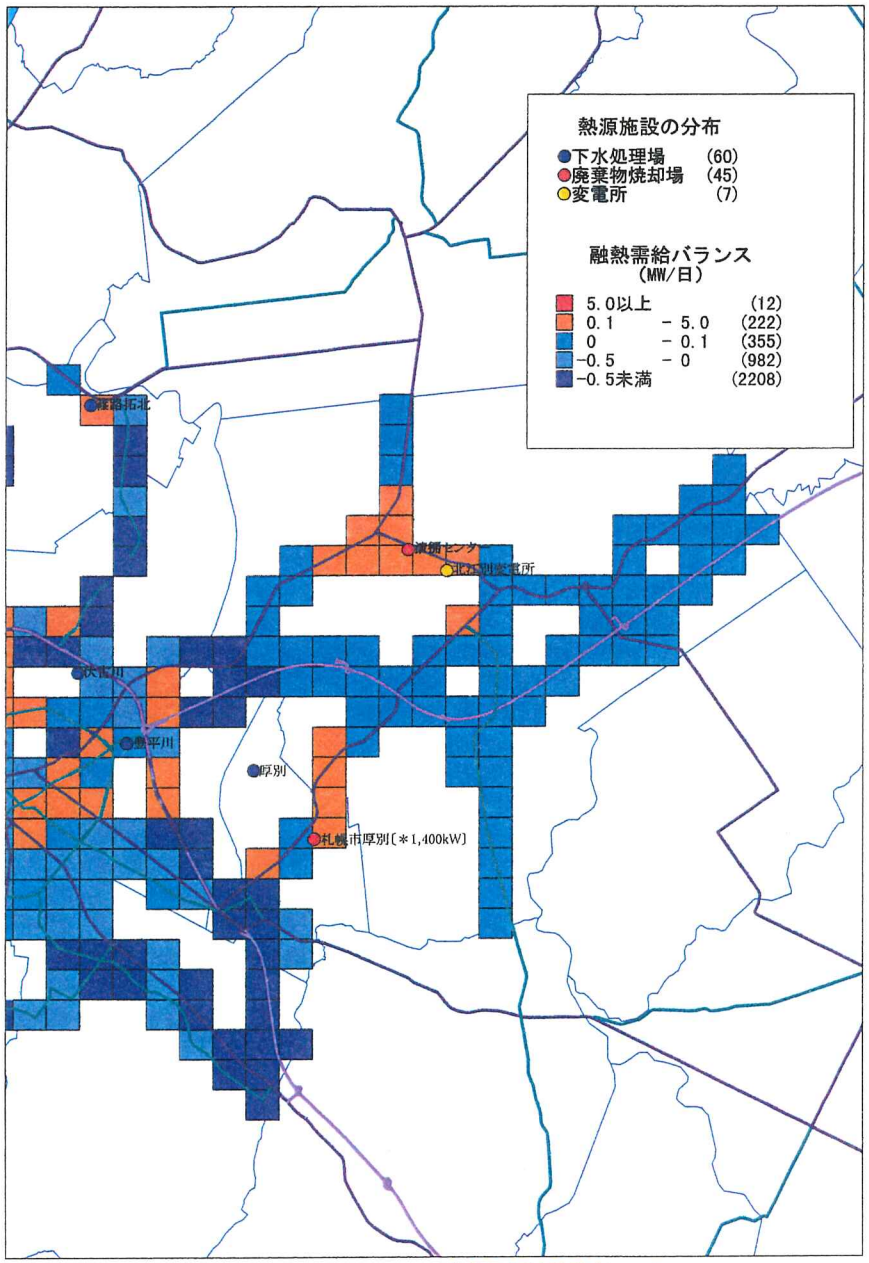
図表　北見におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



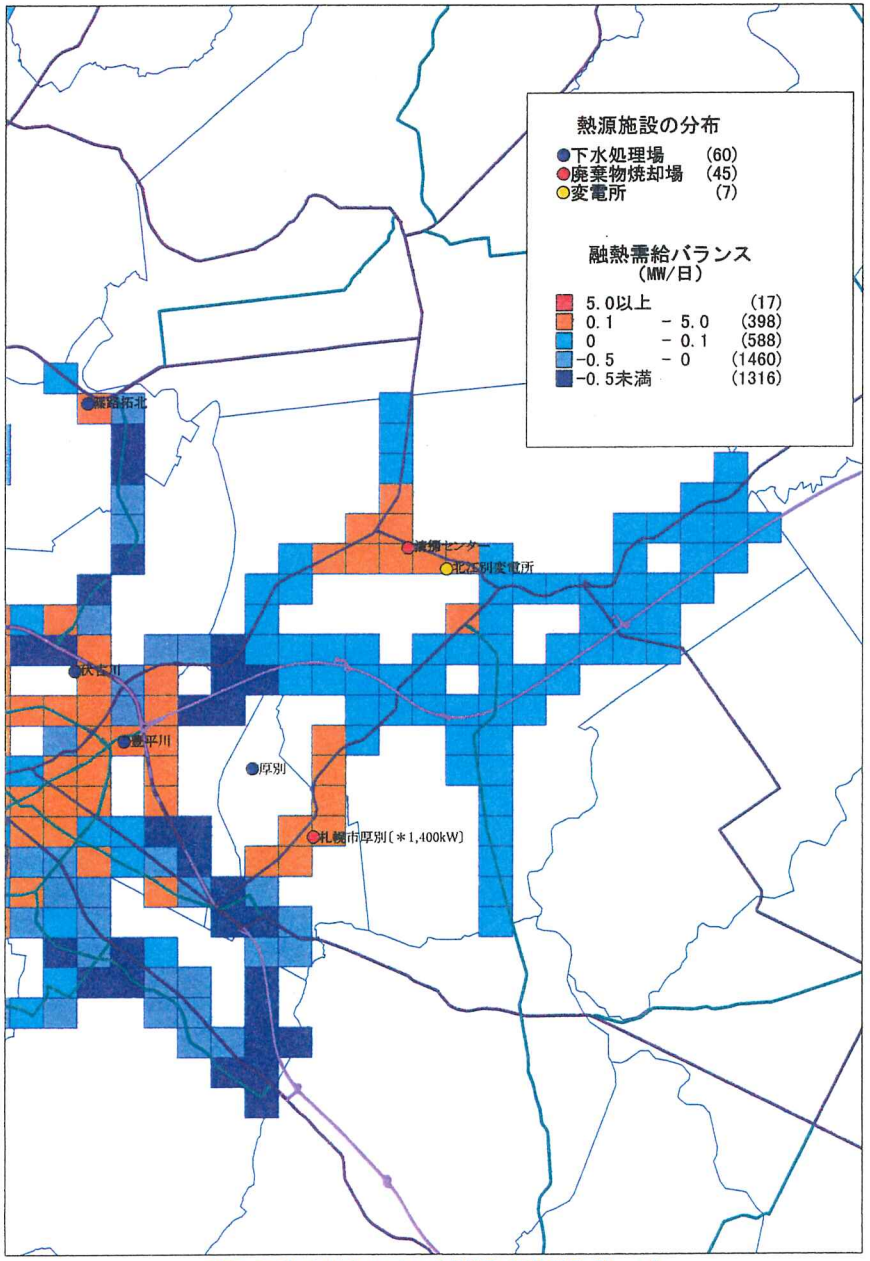
図表　苫小牧におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



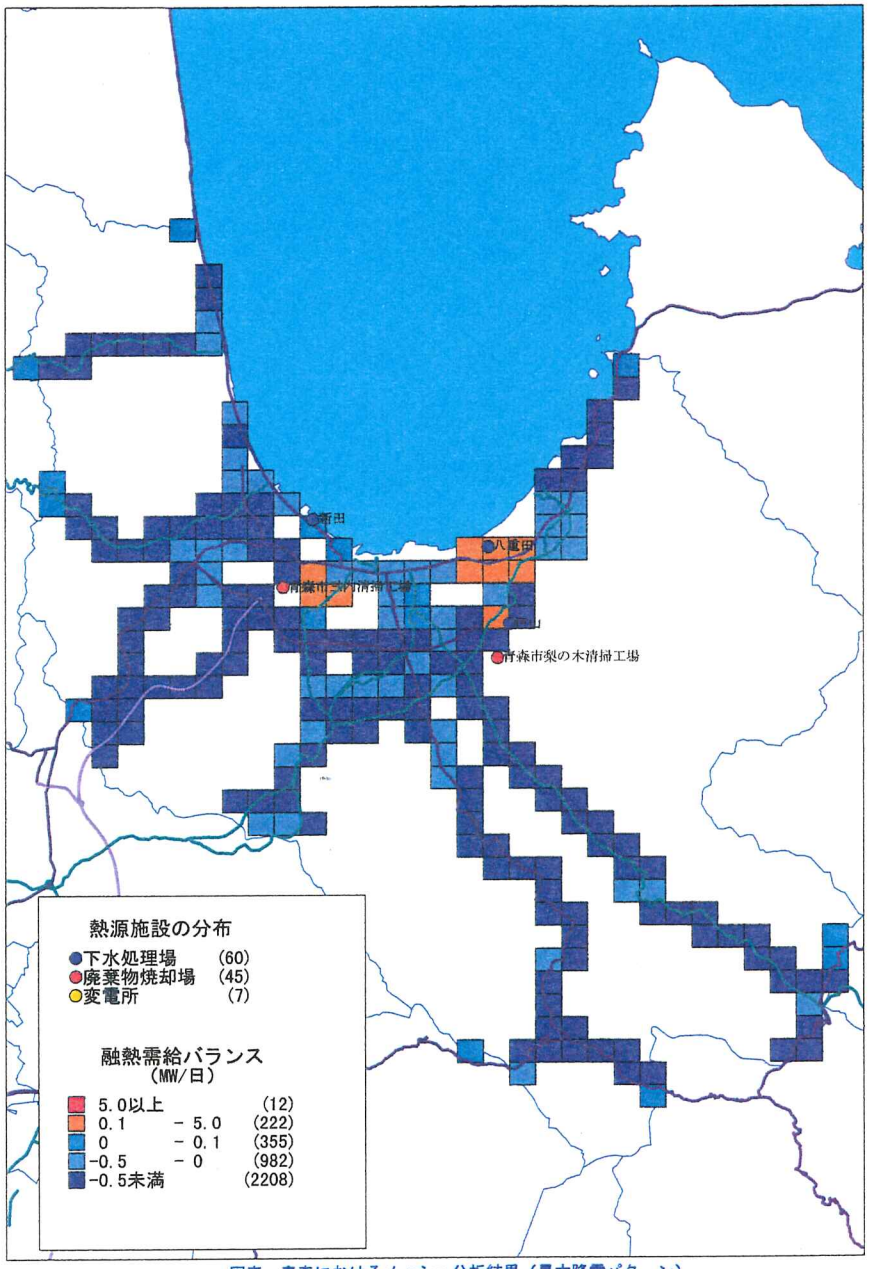
図表　苫小牧におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



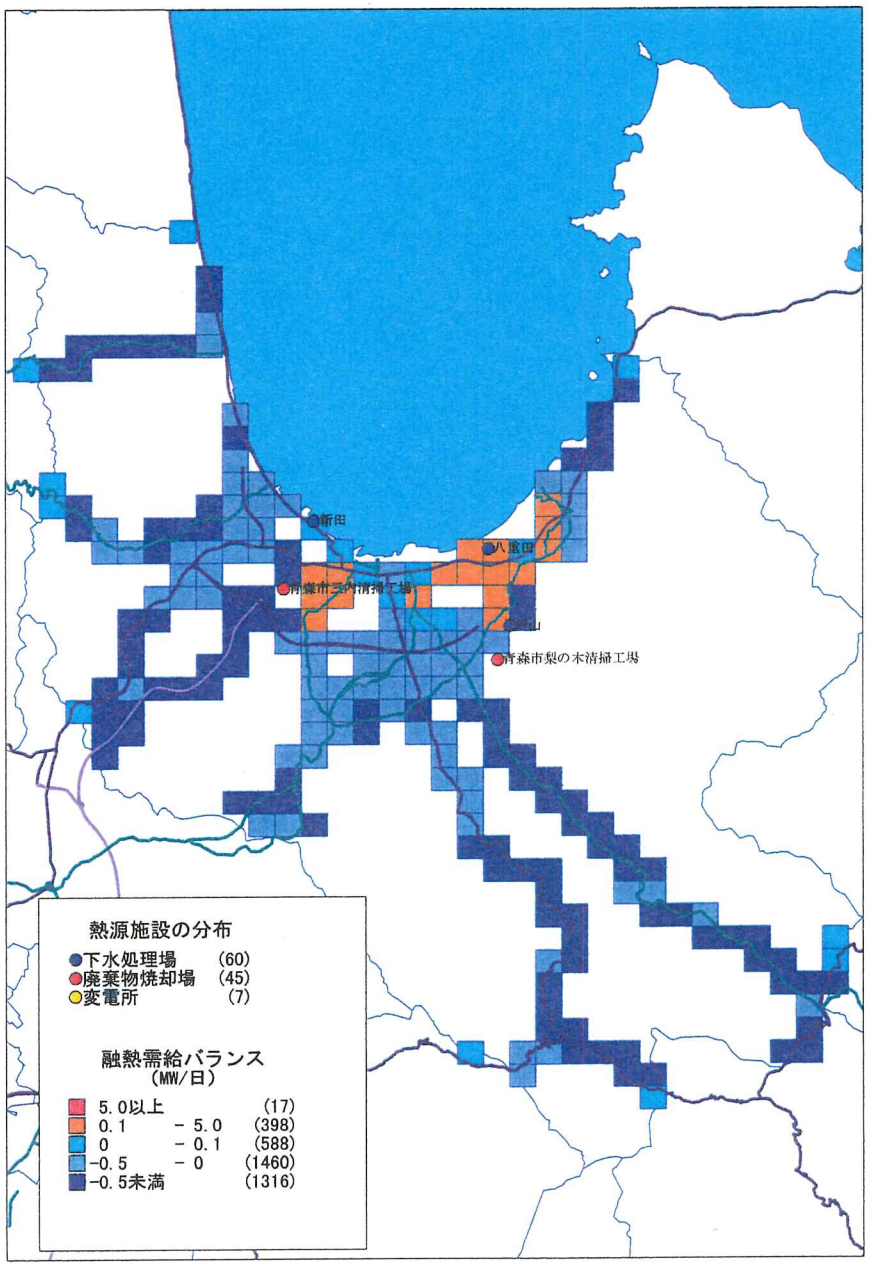
図表　江別におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



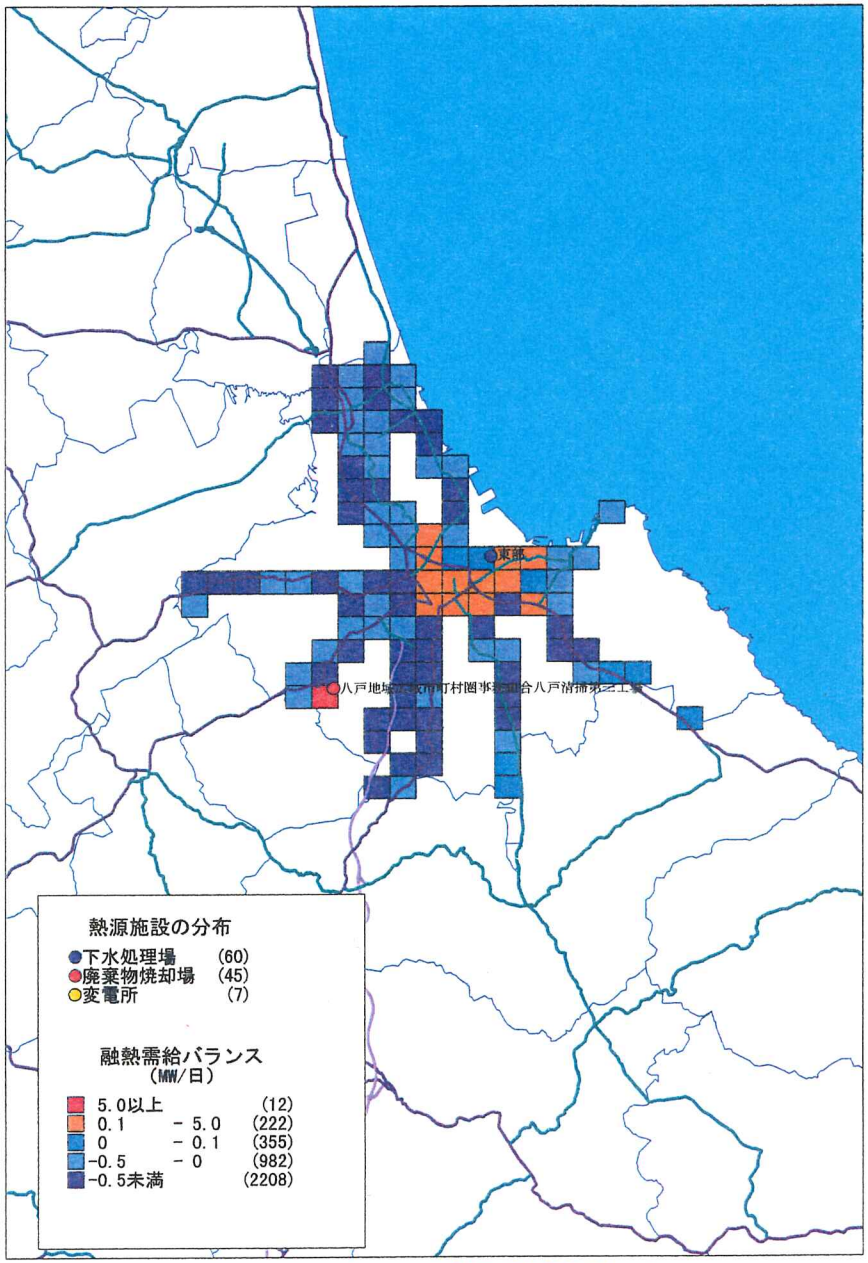
図表　江別におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



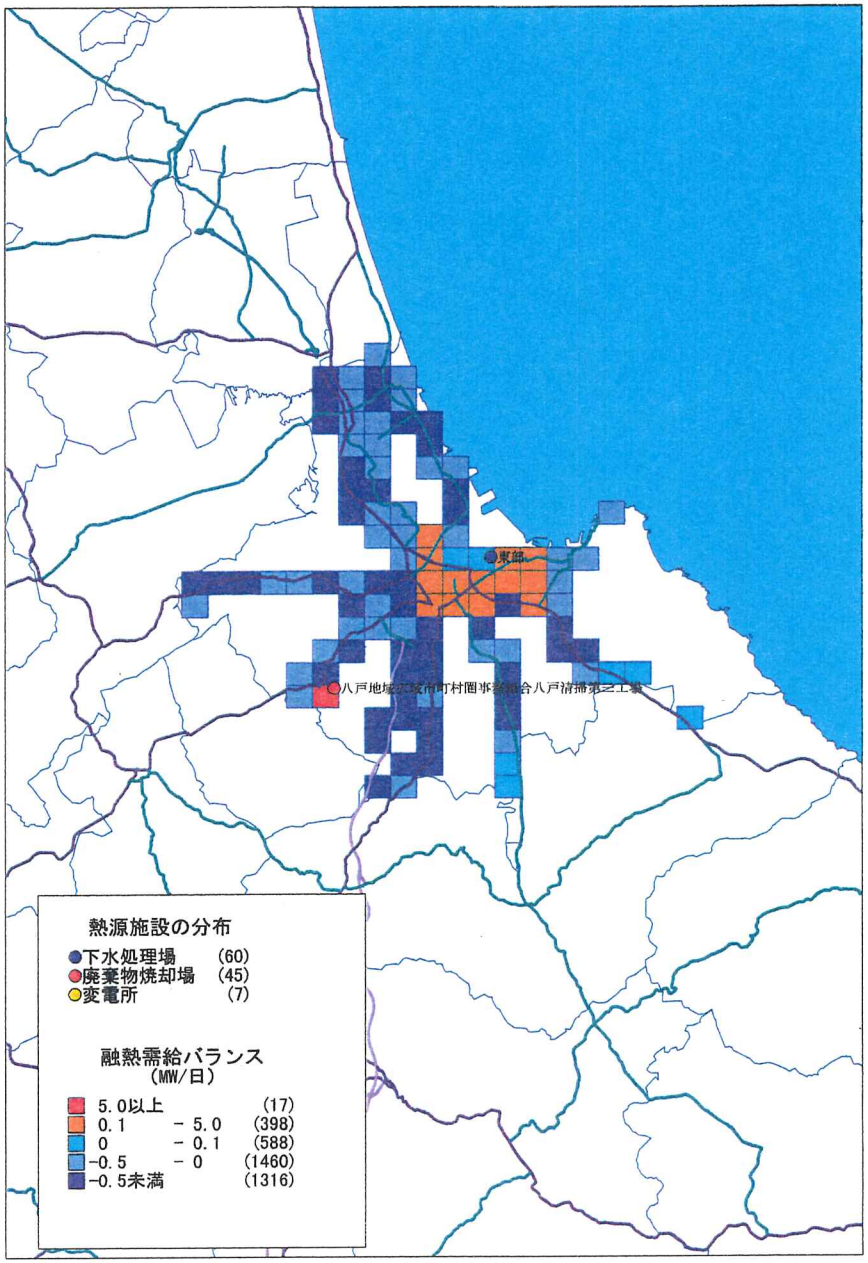
図表　青森におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



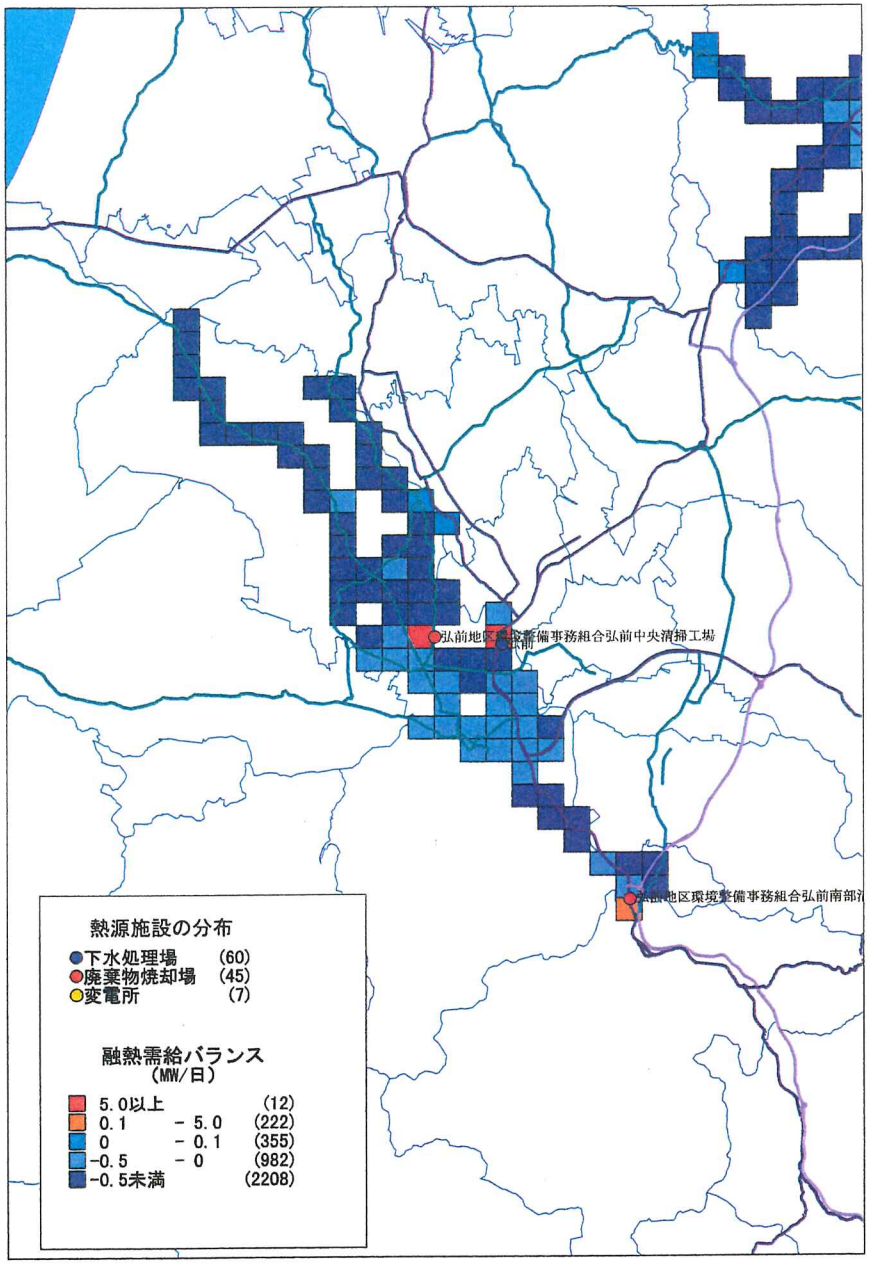
図表　青森におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



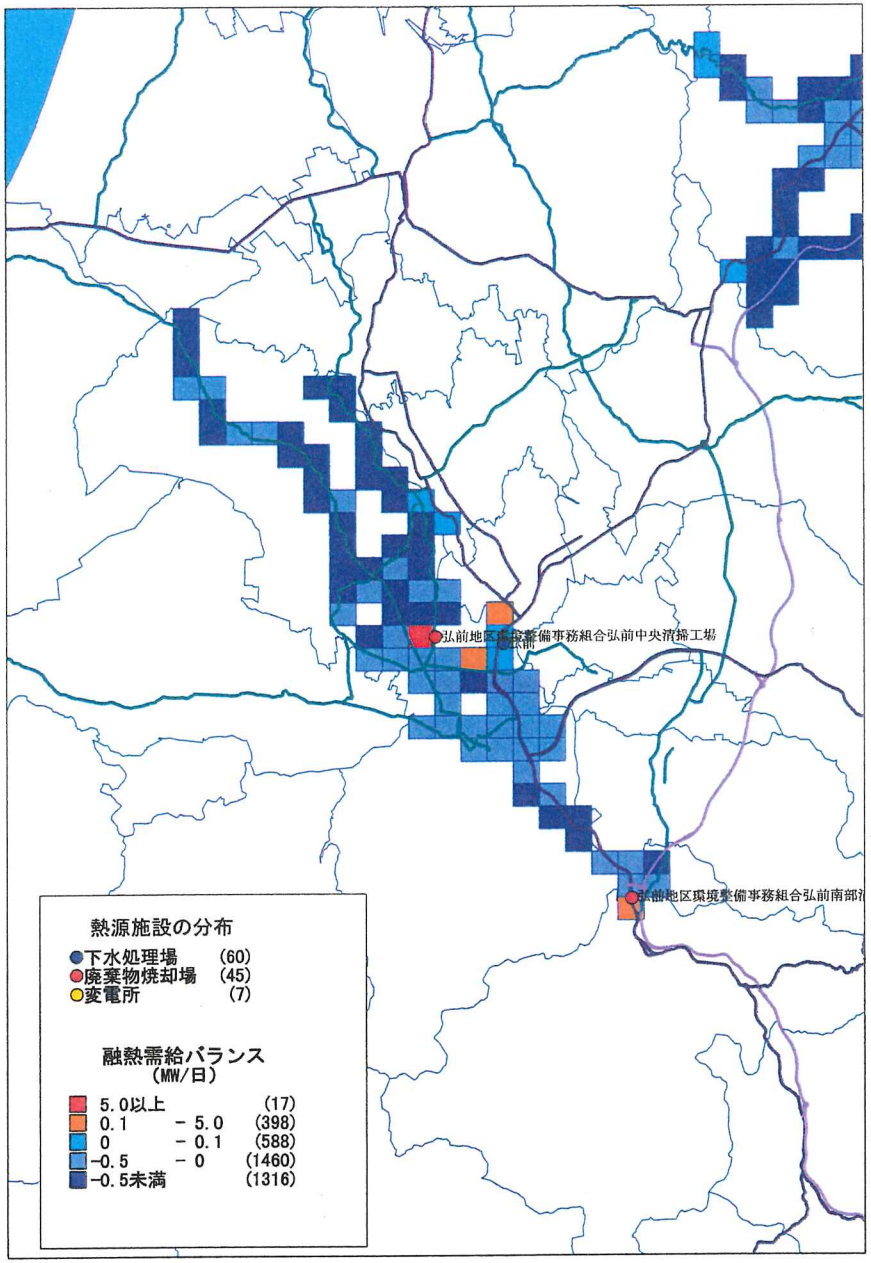
図表　八戸におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



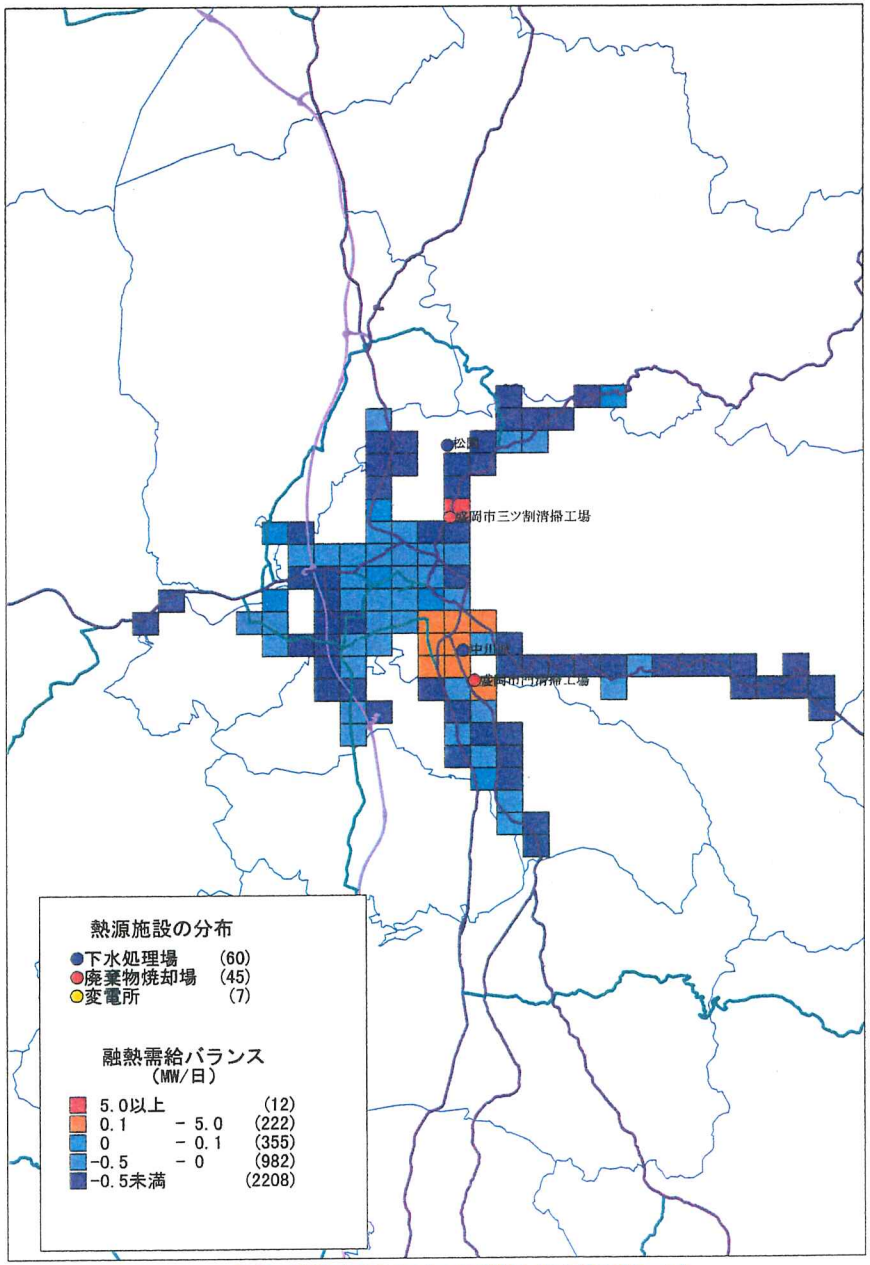
図表　八戸におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



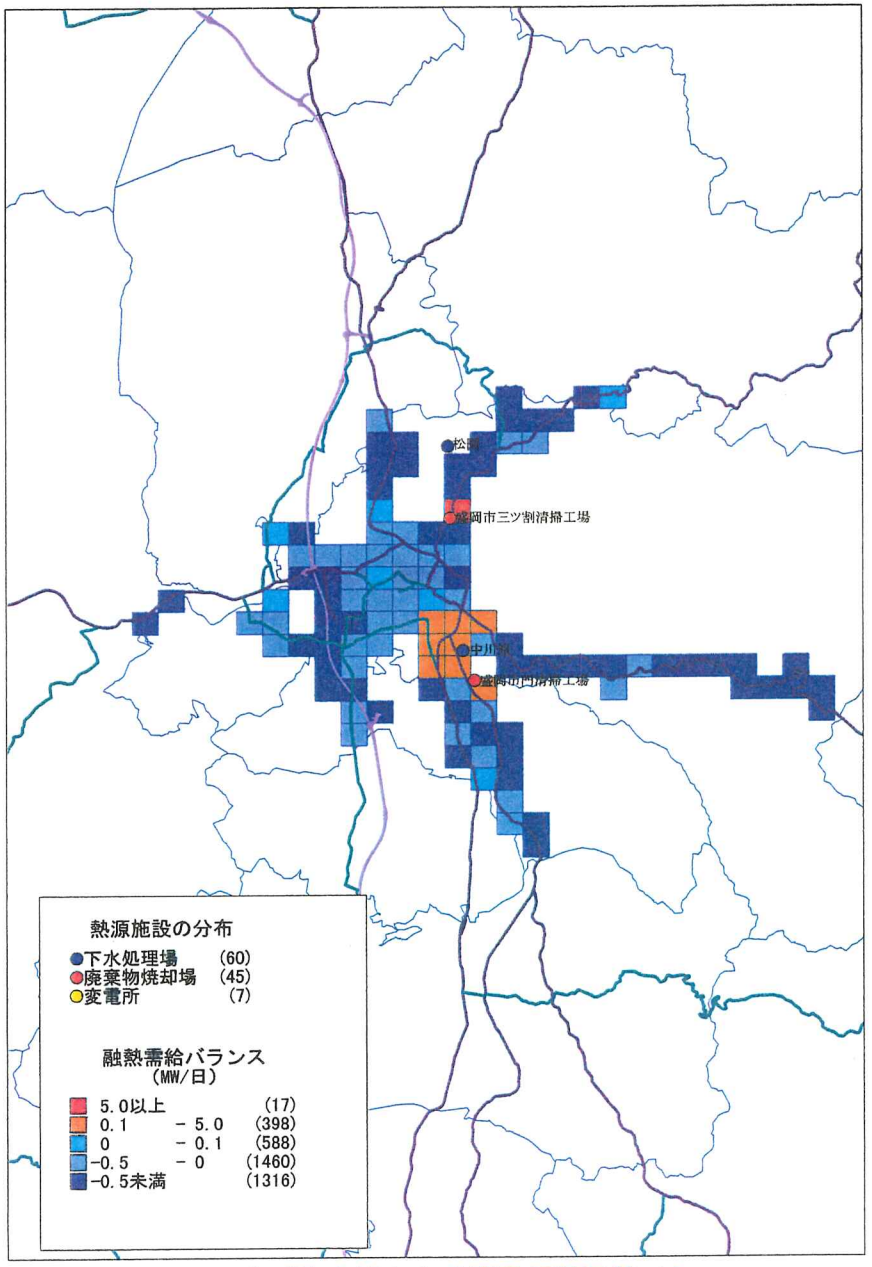
図表　弘前におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



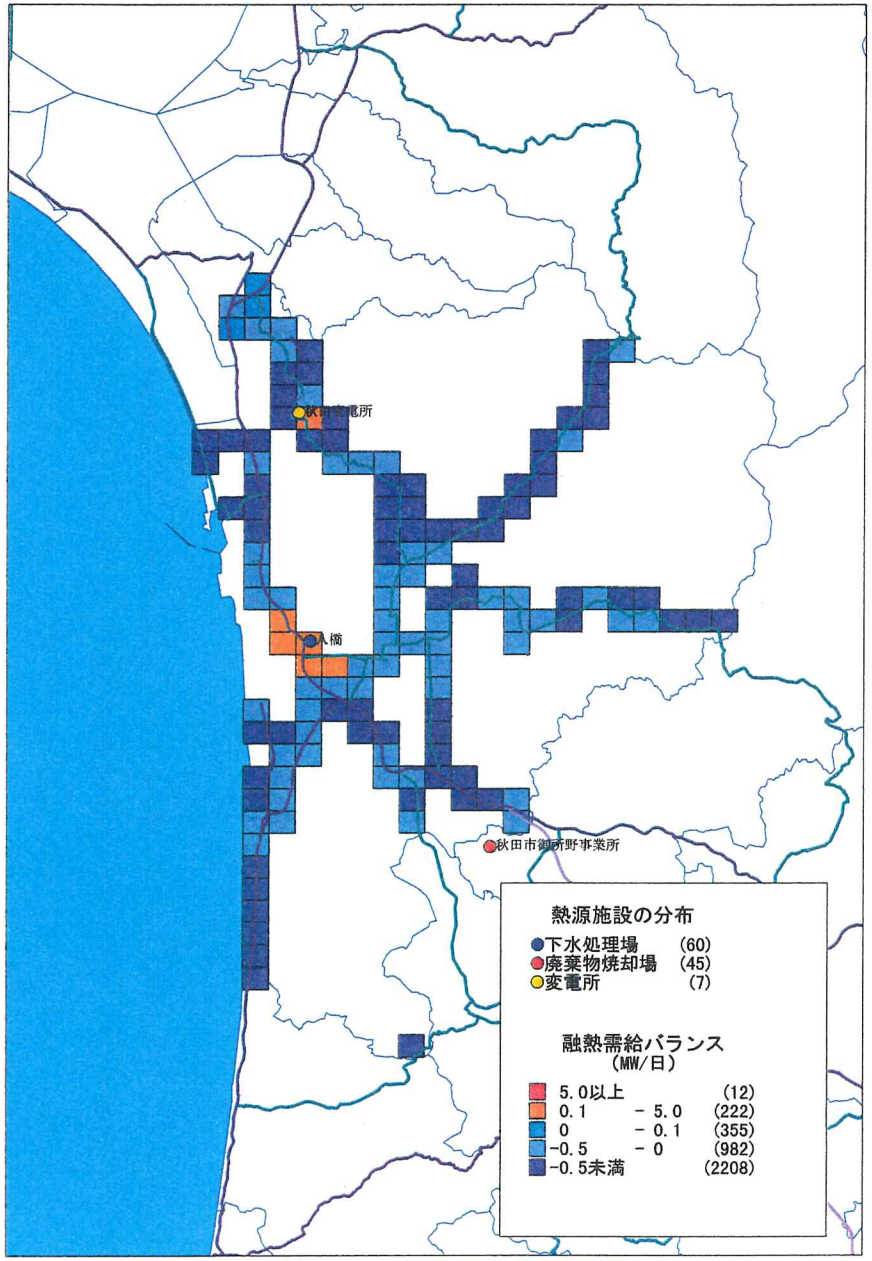
図表　弘前におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



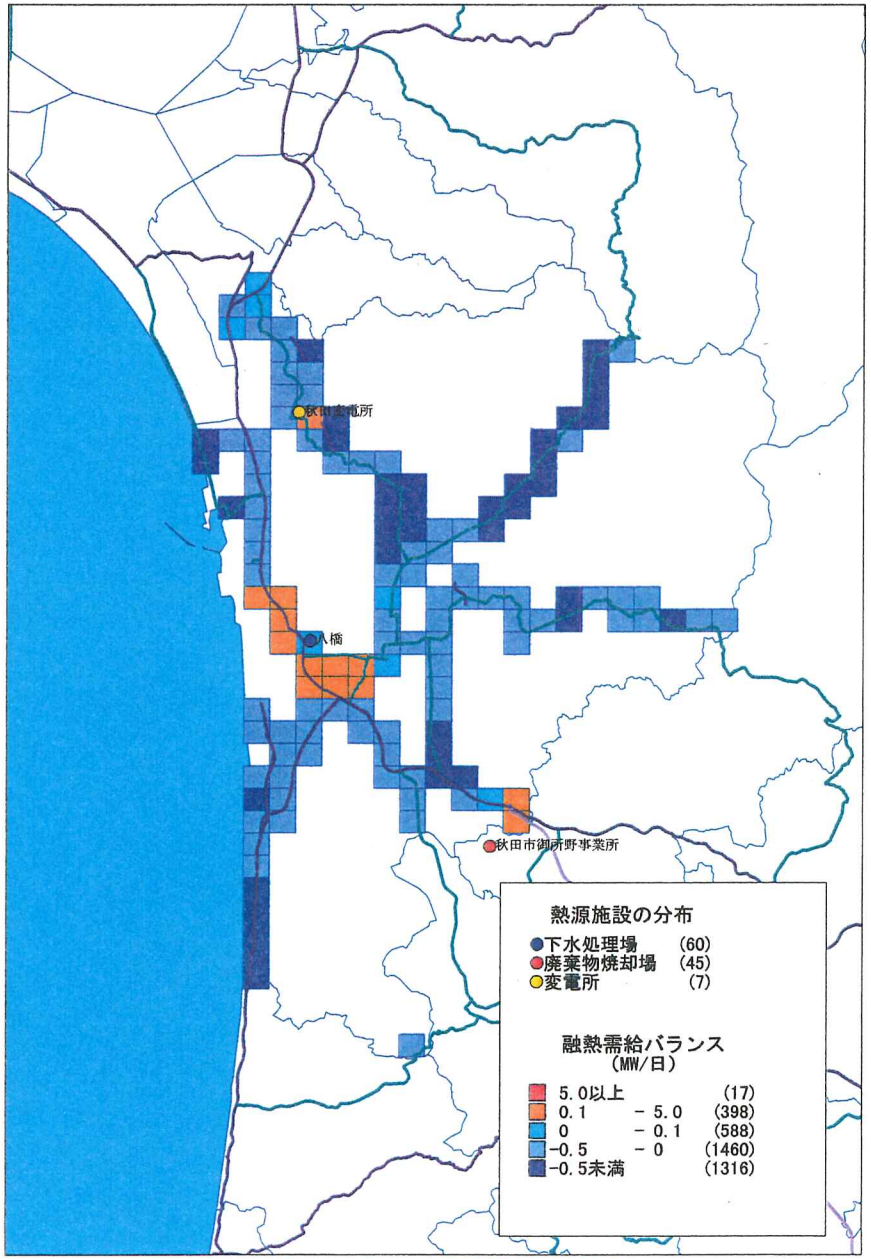
図表　盛岡におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



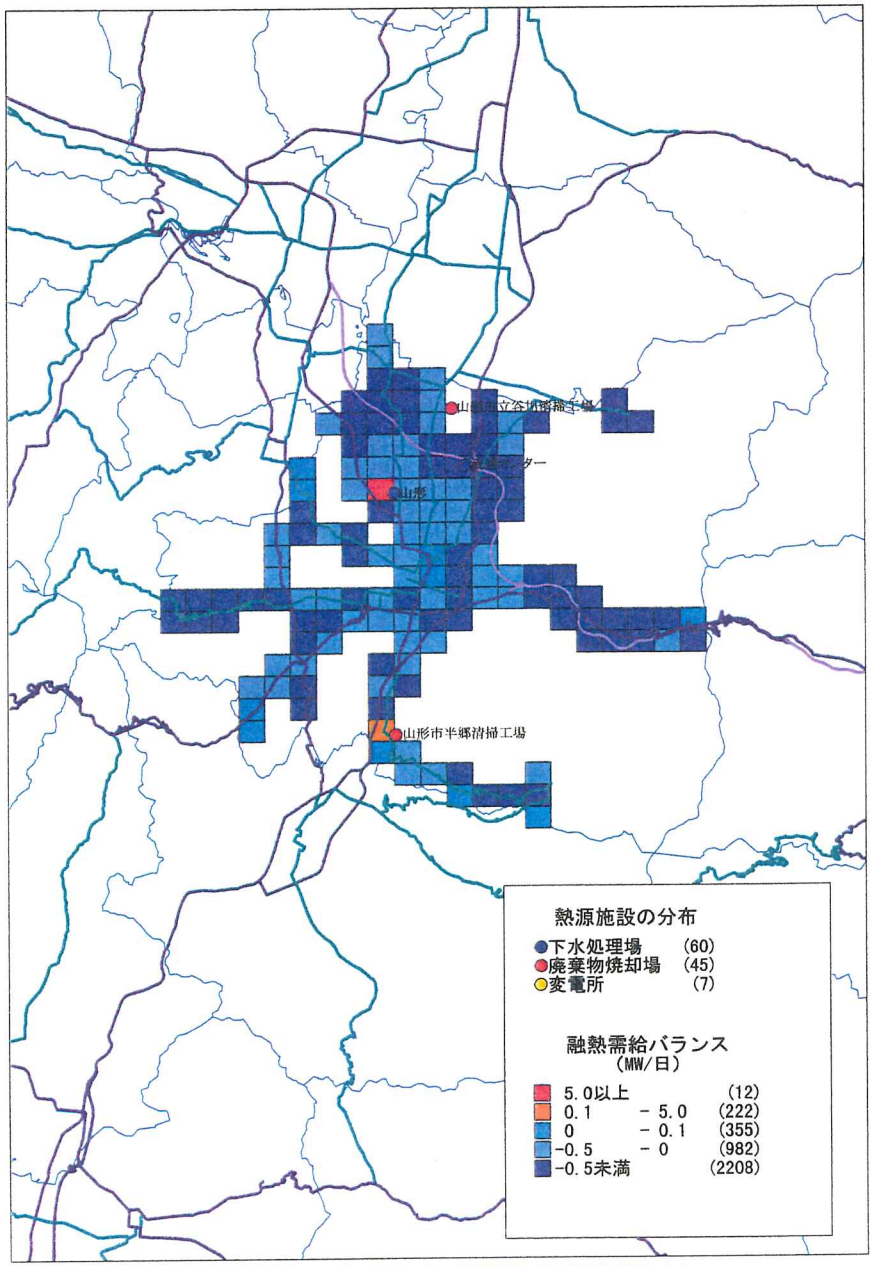
図表　盛岡におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



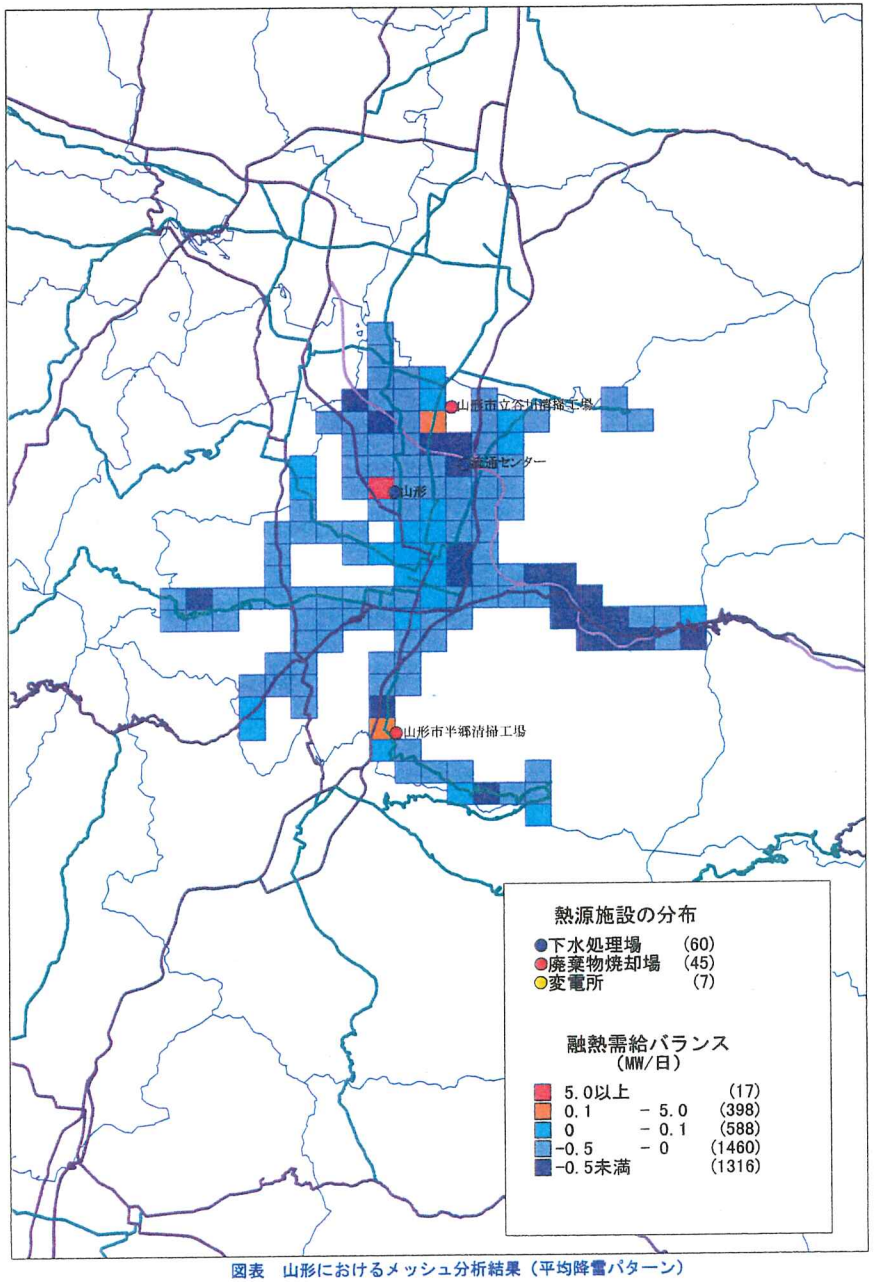
図表　秋田におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



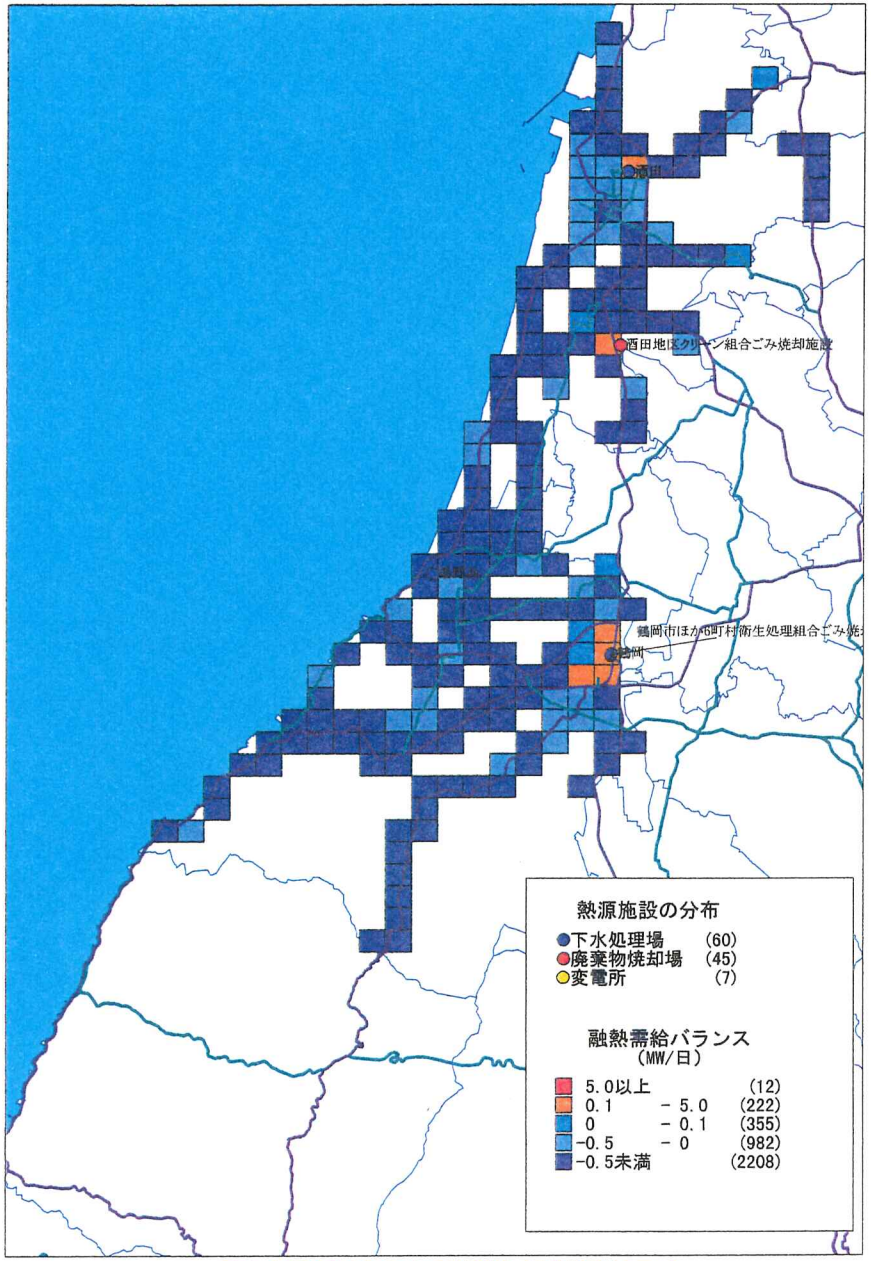
図表　秋田におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



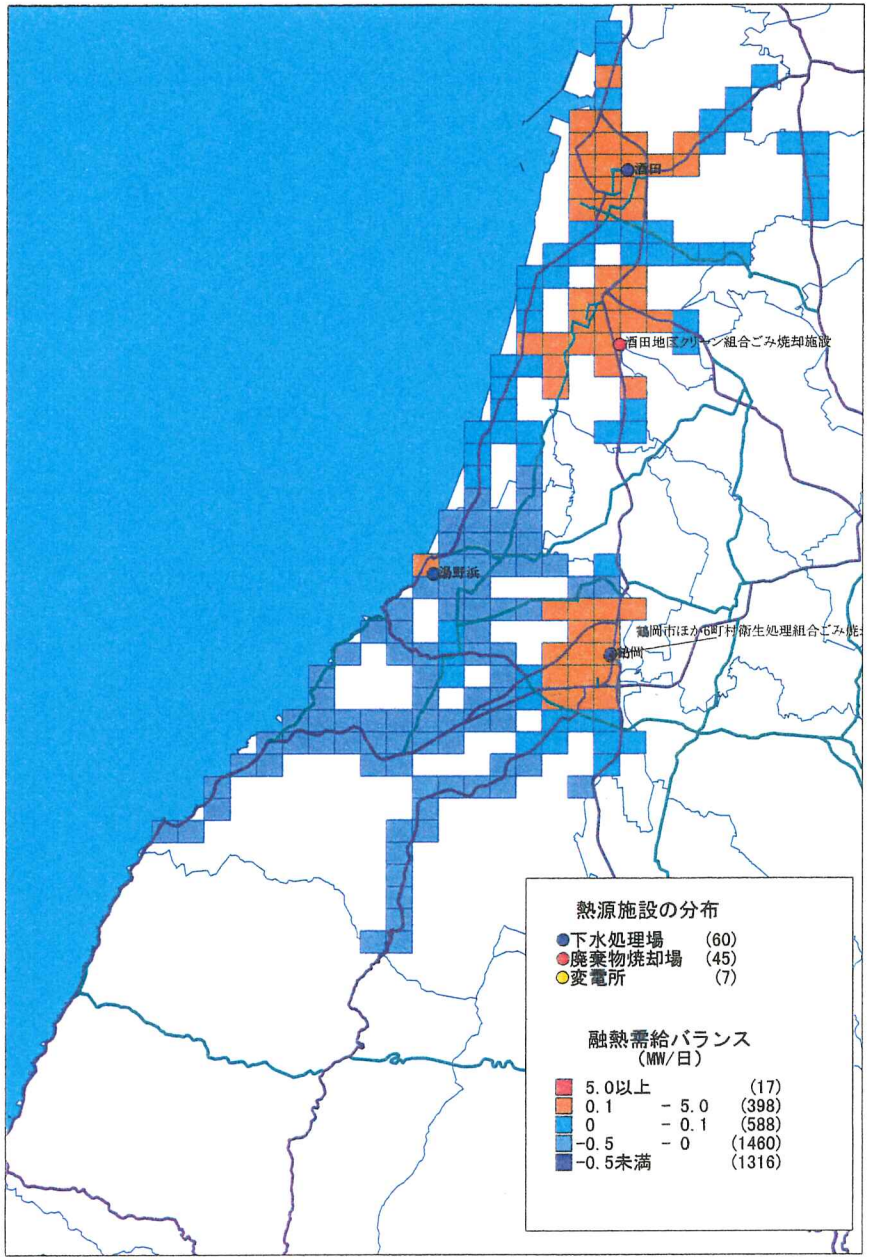
図表　山形におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



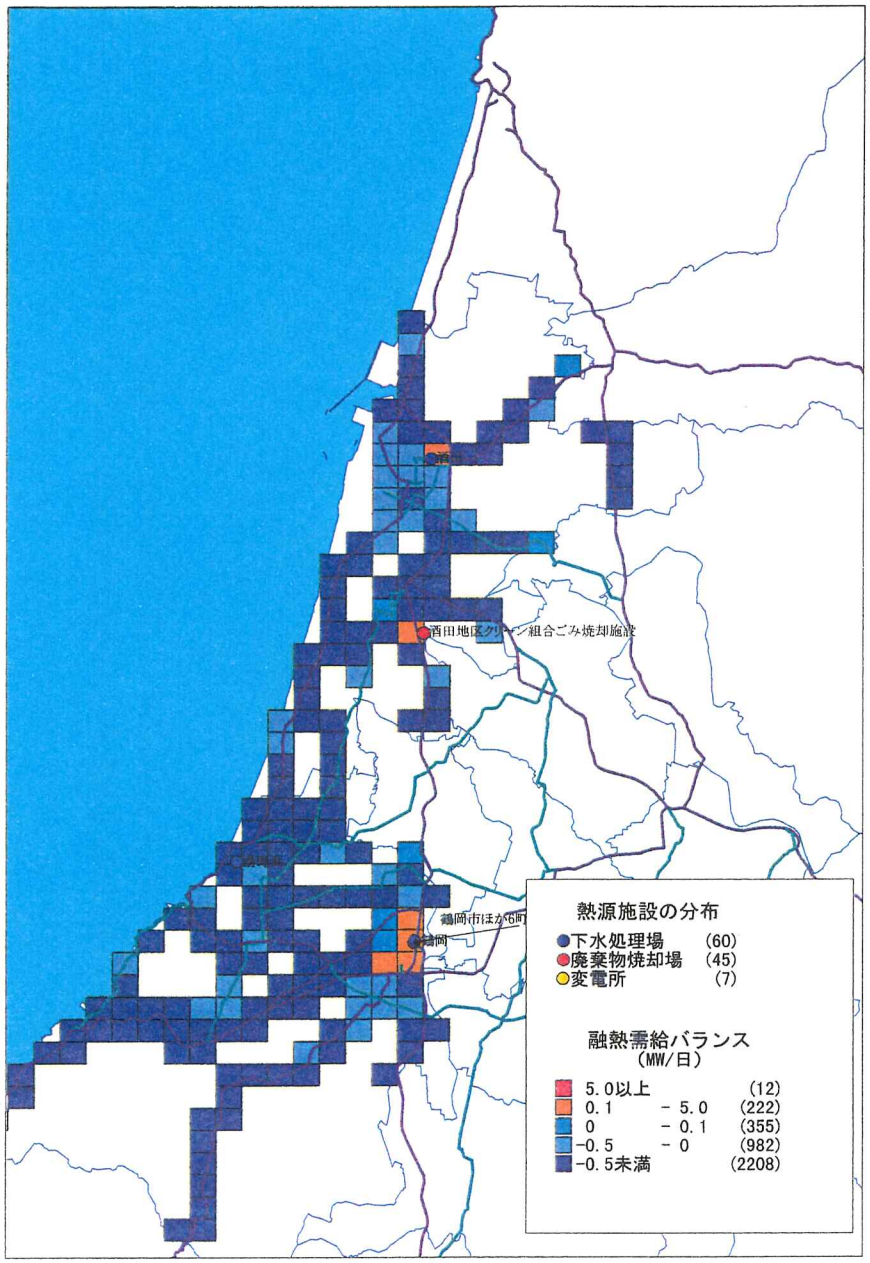
図表　山形におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



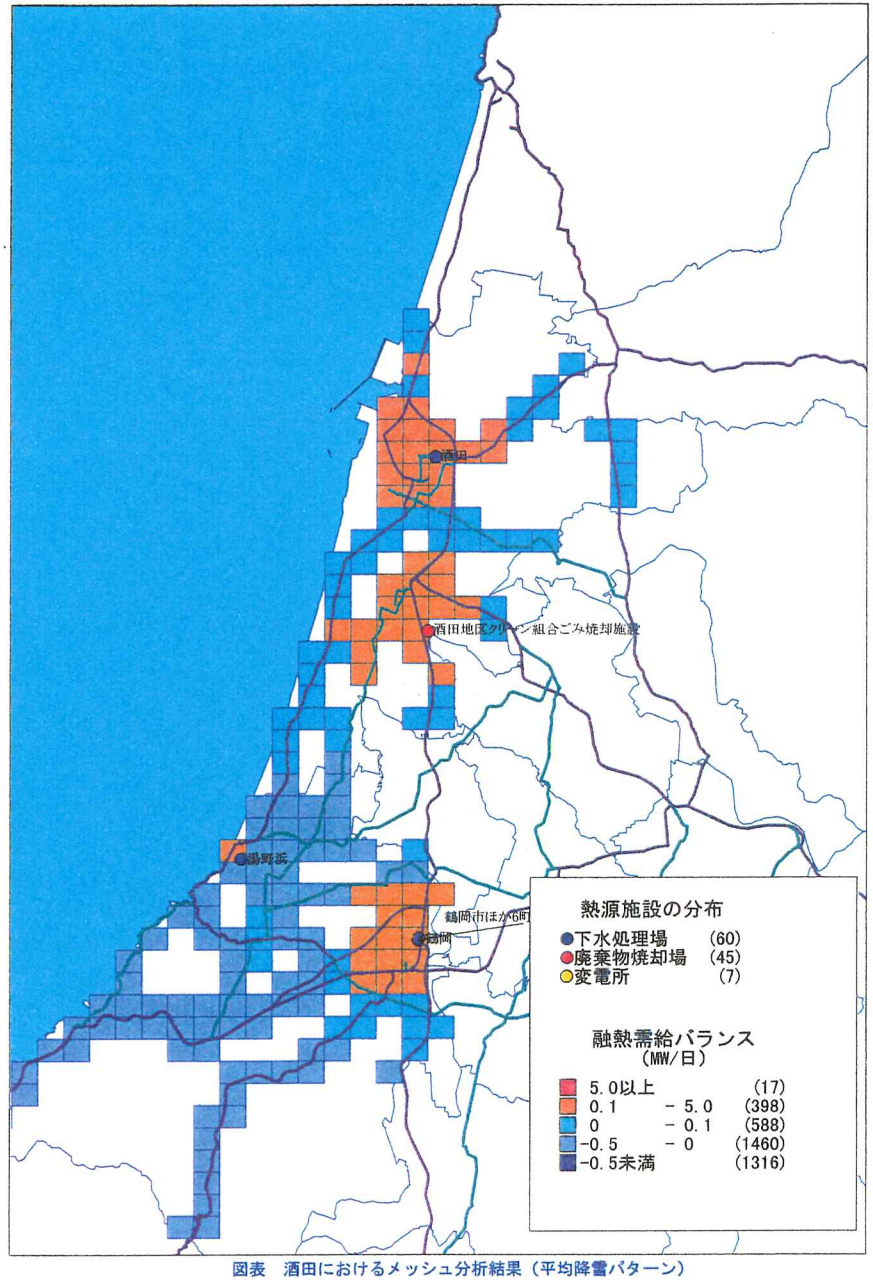
図表　鶴岡におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



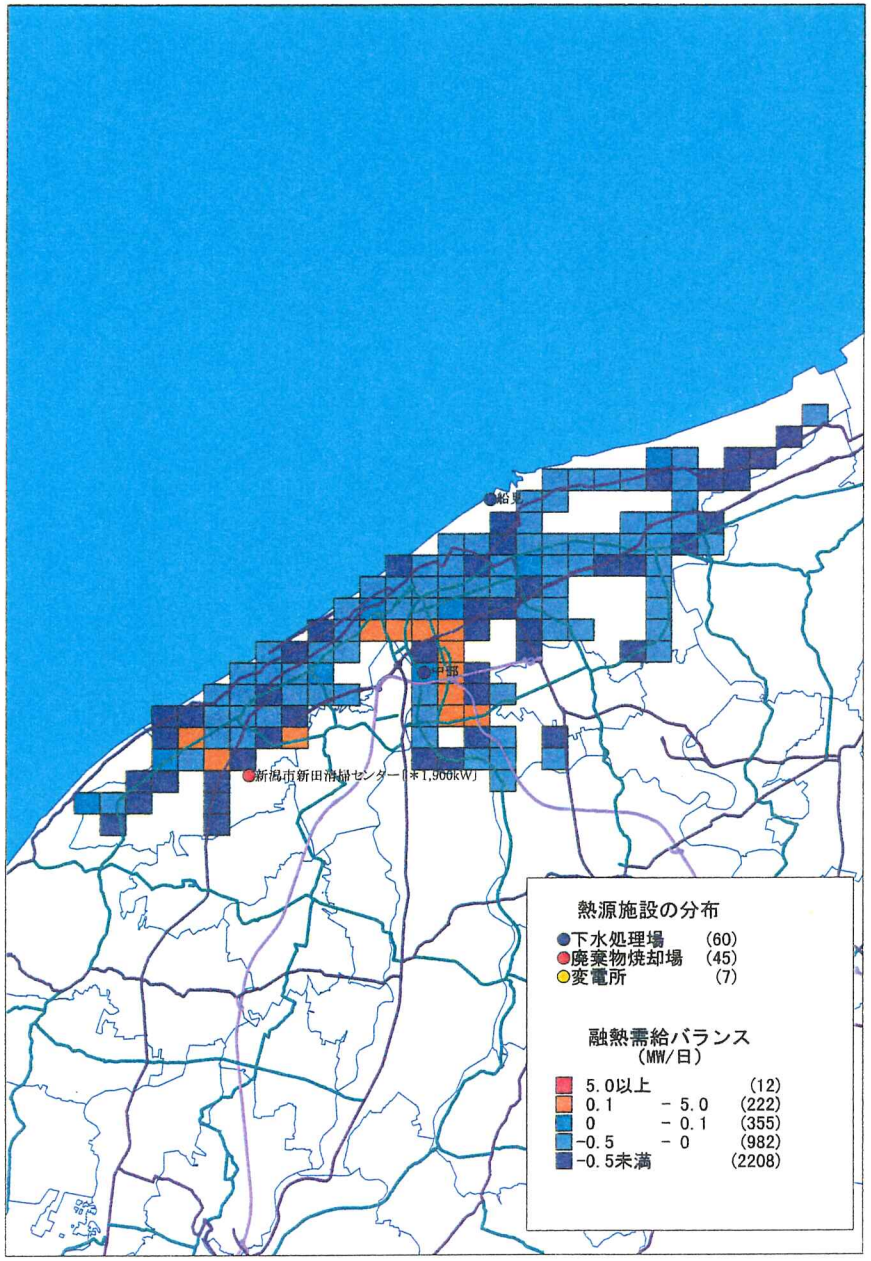
図表　鶴岡におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



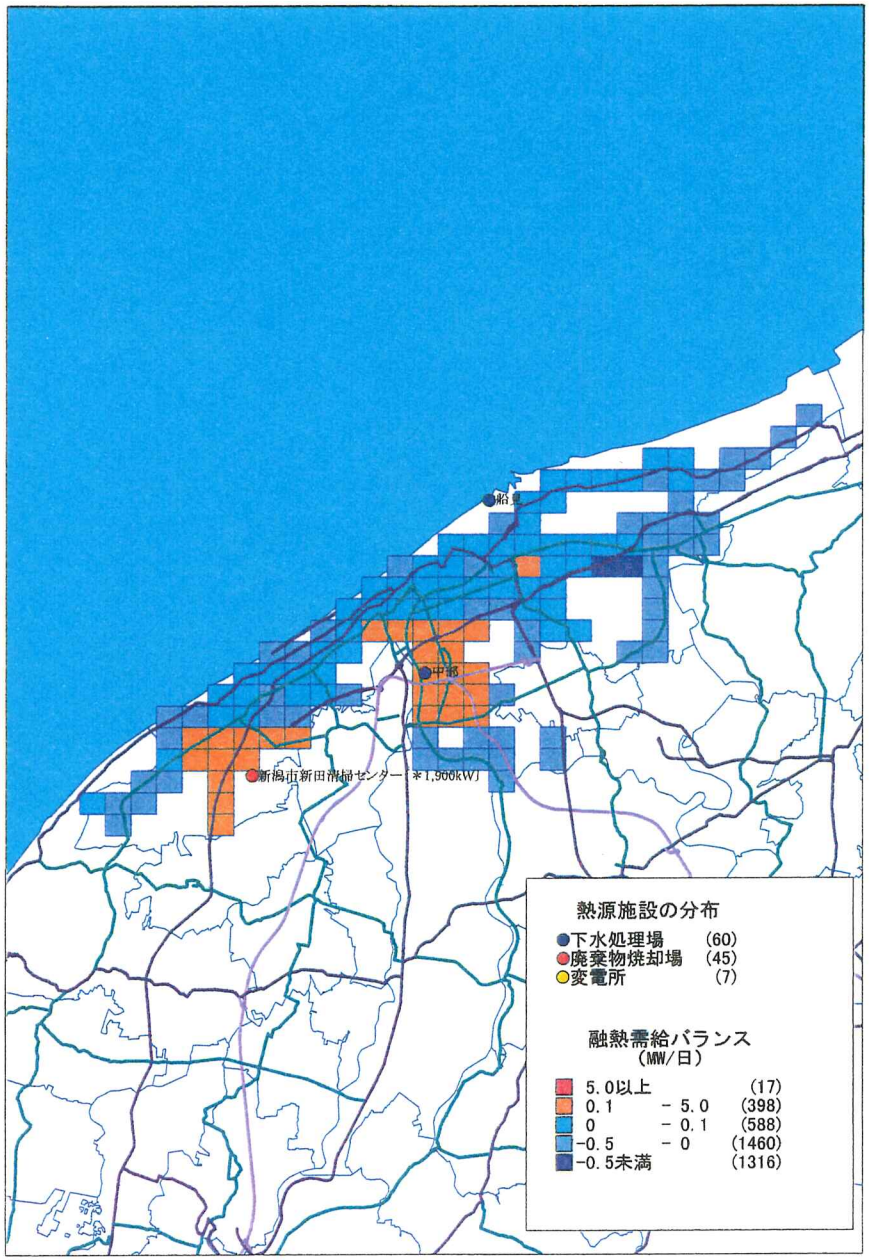
図表　酒田におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



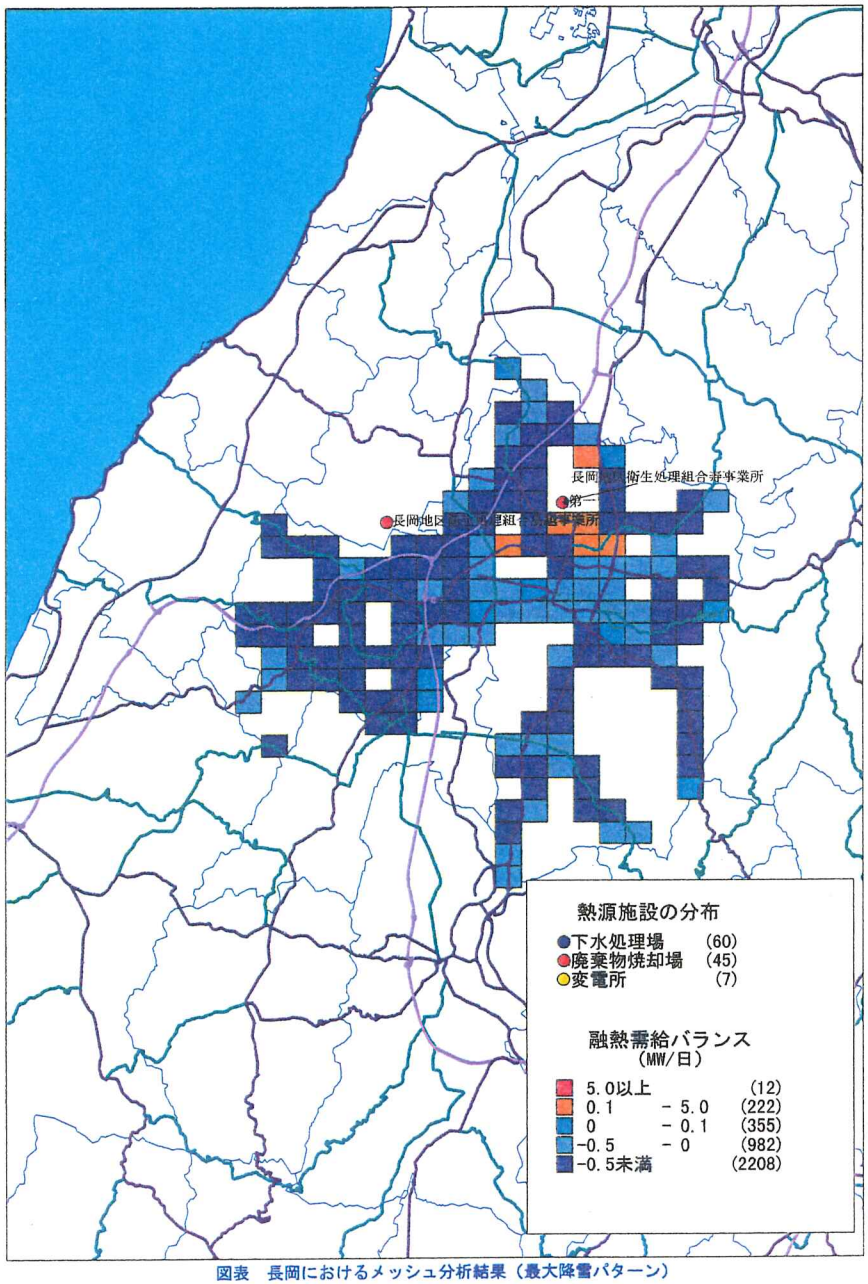
図表　酒田におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



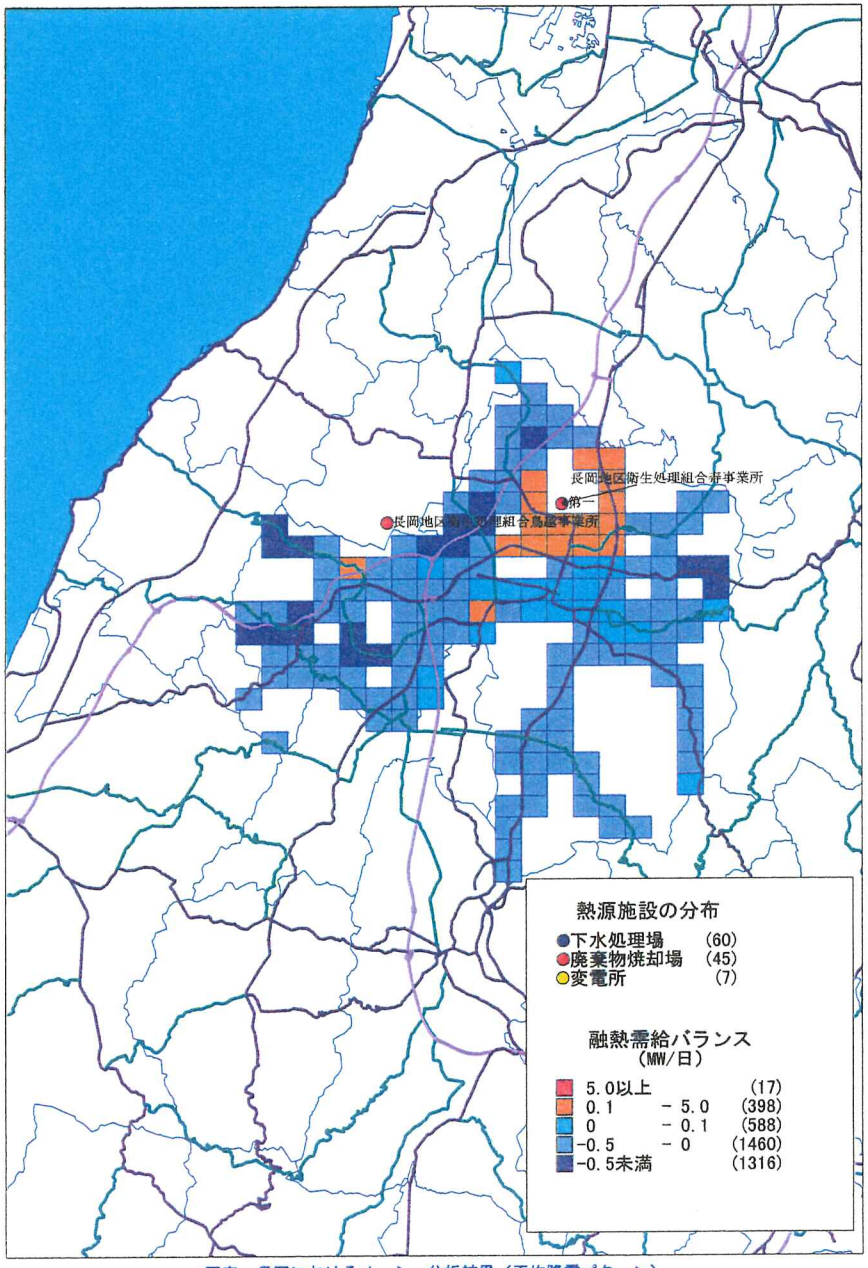
図表　新潟におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



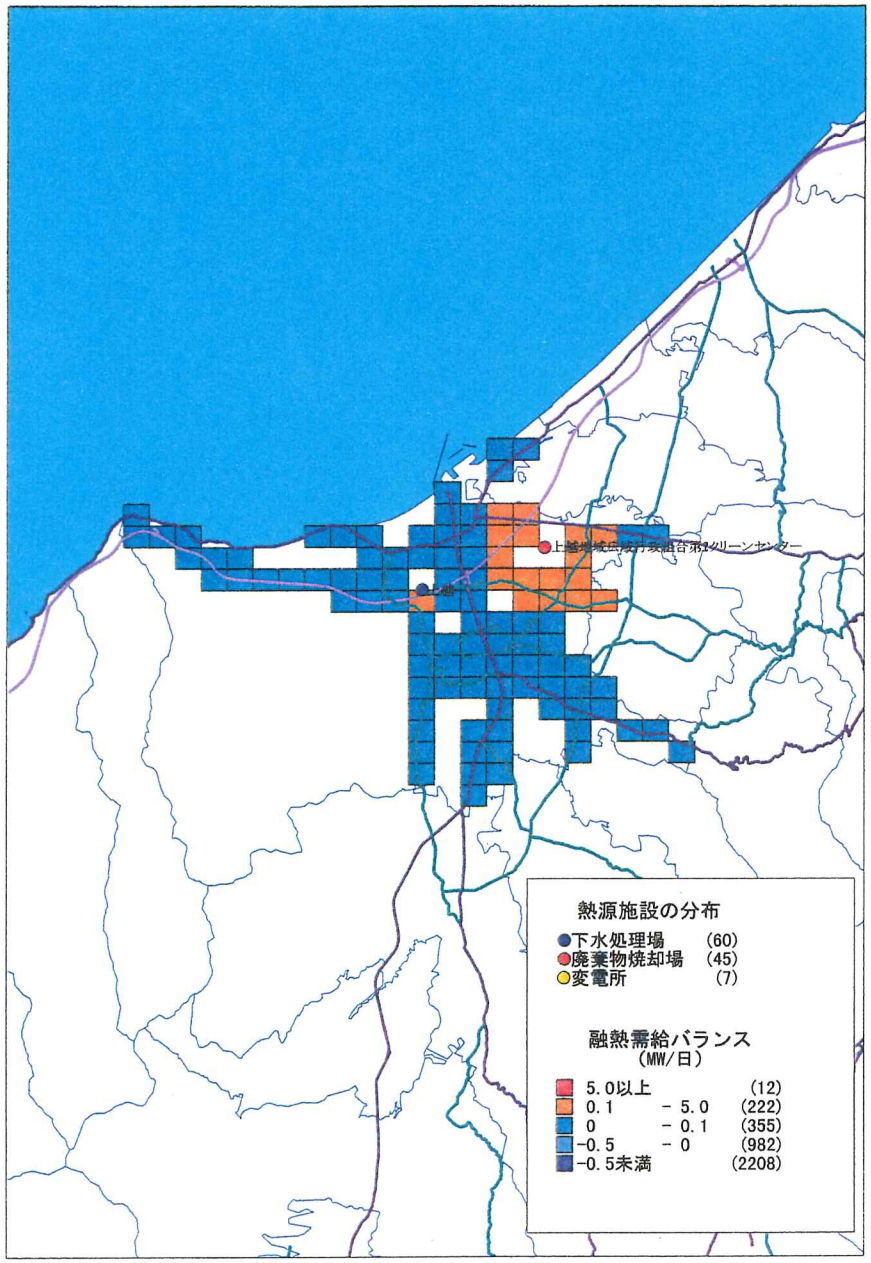
図表　新潟におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



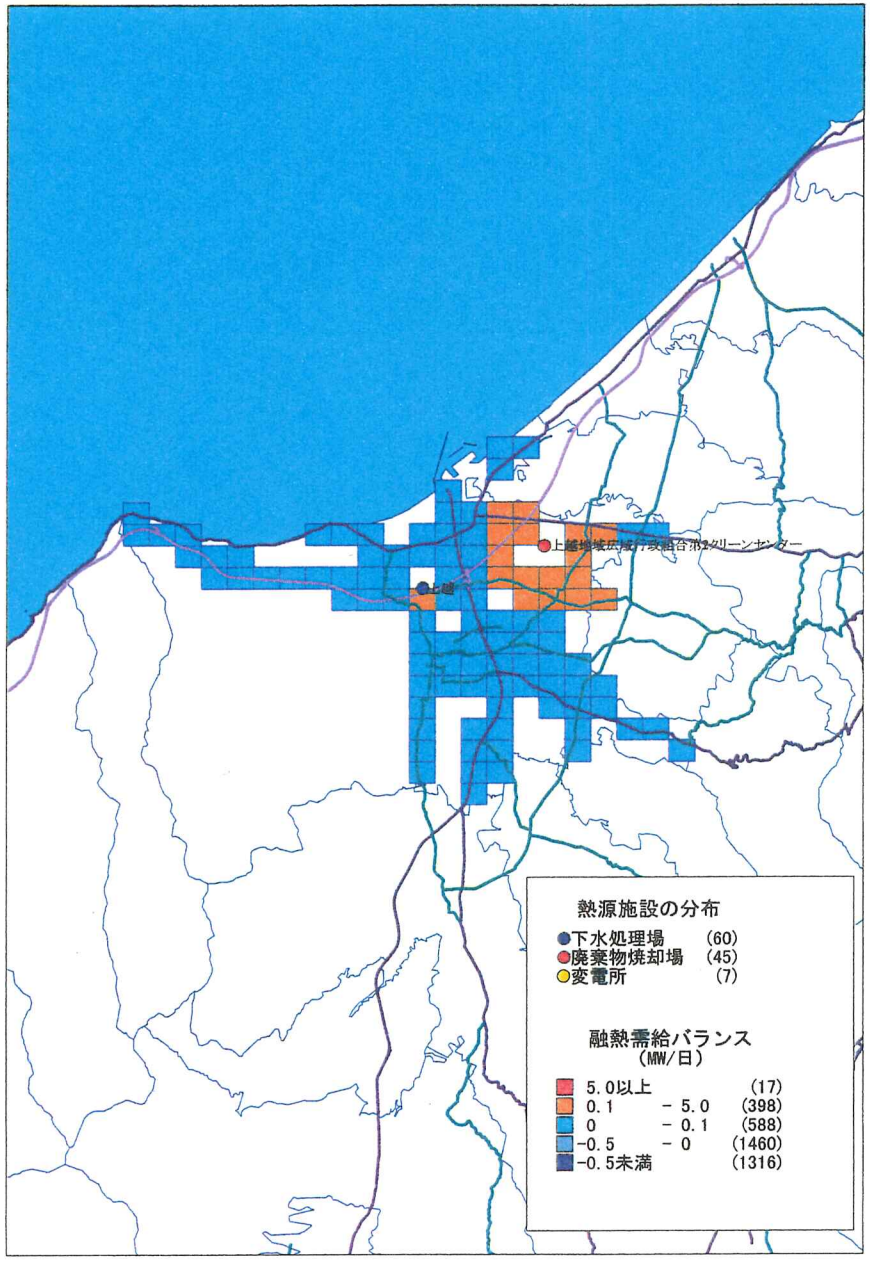
図表　長岡におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



図表　長岡におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）

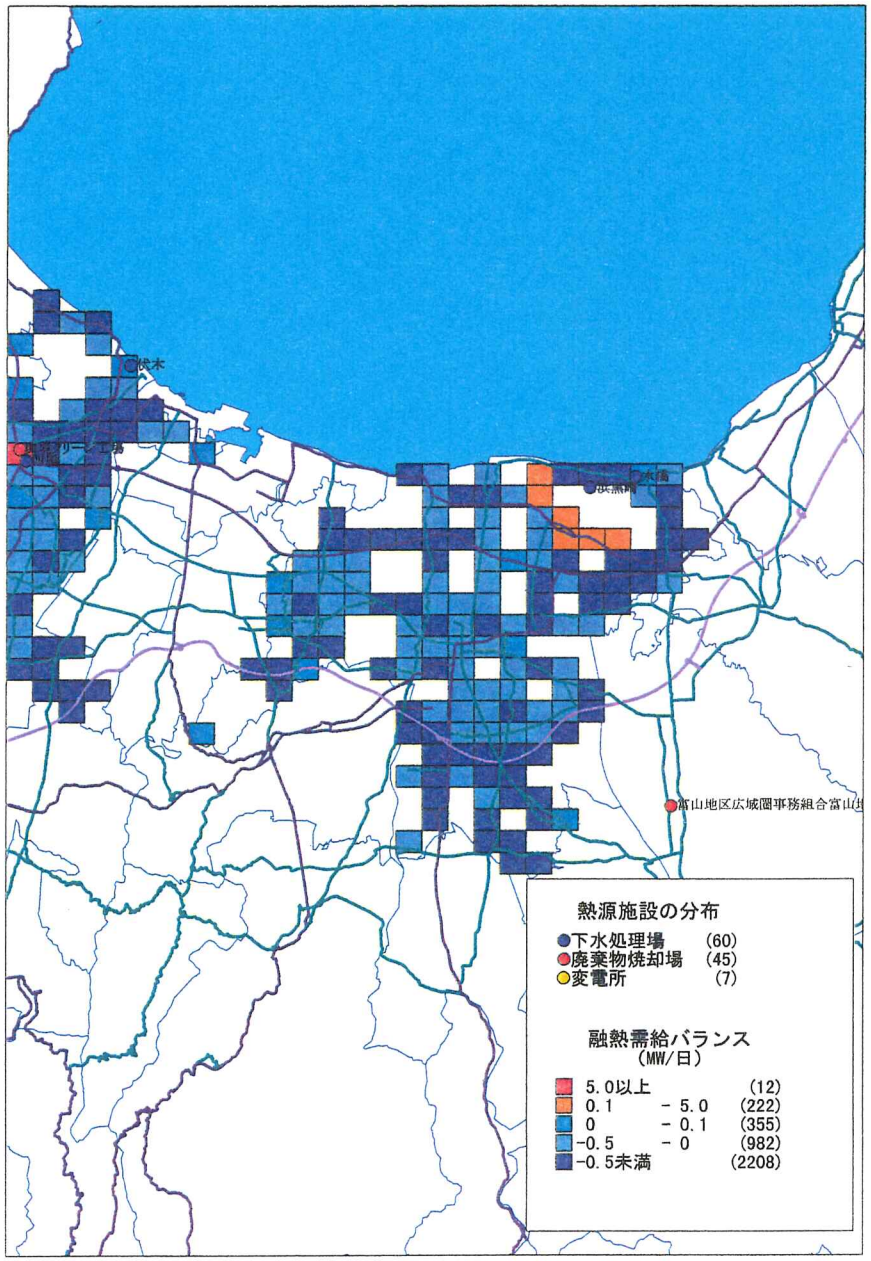


図表　上越におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）

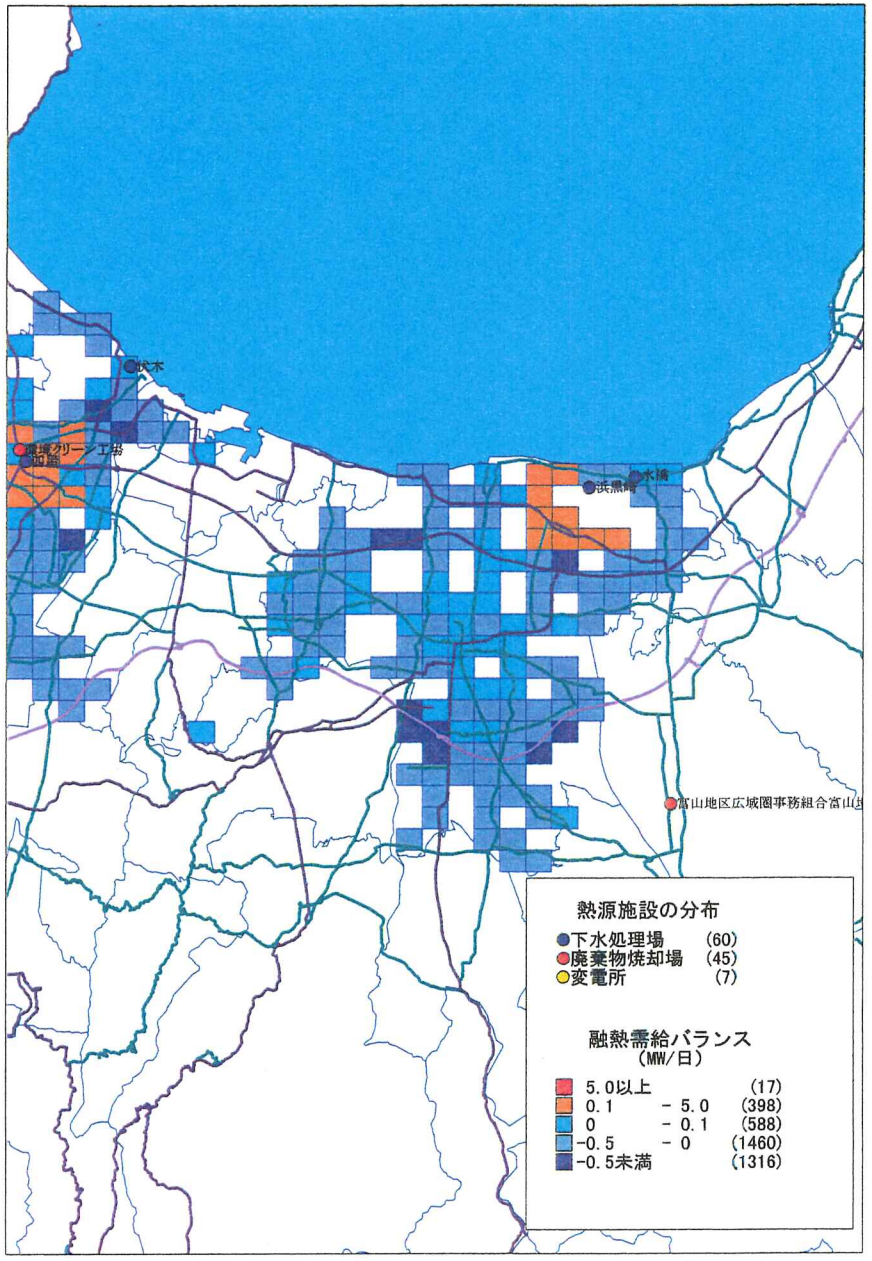


図表　上越におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）

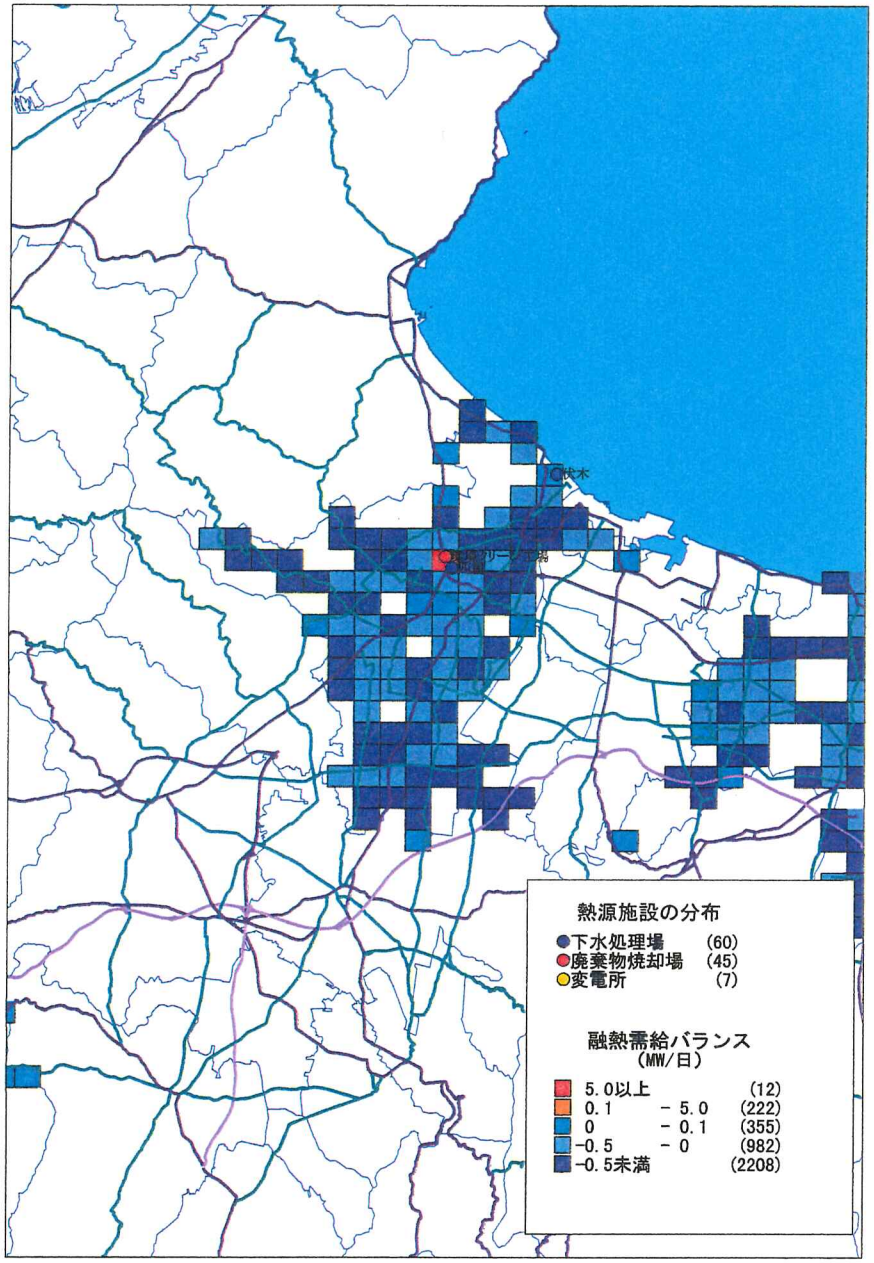




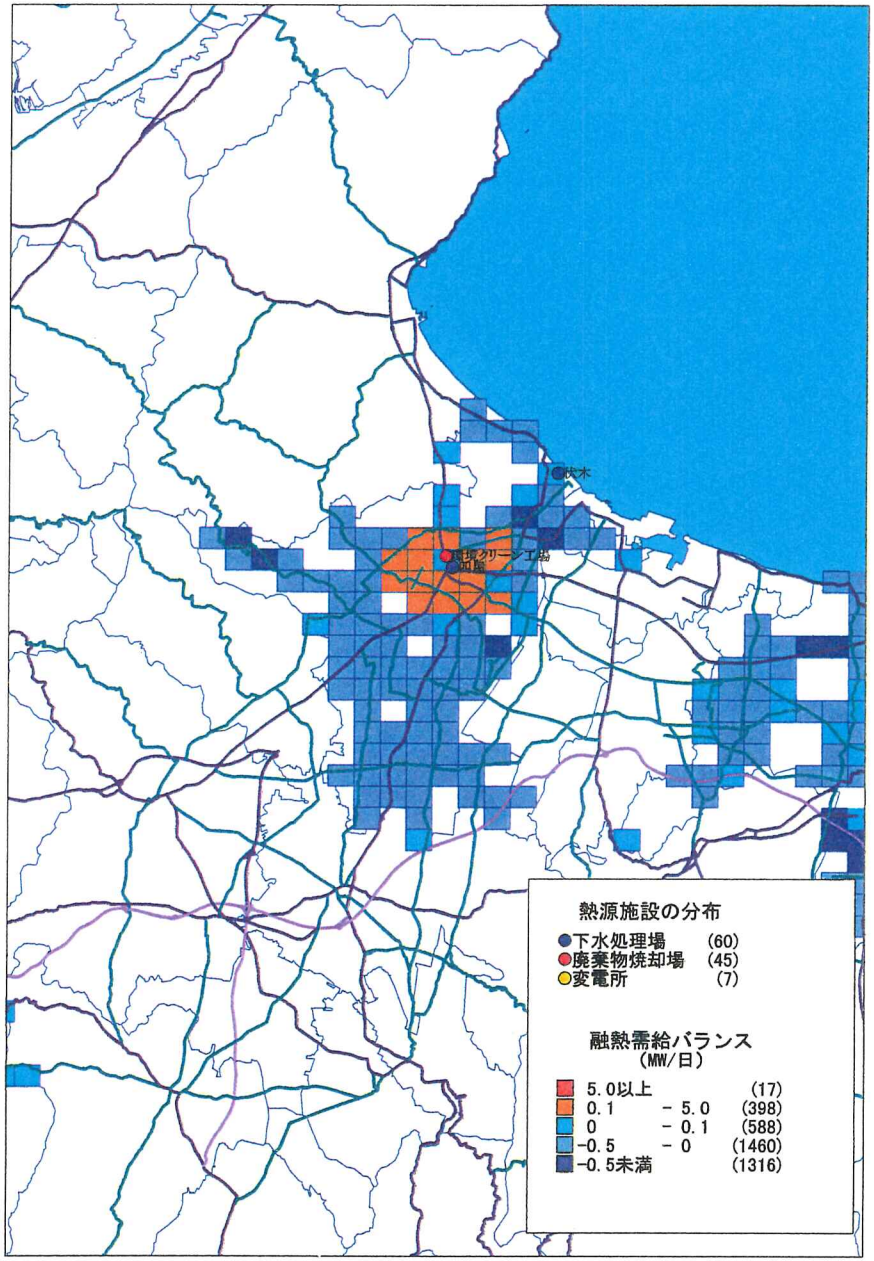
図表　富山におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



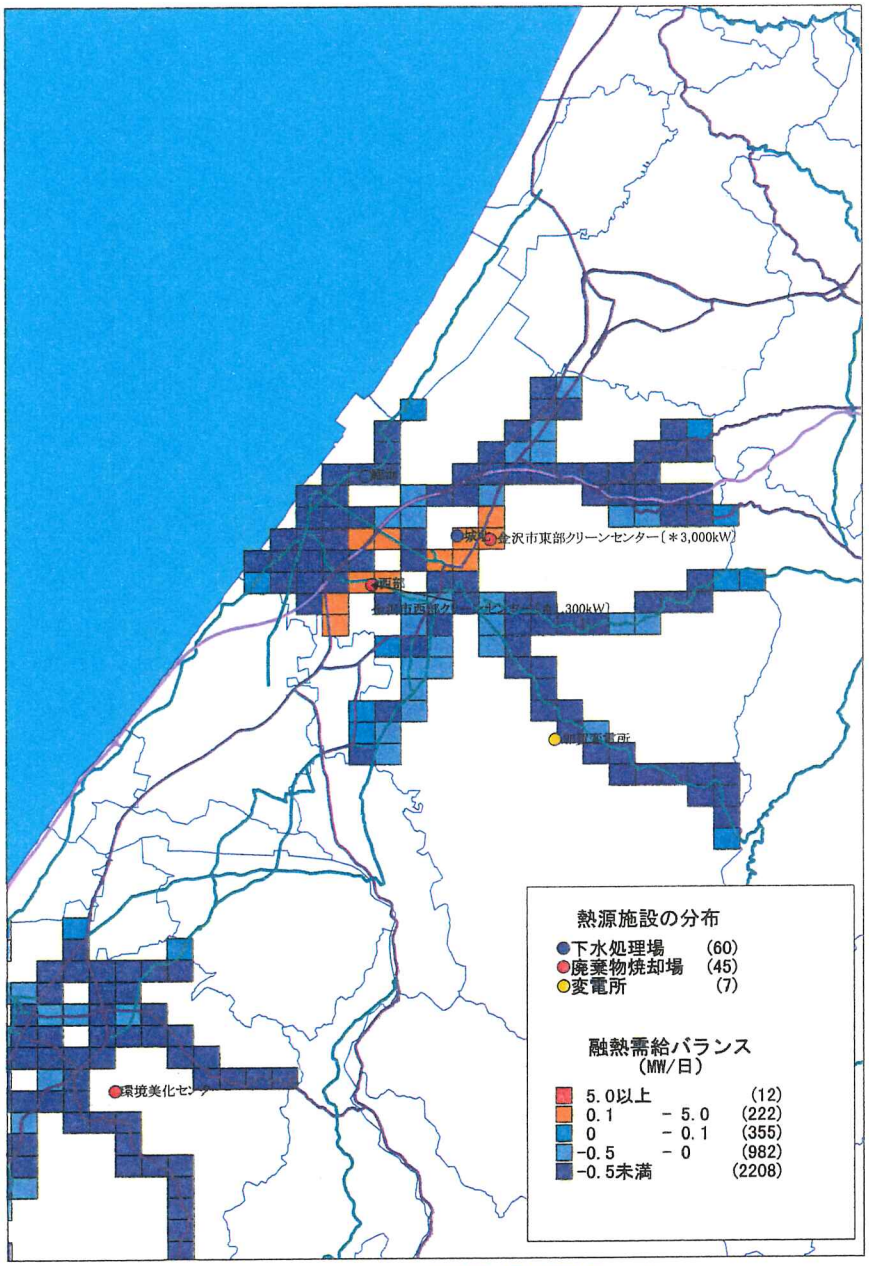
図表　富山におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



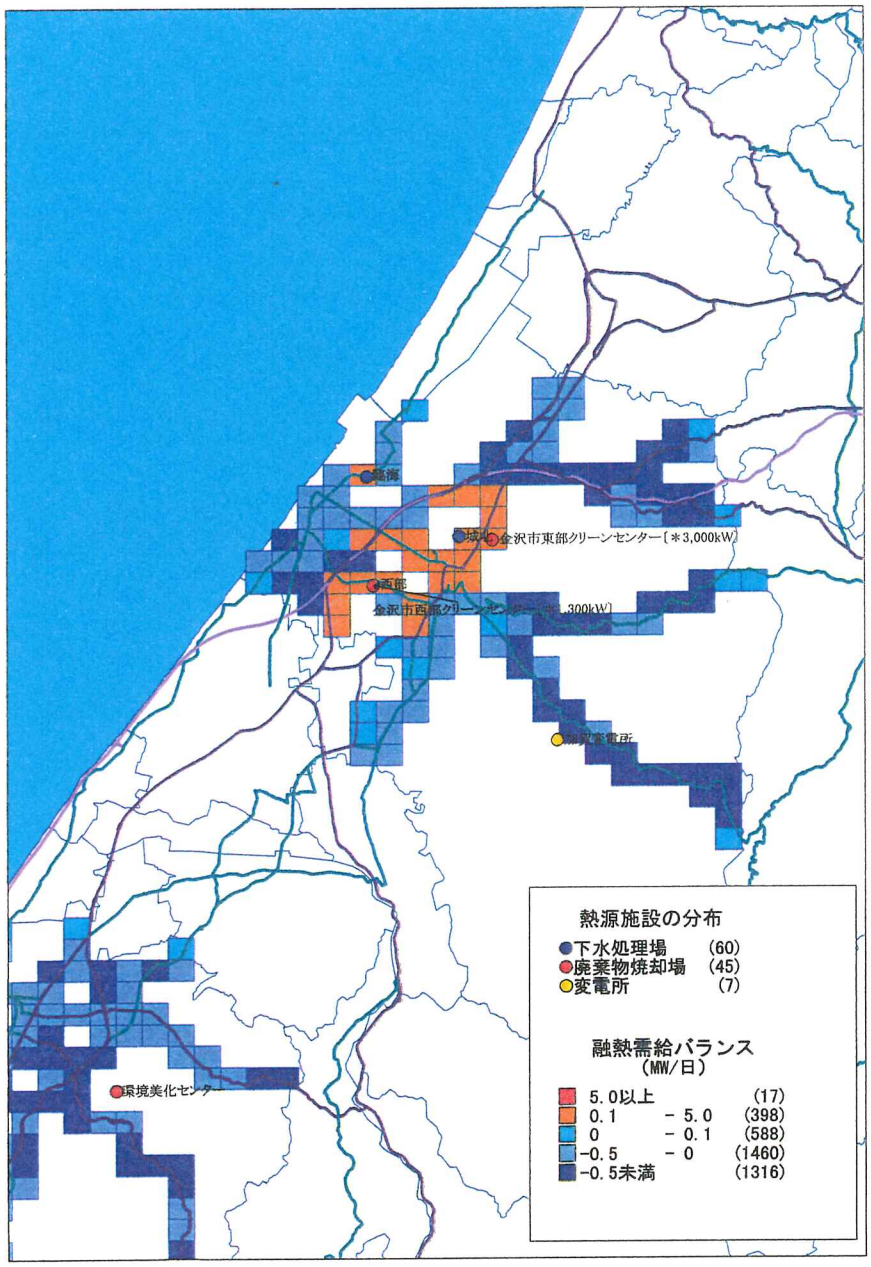
図表　高岡におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



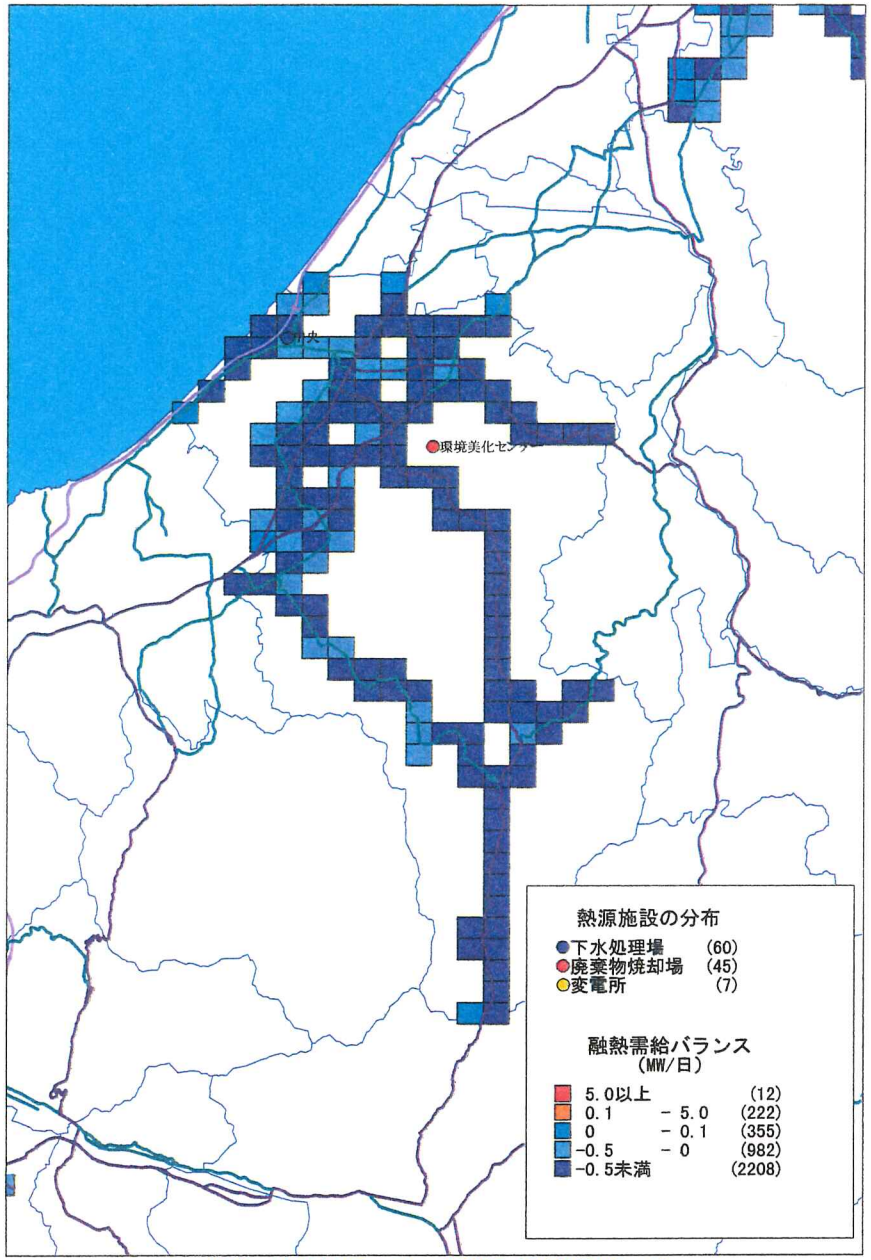
図表　高岡におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



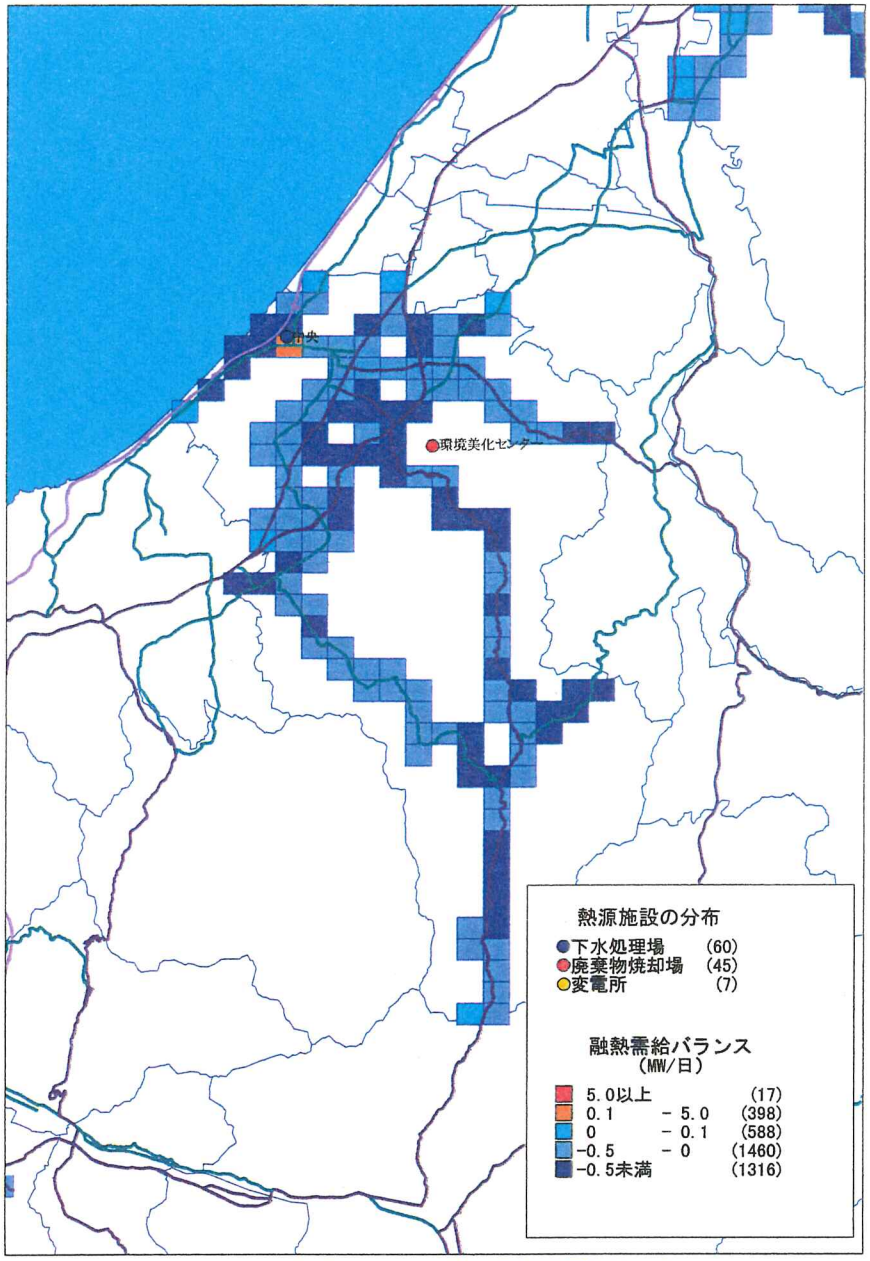
図表　金沢におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



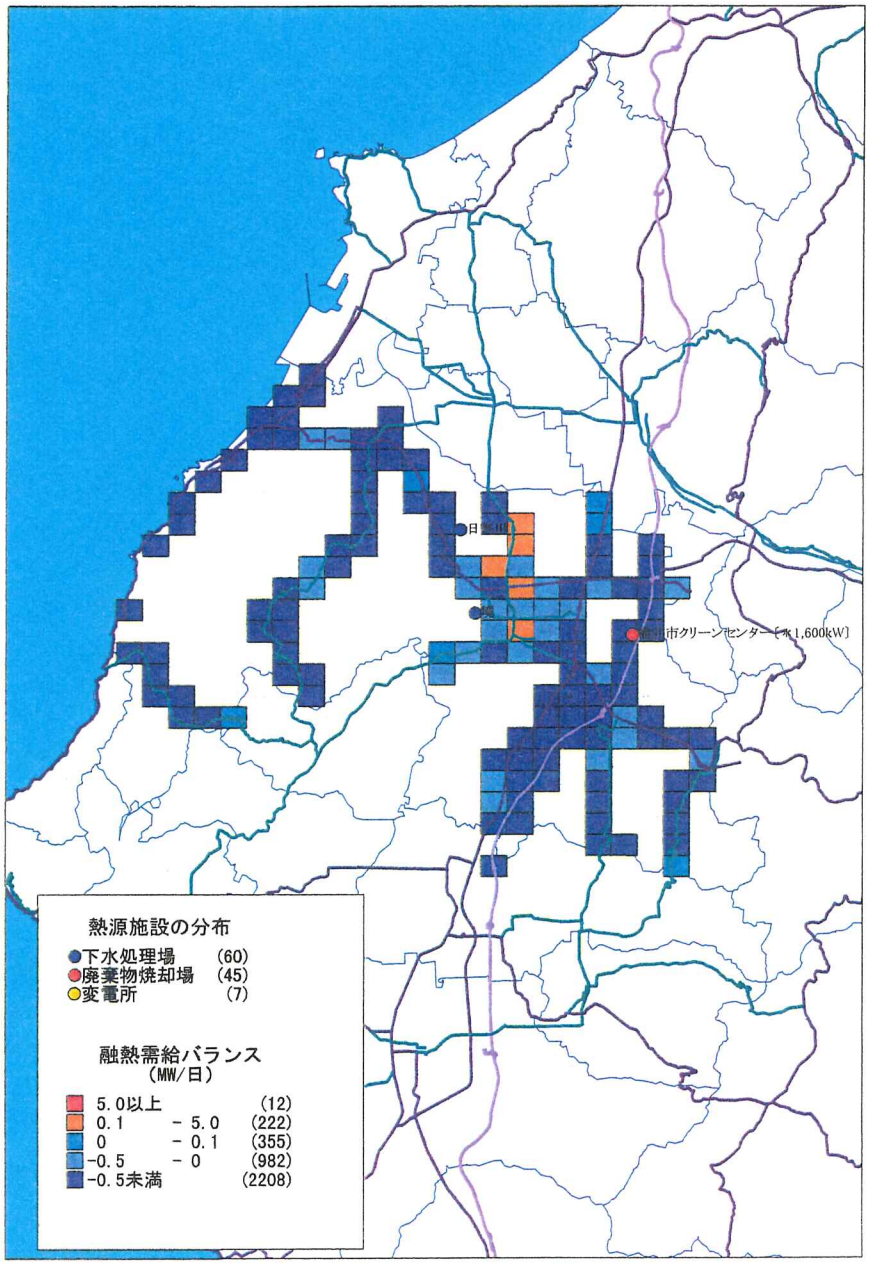
図表　金沢におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



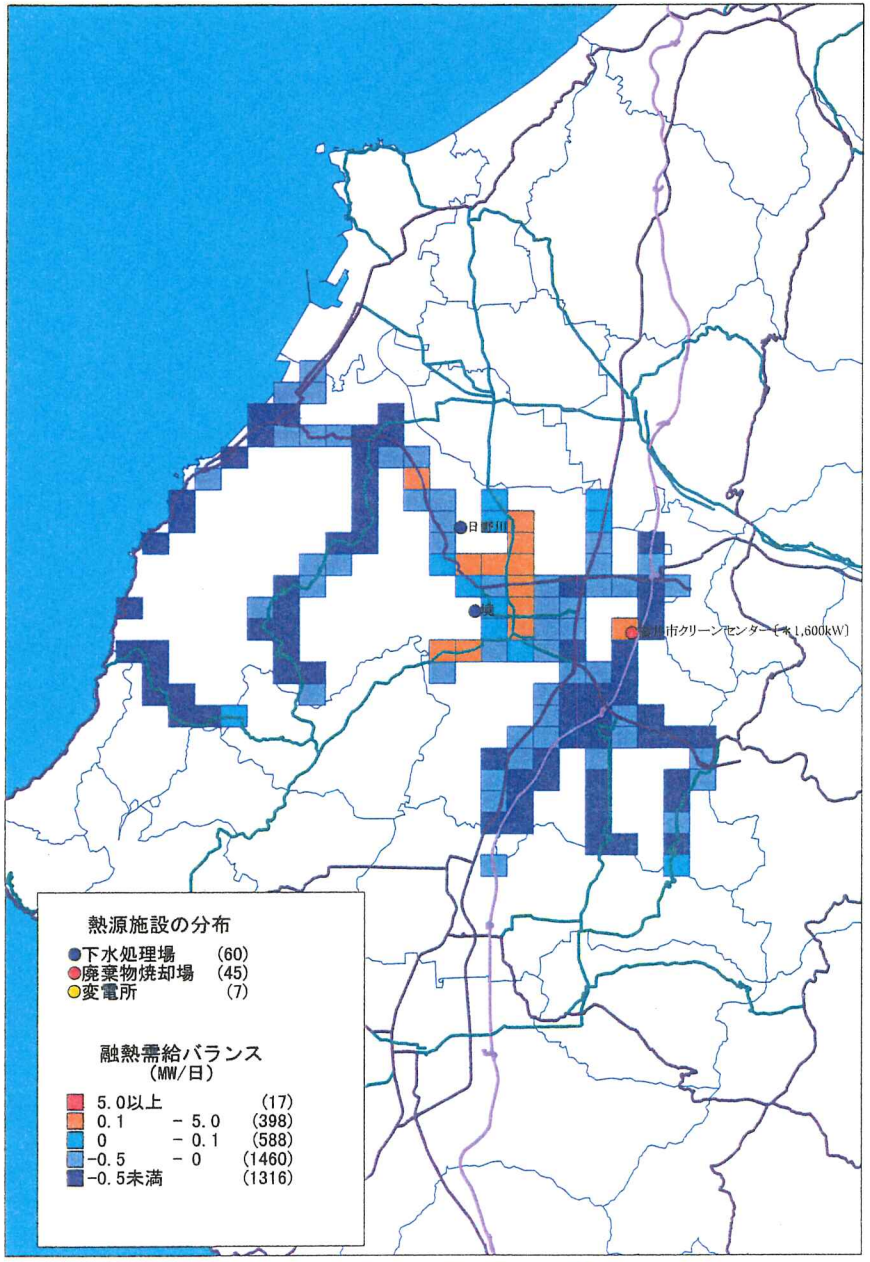
図表　小松におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



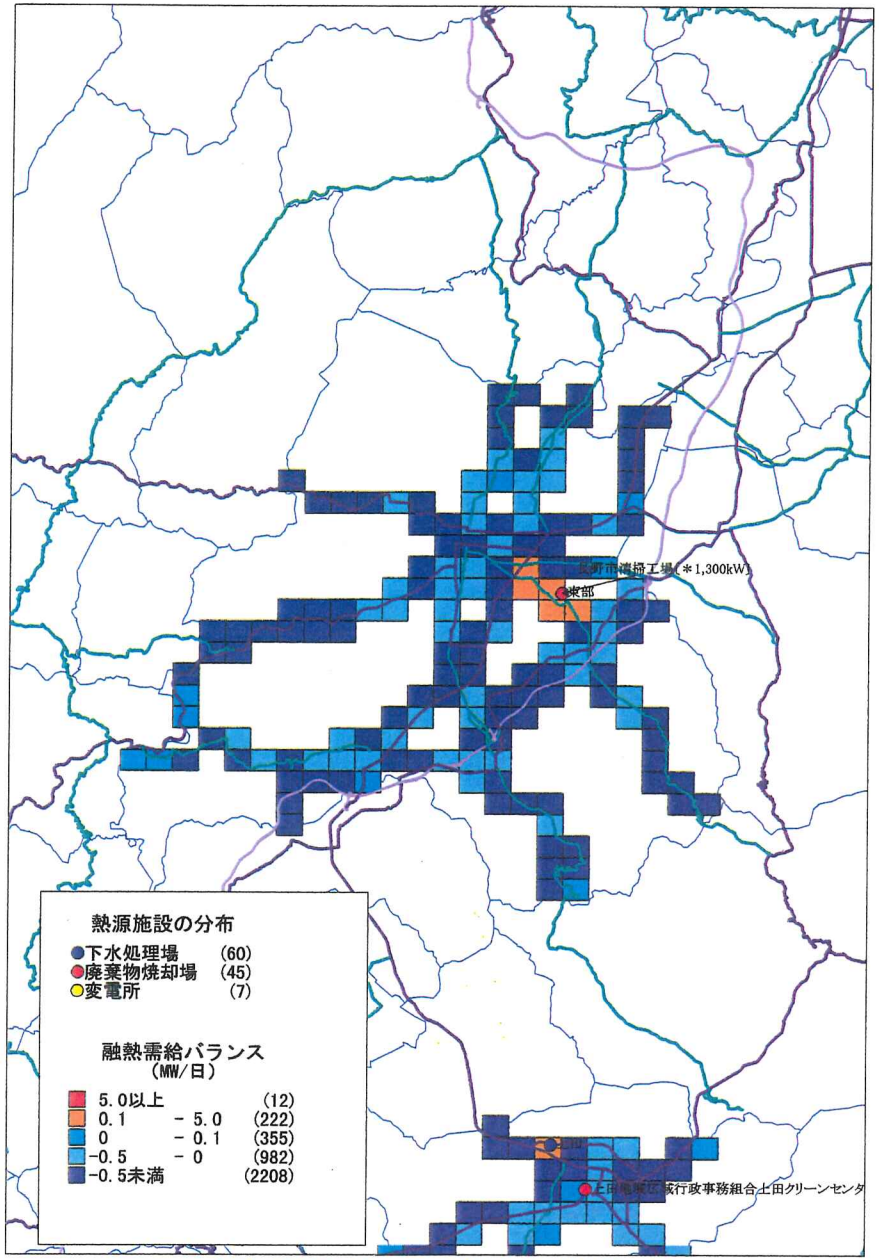
図表　小松におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



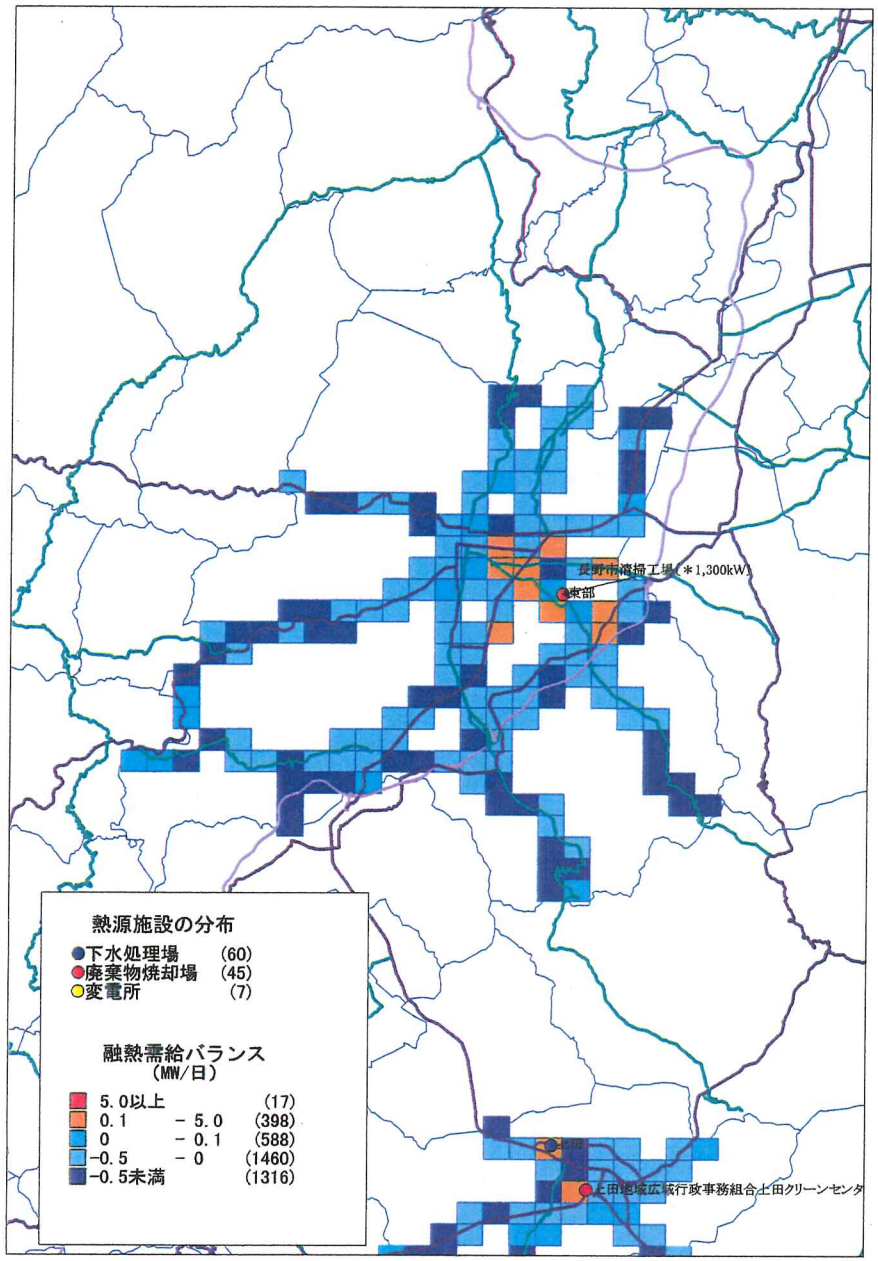
図表　福井におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



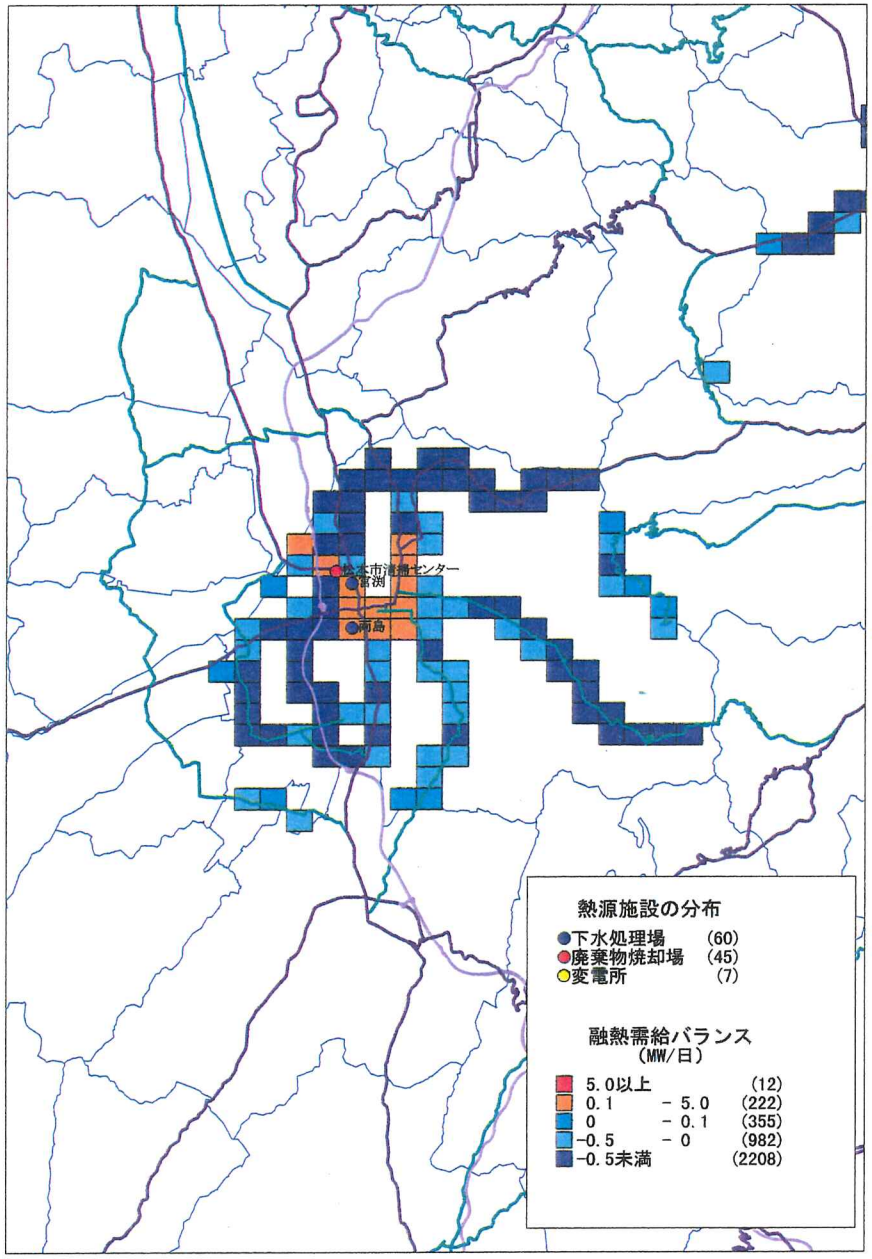
図表　福井におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



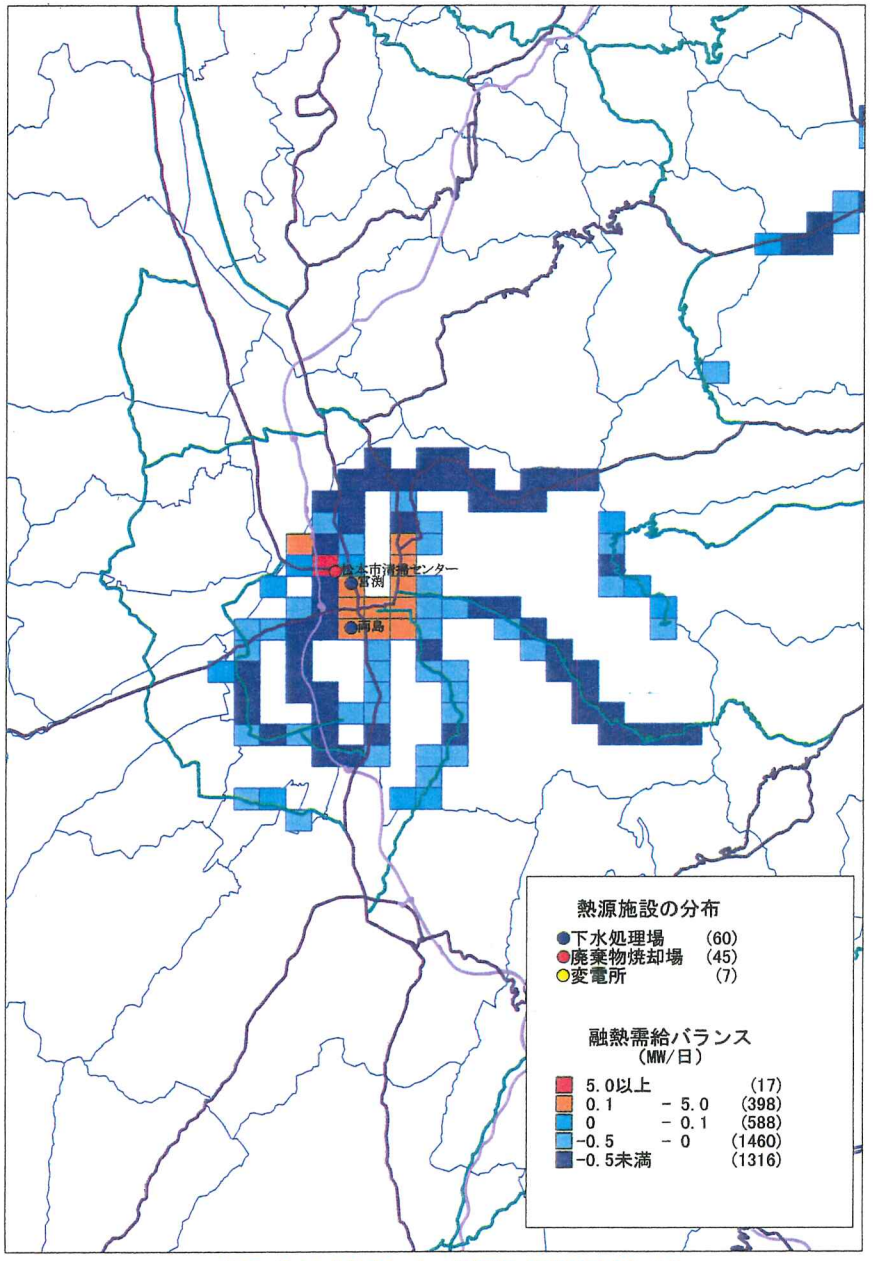
図表　長野におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



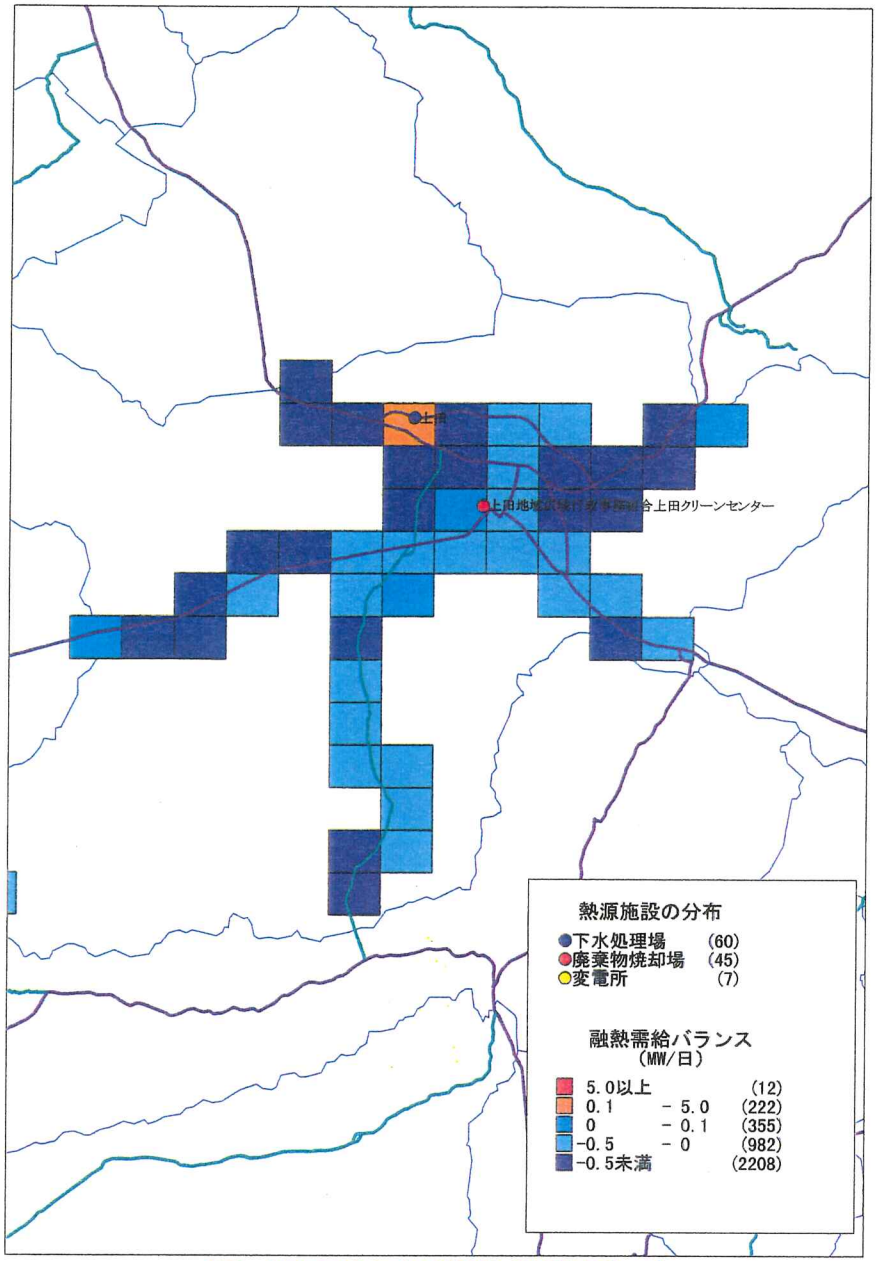
図表　長野におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



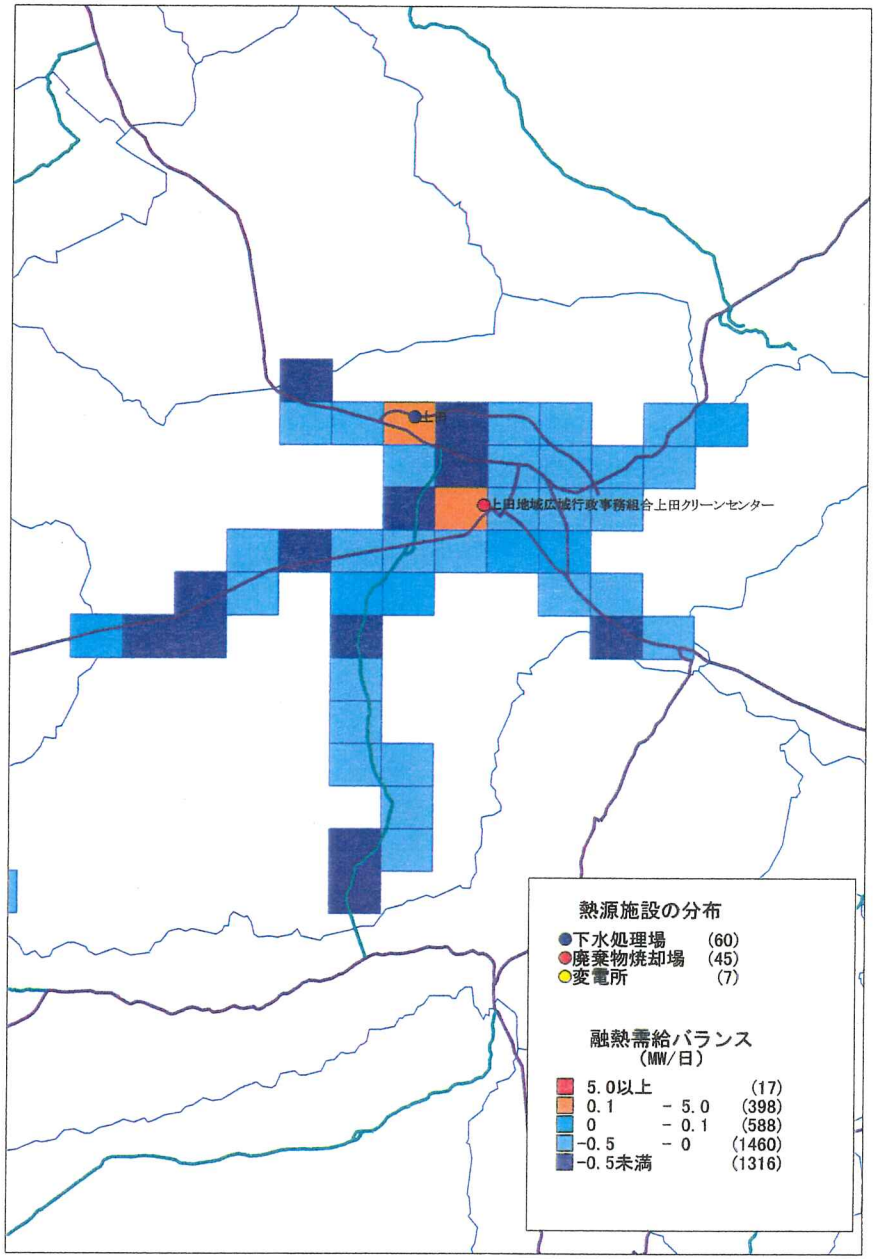
図表　松本におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



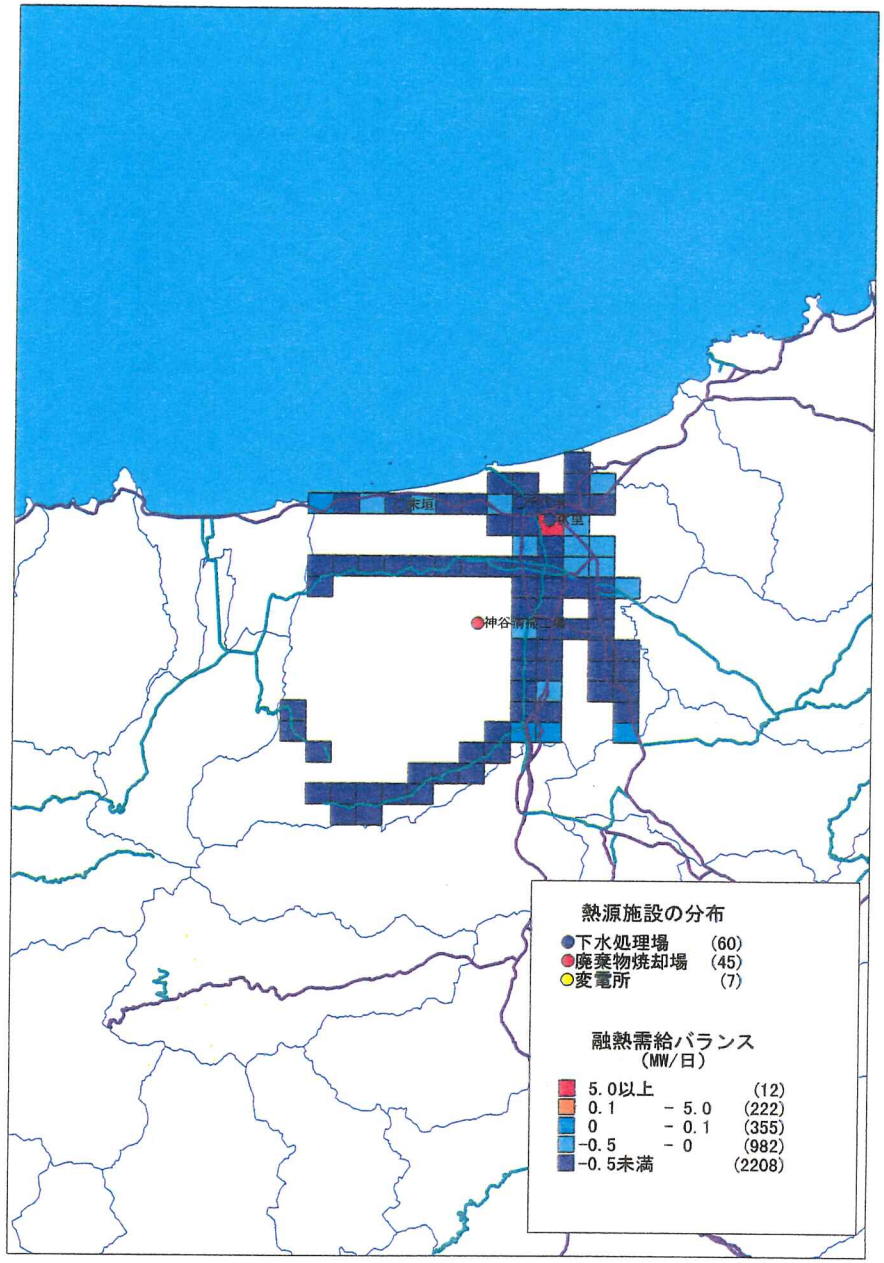
図表　松本におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



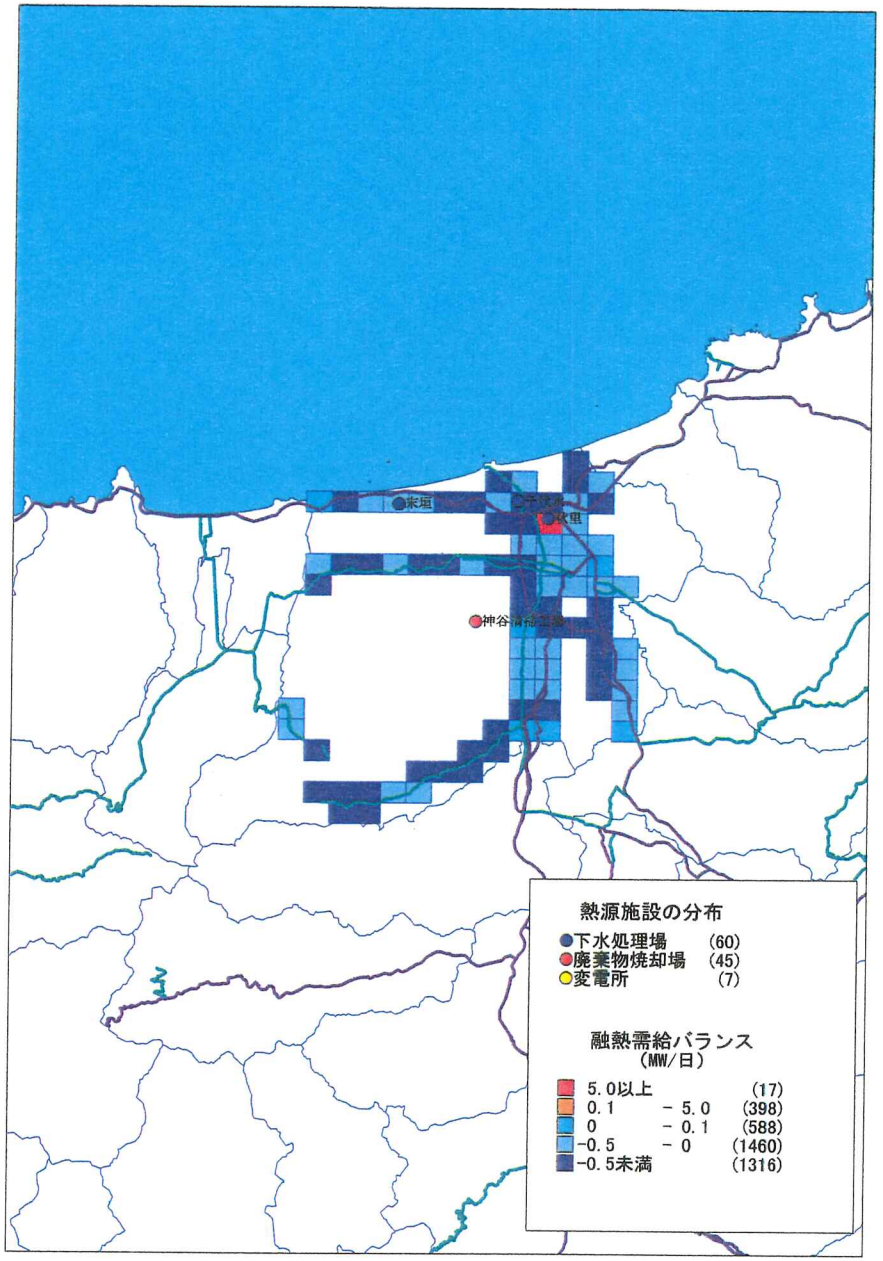
図表　上田におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



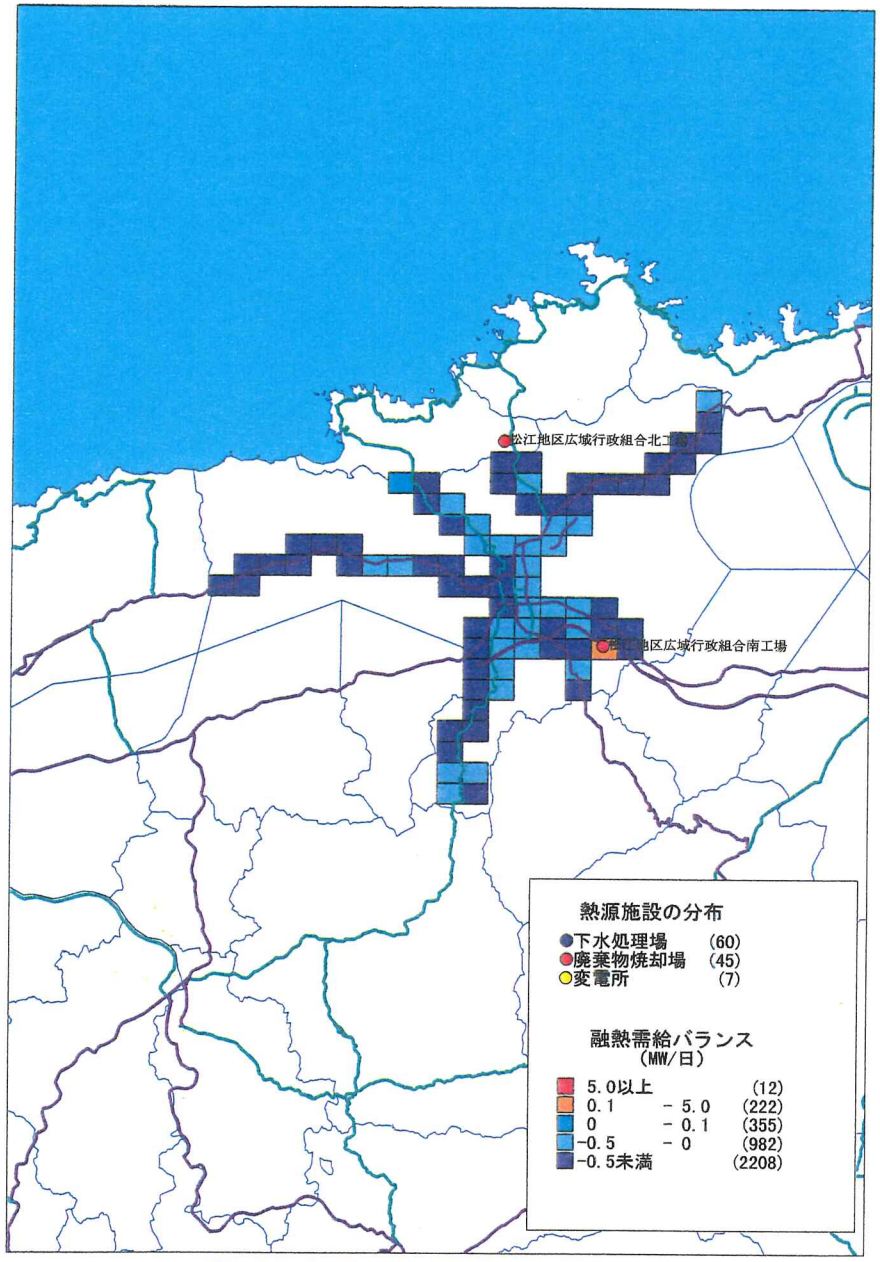
図表　上田におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



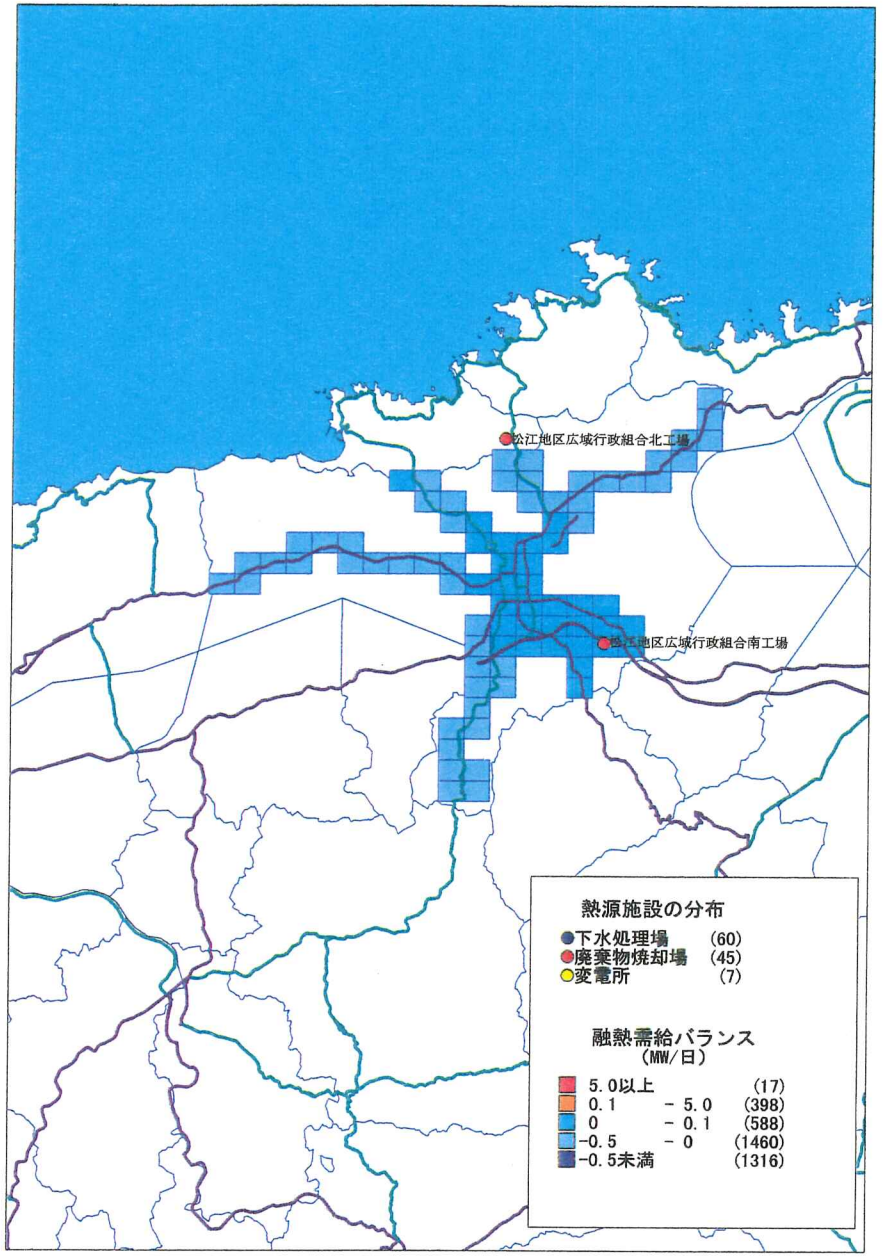
図表　鳥取におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



図表　鳥取におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）



図表　松江におけるメッシュ分析結果（最大降雪パターン）



図表　松江におけるメッシュ分析結果（平均降雪パターン）