

ボックスカルバートを有する道路盛土
による冷気流試験調査報告書

昭和40年3月

建設省土木研究所 トンネル研究室

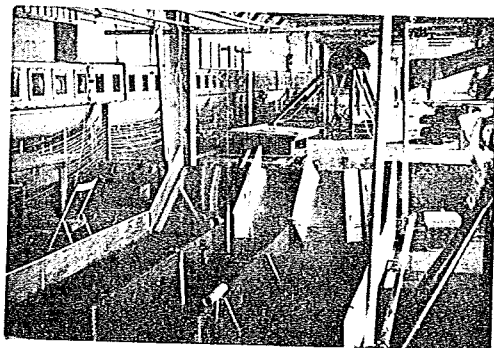


写真-1 冷気流模型実験装置

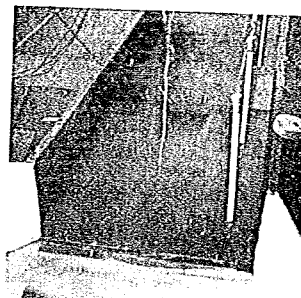


写真-2 カルパートボックス上流側
(サーミスタ温度計と水銀温度計)

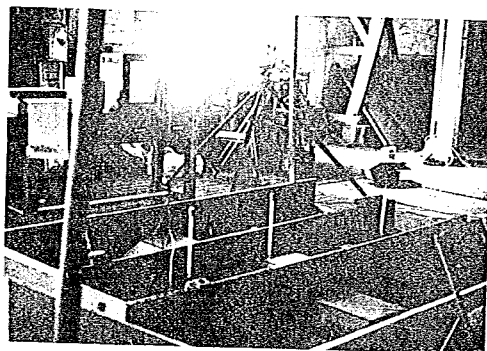


写真-3 サーミスタ温度自記録計



写真-4 カルパートボックス下流側
(開口率 9%)

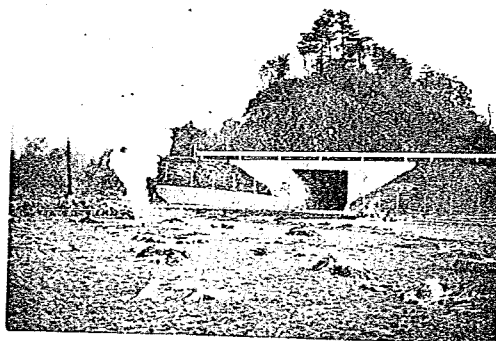


写真-5 現地試験 (発煙筒による冷気流観察)

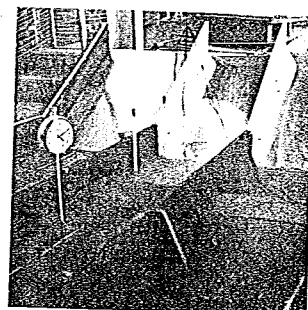


写真-6 冷気の停滞状況

目 次

	頁
まえがき.....	1
1. 調査目的.....	2
2. 調査方法.....	2
2-1 模型装置概要.....	2
2-2 試験器材.....	2
2-3 試験方法.....	4
3. 調査結果と考察.....	5
3-1 冷気流による温度分布.....	5
3-2 盛土による温度変化.....	17
3-3 斜面高による温度変化.....	22
3-4 ボックスカルバートの開口率による温度分布.....	24
3-5 ボックスカルバートの開口率による冷気流出量.....	39
4. 冷気流に関する理論式.....	47
5. 相似率.....	59
6. 固態二酸化炭素の特性.....	61
7. 現地試験.....	64
8. 結び.....	68

ま え が き

比較的高い道路用盛土（ $5\text{ m} \sim 10\text{ m}$ ）を広い範囲にわたって建設する場合、自然環境の変化から気象におよぼす影響が考えられる。その一つに冷気流の停滞と冷気湖の形成がある。日本道路公団静岡建設局管内庵原地区における東名高速道路の建設に際し、「堰堤等の建設が平坦地柑橘園に及ぼす気象災害について」の報告書（農林省農業技術研究所、静岡県柑橘試験場）により農業気象にあたえる影響が大きいことが発表されている。これに関連して道路公団から今年度の委託試験として盛土にボックスカルバートを開けた場合、気象の影響特に冷気流の流出がどのように変わるかの問題について試験調査を依頼されたのであるが、もとより冷気流の問題は気象学の分野であり文献によれば、冷気流発生の機構、流出の条件等についてなお未解決の面が多いといわれているのでここでは単純にボックスカルバートから冷気の流出が上流側平地の温度場にいかなる影響をあたえるかという問題に限定し模型実験によりこれを解明しようと試みたものである。

1. 調査目的

平地にボックスカルバートを有する道路盛土を築提した場合盛土区間に対するカルバートの間隔あるいは盛土区間の縦断面積に対するカルバート断面積の比、すなわち開口率により冷気流がどのような影響を受けるか、また盛土の上流側平地上の温度がどのように変動するか模型実験により明らかにする。

2. 調査方法

2-1 模型装置概要

図-2.1に示すように縮尺 $\frac{1}{100}$ の模型で、断熱材で作られた平地上にボックスカルバートを有する道路盛土が置かれ上流側に 30° 傾斜したアルミニウム板の斜面があり斜面の下はドライアイスが入れられるようにボックス状になっている。

ボックスカルバートの盛土断面に対する開口率を変えるため高さ 200 mm の断熱材の側壁の位置を移動できるようになっており盛土長さ $2,000\text{ mm}$ に対し開口率 2.25% 、同じく $1,500\text{ mm}$ に対し 3.0% 、 $1,000\text{ mm}$ に対し 4.5% 、 500 mm に対し 9% とそれぞれ盛土長さを変えて開口率を変えられるようになっている。側壁は高さ 200 mm 厚さ 25 mm のスチロール断熱材を使用し冷気が横方向に移動しないようにしてある。地盤ならびに斜面のボックス底板、盛土の内張りにも同じく厚さ 25 mm のスチロール断熱材を使用している。

道路盛土は、図-2.2に示すように路面巾 250 mm 、底巾 550 mm 、高さ 80 mm 法面勾配 $1:1.8$ のベニヤ板製でボックスカルバートは巾 60 mm 、高さ 60 mm 、長さ 330 mm でカルバート口と盛土法面の取付は図-2.2のような構造にしてある。

2-2 試験器材

a サーマスタ自記温度計 3組

サーミスタの温度抵抗特性を利用した温度計でサーミスタ素子は $1.0\sim 2.0\text{ mm}\phi$ の小粒子で高感度でタイムラグがなく、点測定が可能で本試験のように極めて狭小な範囲の温度分布を求めるのに適している。

図 2 - 1 冷気流模型装置

$S = 1 : 40$

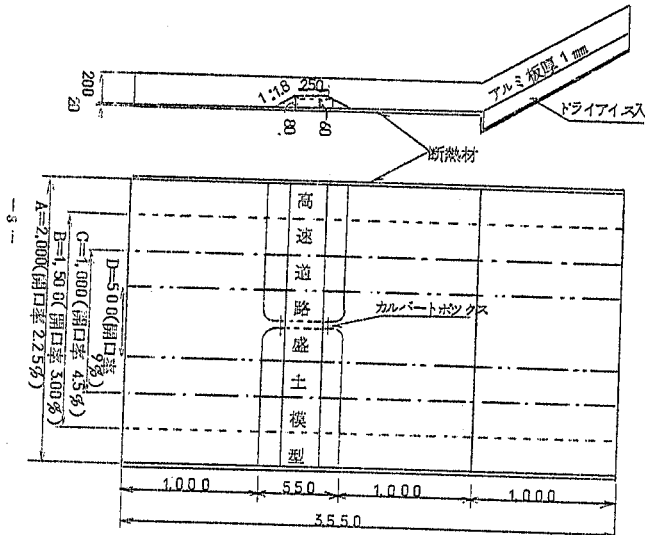
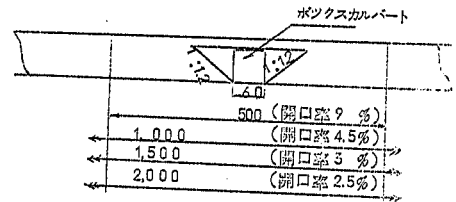
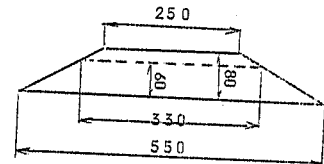


図 2 - 2 道路模型

側面図 $S = 1 : 10$



横断面図 $S = 1 : 10$



素子の温度による抵抗変化をブリッジボックスにより電圧に変換し、これを電子管式自動平衡記録計に導いて温度の自記録を行なうものである。

温度巾 $-20^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$

指示誤差 $\pm 10\%$ 以内

b 水銀精密温度計

サーミスタ温度計以外の各測点における温度を測定するためのもので時間の遅れが大きいため5分間隔に平均温度を求めている。

c アルコール温度計 4ヶ

水銀温度計の補助用として使用し精度は悪いが外気温等温度変化の少ない点の平均温度を測定する。

d 望遠鏡

サーミスタ温度計は人体が近づくだけで直ぐ変化するので水銀温度計の読みを遠隔測定するためのものである。

e 熱線風速計 1台

ボックスカルバート内の温度ならびに風速測定に用いるもので風速測定の場合感度は非常に良好であるが、温度変化が大きい場合、零点の位置が絶えず変動し、測定誤差が大きい欠点がある。

これも作業台上の指示計により読取るものである。

f 16mmムービーカメラ(ボレックス) 1台

ドライアイスの冷却作用によって発生した冷気流の流出状況の撮影のため使用する。

g 固態二酸化炭素(ドライアイス)

斜面上に冷気を発生させるために斜面下のアルミ板ボックス内に入れるものである。

なるべく斜面単位面積あたり一定の冷気を発生させるように大きさと重量と個数を一定になるように入れる。ドライアイスの特性は6章で述べる。

h 地盤および側壁材 厚さ25mmのステロール断熱材を使用する。

熱伝導率 $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ の場合 0.039kcal/mhC 以下

" 0°C " 0.035 " "

2-3 試験方法

a 道路盛土を置かない場合の冷気流の水平垂直温度分布の測定

斜面下にドライアイスを入れ、斜面上に冷気流を発生させ平地部各点の長さ方向と高さ方向の温度分布を測定する。

これによって冷気流の流出による地盤上各点の温度の変動状況を知ることができる。温度計はサーミスタ温度計3ヶ、水銀温度計3ヶ、アルコール温度計4ヶを使用し、上から釣下げて所定の位置に設置する。

サーミスタ温度計はリード線を模型装置の外側にある作業台上の記録計に導いて温度の自動記録を行ない連続同時観測する。水銀温度計とアルコール温度計はサーミスタ温度計に人体の影響をあたえないよう外方から望遠鏡により5分間隔に読取る。

b 道路盛土を置いた場合の冷気流停滞による水平垂直温度分布の測定

斜面下にドライアイスを入れて冷気流を発生させた場合冷気流は、道路盛土にさえぎられて上流側平地に停滞する。

斜面からの冷気流が連続的に流出すると冷気の一部は盛土を越えて下流側に流下し、一部は上方の温度の高い空気の熱と交換されて消滅し、平衡状態に達する。この場合の温度をaと同様の方法で測定する。

c 道路盛土の開口率を変えた場合の上流側の水平垂直温度分布の測定

カルバートの開口率すなわち盛土縦断面積に対するカルバート断面積の比をそれぞれ7%、4.5%、3%、2.25%の4段階に変えた場合の上流側平地の5点における温度の変動を測定する。

開口率の変更は盛土内カルバートのピッチを変えることによって得られる。斜面から発生する冷気量はドライアイスの形状と重量によって決まるが、しかしこれを全斜面に対して一定にすることは困難である。したがって4段階の各開口率に対し温度の比較をするためには各開口率共通の基準温度を定めなければならない。

この共通の基準温度を定めるために各開口率ごとに、盛土を取除いた場合、カルバートを閉塞した盛土を置いた場合、カルバート開口の盛土を置いた場合の三つの場合の等冷気流による温度を測定し、カルバート閉塞時の温度と盛土なしの時の温度差に対するカルバート開口時の温度の比をもって開口による温度の影響を求めるものとする。

3. 調査結果と考察

3-1 冷気流による温度分布

図-3.1と図-3.2に示す位置に各種温度計を配置し、盛土を置かない

で高さを5mm~115mmに変えながら冷気の温度を測定した。

図-3.3、図-3.4と図-3.5がそれぞれの温度の測定結果である。

また図-3.1の斜面下から24.5cmの点において垂直方向にサーミスタ温度計3ヶにより測定した温度は図-3.6でこの場合3ヶのサーミスタ素子はそれぞれ下から5mm、10mmの間隔で結び、全体を高さ5mm~30mmに変えて測定したものである。

これらの測定温度を水平、垂直方向に分けてとりまとめたのが図-3.7、図-3.8の水平温度分布(実線)、図-3.9の垂直温度分布(実線)である。これに対し長さ500mmの道路盛土(カルバート閉塞)を置いて、図-3.2の温度計配置によって高さを5mm~115mmに変えながら測定した温度が図-3.10であり、その分布は図-3.8、図-3.9の点線で示される。これらの温度分布曲線から冷気流に関して次のことが分る。

- (1) 冷気の温度分布は斜面から発生する冷気量と外気温度によって決まる。すなわち斜面からの冷気量が多ければ温度が低下し、外気温度との差が大きくなる程冷気層の厚さは大きくなる。
- (2) 冷気の温度は床に近い程低く、水平方向に対して斜面に近いほど温度勾配が急になり、高さが高いほど水平方向の温度勾配が緩やかである。垂直方向の温度分布も高さが低いほど温度勾配が急で、高くなるにしたがって緩やかになるような曲線を示している。また冷気量の多いほど温度勾配は急となる。
- (3) 盛土が置かれた場合と盛土のない場合を比較すると盛土がある場合には上流側の温度が低くなり逆に下流側は高くなる。上流側の一点における垂直温度から見ると冷気の最低温度と外気温度との差約5℃に対し、盛土の有無による温度差は約2℃生じている。これは勿論盛土によって上流平地に冷気が停滞し、下流に向って流れる冷気量が少ないことを示すものである。
- (4) 測定した温度値は相当脈流しているので、高さを変えた場合定常状態になるまで待って5分間以上の温度の平均値を求めて各高さごとの温度を決めている。この温度の乱れ、あるいは脈動は盛土を置いた冷気の停滞している状態より、盛土のない冷気の流れの大きい状態の方が甚だしい。これにより冷気流は熱現象的には乱流による自然対流とみなされる。

図-3.1 温度計配置図 (1)

S = 1 : 20

外気温度

×

アルコール

温度計

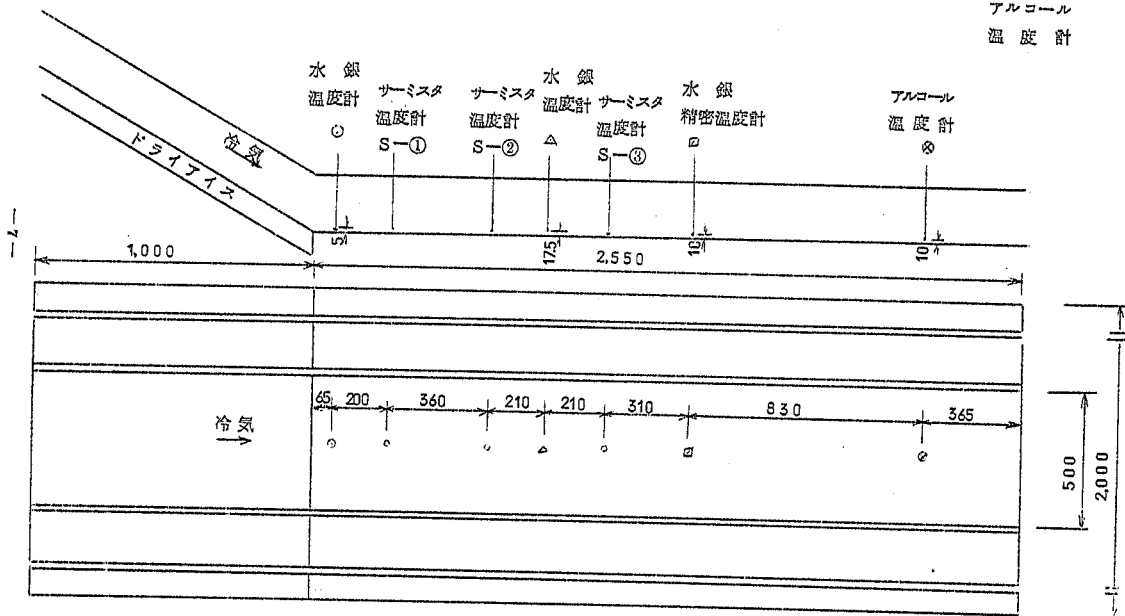


図-3.2 温度計配置図(2)

S = 1 : 20

外気温度
×
アルコール
温度計

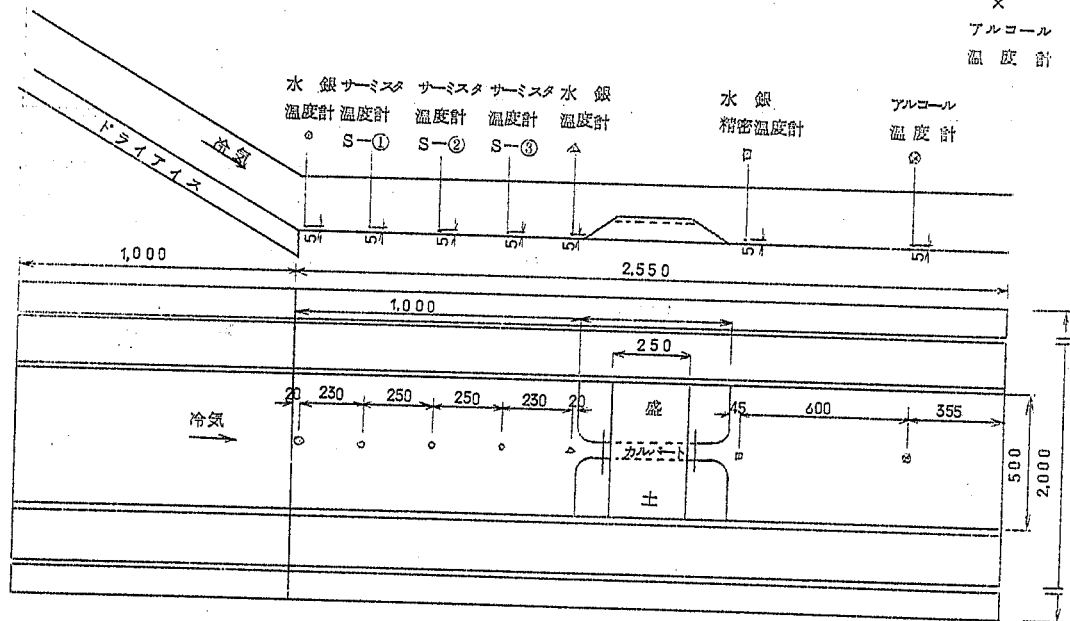
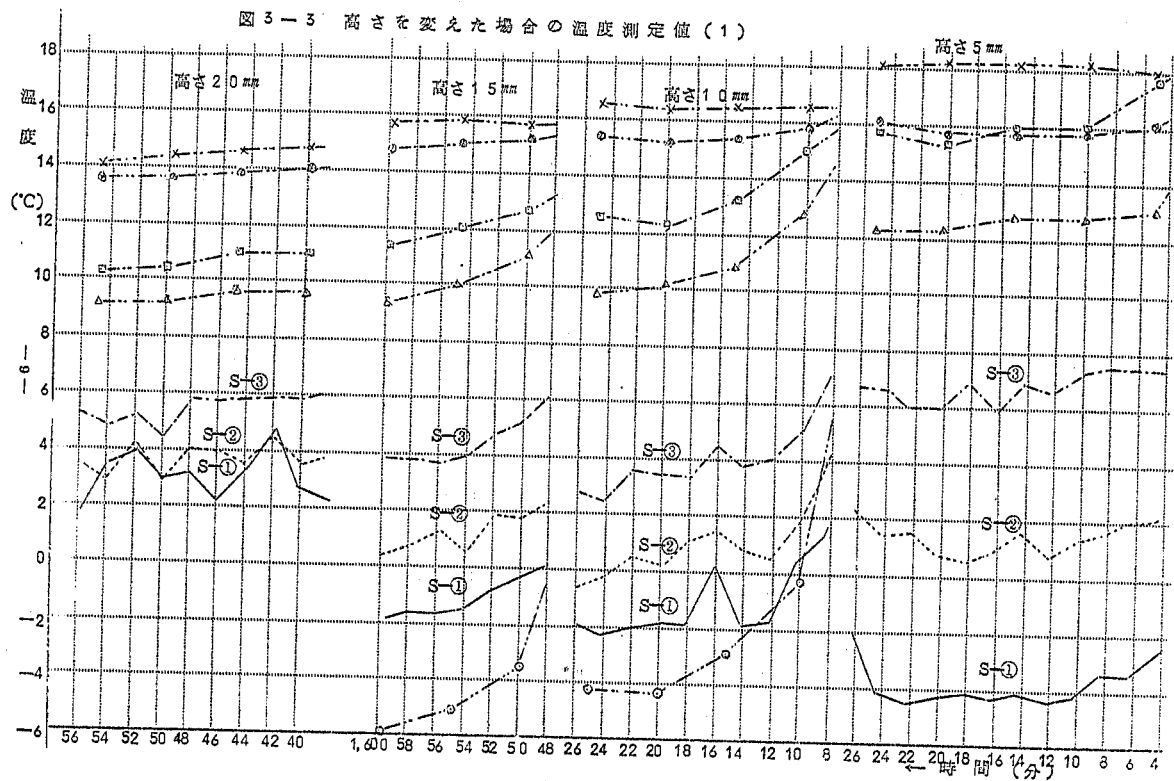
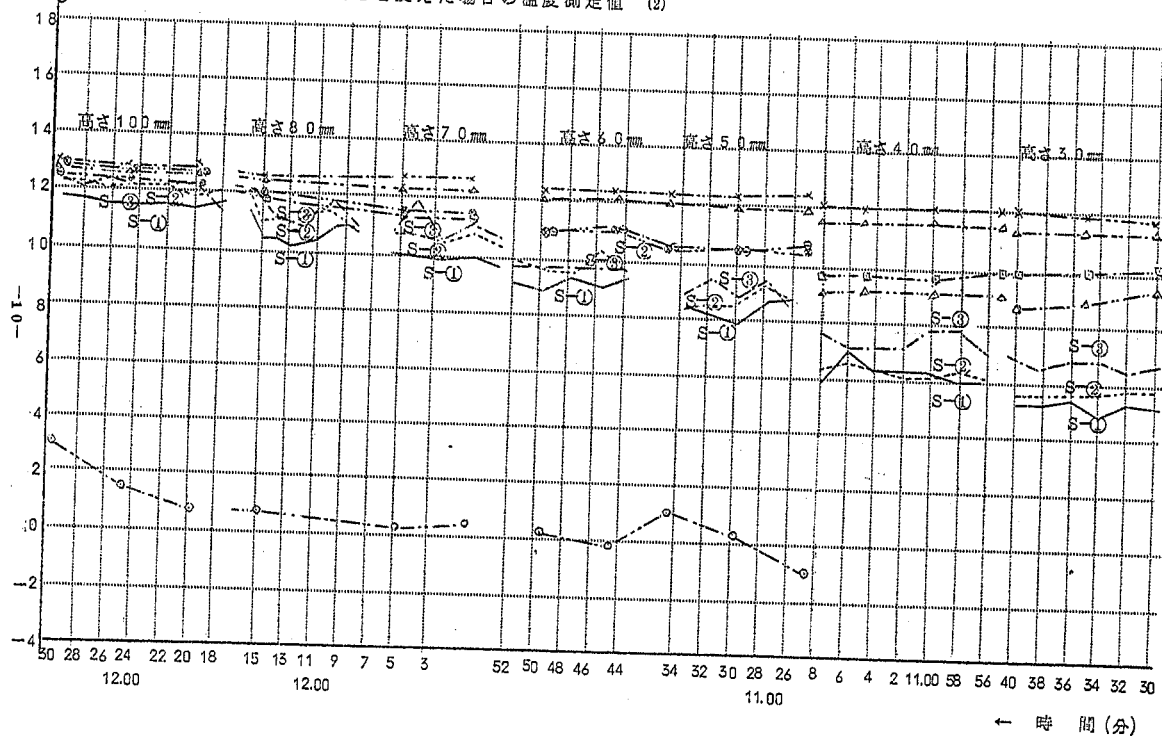


図 3-3 高さを変えた場合の温度測定値 (1)



温度
(°C)

図-3.4 高さを変えた場合の温度測定値 (2)



高さを変えた場合の温度測定値 (3)

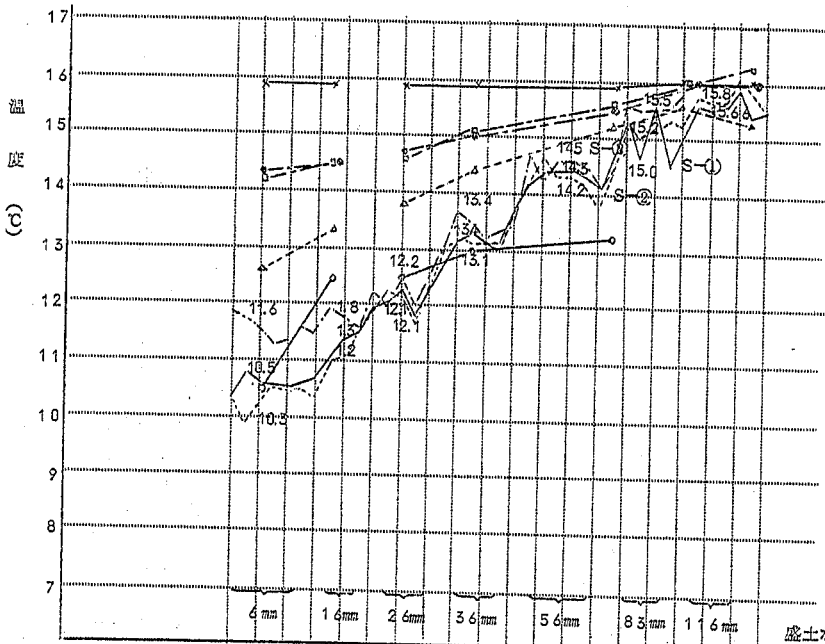


図-3.6 高さを変えた場合の温度測定値(斜面下から24.5 cmの点)

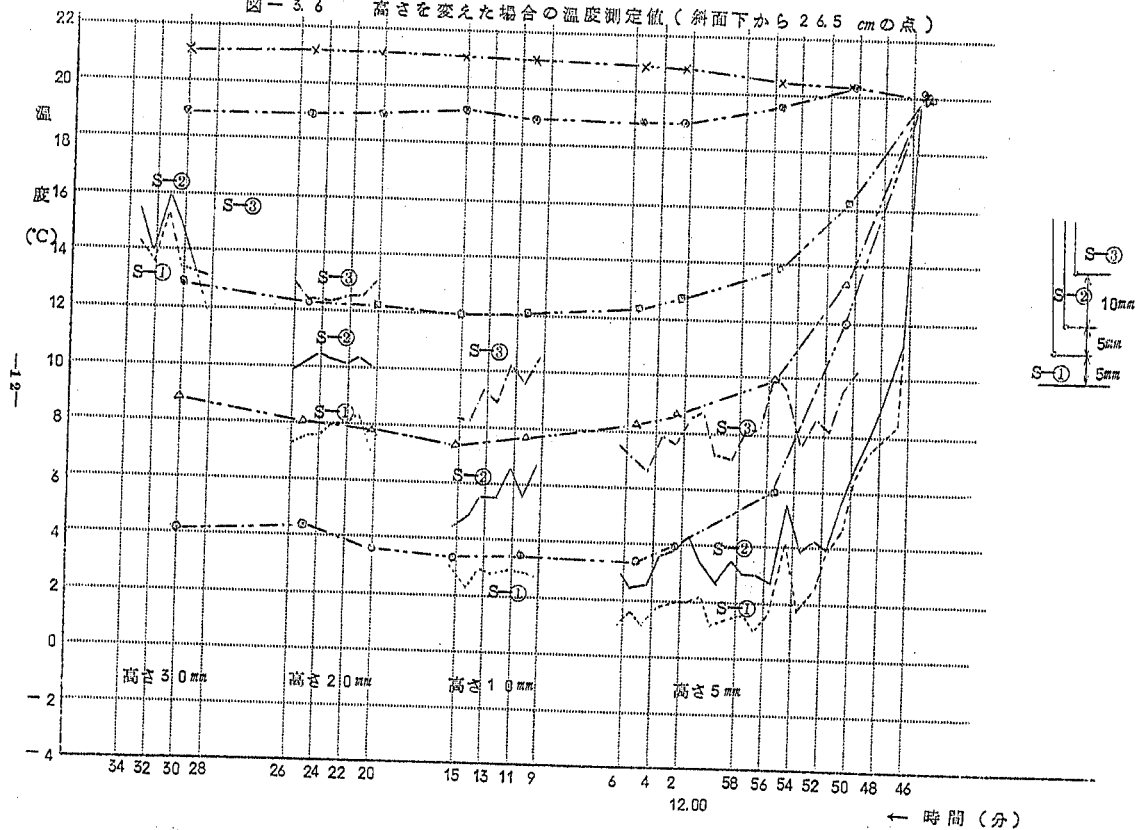


図 - 3.7

水平温度分布

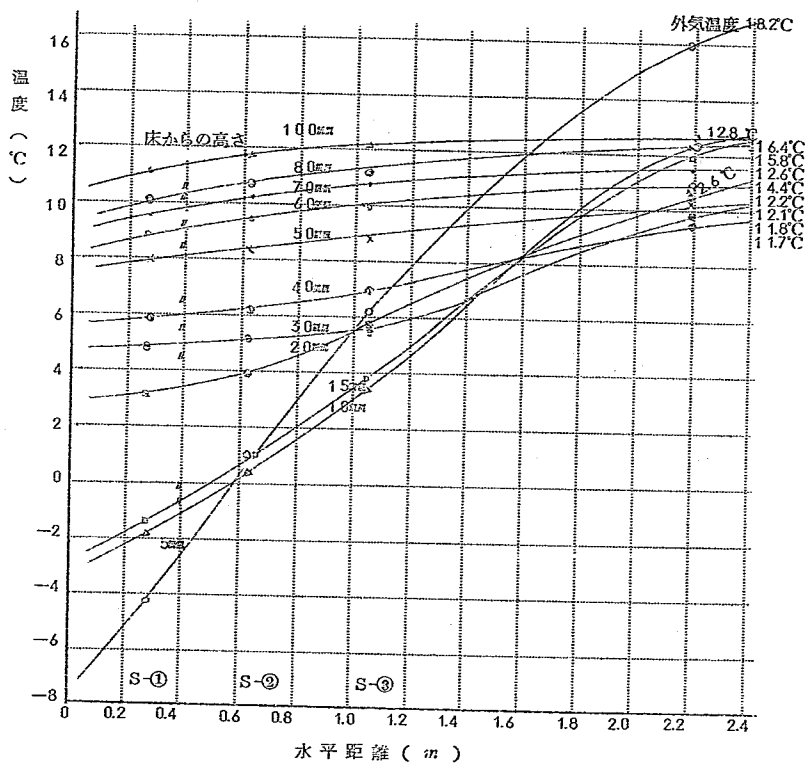


図 - 3. 8

水平温度分布

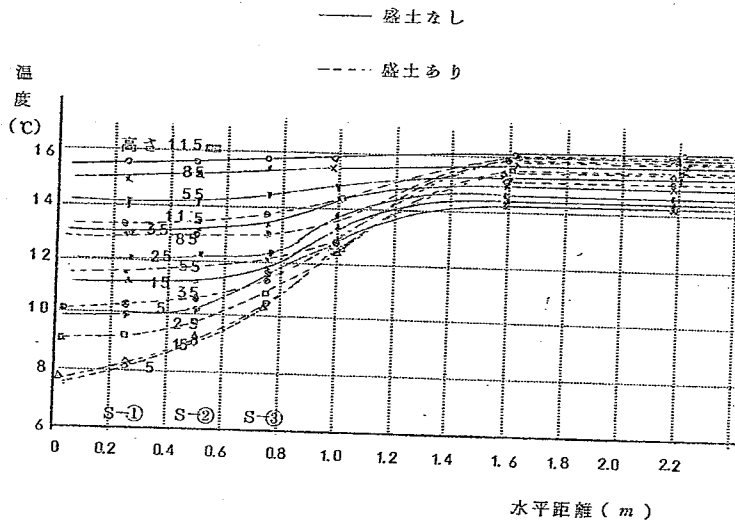


図 - 3.9

垂直温度分布

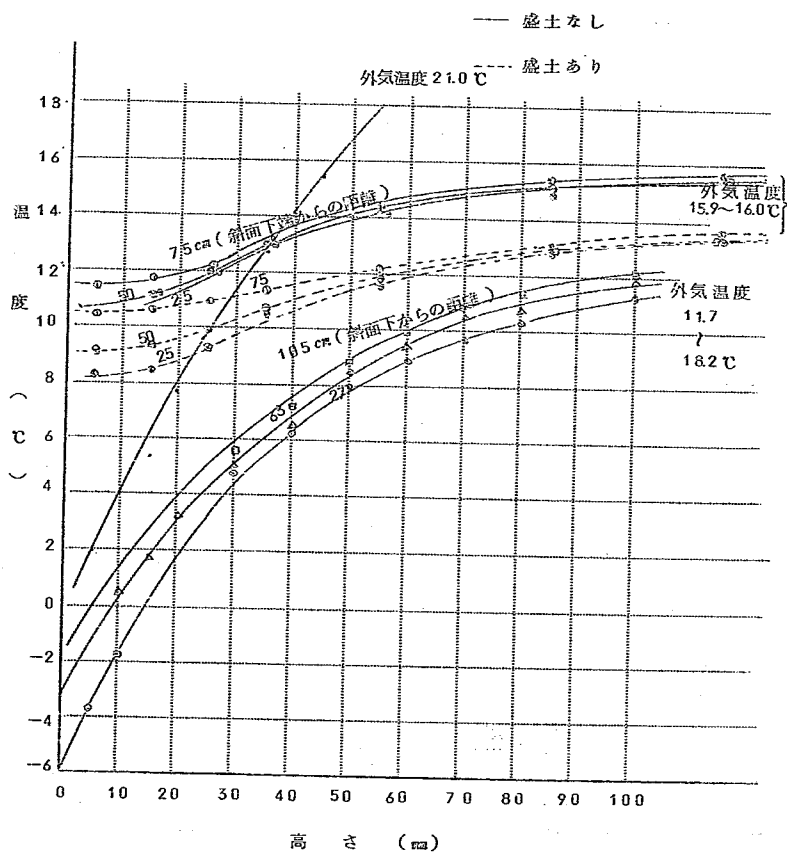
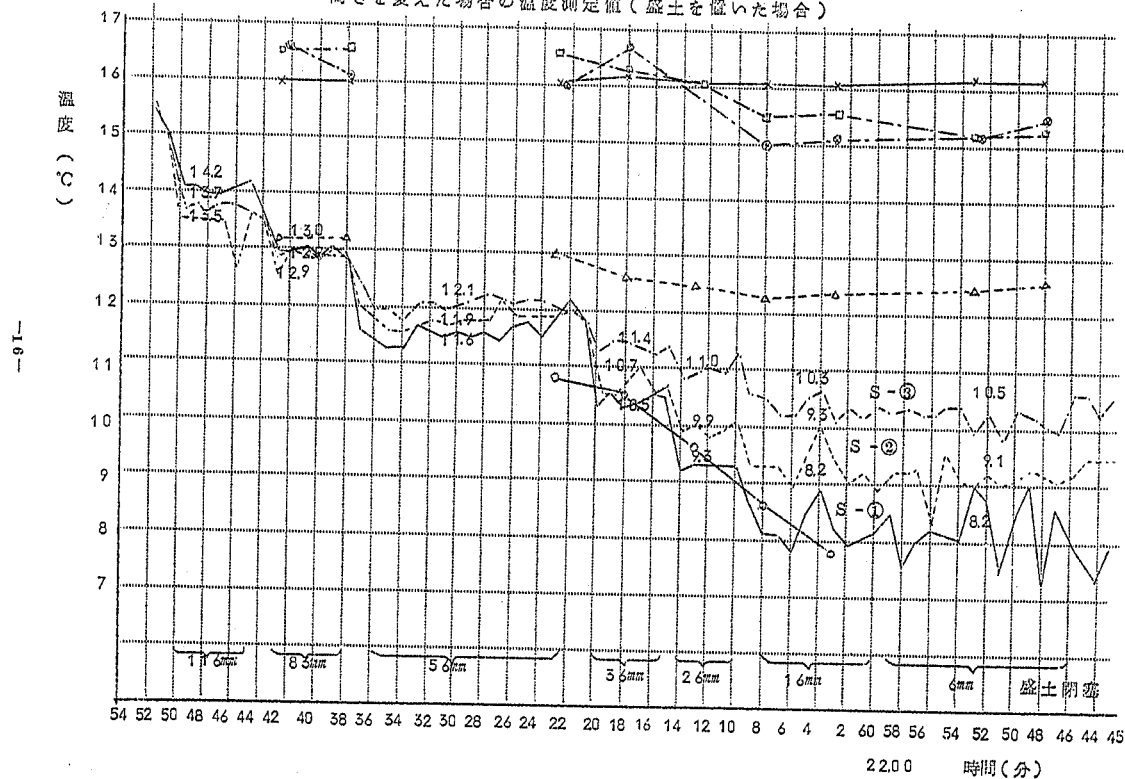


図-3.10 高さを変えた場合の温度測定値（盛土を置いた場合）



3-2. 盛土による温度変化

図-3.1.1に示す位置に温度計を設置して、盛土を置かない場合、盛土を置いてカルバートを閉塞した場合、およびカルバートを開口した場合の三つの場合について温度測定をした結果が図-3.1.2から図-3.1.4までに示される。

図から盛土上および盛土前後の平地部の温度に関して次のような特徴が示される。

- (1) 盛土上の測点温度は盛土のカルバートが閉塞の状態では多少低くなり冷気の一部が溢流していることが分る。しかし盛土がない場合あるいはカルバートが開口の状態では温度が上昇し外気温度に近くなっており、盛土を溢流する冷気がカルバート開口によって急に減少する。
- (2) 盛土を置いてカルバート閉塞の場合の温度は上流平地部の3測点(高さ10mm、40mm、70mm)とも急激に低くなる。カルバート開口の場合には閉塞状態に対して3点とも上昇するが盛土のない場合と比較すれば高さ40mm、70mmの測点温度の上昇の割合が小さい。高さ10mmの測点では同じである。これはカルバートに対して高さの低い部分の冷気だけが流れ、高い部分は停滞することを示すものである。盛土がないと高い部分の冷気も流れるので盛土の下流側の測点温度も前節に示した水平垂直分布のとおり低くなる。

図—3.1.1 温度計配置図 (3)

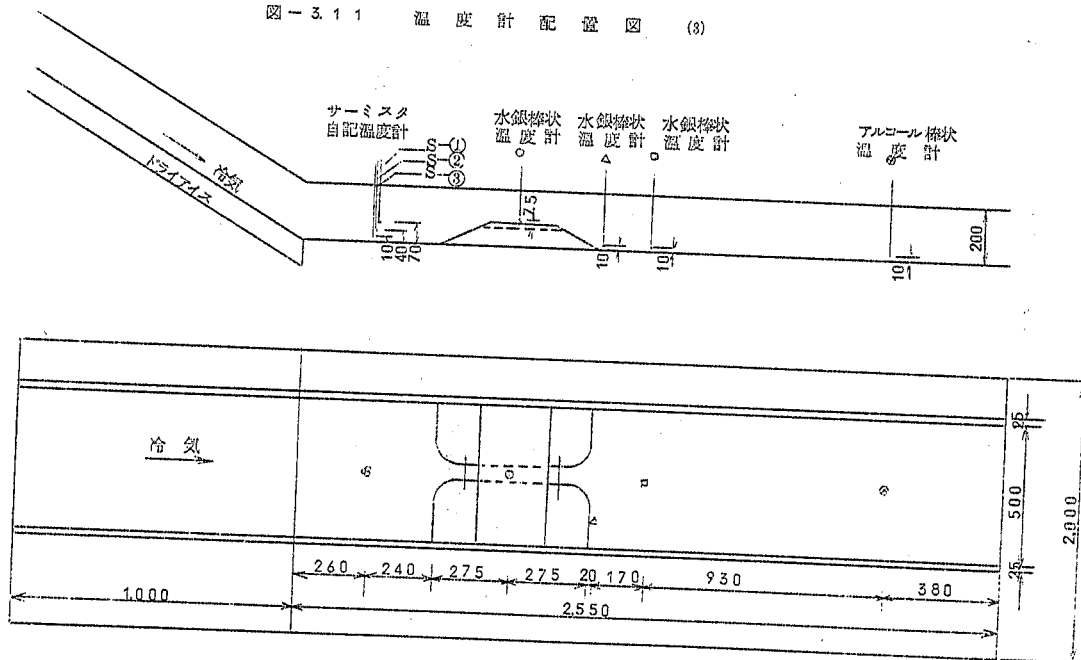


図-3.12 温度測定値(盛土なし)
開口率100%

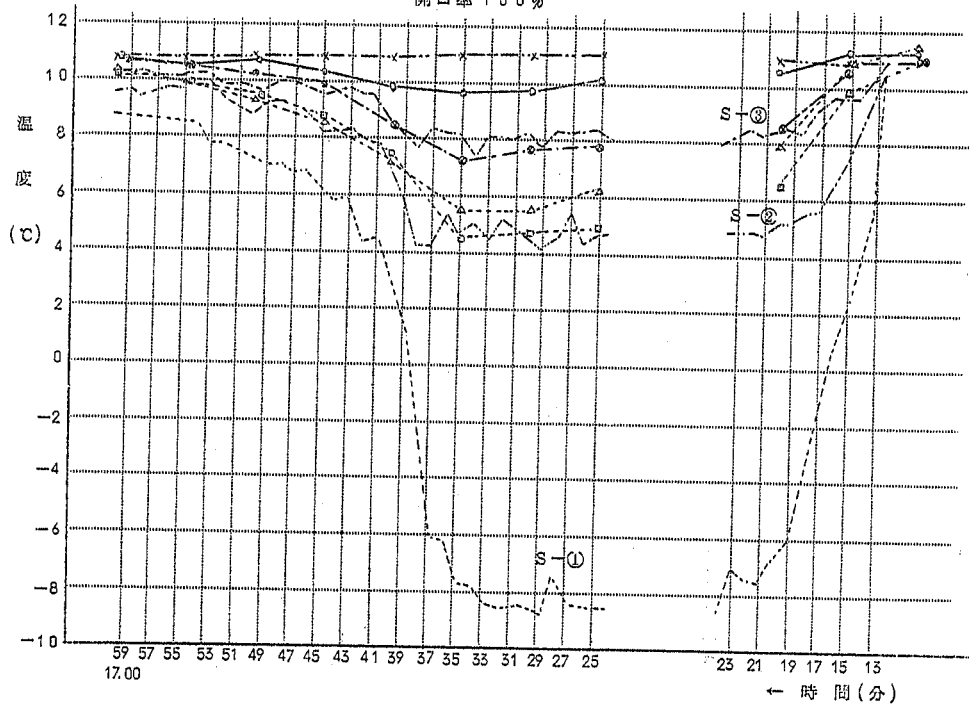


図-3.13 温度測定値 (カルバート閉塞盛土)

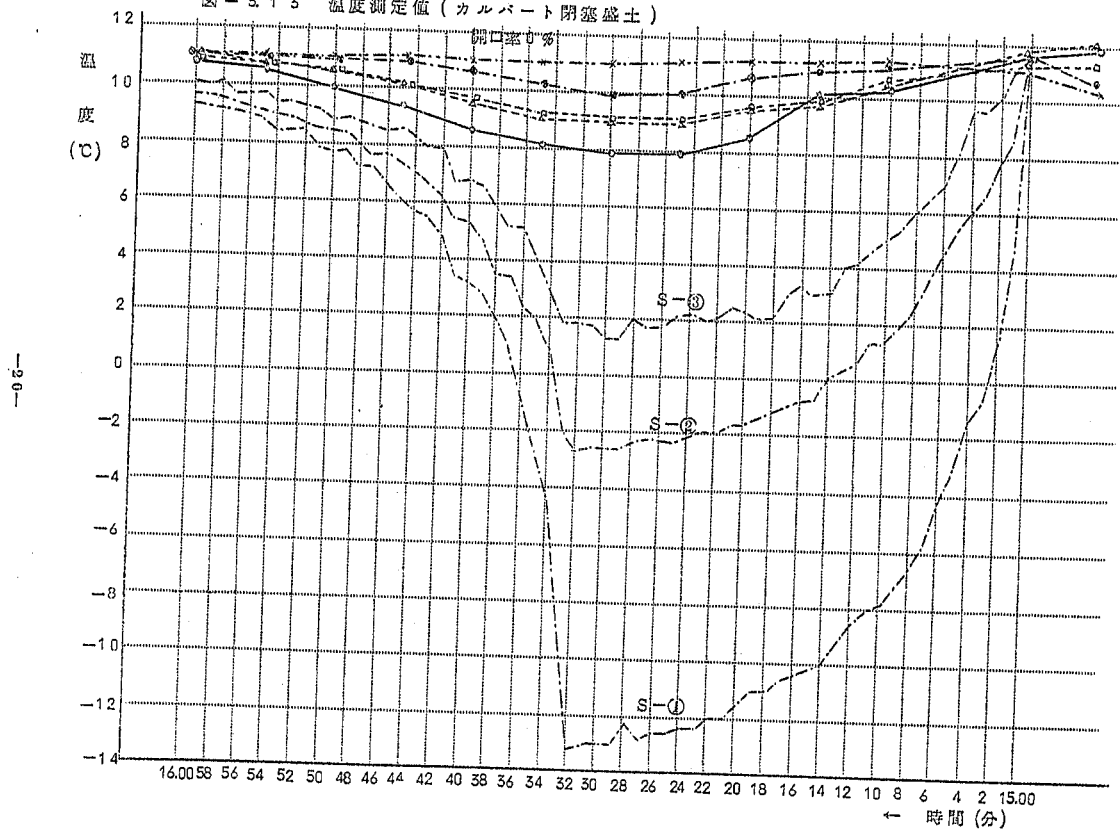
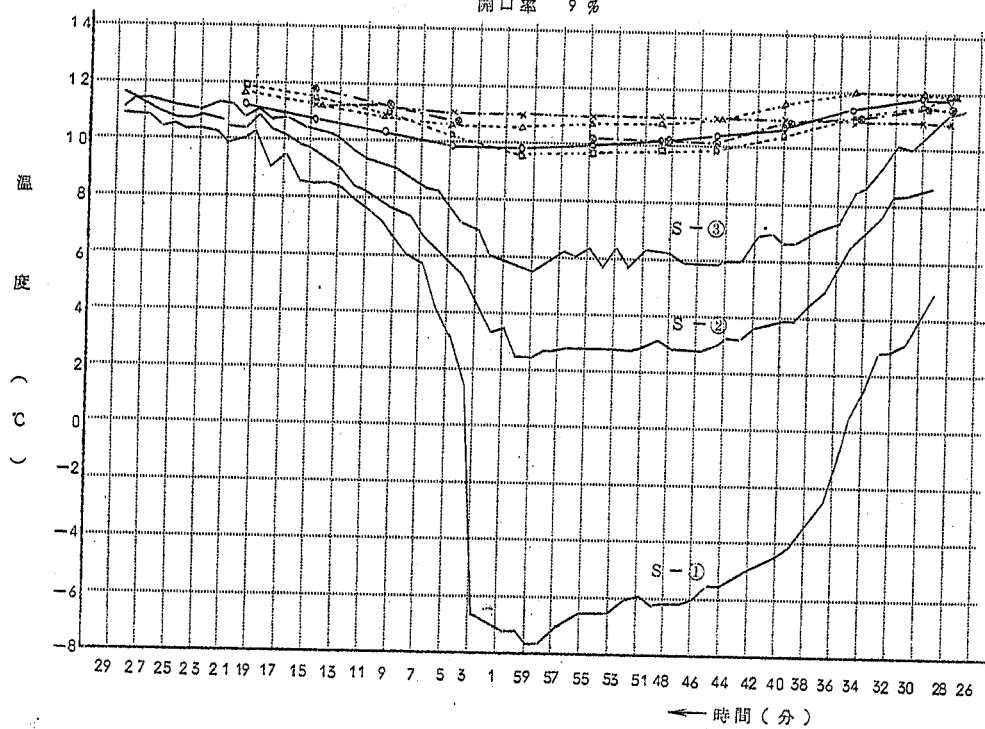


図-3.14

温度測定値 (カルバート開口盛土)

開口率 9%



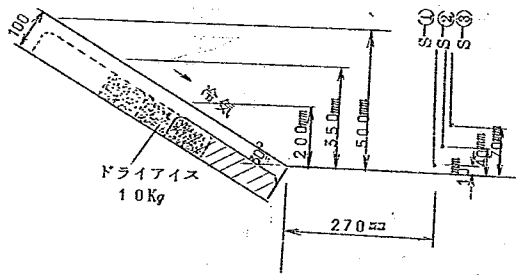


図-3.15.

3-3 斜面高による温度変化

図-3.15に示すように斜面下から27cmはなれた平地上の高さ10mm、40mm、70mmの位置にサーミスタ温度計を設け、ドライアイスボックス内のドライアイスの斜面方向の位置を下からそれぞれ20cm、35cm、50cmの直高になるようにずらして置いた場合の温度の変化を測定した。

測定温度は図-3.16、垂直温度分布の変化は図-3.17に示すとおりである。

同じ形状と重量のドライアイスでも、置く位置における斜面高によつて平地区間に温度変化を生じている。これは斜面上の冷気が温度が低下し、密度を増すため重力作用を受けて、平地上の冷気流の速度が上昇し、温度も低下することを示している。

図-3.16 ドライアイスの斜面高による温度変化

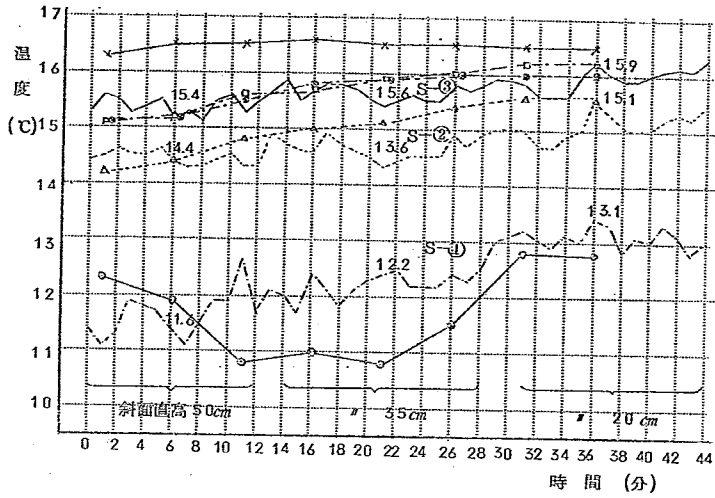
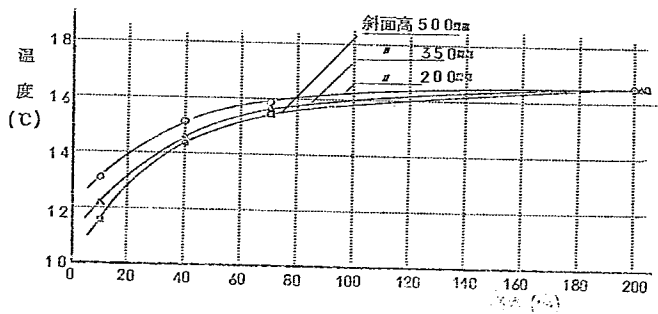


図-3.17 斜面高による垂直温度分布



3-4 ボックスカルバートの開口率による温度分布

図-3.18および図-3.22に示す位置に各温度計を固定し、開口率を4段階に変えて各段階ごとに、盛土なし、カルバート閉塞盛土、カルバート開口盛土の場合の温度分布を測定した結果が図-3.19~図-3.21および図-3.23~図-3.24に示される。

図-3.19~図-3.21はドライアイスの量を多くして冷気の最低温度と外気温度との差が約 30°C の場合の温度分布であり、図-3.23~図-3.24は冷気の最低温度と外気温度との差が約 5°C の場合の温度分布である。

図-3.19~図-3.21および図-3.23~図-3.24に示された温度を各開口率、および盛土、カルバートの状態ごとに一定時間について平均した値とこの値をカルバート閉塞時の最低温度と外気温度との差で割って無次元化した値を各段階ごとにまとめて表にしたのが、表-1表-2である。斜面から発生する単位面積あたり冷気量による誤差を除くために盛土長（開口率）の4段階の各温度を比較できるようにしたのが、この無次元温度である。

具体的には測定温度を各盛土長（開口率）ごとに閉塞時のS-①の温度と大気温度との差で割った値で外気温度の場合常に1.0となり閉塞時のS-①温度が常に0となる。

この無次元温度で同一断面上の3点のサーミスタ温度計による垂直温度分布を各開口率ごとに示したのが図-3.25である。

表-1 開口率による温度変化（外気温度－冷氣最低温度＝30℃）

盛土長さ (開口率)	ボックスカルバート 開閉区分	S-①(床から高さ10mm)		S-②(床から高さ40mm)		S-③(床から高さ70mm)		平均		外気温度
		測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	
① 500 mm (9%)	閉塞	-9.8℃	0	-5.1℃	0.163	+1.1℃	0.378	-4.60℃	0.181	+19.0℃
	開口	-4.6	0.182	+2.4	0.427	+6.6	0.574	+1.47	0.394	+18.8
	盛土なし	+1.9	0.409	+7.7	0.612	+13.3	0.809	+7.63	0.610	+18.8
② 1,000 mm (4.5%)	閉塞	-6.8	0	-0.2	0.260	+5.4	0.480	-0.53	0.247	+18.6
	開口	-3.8	0.119	+3.8	0.421	+7.2	0.556	+2.40	0.365	+18.4
	盛土なし	+3.0	0.392	+10.2	0.680	+13.4	0.808	+8.87	0.627	+18.2
③ 1,500 mm (3.0%)	閉塞	-11.5	0	-2.0	0.311	+5.7	0.564	-2.60	0.292	+19.0
	開口	-10.4	0.036	+0.9	0.404	+7.3	0.613	-0.73	0.351	+19.2
	盛土なし	-3.4	0.250	+11.3	0.733	+15.1	0.855	+7.67	0.616	+19.6
④ 2,000 mm (2.25%)	閉塞	-12.0	0	+0.1	0.385	+6.9	0.602	-1.67	0.229	+19.4
	開口	-11.3	0.022	+1.7	0.431	+7.9	0.626	-0.57	0.360	+19.8
	盛土なし	-3.6	0.263	+11.2	0.727	+14.9	0.844	+7.50	0.612	+19.9

表-2 開口率による温度変化（外気温度－冷気最低温度＋5℃）

盛土長さ (開口率)	ボックスカルバート 開閉区分	S-①(床から高さ10mm)		S-②(床から高さ40mm)		S-③(床から高さ70mm)		平 均		外気温度
		測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	測定温度	無次元温度	
① 500mm (9%)	閉 塞	+11.7℃	0	+13.0℃	0.250	+14.0℃	0.442	+12.9℃	0.231	+16.9℃
	開 口	+11.9	0.039	+13.3	0.314	+14.3	0.510	+13.17	0.288	+16.8
	盛土なし	+12.5	0.180	+14.7	0.600	+15.75	0.810	+14.27	0.514	+16.7
② 1,000mm (4.5%)	閉 塞	+12.8	0	+13.6	0.186	+14.45	0.372	+13.60	0.186	+17.1
	開 口	+12.82	0.005	+13.7	0.209	+14.6	0.419	+13.71	0.211	+17.1
	盛土なし	+13.6	0.190	+15.2	0.572	+16.5	0.881	+15.10	0.548	+17.0
③ 1,500mm (3.0%)	閉 塞	+12.75	0	+13.7	0.20	+14.4	0.347	+13.63	0.185	+17.5
	開 口	+12.8	0.011	+13.8	0.226	+14.5	0.376	+13.70	0.204	+17.4
	盛土なし	+13.2	0.199	+15.3	0.561	+16.5	0.825	+14.93	0.479	+17.3
④ 2,000mm (2.25%)	閉 塞	+13.3	0	+13.8	0.109	+14.3	0.217	+13.80	0.109	+17.9
	開 口	+13.3	0.011	+13.8	0.111	+14.35	0.233	+13.82	0.115	+17.8
	盛土なし	+13.8	0.114	+15.5	0.500	+16.9	0.818	+15.40	0.477	+17.7

Figure 1 is a line graph showing the relationship between temperature (Y-axis, 0 to 20°C) and time (X-axis, 20 to 34 minutes). The graph displays several data series: a solid line with circles (S-①), a dashed line with circles (S-②), a dash-dot line with circles (S-③), a dotted line with squares, a dash-dot-dot line with crosses, and a solid line with triangles. The graph is divided into three regions by brackets: "発生し" (occurs) from 20 to 10 minutes, "カルシウム閉口" (calcium closure) from 10 to 30 minutes, and "カルシウム閉塞" (calcium closure) from 30 to 34 minutes. The temperature generally decreases over time, with a sharp drop around 10 minutes and a recovery around 30 minutes.

図-3.20 温度測定値(2)

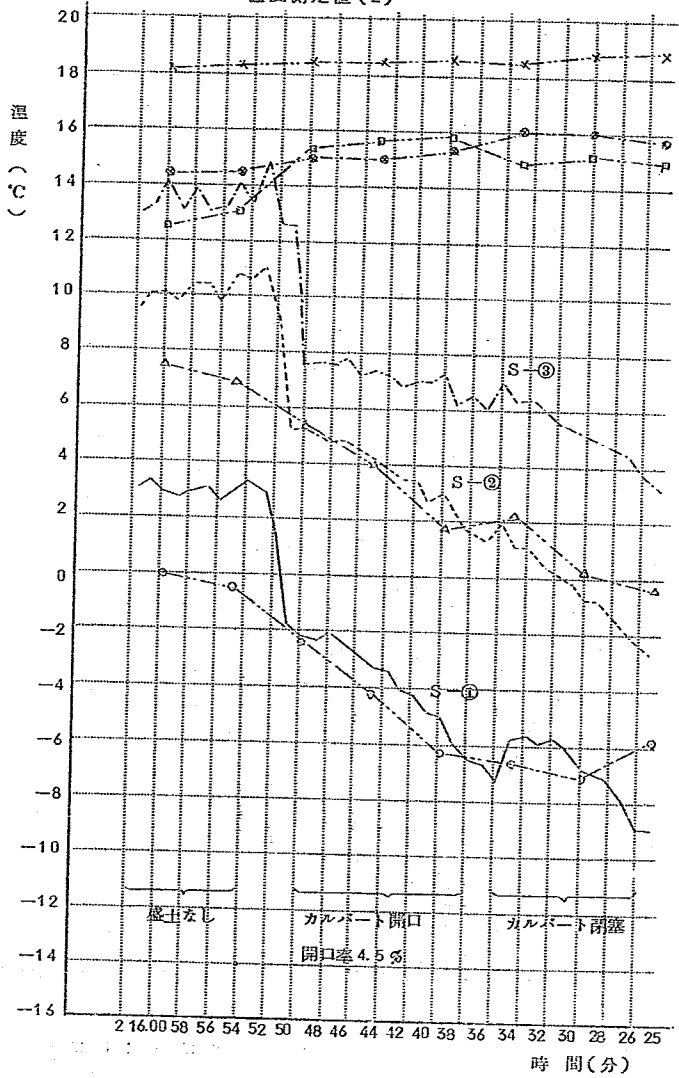
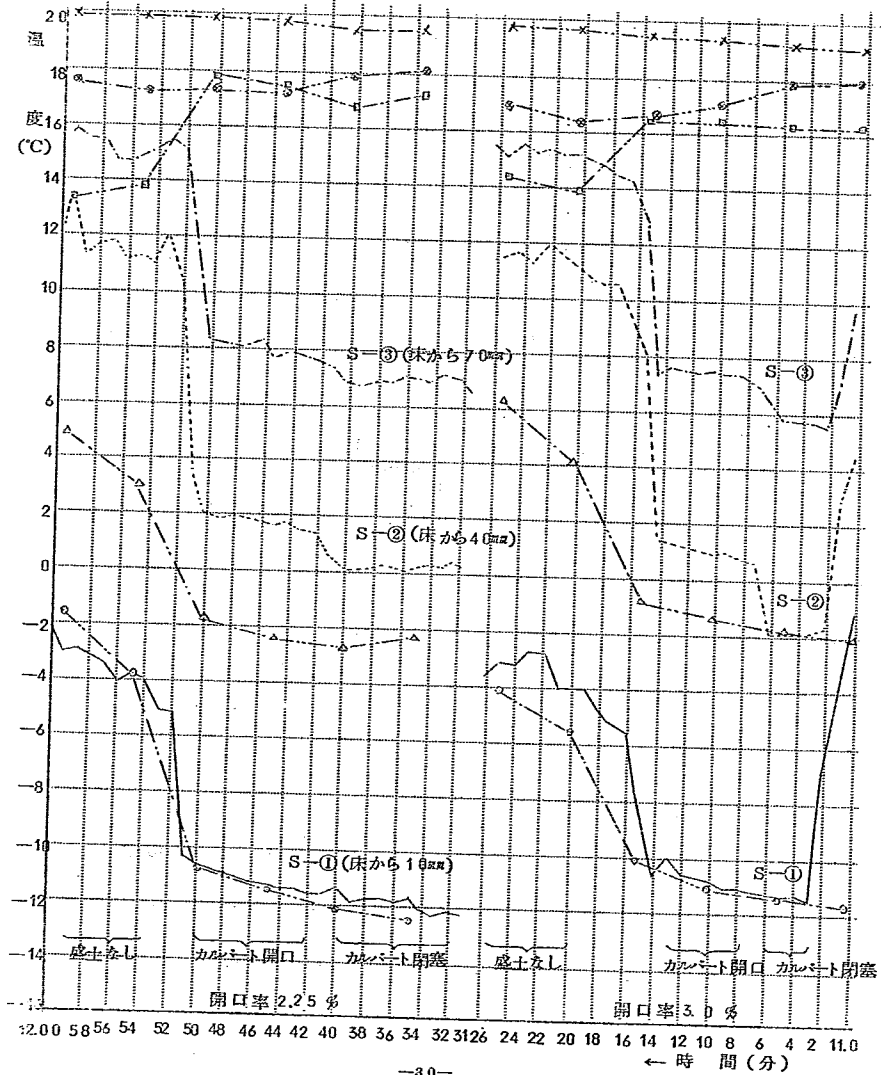


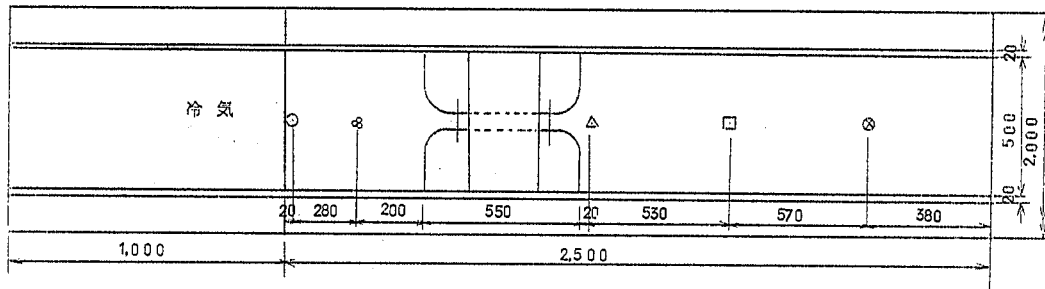
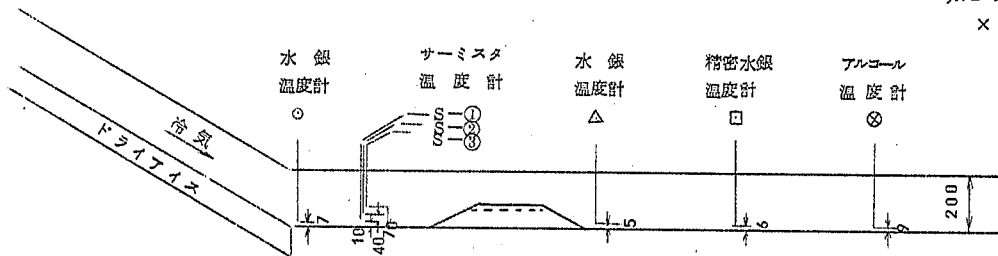
図-3.2.1 温度測定値(3)



図一 3.2.2 温度計配置図 (5)

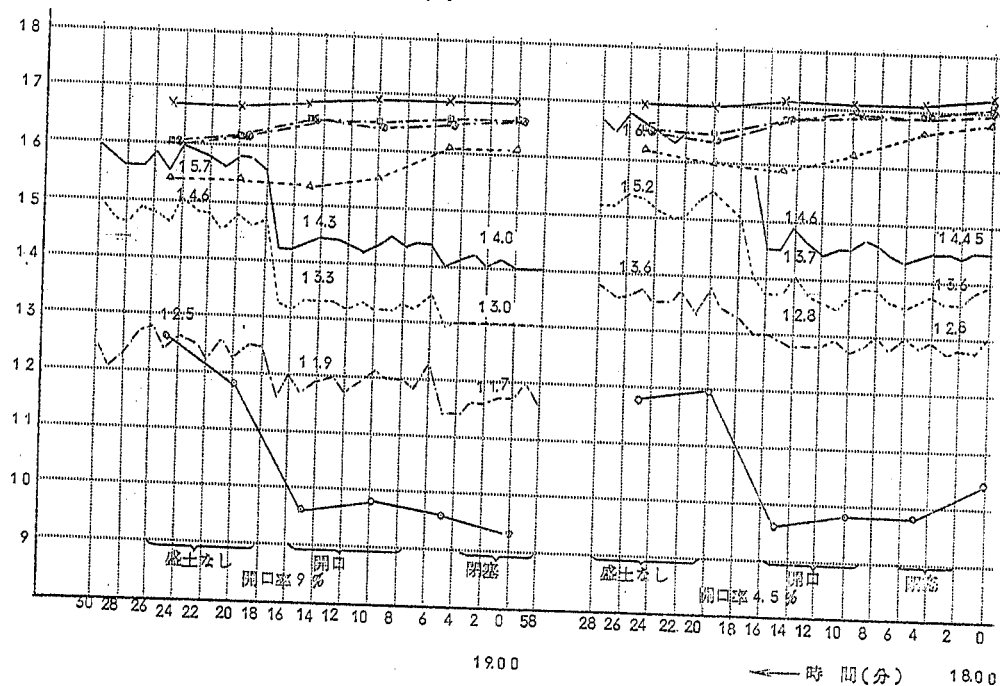
S = 1 : 20

(外気温度)
アルコール温度
×



温度 (°C)

図 - 3. 2 3 温度測定値 (1)'



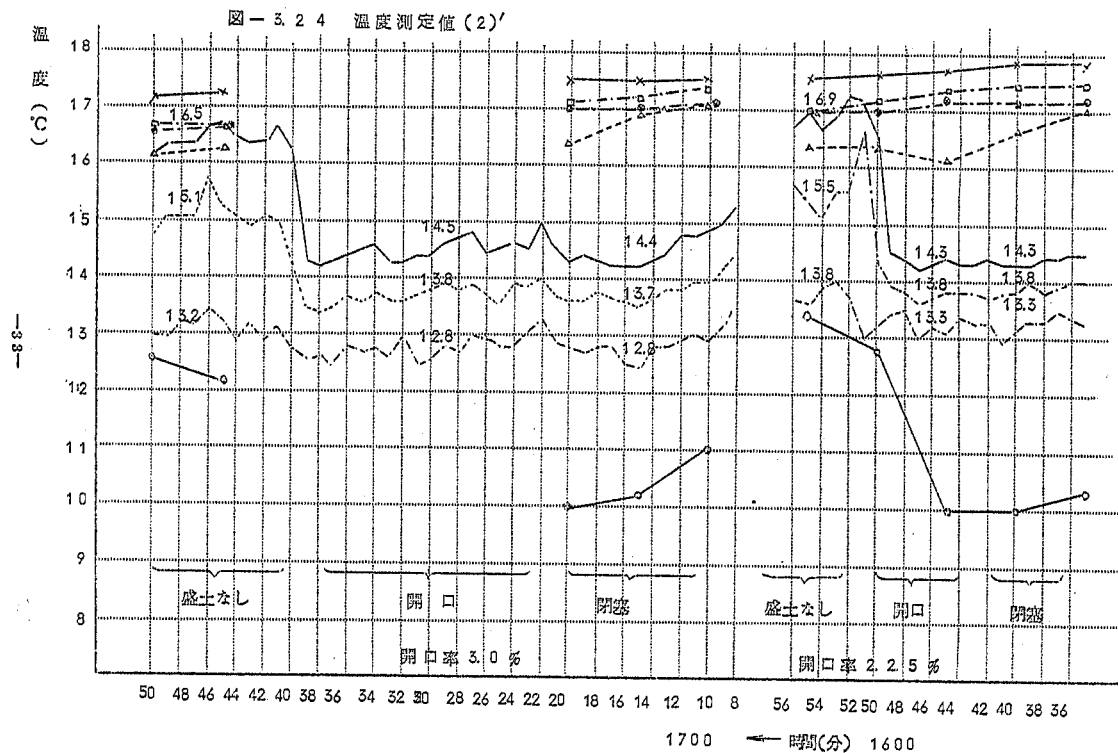
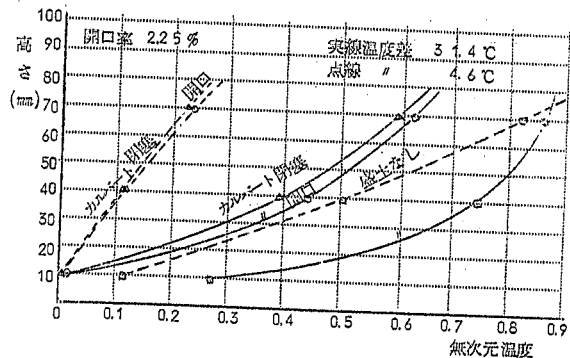
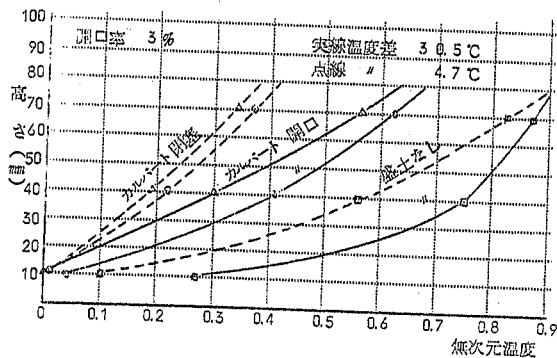
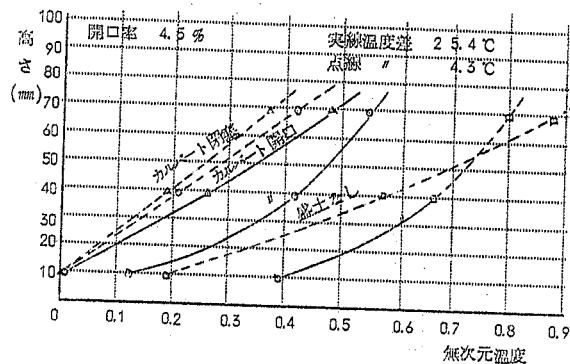
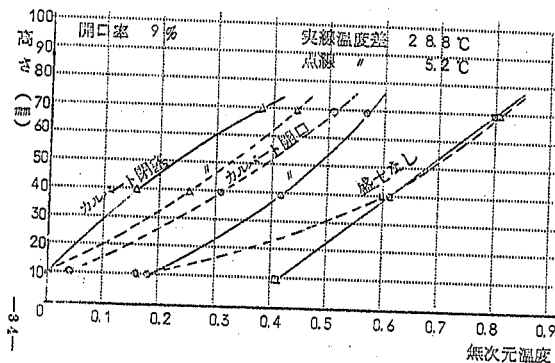


図 3-25 無次元温度による各開口率の垂直温度分布



図一 3.25 において実線は外気温度と冷気の最低温度との差が約 30℃ の場合、点線は同じく約 5℃ の場合の開口率ごとのカルバート閉塞、開口および盛土なしの区分による無次元垂直温度分布 (3 点) を示している。図から分ることは開口率が大きくなるほどカルバート閉塞の場合と盛土のない場合の温度差に対しカルバート開口による温度上昇の割合が大きくなることで、またこの温度上昇の割合は外気温度と冷気最低温度との差が大きくなるほど増大する。

この温度上昇の割合を温度上昇率と定義すれば、温度上昇率は盛土上流側平地部におけるカルバート開口による温度上昇効果を示すものとみなすことができる。

$$\text{温度上昇率} = \frac{\text{各開口率無次元温度} - \text{カルバート閉塞の場合の無次元温度}}{\text{盛土なしの場合の無次元温度} - \text{カルバート閉塞の場合の無次元温度}}$$

として各開口率ごとの高さによる温度上昇率を求めれば表一 3、図一 3.26 のとおりとなる。

図一 3.26 から開口率が大きくなるほど温度上昇率が大きくなり、特に冷気温度と外気温度差が大きくなれば各開口率とも高さ 4.0 m 付近が温度上昇率が大きくなる。

表-3 開口率ごとの高さによる温度上昇率

外気温度と冷気最低温度との温度差	開口率	温度上昇率			
		S-①(高さ10m)	S-②(高さ40m)	S-③(高さ70m)	平均
30℃	9.0%	0.445	0.588	0.455	0.497
	4.5	0.304	0.383	0.232	0.310
	3.0	0.124	0.229	0.168	0.182
	2.25	0.084	0.134	0.099	0.109
5℃	9.0	0.216	0.183	0.185	0.201
	4.5	0.242	0.060	0.092	0.064
	3.0	0.111	0.072	0.061	0.065
	2.25	0.100	0.005	0.027	0.016

表-3の開口率による平均の温度上昇率を図示したのが図-3.27であり、この平均温度上昇率の各開口率および外気温度と冷気最低温度との差による概略の変化を表わしたのが図-3.28である。

平均温度上昇率は開口率の低いところで温度上昇の勾配が急で、開口率が大きくなるにしたがって勾配が緩やかになっている。

また外気温度と冷気温度の差が大きくなるほど温度上昇率の大きくなることは両図から明らかである。

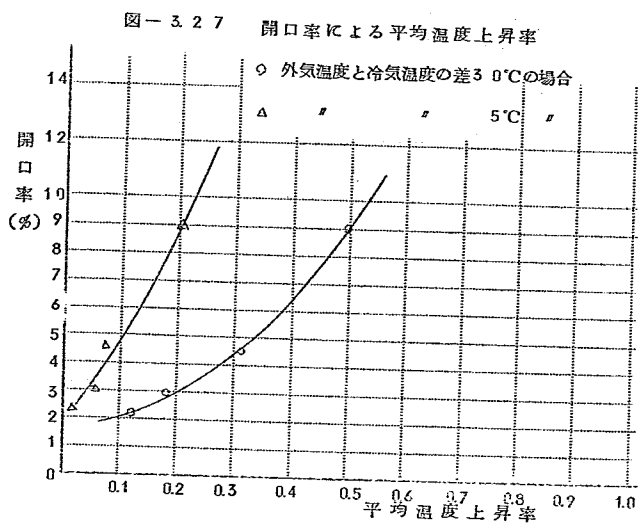
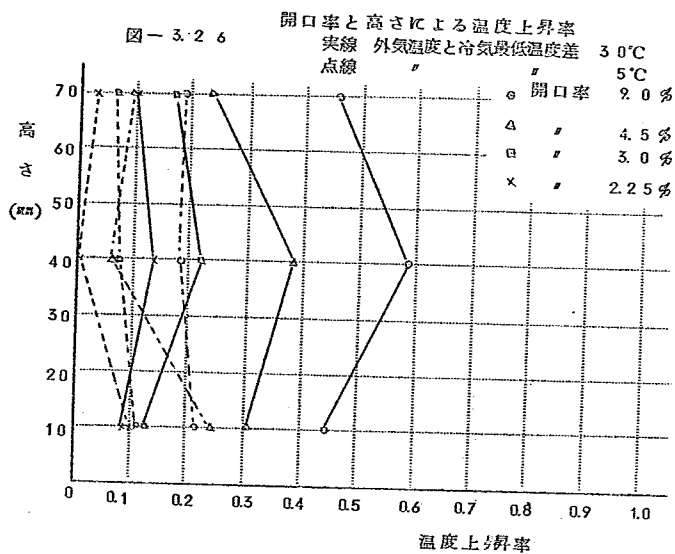
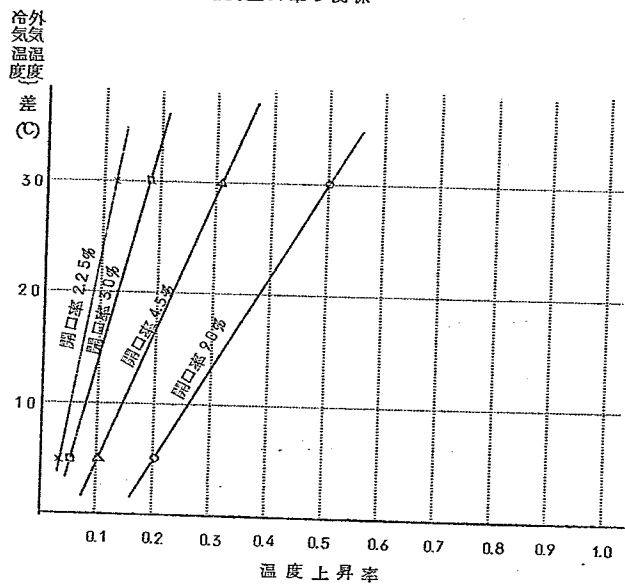


図-3.28 外気温度と冷気温度との差による開口率と
温度上昇率の関係



3-5 ボックスカルバートの開口率による冷気流出量

冷気の流出量は正確な速度測定を行なわなければ求めることはできないが、ここでは参考までに冷気の停滞する上流平地部からボックスカルバートを通して下流に流出する冷気量および熱流量を(4.9)式および(4.10)式から計算により求めてみるものとする。

また盛土のない場合の盛土位置から下流に流出する冷気量および熱流量は(4.1)および(4.16)式から計算により求める。

模型試験において速度の測定は合理的な方程式の誘導あるいは上記の計算式の諸係数を求めるためにも必要であったが計器の問題でできなかったので従来使われている係数値を使用して冷気量および熱流量を求めることとする。

図-3.19～図-3.21から盛土のない場合とカルバート開口の盛土を置いた場合のボックスカルバート出入口付近の温度を求めると表-4のとおりとなる。

表-4 開口率によるカルバート前後の温度変化

盛土長 (開口率)		カルバート付近温度(高5) ^{RT} カルバート開口			カルバート付近温度(高5) ^{RT} 盛土なし				
		入口側	出口側	外気温度	入口側	出口側	外気温度		
500mm (9%)	側壁高までの 平均温度	+ 5.8℃	+16.7℃	+18.8℃	+ 7.0℃	+12.5℃	+18.8℃		
	空気比重量	+12.3℃	+18.1℃		+14.87℃	+16.70℃			
	流量平均温度	1,236 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1,212 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		1,227 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1,218 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$			
	■ 比重量	+12.38℃			+15.79℃				
		1,238 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$			1,222 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$				
1000mm (4.5%)	側壁高までの 平均温度	+ 4.0	+15.6	+18.4	+ 7.2	+12.8	+18.8		
	空気比重量	+11.2	+17.5		+14.93	+16.80			
	流量平均温度	1,243	1,215		1,226	1,217			
	■ 比重量	+11.07			+15.87				
		1,244			1,221				
1500mm (3%)	側壁高までの 平均温度	- 1.4	+16.4	+19.2	+ 5.2	+14.1	+19.6		
	空気比重量	+ 8.9	+18.3		+14.80	+17.77			
	流量平均温度	1,254	1,211		1,227	1,214			
	■ 比重量	+ 9.25			16.29				
		1,252			1,220				
2000mm (2.25%)	側壁高までの 平均温度	- 2.2	+17.6	+19.8	+ 4.0	+13.6	+19.9		
	空気比重量	+ 8.8	+19.1		+14.60	+17.80			
	流量平均温度	1,255	1,208		1,228	1,214			
	■ 比重量	+ 9.52			+ 16.2				
		1,250			1,220				

表中の空気比重量 γ は

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{p}{R} \cdot \frac{1}{(273+t)} = \frac{353}{273+t}$$

から図-3.29により求めた値である。

とすれば

$$\therefore u_1 = 0.35 \text{ m/s}$$

同様にして $u_2 = 0.38$

$$u_3 = 0.47$$

u₄ = 0 4 9 -

次に(4.10)式から熱流量を求めれば

空気の $C_p = 0.24 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$a = 0.0036 \text{ m}^2$$

$$q_1 = 1,238 \times 0,24 \times 0,0036 \times 0,34 \times 93 = 0,00348 \text{ Kcal/s} = 12,5 \text{ Kcal/h}$$

同様にして $q_2 = 0.00396 \text{ Kcal/s} = 14.2 \text{ Kcal/h}$

$$q_3 = 0.00768 \quad \text{и} \quad = 27.6$$

$$q_4 = 0.0089 \quad \sigma = 3.20$$

ここで添字 1、2、3、4 は開口率 9%、4.5%、3%、2.25%を示すものとする。

盛土のない場合における冷気流出量は(4.1)式から

表-4の数値から

$$\gamma_1 = 1.227 \text{ Kg/m}^3$$

$$\gamma'_1 = 1.218 \text{ Kg/m}^3$$

$$h = 0.2 \text{ m}$$

- 41 -

同様に $u_2 = 0.17$

$$u_3 = 0.20$$

$$u_4 = 0.21$$

冷気の熱流量は (4.16) 式から

$$G_P = 0.24$$

$$a_1 = 0.5 \times 0.2 = 0.1 m^2$$

$$\text{温度差 } \Delta t_1 = 1.83^\circ C$$

$$\therefore q_1 = 1.222 \times 0.24 \times 0.1 \times 0.17 \times 1.83 = 0.0091 \text{ kcal/s} = 3.28 \text{ kcal/h}$$

同様に $q_2 = 0.0186 \text{ kcal/s} = 67.0 \text{ kcal/h}$

$$q_3 = 0.0522 = 188.0$$

$$q_4 = 0.0787 = 283.0$$

したがって、盛土のない場合（開口率 100%）に流出する冷気熱流量に対する各開口率のボックスカルバートから流出する冷気熱流量の比を冷気の流出率とすれば、流出率 η は次のとおり求められる。

$$\text{冷気流の熱流量の流出率 } \eta_1 = \frac{12.5}{32.8} = 0.38$$

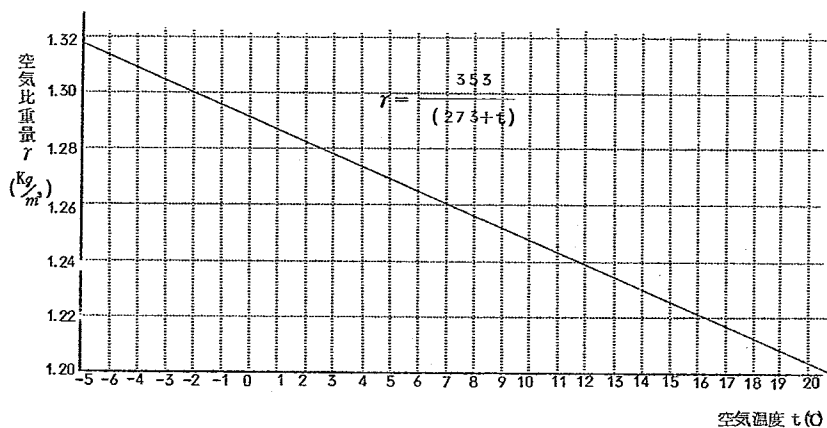
$$\text{同じく } \eta_2 = 0.21$$

$$\eta_3 = 0.15$$

$$\eta_4 = 0.11$$

図 - 3.29 空気の温度に対する比重量

(乾燥空気、標準圧力760mmHg)



以上の計算結果を表にまとめると表-5のとおりとなる。

表-5 開口率による冷気流出率

盛土長 (開口率)	盛土のない場合 冷気流出量	盛土のある場合 ボックスカルバート からの冷気流出量	冷気流出率
500mm (9%)	kcal/h 32.8	kcal/h 125	0.38
1,000mm (4.5%)	67.0	14.2	0.21
1,500mm (3.0%)	188.0	27.6	0.15
2,000mm (2.25%)	283.0	32.0	0.11

また、開口率と冷気流出量の関係を図示すれば図-3.30のようになり、縦軸上の同一の開口率の値に対する横軸上の実線と点線の比が冷気流出率を示すことになる。開口率100%においては実線と点線の値が一致する。

表-5の開口率と冷気流出率の関係を図示したのが図-3.31である。温度上昇率と比較すれば開口率9%、4.5%において約10%の差が生じているが、冷気流出率の方はあくまで計算上の結果であるからこの程度の誤差が生じるのは止むを得ない。

図 - 3 . 3 0

開口率と冷気流出量の関係

外気温度と冷気温度の差 30℃の場合

点線：盛土のある場合のカルパートからの冷気流出量

実線：盛土のない場合の冷気流出量（この場合の縦軸は開口率に相当する盛土延長を示す）

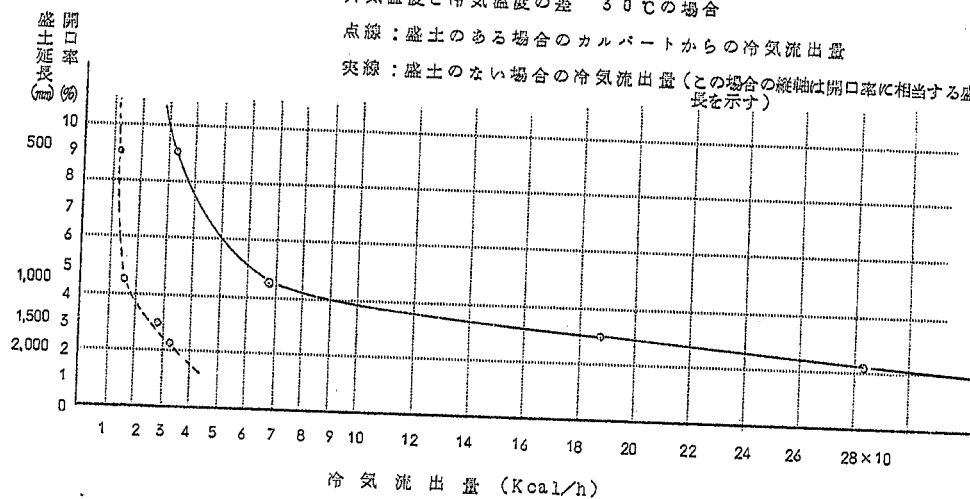
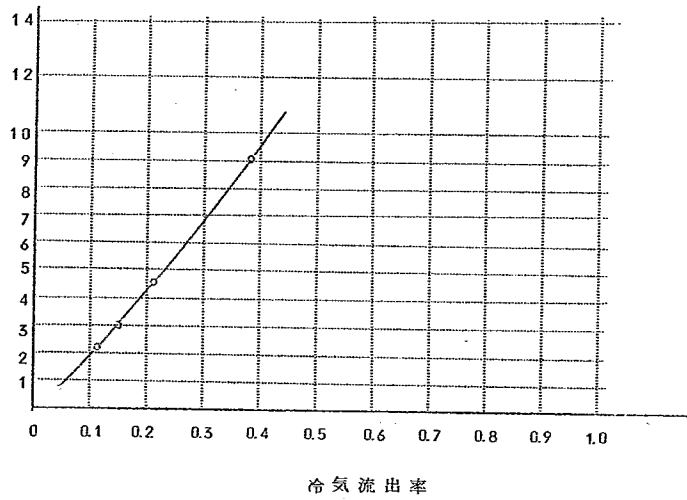


図 - 3.31

開
口
率
(%)

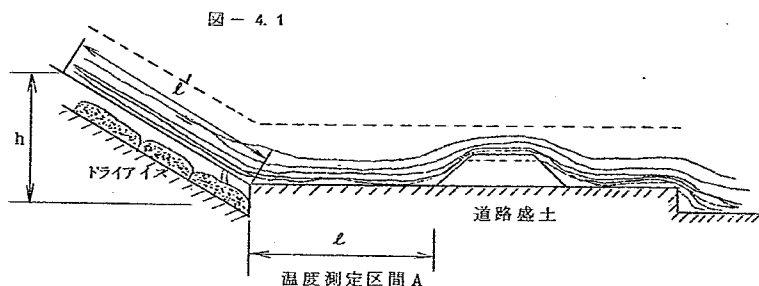
カルパートの開口率と冷気流出率



4 冷気流に関する理論式

冷気流の流出は斜面上に発生した温度の低い空気層が密度が大きいため下方に移動する現象であり、熱的には自然対流によるものであるが、移動の過程において上方の温度の高い空気層からの熱伝達を受け、冷気の温度も移動するにしたがって次第に上昇する。

一般に平地に流出する冷気の流出速度と流出温度は斜面上の冷気層の温度と周囲温度の差および冷気量（冷気層の厚さ）斜面の勾配と長さ（垂直距離）に関係するが、一方流出する平地の表面粗度と下流側に設けられる冷気の流れを阻止する構造物によって大きな影響を受けるものと考えられる。



いま図 - 4.1 の模型を考え斜面下ボックスにドライアイスを入れることにより斜面上から無限の冷気が時間的に一定量（厳密には後述のようにドライアイスの消耗により減少するが短時間においては一定とみなすことができる）発生すると考えれば、斜面と盛土の間の平地区間 A 上では、盛土の有無または盛土のカルバート開口状態によってある一定温度に平衡する。

盛土の状態によって冷気流の流出する機構を分けると、まず

- (1) 盛土のない状態では冷気流は地盤に沿って下流側に流れ、斜面から流下する冷気は温度のより高い上層からの熱伝達による熱量を吸収して、一定の温度分布に平衡しながら下流に流出する。

この場合開口率 100% の状態とみなされる。

② ボックスカルバート閉塞の状態の盛土が置かれた場合には冷気は盛土高さによって流れを阻害され下方に停滞する。斜面からの冷気は温度の高い上層からの熱伝達による熱量の吸収を①と同様に受けるが、冷気の停滞によって測定区間の温度は、低下する。冷気の一部は盛土面に沿って溢流して下流に流出する。この場合開口率 0% の状態とみなされる。

③ ボックスカルバート開口の状態では②の場合の停滞する冷気の一部が開口率に応じてボックスカルバートから流出し測定区間の温度は上昇する。残りは②の場合と同様盛土面を越えて流下する。

図 - 4.1 において斜面長 l' 、落下高を h 、周囲の大気の絶対温度を T' 、冷気の絶対温度を T 、冷気の比重量を r 、周囲大気の比重量を r' とし、地盤の摩擦抵抗を無視するものとすれば、冷気流の速度 u は次式で示される。

$$\frac{u^2}{2g} \cdot r = (r - r') \cdot h$$

$$u = \sqrt{2gh \cdot \left(1 - \frac{r'}{r}\right)}$$

$$r = \frac{1}{v} = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

$$r' = \frac{1}{v'} = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{T'}$$

$$\therefore u = \sqrt{2gh \cdot \left(\frac{T' - T}{T'}\right)} \quad (4.1)$$

斜面の角度を θ とすれば

$$u = \sqrt{\frac{2g l \sin \theta (T' - T)}{T'}} \quad (4.2)$$

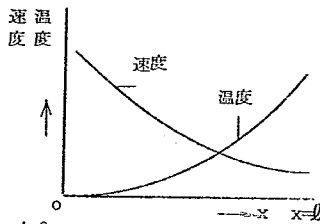


図-4.2

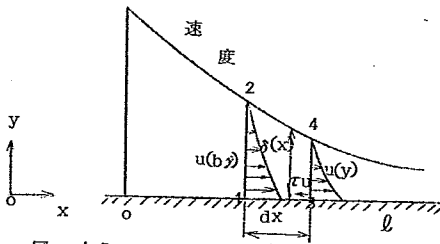


図-4.3

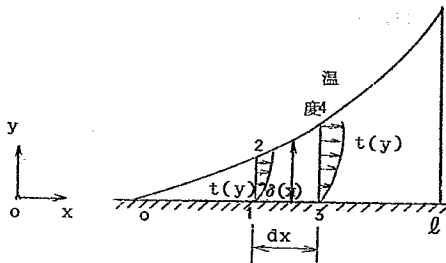


図-4.4

自然対流における乱流熱伝達に関する理論は現在まだ明らかにされていないがここでは境界層における運動量および熱流方程式を求めるものとする。

測定区間上の速度および温度分布は一般に図-4.2に示すとおりとなる。

運動量の式を求めるために図-5.3に平板上の定常流中における容積一定の検査面を考える。検査面を通して単位時間に冷気流が受ける運動量の変化は検査面に作用するすべての外力の和に等しい。ここで外力は温度差にもとづく密度差による冷気の質量力と地盤の摩擦抵抗力であり、下流に流出するにしたがって温度が上昇し、速度は低下すると考えられる。

検査面は地盤に垂直な二つの平面(1-2)、(3-4)と地盤上の(1-3)面、地盤から距離 δ (x)にある(2-4)面からなり、巾1とする。面(1-2)を通して質量 $\rho \int_0^\delta u \cdot dy$ が流入するとすれば、運動量は $\rho \int_0^\delta u^2 \cdot dy$ となり出口の面(3-4)を

通るとき、 $\rho \frac{d}{dx} \left(\int_0^\delta u^2 \cdot dy \right) \cdot dx$

だけ変化する。これは冷気の質量

力と摩擦抵抗力の差に等しいので、

$$\beta \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta t - \tau_w = \rho \cdot \frac{d}{dx} \left(\int_0^{\delta} u^2 \cdot dy \right) \quad (4.3)$$

これが冷気流の運動量の方程式である。

ここに β は容積収縮率で単位容積あたり沈降力 A は

$$A = \beta \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

から求められる。

Δt は温度差で Δt が小さいときは

$$\text{空気の状態方程式 } P v = R T \text{ から } \rho \cdot g = \frac{1}{v} = \left(\frac{P}{R} \right) \cdot \frac{1}{T}$$

P はこの場合一定であるから $\left(\frac{P}{R} \right)$ は常数

$$\therefore \beta = \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dt} \div \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

ただし ρ : 空気密度 $(\text{kg s}^3 / \text{m}^4)$

g : 重力の加速度 (m / s^2)

v : 空気比体積 (m^3 / kg)

T : 絶対温度 $(273 + t^\circ \text{C})$

R : ガス常数 $(29.27 \text{ m} / \text{K})$

P : 絶対圧力 (kg / m^2)

$$\text{また、} \tau_w = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (4.6)$$

ただし μ : 地盤摩擦係数

u : x 方向速度 (m / s)

次に図 - 5.4 から熱流方程式を求める。

温度は地盤上の冷気最低温度 t_c から高さ δ において外気温度 t_∞ になるものとする。

図のような検査面を考え摩擦熱はないものとし熱平衡を考える。面 (1 - 2) を通って流れとともに冷気熱量 $r \cdot c_p \int_0^{\delta} t \cdot u \cdot dy$ が入るものとするれば (3 - 4) から出るまでに吸収する熱量は上層から (2 - 4) を通

って熱伝達により入る熱量 q_{∞} に等しい。

$$\frac{q_{\infty}}{\gamma \cdot G_p} = a \cdot \left(\frac{dt}{dy} \right)_{y=0} = \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} \Delta t \cdot u \cdot dy \quad (4.7)$$

ここに a は温度伝導率で

$$a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot G_p} \quad (4.8)$$

ただし λ : 熱伝導率 $\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

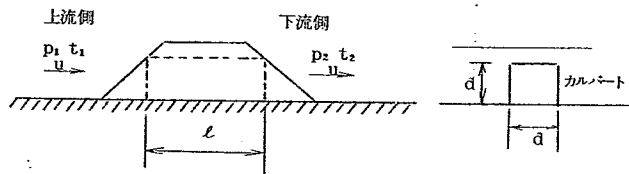
γ : 空気比重量 Kg/m^3

G_p : 空気定圧比熱 $\text{kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

以上運動量方程式および熱流方程式が求められた。もし、実測結果から盛土の有無、ボックスカルバートの開口状態による測定区間の各水平、垂直の温度ならびに速度分布が得られるならば、これらの式から冷気速度と摩擦抵抗力、上層空気からの熱伝達による熱量が得られ、盛土開口状態における熱的変動の関係を求めることができ、したがって逆にボックスカルバートからの冷気流出量が得られることになる。

次にボックスカルバート内を直接流出する冷気量を求める。

図— 4. 5



いま図— 4. 5 に示すような道路盛土およびボックスカルバートを考え、冷気流は上流から自然対流による定常流れを生じ熱的平衡状態にあるものとする。

ボックスカルバート内の流れは両端の空気層の温度差にもとづく密度差

によるものでこれがカルバートの壁面摩擦抵抗と釣合うとすれば、

$$(r_1 - r_2) \cdot S = \left(\rho + \lambda \cdot \frac{L}{d} \right) \cdot \frac{u^2}{2g} \cdot r_{12} \quad (4.9)$$

ここに、 r_1 、 r_2 : 上流側、下流側の平均空気比重量 (Kg/m^3)

S : 冷気層厚 (m)

u : 冷気流速 (m/s)

r_{12} : ボックスカルバート内冷気流比重量 (Kg/m^3)

L : 長さ (m)

d : 代表寸法 (m)

λ : 摩擦損失係数

ρ : カルバート内出入口損失係数

γ の値は空気の状態方程式 $PV=RT$ から

$$\gamma = \frac{1}{V} = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{(273+t)}$$

またカルバートから流出する冷気の熱量は次式から求められる。

$$Q = \gamma \cdot C_p \cdot a \cdot u \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

ただし Q : 単位時間にカルバートから流出する冷気の熱量 (kcal/s)

u : カルバートから流出する冷気の流れ速度 (m/s)

γ : 比重量 (Kg/m^3)

Δt : 出入口における温度差 ($^{\circ}\text{C}$)

C_p : 空気の比熱 ($\text{kcal}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$)

a : ボックスカルバートの断面積 (m^2)

すなわちボックスカルバート上下流側の冷気層の厚さと平均温度差が分れば (4.9)

式、(4.10) 式から冷気量あるいは冷気の熱流量を求めることができる。

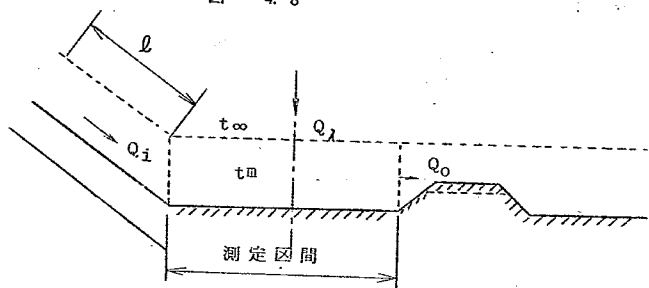
ここで冷気の熱流量とは単位時間に吸収すべき熱量を意味し、高温から低温に移る熱量に対する負の値と考えるものとする。

以上が冷気の流出に関する理論式であるが、実測の結果サーミスタ温度計の数量の不足、微流速測定計の精度不良、ドライアイスの形状、重量の一定化の困難等の制約から上記理論式にあてはめられるだけのデータを求める

ことができなかつた。したがってここで実測データを整理、解析するために
たつて次の方法を試みることにした。

本試験調査の主眼とする所はボックスカルバートの開口状態による上流平地
測定区間上の温度の変化を知ることであるので平地測定区間上の主な点の
温度を測定し、その温度分布の変動（熱エネルギーの変化）からボックスカ
ルバート開口の影響を求めるものとする。そしてこの温度変化が熱的にはど
のような意味をもっているかを次に検討する。

図 - 4. 6



いま図-4.6のように斜面から単位時間に一定量の冷気が測定区間を通っ
て、盛土を越え、あるいはボックスカルバートを通して下流に流出するもの
とし、

Q_i : 斜面から単位時間に測定区間に流入する冷気の熱流量 (kcal/h)

Q_1 : 測定区間上層から熱伝達による熱流量 (kcal/h)

Q_0 : 測定区間から盛土面、カルバートを通して、盛土がない (kcal/h)

場合はそのまま下流に流出する熱流量

とすればある時間後には測定区間上の温度分布は斜面からの冷気量と外気温
度が変わらない限り一定値に平衡する。この場合には斜面からの冷気量は測
定区間上層からの熱伝達による吸収熱量と測定区間から下流に向かって流出す
る冷気量の和に等しい。

すなわち

$$Q_i = Q_1 + Q_0$$

(4.11)

$$\text{ここで } Q_1 = k \cdot F \cdot (t_{\infty} - t_s) \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4.13)$$

ただし

- S : アルミ板厚 (m)
- λ : アルミニウム熱伝導率 (kcal/m・h・℃)
- α_1 : ドライアイス→空気熱伝達率 (kcal/m²・h・℃)
- α_2 : アルミ板→空気熱伝達率 (kcal/m²・h・℃)
- t_{∞} : 外気温度 (℃)
- t_s : ドライアイス表面温度 (℃)
- Q_1 : 冷気熱流量 (kcal/h)
- F : 斜面面積 (m²)
- k : 総熱伝達率 (kcal/m²・h・℃)

測定区間上層からの熱伝達による熱流量 Q_1 は一般に

$$Q_1 = \alpha \cdot A \cdot (t_{\infty} - t_s) = \frac{\lambda}{S} \cdot A \cdot (t_{\infty} - t_s) \quad (4.14)$$

で表わされる。ここに α は測定区間における平均熱伝達率 (kcal/m²・h・℃)、 A は測定区間表面積 (m²)、 t_{∞} は外気温度 (℃)、 t_s は地盤における冷気の最低温度 (℃) である。

α は一定の λ に対し、地盤における冷気の温度差 ($t_{\infty} - t_s$) によって変わる値であるが、 Q_1 の概略値の比較を行なう意味でここでは一定と仮定し、($t_{\infty} - t_s$) の代りに外気温度と冷気層平均温度の差 ($t_{\infty} - t_m$) を使用するものとすれば

$$Q_1 = \alpha \cdot A \cdot (t_{\infty} - t_m) \quad (4.15)$$

また、測定区間から下流に流出する熱流量は次式から求められる。

$$Q_0 = q \cdot r \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (4.16)$$

ただし

- q : 測定区間から下流に流出する空気量 (m³/h)
- r : 流出空気比重量 (Kg/m³)
- C_p : 流出空気比熱 (kcal/Kg・℃)

Δt : 盛土前の冷気層平均温度と外気温度との差 (℃)

(4.11)式から閉塞状態における冷気流出量、および上層からの熱伝達量を添字1で表わし開口状態における冷気流出量および熱伝達量を添字2で表わせば斜面からの冷気量は1.2の場合とも等しいと考えられるので、

$$Q_{11} + Q_{01} = Q_{12} + Q_{02} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_{02} - Q_{01} &= Q_{11} - Q_{12} = \alpha \cdot A \cdot \{t_{\infty} - t_{m1}\} - \{t_{\infty} - t_{m2}\} \\ &= \alpha \cdot A \cdot (t_{m2} - t_{m1}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

$Q_{01} - Q_{02}$ は閉塞状態に対しカルバート・開口により測定区間から流出する熱流量の差すなわち、カルバート内を通過する熱流量にほぼ等しいとみなすことができる。(実際には②におけるカルバートを通過する冷気熱流量と盛土を越流する冷気熱流量の和から①における盛土越流熱流量を差引いた熱量に等しい)したがってカルバート閉塞時と開口時の測定区間上の温度分布から各々の平均温度を求め、その差に対する熱伝達による熱流量がカルバートを通過する冷気熱流量に等しくなる。しかしながら斜面上に発生する単位面積あたり冷気量を各開口率ごとに等しくすることが困難であるため上記の方法で求めたカルバート流出冷気量の絶対量の比較によって各開口率ごとの比較を行なうことはできない。したがって各開口率ごとの比較を行ない、それによって開口による影響を量的に求めるためにはまず(4.11)式において開口率100%すなわち盛土のない場合の冷気流出量および上層から熱伝達量を添字3で表わし、閉塞状態の時の冷気流出量、熱伝達量(添字1)との差から開口率100%の場合の冷気流出量を求め、その値に対する各開口状態の流出量の比をもって表わすことが適当と考えられる。すなわち、

$$Q_{11} + Q_{01} = Q_{13} + Q_{03}$$

$$Q_{03} - Q_{01} = Q_{11} - Q_{13} = \alpha \cdot A \cdot (t_{m3} - t_{m1})$$

$$\frac{Q_{02} - Q_{01}}{Q_{03} - Q_{01}} = \frac{\alpha \cdot A \cdot (t_{m2} - t_{m1})}{\alpha \cdot A \cdot (t_{m3} - t_{m1})} = \frac{t_{m2} - t_{m1}}{t_{m3} - t_{m1}} \quad (4.19)$$

温度分布の測定にあたってはなるべく測定区間上の多くの点における温度変化を求めるのが正確な値を出す上に必要であるが、サーミスタ温度計の個数の制約から便宜上測定区間の中央断面上の3点において温度変化を求めこの値の平均値でもって測定区間内の平均温度とするものとする。

(4.19) 式の値は各開口率に対し100多開口率と比較した開口による熱量変化の割合を示すものでカルバートに対しては冷気流出率、上流測定区間に対しては温度上昇率と定義することができる。冷気流出率または温度上昇率1.0とはカルバートからの冷気流出量または測定区間温度がそれぞれ盛土のない場合の冷気流出量または上流測定区間の温度分布に等しいことを意味する。

5. 相 似 率

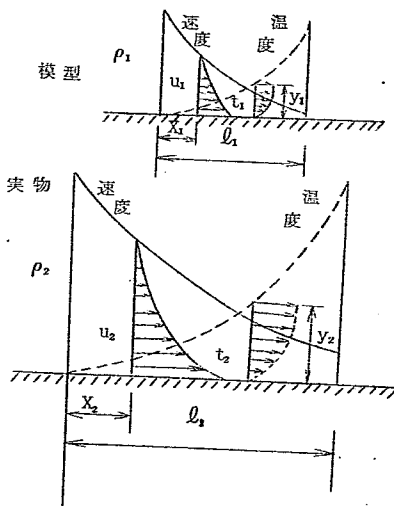


図 - 5.1

模型試験の結果を実際の現象に適用するためにはどのような条件が必要となるか、

いわゆる相似法則について考察する。

斜面からの冷気流が密度差によって流出する自然対流の運動ならびに熱伝達現象は次の微分方程式によって示される。

すなわち、

運動方程式

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \beta \cdot t + \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5.1)$$

エネルギー方程式

$$u \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho \cdot g \cdot C_F} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (5.2)$$

熱伝達の式

$$\frac{q}{A} = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) = \alpha \cdot (t_{\infty} - t_s) \quad (5.3)$$

ここで

- u : x 方向の冷気流速成分 (m/s)
- v : y 方向の冷気流速成分 (m/s)
- ν : 空気の動粘性係数 (m^2/s)
- t : 温度または温度差 ($^{\circ}C$)
- β : 空気体積収縮係数 ($1/^{\circ}C$)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- ρ : 空気密度 (Kg/m^3)
- C_F : 空気比熱 ($kcal/Kg \cdot ^{\circ}C$)
- λ : 熱伝導率 ($kcal/m \cdot h \cdot ^{\circ}C$)
- α : 熱伝達率 ($kcal/m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C$)
- A : 熱伝達面積 (m^2)
- q : 熱流量 ($kcal/h$)

図-5.1に示す模型と実物の二つの系は幾何学的、流体力学的、熱的に相似であり次のような一定の比で表わされるものとする。

$$\text{座標 } x, y \text{ を含む長さ } l \text{ に対し} \quad f_l = \frac{l_2}{l_1} = \frac{x_2}{x_1} = \frac{y_2}{y_1}$$

$$\text{速度 } u, v \text{ に対し} \quad f_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{u_2}{u_1}$$

密度 ρ に対し	$f_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}$	
動粘性係数 ν に対し	$f_\nu = \frac{\nu_1}{\nu_2}$	
温度 t に対し	$f_t = \frac{t_2}{t_1}$	(5.4)
熱伝導率 λ に対し	$f_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	
熱伝達率 α に対し	$f_\alpha = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$	
比熱 C_p に対し	$f_{Cp} = \frac{C_{p2}}{C_{p1}}$	
温度による容積収縮率 β に対し	$f_\beta = \frac{\beta_2}{\beta_1}$	
重力の加速度 g に対し	$f_g = \frac{g_2}{g_1}$	

(5.1) 式 ~ (5.3) 式を系 2 に対してかきそれに (5.4) 式を代入すると、
運動方程式

$$\frac{f_\lambda^2}{f_\ell} \cdot \left(u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + v_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial y_1} \right) = f_g \cdot f_\beta \cdot f_t \cdot g_1 \cdot \beta_1 \cdot t_1 + \frac{f_\nu f_u}{f_\ell^2} \cdot \nu_1 \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial y_1^2} \quad (5.5)$$

エネルギー方程式

$$\frac{f_\lambda \cdot f_t}{f_\ell} \left(u_1 \cdot \frac{\partial t_1}{\partial x_1} + v_1 \cdot \frac{\partial t_1}{\partial y_1} \right) = \frac{f_\lambda \cdot f_t}{f_\rho \cdot f_{Cp} \cdot f_\ell^2} \cdot \frac{\lambda_1}{\rho_1 g_1 C_{p1}} \cdot \frac{\partial^2 t_1}{\partial y_1^2} \quad (5.6)$$

熱伝達の式

$$\frac{f_\lambda \cdot f_t}{f_\ell} \cdot \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial t_1}{\partial y_1} \right) = f_\alpha \cdot f_t \cdot \alpha_1 \cdot (t_\infty - t_1)_1 \quad (5.7)$$

となる。

以上の式から幾何学的、力学的、熱的を相似が成立つためには各式の共通係数が等しいことを必要とする。すなわち

$$(5.5) \text{ 式から } \frac{f_\lambda^2}{f_\ell} = f_g \cdot f_\beta \cdot f_t = \frac{f_\nu \cdot f_u}{f_\ell^2} \quad (5.8)$$

冷気流は主として重力の慣性力によるものと考えられ、速度も遅いので粘性による摩擦力を無視するものとすれば (5.8) 式の 1.2 項から

$$\frac{u^2}{L \cdot g \cdot \beta \cdot t} = \text{一定} \quad (5.9)$$

もし二つの系の温度が一定の場合には

$$\frac{u^2}{L \cdot g} = \text{一定} = Fr \text{ 数} \quad (5.10)$$

すなわち Froude number 一定が流れの相似の条件となり、その場合二つの系の温度差は互に等しくなる。

また (5.6) 式から
$$\frac{f_u \cdot f_t}{f_L} = \frac{f_A \cdot f_t}{f_p \cdot f_{er} \cdot f_L^2}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot G_F} \text{ であるから } \frac{u \cdot L}{\alpha} = \text{一定 (Peclet number)} \quad (5.11)$$

もし (5.8) 式から粘性項を考慮に入れ速度項を消去すれば

$$\frac{g \cdot \beta \cdot t \cdot L^3}{\nu^2} = \text{一定 (Grashof number)} \quad (5.12)$$

(5.8) 式と (5.11) 式から

$$\frac{\nu}{\alpha} = \text{一定 (Prandtl number)} \quad (5.13)$$

(5.7) 式から

$$\frac{f_L}{f_L} = f\alpha \text{ あるいは } \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \text{一定 (Nusselt number)} \quad (5.14)$$

これから自然対流における熱伝達は

$$N_u = F(G_r \cdot P_r) \quad (5.15) \text{ で表わされる。}$$

(5.13) 式は流体の性質を示す無次元数で 0℃ の空気の場合 0.72 である。

以上の結果を模型と実物に対しどのように適用するか、あるいは無次元数がどのような物理的意味をもっているかを考察する。Fr 数が一定の場合には流れの速度は模型縮尺の平方根に比例する。自然対流では速度は冷気層の温度差と高さによるものだけで他から加わるものはない。したがって温度差を一定とすれば模型と実物の間には次の関係がなりたつ。

$$\left(\frac{u^2}{L}\right)_M = \left(\frac{u^2}{L}\right)_N \quad (5.16)$$

ここで M は模型、N は実物を示す添字とする。

縮尺 $\frac{1}{100}$ の模型に対しては

$$\ell_M = \frac{1}{100} \cdot \ell_N$$

$$\therefore u_M = \frac{1}{10} \cdot u_N$$

$$N_u \text{ 数は } N_u = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} = \frac{\ell}{\lambda} \cdot \frac{\alpha}{\lambda}$$

これは対流で流れている実際の冷気層の高さと冷気層が静止していると仮定した場合のその高さの比と考えられる。また一方、

$$N_u = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda/\ell}$$

と考えれば N_u 数は熱伝達率 α によって表わされる実際の熱流密度と厚さ ℓ の層の純熱伝導による熱流密度との比と考えられる。

の間には

乱流の自然対流では

$$N_u = F \cdot (Gr \cdot Pr)$$

で熱伝達率 α は N_u 、あるいは Gr , Pr の値によって決まる値であるが、その関数形は現地試験結果から確かめられなければならない。

6. 固態二酸化炭素の特性

固態二酸化炭素（ドライアイス）は炭酸ガスを高圧下（3.0 気圧の下で $-7^{\circ}\text{C} \sim -7.5^{\circ}\text{C}$ 、100 気圧の下で $+2.5^{\circ}\text{C}$ ）に冷却して固体化させたもので比重量 1.525 kg/m^3 、大気圧の下で昇華温度 -78.5°C 、昇華熱 136.7 kcal/kg である。

ドライアイスの昇華熱の時間的発生量すなわち消耗度は、周囲温度、形状によって異なるがここではある仮定を設けて簡単な計算式を誘導し、実際の測定結果と比較する。

いまドライアイスを正立方体と考え

ドライアイス昇華熱	:	$S \text{ (kcal/kg)}$
周囲温度	:	$T_R \text{ (}^{\circ}\text{C)}$
ドライアイス昇華温度	:	$T_D \text{ (}^{\circ}\text{C)}$
温度差	:	$\Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = T_R - T_D$
密度	:	$\rho \text{ (kg/m}^3)$
重量	:	$W \text{ (kg)}$
立方体辺長	:	$x \text{ (m)}$
立方体表面積	:	$F \text{ (m}^2)$
時間	:	$t \text{ (hr)}$

ドライアイス熱伝達率 : $k \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ とすれば

$$F = ax^2$$

$$W = bx^3 \cdot \rho$$

(6.1)

ここで a は立方体の面数、 b は立方体の数を示す。

時間 dt の間に周囲からドライアイスに入る熱量を dQ とすれば

$$F \cdot \Delta T \cdot K \cdot dt = dQ = -dW$$

(6.1) 式を代入して

$$ax^2 \cdot \Delta T \cdot K \cdot dt = -d(bx^3 \cdot \rho) \cdot S$$

$$= -3bx^2 \cdot \rho \cdot S \cdot dx$$

$$dx = -\frac{a \cdot \Delta T \cdot K}{3b \cdot S \cdot \rho} \cdot dt$$

周囲温度、熱伝達率を一定と仮定し、

$$\frac{a \cdot \Delta T \cdot K}{3b \cdot S \cdot \rho} \text{ を定数 } A \text{ とすれば}$$

$$dx = -A \cdot dt$$

これを積分すれば

$$x = -A t + B \quad (6.2)$$

B は $t = 0$ の場合の辺長 x となる。

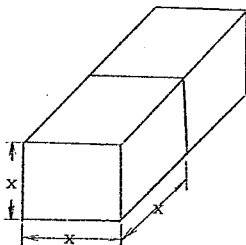
$$(6.1) \text{ 式から } W = b \cdot (-A t + B)^3 \cdot \rho \quad (6.3)$$

消耗度の測定結果によると

ドライアイスを図-6.1のとおり立方体を2枚ならべて台上に置いて測定した結果平均室内温度 $T_R = 10^\circ\text{C}$ 、 $B = 0.254 \text{ m}$ 、 $W = 2.5 \text{ Kg}$ であった。

$$\text{したがって } \rho = \frac{2.5}{(0.254)^3} = 1525 \text{ Kg/m}^3$$

図-6.1



$$S = 1367 \text{ kcal/Kg}$$

$$\Delta T = T_R - T_D = 10 - (-78.5) = 88.5^\circ\text{C}$$

$$A = \frac{a \cdot \Delta T \cdot K}{3b \cdot S \cdot \rho} = \frac{9 \times 88.5}{3 \times 2 \times 1367 \times 1525} \cdot \text{K}$$

$$= 0.000636 \text{ K}$$

(台上に置いてあるため $a = 9$ と仮定する)

$$W = 2 \times (-0.000636 \text{ K} \cdot t + 0.254)^3 \times 1525$$

実測により、

$$t = 4 \text{ hr. のとき } W = 4.0 \text{ Kg} \text{ であるから}$$

$$4.0 = 2 \times (-0.000636 \times 4 \cdot \text{K} + 0.254)^3 \times 1525$$

$$\therefore K = 7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$$

したがって

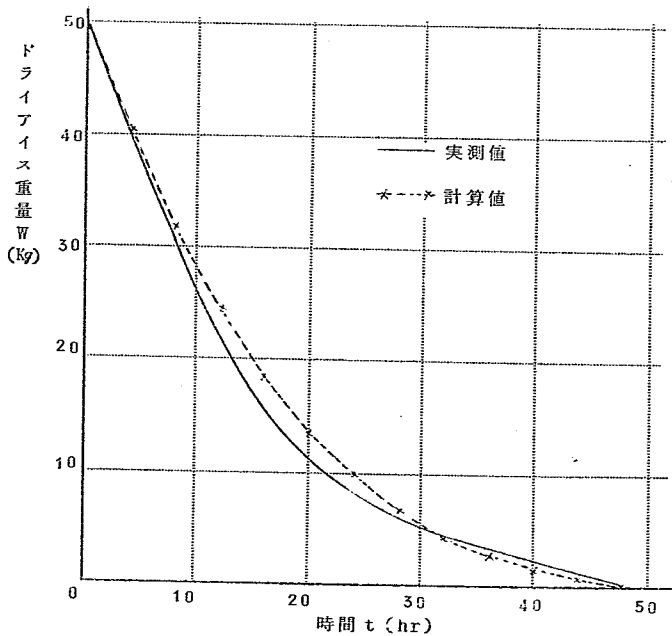
$$W = 3050 \times (-0.00445 \cdot t + 0.254)^3 \quad (6.4)$$

(6.4) 式から $t=0$ のとき、 $W=50 \text{ Kg}$ からの経過時間による W の変化を求めることができる。

図-6.2 は当初の $W=50 \text{ Kg}$ の場合における消耗度の実測値と(6.4)式による計算値を示す。

図-6.2 ドライアイス消耗度曲線

$$W = (-0.00445t + 0.254)^3 \times 3050$$



7 現 地 試 験

冷気流の実際の状態を測定し模型試験の結果と比較するために現地試験を行なった。

昭和40年3月23日4時30分から8^時00の間、滋賀県米原市醒ヶ井地内名神高速道路の農道としてのボックスカルバートを使用して高速道路の上下流平地における冷気流を測定した。

観測方法としては図-7.1の平面図のとおり上流側4ヶ所、下流側2ヶ所高速道路盛土上1ヶ所の計7点(高さ地上1.5m)の温度を5分間隔に読取り、冷気の流れは発煙筒の白煙を16mmカメラで撮影した。

観測結果は表-6、図-7.2のとおりである。

発煙筒の白煙は上方に拡散し、ボックスカルバート内の冷気の流れは全然見られなかった。

山の斜面は300m以上あり斜面下から高速道路まで500m位緩やかな下り勾配で巾約200mの両側は高さ10m~30mの丘で囲まれた平地であり、冷気流が生ずるものと期待したが、結果は残念ながら観測できなかった。発煙筒の白煙は第1回目では約5m~10mの高さで拡散しながら高速道路を横断して下流側に向って流下したが第2回目では第1回目と同じく約5m~10mの高さで拡散しながら高速道路の上を通過したが、1分後には方向を変えて逆に高速道路上を通過して上流側に逆流して来るのが観察されている。

十
六
外

図-7.1 冷気流試験地略図

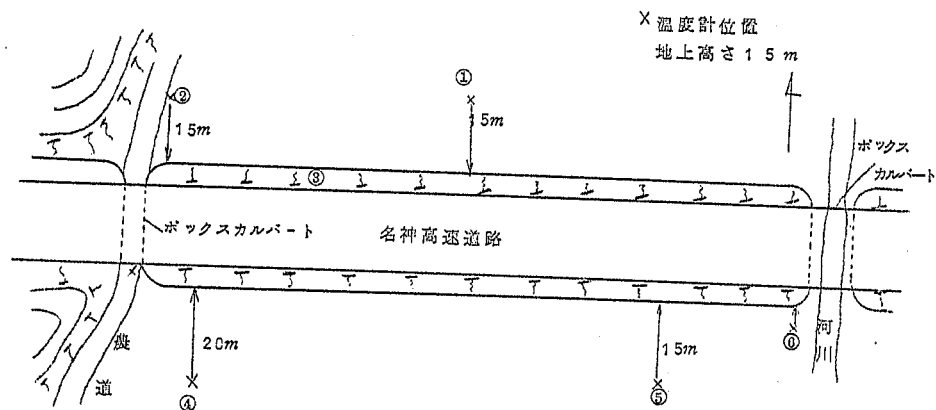
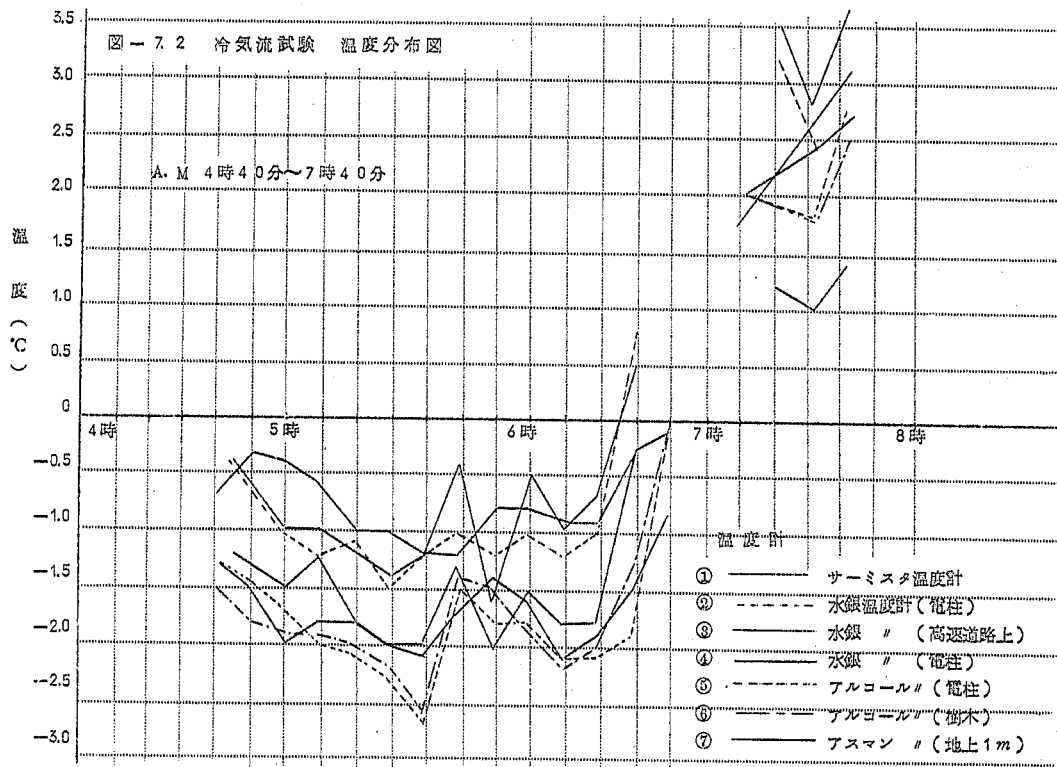


表-6 温度測定値

時刻	サーミスター ①	水銀温度計 (電柱に掛ける) ②	水銀温度計 (高速道路上) ③	精密水銀温度計 (電柱に掛ける) ④	アルコール温度計 (電柱に掛ける) ⑤	アルコール温度計 (木に掛ける) ⑥	アトマン乾湿計 (地上1m) ⑦
4時40分		欠	欠	-1.3	-1.3	-1.5	-0.7
4 45	-0.4	-0.4	-1.2	欠	欠	欠	欠
4 50	欠	欠	欠	-1.5	-1.5	-1.8	-0.3
5 0	-1.0	-1.0	-1.5	-2.0	-1.7	-1.9	-0.4
5 10	-1.0	-1.2	-1.2	-1.8	-2.0	-1.9	-0.6
5 20	-1.2	-1.1	-1.8	-1.8	-2.1	-2.0	-1.0
5 30	-1.4	-1.5	-2.0	-2.0	-2.3	-2.2	-1.0
5 40	-1.2	-1.2	-2.0	-2.1	-2.7	-2.6	-1.2
5 50	-0.4	-1.0	-1.3	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2
6 0	-1.6	-1.2	-2.0	-1.4	-1.8	-1.5	-0.8
6 10	-0.5	-1.0	-1.5	-1.6	-1.8	-1.9	-0.8
6 20	-1.0	-1.2	-1.8	-2.1	-2.1	-2.2	-0.9
6 30	-0.7	-1.0	-1.8	-1.7	-2.1	-2.0	-0.9
6 40	+0.5	+0.8	-0.3	-1.5	-1.9	-1.2	-0.3
6 50	欠	欠	欠	-0.8	0	0	-0.1
7 10	欠	欠	欠	+2.0	+2.0	+2.0	+1.8
7 20	+3.5	欠	+1.2	欠	欠	欠	欠
7 30	+2.8	+2.5	+1.0	+2.4	+1.8	+1.8	+2.6
7 40	+3.7	欠	+1.4	+2.7	+2.8	+2.5	+3.1



8 結 び

以上述べてきた各試験結果をとりまとめ要約すれば次のとおりである。

- (1) 斜面に発生する冷気は外気との温度差にもとづく密度差により低地に流出し冷気量あるいは冷気温度と外気温度との差により平地上において一定の水平、垂直方向の温度勾配は急で距離が長くなるにしたがって次第に勾配が緩やかになり、外気温度に漸近する曲線で示される。垂直方向に対しても同様で地盤近くほど温度勾配は急で上方に向うにしたがって緩勾配になって外気温度に漸近する曲線となる。したがって冷気層の厚さも冷気温度と外気温度の差が大きいほど厚くなる。
- (2) 平地上の温度分布は冷気の斜面上の高さ（または斜面長と勾配）によっても変動する。すなわち斜面上の冷気の高さが高くなるほど平地の温度は低くなる。
- (3) 平地上の冷気の測定温度は脈流しており、その振幅は盛土のない状態の速い流れの場合に大きく、盛土によって停滞している状態では小さい。これにより冷気流は熱的には乱流による自然対流とみなされる。
- (4) 冷気流は盛土によって流れを阻止され、低地に停滞することによって、盛土上流側の平地上の温度は低下する。その低下した平均の温度比は盛土の高さと冷気量によって異なるが、本試験の場合 0.3～0.5 となっている。
- (5) ボックスカルバート開口による盛土上流側平地上の温度上昇は開口率が大きくなるほど、また冷気温度と外気温度との差が大きくなるほど高くなる。盛土による平地上の低下温度からの温度上昇率を盛土のない場合の上昇温度に対するカルバート開口によって生じた上昇温度の比とすれば開口率 22.5%～9% に対し外気温度と冷気最低温度の差 3.0℃ に対し平均温度上昇率は 0.1～0.5 となり同じく外気温度と冷気最低温度の差 5℃ に対し、0.02～0.2 となる。
- (6) 冷気流のカルバート開口による変動量を示すのに盛土のない場合の冷気の流出による吸収熱エネルギーに対するカルバートを流出する場合の吸収熱エネルギーの比を使用することもできる。これを冷気流出率とすれば、冷気流出率は各開口率に対し平地上の温度上昇率と等しくなるはずである。

以上が本試験調査の結論であるが、初めて冷気流と言う特殊分野の問題を扱って、しかも短期間の試験であったため、測定範囲、測定回数も限られたものとなり、簡単な模型試験による極めて概略的な結果を得るにとどまった。

今後必要な測定上の問題としては

- (1) 冷気流の速度分布を温度と同時に測定するとともに計器の数を多くして精度の高い分布を求めること。
- (2) 冷気温度と外気温度の差についての測定段階と回数を増やすこと。
- (3) ドライアイスによる冷気発生量を単位時間、単位面積あたり一定になるようにして冷気流出量の絶対値の比較を可能にすること。
- (4) 開口率の段階を増やすとともに側壁の影響をなくするような盛土模型にすること。
- (5) 冬期における十分な現地調査を行なってその結果から模型試験の相似性について確かめること

筆があげられ、機会があればこれらの問題についてさらに試験調査を重ね、本試験結果を補ないたい。