

土 木 研 究 所 報 告

第 192 号

-
1. ヘリコプター等を用いた上空からの即時・広域震災情報の
収集技術の開発に関する研究 川島一彦, 杉田秀樹, 加納尚史 1
中島 燈, 運上茂樹, 飯田寛之
2. 大規模海浜過程の予測モデルに関する研究 都丸徳治 77

平成6年1月

建設省土木研究所

Copyright © (1994) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General 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、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ヘリコプター等を用いた上空からの 即時・広域震災情報の収集技術の開発に関する研究

川島 一彦*, 杉田 秀樹**, 加納 尚史***, 中島 燈**,
運上 茂樹****, 飯田 寛之**

Development of Surveying Systems for Detecting Seismic Damage Using Helicopters

by Dr. Kazuhiko Kawashima, Hideki Sugita, Takashi Kanoh, Tomoru Nakajima,
Shigeki Unjoh and Hiroyuki Iida

要 旨

本報告は、建設省総合技術開発プロジェクト「災害情報システムの開発（昭和62年～平成3年度）」において行った震災復旧計画作成支援システムに関する研究のうち、ヘリコプターを用いた震災情報の収集技術に係わる一連の研究成果をとりまとめたものである。

大規模地震により広域的に震災が生じた場合には、被害の拡大防止対策、二次災害防止対策及び被災施設の復旧対策等を適切に実施することが、被害の拡大や社会不安の増大を防ぐ上で極めて重要である。このためには、地震発生後において施設被害に関する情報を迅速に収集するとともに、これを適切に施設管理者に伝達することが重要となる。しかし、既往の地震時における震災情報の収集の実態を調査すると、施設被害や交通渋滞等により情報の収集そのものに長時間を要したり、震後の混乱により情報が断片的であったり、情報の精度が十分でなかったりした場合が多い。

したがって、このような状況を考慮すると、大規模かつ広域的な震災が都市域に生じた場合の震災情報を迅速かつ正確に収集するためには、従来の地上調査とは抜本的に異なった、新しく、高い信頼性を有する手法の開発が必要とされる。ヘリコプターを用いた上空からの調査は、道路の被害や交通渋滞に影響されず、機動性に富み、また、ビデオカメラ等を用いたビジュアルな情報を伝送することにより、施設管理者に必要な情報をリアルタイムで提供することも可能になると考えられる。

本研究では、上記の観点から、ヘリコプターを用いた震災情報収集技術を開発することを目的として、模擬的な地震被害を対象とした撮影実験による情報収集能力の検討、昭和53年伊豆大島近海地震時に撮影されたビデオ画像からの情報収集精度の検討、震後の時間経過に応じたヘリコプターの飛行方法の開発、ビデオ画像上で画像が流れないヘリコプターの最高飛行速度の設定方法の開発、夜間調査における熱赤外線カメラの撮影方法の開発、及び、ビデオ画像からの施設被害の簡易測定方法の開発を行った。

平成5年2月8日原稿受理 (Received on February 8, 1993)

*地震防災部耐震研究室長、工博
**** 同 耐震研究室主任研究員
** 同 耐震研究室研究員
*** 同 耐震研究室（現東北地方建設局郡山国道工事事務所調査課）

キーワード：大規模地震，震災復旧，震災情報，情報収集，ヘリコプター，可視ビデオカメラ，熱赤外線カメラ

ABSTRACT

The present report describes a comprehensive research for developing damage information surveying systems using helicopters immediately after an earthquake. This was conducted from 1987 to 1991 as a part of a comprehensive Five Year Research Project entitled "Development of Disaster Information Systems".

When a destructive earthquake occurs in urban area, for mitigating anxiety of public and functional damage in urban area, it is of great importance to prevent a spread of damage, prevent secondary effect associated with structural damage and to promptly repair structural damage. For facilitating the restoration, it is quite important to collect information immediately.

From the survey on the damage restoration in the past earthquakes, it is clear that it required much long time to collect the damage information, mostly due to damage of road and traffic congestions. Insufficient information was often collected due to the functional confusion in urban area, and the accuracy of information was insufficient.

Based of these facts, accurate information collecting systems available immediately after an earthquake, which is different from ordinary surveying method by ground patrol, is required when destructive damage occurs in urban area. Information collecting systems from air with use of helicopters seems promising for such purpose in comparison with the traditional ground patrol because it is not affected by the damage of road and traffic congestion, and also it can have high mobility. Furthermore transferring visual information using video camera taken from helicopter make it possible to supply information required for prompt repair and restoration on real-time.

Described in this report are a series of studies for investigating technical feasibility and development of damage surveying systems from air. Feasibility to detect seismic damage from air is firstly studied through an experiment in which several damages which were artificially placed on road and river facilities were detected from helicopter. The feasibility is also demonstrated by analysing a video tape which was taken for broadcasting purpose after the Izu-oshima Kinkai Earthquake in 1978.

Effectiveness of the thermal image sensor for surveying damage at night is then studied. Because accuracy of information required for repair and restoration depends on the time after the break out of an earthquake, it is required to collect the damage information taking account of such time flame.

The most appropriate flight method which takes account of seismic damage feature is proposed. Camera handling in both video camera and thermal image sensor is also proposed. Although it is desirable to fly over the damage area with high velocity, there is certain limit for preventing spoil of video picture. The maximum velocity of the helicopter which does not cause spoil of video picture is evaluated.

A new photographic survey method which can reduce the time required to make a map from video picture taken from helicopter is developed by eliminating positioning process. Accuracy of the new method developed is demonstrated through the application.

Key Words : Large Scale Earthquake, Damage Restoration in Earthquake Disaster, Damage Information in Earthquake Disaster, Information Collecting, Helicopter, Video Camera, Thermal Imaging Sensor

目 次

1. 概 説	5
2. ヘリコプター等による上空からの震災情報収集能力の検討	5
2.1 まえがき	5
2.2 模擬地震被害及びその調査法	6
2.3 昼間における模擬地震被害の調査	8
2.4 夜間における模擬地震被害の調査	14
2.5 まとめ	14
3. ヘリコプターから撮影したビデオ映像による地震被害状況の把握	17
3.1 まえがき	17
3.2 地震被害の概要	17
3.3 ビデオ映像を用いた被災状況の把握方法	17
3.4 ビデオ映像から見た被災状況の把握	18
3.5 ビデオ映像を中心とした地震被害の調査法	20
3.6 まとめ	25
4. 即時・広域震災情報の収集を目指したヘリコプター等の飛行方法	26
4.1 まえがき	26
4.2 震災復旧の時期区分とこれに対応したヘリコプター等の活用	26
4.3 震災復旧の第1及び第2段階におけるヘリコプター等の飛行方法	26
4.4 ヘリコプター等を用いた震災調査項目	27
4.5 可視ビデオカメラの撮影方法	30
4.6 熱赤外線カメラによる撮影方法	36
4.7 まとめ	37
5. ビデオ画像を用いた上空からの震災調査におけるヘリコプターの最高飛行速度	37
5.1 まえがき	37
5.2 画像の流れの発生のメカニズムと限界速度の評価	37
5.3 模擬地震被害を用いた飛行速度の検討方法	40
5.4 撮影対象の大きさに応じて必要とされるビデオカメラの焦点距離	41
5.5 橋脚の損傷を識別するための限界速度	43
5.6 まとめ	46
6. 震災情報の収集に対する熱赤外線カメラの適用性	47
6.1 まえがき	47
6.2 解析対象とする模擬地震被害及び撮影方法	47
6.3 模擬地震被害の撮影方法及び撮影条件	51
6.4 熱赤外線ビデオカメラによる模擬被害の識別	53
6.5 被害の識別程度に及ぼす風の影響	59
6.6 まとめ	64
7. 斜め写真及びビデオ映像を用いた震災状況の簡易測量法	65

7.1 まえがき	65
7.2 従来の写真測量	65
7.3 斜め写真及びビデオ映像を用いた簡易測距法の提案	68
7.4 PSEP 法による被災施設の解析	69
7.5 まとめ	72
8. 結論	73
謝 辞	73
参考文献	74
本研究に関連した発表論文等	74

第1章 概 説

大規模地震により広域的に被害が生じた場合には、被害の拡大防止対策、二次災害防止対策及び被災施設の復旧対策等を適切に実施することが、被害の拡大や社会不安の増大を防ぐ上で極めて重要である。このためには、地震発生後において、施設被害に関する情報を迅速に収集するとともに、これを適切に施設管理者に伝達することが重要となる。

しかし、既往の震災時における施設被害に関する情報の収集及び伝達では、以下のような問題点が指摘されている。^{1)~5)}

1) 情報の収集に時間がかかる

放置車両等の路上障害物、施設の被害、帰宅目的の車両の増加などに起因する交通渋滞等によって、施設の調査が思うようにはかどらない。また、電話回線の輻輳及び不通により、思うように情報を伝達できない。このため、地震後には通常のパトロールに比較して情報の収集に大幅な時間がかかる。

2) 収集される情報の内容が不十分

地震直後の混乱等により、伝達される情報の内容が断片的となり、施設管理者が被災状況を十分に把握できない場合がある。

3) 情報が正確でない

未確認情報も多量に収集されると同時に、調査担当者の主観的な判断も介入することがあるため、各々の情報の信頼性を適切に評価できない場合がある。

したがって、このような状況を考慮すると、大規模かつ広域的な震災が大都市域に生じた場合の震災情報を迅速かつ正確に収集・伝達するためには、従来から用いられている地上からのパトロール調査とは抜本的に異なった、新しく、高い信頼性を有する手法の開発が必要とされる。この1つの手法として、ヘリコプターや小型飛行機等を用いた上空からの震災調査方法が有望視されている。これは上空からの調査では、道路被害や交通渋滞に影響されず、機動性に富み、また、ビデオカメラ等を用いたビジュアルな情報を伝送することにより、施設管理者に必要な情報をリアルタイムで提供することも可能になるためである。

本研究では、大規模かつ広域的な震災が発生した場合の大都市域の即時・広域震災調査法の開発の一環として、ヘリコプター等の特性を活かした上空からの震災調査方法を開発することを目的として、上空からの震災調査のフィージビリティの検討、飛行方法及びビデオカメラの撮影方法の検討、熱赤外線カメラの適

用性の検討、解析時間の大幅な短縮を目指した写真測量方法の開発等に関して検討を行った。

第2章では、道路及び河川施設に模擬的に設けた地震被害を対象としたヘリコプターからの撮影実験により、ヘリコプターからの震災情報の把握能力を検討した結果を示す。

第3章では、昭和53年2月の伊豆大島近海地震の際にヘリコプターから撮影されたビデオ画像を用いて、ヘリコプターからの震災情報の把握精度を検討した結果を示す。

第4章では、第2章及び第3章の検討結果に基づき、ヘリコプターの特性を活かして即時・広域的に震災情報の収集を図るために必要とされるヘリコプターの飛行方法、及び、ビデオカメラの撮影方法を検討した結果を示す。

第5章では、震災調査を迅速に進める観点から、ビデオ画面上で画像が“流れ”ないヘリコプターの飛行速度の上限を、模擬地震被害の撮影実験により検討した結果を示す。

第6章では、夜間における震災調査に資することを目的として、熱赤外線カメラを用いた調査方法を、模擬地震被害を設けたRC橋脚模型及び盛土模型を対象とした撮影実験により検討した結果を示す。

第7章では、緊急措置及び応急復旧の基本方針を決定する上で、まず必要とされる施設被害の縦横断面図を、ヘリコプターから撮影されたビデオ画像及び斜め写真から作成するために、従来の写真測量の作業工程を大幅に省略した簡易測量法(PSEP法)を開発した結果を示す。

最後に、8章では本研究全体での結論を示す。

第2章 ヘリコプター等による上空からの震災情報収集能力の検討

2.1 まえがき

ヘリコプター等を用いた上空からの震災調査は、道路の被害や交通渋滞に影響されず、機動性に富み、ビデオ等を用いたビジュアルな情報をリアルタイムで施設管理者に伝送できるなど、広域的な震災情報を迅速に収集する上で有効と考えられる。ただし、このような手法を用いるためには、ヘリコプター等から震災状況の把握をどの程度の精度で行い得るかをよく検討しておかなければならない。

本章ではヘリコプター等を用いた震災情報収集能力

が実用に耐えるものであるかどうかを検討するために、道路及び河川施設に粘土、ペイント等で模擬的な地震被害を設けて、これを建設省の防災ヘリコプター“あおぞら”を用いて調査した結果を示す。

2.2 模擬地震被害及びその調査方法

2.2.1 模擬地震被害

調査対象としたのは、図-2.1 及び図-2.2 に示すように、関東地方建設局下館工事事務所管内の小貝川流域と千葉県国道工事事務所管内の国道16号である。この範囲の管理施設の中から、構造物の種類や被害の特性を考慮しながら、18施設を選び模擬的な地震被害を設けた。模擬地震被害は、既往の震災を参考にして、以下の方針で作成した。

1) ヘリコプターによる上空からの調査が有効なのは、震災復旧の第1段階（緊急調査から緊急措置の段階）及び震災復旧の第2段階（応急調査から応急復旧の段階）と考えられる。ここで、震災復旧の第1段階、第2段階とは、震後に必要とされる復旧作業を震後の時間経過によって整理すると、図-2.1、表-2.1のように3段階に区分される⁵⁾が、このうちの緊急調査から緊急措置の段階（震災復旧の第1段階）及び応急調査から応急復旧の段階（震災復旧の第2段階）のことである。これらの段階では、細かい被害の調査というよりも、重大な二次災害につながる可能性のある大規模な被害の発見が求められており、本当に重要な落橋とか盛土・斜面の大崩壊といった大規模被害の発見は、

特別な工夫をしなくても、現状でもヘリコプターからの目視調査で対応が可能である。このため、ここでは、

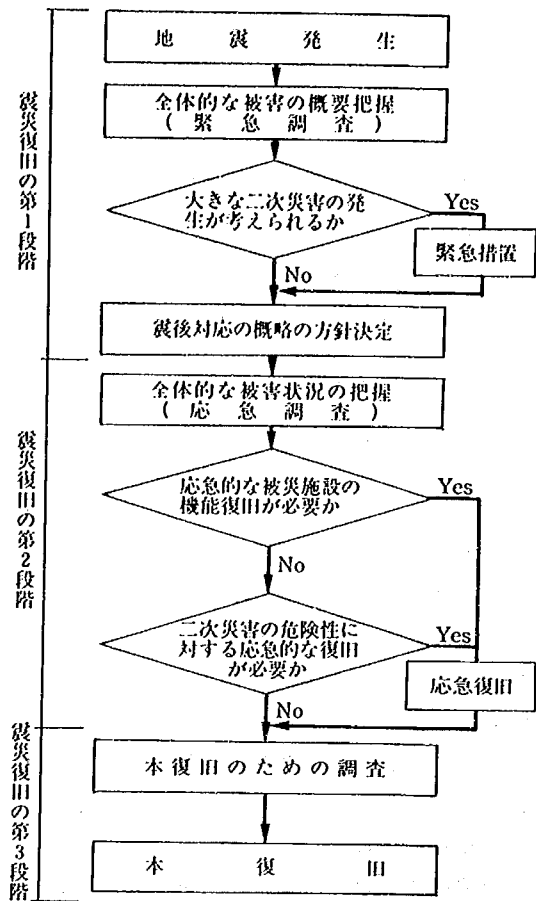


図-2.1 震災後の時期区分と復旧の進め方(参考文献⁵⁾による)

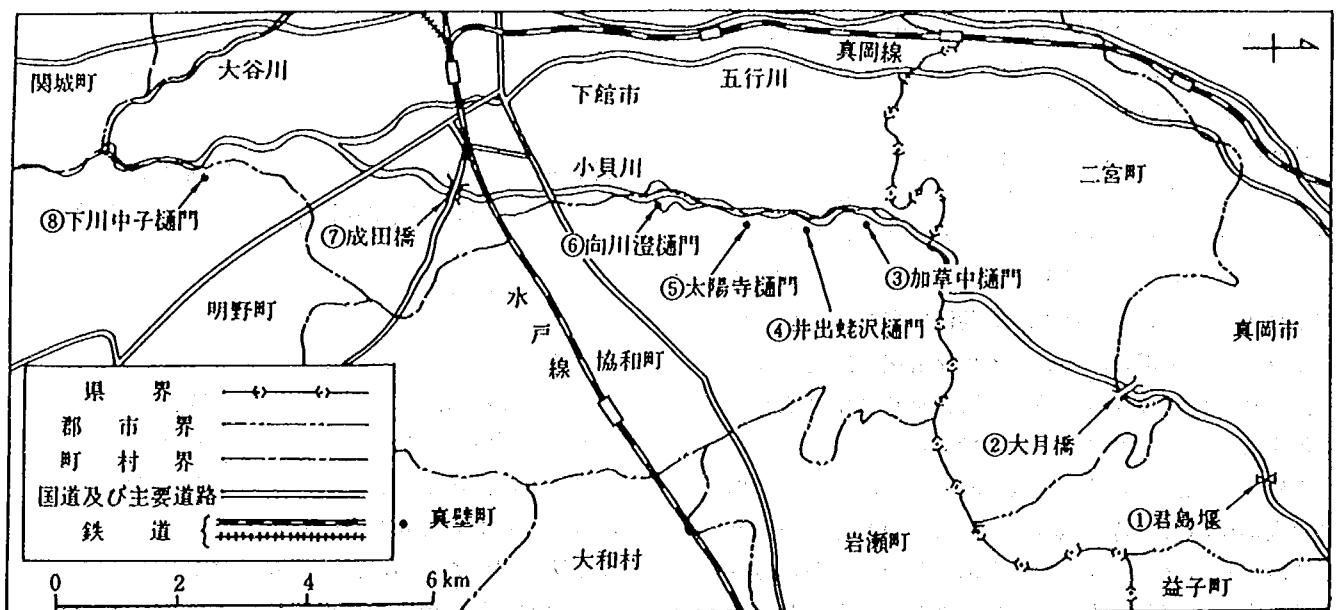


図-2.2 模擬地震被害調査飛行区間（河川施設、①～⑧は模擬地震被害を設けた施設、表-2.2参照）

表-2.1 震後の時期区分に応じた震災復旧の基本方針

復旧の区分	震災発生後の時間	震災復旧の基本方針
震災復旧の第1段階	発震～約1時間後	被災状況の概略を把握して復旧方針を定めるとともに、二次災害の危険性を適切に判定し、必要に応じて緊急措置を行う。
震災復旧の第2段階	約1時間後～約1日後	施設全体の被災状況を把握し、二次災害の危険性、復旧の緊急性、施設の用途・重要度、本復旧までの工期等に応じて応急復旧を行う。
震災復旧の第3段階	約1日後～約1週間後	施設の重要性、被災箇所・程度、復旧の難易度、施設の将来計画を考慮して本復旧水準を定めるとともに、地域の将来計画を考慮して本復旧を行う。

表-2.2 模擬地震被害

(a) 道路施設

番号	被害設置施設	模 擬 地 震 被 害
1	溝下橋	橋台のクラック
2	長浦袴線橋	橋台のクラック
3	奈良輪高架橋	橋脚のクラック(2橋脚) 主桁のクラック(2箇所)
4	浮戸橋	主桁の座屈(2箇所) 盛土のクラック
5	馬来田橋	主桁のクラック(2箇所) 橋台のクラック 取付盛土のクラック
6	木更津大橋	橋脚のクラック(2橋脚) 取付盛土のクラック
7	長須賀高架橋	橋脚のクラック(5橋脚) 主桁の座屈(5箇所)
8	太田歩道橋	橋脚のクラック(2橋脚)
9	太田山高架橋	橋脚のクラック(2橋脚) 取付盛土のクラック(2箇所)
10	矢那川橋	橋台のクラック(2箇所)

(b) 河川施設

番号	被害設置施設	模 擬 地 震 被 害
1	君島堰	脚のクラック(2脚)
2	大月橋下流	護岸のクラック 堤体のクラック 噴砂(液状化)
3	加草中樋門	門柱のクラック
4	井出蛇沢樋門	門柱のクラック
5	太陽寺樋門近辺	護岸のクラック(2箇所)
6	向川澄樋門近辺	門柱のクラック 堤体のクラック 噴砂(液状化)
7	成田橋上流	門柱のクラック 堤体のクラック
8	下川中子樋門	門柱のクラック 堤防のクラック(2箇所) 噴砂(液状化)

震災復旧の第1段階及び第2段階で対応が必要とされる被害のうち、目視のみでは把握が困難である被災度の比較的小さい方の被害を検討対象にすることとした。

2) 模擬地震被害の種類は、既往の地震被害例⁹⁾を参考に、道路施設、河川施設ごとに表-2.2のように選定した。

3) 模擬地震被害は、外見上はなるべく実被害に似ているとともに、調査後は容易に撤去できるものでなければならない。このため、コンクリート構造物につ

いては、コンクリートの耐力に影響を与え始める大きなクラックや剝離等の状況を想定し、テープもしくは粘土を貼付けて損傷状況を表現した。布やテープの幅は耐力に影響を与え始める程度の損傷を対象として、5 cm とした。PC 橋においては、固定支承直上から桁端部にかけて、コンクリートのクラックが生じる場合がある⁵⁾⁶⁾ので、これを想定して写真-2.1に示すように、絵具やテープによって損傷状況を表すようにした。また、堤体や道路盛土では、天端や法面に生じるクラック程度の損傷を対象として、写真-2.2に示すように

幅 10 cm、深さ 20 cm 程度の溝を掘り、これを模擬地震被害と見なすこととした。

このようにして設けた模擬地震被害の代表例を写真—2.3～写真—2.6 に示す。

2.2.2 模擬地震被害の調査方法

模擬地震被害の調査は、昭和 63 年 11 月 25 日（金）に表—2.3 に示すスケジュールにより、写真—2.7 に示す建設省防災ヘリコプター“あおぞら”を用いて、昼間と夜間に分けて行った。11 月 25 日の天候は晴れて、昼間の調査では図—2.2 及び図—2.3 に示した調査区域を以下の順序で調査した。

- a) 一定高度(300 m)、高速飛行(130 km/h)による調査
- b) 一定高度(300 m)、低速飛行(60 km/h)による調査
- c) 被害構造物のまわりをホバリングも混えて数回旋回する詳細な調査

上記の調査では、ヘリコプターの運行責任者を除く搭乗者は原則として飛行区間内のどの施設に模擬地震被害があるかをあらかじめ知らされていないという条件の下に、被害施設の発見と、これが発見できた場合には、その位置、構造物の名称(管理地図による)、被害の部位、及び、被害程度を把握するものとした。

模擬地震被害の調査には、機上からの目視の他、“あおぞら”に搭載された防振架台付きのビデオカメラを用いた。ビデオカメラでは、標準(焦点距離 12.5 mm)から 2 倍のコンバータを用いた 44 倍(焦点距離 550 mm)までズームアップが可能である。高度 300 m で飛行した場合には、211 m×158 m の範囲が撮影できるが、最大にズームアップした場合には 4.8 m×3.6 m の範囲に的を絞ることができる。なお、ビデオにより撮影した画像は、固定基地にリアルタイムで画像伝送が可能であるが、今回の調査では、被災構造物の発見と被災度の判定に重点を置いたため、画像伝送はしなかった。

次に、夜間の調査では、昼間に飛行した経過と同じ経路を飛行し、主として熱線画像システムにより模擬地震被害がどのように識別されるかを検討した。熱線画像システムとは、地上物が放射する温度差を感知することにより、肉眼では見ることのできない地上の状況を白黒画像で映し出すことのできるものである。“あおぞら”に搭載されている熱線画像システムは、最小識別可能温度差が 0.25℃で、標準及び 4 倍のズームを有している。4 倍のズームにすると 37 m×21 m の範囲を調査することができる。

2.3 昼間における模擬地震被害の調査

写真—2.8 は、高度 300 m から国道 16 号を中心として撮影したものである。広い範囲が撮影されているが、道路に関しては、そこに焦点をあてれば、伸縮継手や分離帯、車両の流れ具合等はよくわかる。ただし、ヘリコプター自身の小さきみな振動がかなりあるため、橋脚の損傷のように具体的な模擬地震被害をよく見ようとするとかなり大変である。

これに対して、防振装置付きテレビカメラでズームアップすると、中～小程度の被害もほぼ把握することができる。代表的な例をいくつか示そう。

1) RC 橋脚及び PC 桁の損傷

写真—2.9 は、写真—2.1 に示した RC 橋脚基部及び固定支承直上の PC 桁の損傷を示したものであり、ビデオのモニター画面をカメラで撮影したものである。RC 橋脚基部の損傷は設計水平震度を大きく上まわる地震力が作用した場合に生じる被害で、橋脚の全周にわたりかぶりコンクリートに幅約 5 cm のクラック(クラックの幅は、画面上のガードレールの寸法と比較することによりおおそ推定できる)が生じた段階のものである。ただし、まだ、主鉄筋の座屈や破断は生じていないため、道路震災対策便覧(震災復旧編)に示される、RC 橋脚基部の損傷程度のうち、「小被害(応急的には、耐力の観点からは交通止めを要しない程度の被害)」と判定されるものである⁵⁾⁶⁾。したがって、この例では、震災復旧の第 2 段階(応急復旧段階)では、車線や速度規制を要しないということになる。

一方、PC 桁の損傷は、桁に大きな水平力が作用した場合に固定支承周辺に発生するもので、まだ、コンクリートに幅 5 cm 程度と見なされるクラックが入った状態であり、コンクリートの剝離は生じていない。したがって、これも、上部構造の損傷程度のうち「小被害」と判定してもよい被災度であるということができると。⁶⁾

2) 堤体の模擬クラック

写真—2.10 は、写真—2.2 に示した河川堤防の堤体の模擬クラックを高度 300 m からビデオカメラで撮影したものである。地震被害らしさが今一つ足りないため、まわりの元からある段差との識別がややつきにくい、模擬地震被害としての意図がわかれば、模擬クラックとして十分把握することができる。また、堤体の幅との比較から模擬クラックの幅もおおよそ見当をつけることができる。



写真-2.1 PC桁橋の固定支承部の模擬地震被害及びRC橋脚基部
(曲げ破壊)の模擬地震被害(太田山高架橋
(道路施設No.9))



写真-2.2 堤体に設けた模擬地震被害クラック
(幅10cm, 深さ20cm程度の溝を設け
た, 向川澄樋門下流(河川施設No.6))

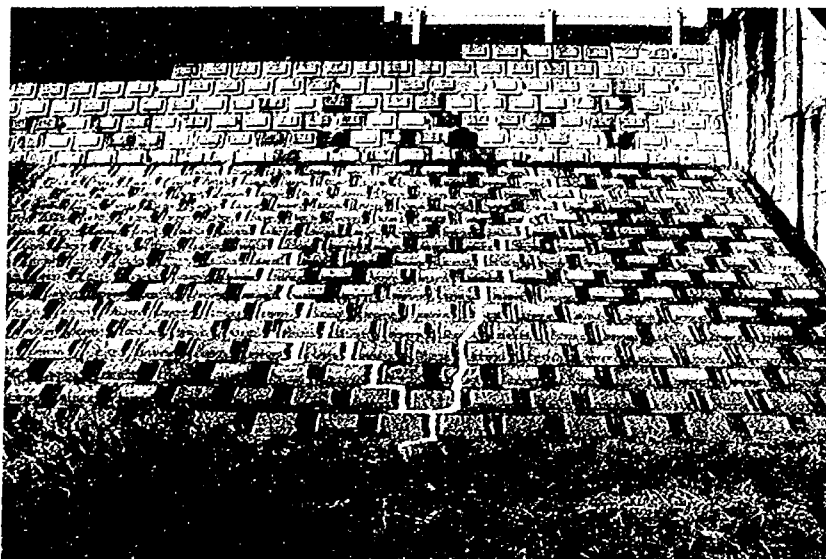


写真-2.3 河川堤防の護岸に設けた模擬地震被害クラック（大月橋下流の護岸（河川施設No.2））

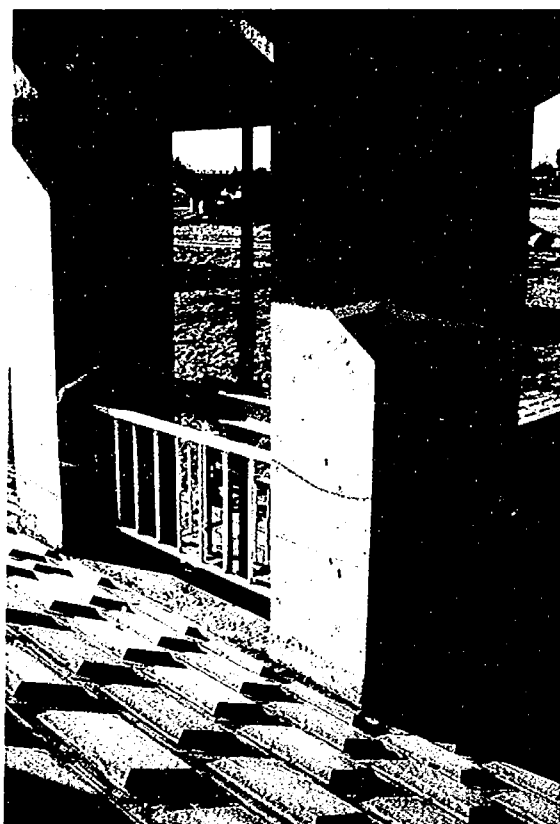


写真-2.4 樋門の門柱に設けた模擬地震被害クラック（加草中樋門（河川施設No.3））



写真-2.5 河川堤防の法尻に設けた液状化に伴う噴砂（河川施設No.6）

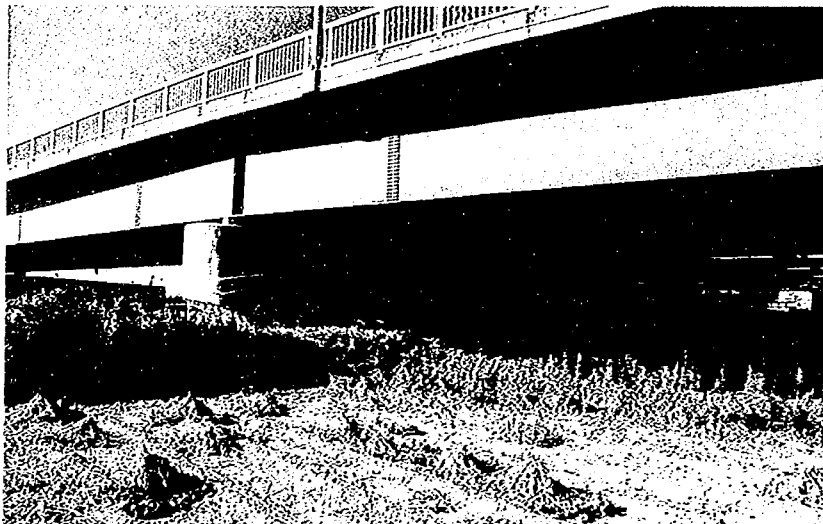


写真-2.6 RC橋脚中間高さ（主鉄筋の段落し位置）に設けた
模擬地震被害（道路施設No.6）



写真-2.7 建設省防災ヘリコプター“あおぞら”

表-2.3 模擬地震被害調査飛行時間

年 月 日	時 間	調 査 区 間
昭和63年 11月25日	9:05 ↓ 11:05	河 川 施 設
	13:15 ↓ 15:05	道 路 施 設
	16:30	日 没
	16:45 ↓ 17:15	道 路 施 設
	18:05 ↓ 19:05	河 川 施 設

3) 樋門の門柱の損傷

写真-2.11は、写真-2.4に示した樋門の門柱に生じた損傷である。クラックの幅は5 cm程度であり、クラックの位置が門柱の中間の位置であることから、主鉄筋の段落し位置に生じたせん断破壊⁵⁾⁶⁾によるものであることが想像される。

以上のように、防振装置付きのテレビカメラを用いると、橋脚、水門等の幅5 cmのクラック程度までであれば、はっきり把握することができる。今回の模擬地震被害調査飛行でわかった事項を示すと、次のように

なる。

i) テレビ画面内に道路や河川の全景が写る程度の焦点距離にすると、落橋や堤体の大崩壊といった「大被害」は把握できるが、橋脚の損傷、堤防のり面の亀裂等の「中被害」もしくはそれ以下の被害の把握はできない。したがって、最初にざっと飛ぶ段階とその後には照査する段階では、撮影する範囲（ズーム倍率）を変化させるのが有効ではないかと考えられる。

ii) 高度300 mを130 km/hの速度で飛行した場合には、速すぎて画面がちらつく感じがあり、やや見にくいと思われる瞬間がある。これは、当然、ズームアップした場合に著しい。60 km/h程度の速度であれば、ゆっくりした感じで画面を見ることができる。ただし、130 km/hで飛行して撮影したビデオを、後で、低速で再生することにより60 km/h相当の速度で飛行した場合と同程度の見やすさが得られる。

iii) 模擬地震被害の“被害らしさ”がやや十分でないため、周辺の段差やよごれ等との識別ができにくく、模擬地震被害の発見は、当初、必ずしも容易ではなかった。しかし、調査に慣れてくるに従い、模擬地震被害の発見もしやすくなり、この程度のわずかな経験でも有るか無いかでは大きく異なる。やはり、普段からヘリコプターにより上空から管理施設を見ることに慣れておくことが重要であろう。なお、特殊な場合を別にすれば実際に広域的に地震被害が生じた場合には、今

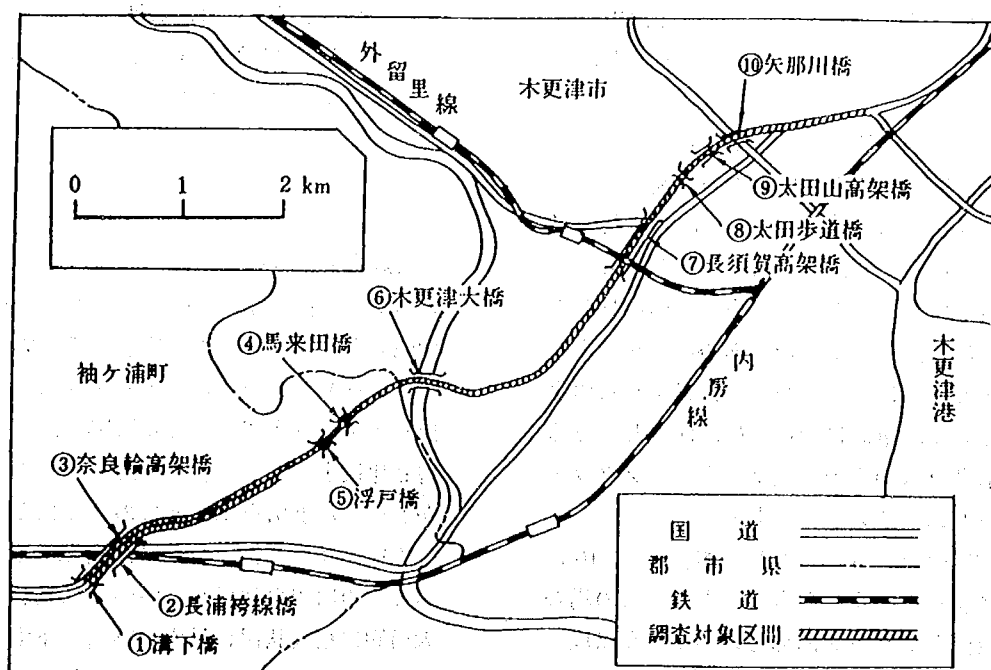


図-2.3 模擬地震被害調査飛行区間（道路施設、①～⑩は模擬地震被害を設けた施設、表-2.2参照）

同のように“被害らしさ”がやや不足している模擬地震被害を探すよりも、被害の発見は容易であると考えられる。したがって、この場合にはどの程度の被害までを調査し、これをどう判断するかといった点が、重要になろう。

iv) 道路施設では、沿道の建築物等の遮へい物により、これらの陰となって目標とする施設が見えなかったりする場合がある。このため撮影角度、飛行コースの選択に配慮が必要である。また、太陽光線、風向き（ヘリコプターは追風での低速飛行が難しい）等により撮影方向を変えたりする必要がある。

v) ヘリコプターのパイロットや地上を撮影するテレビカメラのオペレーターに各種の指示を出しながら、飛行位置の確認をすると同時に、模擬地震被害が見つかった構造物の位置及び名称を識別し、さらに、モニターテレビを見てノートに記録することは、とても1人ではできない。したがって、少なくとも以下の3人がチームを組み、十分なチームプレイで調査にあたることが重要であると考えられる。

- ① 位置・施設に関する知識のある担当者
- ② ビデオカメラのモニターから被害を判断できる担当者
- ③ 地図で位置を確認しながらメモをとる担当者

2.4 夜間における模擬地震被害の調査

夜間にヘリコプターで飛行すると、街灯や自動車のライト等明るいものは識別できるが、道路や河川施設については、その位置さえも、ほとんど見ることはできない。

これに対して、熱線画像カメラを用いると、ちょうど白黒のテレビを見ているように眼下の状況をよく把握することができる。例えば、写真—2.12は、暫定供用中の橋梁の横で新しく架設中の桁を示したものである。供用中の橋では、その上を走行中の車両を見ることができる。これは、橋や車両の表面の温度が違いため、この温度の違いによりあたかも白黒テレビのように見えるのである。車両については、注意して見ると一般の乗用車クラスのものとは大型のトラッククラスのものとの違いも識別できそうである。

次に、写真—2.13は、写真—2.3及び写真—2.10に示した堤体のクラックを示したものである。この場合にも、堤体の表面とクラック内部とのわずかな温度差の存在により、このようにはっきりとその存在を知る事ができるのである。ただし、これについては、昼間の調査によりこれが模擬地震クラックであることを

知っているために写真—2.13を見て模擬地震被害と識別できるが、このような情報なしに直接写真—2.13を見た場合には模擬地震被害とは理解されないかもしれない。医者がレントゲン写真を見て患部の状況を判断するのと同様な判断が熱線画像には求められる。

以上のような調査より、熱線画像システムを用いた模擬地震被害の把握について、わかった事項を示すと次のようになる。

i) 肉眼では全く見えなくても、熱線画像システムを用いると、白黒テレビのように温度差を検知でき、このため、落橋や橋脚の大被害、堤体の崩壊等大きな構造物の大被害は、夜間でもよく把握することができる。

ii) 夜間では、熱線画像システムで撮影可能な領域しか把握できない。このため、昼間の調査と比較すると、周辺状況の把握ができないため、どこを飛行しているか、また、場合によっては、熱線画像カメラがどこを撮影しているかさえ把握しにくい。このため、カメラ操作の熟練と同時に被害と、そうでないものととの区別をどう判定するか等、各種のノウハウを蓄積していく必要がある。

なお、現在“あおぞら”に搭載されている熱線画像カメラは、テレビカメラに用いられている防振装置と比較すると簡単な防振装置が用いられているため、4倍にズームアップした場合には画面にかなりのぶれが生じる。また、倍率は最大4倍までであるが、これをさらに大きくできれば、昼間のテレビカメラによる調査と同じように橋脚、水門等のある程度大きなクラック程度の被害まで、把握できるのではないかと期待される。

2.5 まとめ

大規模・広域震災時のヘリコプターを用いた上空からの震災情報の収集を図る際に基本となる被災度の識別能力を、河川及び道路施設に模擬的な地震被害を設け、これを上空からビデオカメラ（昼間）及び熱線画像システム（夜間）により撮影し、実際の模擬地震被害と比較することにより検討した。本調査により明らかとなった事項を示すと次のようになる。

1) ヘリコプターから目視調査すると、道路及び河川とその周辺の状況が一望の下に見わたす事ができ、大局的に被災状況に対する判断を下すのに極めて有効である。テレビカメラや熱線画像システム等、特別な手法を用いなくても、マクロ情報の収集は、現在でも、すでに実用化できると考えられる。

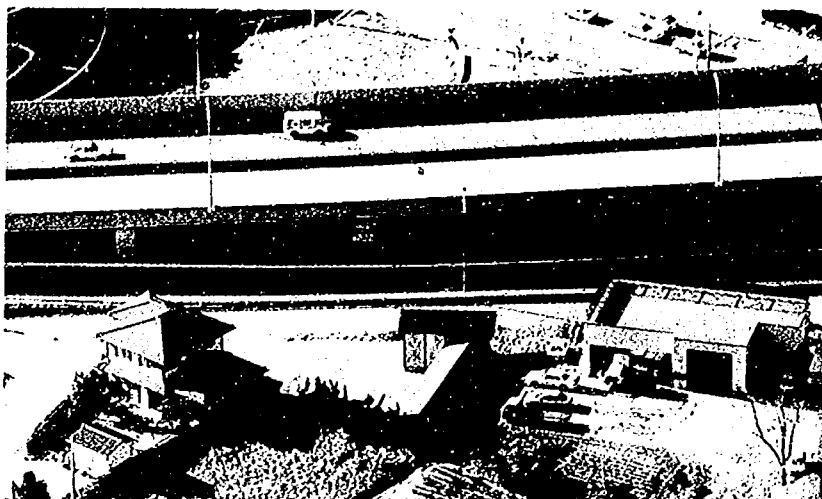


写真-2.8 高度300m から撮影した国道16号（距離600m）



写真-2.9 写真-2.1に示した固定支承上の PC 桁及び RC 橋脚の
模擬地震被害を高度321m から撮影したビデオ画像

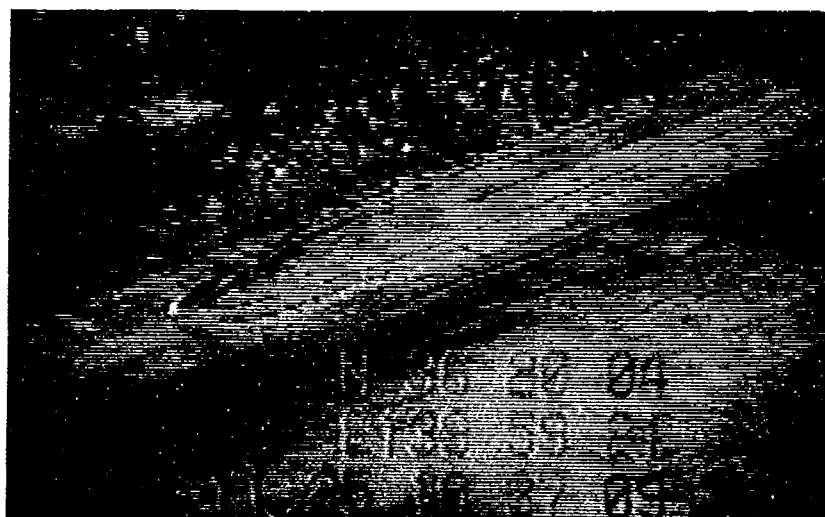


写真-2.10 写真-2.2に示した堤体の模擬地震被害クラックを
高度288m から撮影したビデオ画像

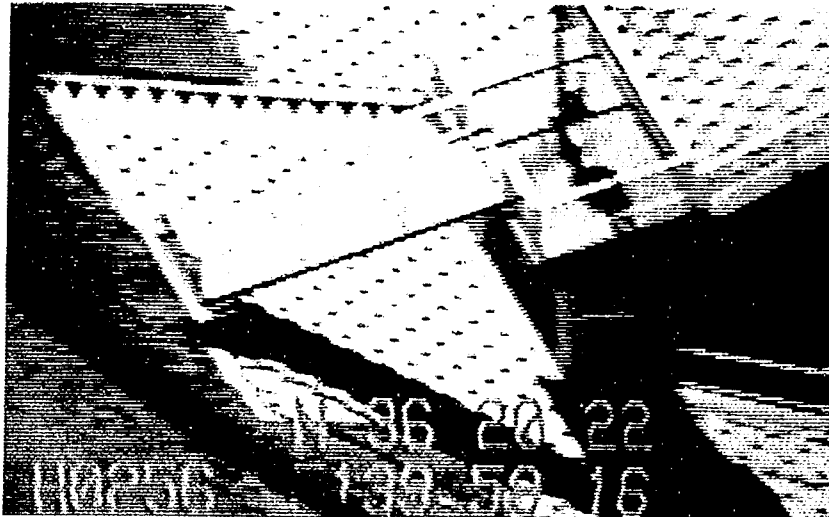


写真-2.11 写真-2.4に示した樋門の門柱の模擬地震被害クラックを
高度283m から撮影したビデオ画像

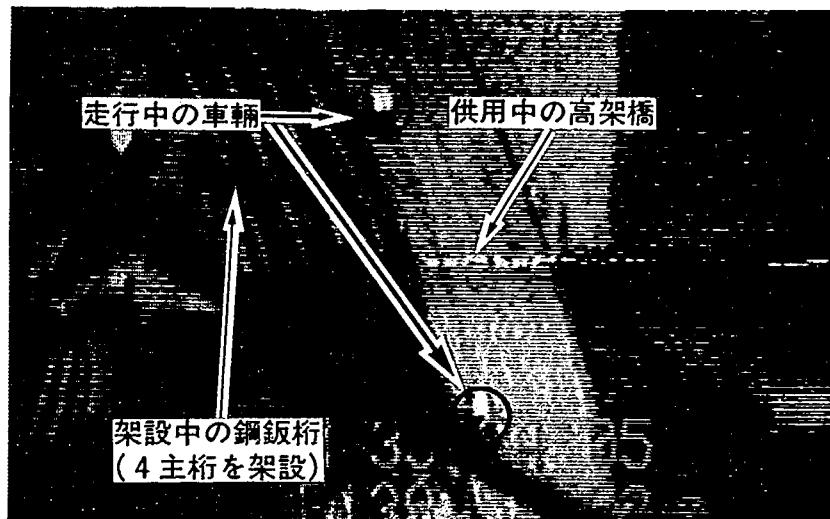


写真-2.12 熱線画像カメラにより撮影した国道16号

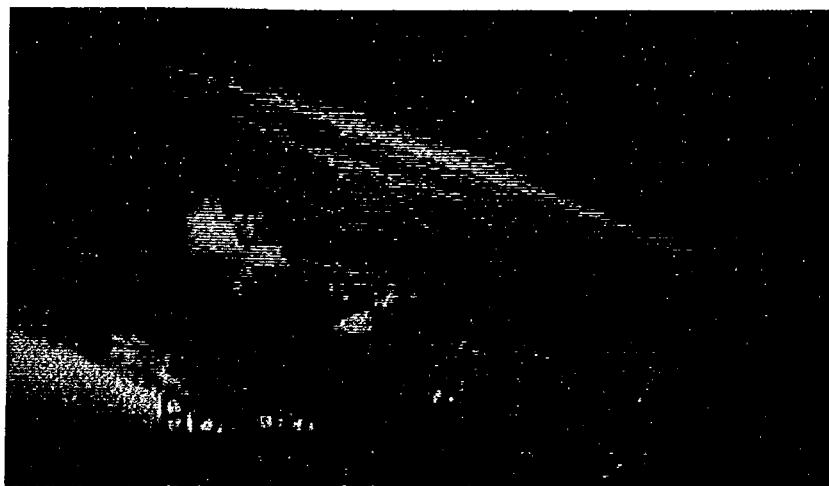


写真-2.13 写真-2.2に示した河川堤防のクラックを夜間に熱線
画像カメラで撮影したもの

2) 仕間には、防振装置付きのテレビカメラを用い、550 mm 位までズームアップすると、幅 5 cm のコンクリートのクラック程度までの識別が可能となる。大規模震災が発生した場合には、このような細かい損傷ではなく、もっと大きな損傷の把握が重要と考えられるため、主要な構造物ごとに被災度の把握に要する飛行速度、ズーム倍率等について、調査していくことが必要とされる。

3) 夜間で、肉眼による上空からの被災調査は全くできないような条件下でも、熱線画像システムを用いると、物の識別がかなりできそうである。ズーム倍率、識別できるものとできないものの区別等について、検討する事が必要とされる。

第3章 ヘリコプターから撮影したビデオ映像による地震被害状況の把握

3.1 まえがき

第2章では、道路及び河川に人工的に模擬被害を設け、これを建設省防災ヘリコプター“あおぞら”からビデオ撮影することにより、かなりの精度で地震被害を識別できることを示した。しかし、これはあくまでも人工的な模擬被害であることから、実際の地震被害を用いた検討が必要とされる。

本章では、このような観点から、昭和53年1月14日の伊豆大島近海地震の際に撮影された報道用ビデオ映像から被災状況を把握し、これを地上調査による実測等から得られた状況と比較することにより、ビデオ映像にもとづく震災状況の把握精度を検討した結果を示す。

3.2 地震被害の概要

伊豆大島近海地震は、昭和53年1月14日に伊豆半島東方沖の海底を震源として発生したマグニチュード7.0の地震である。この地震により、伊豆半島東岸の河津町を中心に半島全体に大きな被害を生じた。特に、図-3.1に示す5地点においては、道路沿いに斜面の崩壊等が生じ、著しい被害が生じた。被害の詳細は多数の報告書^{9)~11)}に示されているが、以下の解析に必要な概要を示すと以下の通りである。

a) 梨本地区(当時の主要地方道修善寺～下田線)

道路沿いに125 mにわたって、道路上方の30~50 mの高さの自然斜面が崩落した。このため、通行中の路線バスが埋没し、3名の犠牲者が出た。

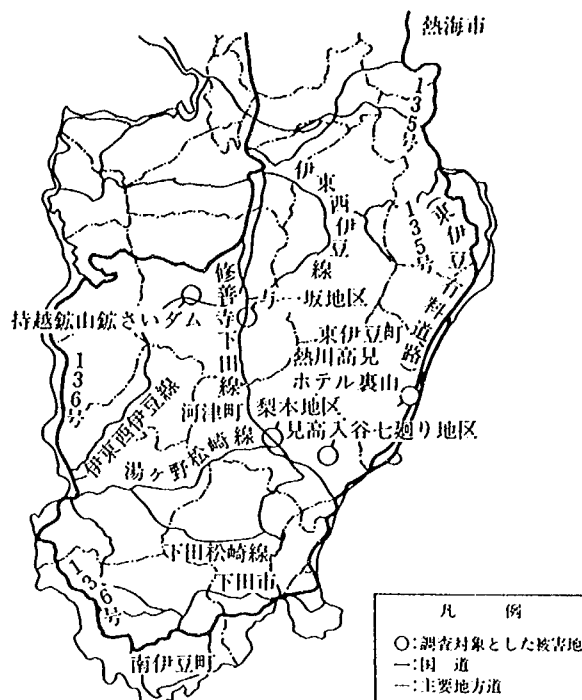


図-3.1 調査対象とした被害の位置

b) 与一坂地区(当時の主要地方道修善寺～下田線) 道路沿いに延長123 mにわたって、道路上方の約50 mの高さから自然斜面の崩落が生じた。さらに、大きな落石が通行中のバスの右前頭部を直撃し、運転手を含む4名が犠牲となった。

c) 見高入谷七廻り地区

通称土口山と呼ばれる海拔366 mの山腹が幅約500 m、長さ約200 mにわたって崩壊し、山沿いに流れる田尻川を埋め尽くした上、対岸の山腹斜面にまで達した。崩土量は約170,000 m³にも達し、民家4戸が飲み込まれ7名が犠牲となった。

d) 持越鉱山の鉱さいダム

ほうずき沢鉱さい場(約30,000 m²、周囲の堰堤の長さ約640 m)の第一堰堤(高さ約30 m、堤長約110 m)の上部が高さ約14 m、長さ73 mにわたって崩壊し、堆積していた鉱さい(全量約476,000 m³)のうち、約60,000 m³が流出し、狩野川の支流の持越川へ流入した。

e) 熱川高見ホテル裏山

高見ホテルから東伊豆有料道路を隔てた裏山の自然斜面が、道路上方が高さ15 m程度の範囲で崩壊し、ホテルの従業員宿舎を押し潰し、5名の犠牲者を出した。

3.3 ビデオ映像を用いた被災状況の把握方法

昭和53年当時は、ビデオが使用され始めた時期で、

あまり多くのビデオ映像は残されていないため、ここではテレビ報道に用いられたビデオから被災状況を把握することとした。解析対象としたビデオは、報道目的のために地震発生当日(1月14日)とその翌日に複数回にわたって撮影されたものであり、今回解析対象とした上記の5箇所を連続的に撮影したものではない。複数のビデオから解析対象地点に該当する部分を抽出したものであるため、撮影時刻は場面ごとに異なっている。また、あくまでも、報道目的に撮影されたものであり、被害状況の調査を目的としていないため、被害状況や、被害原因、被害の拡大の可能性等を工学的に調査するためには撮影の方向、撮影範囲等が不十分である。さらに、ヘリコプターの飛行高度や飛行速度、カメラの種類、カメラのズーム倍率等の記録は残されていない。カメラ撮影は手持ちで行われたようである。以上のように、工学的な地震被害の把握を目的として撮影したビデオ映像ではないための多数の制約がある。しかし、山間地に地震が生じた場合の実際の被害状況を撮影した数少ないビデオであることから、これらの制約を承知の上で解析に用いることにしたのである。

上記の5地点を撮影した部分は合計約12分間であるが、これをヘリコプターによって撮影した後、地上の災害対策本部に伝送したビデオと見なし、3人の調査者がこのビデオを再生することにより、それぞれ独自に被災状況の把握を行った。再生方法としては通常の方法による再生の他に、適宜スロー再生、スチル再生を併用した。

ビデオ画像からの被災状況の把握には、調査者の専門、あらかじめ被災状況を知っているかどうか、等が大きく関係してくる。このため、3人の調査者を選定するに際しては、調査者の特性を表-3.1に示すようにした。すなわち、今回の調査では沿道斜面の被害が多いため、調査者は地質の専門家とし、経験年数を“長い”(調査者A)、“中程度”(調査者B)、“短い”(調査者C)の3通りとした。調査者Aは、地震後に現地調査に携わった経験があり、12年前の地震であってま

なり鮮明に被災状況の特徴を記憶している。他の2名の調査者は全体として地震被害に関する知識はあるものの、被災状況を詳しく見るのは今回が最初である。

調査すべき項目としては、工学的に被災状況を把握するために重要で、同時に、定量的な把握が可能な指標として、①崩壊の平均的な幅、②崩壊面における平均的な崩壊深さ、③崩壊面積、④崩壊土量、⑤道路または河川の被災延長、とした。

3.4 ビデオ映像から見た被災状況の把握

1) 梨本地区(主要地方道修善寺～下田線)

写真-3.1及び写真-3.2は、被災地区の全景及び復旧中の重機(バックホウ)を示したものである。スチル画面を写真撮影したものであるため、画面が荒れて見づらいが、被災の特徴はよく把握することができる。こうしたビデオ映像から調査者Aが作成した被災状況のスケッチが図-3.2である。これによれば、崩壊には大きく2つあり、右側の深い地滑り性崩壊と左側のやや浅い崩壊からなっていることがわかる。ただし、崩壊面の上端が撮影されていないため、余震や降雨による今後の被害の拡大の可能性を判断する上で重要な亀裂等が崩壊面の上部に生じているかどうか判断できない。震災情報収集用の調査では、崩壊面だけでなく、崩壊面の上部や側面も調査することが重要である。

図-3.2は、最も経験年数の長い調査者Aの判断であるが、調査者Aを含めて、3人の調査者がどの程度崩壊幅等を判読できたかを示した結果が表-3.2である。ここには、地震後に地上より調査された結果と比較のために示している。地震後の地上調査によれば、崩壊土量は $26,500\text{ m}^3$ であるが、調査者A及びBは

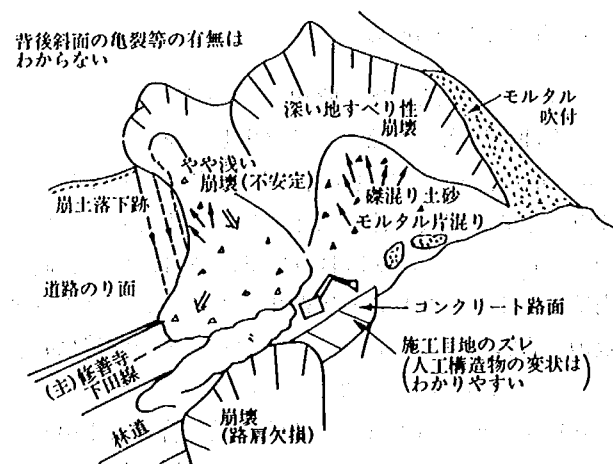


図-3.2 調査者Aがビデオ映像から判読した被災状況のスケッチ(梨本地区)

表-3.1 ビデオ画像の調査書

調査書	専門分野	経験年数
調査者A	地質	17年
調査者B	〃	10年
調査者C	〃	5年

表-3.2 被災状況の判読の程度
(梨本地区(主要地方道、修善寺～下田線))

調査対象	調査者 A	調査者 B	調査者 C	地震後に調査された値
崩壊面の平均的な幅(m)	70(重機(10m)×7)	60~80	50	100m
崩壊面における平均的な崩壊深さ(m)	10(崩壊幅×1/7~1/10)	5~10	10~20	5 m
崩壊面の面積(m ²)	*	320~480	*	
崩壊土量(m ³)	20,000(30m×70m×10m)	20,000	60,000	26,500
道路の被災延長(m)	100(崩壊幅+α)	80	50	125

注) *は、ビデオ画像から判定できなかったことを示す。

() 内は、調査者Aの判断材料を示す。

20,000 m³とほぼこれに近い値を推定している。これに対して、経験年数の最も浅い調査者Cは崩壊土量を60,000 m³と実際の約2.3倍に推定している。また、崩壊幅は実際には約100 mであるのに対し、調査者A、Bはともに約70 m程度、調査者Cは50 mと、いずれも実際の30~50%小さめに評価している。なお、崩壊幅をどのように推定したかが重要であるが、調査者はいずれも写真3-2に写っている重機の大きさを基準とし、その何倍であるかという点から崩壊幅を割り出している。このように、調査対象に比較してその数倍~数分の一程度の大きさの人工的な工作物がある場合には、調査対象物の寸法等の定量的な把握が行いやすい。

なお、人工工作物の変状は斜面等に比較するとわかりやすい。例えば、写真-3.2には修善寺～下田線から分岐する村道が写っているが、コンクリート舗装の目地ずれがはっきりわかる。これは、人工工作物では、それが舗装、擁壁のようにごく一般的なものであれば、構造上の特徴が頭に入っており、したがって、変状があった場合に状態や原因を推定しやすいためである。

2) 与一坂地区(主要地方道修善寺～下田線)

写真-3.3、4は落石が道路通過中のバスの右前頭部を直撃した与一坂地区において沿道斜面からの崩土とバスの損傷状況を示したものである。ビデオ映像をもとに調査者Aが作成したスケッチは図-3.3の通りである。バスを直撃した石は写っていないが、法面上方から落石があり、バスに損傷を与えた後、ガードレールを突き破って道路下に落下していった状況がよくわ

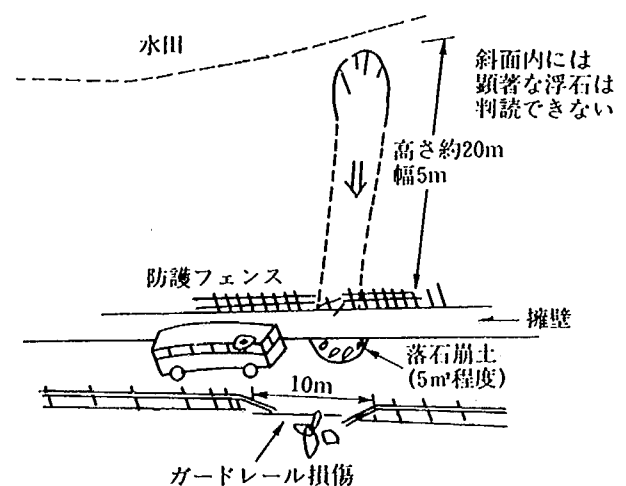


図-3.3 調査者Aがビデオ映像から判読した被災状況のスケッチ(与一坂地区)

かる。

3) 見高入谷七廻り地区

写真-3.5は崩壊地区を示したものである。被災範囲が大きく、この映像からだけでは、どのような地形条件の中でどの範囲に被害があったのかよくわからない。広範囲な領域で被害が生じた場合には、被害の全容をつかむために、ヘリコプターの高度をもっと上げて、周辺の地形が入った全景を撮影することが重要であろう。写真-3.5では中央部分で木が全て倒れていることから、緩傾斜の自然斜面が大規模な表層の崩壊を生じ、右下側の道路を埋没させていることがわかる。図-3.4は調査者Aが作成したスケッチである。崩壊の幅は少なくとも100 m以上、崩壊の長さは200 m程

度以上であると考えられること、さらに、滑落量がはっきりしないことから、崩壊の深度は浅いことが判読できている。しかし、ビデオ映像の中には大規模な崩壊範囲に相応した寸法の基準となる人工的な工作物がないこと、また、上述したように、全域を撮影した映像がないことから被災の大きさの定量的な把握が困難で

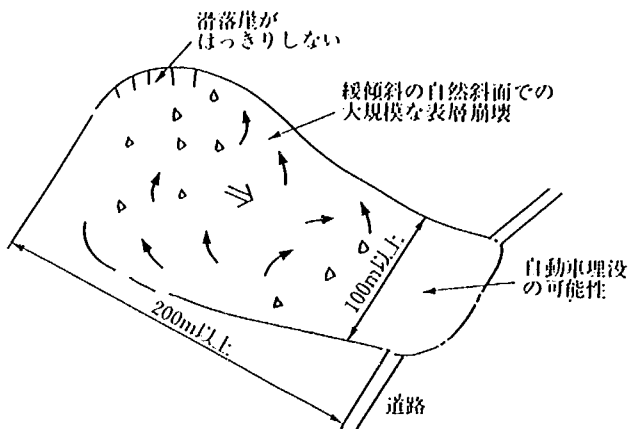


図-3.4 調査者 A がビデオ映像から判読した被災状況のスケッチ（見高入谷七廻り地区）

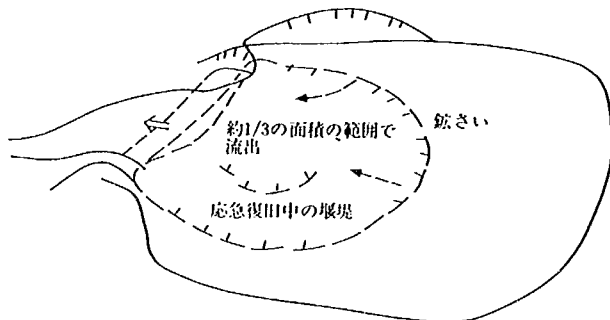


図-3.5 調査者 A がビデオ映像から判読した被災状況のスケッチ（持越鉦さいダム）

ある。なお、埋没により損傷を受けた車両があることから、他にも車両が土砂に埋没している可能性のあることが推定される。

4) 持越鉦山の鉦さいダム

写真-3.6 は山頂に設けられた鉦さいダムから鉦さいが流出し、持越川に流入している状況を、また、写真-3.7 は崩壊した第一堰堤とそこから流出する鉦さいを示したものであり、堰堤の応急復旧が進められつつあることがわかる。図-3.5 はビデオ映像から調査者 A が作成したスケッチを、また、表-3.3 は判読結果を 3 人の調査者間で比較した結果を示している。

表-3.3 によれば、堰堤の崩壊幅は 73 m であったが、ビデオ映像からは復旧中の重機の大きさを基にいずれの調査者も 30~50 cm と推定している。図-3.5 によれば、鉦さいダム全体の約 1/3 の範囲で鉦さいの流出が生じているのがわかるが、堰堤の寸法や流出した深さがこれだけの情報でははっきりわからないため、崩壊土量の推定はできない。

5) 熱川高見ホテル

写真-3.8 は、熱川高見ホテルの裏側で崩壊が起こり、道路に面した一棟（従業員宿舎）が原型をとどめないほどに破壊された状況を示している。崩壊地区の上端には小さな道路があり、5 m 程度の非常に深い滑落量があること、画面手前の道路が崩土で閉塞されていることがわかる。図-3.6 は調査者 A がビデオ映像をもとに作成したスケッチである。

3.5 ビデオ映像を中心とした地震被害の調査法

以上が 5 地点に対するビデオ映像から見た被災状況の判読結果である。以上のような調査からビデオ映像をもとに、工学的に有効な地震被害状況を推定するた

表-3.3 調査者による判読結果の違い
(持越鉦山の鉦さいダム)

調 査 対 象	調 査 者 A	調査者 B	調査者 C	地震後に調査された値
第一堰堤の崩壊幅 (m)	50 m (重機 (10 m) × 5)	40	30~50	73
第一堰堤の崩壊した部分の高さ (m)	5 m (崩壊幅 × 1/7~1/10)	*	4~5	
崩壊土量 (m ³)	*	*	3,000	80,000
流出した鉦さいが持越川を流下した長さ (m)	*	1,000	20,000	

注) * は、ビデオ画像から判定できなかったことを示す。

() 内は、調査者 A の判断材料を示す。

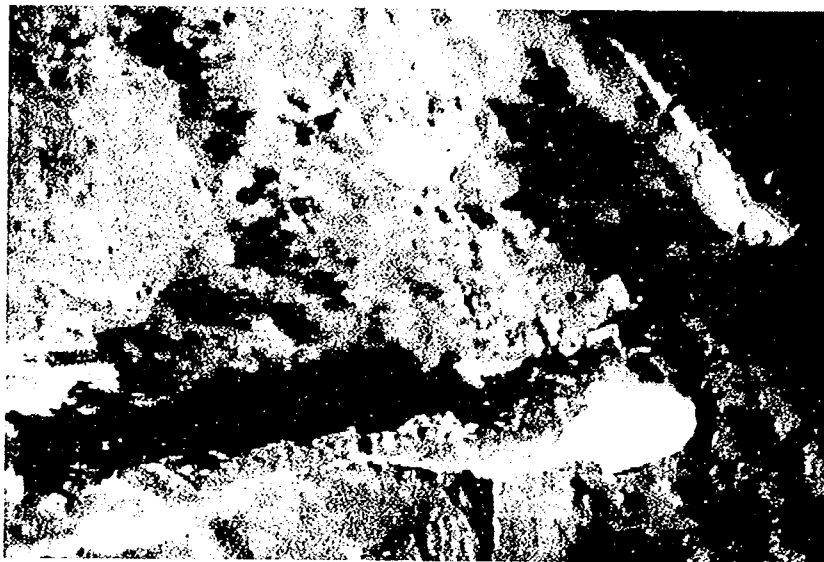


写真-3.1 梨本地区（主要地方道修善寺～下田線）の被災状況



写真-3.2 復旧作業中のバックホウと周辺の被災状況のクローズアップ



写真-3.3 与一坂地区（主要地方道修善寺～下田線）における
落石とバスの被災状況



写真-3.4 落石により損傷を受けたバス前頭部の状況

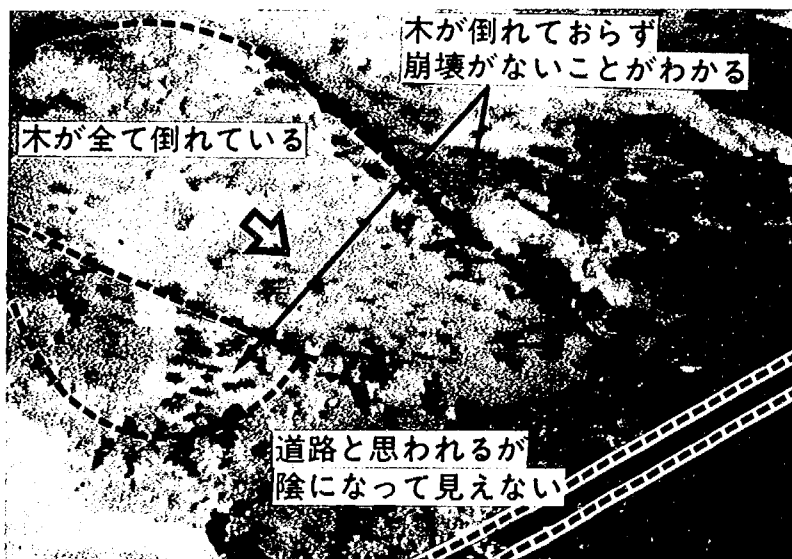


写真-3.5 見高入谷七廻地区の被災状況

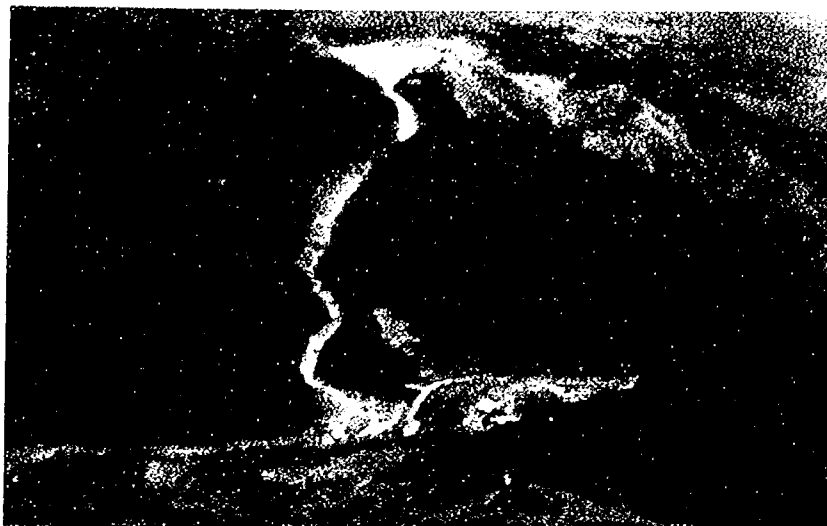


写真-3.6 持越鉱山鉱さいダムとこれから流出した鉱さいが持越川に流入している状況



写真-3.7 第一堰堤の崩壊状況（応急復旧による土堰が作られつつあるのがわかる）



写真-3.8 熱川高見ホテル周辺の被災状況

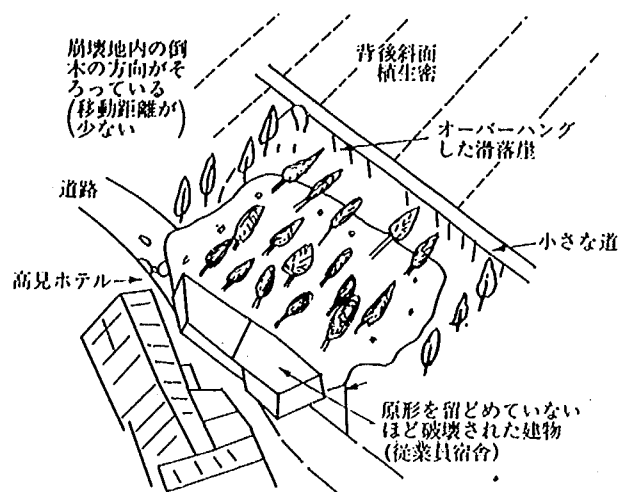


図-3.6 調査者 A がビデオ映像から判読した被災状況のスケッチ (熱川ホテル周辺の山腹崩壊)

めに重要と考えられる事項を示すと以下のようになる。

1) 全体の印象として、5箇所の被災地区を被災状況の推定のしやすい順に並べると、①梨本地区、②熱川高見ホテル、③与一坂地区、④持越鉱山さいダム、⑤見高入谷七廻り地区、となる。何故このようになるかという原因を考えてみると、a) 寸法等の目安となる人工的な工作物が含まれていること、b) こうさいの流出に比較して自然斜面の崩壊等のように、現象として発生頻度の相対的に高いものの方が被災状況の推定がしやすいこと、の2点が大きく関係していることがわかった。山間地の大規模斜面崩壊のように調査対象が自然物だけから構成されている場合には、被災状況の定量的な把握はなかなか困難である。

2) 被災状況の定量的な把握に有効なものとしては、道路 (橋、横断歩道橋、車線ラインや路肩等を含む)、ガードレール、自動車や復旧用の重機、人間、自動販売機等、大ききのわかっているものが挙げられる。また、空かんなども路面の小さな亀裂幅等を知るためには有効である。したがって、調査対象とする施設や事象の数倍～数分の一程度の大ききの補助的な物体が存在することは被災状況を定量的に把握するために極めて重要である。したがって、こうした補助的な物体が被災地域にある場合には、これが画面の一部に写るように撮影することが有効と考えられる。

3) 本調査では、ビデオ画像から推定した対象物の大ききは、いずれも実際の寸法を過小に評価する傾向にあった。この理由ははっきりしないが、画像という限られた範囲内の情報から推定していることが、実際

の大規模な現象を過小に評価することに関係していると考えられる。

4) 調査対象物や対象事象が10～100 m程度のスケールであれば、今回解析に用いた報道用ビデオからでも被災状況の把握がかなり可能であるが、被災対象物や対象事象が10 m以下と小規模な場合、あるいは、100 m以上と大規模な場合には、有効な情報を得るために飛行高度、飛行方法、ズーム倍率等の撮影方法に工夫が必要となる。今回解析した沿道斜面を例にとれば、基本的な撮影方法としては、以下の方法が提案される。

a) 周辺の地理的条件も含めて崩壊地点の全体的な位置関係を撮影し、その後崩壊地の全景、さらに崩壊地の中の特定の調査対象へと撮影対象を移す。

b) 崩壊地正面だけではなく、崩壊地の上方、側方についてもクラック等がないかを撮影する。

5) 被災状況から崩壊の種類、原因、余震による崩壊の拡大の可能性等を検討するためには、当然ではあるが、地質・地盤条件や施設に関する十分な知識を有する担当者があたることが重要である。今回は沿道斜面の崩壊が中心であるため、地質の専門家を抽出したが、被災の種類に応じた複数の専門家の組合せを考えていくことが重要であろう。

3.6 まとめ

都市震災や山間地における震災をヘリコプターを使って、迅速かつ広域的に調査するために重要なビデオ映像から判読できる被災状況の精度を、昭和53年1月の伊豆大島近海地震の際に撮影された報道用ビデオ映像をもとに検討した。本解析結果をまとめると以下のようなになる。

1) 報道用のビデオ映像からでも、注意深く観察することにより、数十～数百 m程度のスケールの被災であれば、かなりの被災情報を得ることができる。数十 m以下もしくは数百 m以上のスケールの被災状況を把握するためには、これに合わせたヘリコプターの飛行及びビデオ撮影が必要とされる。

2) ビデオ画像から判断できる被災情報の精度は、被災対象の中に人工工作物がある場合ほど高い。これは、人工工作物の寸法等を基準として被災の範囲等の定量的な把握がしやすいためである。

3) 定量的な把握に役立つ人工工作物としては、道路、ガードレール、自動車・重機、人間等がある。被災調査対象物もしくは対象事象の数倍～数分の一程度の人工工作物が特に有効である。

第4章 即時・広域震災情報の収集を目指したヘリコプター等の飛行方法

4.1 まえがき

全章までの検討で、ヘリコプター等を用いた上空からの調査でも震災状況を十分な精度で把握できることが分かった。しかし、震後に必要とされる震災情報の内容とその精度は、震災が起こってから時間の経過によって同じではない。震災直後には、精度は十分ではなくても大域的な災害情報が重要であるが、震災後の時間が経つにつれてより精度が良く、詳細にわたる被害情報が必要となる。このように震後の時間経過とともに必要とされる震災情報の内容と精度が異なってくるため、ヘリコプター等の飛び方もこれらにあわせて変えていかなくてはならない。

本章では、ヘリコプター等の特性を活かして即時・広域的に震災情報の収集を図るために必要とされるヘリコプター等の飛行方法、及び、ビデオカメラの撮影方法を検討した結果を示す。

4.2 震災復旧の時期区分とこれに対応したヘリコプター等の活用

震後に必要とされる復旧作業は、震後の時間経過によって大きく異なる。2章に示したように、建設省総合技術開発プロジェクトでは、震後の対応を三つの段階に分けて、各段階における基本方針を表2.1のように分類している。

時間区分に応じて必要とされる情報とその精度が異なることを念頭に置き、震災調査にヘリコプター等がどのように使用できるかを整理すると次のようになる。

a) 震災復旧の第一段階

地上からの調査に比べてはるかに高速な飛行を利用して、短時間に広範囲の調査を行うことができ、ヘリコプター等による調査が最も有効かつ必要な時期と考えられる。上空からの調査のメリットを最大限に生かして、大規模な被害や、放置すると重大な二次災害を引き起こす可能性のある被害を中心に、速やかに被災の全体像の把握を行い、以後の復旧方針の策定に資することが重要である。

b) 震災復旧の第二段階

地上調査班が行う応急調査に基づいて応急復旧に着手される時期であり、この段階になるとヘリコプター等による調査は徐々に二次的になってくると考えられ

る。ヘリコプター等による調査が有効なのは、震災復旧の第二段階になっても地上調査班が踏み込めない地域が存在したり、早急に応急復旧に取り組む必要がある場合、あるいは、ヘリコプター等からの調査によっても地上からの調査と変わらない十分な精度で定量的な資料を得ることができ、これを応急復旧に反映できる場合、の2つの局面と考えられる。

c) 震災復旧の第三段階

復旧対象施設の種類の、被災の部位・特性等によっては、ヘリコプター等からの調査が有効な場合もあるが、基本的にはこの段階になるとヘリコプター等の活用は期待されない。

4.3 震災復旧の第一及び第二段階におけるヘリコプター等の飛行方法

以上のように、ヘリコプター等からの震災情報の収集が有効なのは、震災復旧の第一段階及び一部の第二段階と考えられる。したがって、これらの段階では、基本的にヘリコプター等をどのように飛行させればよいかを、飛行目的と関連させて整理してみよう。

ヘリコプターは、空中停止機能、微速運航機能、サークリング（回転半径の小さな旋回飛行）機能等、一般の航空機にはない特殊な飛行性能を有しており、また、離着陸に長い滑走路を必要としないという特徴も持っている¹²⁾。このため、震災調査のように、広域調査と同時に特定箇所の調査が必要とされる場合には、こうした機能を十分使いこなすことが必要とされる。時期区分に応じた震災調査の項目とヘリコプターの飛行特性を組み合わせると、震災調査を行うためには以下の3種類の飛行形態が必要になる。

1) 緊急飛行

緊急飛行とは、災害対策の基本方針を決定するために最初に行う視察飛行である。大規模地震が発生した場合には、災害対策本部（以下、地上本部と呼ぶ）が設置されることになるが、震災直後は地上本部との連絡等が十分にできない場合も考えられることから、震災の発生が認められた場合には、ただちに、独自の判断で離陸し、被災地区に最短経路で直行する。被災地区に到達した後は、その中心と外周を飛行することにより被災地区の大勢、及びポイントとなる重要施設の被災状況を判断する。震災復旧の大まかな方針を決定するのに必要な情報を短時間に入手するために、被災地域に到着後、概ね30分程度で必要な情報収集を終えることを目標としなければならない。どこを調査するかは原則として視察者（ヘリコプターに搭乗した調査

者)の判断によるため、被災地域と施設の工学的な特徴に詳しい調査者の搭乗が必要とされる。もちろん、地上本部からの指示を受けて調査対象を変えることも考えられるため、地上本部との十分な連携が重要である。飛行高度は必ずしも低くする必要はなく、特に広い広域的に震災が発生している場合にはなるべく高度を上げ(1000 m 程度)、震災の全貌を把握する必要がある。

被災状況は、昼間であれば可視ビデオカメラに、また、夜間であれば熱赤外線ビデオカメラに記録すると同時に、これをリアルタイムで地上本部に伝送し、ここで震災の専門家による大局的な復旧方針の検討を加える。地上本部では、ヘリコプターから送られてくるビデオ映像を記録すると同時に、これをリアルタイムで分析し、次の一定飛行で重点的に調査すべき地域を定めるとともに、震災復旧の基本方針を決定する。ビデオ映像には飛行経路、被災施設の様子がわかるように適宜音声を入れるものとする。

2) 一定飛行

一定飛行とは、被災状況を一定のフォーマットで調査・解析するためのビデオ画像を得ることを目的とした飛行であり、震災前にあらかじめ想定した飛行経路の中から、緊急飛行による調査結果をもとに地上本部で飛行経路及び飛行速度を選定し、これに基づいて飛行・撮影を行う。飛行経路及び飛行速度は、原則として地上本部の指示により変更しない。

飛行中は、可視ビデオカメラあるいは熱赤外線カメラを用いて機体直下の状況を連続撮影する。この際、原則として搭乗者の指示により臨機応変に撮影対象物を変更することはしない。これは、このように臨機応変に撮影対象物を変えると、適切に被災状況をキャッチできるように思われがちであるが、地上本部で伝送されてきたビデオ映像をもとに被害状況を検討・解析する際に、どうしても調査漏れ等の支障が生じるためである。また、飛行高度は原則として最低安全高度(市街地で 300 m、これ以外の地域で 150 m)とする。

一定飛行に際しては、被災施設の特徴が判断できる調査者を同乗させることが重要である。調査者は、地上本部と緊密な連絡をとるとともに、肉眼、双眼鏡等を用いて状況を観察する。また、被災状況に対する説明を適切に音声でビデオ映像に挿入する。

具体的な飛行方法としては、河川施設の場合には、原則として氾濫の発生が予想される下流域から上流域に向かって飛行し、被災の見られなくなった地点で次の調査対象河川に移動するのがよいと考えられる。ま

た、道路施設の場合には、復旧用幹線道路の調査を主眼とし、道路に沿って飛行し、被災の見られなくなった地点で次の調査対象道路に移動するのがよいと考えられる。いずれの場合にも、1つの河川もしくは路線の調査終了後、次のどの河川もしくは路線に調査を移すかは、被災範囲、移動時間等をもとに、あらかじめ何通りかのシナリオを作っておくことが必要である。

図-4.1は、以上のような飛行方法を河川堤防及び道路について模式的に示したものである。

3) 調査飛行

調査飛行とは、上述した緊急飛行、一定飛行の後に、応急復旧に必要な特定の構造物・施設に関する詳細な被災情報を得るために行う飛行である。調査飛行では、最短経路で対象施設に直行し、対象施設に到着後は地上本部からの指示を受けつつ、最低安全高度でホバリング、旋回飛行等を適宜組み合わせるいろいろな角度からビデオ撮影を行い、定量的な被災状況の収集を行う。ビデオ画像はリアルタイムで地上本部に伝送し、そこで専門家の判断を加えるとともに、必要なカメラ操作の指示を受ける。

以上のような調査に際して一番重要なポイントは、地上本部及び地上調査班とどのように連携プレーをとるかである。図-4.2は、以上に示した調査方法を、「ヘリコプター」、「地上本部」、「地上調査・措置班」の連携という観点から整理したものである。

4.4 ヘリコプター等を用いた震災調査項目

地震後の時期区分に応じて何を調査すべきかについては、「土木構造物の震災復旧技術マニュアル(案)」⁹⁾にまとめられている。このうち、ヘリコプターを用いた震災調査で重要な項目を緊急飛行及び一定飛行について整理すると以下ようになる。

まず、緊急飛行においては、被災状況の大勢を判断し、復旧の基本方針を定めることが求められているため、結局以下の点が調査のポイントとなろう。

- ① 被災の範囲はどこまでか？また、被災程度は激甚であるか？
- ② 特に必要な施設について、被災は生じているか？また、その程度はどうか？
- ③ 火災、爆発、津波など、今後重大な二次災害に発展する可能性の高い災害が生じているか？

一定飛行においては、表-4.1に示される緊急調査項目⁹⁾が調査できるように、調査項目を選定することが重要である。ただし、これは、地上調査用に整理されたものであり、この中で○印のついた項目がヘリコ

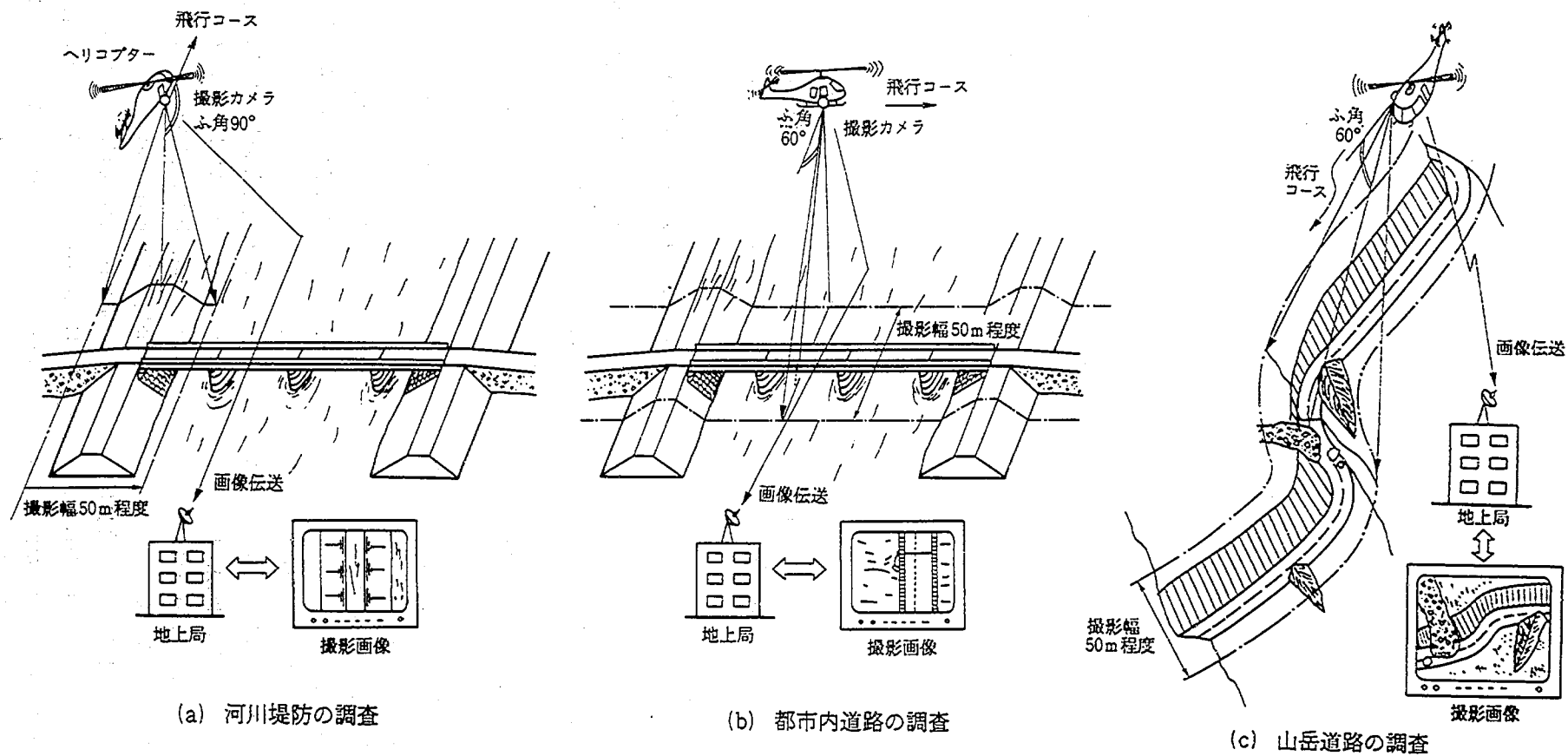


図-4.1 一定飛行における飛行方法の一例

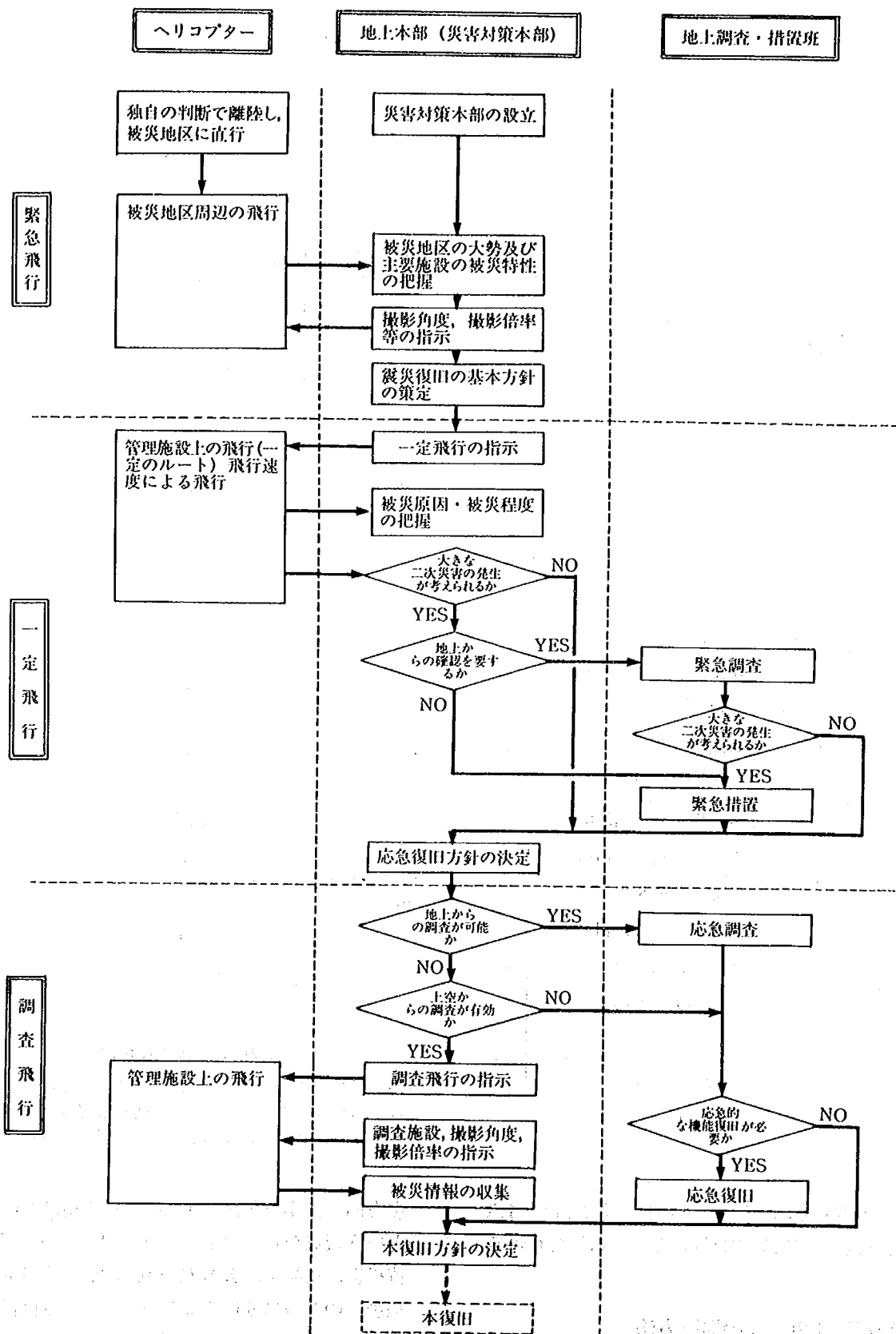


図-4.2 地上本部及び地上調査班と連携したヘリコプターの調査フロー

表-4.1 道路施設及び河川施設に対する緊急調査項目

(a) 道路施設

対象施設		調査項目	調査の有効性
道 路	平坦道路	大きな陥没	○
		大きな亀裂	○
	低盛土 及び 高盛土	大きな陥没	○
		路体沈下	○
		流失	○
	斜面・切 土のり面	大規模斜面崩壊	○
		大きな落石	○
		大きな決壊	○
橋 梁	全体	落橋	○
	橋面	高欄、地覆のずれ、折れ 角及び蛇行	○
		縦断線形の折れ角	△
		伸縮部の開き、盛り上がり	△
		伸縮部の段差	△
	上部工	不連続な折れ・たわみ	△
	下部工 (橋脚・ 橋台)	かぶりコンクリート剥離	○
		傾斜	○
		沓座部のかけ落ち	△
		張り出し部の大きな亀裂	△
トンネル	杭口周辺の斜面崩壊		○
	覆工の大規模な崩落		×
共同溝	路面上への突出		○
	本体の大きな破損		×
カルバート・地下横断歩道	大きな路面陥没		○
	本体の大きな破損		×
横断歩道橋	落橋		○
	橋脚の大破損		○

(a) 道路施設

対象施設		調査項目	調査の有効性
堤防(土堤及び 特殊堤共通)	天端	天端亀裂	○
		天端陥没	○
	法面	法面縦断亀裂	○
		法面横断亀裂	○
		法面崩壊	○
		漏水	△
	堤体全体	決壊・浸水	○
		堤体沈下	○
特 殊 堤	擁壁	擁壁の傾斜	△
		擁壁の転倒	○
	継目部	継目のずれ	△
		継目の開口	△
護岸工	亀裂		△
	崩壊		○
	滑動		△
	はらみ		△
樋門・樋管・ 水門	函体	亀裂	×
		継手・目地の開き	×
		閉塞	×
		軸線の曲がり	×
	門柱	亀裂	○
		傾斜	△
	翼壁・胸壁	目地の開き	△
		はらみだし	△
		倒壊	○
	呑吐口	大きな損傷	△

○：ヘリコプターによる調査が有効なもの
△：ヘリコプターによる調査が比較的有效なもの
×：ヘリコプターによる調査ができないもの

プターからの調査で、調査すべき項目である。図-4.3
はこれを橋梁及び河川堤防を例にとって示したもので
ある。

4.5 可視ビデオカメラの撮影方法

1) 撮影方向の決定

ヘリコプターから可視ビデオを撮影する際には、飛
行方法に応じて撮影方向を変えなければならない。撮

影方向を機体の進行方向と撮影対象施設との位置関係
という観点から整理すると、図-4.4 に示すように、垂
直撮影、連続平衡撮影(斜め撮影)、収れん撮影(斜め
撮影)の3つに分けることができる。垂直撮影とは、
進行方向に対して常に直下を撮影するもので、ぶれが
一番少なく広範囲をもれなく撮影することができる。
また、画像の歪みが少なく、各種画像処理に最も適し
ている。連続平衡撮影とは、進行方向に対して常に真

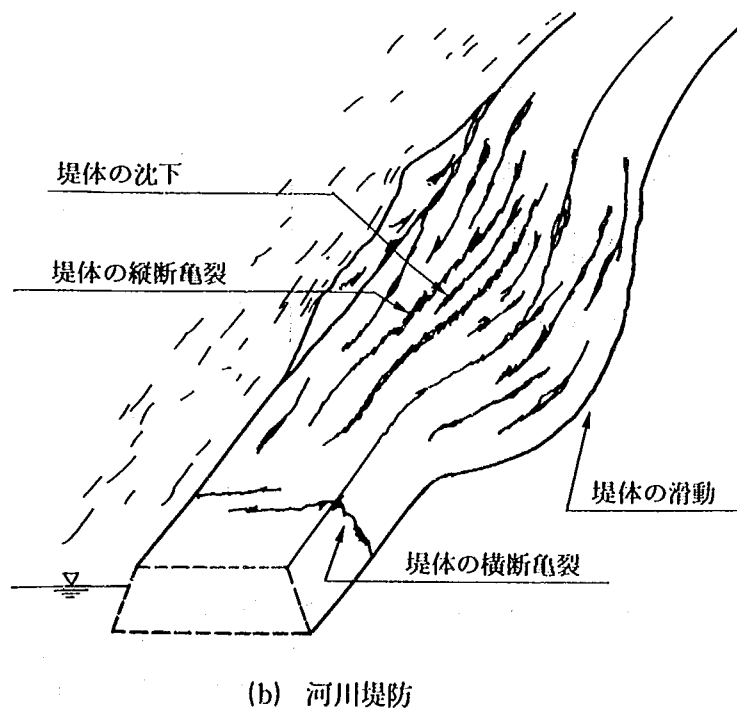
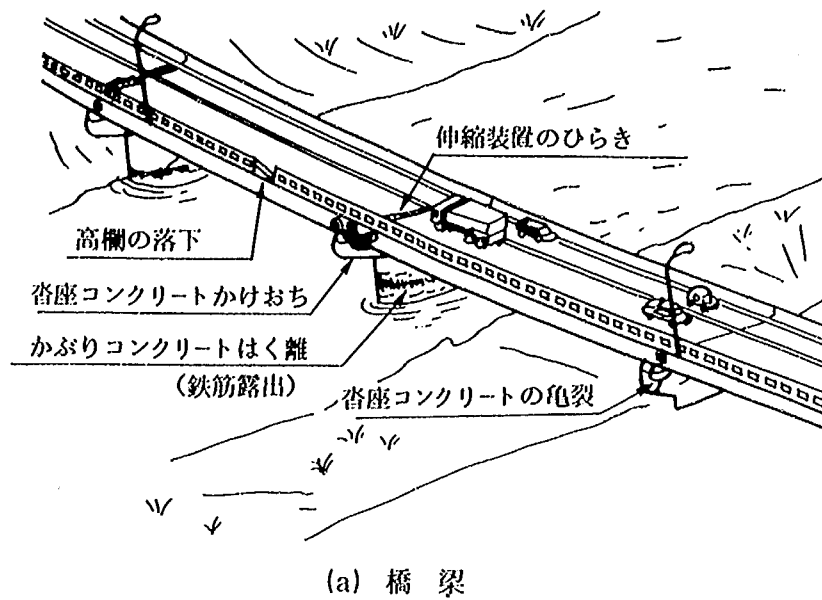


図-4.3 一定飛行によるビデオ画像から調査すべき被害形態の一例

横を撮影するもので、撮影者が目に入るシーンが撮影できるため最も撮影しやすい方法である。また、橋桁の下、橋脚のように垂直撮影では撮影できないものも、図-4.1に示したように60度程度のふ角（以後、撮影角度と呼ぶ）をとることにより撮影できる。ただし、撮影角度の影響で画像処理には誤差が入りやすい。収れん撮影とは、常に調査対象施設に視点を合わせるもので、特定施設の被害をいろいろな角度から撮影す

るのに適している。

以上のような特性をもとに、上述した3種類の飛行方法と組み合わせると、表-4.2のように撮影方向を選択するのがよいと考えられる。

2) 撮影幅及び撮影角度の決定

撮影に際しては、対象施設の特徴に応じて必要とされる撮影画像の大きさ（撮影幅）及び撮影角度を定めなければならない。震災時には、図-4.5に示す手順に

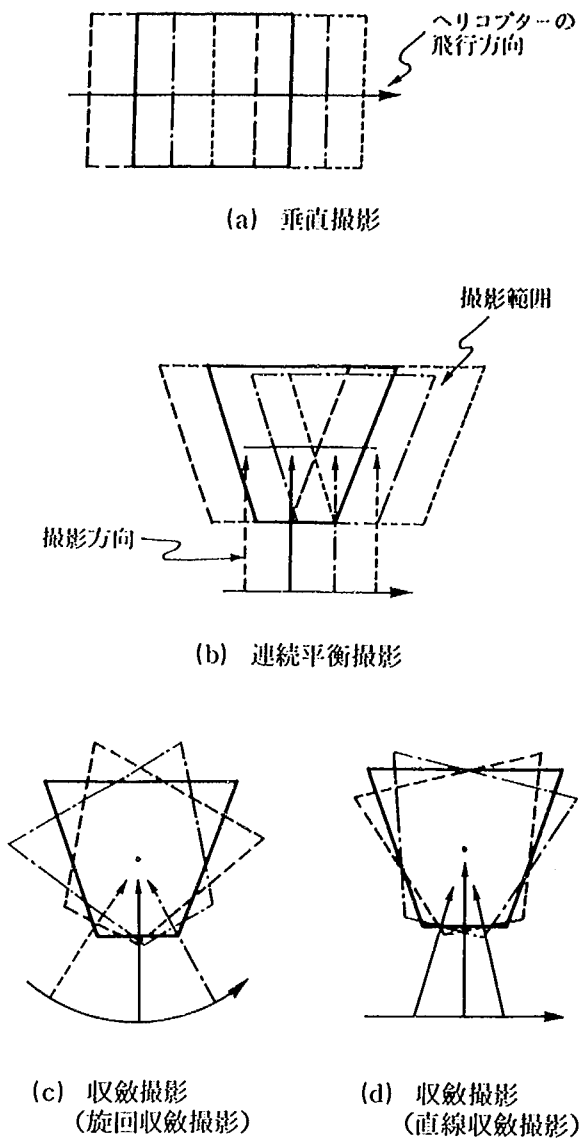


図-4.4 ヘリコプターからのビデオ撮影方向

より撮影幅及び撮影角度を定めるのがよいと考えられる。この基本的な考え方は以下の通りである。

i) 飛行高度の決定

航空法で定められた最低安全高度を基準とするのがよい。

ii) 調査対象施設の特徴に応じた撮影幅の決定

撮影すべき幅には、対象施設の全貌を捉えるためには、これ以下であってはならないという最小値 A_{min} (以下、撮影幅の小値と呼ぶ) と、被害を画像上で識別できるだけの解像幅を得るためには、これ以上撮影範囲を大きくしてはならないという最大値 A_{max} (以下、撮影幅の最大値と呼ぶ) がある。このうち、撮影幅の最小値 A_{min} は、対象施設の大きさから決めればよい。例えば、昭和53年伊豆大島近

表-4.2 ヘリコプターの飛行方法に応じたビデオ撮影方向

飛行タイプ	撮影方向
緊急飛行	連続平衡撮影
一定飛行	垂直撮影、連続平衡撮影
調査飛行	収れん撮影

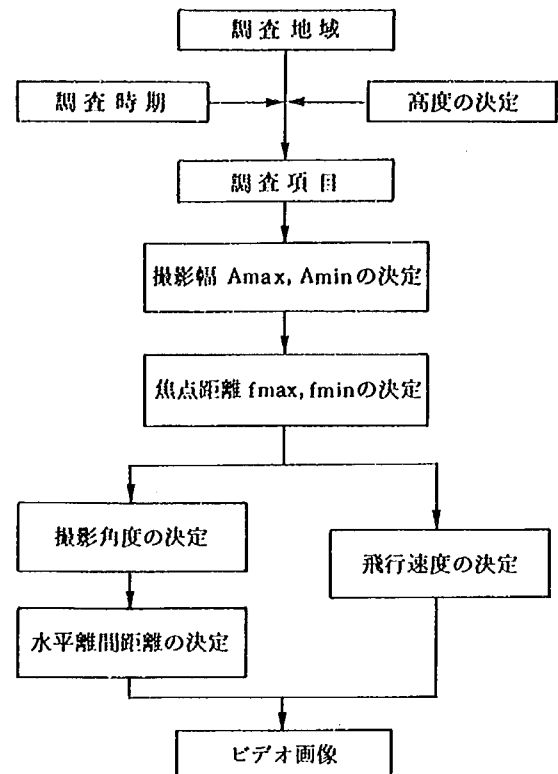


図-4.5 ヘリコプターからの可視ビデオカメラの撮影フロー

海地震の際に撮影された斜面崩壊の画像を示したのが写真-4.1である。この場合には、沿道を含む崩壊斜面の大きさが撮影幅の最小値となる。これに対して、撮影幅の最大値 A_{max} を定めるためには、ビデオ画像の解像力を考えに入れておかなければならない。

すなわち、ビデオカメラによる VTR 画面は図-4.6 に示すように、一般に525本の走査線から構成されており解像幅と撮影幅の間には次の関係がある。

$$A = M \times N / 6$$

ここに、

A: 撮影幅 (m)

M: 解像幅 (m)

N: 垂直解像度 (本)

垂直解像度 N とは、画像を構成する走査線の有効本数

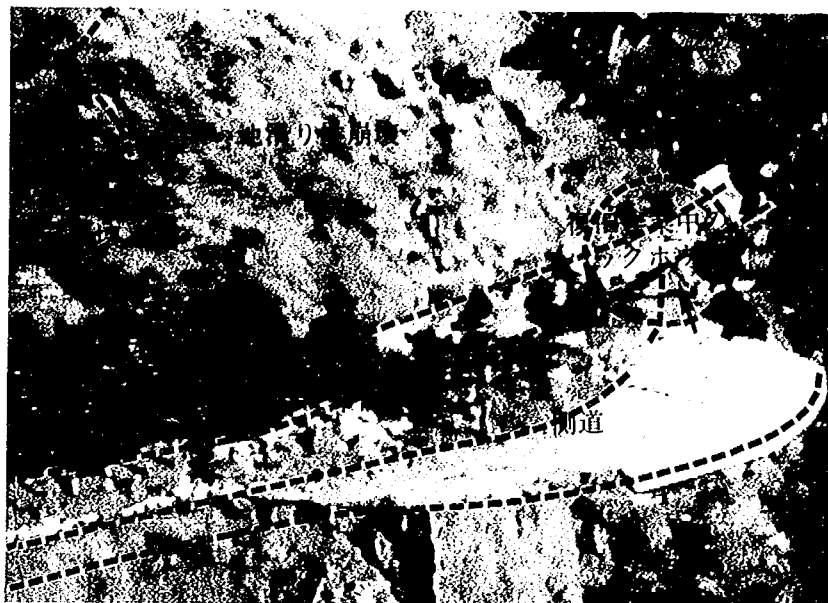
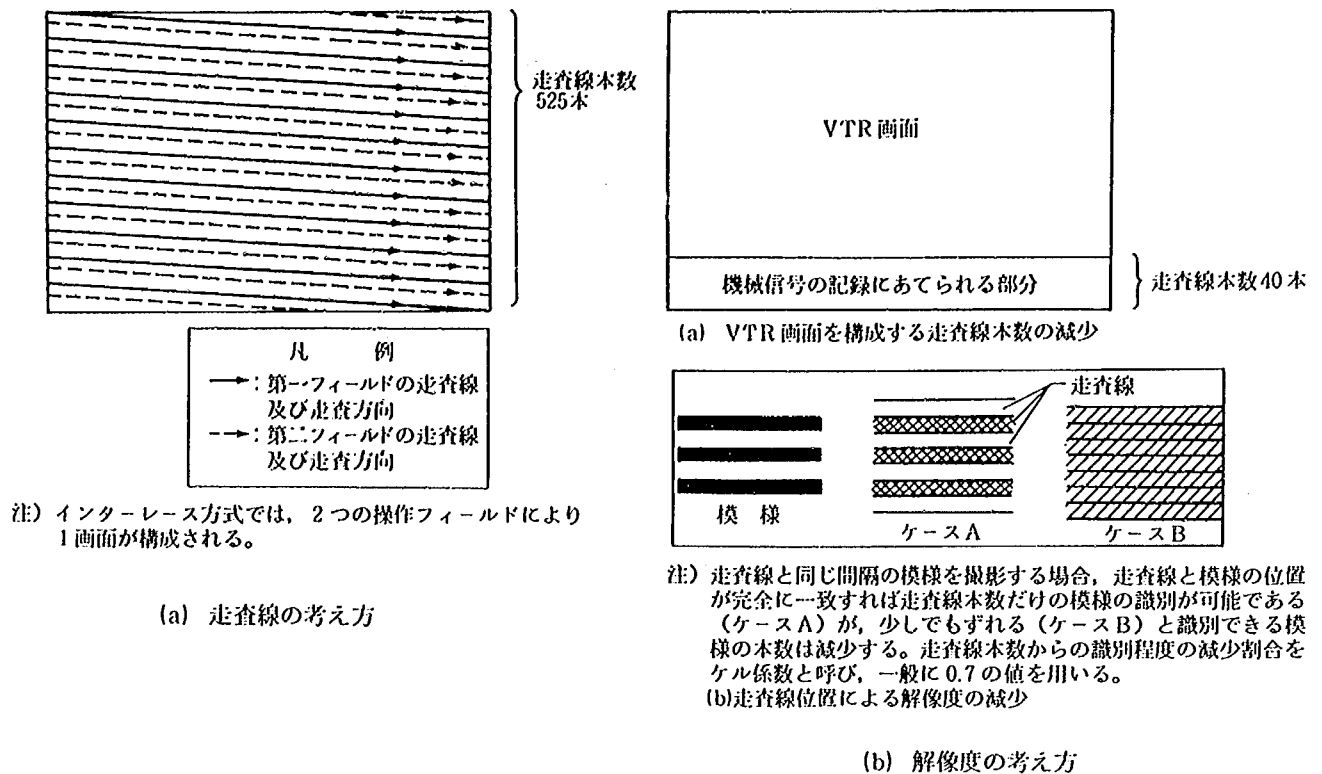


写真-4.1 修善寺～下田線の梨本地区の被災状況を撮影した
可視ビデオカメラの画像

図-4.6 撮影画像の考え方⁹⁾

である。1画面は525本の走査線から構成されるが、これから機械信号を記憶させるのに必要な40本を差し引いた値に、インターレース方式¹⁰⁾と呼ばれる記録方式に固有な解像度の減少率(一般にケル係数と呼ばれる)70%を乗じた約340本が有効な走査本数となる。ここで、式(4.1)の右辺で6で割っているのは、走査線相互の重なりを考慮すると物体の存在を認識するためには、一般に最低6本の走査線を必要とするためである。施設の被害を画像上で認識するためには、解像幅Mが被害の大きさを表わす単位、例えば、鉄筋コンクリートの橋脚の被害を識別するために、基本となるコンクリートの剥離を判断出来なければならない。このため、コンクリートの剥離の生じる範囲が単位となる。したがって、撮影幅の最大値 A_{max} はこうした被害の大きさを表わす単位から、式(4.1)により算出することができる。

iii) カメラの焦点距離の決定

図-4.7に示すように、撮影幅Aとカメラの焦点距離fとの間には次式の関係がある。

$$f = Z \times H / A$$

ここに、

f: カメラの焦点距離 (mm)

H: 飛行高度 (m)

Z: カメラの撮影管の横幅

カメラの撮影管の横幅Zはカメラの機種によって異なり、例えば、建設省防災ヘリコプター“おおぞら”に搭載されているカメラでは8.8mmである。したがって、ヘリコプターの飛行高度を与えることにより、前述の撮影幅の最大値 A_{max} 及び最小値 A_{min} に応じた焦点距離 f_{min} 及び f_{max} を式(4.2)より算定することができる。焦点距離fは、調査対象施設の大きさ及び被害の特徴に応じて次式を満足するように定める必要がある。

$$f_{max} > f \geq f_{min}$$

iv) 施設からの水平離間距離の決定

連続平衡撮影では、まず、撮影角度を決めなければならない。撮影角度は、調査対象施設や被害の種類、飛行高度によって定めなければならないが、最低安全高度の場合には、一般には45~60度程度がよいと考えられる。撮影角度及び飛行高度が決まれば、図-4.8に示すように、施設からの水平離間距離hは次のように定められる。

$$h = H / \tan \alpha$$

ここに、

h: 施設からの水平離間距離 (m)

H: 飛行高度 (m)

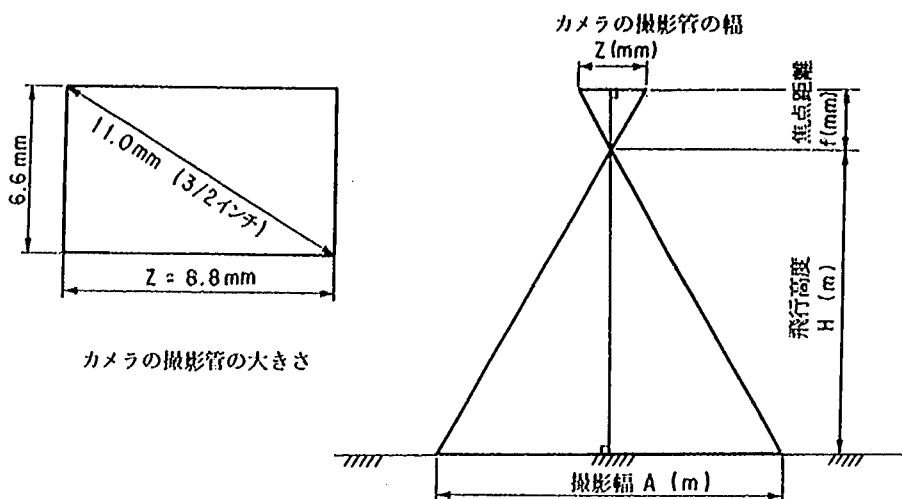


図-4.7 カメラの焦点距離と撮影幅との関係

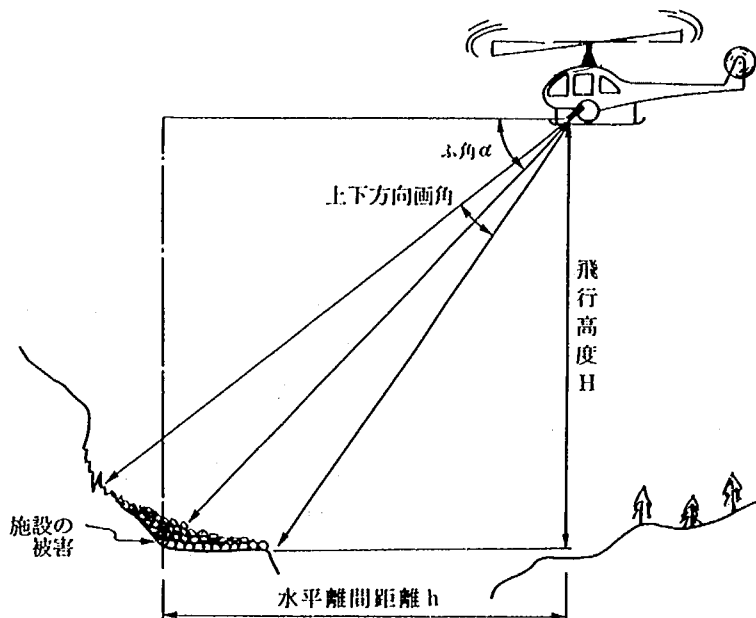


図-4.8 ヘリコプターの飛行高度、カメラの撮影角度と水平離間距離の関係

α : 撮影角度 (度)

v) ヘリコプターの飛行速度の決定

調査を迅速に行うためには、基本的にできるだけ高速で飛行することが望ましい。高速で撮影されたビデオ画像で人間の目では十分追従できない場合でも、ビデオデッキの静止画像もしくはスロー再生機能を用いることにより被害状況の把握が可能である。ただし、カメラのシャッタースピードと比較して画面上の撮影対象施設の移動速度が大きすぎると、施設の輪郭が流れて記録されるため、正しい被害状況を判定できない。このような現象は近距離の対象施設を望遠撮影した場

合に生じやすく、十分に注意が必要である。

4.6 熱赤外線ビデオカメラによる撮影方法

熱赤外線ビデオカメラにおいても、撮影時に決定すべき撮影幅及び撮影角度等の考え方は可視ビデオカメラの場合と基本的に同じであるが、熱赤外線カメラではこれに加えてレベル（撮影の基準となる温度）及びゲイン（撮影の対象とする温度の幅）の調整を適切に行う必要がある。これは、撮影対象施設の表面の温度分布が構造物の種類、撮影時の気象条件、被害の程度、撮影時間帯等によって変化するために、レベル及びゲ

インを適切に定めないと画像上で色調の違いが十分に現れず、被害の識別ができないためである。実際の調整は、機器の種類によって変化するため一概には規定できないが、撮影対象施設の表面温度が高い夏期にはレベルを上げ、表面温度が低い冬季にはレベルを下げる必要がある。また、施設表面に被害を受けている場合には、被害を受けた部分とそうでない一般部に温度差を生じるのが普通であり、これを利用して被災状況を捉えることができる。したがって、一般部と被害部との温度差が大きい日没直後にはゲインを下げ、温度差が小さくなる日の出前にはゲインを上げる必要がある。ただし、ゲインを上げるほど、被害とは直接関係のない他の箇所の温度差を抽出してしまうようになるため、こうした点に対する配慮が必要である。

4.7 まとめ

広域的な震災情報を、地上の渋滞等に影響されずに上空から迅速かつ円滑に収集することを目指して、このために必要とされるヘリコプターの飛行方法及びビデオカメラの撮影方法を提案した。本検討を通して提案した項目をまとめると以下ようになる。

1) 震後の時間経過に伴って必要とされる情報の性格及び精度が大きく異なるため、まず、「緊急飛行」により震災復旧の基本方針を決定するための概略の調査を行う。次に、「一定飛行」で予め定めたフォーマットに従って網羅的かつ統一的に調査を行い、最後に、「調査飛行」により応急復旧に必要なより詳細な情報の収集に重点をおいた調査を行うのがよいと考えられる。

2) 1) に示した3つの飛行のポイントとしては、まず、「緊急飛行」では、被災状況の全体像の把握、激甚な被災地区の特定、重要な二次災害につながる可能性の検討に要する項目の調査が、また、「一定飛行」では、道路・河川施設の被災箇所及び被災程度、道路の通行の可否、二次災害の発生の可能性の判断に必要な項目の調査が重要である。また、「調査飛行」では、特定の調査対象構造物の応急復旧に必要な定量的資料の取得が必要である。

3) ビデオカメラによる撮影は、調査対象とする施設及び被害の特徴に応じて、以下のように行う必要がある。

① 施設の全貌を捉えることができ、かつ画像上で被害が識別できるだけの撮影幅が得られるように、カメラの焦点距離及びヘリコプターの飛行高度を定める。

② 被害の種類に対して適切な撮影角度が得られる

ように、施設からの水平離間距離を定める。

③ 調査を迅速に行うために、5章に示すようにビデオ画像が乱れない範囲でヘリコプターの飛行速度を高速にする。

④ 熱赤外線カメラでは、6章に示すように撮影時の気象条件、撮影時間帯等に応じてカメラのレベル及びゲインを適切に設定する。

第5章 ビデオ画像を用いた上空からの震災調査におけるヘリコプター等の最高飛行速度

5.1 まえがき

ヘリコプター等を用いた上空からの震災調査では、調査を迅速に進めるという観点からできるだけ高速に飛行するのが望ましい。しかし、飛行速度があまり速すぎると画面上で画像が流れてしまい、ビデオ画像から正しく被災状況を判読することが困難になる。したがって、飛行速度の上限を定めるためには、画像の“流れ”に対する検討が必要とされる。

本章では、震災調査におけるヘリコプター等の飛行速度の合理的な設定方法を提案することを目的として、画像の“流れ”の発生のメカニズムを検討し、流れを生じさせないための飛行速度、飛行高度及びビデオカメラの焦点距離の関係を明らかにするとともに、模擬的な地震被害を用いた撮影実験によってこの関係を検討した結果を示す。

5.2 画像の流れの発生のメカニズムと限界速度の評価

画像が“流れる”とは、被写体の動きに画像が追従できず、ビデオ画像上で撮影対象物の輪郭がぼやける現象である。ビデオ画像は、ビデオカメラのレンズを通して撮像管あるいは CCD 上に投影された撮影対象物を電気的に記録したものである。ここで、撮像管とは、光を感じてこれを電気信号に変えるもので、初期のビデオカメラに用いられた。CCD とは、Charge Coupled Device (撮像素子) の頭文字を取ったもので、多数の光電素子で光を電気信号に変えるものである。最近のビデオカメラは大部分 CCD を用いているが、建設省の防災ヘリコプター“あおぞら”に搭載されている HL-95 型ビデオカメラは旧式であり、撮像管が用いられている。

画像の流れが生じるのは、基本的にビデオカメラが

記録できるスピードよりも撮影対象物が速く移動するためである。したがって、ビデオカメラに対する撮影対象物の相対的な移動速度が大きいほど“流れ”の程度は激しくなる。

撮像管あるいは CCD 上での撮影対象物の移動速度は、撮影対象物とビデオカメラの相対的な速度、ビデオカメラのシャッター速度、及び、撮像管もしくは CCD 上に映る撮影対象物の寸法によって定まる。したがって、ヘリコプター等による被災調査において“流れ”が生じるか否かは、ヘリコプター等の飛行速度、飛行高度、ビデオカメラのシャッター速度及び焦点距離の4つによって決定されることになる。

このうち、ヘリコプターの飛行高度は航空法により定められ、また、ビデオカメラの焦点距離は被害部位の損傷度を識別できるだけの解像幅が得られるように定めなければならない。シャッター速度で重要な点は、CCD を用いた場合には電子高速シャッターを用いて家庭用のビデオカメラでも容易に 1/2000 秒といった高速シャッターを用いることができるが、撮像管を用いた場合には光ビームをあてる速さは一定であり、シャッター速度は 1/60 秒から変化させることはできないという点である。ここで、高速電子シャッターとは、写真機のシャッターのように機械的な原理でフィルムの露光時間を調節するのではなく、光電素子から電気信号を取り出す時のパルス周波数のことである。

以上の観点から、画像の“流れ”を生じさせない範囲で最も高速なヘリコプター等の飛行速度（以下、流れ発生速度と呼ぶ）の定式化を行うと、次のようになる。

いま、図-5.1 に示すように、飛行速度 V 、飛行高度 H で飛行するヘリコプター等から、焦点距離 f で地上

のある構造物をビデオ撮影すると、撮像管上における地上の構造物の移動速度 v は次のようになる。

$$v = f \cdot V / 3.6 H \quad (5.1)$$

ここに、

v : 撮像管もしくは CCD 上における地上構造物の移動速度 (mm/s)

V : ヘリコプター等の飛行速度 (km/h)

f : ビデオカメラの焦点距離 (mm)

H : ヘリコプター等の飛行高度 (m)

ビデオカメラによる VTR 画像は、一般にインターレース方式と呼ばれる記録方式に基づいており、2つの走査フィールドから構成されている。すなわち、VTR 画像では、図-5.2 に示すように、まず 263 本の走査線からなる第 1 フィールドが作成され、それに引き続いて残りの 262 本の走査線からなる第 2 フィールドが走査線相互の間を補完するように作成される。1

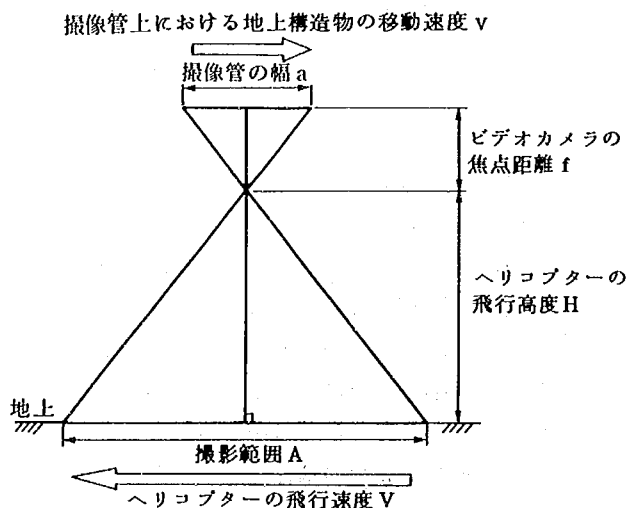
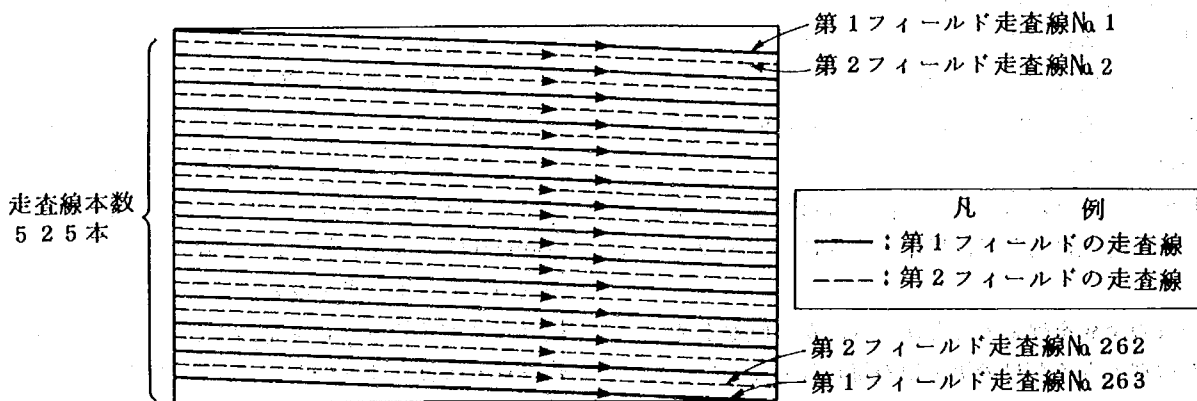


図-5.2 ビデオ画像の構成



注) インターレース方式による記録方式では、2つの走査フィールドにより1画面が構成される。

図-5.1 撮像管上における地上構造物の移動速度

フィールドを作成するのに要する時間は1/60秒であり、したがって、VTRの1画面を作成するには1/30秒を要する¹⁴⁾。VTRの1画面が走査される速度を撮像管もしくはCCD上の撮影対象物の移動速度が上回ると“流れ”が生じるが、こうした動きの速い被写体のブレを防ぐために高速電子シャッターを用いると、流れを少なくすることができる。例えば、1/1000秒のシャッター速度を用いれば、CCDに1/1000移だけ蓄積した画素を1/60秒ごとに次々に取り出すことができる。したがって、正しい画像記録を得るためには、シャッター速度の間に撮像管もしくはCCD上における撮影対象物の移動が走査線1本分の幅に収まっていなければならない。ただし、これはあくまで原理的な話であり、実際には撮影対象物の移動が走査線1本分の幅に収まっていなくても、正しい画像記録との違いは視覚的に必ずしも顕著ではない。この理由は、人間の目が画像上で物体を識別できる最小幅（解像幅）が一般に走査線6本程度の幅であるためであり、第2フィールドの走査線が第1フィールドの走査線を6本程度以下の範囲で飛び越して記録されたとしても、見かけ上ほぼ正常な記録と見られるためである。

したがって、ここでは、シャッター速度の間に撮影対象物が撮像管もしくはCCD上で走査線6本分の幅だけ移動する状態になり画面が“流れる”と考えれば、この時のヘリコプター等の速度、すなわち、流れ発生速度 V_L は次式で表される。

$$V_L = \frac{6 \cdot a}{525} \cdot \frac{1}{T_s} \cdot \frac{3.6 H}{f} \\ = 0.041 \times \frac{a \cdot H}{f T_s} \quad (5.2)$$

ここに、

a : CCD もしくは撮像管の幅(mm)

T_s : シャッター速度(秒)

前述したように、“あおぞら”に搭載されているビデオカメラは撮像管を用いており、撮像管の幅 a は6.6 mm、シャッター速度は1/60秒（固定）である。この場合には、式（5-2）は次式のようにになる。

$$V_L = 16.5 \times \frac{a \cdot H}{f} \quad (5.3)$$

式（5.3）によれば、ヘリコプター等の流れ発生速度 V_L (km/h) と飛行高度 H (m)、ビデオカメラの焦点距離 f (mm) の関係は図-5.3のようになる。いま仮に、飛行高度 H を航空法に定める300 m（市街地）とすれば、ビデオカメラの焦点距離 f が50 mm（画像上の撮影幅は39.6 m×52.8 mの範囲となる）、100 mm（同、19.8 m×26.4 m）、514 mm（同、3.9 m×5.1 m）の場合の流れ発生速度 V_L は、それぞれ、97.8 km/h、48.9 km/h、9.5 km/hとなる。

現在、建設省の防災ヘリコプター“あおぞら”に搭載されているビデオカメラには、2倍のエクステンダーが取り付けられており、これを用いると最大焦点距離は514 mmとなる。このため、焦点距離を最大とした場合には、飛行高度を300 mとすると流れ発生速度はわずかに9.5 km/hとなる。ただし、9.5 km/h以

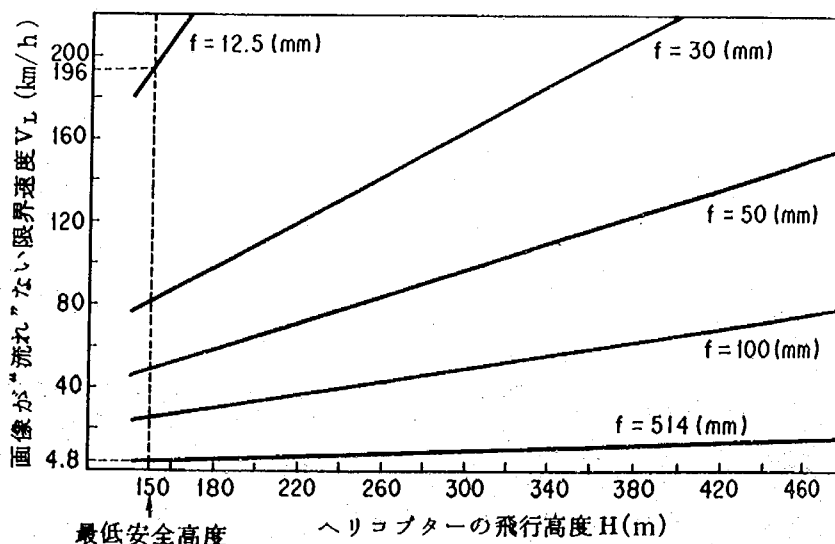


図-5.3 ヘリコプターの限界速度、飛行速度及びビデオカメラの焦点距離の関係

上になるとすぐビデオ画像からの震災状況の識別ができなくなる訳ではない。式(5.3)で与えられる流れ発生速度に達して“流れ”が生じるということは、人間の目で識別できる最も小さい幅の中で画面に乱れが生じ始めるということを意味するものであり、乱れの大きさが調査しようとする被害部位の寸法に比較して十分小さい範囲であれば、被害の識別は可能であるためである。これについては、5.5に示す。

このように、現在“あおぞら”に搭載されているビデオカメラでは、流れ発生速度 V_L は非常に小さい値となるが、これはシャッター速度が $1/60$ 秒と遅いためである。したがって、将来、現在の旧式ビデオカメラを CCD を採用した新型カメラに入れ換えれば、シャッター速度は $1/500$ 秒程度にすることができる。この場合には、ビデオカメラの焦点距離を 50 mm , 100 mm , 514 mm とした場合の流れ発生速度 V_L は、それぞれ、 815 km/h , 406 km/h , 79 km/h に上げることができる。シャッター速度は速ければ速いほど流れは少なくなるが、あまりシャッター速度を速くすると画面が暗くなるため、より感度のよい CCD を採用する必要がある。

5.3 模擬地震被害を用いた飛行速度の検討方法

上述したヘリコプターの流れ発生速度 V_L を検証するために、写真-5.1に示すように、RC 橋脚の模擬地震被害と同心円を描いた2枚のパネルを試験車の側面に固定した上で試験車を走行させ、これを地盤に対して横方向（画面上で画像が短辺方向に移動する方向）に固定したビデオカメラで撮影することにより、その

視認性を検討することとした。ここに、ヘリコプターによる調査のようにビデオカメラ側が移動するのではなく、撮影対象側を移動させたのは、VTR 画像上では両者の相対速度が重要であり、どちらを移動させても同じ結果が得られるはずであることから、実験の容易な撮影対象側を移動させる方法を採用したものである。撮影には土木研究所構内の試験走路を用いた。写真-5.2は撮影時の様子を示したものである。

実験に用いた撮影対象は以下の2つである。

i) 同心円のパネル

$90\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ の白色のパネル板に、黒色の同心円を3本描いたものである。同心円の幅は、それぞれ 10 cm とした。

ii) 鉄筋コンクリート橋脚模型の地震被害のパネル

写真-5.3に示す中空円形の RC 橋脚模型 ($\phi 80\text{ cm}$) に生じた損傷をカメラで撮影し、 $90\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ のパネル板に原寸の約 110% に引き伸ばして貼付したものである。ここに、橋脚模型の損傷は、主鉄筋段落し部の耐震性を検討するため別途実施した動的載荷実験¹⁵⁾によるものである。主鉄筋径は 13 mm 、帯鉄筋径は 9 mm であるから、パネル上ではそれぞれ約 15 mm , 約 10 mm となっている。

主鉄筋段落し部の損傷は、昭和 57 年浦河沖地震における静内橋のように、ねばりの少ないもろい被害¹⁶⁾となるため、落橋等につながる危険な破壊形態である。なお、写真-5.3のようにコンクリートが大きく剥離し、主鉄筋がはみだした状態となると、道路震災対策便覧⁹⁾ (震災復旧編) に示される RC 橋脚の被災判定表に基づけば、直ちに通行止めを要する「大被害」と判

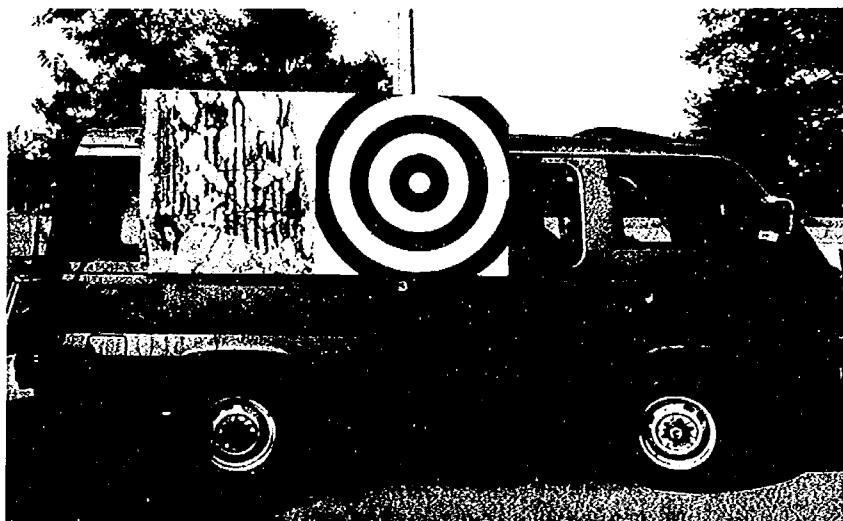


写真-5.1 撮影の対象とした RC 橋脚の模擬地震被害のパネル及び同心円のパネル

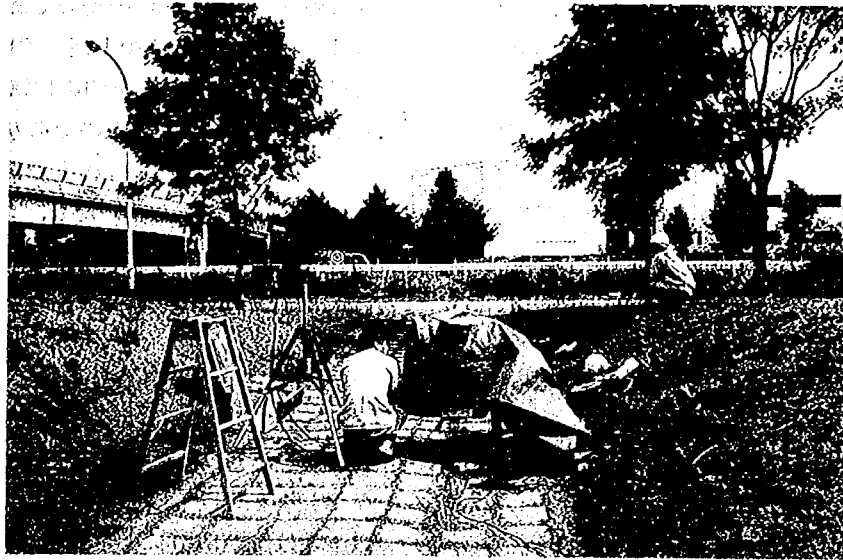


写真-5.2 撮影の様子

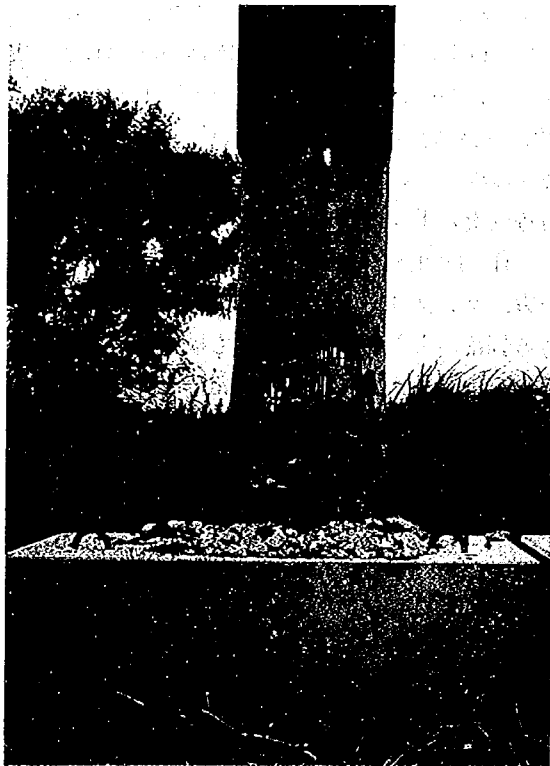


写真-5.3 RC橋脚の模擬地震被害

定しなければならない。

撮影には、有効画面幅が8.8mm×6.6mmで2/3インチ撮像管を有するビデオカメラと、テープ幅3/4インチの収録再生装置を用いた。ビデオカメラは、建設省防災ヘリコプター“あおぞら”に搭載されているHL-95型と同種のカメラであり、シャッター速度は1/60秒(固定)である。ただし、装着レンズが多少異なり、実験に用いたビデオカメラでは焦点距離は

9.5~143mmと、HL-95型の焦点距離12.5~514mm(2倍エクステンダー付き)に比べて、広角側が3mm、望遠側が371mmと、それぞれ小さくなっている。ちなみに、ヘリコプターの飛行高度が300mの場合に撮影できる画像の大きさは、焦点距離が143mmの場合には約14m×18m、焦点距離が514mmの場合には約4m×5mである。

実験では、撮影距離、撮影対象物の移動速度、及び、ビデオカメラの焦点距離を変化させて、合計97ケースの撮影を実施した。ここで、撮影距離及び撮影対象物の移動速度は、ヘリコプター等による上空からの調査では、それぞれ、飛行高度及び飛行速度に相当するものである。試験車の走行速度は、測定精度が±1.0km/h程度の非接触車速計を用いて測定した。以上の条件で平成2年9月17日の晴天時に撮影を行った。

5.4 撮影対象の大きさに応じて必要とされるビデオカメラの焦点距離

流れ発生速度の検討に入る前に、まず撮影対象物をビデオカメラで識別するために必要とされる像の大きさ(すなわち、ビデオカメラの焦点距離)としてはどの程度が必要かを、RC橋脚模型を用いた実験結果に基づいて検討する。

前述したようにビデオ画像上で対象物を識別するためには、最小6本分の走査線の大きさが必要とされることから、ビデオカメラの焦点距離 f (mm)は、撮影距離 H (m)及び撮影対象物の寸法 M (m)に応じて、以下のように与えなければならない。

$$f > 0.116 H / M$$

いま、模型橋脚の主鉄筋の識別に着目すると、主鉄筋径の 15 mm を式 (5.4) の撮影対象物の幅 M と見なすことにより、式 (5.4) は次のようになる。

$$f > 7.73 H \quad (5.5)$$

これが径 15 mm の主鉄筋を識別するために必要な最小の焦点距離であり、仮に、300 m の上空から撮影するとすれば、約 2300 mm の焦点距離が必要となる。

一方、模型橋脚の幅 (90 cm) に着目し、これを式 (5.4) の撮影対象物の幅 M と見なせば、模型橋脚の全幅を識別するために必要な最小の焦点距離は次のようになる。

$$f > 0.13 H \quad (5.6)$$

図-5.4 は、式 (5.5) 及び式 (5.6) により与えられた関係を H/f の関数として表わしたものである。なお、図中には比較のために後述する実験結果も示している。これによれば、 H/f が 0.13 以下であれば径 15 mm の主鉄筋を、また、 H/f が 7.69 以下であれば橋脚の全幅をそれぞれ識別できることになる。

これを上述した実験結果によって検討してみよう。いま、RC 橋脚に着目し、いろいろ焦点距離を変えて撮影した RC 橋脚の損傷の識別度を以下のように 3 ランクに分類する。

- i) 主鉄筋が識別できる
 - ii) 主鉄筋は識別できないが、コンクリートが剥落していることは識別できる
 - iii) コンクリートが剥落していることもわからない
- ただし移動速度としては、今回の検討で最も遅い 5 km/h の場合を基本とし、移動速度が大きいても流れが生じにくい H/f が大きい場合については、一部移動速度が 7 km/h 及び 45 km/h の場合も対象とした。

図-5.4 によれば、径 15 mm の主鉄筋が概ね識別で

きるのは $H/f < 0.35$ の場合であり、式 (5.5) による値 ($H/f < 0.13$) を多少上回っている。ここに、式 (5.5) は径 15 mm の主鉄筋を明瞭に識別するために最低限必要な H/f を示したものであり、多少鉄筋の輪郭がぼやけても $H/f < 0.35$ 程度であれば、鉄筋の識別はできると考えられる。ただし、コンクリートの剥落が識別できるのは $H/f < 2.5$ の場合であり、式 (5.6) による値 ($H/f < 7.69$) をかなり大きく下回っている。これは、コンクリートの剥落を識別するためには橋脚の全幅を撮影対象物の幅 M とすることは適切ではなく、これよりもさらに小さい値を用いなければならないことを示している。図-5.4 の検討では、 H/f が少なくとも 2.5 以下でなければならないが、 H/f が 2.5 以下とは、式 (5.4) による撮影対象物の幅が $M \geq 30$ cm 程度の場合に相当する。コンクリートが一群として剥落している範囲が 30 cm 程度であることから、 H/f の値はこれによっていると考えることができる。

なお、以上はあくまでも模型橋脚の話であり、実橋では一般に 30 mm~40 mm 程度の主鉄筋が用いられる。撮影対象物の幅 M と H/f の値は単純に比例するため、実橋において主鉄筋を識別するために必要な焦点距離は次のようになると考えられる。

$$H/f < 0.8 \quad (5.7)$$

一方、コンクリートの剥落については、一群として生じる剥落の大きさは実橋脚でも模型橋脚でもあまり異ならないと考えられる。このため、実験から求めた通りに、以下の焦点距離をコンクリートの剥落を識別するために必要な焦点距離を見なすこととする。

$$H/f < 2.5 \quad (5.8)$$

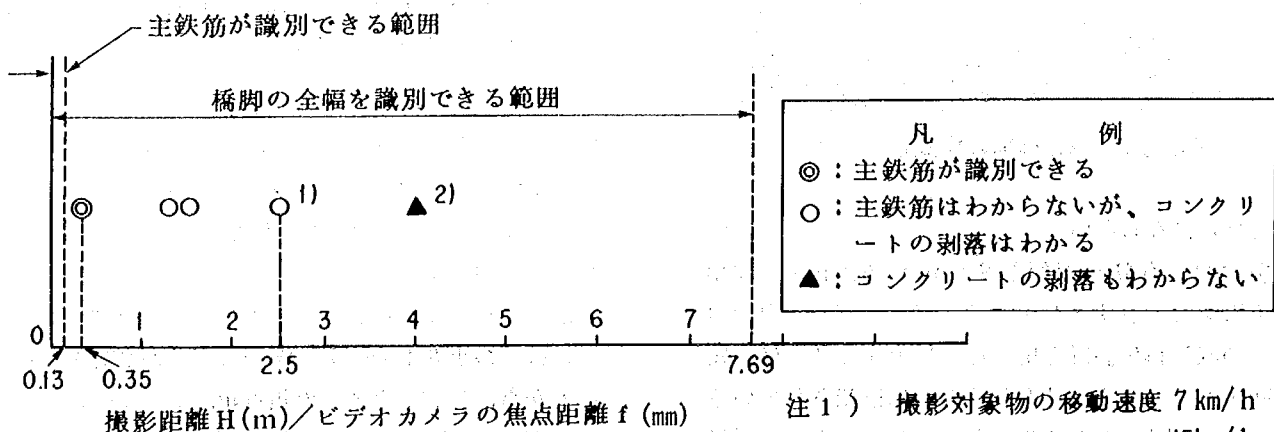


図-5.4 RC 橋脚の識別の可否と撮影距離、焦点距離の関係

5.5 橋脚の損傷を識別するための 限界速度の検討

上述した検討結果に基づいて、RC橋脚のコンクリートの剥落の識別が可能な $H/f < 2.5$ の焦点距離を用いて、RC橋脚の被害を識別するために必要とされる飛行速度の最大値を検討してみよう。

撮影結果の一例として、撮影距離を 50 m、ビデオカメラの焦点距離を 40 mm として、撮影対象物の移動速度を 5~70 km/h に変化させた場合の撮影画像を示すと写真-5.4 のようになる。

同心円のパネルの方が“流れ”の発生の有無を識別しやすいためこれに着目すると、写真-5.4 の条件では、速度が 5~20 km/h の場合には“流れ”が生じない。しかし、速度が 30 km/h を越すと“流れ”が生じ始め、40 km/h になると一層これがはっきりしてくる。このようにして、97 ケースの各々について画像に“流れ”が生じるか否かを判定し、これを撮影距離、カメラの焦点距離、撮影対象物の移動速度の関係として整理した結果が図-5.5 である。なお、図中には式 (5.3) による流れ発生速度 V_L も比較のために示している。

図-5.5 によれば、画像に“流れ”が生じるか否かは式 (5.3) によって判定できることがわかる。ただし、ビデオ画像に“流れ”が生じていても、それが調査しようとする対象物の寸法に比較して十分小さければ、被害

の識別は可能である。例えば、写真-5.5 では、移動速度が 5 km/h であれば鉄筋が露出し、一部で外側にはらみ出していることまでわかるが、移動速度が 10 km/h となると、このような被害の細部はわからなくなる。ただし、移動速度が 20 km/h までは、コンクリートの剥落が橋脚の大部分で生じており、大被害であることは推定可能である。前述したように、同心円のパネルから求めた“流れ”が生じ始める移動速度は 5.7 km/h であるが、当然、鉄筋のように径の小さいものは、移動速度が 5.7 km/h 以上になると状況はよくわからなくなるし、コンクリートの剥落のように寸法の大きいものは、移動速度が 5.7 km/h となり“流れ”が生じても識別可能である。

このため、RC橋脚模型の損傷に着目し、以下のように被害度を 3 ランクに分けて、被害の識別程度を検討した。

- i) 主鉄筋の損傷状況（座屈，はらみ出し）がわかる
- ii) 主鉄筋の損傷状況はわからないが、コンクリートが剥落しているのはわかる
- iii) 画像の“流れ”のために、コンクリートが剥落しているのがわからない

RC橋脚の損傷の識別度合を 97 ケースの実験について、撮影距離、カメラの焦点距離、撮影対象物の移動速度の関数として整理すると図-5.6 のようにな

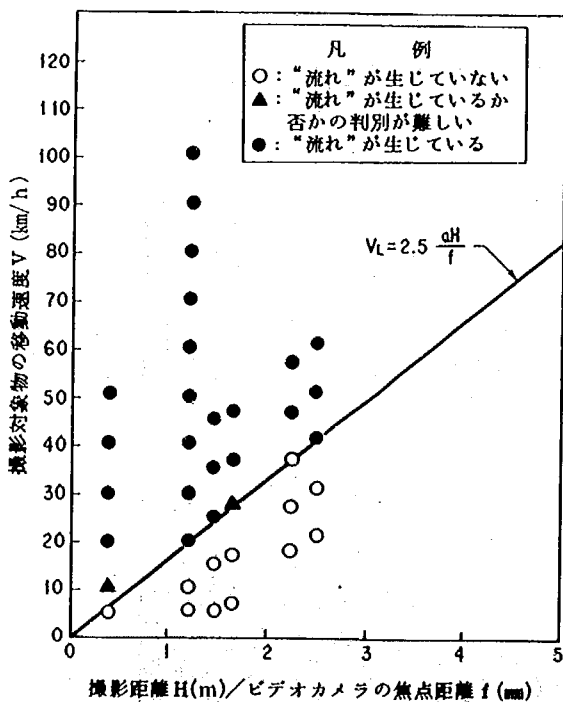


図-5.5 “流れ”の発生と撮影対象物の移動速度，撮影距離，ビデオカメラの焦点距離の関係

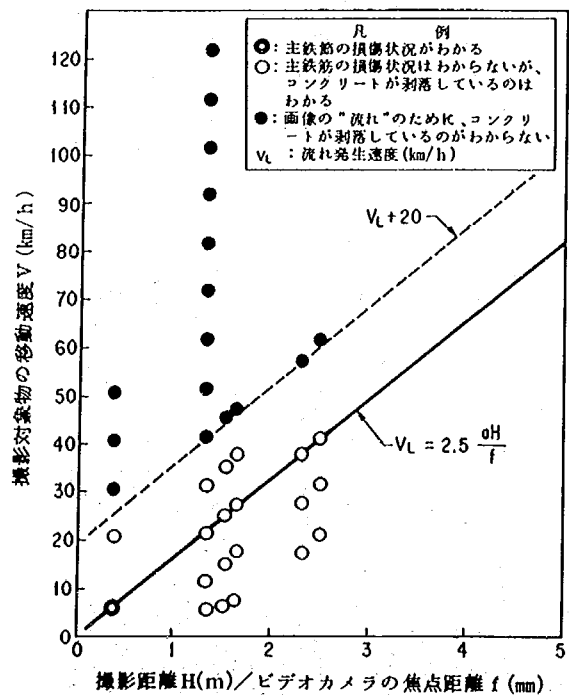
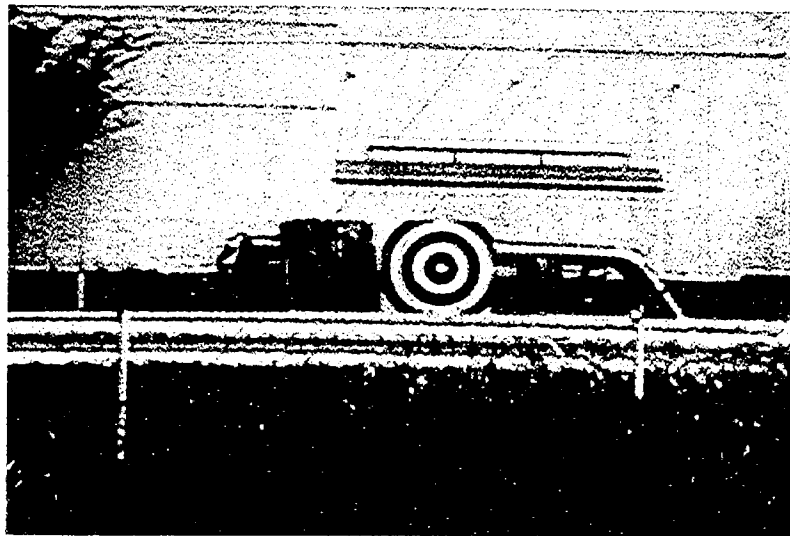
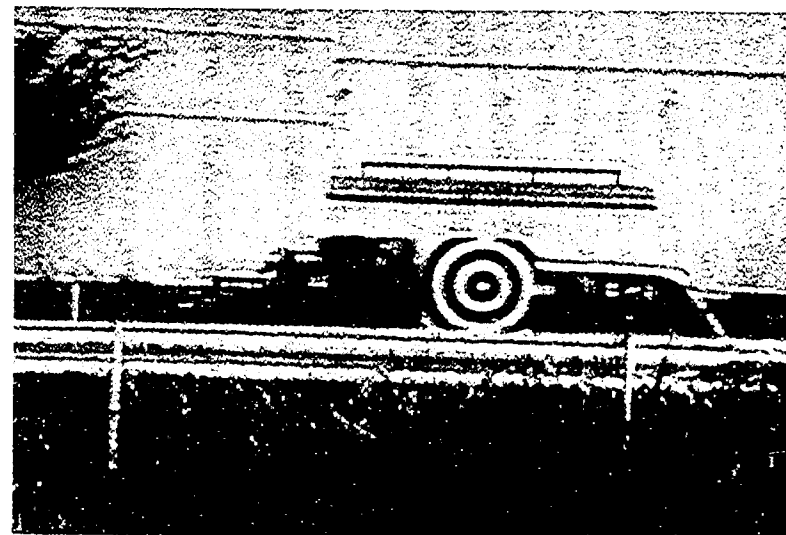


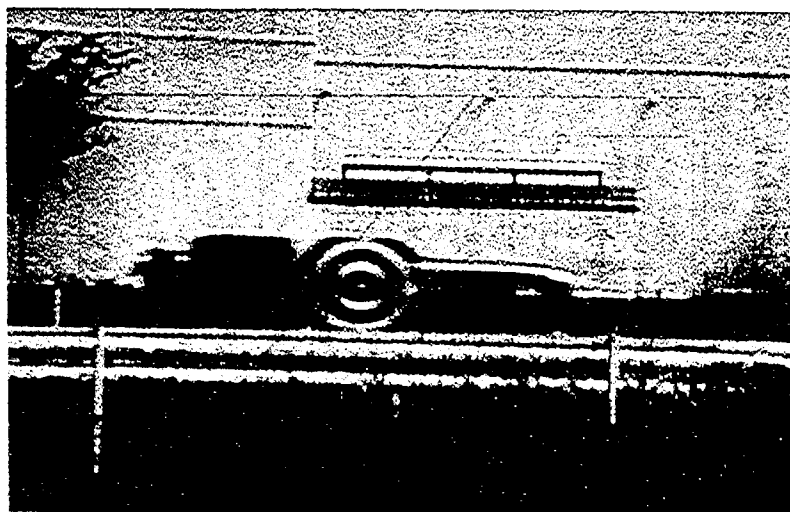
図-5.6 損傷の識別程度と撮影対象物の移動速度，撮影距離，ビデオカメラの焦点距離の関係



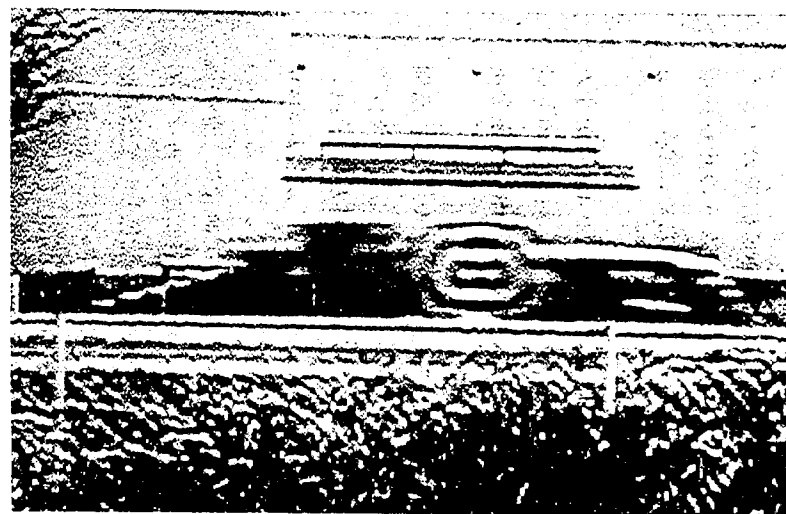
(a) 5 km/h



(b) 20km/h

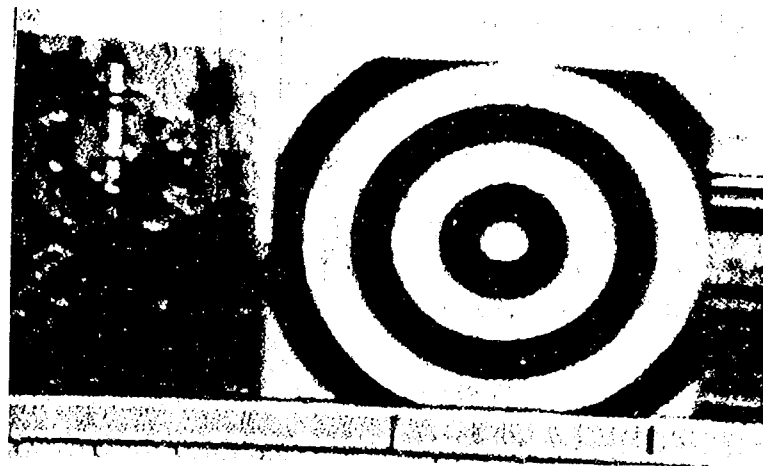


(c) 40km/h

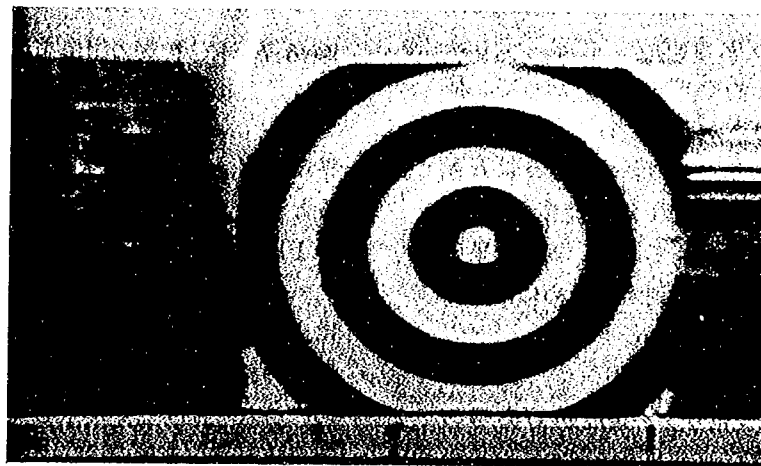


(d) 70km/h

写真-5.4 撮影距離50m, カメラの焦点距離40mm の時の VTR 画像(式(2)による限界速度
 $V_L = 20\text{km/h}$)



(a) 5 km/h



(b) 10km/h



(c) 20km/h

写真-5.5 撮影距離50m, ビデオカメラの焦点距離143mm 時のビデオ画像(式(2)による限界速度 $V_L=5.7\text{km/h}$)

る。これによれば、RC 橋脚の被害を識別するための最大の飛行速度（以下、これを限界速度 $V_{\max}$ と呼ぶ）について以下の点が指摘される。

i) 主鉄筋が損傷していることがわかるのは $H/f=0.35$ の 1 ケースのみである。前述したように、 $H/f=0.35$ の場合の流れ発生速度は 5.7 km/h であり、これよりも移動速度が大きくなると主鉄筋の損傷の識別はできなくなる。したがって、鉄筋のように小さな部材の損傷を対象とする場合には、限界速度 $V_{\max}$ は次のようにする必要がある。

$$V_{\max} = V_L \quad (5.9)$$

ii) 帯鉄筋の識別は、その径が主鉄筋よりも小さいにも係わらず、主鉄筋に比べて画像の“流れ”の影響を受けにくい。これは、主鉄筋の配筋方向が“流れ”の方向に直交しているのに対して帯鉄筋の配筋方向は“流れ”の方向に平行であり、画像が“流れ”ても鉄筋の輪郭がぼやけにくいためである。したがって、移動方向に対する物体の大きさが重要である。

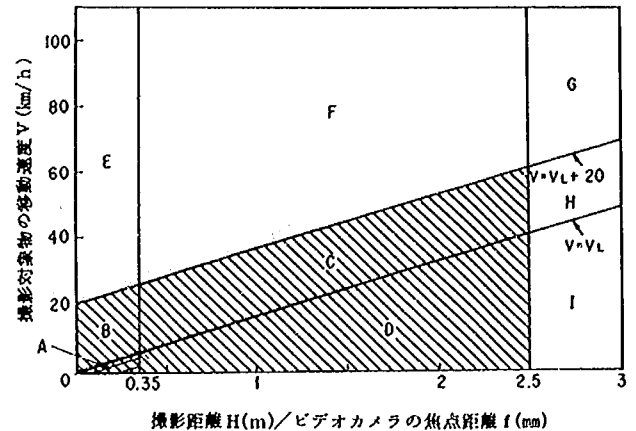
iii) 鉄筋に比べてコンクリートの剥落のように大きな撮影対象では、移動速度が流れ発生速度 V_L を上回っても、ある程度の識別は可能である。実験結果によれば、コンクリートの剥落を識別するためには限界速度 $V_{\max}$ は次のようにするのがよい。

$$V_{\max} = V_L + 20 \quad (5.10)$$

以上の検討に基づいて、シャッター速度が 1/60 秒の場合には、RC 橋脚の損傷を画面上で識別するために必要な焦点距離を確保でき、また、損傷が識別できる範囲に、画像の“流れ”を抑えるために必要とされるビデオカメラの焦点距離と限界速度との関係を整理すると、図-5.7 のようになる。例えば、コンクリートの剥落を識別するためには、撮影対象物を画面上で識別するのに必要な焦点距離を確保できる A~F の領域と、画像の“流れ”を必要最小にとどめることのできる A~D の領域が重なり合った領域 A~D の範囲に設定する必要がある。また、同様に主鉄筋を識別しようとする場合には、領域 A の範囲に設定しなければならない。

5.6 まとめ

ビデオカメラを用いて上空から広域的に震災調査を行う場合の、ヘリコプター等の飛行速度の合理的な設定法を開発することを目的として、VTR 画像の流れ発生速度 V_L の評価方法を提案するとともに、これをさらに模擬地震被害を用いた撮影実験により検討し、流れが多少生じていても調査対象物の損傷を識別できる限



注1) 領域A …… RC橋脚の主鉄筋の損傷を識別できる。

注2) 領域A~D …… 主鉄筋の損傷は識別できないが、コンクリートの剥落は識別できる。

注3) 領域E~I …… 主鉄筋の損傷、コンクリートの剥落ともに識別できない。

図-5.7 RC 橋脚の損傷を識別するための限界速度、撮影距離、ビデオカメラの焦点距離の関係

界速度 $V_{\max}$ の評価法を検討した。本検討結果をまとめると次のようになる。

1) 画像が“流れる”のは、ビデオカメラのシャッターが映像を電気信号に変換する間（シャッター速度）に、撮影対象物が撮像管もしくは CCD 上で走査線 6 本分の幅だけ移動する状態になった場合である。画像の“流れ”が生じるか生じないかの限界の速度、すなわち流れ発生速度 V_L は次式で評価できる。

$$V_L = 0.041 \times \frac{a \cdot H}{f \cdot T_s} \quad (5.11)$$

ここで、

a: 撮像管もしくは CCD の幅（おおぞらに搭載されたビデオカメラ（撮像管方式）では 6.6 mm）

f: ビデオカメラの焦点距離（mm）

H: ヘリコプターの飛行高度（m）

T_s : シャッター速度（おおぞらに搭載されたビデオカメラ（撮像管方式）では 1/60 秒（固定））

2) ビデオ画像上で撮影対象物を識別するためには、最小 6 本分の走査線の幅が必要とされる。一般に、主鉄筋及びコンクリートの剥落を識別するために必要なビデオカメラの焦点距離 f は、一般に、次式を満足するように定める必要がある。

$H/f < 0.8$ （主鉄筋）

$H/f < 2.5$ （コンクリートの剥落）

3) 撮影対象物の移動速度が 1) の流れ発生速度 V_L を上回って画像に“流れ”が生じてても、“流れ”の大

きさが調査対象とする被害の大きさに比較して小さければ、被害状況を把握することが可能である。“流れ”の大きさが被害の大きさの何倍程度になると識別できなくなるかについては、今後、調査対象とする被害の種類及び程度ごとにさらに検討の余地があるが、シャッター速度が1/60秒の場合には、橋脚の主鉄筋及びコンクリートの剥落が識別できるかどうかに着目すると、限界速度 V_{max} はそれぞれ次ようになる。

$$V_{max} \begin{cases} V_L \text{ (主鉄筋)} \\ V_L + 20 \text{ (コンクリートの剥落)} \end{cases}$$

4) 上記3)の検討には、現在、建設省の防災ヘリコプター“あおぞら”に搭載されているHL-95型ビデオカメラを対象にしたが、このカメラは撮像管を採用した旧式であり、シャッター速度は1/60秒に固定されている。しかし、CCDを用いたビデオカメラでは、1/500秒あるいは天候に応じてそれ以上の高速シャッターを切ることができ、この場合には式(5.11)のように流れ発生速度 V_L を大幅に上げることができる。

第6章 震災情報の収集に対する熱赤外線カメラの適用性

6.1 まえがき

震災情報の収集にヘリコプターを用いる場合の弱点の1つに、夜間に震災が生じた場合どのように情報を収集するかという点がある。仮に、夜間にヘリコプターが飛行できたとしても、目視や可視ビデオにより管理施設の被災状況を把握することは基本的にはできない。夜間の被災調査に非常に有効視されているのが熱赤外線カメラの利用である。熱赤外線カメラは物体の表面温度を測定するものであるが、2章の検討によれば、これを用いればある種の被災はかなりはっきり調査することができることがわかっている。

本章では、熱赤外線カメラによる夜間の震災情報の収集に資することを目的として、季節・時間帯・撮影距離等を変化させることにより地震被害の識別がどのように変化するか、また、風が吹いた場合に地震被害の識別にどのような影響が出るかを、模擬被害を設けた鉄筋コンクリート橋脚模型及び盛土模型を対象とした撮影実験により検討した結果を示す。

6.2 解析対象とする模擬地震被害及び撮影方法

6.2.1 解析対象とする模擬地震被害

実地震による被害を調査のために設けることは困難であることから、ここでは写真-6.1、写真-6.2及び写真-6.3に示すように、土木研究所構内においてRC橋脚模型及び実大盛土実験施設に模擬的な地震被害を設け、これを解析対象とすることとした。模擬地震被害の特徴は以下の通りである。

1) RC橋脚模型

RC橋脚の被害にはいろいろなタイプがあるが、ここでは、橋脚基部で曲げ破壊している場合と、昭和57年浦河沖地震等で大きな損傷につながる可能性が高いことが明らかとなったRC橋脚の主鉄筋断落し部の損傷を想定することとした。損傷の程度としては、道路震災対策便覧(震災復旧編)⁶⁾に示される「大被害」(耐力の低下に著しい影響のある損傷で、落橋等致命的な被害につながる可能性のある場合)を基本に次の3体の模型を用いた。これらは、いずれも断落し部の耐震性判定を検討するため土木研究所において別途行った載荷実験後の供試体である。

a) 「大被害」の中空円形橋脚(写真-6.1の左側の模型)

中空であるため、コンクリートは橋脚基部で橋脚の外側と同時に内側でも剥落している。また、斜めひび割れが橋脚上部まで伸びている。このようになると落橋の可能性が濃くなり、非常に危険と判断すべき被害状況である。

b) 「大被害」の中実正方形橋脚(写真-6.1の中央の模型)

主鉄筋の段落し位置でコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈して面外にはらみ出すとともに、一部は破断している。段落し位置から斜めひび割れが橋脚基部に向けて伸びている。段落し部の損傷は橋脚基部の損傷とは違い、ねばりのない破壊をするため、上記a)と同じく非常に危険と判断すべき被害状況である。

c) 無被害の中実橋脚(写真-6.1の右側の模型)

クラック等被害は全く生じていない。

2) 盛土模型(写真-6.2)

盛土の被害にもいろいろな形態があるが、震災復旧上重要な大規模な法面の流出といった被害は模型製作が容易ではない。このため、ここでは盛土表面に生じる亀裂に着目し、幅と深さを変化させた人工的な亀裂

(長さ3m)を設けることとした。大規模な法面の流出等を生じた場合には、当然多数の亀裂も伴うため、亀裂に対する調査が正確にできれば、法面の流出等より大規模な震災の把握に対しても本検討結果が利用できると考えたためである。

亀裂の幅及び深さは道路震災対策便覧(震災復旧編)⁹⁾に示される被害ランクに応じて、以下の通りとした。

- a) 幅30cm, 深さ30cm ……被害ランク A
- b) 幅20cm, 深さ30cm ……被害ランク B
- c) 幅10cm, 深さ15cm ……被害ランク C

3) RC橋脚の部分模型(写真-6.3)

幅1m, 高さ1m, 厚さ7cmの鉄筋コンクリートの板に、上記1)に示したRC橋脚模型のうち、「大被害」の中空円形橋脚の被害を模擬的に作成した。

季節・時間帯・撮影距離等の変化が地震被害の識別程度に及ぼす影響を解析するための撮影実験には、上記3種類の模型のうち、RC橋脚模型及び盛土模型を用いた。また、地震被害の識別程度に及ぼす風の影響を解析するための撮影実験には、RC橋脚の部分模型を用いた。RC橋脚の部分模型は、同一条件で2体作成し、一方は風がある場合、もう一方は風がない場合の実験に用いることとした。

6.2.2 熱赤外線カメラの原理とその特性

熱赤外線カメラは、撮影対象物が放射する熱エネルギーを熱赤外線検知素子により検出し、熱エネルギー(表面温度)の分布を白から黒の複数譜の色調で表現する装置である。可視光線の反射を映像化する可視カメラや、近赤外線の反射を映像化する赤外線カメラでは物体を肉眼で確認できる程度の光量がなければ映像が得られないのに対して、熱赤外線カメラでは辺りの明るさに関係なく物体を識別することが可能な所に特徴がある。ただし、熱赤外線カメラによって撮影される画像は、通常肉眼で観察される景色ではなく、あくまでも温度分布である。したがって、色彩の違い等により肉眼で識別できる景色であっても、温度分布が均一であれば、熱赤外線カメラでは一定濃度の画像となり対象物体の識別ができない。

季節・時間帯・撮影距離等が、地震被害の識別程度に及ぼす影響を検討するための撮影実験には、熱赤外線カメラとしてサーマルイメージシステム2000A(写真-6.4)を、また、地震被害の識別程度に及ぼす風の影響を検討するための撮影実験にはサーマルイメージシステム2000HPを、それぞれ用いた。2種類の熱赤外線カメラの主要な性能は表-6.1に示す通りであ

り、ともに8~12 μ mの波長帯の赤外線を捉えることができる。サーマルイメージシステム2000A及び2000HPは、建設省防災ヘリコプター“あおぞら”に搭載されているサーマルイメージシステム2500Bと同種のカメラであり、画角の大きさ及び瞬時視野角がわずかに異なる。ここで、画角とは図-6.1に示すように、カメラのレンズに写る視野の広さのことであり、水平視野角と垂直視野角で表現される。また、瞬時視野角とは、後述するように、解像幅に対応した視野角度のことである。サーマルイメージシステム2500Bは水平視野角が29°、垂直視野角が15°、瞬時視野角が1.87mradである。サーマルイメージシステム2500Bと比較すると、2000Aは水平視野角が2°狭くなっており、2000HPは水平視野角が2°狭く、垂直視野角が1.8°広く、瞬時視野角が0.93mrad狭くなっている。

熱赤外線カメラの画像は多くの画素によって構成されている。ここで、ひとつひとつの画素の幅を解像幅といい、これが小さいほど分解能のよい鮮明な画像となる。解像幅の大きさは、図-6.1に示すように瞬時視野角及び撮影距離を用いて、式(6.1)で算定することができる。

$$B=L\times\tan\beta$$

ここに、

Bは解像幅(m)

Lは撮影距離(m)

β は瞬時視野角(rad, サーマルイメージシステム2000Aでは1.9mrad(標準レンズ使用時), 0.47mrad(望遠レンズ使用時))

例えば、サーマルイメージシステム2000Aでは、撮影距離Lが100mの場合の解像幅Bは19mm(標準レンズ使用時)~4.7mm(望遠レンズ使用時)となる。

表-6.1 熱赤外線カメラの主要性能

主要性能	サーマルイメージシステム2000A	サーマルイメージシステム2000HP
赤外線波長帯域	8~12 μ m	
走査線本数	525本	
視野角	28.0°×15.0°	28.0°×16.8°
瞬時視野角	1.87mrad	0.94mrad
最小温度分解能	0.2°	
表示方法	白黒256階調	

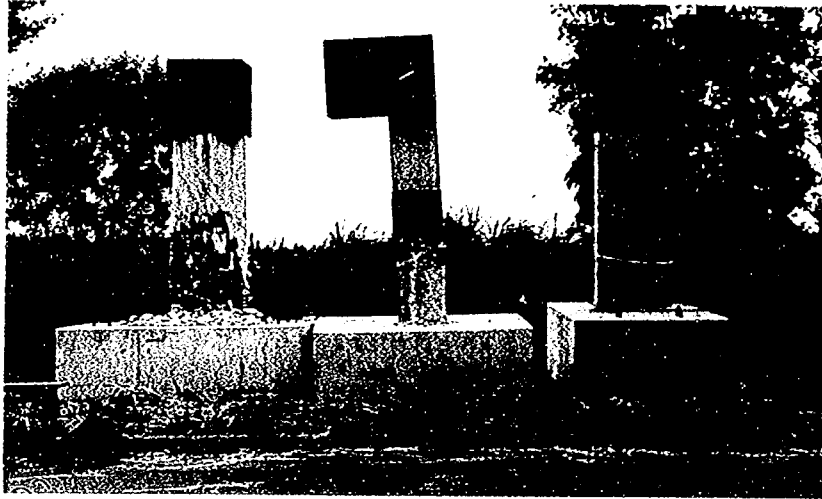


写真-6.1 撮影の対象とした RC 橋脚模型
左側から、「大被害」の中空橋脚、「大被害」の
中実橋脚、「無被害」の橋脚



写真-6.2 撮影の対象とした盛土模型
(写真中央に3本の亀裂を作成した)

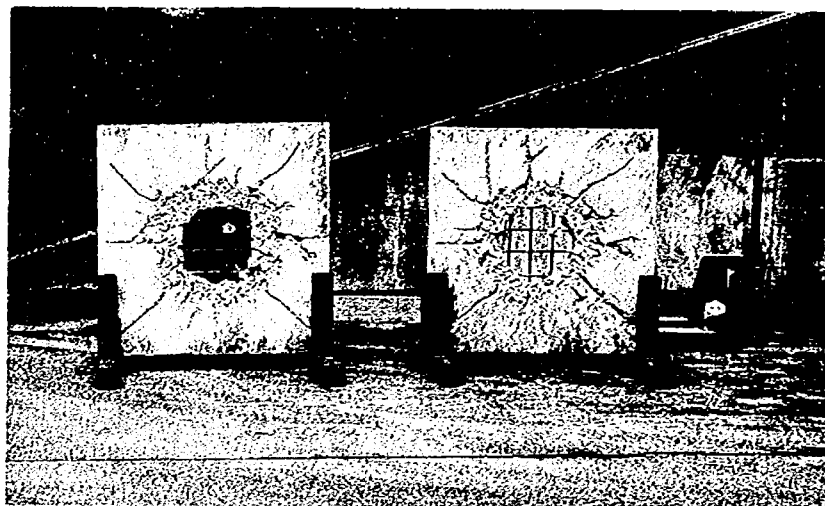


写真-6.3 撮影の対象とした RC 橋脚の部分模型



写真-6.4 サーマルイメージシステム2000A

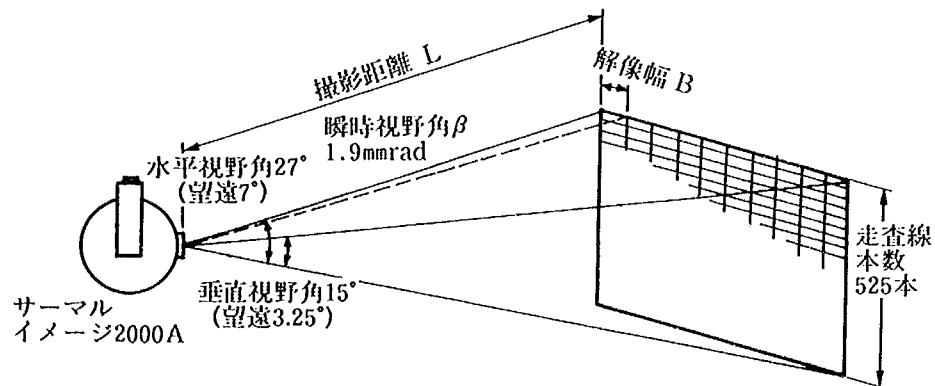


図-6.1 サーマルイメージシステム2000Aの画角、撮影幅、及び解像幅

表-6.2 撮影条件

	RC橋脚模型		盛土模型	
撮影日時	1989年 9月14日	1989年 11月30日	1989年 9月14日	1989年 11月30日
撮影時間帯 (日没直後)	19:00	18:00	21:00	19:00
(深夜)	23:00	22:00	2:00	23:00
(日の出前)	5:00	5:00	6:00	6:00
撮影距離	100, 50, 25m		32, 60m	
使用レンズ	標準レンズ, 望遠レンズ			

6.3 模擬地震被害の撮影方法及び撮影条件

6.3.1 季節・時間帯・撮影距離に着目した撮影

前述したように、熱赤外線カメラは、撮影対象物の表面温度の空間的な分布を捉えるものである。した

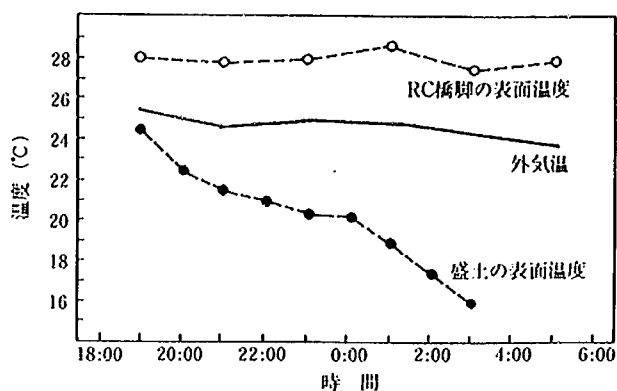
がって、物体の表面温度や外気温の分布によって画像のコントラストが変化し、把握できる被害の程度が異なってくる。また、画像上で物体を識別するための分解能は、カメラの瞬間視野角が一定であるために、撮影距離によって変化する。

このため、ここでは表-6.2に示すように、撮影日時、撮影時間帯、撮影距離、使用レンズを変化させて撮影を行い、これらの条件下でどのように被害の識別程度が変化するかを検討する。

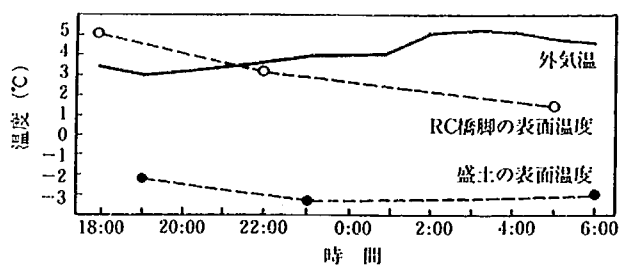
ここで、季節としては夏期（9月14日）と冬季（11月30日）の2時期を選定した。9月14日は曇り時々小雨（風速0~1m）でいわゆる蒸し暑い夏日であり、反対に11月30日は快晴（風速1~3m）の肌寒い初冬である。また、撮影時間帯としては供試体の表面温度のコントラストが最も大きい日没直後、最もコントラストが小さくなる日の出直前、及び、この中間に相当す

る深夜、の3時間帯を選定した。

デジタル温度計により測定した外気温と、放射温度計により測定した供試体の表面温度を図-6.2に示す。夏期には、外気温は25°で一日中ほぼ一定であり、RC橋脚の表面温度はこれより2°~4°高い程度で時間帯による温度変化は少ない。また、盛土の表面温度は、日没直後には外気温よりも4°低い程度であるが、日の出前には12°も低くなっている。これに対して、冬季に



(a) 夏期 (9月14日)



(b) 冬季 (11月30日)

図-6.2 橋脚表面温度、盛土表面温度、及び気温の時系列変化

は、外気温は3°~5°であるのに対して、RC橋脚の表面温度は日没直後の5°から日の出前の1°まで徐々に低下している。また、盛土の方は外気温よりも低く、表面温度は-2°にまで低下している。

熱赤外線カメラでめりはりのついた画像を得るためには、レベル (撮影の基準となる温度) 及びゲイン (撮影の温度幅) を適切に設定する必要がある。一般にレベルを上げると画像は暗くなり、ゲインを上げるとコントラストが強くなって細かな温度分布が表現できる。本調査では、撮影距離及び使用レンズに応じて、調査者がモニター上で最も被害がよく識別できるようにレベル及びゲインをマニュアル操作によって調整した。

6.3.2 風の影響に着目した撮影

模擬被害の撮影状況を写真-6.5に示す。本検討では、供試体中の鉄筋やクラックを画像上で識別できるように、撮影距離を4mとした。この場合の解像幅は0.4mmとなり、鉄筋径やクラック幅に比べて十分小さいため、これらの損傷状況を正確に表現できることになる。

撮影条件は表-6.3に示す通りである。風がある場合とない場合との違いを調べるために撮影に先だって、風にあてる供試体と風にあてない供試体とともに約4時間屋外に放置し、自然な状態における温度分布の状態を作り出すようにした。その後、供試体を実験棟内に持ち込み、ここで撮影実験を行ったが、これは屋外におけるコントロール不能な日射量や気温、風等の変化をさけるために、実験棟内で実験することとしたものである。撮影に際しては、風にあてる供試体と



写真-6.5 模擬地震被害の撮影状況

表-6.3 撮影条件

ケース	1		2	
	風にあてる (5/sec)	風にあてない	風にあてる (10m/sec)	風にあてない
風の影響 (風速)				
撮影日時	1991. 10. 2		1991. 10. 3	
撮影継続時間	2:30p.m.~5:00p.m.		2:00p.m.~4:30p.m.	

表-6.4 被害の程度による識別程度の変化

撮影対象とした橋脚模型	被害の識別程度
「大被害」の中実橋脚	橋脚全周にわたって鉄筋が露出している状況がよくわかる。特に、橋脚内部に外気と同じ色が見えることから、橋脚が中空であり、かつ、コンクリートが剥離して向う側が透過できるほどの「大被害」とであると判断できる。
「大被害」の中実橋脚	コンクリートが剥離した部分の周辺がわずかに低温となるため、被害がよくわかる。ただし、露出した鉄筋及びコンクリートのクラックまではよくわからない。鉄筋のはらみ出しや破断が識別できないため、「大被害」か「中被害」かを区別して判断することができない。
「無被害」の橋脚	橋脚全面に温度変化がなく、「無被害」とであると判断できる。

風にあてない供試体を並べて同時に撮影することとし、撮影開始後に熱赤外線画像が時系列にどのように変化するかを検討した。ここで、風速としては、ヘリコプターが飛行できる限界の風速等も考慮して5m/sec(ケース1)と10m/sec(ケース2)の2ケースとした。

6.4 熱赤外線ビデオカメラによる模擬被害の識別

6.4.1 被害度の違いに応じた識別程度の変化

1) RC 橋脚模型

RC 橋脚模型を冬季(11月30日)に、撮影時間帯:18:00、撮影距離:25m、望遠レンズ使用の条件下で撮影した赤外線画像を写真-6.6に示す。これらの条件は、後述するように、基本的に最も被害を識別しやすいものである。被害の程度による識別程度の変化を比較すると表-6.4のようになる。

RC 橋脚の被害を熱赤外線カメラで撮影する場合の特徴として、以下の点が指摘される。

- i) 撮影距離を25m程度とすると、コンクリートが剥落していることはよく識別できる。したがって、コンクリートの剥落を伴う程度の損傷が生じ

ている場合には、被害の識別は十分可能と考えられる。

- ii) コンクリートの斜めひび割れは、識別することができない。これはひび割れ幅が1mm以下と小さく、カメラの解像力がこれに伴わないためである。

- iii) 「大被害」であるか「中被害」であるかの判断のポイントは、軸方向鉄筋が座屈して単に外側にはらみ出しているだけか、これが破断に至っているかである⁹⁾。今回の解析の範囲では、撮影距離を25mとすれば鉄筋の識別はできるが、これが破断しているか、座屈しただけかの区別は明確ではない。

2) 盛土模型

同様に盛土の模擬被害を冬季(11月30日)に、撮影時間帯:19:00、撮影距離:32m、望遠レンズ使用の条件で撮影した赤外線画像を写真-6.7に示す。盛土の被害を撮影する場合の特徴として、以下の点が指摘されている。

- i) 盛土の表面に、模擬被害とは関係のない凸凹が多数存在し、当初、これが模擬被害の判定に悪い影響を与えないかと心配したが、多少の凸凹が存在しても、表面温度差が小さいために画像上には現われてこない。ただし、模擬被害として設けた亀裂のように深さをともなう凸凹については、亀裂の内部が表面に比較して高温であるため識別が可能である。

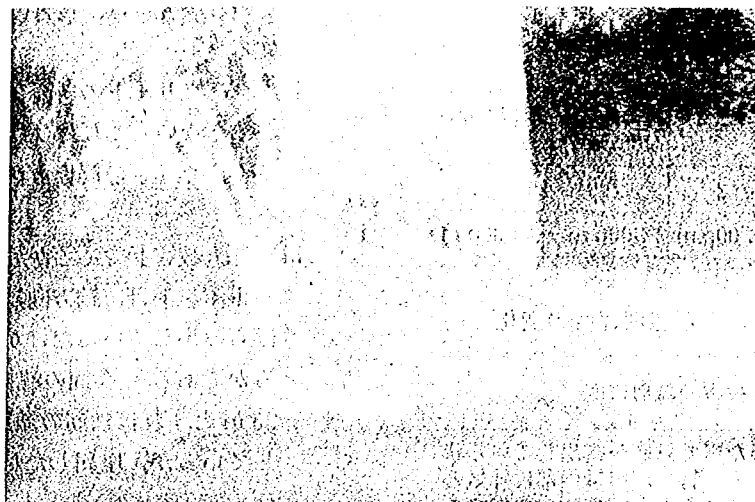
- ii) 亀裂が深いほど表面と亀裂深部の温度差が大きく、識別しやすい。したがって、被害ランクが高い被害ほど識別は容易となる。

- iii) 熱赤外線カメラで識別できるのは亀裂内部に温度差があるためである。このため、撮影は盛土に対してできるだけ垂直に行うことが必要となる。ヘリコプターによる上空からの撮影はこの点で有利に作用すると考えられる。

6.4.2 撮影季節による被害の識別程度の変化

「大被害」の中実円形橋脚について、夏期(9月14日)と冬季(11月30日)の赤外線画像を比較すると写真-6.8のようになる。ここで、比較の対象としたのは、撮影時間がともに日没直後(夏期:19:00、冬季:18:00)で、望遠レンズを使用して、25mの距離から撮影した場合である。写真の特徴をまとめた結果が表-6.5であるが、これより撮影の季節が被害の識別程度に及ぼす影響として以下の点が指摘される。

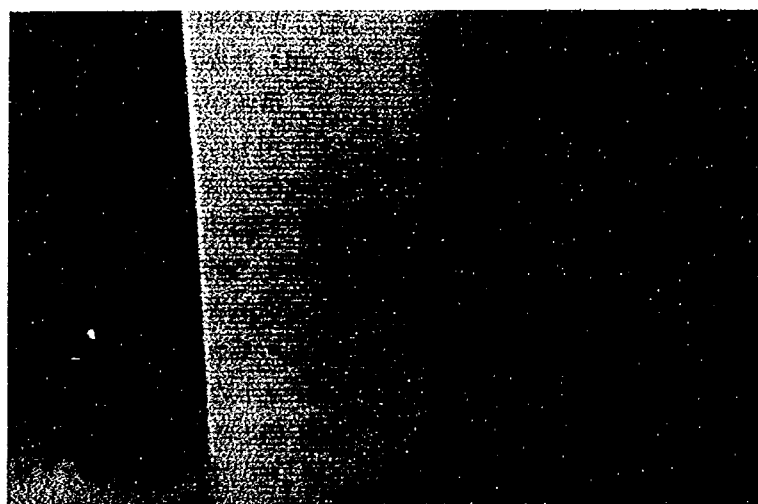
- i) 冬季の方が夏期よりも被害状況をよく識別する



(a) 「大被害」の中空橋脚



(b) 「大被害」の中空橋脚



(c) 「無被害」の橋脚

写真-6.6 被害の程度による識別程度の変化 (RC 橋脚模型)
(11月30日, 18:00, 撮影距離25m, 望遠レンズ使用)

ことができる。一般には、撮影対象物の表面温度と外気温との差が大きいほど被害の識別程度は向上するが、両者の温度差を比較すると、夏期には 3.3° 、冬季には 2.0° である。したがって、撮影対象物と外気温の温度差だけが被害の識別程度を左右するわけではなく、対象物の表面温度の場所的な変化に寄与する要因、例えば、それぞれの場所における時間的な温度変化の違い等が影響すると考えられる。

ii) 橋脚の被害が識別できるのは、コンクリートの剥落した部分と剥落しない部分との境界付近がその他のコンクリート表面より低温となるためである。剥落部の境界が周辺よりも低温となる理由は明らかでないが、コンクリートの剥落にともなう凸凹や剥落面の傾きから太陽光線の受光量が異なったり、風等により熱放射の程度が異なるためかと考えられる。

6.4.3 撮影距離による被害の識別程度の変化

「大被害」の中空円形橋脚に対して、撮影距離を100 m, 50 m, 25 mと変化した赤外線画像から、解像幅と被害の識別程度を比較すると写真-6.9のようになる。ここで、撮影は冬季(11月30日)に行い、撮影時間帯は18:00の場合を示している。表-6.6は写真-6.9の比較をまとめたものであるが、撮影距離が被害の識別程度に及ぼす影響としては以下の点が指摘される。

表-6.5 撮影季節による被害の識別程度の変化
(「大被害」の中空橋脚)

撮影の対象	被害の識別程度	
	9月14日の撮影	11月30日の撮影
「大被害」の中空橋脚	コンクリートが剥落した部分全体が一様に低温となっている。鉄筋は被害の周辺部で一部わかるが、被害中央部ではわからない。	鉄筋の露出が被害の全体にわたってよくわかる。向う側が透過できる状態であることもわかる。

表-6.6 解像幅による被害の識別程度の変化

解像幅(m)	被害の識別程度
0.012	コンクリートの剥落や鉄筋の露出まで詳細にわかる。
0.047	コンクリートの剥落がわかる。
0.094	何らかの異常が生じていることがわかる。
0.187	被害が生じているか否かはほとんどわからない。

i) 被害が識別できるか否かはカメラの解像幅によって大きく異なる。撮影対象構造物に近づくほど当然ながら解像幅は向上するため、より細かな被害の識別が可能となる。

ii) 同一距離からの撮影で解像幅を向上させるためには、望遠レンズの使用が有効である。ただし、熱赤外線画像はカメラと撮影対象物との間の大気の影響を少なからず受けるため、望遠レンズを用いても必ずしも解像幅を向上させただけの被害の識別能が向上するとは限らない。

iii) 実際の調査ではヘリコプターの飛行高度に下限がある(例えば市街地では300 m)ため、高解像度の熱赤外線カメラと高倍率の望遠レンズを組み合わせる必要がある。

6.4.4 撮影時間帯による被害の識別程度の変化

「大被害」の中空円形橋脚を対象に、冬季(11月30日)の撮影で、撮影時間を日没直後(18:00)、深夜(22:00)、日の出前(5:00)と変化した熱赤外線画像を写真-6.10に示す。ここで、撮影距離は25 mとし、望遠レンズを使用している。撮影時の外気温は 3.0° (日没直後)、 3.8° (深夜)、 4.6° (日の出前)であり、また、橋脚の表面温度は 5.0° (日没直後)、 3.2° (深夜)、 1.7° (日の出前)である。撮影時間帯が被害の識別程度に及ぼす影響として以下の点が指摘される。

i) 撮影時間帯が日没直後から日の出前に移るにつれて、被害の識別は徐々に困難になる。これは、時間の経過にともない、被害部と被害を受けていない一般の橋脚表面の温度差が小さくなるとともに、被害部の中でも大きな被害を受けた箇所とそうでない箇所との温度差が小さくなるためである。

ii) 時間の経過につれて被害部分とその周辺部分との温度差が小さくなるため、被害部をはっきり識別するためにカメラのゲインを上げてカメラが感知する撮影温度の幅(以下、撮影温度幅と呼ぶ)を小さくする必要がある。日没直後に 3.0° が最適であった撮影温度幅は、日の出前には 0.6° となった。

iii) カメラのゲインを上げて撮影温度幅を小さくすれば、被害部の中では細かな被害の状況まで識別できるようになるが、他方では、被害を受けていない一般部のわずかな温度差も抽出してしまう。ヘリコプターを用いた実際の調査では、調査対象構造物周辺の各種の光源等により、ゲインを上げて特定箇所に集中しにくいことが考えられる。

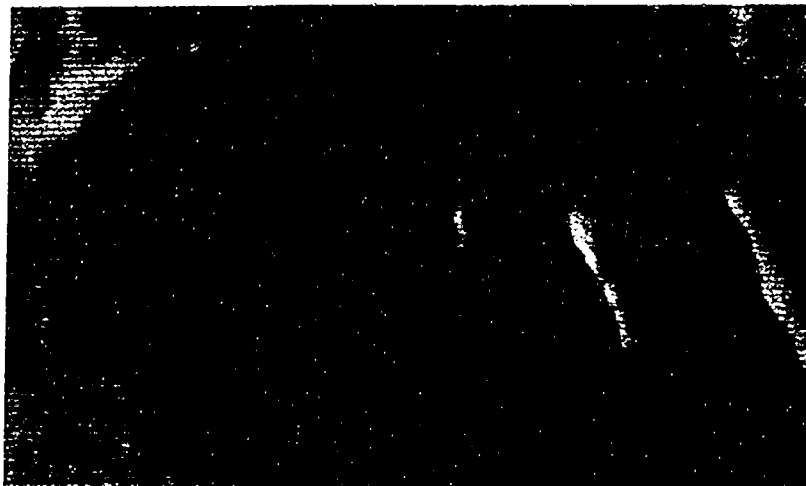
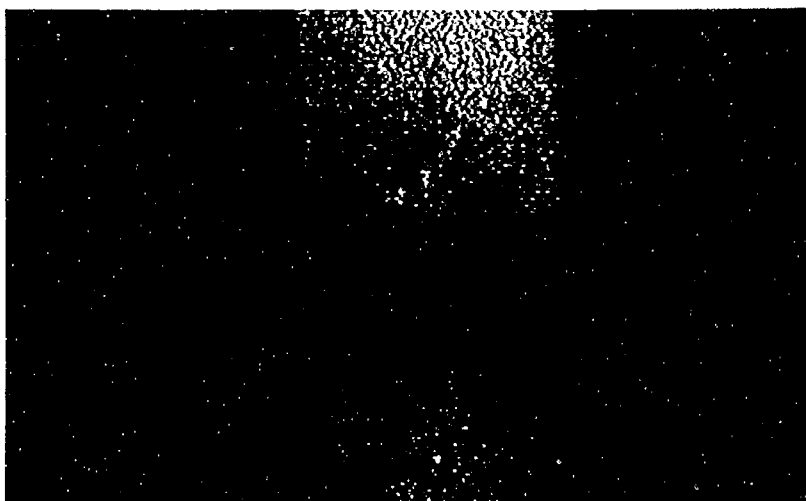


写真-6.7 被害の程度による識別程度の変化 (盛土模型)
(11月30日, 撮影距離32m, 望遠レンズ使用)



(a) 夏期 (撮影時間帯19:00)

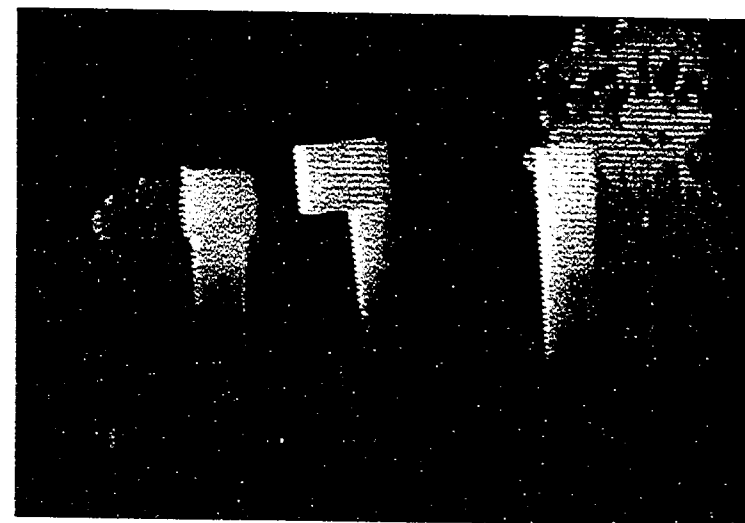


(b) 冬期 (撮影時間帯18:00)

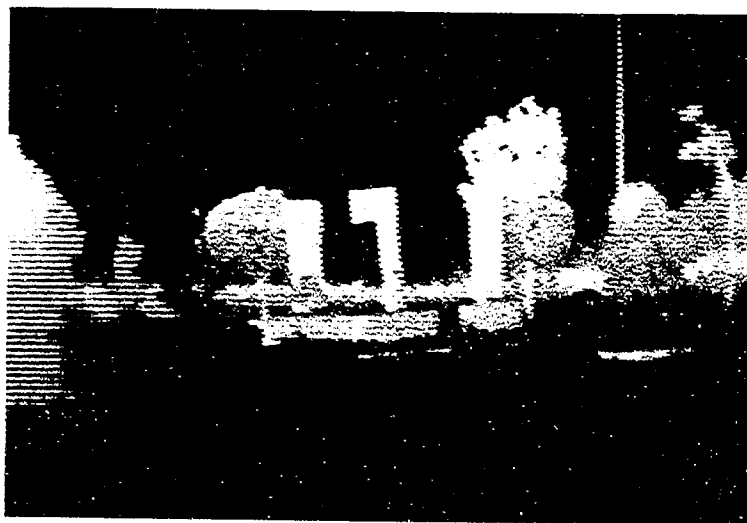
写真-6.8 撮影季節による被害の識別程度の変化
(「大被害」の中空橋脚, 撮影距離25m, 望遠レンズ使用)



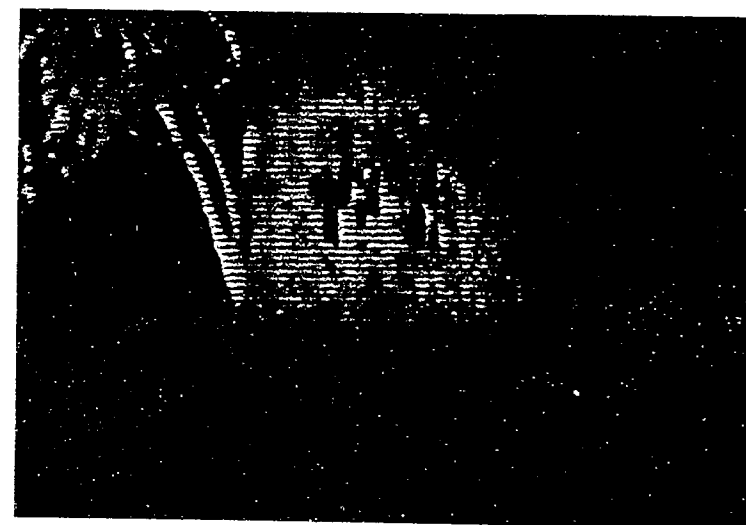
(a) 撮影距離100m (標準レンズ使用, 解像幅0.187m)



(c) 撮影距離25m (標準レンズ使用, 解像幅0.047m)

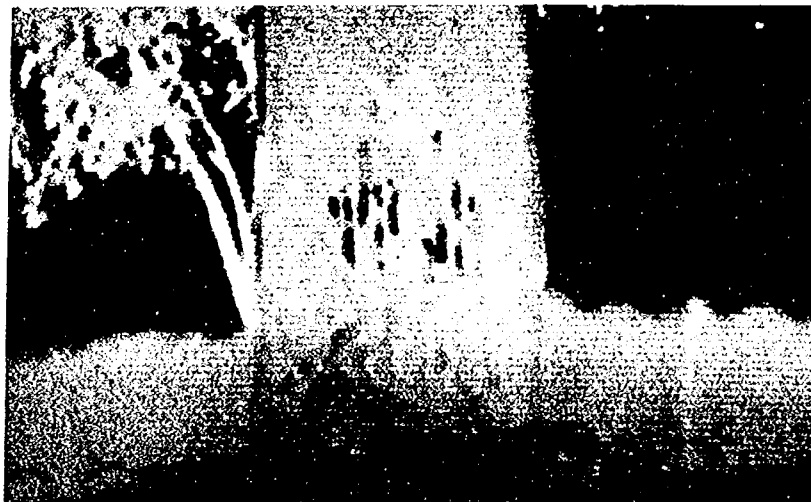


(b) 撮影距離50m (標準レンズ使用, 解像幅0.094m)



(d) 撮影距離25m (望遠レンズ使用, 解像幅0.012m)

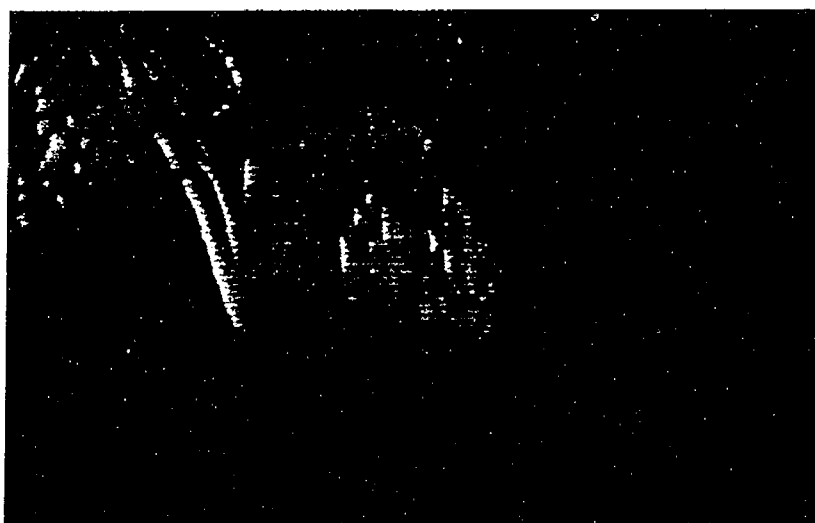
写真-6.9 撮影距離による被害の識別程度の変化 (11月30日, 18:00)



(a) 18:00 (撮影温度幅2.0~5.0℃)



(b) 22:00 (撮影温度幅1.0℃~2.8℃)



(c) 5:00 (撮影温度幅1.8~2.6℃)

写真-6.10 撮影時間帯による被害の識別程度の変化

(11月30日, 「大被害」の中空橋脚, 撮影距離25m, 望遠レンズ使用)

6.5 被害の識別程度に及ぼす風の影響

6.5.1 風速を変化させた場合の模擬被害の識別程度

写真—6.11 及び写真—6.12 は、それぞれ風をあてない場合と、風速 5 m/sec の風をあてた場合 (ケース 1) の熱赤外線画像を示したものである。写真にとるとやや見えづらくなるが、実際にブラウン管を通して観察できる画像はもっと鮮明である。

まず、写真—6.11 に示した風がない場合であるが、この場合には撮影開始直後では、コンクリートのクラックや剥離した範囲があることがよくわかる。また、コンクリートが剥落している様子も見ることができる。その後時間が経過するにしたがって、次第にコンクリートのクラックや剥離等の微妙な損傷は識別しにくくなるが、コンクリートが剥落して鉄筋が露出している点ははっきりわかる。

一方、風にあてた場合には、送風 (撮影) 開始直後には風がない場合と同様であり、コンクリートの剥離やクラック、コンクリートの剥落をはっきり識別することができる。送風開始後約 5 分になると、被害の様子をさらによく識別できるようになり、この時にはコンクリートの小さなクラックまではっきり識別することができる。送風後約 40 分たった段階でもまだ、コンクリートのクラックを識別することができる。その後さらに時間が経過すると、上述した風がない場合と同程度の識別度となっていく。送風後約 120 分になると、風がない場合より多少被害の識別がしにくいが、コンクリートの剥落や鉄筋の露出はよくわかる。以上のように、風にあてた場合には、風が吹き始めてからある一定時間たった段階で、最もシャープに被害の識別ができるようになるという点が興味深い。

熱赤外線画像からみた被災の識別度は、以上の通りであるが、実験棟内の室温及び供試体の表面温度がどのように変化したかをデジタル温度計、放射温度計によって測定した結果が図—6.3 である。これによれば、当然ながら風がある場合には、風がない場合に比べて供試体全体が早く冷却され、この傾向は風速が大きいほど著しい。上述したように風にあてた場合には、風が吹き始めてからある一定時間が経過した方が、被害状況を細かく識別できるが、これは損傷を受けて表面に凹凸ができていない箇所の方が、損傷のない箇所に比べて早く冷却される結果、両者の温度差が大きくなるためと考えられる。

このため、供試体の中で損傷等を生じている部分とそうでない部分の温度差に着目し、これが撮影開始か

らの時間に応じてどのように変化したかを整理することとした。ここで、供試体の中で着目したのは、図—6.4 に示すように、供試体のコーナーで損傷を受けていない箇所 (以下、一般部と呼ぶ)、コンクリートが剥離している箇所 (以下、コンクリート剥離部と呼ぶ)、クラックの生じている箇所 (以下、クラック部と呼ぶ) 及び鉄筋の 4ヶ所である。ここで、クラック部とはクラックの中ではなく、クラックを生じている領域におけるコンクリート表面のことである。これらの各部位における表面温度より、一般部に対する温度差を次のように定義する。

$$\Delta T_{cs}(t) = T_o(t) - T_{cs}(t) \quad (6.2)$$

$$\Delta T_c(t) = T_o(t) - T_c(t) \quad (6.3)$$

$$\Delta T_s(t) = T_o(t) - T_s(t) \quad (6.4)$$

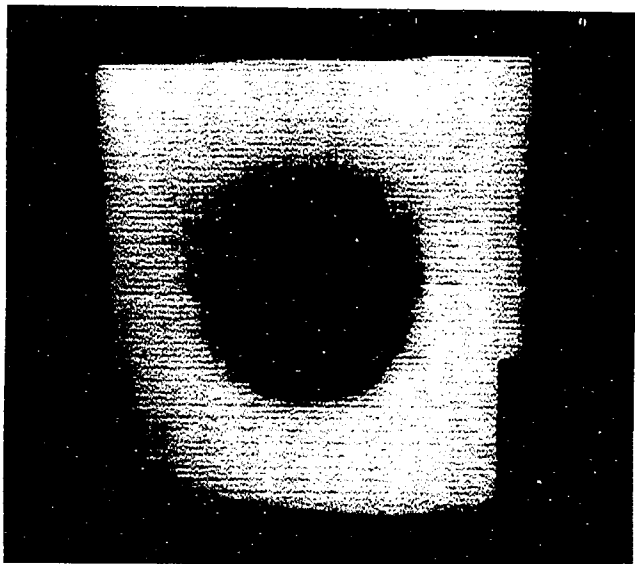
ここで、 $T_o(t)$: 一般部の表面温度、 $T_{cs}(t)$: コンクリート剥離部の表面温度、 $T_c(t)$: クラック部の表面温度、 $T_s(t)$: 鉄筋の表面温度、 t : 撮影 (送風) 開始後の時間である。

式 (6.2) によるコンクリート剥離部と一般部の温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ をまとめた結果が図—6.5 である。これによれば、コンクリート剥離部の表面温度は一般部の表面温度よりも低い。温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ は、風速が大きいほど大きく、また風が吹かなければ小さい。重要な点は、温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ が撮影開始後ある時間経過した後に最大となり、これ以後は単純に減少する点である。これが写真—6.12 で示した撮影開始後ある一定時間経過した方が被害の識別がシャープにできる理由と考えられる。

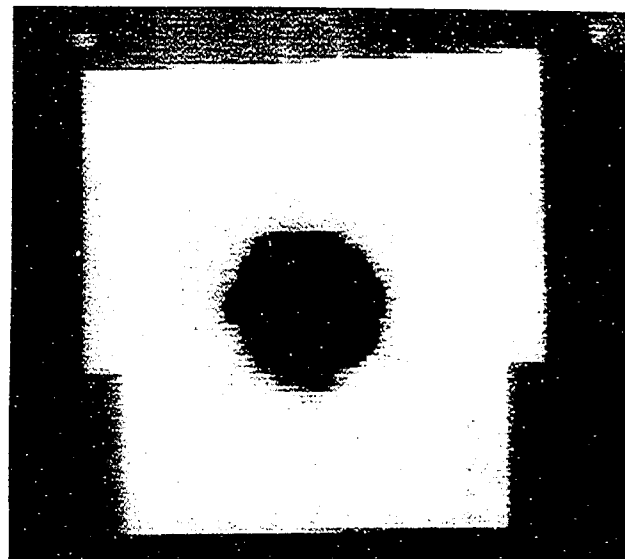
撮影開始後温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ が最大となるまでの時間は、風速が 10 m/sec の場合には約 2 分、風速が 5 m/sec の場合には約 4 分である。これは、風速が大きい程、コンクリートが剥離し表面が凹凸になっている箇所における表面温度の低下が激しいためである。

興味深いのは、風をあてない場合にも撮影開始後約 5 分で、わずかではあるが温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ が最大となる点である。これは、屋外で太陽光にあてた供試体を実験棟内に持ち込んで実験したため、一般部の表面温度の低下との関係でこのようになったものと考えられる。

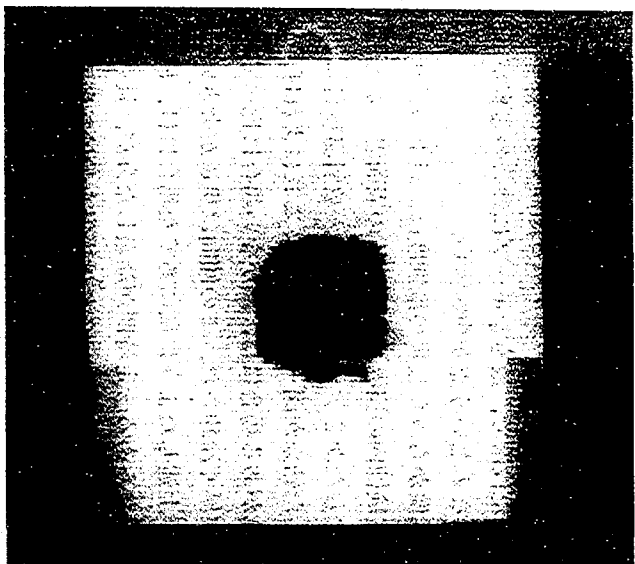
次に、風速が 5 m/sec の場合に着目し、コンクリート剥離部の温度差 $\Delta T_{cs}(t)$ 、クラック部の温度差 $\Delta T_c(t)$ 、鉄筋部の温度差 $\Delta T_s(t)$ を比較した結果が図—6.6 である。いずれの箇所においても、一般部との温度差は、鉄筋部、コンクリート剥離部、クラック部の順で大きくなっている。



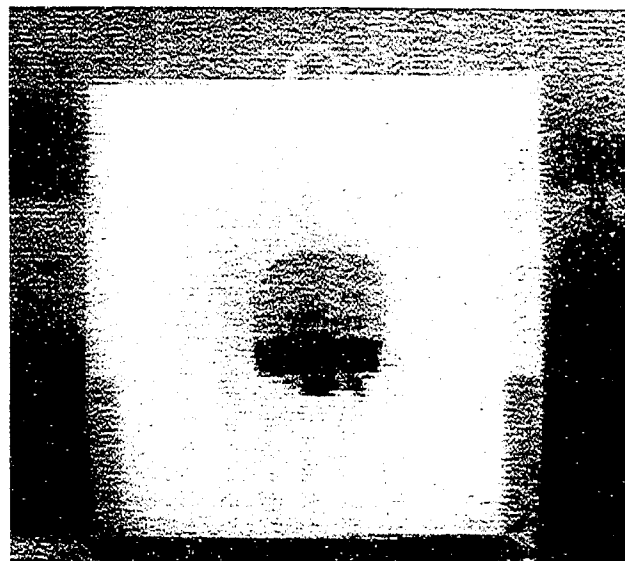
(a) 撮影開始直後



(b) 約5分後

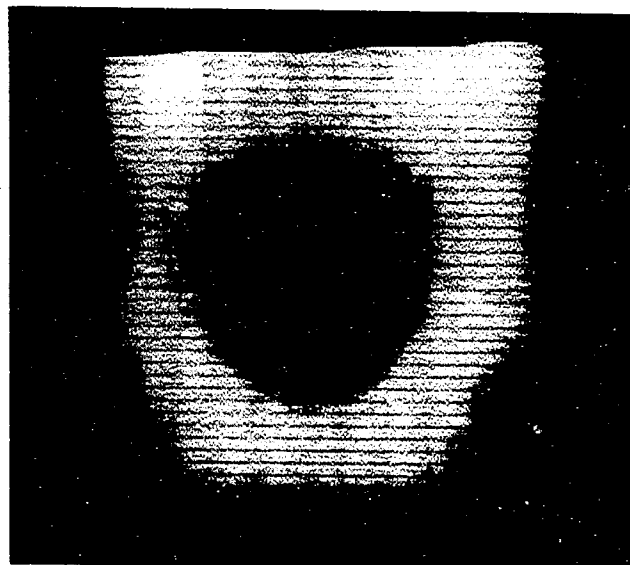


(c) 約40分後



(d) 約120分後

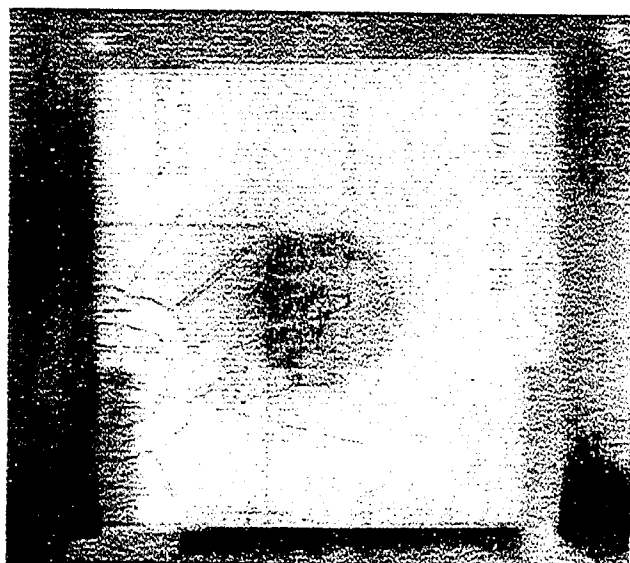
写真-6.11 風にあてない場合の熱赤外線画像



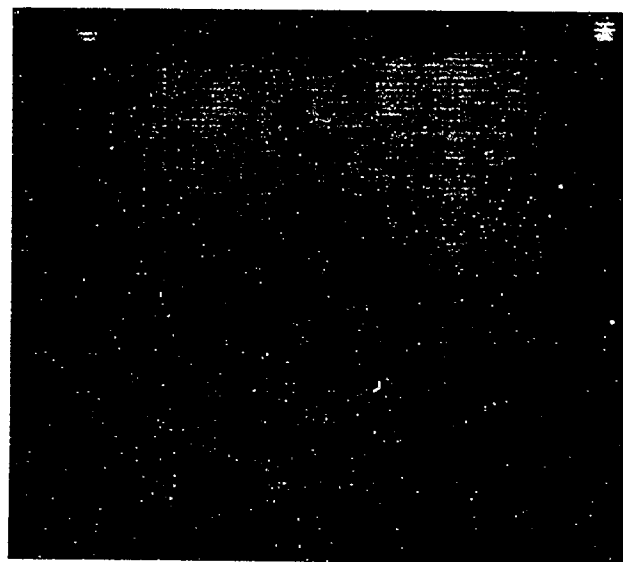
(a) 撮影開始直後



(b) 約5分後



(c) 約40分後



(d) 約120分後

写真-6.12 風をあてた場合（風速 5 m/s）の熱赤外線画像

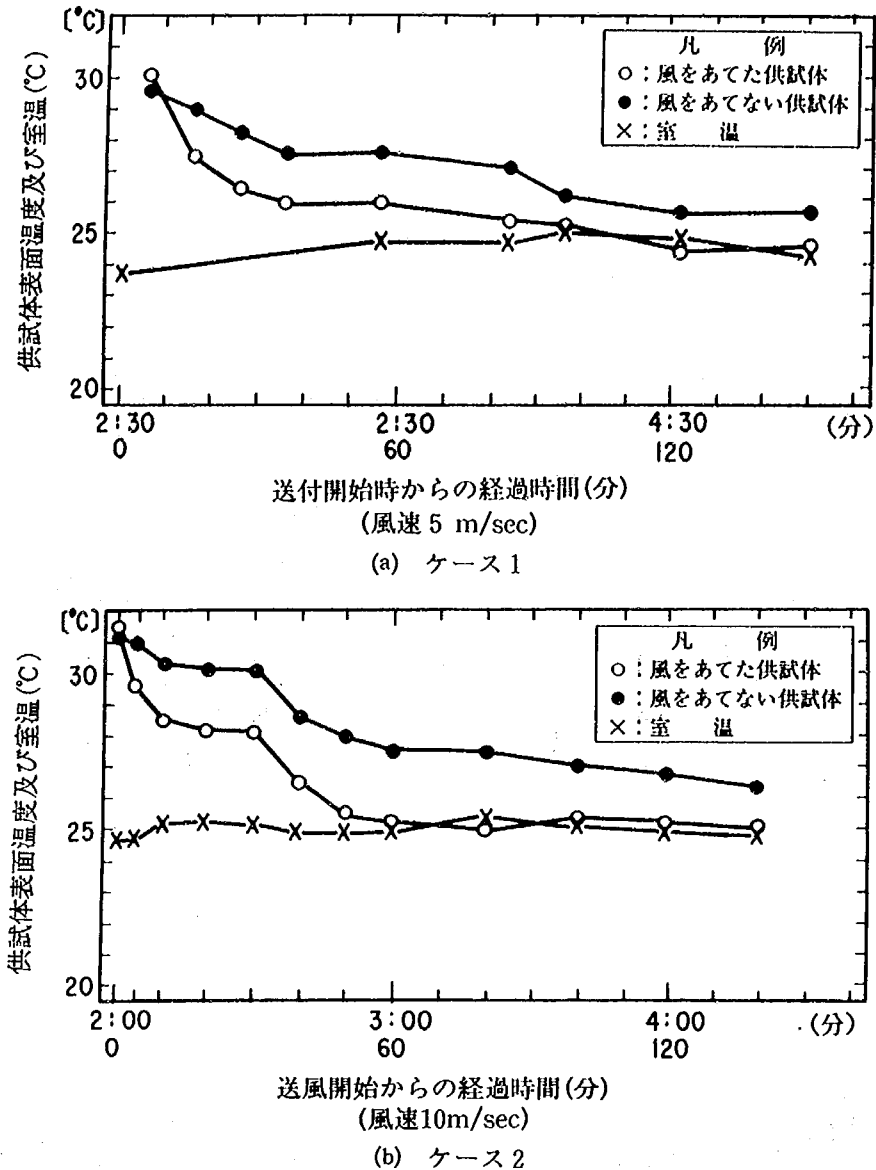


図-6.3 供試体の表面温度及び室温の時間的な変化

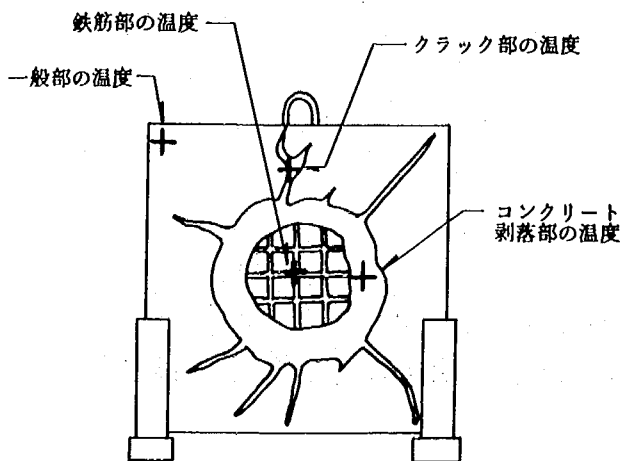


図-6.4 温度差の計測位置

6.5.2 被害を識別できる最小の温度差

熱赤外線画像による地震被害の識別程度は、被害部位と一般部の温度差に支配されることは6.5.1により明らかにされた。ここでは、地震被害の識別程度に及ぼす風の影響を解析するために行った撮影実験の結果を用いて、どのくらいの温度差があれば地震被害の識別が可能であるかを検討してみよう。

熱赤外線画像から観察される被害の識別程度は、表-6.7に示すように4ランクで評価することとした。人間の目を見た判断であるので、多少ファジーな部分があるが、ケース1及びケース2に対して送風開始後どのように被害の識別度が変化していったかを整理した結果が表-6.8である。これと式(6.2)～式(6.4)による一般部に対する温度差 $\Delta T_{cs}(t)$, $\Delta T_c(t)$, $\Delta T_s(t)$

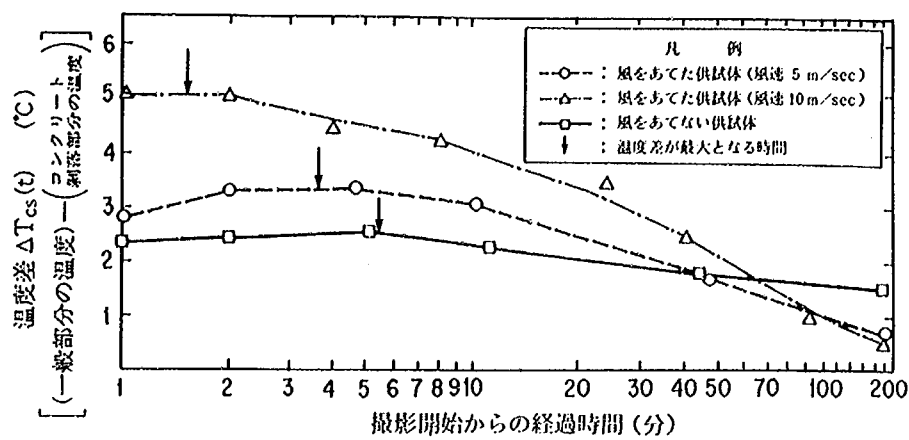
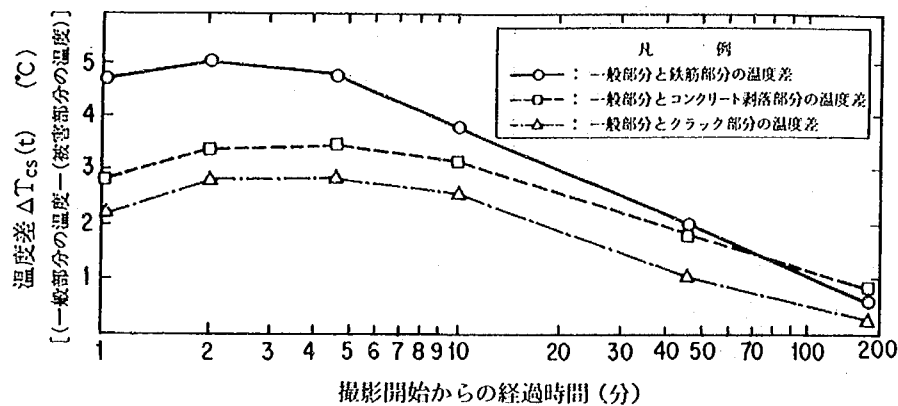
図-6.5 コンクリート剥落部と一般部の温度差 ΔT_{cs} の時間変化図-6.6 被害の種別ごとに見た温度差 $\Delta T(t)$ の変化(風速5m/s)

表-6.7 熱赤外線画像による被災度の識別度の定義

ランク	識 別 度	記号
1	非常によく識別できる。	◎
2	カメラのゲイン及びレベルを適切に設定すれば識別できる。	○
3	カメラのゲイン及びレベルを調節しても識別しにくい。	△
4	全く識別できない。	×

表-6.8 送風開始からの時間経過に伴う被害の識別程度の変化

ケース	送風開始からの時間(分)	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	70分	80分	90分	100分	110分	120分
ケース 1 (風速 5m/s)	鉄筋部	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	△	△	△	×
	コンクリートの剥落部	○	◎	○	○	○	○	○	○	△	×	×	×	×
	クラック部	○	◎	○	○	△	△	△	△	×	×	×	×	×
ケース 2 (風速 10m/s)	鉄筋部	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	コンクリートの剥落部	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	×	×	×
	クラック部	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×

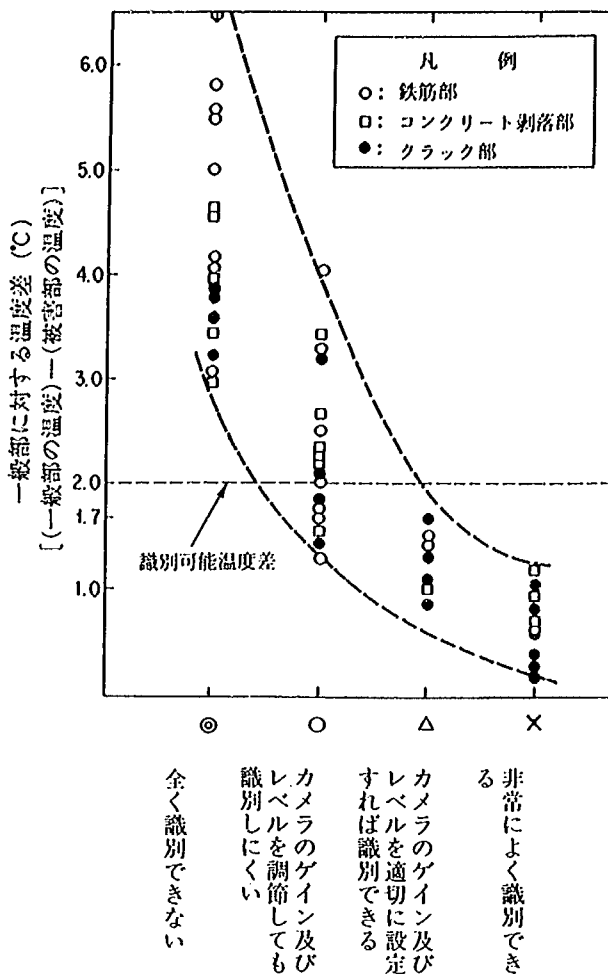


図-6.7 被害の識別程度と温度差の関係

の関係を求めた結果が図-6.7である。「非常によく被害を識別できる」状況と「レベルやゲインを適切に設定すれば被害を識別できる」状況が熱赤外線画像の実用的な適用範囲とすれば、RC橋脚の被害を熱赤外線画像上で識別するためには 2.0°C 程度の温度差が必要とされる。今回の検討は実験棟内という周辺条件のよい位置での測定であるため、 2.0°C という温度差は、最小限必要な値と考えられるが、これだけの温度差があれば震災によるRC橋脚の被害状況の測定に熱赤外線画像を使用できると言えよう。

6.6 まとめ

被害の程度、撮影季節、撮影時間帯、撮影距離、風の有無等諸条件が変化する場合は熱赤外線カメラによる震災情報の収集能力を、模擬地震被害を設けたRC橋脚模型及び盛土模型を対象とした撮影実験により検討した。検討結果をまとめると次のようになる。

1) RC橋脚のコンクリートの剥落や鉄筋の露出、

盛土の亀裂は、いずれも適切な距離からの撮影であれば十分に被害として識別が可能である。被害の程度としては、その損傷部所の広がり、損傷度がともに大きい方がより識別は容易であり、こういう意味では今回の調査は条件の厳しい場合に相当している。

2) RC橋脚の被害が「大被害」か「中被害」かは、鉄筋の面外座屈に伴うはらみ出しが生じているだけであるか、これが破断しているかにより判断しなければならない。鉄筋のはらみ出しが生じているか、破断に至っているかを識別するためには、解像幅が 0.012 m 以下となるように被写体に接近するか、あるいは、望遠レンズを使用しなければならない。

3) 被害の識別程度を大きく左右する撮影条件として、撮影幅及び解像幅が挙げられる。撮影幅は撮影対象物に対して大きすぎてはならない。また、解像幅は調査しようとする被害のうち最も小さい要素（コンクリートのクラック、鉄筋径等）より小さくなければならない。RC橋脚の被害を鉄筋の露出までを含めて把握するためには、撮影幅を 3.1 m 以上、解像幅を 0.012 m 以下とする必要がある。

4) 橋脚及び盛土の被害はともに、日没から日の出前に移るにつれて識別しにくくなる。これは時間の経過に伴い、被害部分の中では被害の大きい部分と小さい部分の温度差が、また、被害部分と被害のない一般の構造物表面の温度差が、それぞれ小さくなるためである。したがって、撮影時間帯に合わせてカメラのレベル及びゲインを適切に調整することが重要である。

5) RC橋脚では、被害部分と一般の構造物表面の温度差が最低限 2.0°C 以上であれば、被害を識別することができる。

6) 風がある場合には風がない場合に比較して、構造物全体の温度が早く低下するため、基本的には被害の識別がしにくくなる。この傾向は風速が大きいほど著しい。ただし、被害の識別程度は、風があたり始めてからの時間に単調に比例して悪くなるわけではなく、風があたり始めてからある一定の時間が経過した段階で、被害の識別が最もしやすくなる時間が存在する。

第7章 斜め写真及びビデオ映像を用いた震災状況の簡易測量法

7.1 まえがき

大規模かつ広域的な震災が都市域に生じた場合に、緊急措置及び応急復旧の方針を立案する上でまず必要とされるのは、施設被害の概略の形状や寸法諸元を示す縦横断面図である。地形図等の縦横断面図の作成は、一般に航空写真を用いた写真測量により行われるが、写真測量には多くの時間が必要とされるため、迅速な調査が要求される震災直後の調査には、これをそのまま適用することはできない。このため、施設被害のごく概略を、防災ヘリコプター等により撮影された斜め写真やビデオ映像等から迅速性に主眼をおいて処理できれば、震災対策上有効と考えられる。

本章では、従来の写真測量の作業工程を大幅に省略した簡易測量方法を開発し、その適用性を検討した結果を示す。

7.2 従来の写真測量

1) 写真測量の基本的な考え方¹⁹⁾

写真測量は、写真として撮影された2次元の幾何形状から、被写体の3次元形状を求めるための技術である。すなわち、被写体の3次元形状を表わすためには

正射投影により被写体を表現した像が必要とされるが、写真で表現される被写体は中心投影による像である。このため、写真測量とは図-7.1に示すように、中心投影による像を正射投影による像に変換する技術とすることができる¹⁹⁾。

一般に、単独の写真からは奥行き方向の形状を測定することができないため、写真測量に際しては、異なる場所から被写体が重複するように撮影された2枚1組の写真(以下、ステレオペアと呼ぶ)が必要である。2枚の写真をそれぞれが撮影された時点でのカメラの位置及び傾き(撮影方向)を再現する位置にセットし、投影中心に相当する位置から光をあてれば、被写体の3次元形状に相似な光学的な立体像が得られることになる。ここに、ステレオペアが撮影された時点のカメラの位置及び傾きは、あらかじめ撮影範囲内に設置しておいた複数個の標定点(座標が既知である点)の写真上の座標(以下、写真座標と呼ぶ)から、間接的に算定することができる。

光学的な立体像の形状を測定するためには、ステレオペアの対応する光線が交わる点を順次求めてゆけばよい。これには、写真測量図化機を用いる方法と、数学的な計算により求める方法がある。現在では一般に、数学的に被写体の3次元座標を測定するための計算機と、写真測量図化機を組み合わせた解析図化機と呼ばれる装置が用いられている。

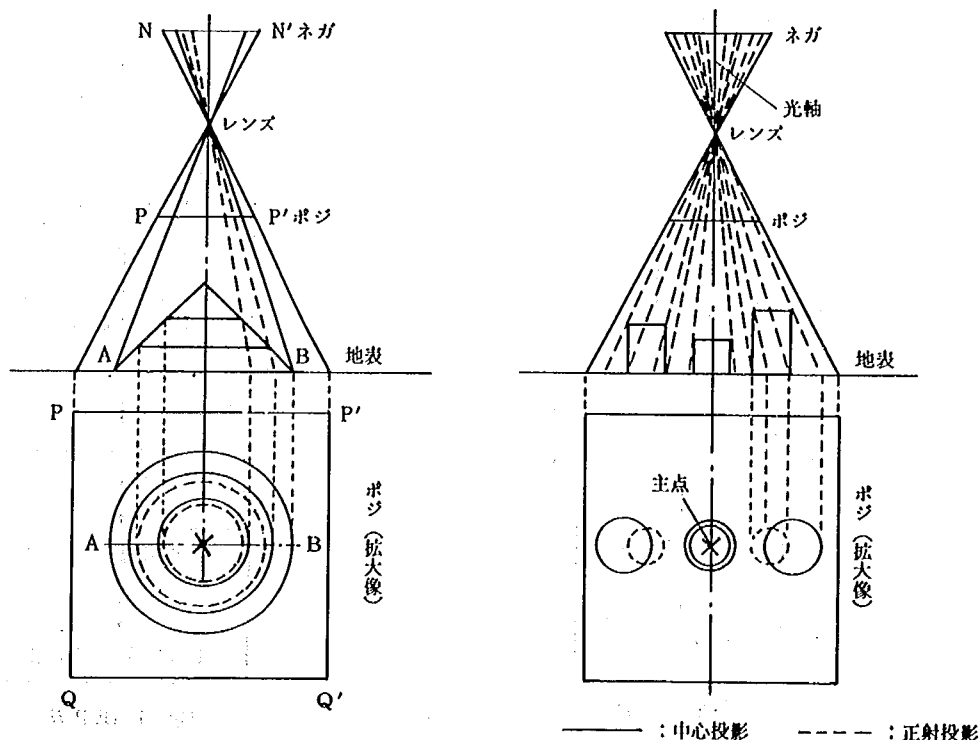


図-7.1 中心投影と正射投影の違い

2) 写真測量の流れ

ステレオペアの撮影から被写体の図化までの作業工程を示すと、図-7.2 (a) の通りであり、おおよそ次のようになる。

a) 標定点の設置

ステレオペアが撮影された時点のカメラの状態を解析的に算定するために、被写体中の対地座標の算定が可能な標定点をあらかじめ設置しておく。ここに、カメラの状態として算定すべき項目は次の通りである。

- i) 投影中心の対地座標 (X_i, Y_i, Z_i) ($i=1, 2$)
- ii) 座標軸まわりのカメラの回転角 ($\omega_i, \phi_i, \kappa_i$) ($i=1, 2$)

ここに、 i は 2 枚の写真がそれぞれ撮影された時点のカメラの状態を示している。上記 12 個の未知数を算定するために、一般には、ステレオペアの重複する範囲内に 6 点以上の標定点を設定しなければならない。一般の写真測量では、解析精度を高める目的から、12 個程度の標定点を設定する例が多い。ただし、対地座標がわかっている基準点（三角点等）の配置は一般にはそれほど密ではないため、三角点等を用いた空中三角測量によって、対地座標を算定するのに必要なだけ標定点を増設しておく必要がある。標定点としては、一般に木製で $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ 程度の印が用いられる。

b) ステレオペアの撮影

各々の写真間で被写体の一部を重複するように撮影する。重複させる範囲、すなわち重複率は、一般に、60%程度がよいとされている。また、撮影には、レンズの歪及びフィルムの湾曲に対する補正が行えるように画面中心、画面距離、レンズ収差がわかっている高精度の写真測量用カメラが用いられる。一般のカメラを写真測量に用いる場合には、これらの特性をあらかじめ測定しておく必要がある。

c) 写真処理

ネガの現像、及び、測量作業を行うためのダイヤポジの作成を行う。ネガの大きさが $24\text{ cm} \times 24\text{ cm}$ と大きいため、航空写真を処理できる施設は、現状では全国で数箇所（特に、カラーフィルムの場合は全国で 3 箇所）程度に限られている。

d) 標定点測量

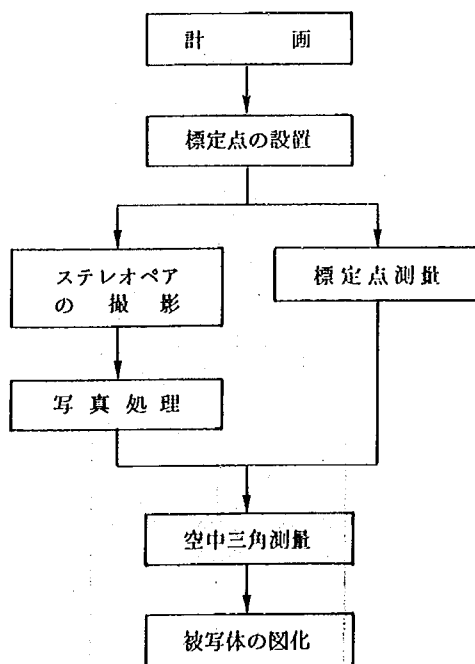
a) で設置した標定点の対地座標を、三角点等の対地座標をもとに現地で測量する。

e) 空中三角測量

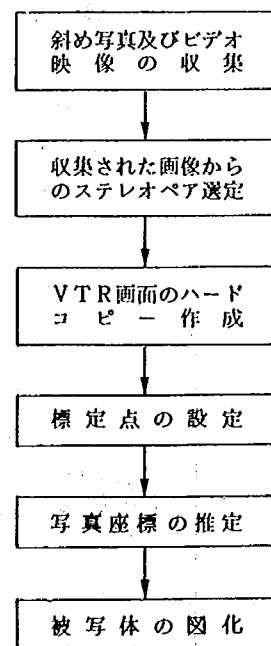
a) で設置した標定点の写真上での座標と、d) で測定した標定点の対地座標から、ステレオペアを撮影した時点のカメラの状態（投影中心の対地座標、傾き）を算定する。

f) 被写体の図化

ステレオペアをカメラの状態を再現するように解



(a) 従来の写真測量



(b) PSEP 法

図-7.2 測量の流れ

析図化機にセットした後、前述した方法により、被写体中の任意点の対地座標の算定、描画の作成、等高線の作成等を行う。

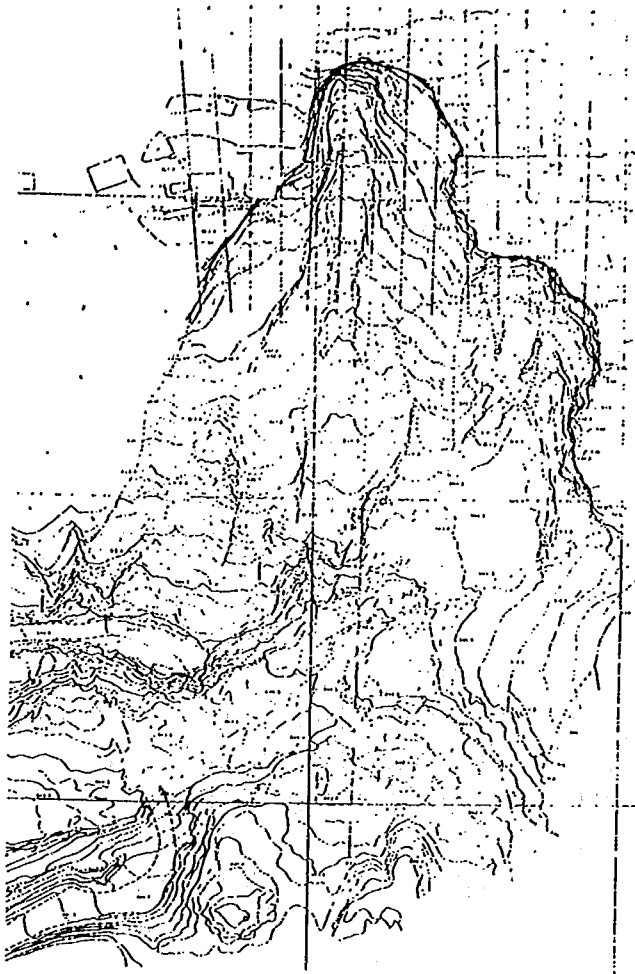


図-7.3 斜め写真から図化した平面図

3) 写真測量に要する時間

図-7.3 及び写真-7.1 は昭和 59 年長野県西部地震による王滝村松越地区の大規模斜面崩壊¹⁹⁾を示したものである。このような縮尺 1/500 の斜面崩壊の等高線図を、従来の写真測量より作成するためには、概ね表-7.1 に示す時間が必要とされる。ただし、これは各工程に要する時間の総和で、ある一つの工程から次の工程に移るまでに要する時間は含まれていない。

表-7.1 によれば、全体の中で最も時間を必要とするのは標定点測量で約 3 日(日中のみ)、次が被写体の図化で約 8 時間となっている。ステレオペアの撮影・写真処理と標定点測量は並行して作業可能であるため、全体の所要時間は約 3 日と 15 時間となる。

表-7.1 従来の写真測量に要する時間
(ステレオペアを 5 組撮影し、この中の 1 組について図化を行う場合)

工 程	所要時間	備 考
①標定点の設置	約 1 時間	ステレオペア 5 組×6 点分
②ステレオペアの撮影*	約 6 時間	ステレオペア 5 組分
③写真処理* フィルム輸送 現象	約 4 時間 約 2 時間 約 2 時間	東京都内
④標定点測量**	約 3 日	ステレオペア 5 組×6 点分
⑤空中三角測量	約 6 時間	ステレオペア 5 組×6 点分
⑥被写体の図化 主要施設の描写 等高線の記入 土量等の計測	約 8 時間 約 1 時間 約 6 時間 約 1 時間	
合 計 ¹⁾	約 3 日 15 時間	

注 1) 表中* 及び** の工程は並行作業で行なう。

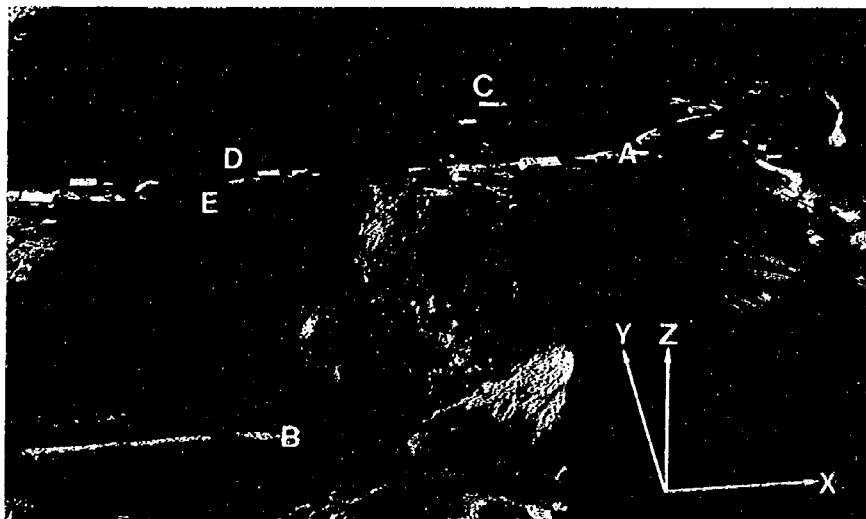


写真-7.1 長野県王滝村松越地区の斜面崩壊 (斜め写真)

7.3 斜め写真及びビデオ映像を用いた 簡易測量法の提案

震災直後に必要な概略の被災状況を把握することを目的として開発した簡易測量方法の基本方針は、以下の通りである。

- a) 測量に用いるステレオペアは、震災直後に緊急飛行もしくは調査飛行により収集される斜め写真及びビデオ画像の中から選定する。
- b) 標定点の設置や標定点測量など、現在での作業を必要とする工程はできるだけ省略し、工程の短縮化を図る。
- c) 上記の a) 及び b) を満足しつつ、解析精度はできるだけ低下しないようにする。

なお、この方法では、従来の写真測量に比較して現地での標定作業が不要であるので、Photographic Survey Eliminating Positioning (略称 PSEP 法) と呼ぶことにする。

PSEP 法による簡易測量は、図-7.2 (b) に示すフローに従い、以下の手順で行う。

1) 斜め写真及びビデオ映像の収集

緊急飛行もしくは調査飛行により被災構造物の撮影を行う。撮影に際しては、ステレオペアとしての使用が可能な映像を得るために、以下の点に注意する。

a) ビデオカメラによる上空からの斜め撮影方法には、連続平衡撮影、旋回收収撮影、及び、直線収収撮影がある。このうち、旋回收収撮影及び直接収収撮影は、カメラの光軸を常に被災施設に向けた撮影であり、画像間のオーバーラップ率は 100% に近いものとなる。前述したように、ステレオペアに用いる画像のオーバーラップ率は 60% 程度が適切であることから、ビデオカメラによる撮影はできるだけ連続平衡撮影で行うのがよい。ここに、ヘリコプター等の飛行速度及びビデオカメラの焦点距離は、調査対象とする被害部位を画像上で識別できるだけの解像幅が得られ、かつ、画像が流れない範囲で設定する必要がある。

b) 斜め写真の撮影は、ビデオカメラによる撮影のように連続的ではないため、できるだけ各写真間の撮影間隔を短くして、多くの画像を収集する。

c) 後述する標定点の設定を容易にし、測量の精度を高めるために、被災した箇所だけではなく、周辺の人工的な工作物も同一画面に写し込むようにする。

2) 収集された画像からのステレオペアの選定

ビデオ映像及び写真ともに、適切にオーバーラップ率が得られ、かつ、周辺の人工構造物ができるだけ多く映っている画像のペアを選定する。

3) VTR 画面のハードコピーの作成 (斜め写真を用いる場合には不要)

解析図化機を用いた測量作業では写真またはダイヤボジが必要とされるため、2) で選定したビデオ画像からハードコピーを作成する。

4) 標定点の設定

最少限、3 次元座標がわかっている標定点 2 点と、3 次元座標のうちいずれか 1 つの座標がわかっている標定点 1 点があれば、カメラの状態を規定する 12 個の未知数は算定が可能である。このため、標定点の数を従来の写真測量に用いられる 6 点以上という条件から 3 点以上という条件に緩和する。

ただし、この場合には、解析精度を上げるために標定点の設定に際してはこれらがなるべく直線上に分布せず、対象範囲をまんべんなくカバーしていること、また、ステレオペアが重複する範囲内にできるだけ均等に配置することが重要である。

標定点は、写真上での座標が特定しやすいように、道路構造物であれば車道構成要素 (車線区画線、車道外側線等)、橋梁 (取付部、高欄、照明灯、橋脚等)、河川構造物であれば河川構成要素 (河道外側線、護岸、堤防等)、樋門、水門、堰等、または、一般の建物、家屋、自動販売機など、人工構造物の端部に設定するのがよい。

5) 写真座標の推定

被害部位の縦横断面図の作成には、必ずしも被写体の対地座標は必要ではなく、写真上での相対的な位置関係がわかればよい。このため、4) で設定した標定点の写真座標を推定する。一例として、橋梁に標定点を設けた場合には図-7.4 のようになる。すなわち、図中に示す標定点 A を写真座標の原点とすれば、標定点 B 及び C の写真座標は次のように推定できる。

標定点 B ($1_1, 0, 0$)

標定点 C ($*, *, 1_2$)

ここに、 1_1 及び 1_2 の値は、橋梁台帳等により調べるか、手がかりとなる情報が得られない場合には担当者の判断により設定する。また、* は、4) に示した理由により座標値の特定が不要であることを示す。

このような評定点の設定に際しては、震災直後に被災地周辺の大縮尺の地形図・構造物設計図書・路線図等の資料が入手可能であれば、より正確な値を設定することができる。なお、車道構成要素である車線区画

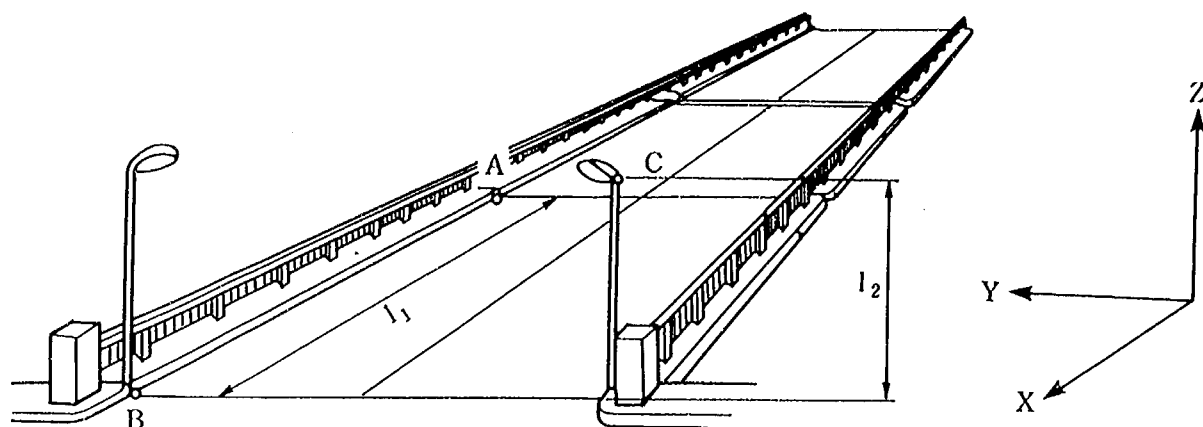


図-7.4 写真座標値の設定方法 (標定点を橋梁に設けた場合の例)

線・車道外側線等の寸法は、その標準値が道路技術基準通達集（建設省道路局）により規定されており、座標値の設定に有効に用いることができる。

6) 被写体の図化

5) で推定した標定点の写真座標から、ステレオペアが撮影された時点のカメラの状態を算定し、ステレオペアを解析図化機にセットする。従来の写真測量と同様の方法で、被害部位の概略寸法の計測及び縦横断面面の描画を行う。

7.4 PSEP 法による被災施設の解析

1) 解析対象とした斜め写真及びビデオ映像

提案手法を用いて実際に被災施設の計測を行い、その適用性、計測精度、ならびに計測に必要な時間を検討した。解析対象としたのは以下の3例である。

a) 長野県王滝村松越地区の斜面崩壊

昭和59年9月14日の長野県西部地震(M6.8)により、県道御岳王滝黒沢線の松越地区では、写真-7.1に示したような大規模な斜面崩壊を生じた。斜面の下部では新大又橋(橋長20.9m、橋幅6.5m)を含む全長約420mの道路が、また、上部では全長約50mの道路が、それぞれ流出した。ここに、写真-7.1は、ヘリコプターから航空写真用カメラを用いて斜め撮影されたものである(撮影距離602m、焦点距離209mm、俯角30°)。

b) 高架橋

被災施設ではないが、施設の形状・寸法の計測として、写真-7.2に示す道路橋を解析することとした。写真-7.2は、周辺の建物から6×6版の非計測用カメラを用いて斜め撮影されたものである(撮影距離47m、焦点距離70mm、俯角27°)。

c) 駐車場

もう一つ、ビデオ画像を用いた場合の計測精度を検討するために、実寸法を測定した写真-7.3の駐車場を解析対象とすることとした。PSEP法による測定値と実寸法が比較できるように、ビデオ画像の撮影に先だって評定点位置の現場計測を行っている。ここに、写真-7.3は、周辺の建物から家庭用ビデオカメラを用いて斜め撮影されたものである(撮影距離22m、焦点距離12mm、俯角45°)。

2) PSEP 法による被災施設の解析結果

a) 長野県王滝村松越地区の斜面崩壊

写真-7.1に示したA, B, C, D, E点(道路交点、道路の中央、屋根の隅、建物の隅、火の見やぐら)の5点を標定点として選定した上で、縮尺1/25000の地形図を用いることにより、火の見やぐらを基準点とする各標定点の写真座標を表-7.2に示すように定めた。

PSEP法によって得られた崩壊地の縦横断面図を示した結果が図-7.5である。また、PSEP法による結果を従来の写真測量法による図面と比較して、主要点間における寸法の計測精度を示した結果が表-7.3である。表-7.3によれば、主要点間における寸法の計測誤差は、たかだか5%程度であり、PSEP法でもかなりの精度で崩壊形状の把握を行うことが

表-7.2 標定点の写真座標(長野県松越地区の斜面崩壊)

標定点	X(m)	Y(m)	H(m)	備考
A	280	70	10	道路の交差点
B	30	-120	-70	道路中央
C	190	100	15	屋根の隅
D	0	40	0	建物の隅
E	0	0	0	火の見やぐら

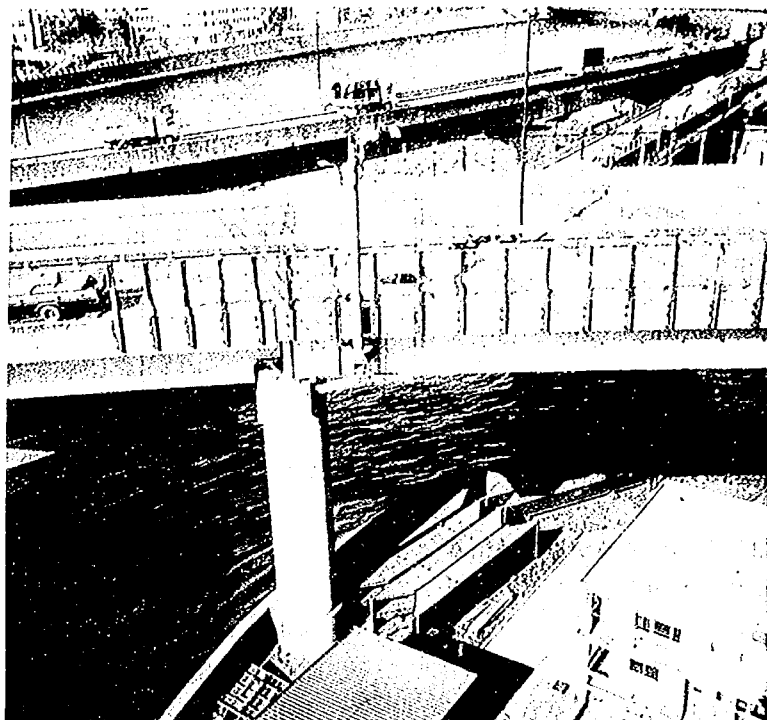


写真-7.2 首都高速道路7号線の高架橋（斜め写真）

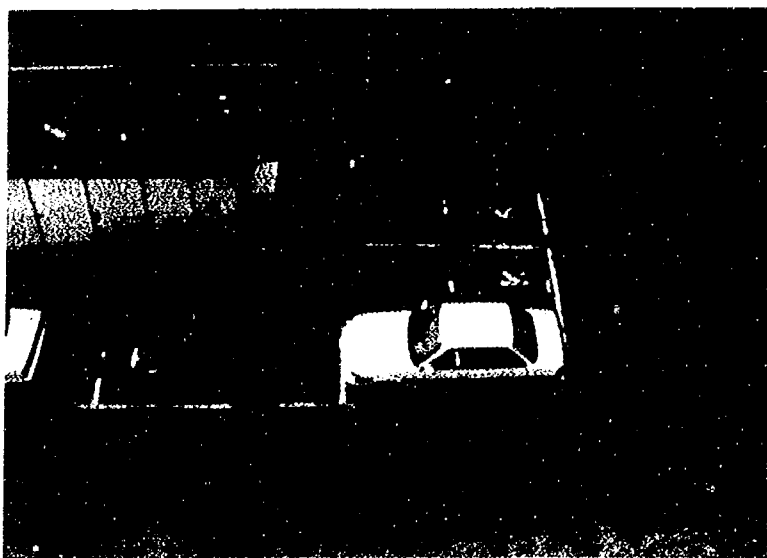


写真-7.3 駐車場を撮影したビデオ画像

できる。

また、図-7.5 に示した崩壊地の横断面図から求めた断面積に崩壊延長を乗じることにより、崩壊土量を推定すると次のようになる。

$$(740 \text{ m}^2 + 2,835 \text{ m}^2 + 1,616 \text{ m}^2) \times 186 \text{ m} / 3 = 321,842 \text{ m}^3$$

災害直後の調査による崩壊土量は約 27 万 m^3 と報告されており、わずか 3 断面から推定した崩壊土量であるにも係わらず、震災直後に利用する情報とし

ては十分な精度であると言えよう。

b) 高架橋

写真-7.2 に示した A 点～F 点（案内標識、防護フェンス、橋脚等）の 6 点を標定点として選定した上で、案内標識ポールの高さ（A 点～B 点）を 4 m、フェンスの 2 支間長（C 点～D 点）を 2 m、及び、橋脚上梁の厚さ（E 点～F 点）を 1.5 m と仮定することにより、各標定点の写真座標を設定した。

PSEP 法により求めた高架橋の縦横断面図を示す

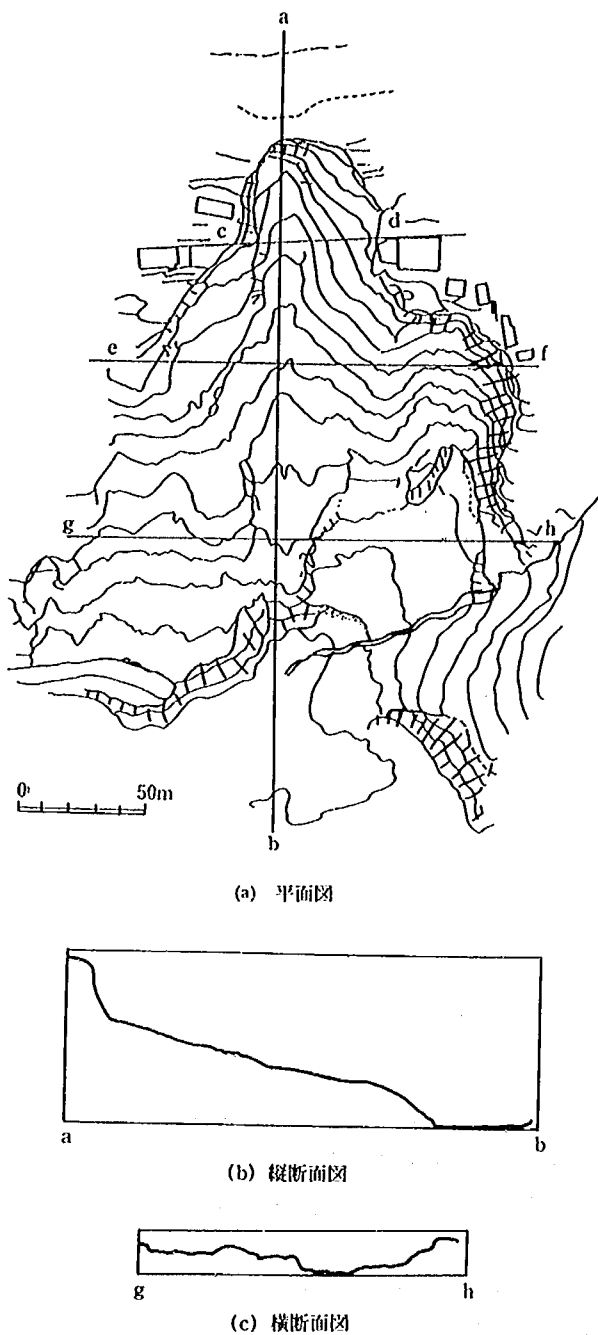


図-7.5 PSEP 法による縦横断面図
(長野県王滝村松越地区の斜面崩壊)

表-7.3 写真測量による図面との形状寸法の誤差
(長野県王滝村松越地区の斜面崩壊)

区 間	簡易測量による測定値(m)	写真測量図面からの測定値(m)	誤差	誤差/実寸法
距離 ab	186	186	0	—
距離 ef	123	128	-5	0.039
距離 gh	153	156	-3	0.019
比高 ab	84	88	-4	0.045

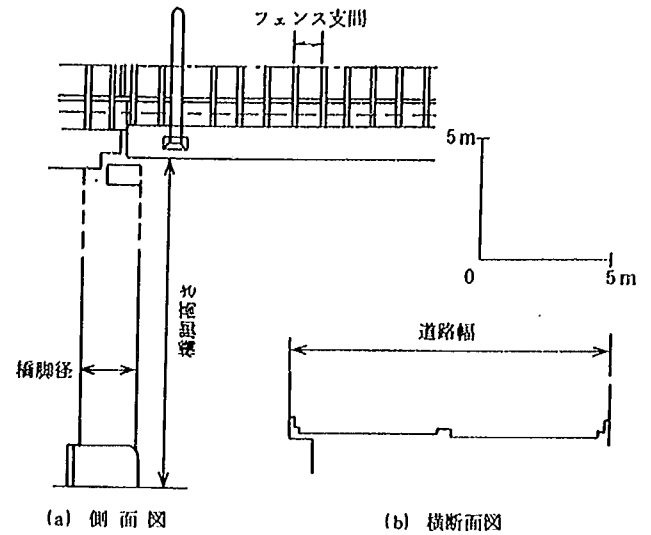


図-7.6 PSEP 法による縦横断面図
(首都高速道路 7 号線の高架橋)

表7-4 設計図面との形状寸法の比較
(首都高速道路 7 号線の高架橋)

対象物	簡易測量による測定値(m)	設計図面からの測定値(m)	誤差	誤差/実寸法
橋脚高さ	14.5	20.5	-6.0	0.293
橋脚径	2.5	3.0	-0.5	0.167
道路幅	12.4	18.5	-6.1	0.330
フェンス支間	1.1	1.5	-0.4	0.267

と図-7.6の通りである。また、PSEP 法による結果を橋梁台帳による図面と比較して、主要点間における寸法の計測精度を示すと表-7.4の通りである。表-7.4によれば、PSEP 法による測定精度は、先に示した松越地区の斜面崩壊の場合と比較すると低く、実寸法よりも 10~30%程度下回っている。この原因は、基準長さとして仮定した案内標識ポールの長さ(A-B間)4mが実際には5mである等、当初の仮定値が実寸法よりも小さすぎたためである。当然なことではあるが、基準長さはできるだけ精度よく仮定することが重要である。

c) 駐車場

写真-7.3に示したA点~G点(白線の隅角部等)をあらかじめ標定点として設定してビデオ撮影を行った。PSEP 法によって計測した標定点の座標と実測値との誤差を示すと表-7.5の通りである。これによれば、評定点という1点の座標の計測誤差として、水平方向には0.12~0.26m程度、上下方向には0.1m程度の誤差があることがわかる。ただし、重要なことは、ビデオ画像では画素が写真に比

べて粗いこと、ビデオカメラでは画像中心や画面湾曲の影響が写真測量用カメラに比較して正確に把握しにくいこと等、ビデオ画像を用いる場合に特徴的な問題点が挙げられるにも係わらず、実用的にはかなりの精度で評定点の座標を計測できている点である。

駐車場の縦横断面図を示すと図-7.7の通りである。図-7.7によれば、側面図には歪が生じているものの、平面図では概略の形状がよく捉えられている。したがって、形状・寸法を短時間に把握することが必要とされる震災直後においては、斜め写真からの縦横断面図と並んで、ビデオ画像も有効に活用できると考えられる。

3) PSEP法に要した時間

以上に示した3例の他に、あと2例について同様な検討を行ったが、これら5例の図化計測に要した時間の平均をとった結果が表-7.6である。これによれば、PSEP法の所要時間は合計4時間強であり、表-7.1

表7-5 PSEP法による標定点の写真座標と実測値との誤差 (駐車場)

標定点	X (m)	Y (m)	H (m)
A	0.032	0.164	-0.026
B	0.352	0.393	-0.112
C	-0.144	-0.679	0.072
D	-0.077	0.359	-0.023
E	0.035	-0.077	0.145
F	-0.034	0.005	0.125
G	-0.165	-0.164	-0.180
平均*	0.120	0.263	0.098

注*：絶対値の平均

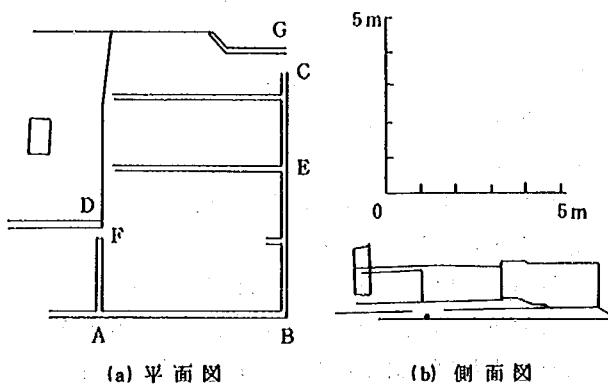


図-7.7 PSEP法による縦横断面図 (駐車場)

表7-6 PSEP法に要した時間 (5件の図化計測に要した時間の平均値)

工 程	所要時間	備 考
①ステレオペアの選定	約10分	VTR 再生モニター
② VTR 画面のハードコピー作成	約10分	5枚
③標定点の設定	約30分	
④写真座標の推定 標定点・カメラ データ入力 写真設置・標定観測 座標値の算出	約40分 約20分 約10分 約1時間	解析図化機による作業
⑤被写体の図化 図面作成 土量等の計測	約2時間 約90分 約30分	解析図化機による作業
所要時間合計	約4時間20分	

に示した従来の写真測量に要する時間 (約3.6日) の約1/20に短縮されている。この程度の短時間であれば、震災直後にヘリコプターにより収集された被災地の画像を用いて、震災復旧のごく初期の段階で必要とされる概略の情報を提供することが可能と考えられる。

7.5 まとめ

震災直後にヘリコプター等により収集される斜め写真及びビデオ映像を用いて、被災施設の概略の縦横断面図の作成を目指した簡易測量法 (PSEP法) を開発した。本手法によれば、震災発生後数時間のうちに、復旧方針の策定に必要な被災施設の概略形状を把握することが可能となり、より迅速に震災復旧の初期方針の決定に資することができるものと期待される。

PSEP法の特徴及び適用上の留意事項をまとめると、以下のようになる。

1) PSEP法では、従来の写真測量における標定点の設置や標定点測量など現地での作業を、写真上での作業で置き換えることにより、写真測量に必要とされる全体工程を大幅に短縮した。

2) 斜め写真及びビデオ映像を用いた検討によれば、PSEP法による画像計測に要する時間は、画像1件あたり4時間強である。これは従来の写真測量に要する時間 (約3.6日) の約1/20に相当する。

3) PSEP法に斜め写真を用いる場合には、写真座標のベースとなる基準長を適切に設定すれば、精度の

高い図面を比較的容易に得ることができる。また、写真に比べると画素が粗く、画像中心や画像湾曲の影響が把握しにくいといった欠点を有するビデオ画像からでも、震災直後に利用する上で十分な精度で図面の作成が可能である。

第8章 結 論

大規模かつ広域的な震災が都市域に生じた場合の震災情報を迅速かつ正確に収集・伝達するための、ヘリコプターによる震災調査方法を開発することを目的として、本研究では、ヘリコプターからの震災情報収集能力の解明、ヘリコプターの特性を活かした飛行方法・ビデオカメラの撮影方法の提案、ヘリコプターの最高飛行速度の設定方法の提案、熱赤外線カメラによる震災調査方法の提案、ビデオ画像・斜め写真からの簡易測量法の開発等を行った。本研究の個々の結論は、すでに各々の章に示した通りであるが、本研究の主要な結論をまとめると以下ようになる。

1) 道路施設及び河川施設に模擬地震被害を設けて、ヘリコプターからの撮影実験を行った。この結果、震災復旧の第1段階（発震～約1時間後）で必要とされる被災地域の分布・特徴などのマクロな震災情報は目視によっても十分に調査できる。また、震災復旧の第2段階以後（震災発生後約1時間後～）に必要とされる施設の震災情報を収集するためには撮影時間帯や施設被害の特徴に応じて可視ビデオカメラ及び熱赤外線カメラを活用することが有効である。

2) 昭和53年2月の伊豆大島近海地震の際にヘリコプターから撮影されたビデオ画像を用いて、ヘリコプターからの震災情報の把握精度を検討した。本検討に用いたビデオ画像は報道用に撮影されたものであるが、このようなビデオ画像を用いた場合でも、数十～数百m程度のスケールの被害であれば精度よく被災状況を推定できる。また、被災状況の把握精度を向上させるためには、ビデオ画像中に被害の数倍～数分の一程度のスケールの人工工作物（道路、自動車、人間等）を映し込むことが有効である。

3) 震後に必要とされる情報の性格や精度は時間経過に伴って大きく変化する。このため、震後の時間経過に応じて3種類の飛行方法を提案した。すなわち、震害発生直後に震災復旧の基本方針を定めるためのマクロ情報の収集に主眼をおいた「緊急飛行」、予め定められたフォーマットに従って網羅的かつ統一的な調査を行うための「一定飛行」、及び応急復旧に必要な被災情報

を施設毎に調査するための「調査飛行」である。また、調査対象とする施設及び被害の特徴に応じて、震災情報を収集するために必要とされる撮影幅の設定方法及び焦点距離の設定方法等、ビデオカメラを用いた撮影方法を提案した。

4) ヘリコプター等による震災調査では、調査を迅速に進めるという観点からできるだけ高速に飛行するのが望ましい。しかし、飛行速度があまり速すぎると画面上で画像が流れてしまい、ビデオ画像から正しく被災状況を把握することが困難になる。このため、ビデオ画像の流れ発生速度 V_L の評価方法を検討するとともに、これを模擬地震被害を用いた撮影実験により検証し、多少の流れが生じて調査対象物の損傷を識別できる限界速度 V_{max} の評価方法を提案した。

5) 熱赤外線カメラによる震災情報の収集能力を明らかにするため、模擬地震被害に対する撮影実験を行った。この結果によれば、RC橋脚の損傷や盛土の亀裂は適切な撮影距離を確保できれば十分に被害として識別可能である。被害の識別度を大きく左右する条件としてカメラ撮影幅及び解像幅があり、撮影幅は撮影対象物に対して大きすぎてもならず、解像幅は調査対象とする被害のうち最も小さい要素（コンクリートのクラック幅、鉄筋径等）より小さくならない。また、熱赤外線画像に及ぼす撮影季節、撮影時間帯、撮影距離、風の有無等の影響を明らかにした。

6) 緊急措置及び応急復旧の基本方針を決定する上でまず必要とされる施設被害の縦横断面図を、ヘリコプターから撮影されたビデオ画像及び斜め写真を用いて作成するために、従来の写真測量の作業工程を大幅に省略した簡易測量法（PSEP法）を開発した。さらに、模擬地震被害を対象とした縦横断面図の試作検討を行い、震災復旧に対するPSEP法の有効性を示した。

以上の検討により、ヘリコプター等を用いた上空からの即時・広域的な震災情報の収集が可能であることが明らかになった。本研究が、今後の震災復旧対策技術の向上に資することを望む次第である。

謝 辞

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「災害情報システムの開発」（昭和62～平成3年度）の一環として実施したものである。本研究の実施に際しては、（財）国土開発技術研究センターに設けられた「災害情報システムの開発委員会」（梅村 魁委員長）及びその下に設けられた「復旧計画作成支援システムの開発委

員会」(久保 慶三郎委員長), 及び, 「震災復旧計画作成支援システムの開発分科会」(栗林栄一分科会長) において, 種々有益なる御指導を賜った。ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 川島一彦, 大日方向尚巳, 後藤勝志, 加納尚史:
昭和 59 年長野県西部地震における震後対応, 土木技術資料, Vol. 28-29, 昭和 61 年 9 月
- 2) 広井 修: 都市化社会と防災, 新都市, Vol. 40-8,
昭和 61 年 8 月
- 3) 熊谷良雄: 震後の行政対応, 新都市, Vol. 40-8,
昭和 61 年 8 月
- 4) 建設省土木研究所: 震災時の被災調査及び情報連絡体制, 一昭和 62 年 12 月千葉県東方沖地震の場合一, 土木研究所資料, 第 2656 号, 昭和 63 年 8 月
- 5) 建設省土木研究所: 土木構造物の震災復旧マニュアル (案), 土木研究所集報, Vol. 45, 昭和 61 年 12 月
- 6) 日本道路協会: 道路震災対策便覧 (震災復旧編),
昭和 63 年 2 月
- 7) 国土開発技術研究センター: 災害情報システムの開発報告書, 平成元年 3 月
- 8) 建設省土木研究所: 1978 年 1 月伊豆大島近海地震調査概要, 土木研究所資料, 第 1346 号, 昭和 53 年 2 月
- 9) 建設省土木研究所: 1978 年伊豆大島近海地震災害調査報告, 土木研究所報告, 第 158 号, 昭和 57 年 3 月
- 10) 静岡県: 1978 年伊豆大島近海の地震災害誌, 昭和 53 年 10 月
- 11) (社) 日本道路協会, 道路震災対策委員会: 道路の震災対策に関する調査報告 (I) —1978 年伊豆大島近海地震災害一, 昭和 58 年 3 月
- 12) 建設省: 建設省ヘリコプター「あおぞら号」運航マニュアル (案), 平成元年 11 月
- 13) (財) 国土開発技術研究センター: 災害情報システムの開発報告書, 平成 2 年 3 月
- 14) 持木一明, 他: ビデオ技術ハンドブック, 電波新聞社, 昭和 63 年 11 月
- 15) 建設省土木研究所耐震研究室: RC 橋脚の動的耐力に関する実験研究 (その 2), 土木研究所資料, 第 2279 号, 昭和 61 年 1 月
- 16) 浅沼秀弥: 静内橋地震災害調査, 土木技術資料,

Vol. 25, No. 11, 昭和 58 年 11 月

- 17) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史: 震災時の被災調査及び情報連絡体制—昭和 62 年 12 月千葉県東方沖地震の場合一, 土木研究所資料, 第 2656 号, 昭和 63 年 8 月
- 18) 日本写真測量学会: 写真による三次元測量—応用写真測量一, 昭和 58 年 6 月
- 19) 建設省土木研究所: 昭和 59 年 (1984 年) 長野県西部地震災害調査報告, 土木研究所報, 第 182 号, 平成 3 年 3 月
- 20) 秋山 實, 小井土今朝己: 簡易型解析図化機の開発, 平成元年度写真測量学会講演文集, pp. 123 ~ 126, 平成元年

本研究に関連した発表論文等

- 21) 建設省: 災害情報システム・ガイドライン (案),
平成 4 年 3 月
- 22) 建設省土木研究所: 基幹施設の災害情報システム・ガイドライン (案), 土木研究所集報, Vol. 58, 平成 4 年 3 月
- 23) 川島一彦, 運上茂樹, 杉田秀樹, 加納尚史, 飯田寛之: ヘリコプターを用いた上空からの震災状況の把握—(その 1) 模擬地震被害を用いた適用性の検討一, 土木研究所資料, 第 2802 号, 平成元年 9 月
- 24) 川島一彦, 運上茂樹, 飯田寛之: 空から地震の被害を調べる—建設省ヘリ「あおぞら」による模擬調査一, 土木研究資料, ニュース, Vol. 31-4, pp. 8-9, 平成元年 4 月
- 25) 川島一彦, 運上茂樹, 杉田秀樹, 加納尚史, 飯田寛之: ヘリコプターによる上空からの震災情報収集能力の検討, 土木研究所資料, Vol. 32-1, pp. 59-64, 平成元年 1 月
- 26) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史: ヘリコプターから撮影したビデオ映像による地震被害状況の把握, 土木技術資料, Vol. 33, No. 1, 平成 3 年 1 月
- 27) 川島一彦, 杉田秀樹, 加納尚史: 即時・広域震災情報の収集を目指したヘリコプターの飛行方法, 土木技術資料, Vol. 33, No. 9, 平成 3 年 9 月
- 28) 川島一彦, 杉田秀樹, 加納尚史: ビデオ映像を用いた上空からの震災調査におけるヘリコプターの最高飛行速度, 土木技術資料, Vol. 33-9, 平成 3 年 9 月

- 29) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史・飯田寛之：震災情報の収集に対する熱赤外線ビデオの適用性，土木技術資料，Vol. 33, No. 1, 平成3年1月
- 30) 杉田秀樹，川島一彦，加納尚史：斜め写真及びビデオ映像を用いた震災状況の簡易測量法の開発，土木技術資料，Vol. 34-1, 平成4年1月
- 31) 川島一彦，中島 燈，杉田秀樹：震災情報の収集に対する熱赤外線ビデオの適用性～熱赤外線画像に及ぼす風の影響～，土木技術資料，投稿中
- 32) 川島一彦，運上茂樹，飯田寛之：ヘリコプターによる上空からの震災状況の把握，土木学会第44回年次学術講演会議演集，1989. 10
- 33) 川島一彦，運上茂樹，飯田寛之：ヘリコプターによる上空からの震災状況の把握，第18回日本道路会議講演集，(社)日本道路協会，1989. 10
- 34) 川島一彦，運上茂樹，飯田寛之：上空からの早期震災状況把握手法の実用化，写真とリモートセンシング，Vol. 28-4, 日本写真測量学会，1989. 4
- 35) 杉田秀樹：より迅速な震後対応を目指して～ヘリコプターによる上空からの震災情報の収集，土木研究所研究発表会講演集，平成2年12月
- 36) 川島一彦，杉田秀樹，加納尚史，飯田寛之：即時・広域震災情報の収集を目指したヘリコプターの飛行方法，第44回建設省技術研究会講演集，平成2年11月
- 37) 川島一彦，杉田尚史，加納尚史：ヘリコプターを用いた上空からの即時震災調査法，第19回日本道路会議講演集，(社)日本道路協会，1991. 10
- 38) 川島一彦，杉田秀樹，加納尚史：ヘリコプターを用いた上空からの即時震災状況調査法，第21回地震工学研究発表会講演集，土木学会，1991. 7

大規模海浜過程の予測モデルに関する研究

都 丸 徳 治*

Study on Prediction Model of Large Scale Coastal Behaviour

Tokuji TOMARU

要 旨

延長数十キロメートルに及ぶ大規模な海浜は、そのほとんどが両端に岬などの境界があって、その間に凹型の安定した砂浜を形成している。

ここでは、このような安定した海浜の機構を一つの漂砂系としてとらえて究明するとともに、大規模海浜過程として長期の汀線変化を予測できる数値シミュレーションモデルを構築し提案する。

キーワード：漂砂系，大規模海浜過程，大規模海浜の予測モデル，代表波浪，漂砂海岸の分類

Synopsis :

Large scale beach of several to tens of kilometers long usually has boundary conditions such as headlands at its both ends and forms a stable concave beach. In this report, mechanism of this stable beach is studied regarding it as one littoral sedimentation cell and numerical simulation model to predict long term shore-line change as a large scale coastal behaviour is proposed.

Key Words : littoral sedimentation cell, large scale coastal behaviour, prediction model of large scale beach, dominant wave, classification of sand drift beach

平成5年11月22日原稿受理 (Received on November 22, 1993)

*土木研究所次長

目 次

1. 概 説	5
2. 漂砂海岸の形成と大規模海浜過程の実態	5
2.1 漂砂海岸の分類	6
2.2 漂砂海岸の大規模海浜過程	20
3. 大規模海浜過程の予測	23
3.1 代表波浪	23
3.2 長期的汀線変化予測モデル	26
3.3 予測モデルの適用性	31
4. 結 語	42
参考文献	43

1 概 説

周囲を海に囲まれたわが国の地図を拡げて眺めてみると、すばらしい弧状をした美しい長い海岸線をもった海浜が数多く存在する。これらの海浜の延長は20~30キロメートルから100キロメートル近くに及ぶものもあり、そのスケールの雄大さに驚かされる。これらの数十キロメートルに及ぶ大規模な海浜は、地質時代の海面変動や繰り返す来襲する波浪などの自然の力のもとで、非常に長い年月をかけて形成されてきたものである。

これらの大規模な海浜をよくみると、そのほとんどが両端に岬などの境界をもっており、とくに中央部に供給土砂の多い大河川が流入している場合は別として、その間に凹型の浜を形成している。そしてその形は、あるものは対称形であったり、またあるものは非対称形である。これらの形は波浪の波向によって違いまたは変化する。これらの大規模な海浜は2つの岬などの境界条件にはさまれて、沿岸漂砂が両端の境界を経て移動することなくその間で安定している場合と、両端の岬などを経て漂砂の流出入はあるがそれが平衡して安定している場合とがある。したがって、これらの海浜は、たとえ数十キロメートルに及ぶ規模でも、両端の岬などを境界条件として1つの漂砂系を形成しておりそこでは漂砂の連続性が成立しているといえる。

従来ともすれば、このような大規模な海浜においても、その一部分にのみ着目して海浜の変形機構を解明しようとしてきたきらいがあるが、全体的な海浜の安定化という点からみるとどうしても解決できない課題が残った(土屋, 1987)。ここでは、これらの大規模な海浜を100年のオーダーで検証し、1つの自然のシステムの中で存在する大規模な海浜としてとらえその現象の解明を行うこととする。

このような大規模な海浜の形成とその海浜の安定化の機構を究明するために、漂砂によって形成された砂浜海岸を対象として、その漂砂系に注目し、境界条件としての海岸の地形、漂砂源の有無とその流入位置によって分類する。それぞれの砂浜海岸における海浜変形の境界条件、たとえば両端に存在する岬などのほか、漂砂源としての流入河川や波浪による漂砂が全体として1つの漂砂系を形成しているはずであるので、その特徴を実際の海岸の例を提示しながら考察する。この場合、これらの条件のもとに形成された砂浜はそれ自身が全体としていわば大規模海浜過程を表すことか

ら、海浜の安定形状の形成システムを境界条件と波浪特性との関連から分類し、それぞれの砂浜の大規模海浜過程としての特徴について考察する。

ついで、大規模海浜過程として長期の汀線変化を予測できる数値シミュレーションモデルを構築する。この場合、まず海浜変形を支配する代表波浪をどのように選定するかということはきわめて重要であり、従来汀線変化予測モデルにおいては、1) 適当に定めた発生頻度の高い高波浪を代表波浪とし、年平均沿岸漂砂量を与えるよう継続時間を与える方法、2) 時系列としての観測波浪データを入力する方法(たとえば, Mehaute, Soldate, 1980)、さらには3) 季節風による波浪特性をできるだけ表現できるように工夫した代表波浪を与える方法(土屋, 山下, 泉, 鳥取, 1993) など各種のものが提案されているが、これらはいずれも沿岸海域における観測結果によるものである。したがって、多くの場合波向の観測結果が得られているかどうか、また、その沖波への換算が適切であるかなど実際上の問題がある。このため、本研究ではWMO(世界気象機構)による外洋における長期の観測結果に基づく新しい代表波浪の選定方法を提案する。

つぎに、長期の汀線変化予測モデルの構築においては、いずれにせよ1ライン汀線変化予測モデルを用いることになるが、その場合の問題点はつぎのように指摘できる。その1つはその基礎式に含まれている沿岸漂砂量の推定をいかに確実にこなうかということ、いいかえれば、どの沿岸漂砂量式を適用するか、また、そのための代表波浪の変形計算をどの方法によって実施するのかということ、2つは海浜変形に対する適切な境界条件を与えて長期の数値計算をいかに安定して実施するかである。本研究では、これらの問題を実際上解決した新しい長期汀線変化予測モデルを提案し、具体的に実海岸を模倣した海岸地形に適用して、代表波浪を形成する波浪の変形過程から汀線変化のみならず沿岸漂砂量の沿岸方向分布を計算して、計算方法の安定性はもとより、大規模海浜過程としての長期の汀線変化と海岸地形との関係を、それを形成させる沿岸漂砂量の動態について考察する。これによって、本数値予測モデルの適用性を究明する。

2 漂砂海岸の形成と大規模海浜過程の実態

漂砂によって形成された比較的大規模な海浜を対象として、その類型化を行い、それらの海浜の形成過程における境界条件および漂砂特性を全体的にとらえて

それを1つの漂砂系として考え、海浜の形成機構を考察することによって大規模海浜過程として取り上げるべき諸問題を明確にする。

2.1 漂砂海岸の分類

海岸線は波浪、潮汐などの外力と地殻変動に起因する地盤の昇降が相対的に作用するところであり、海岸地形を系統的に把握するために、その地形の相違点や類似点をとらえて分類する試みが種々行われてきている。海岸地形の生成に関して Inman, Nordstrom (1971) はプレートテクトニクスの考えを導入して大規模な海岸地形の分類を行い、また、Shepard (1973) も地形生成に加わった外力の要素に基づいた海岸地形の分類を行っている。さらに、土屋、芝野 (1985) は漂砂の動態に基づいて、砂浜海岸を漂砂系および海浜の平面形状の変化などに基づいて分類し、図-2.1のように示している。

ここに Q_{in} は対象とする漂砂系に流入する漂砂、 Q_{out} は流出する漂砂を表し、これらの平衡状態に着目して漂砂海岸を閉漂砂海岸 (CSD beach)、擬閉漂砂海岸 (Q-CSD beach) および開漂砂海岸 (OSD beach) に分類している。閉漂砂海岸は、いわゆるポケットビーチといわれる海岸であり、砂浜海岸の両端部には岩礁からなる岬があり、流入河川など漂砂源がないため来襲波浪の波向の季節変動によって汀線は変化するものの、長期的には限られた海浜内で土砂収支の系が閉じ

られた海岸となっている。閉漂砂海岸はこのような漂砂特性であるので、その海岸の規模は比較的小さいものが多いと考えられる。

擬閉漂砂海岸は広義的には閉漂砂海岸の性格を有するが、長期的な観点では沿岸漂砂の分布が非一様性を示す海岸である。そのため、一連の海浜の中で侵食領域、堆積領域が生じることとなる。このような漂砂に伴う土砂収支は長期的な変化が見られるものの、海岸全域としては均衡のとれた海岸で河川から流入する漂砂と海域から流出する漂砂のバランスがとれていて、長期的に大きな海浜変形が生じない動的に安定な海岸を擬閉漂砂海岸としている。このような漂砂特性によるところから、この海岸の規模は閉漂砂海岸に比べるとその規模は大きいものが多いと考えられる。

開漂砂海岸は海域内の侵食によって生産された土砂が、漂砂系外 (沖合の海谷などの深海部) へ流出して再び海浜の回復に寄与しない侵食性海岸と、海域外からの漂砂と河川から流入する漂砂が流出する漂砂より多い堆積性の海岸に分類される。このような漂砂特性に基づくと、この海岸も擬閉漂砂海岸と同様に閉漂砂海岸に比べるとその規模は大きいものが多いと考えられる。前述した土屋、芝野 (1985) の分類に基づくと、本論文で対象とする大規模な海浜は、擬閉漂砂海岸または開漂砂海岸に属する 경우가多いが、それには閉漂砂海岸の場合も存在すると考えられる。

ここでは、これらの分類を参考にして、大規模な砂浜海浜の形状の安定性という観点から、海浜の形成における境界条件に着目して漂砂海浜の分類を行う。海浜が安定するためには、対象とする海域への流出入する漂砂量とその境界条件となる両端部の岬などを越える漂砂量が平衡することが必要条件となる。図-2.2は

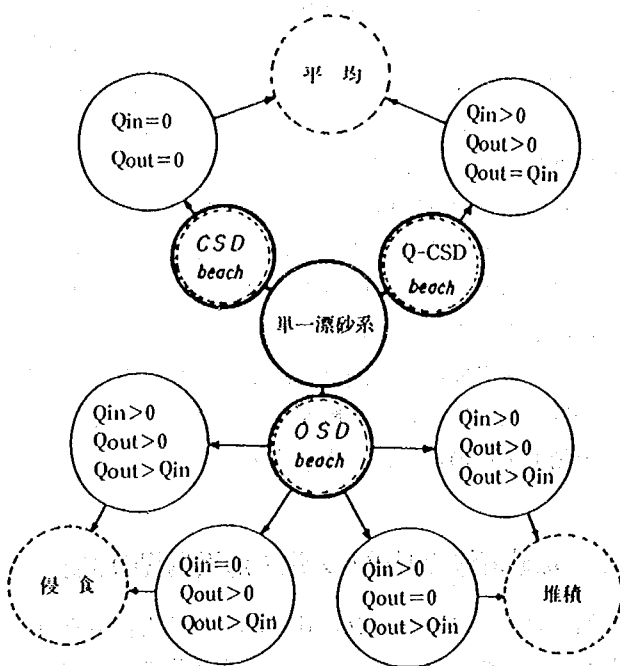


図-2.1 土屋、芝野による漂砂系と漂砂海岸の分類

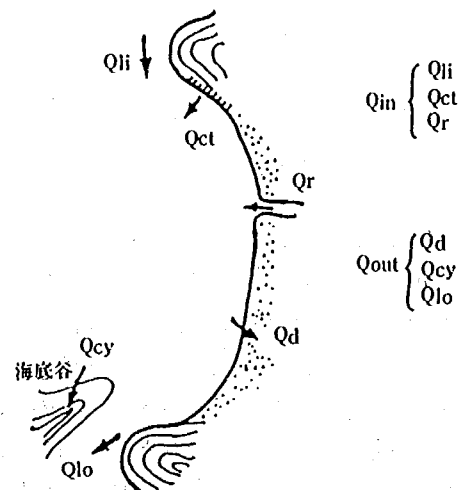


図-2.2 芝野による漂砂系の模式図

芝野 (1985) による砂浜における漂砂系の模式図であるが、海浜の安定はこの図における Q_{in} と Q_{out} がバランスすることによって形成されるものであることを表現している。

わが国沿岸の海岸地形を大きく岩石または崖海岸と砂浜海岸という視点で分類し、その分布を見ると比較的規模の大きい砂浜海岸の一部には、九十九里沿岸や日高・胆振沿岸のように海域への流入土砂をもたらすような主要な流入河川がなく、隣接する海岸の侵食土砂が漂砂となって汀線の変化をもたらすような海岸もあるが、ほとんどは大河川が流入している海岸である。したがって、わが国における大規模な砂浜海岸のほとんどは、河川からの流入土砂を主な供給源として形成されたものと考えられる。つぎに、この河川が海域のどの部分に流入しているかに注目すると、図-2.3に示すように岬と岬の中央部に位置する海岸や片方の端部に流入し、もう一方にはこれより小規模の河川が流入している場合あるいは流入していない場合、また、中央部および両端部に河川が流入している場合など、さまざまなパターンがある。

したがって、本論文では海浜安定に必要な漂砂の連続性を扱うことから、海岸の地形とそこに流入する河川の有無やその位置により、図-2.4(a)~(e)の模式図に示すような5つのタイプに分類する。

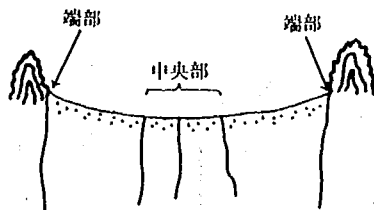


図-2.3 砂浜海岸における流入河川の位置の説明図

1) タイプA ($Q_R=0$ の場合)

海域へ大規模な河川の流入がない例であり、漂砂の主な供給源としては端部の崖海岸の侵食土砂や岬部を通過して海域外から供給される沿岸漂砂が考えられる。海岸線は長期的には来襲する波浪の年間卓越波向に対応した安定海浜に近づくが、波向に季節変動があると土砂の供給に季節変動が生じる。海域へ土砂の流送を伴う大河川が流入しない海岸の例としては、前述したように千葉県九十九里海岸をあげることができる。この海岸の延長は約80kmであるが、図-2.5に示すように主だった流入河川は存在しない。

堀川、砂村 (1971) は九十九里海岸の漂砂の方向を

数種類の方法で求めるとともに、汀線位置の変化実態に基づき漂砂の卓越方向を推定している。それによると、九十九里海岸の汀線付近に分布する礫の種類は灰色泥岩、白褐色軽石質泥岩（以下「白褐色泥岩」とよぶ）、石英粗面岩および軽石質凝灰岩などである。当海岸に流入する諸河川はいずれも河口付近まで礫を流送していない。したがって、これらの礫は当海岸に隣接する海岸から運搬されてきたものと思われる。屏風ヶ浦と太東岬の海蝕崖は激しく侵食されており、その結果両地域とも多量の灰色泥岩礫を生産している。屏風ヶ浦の灰色泥岩と太東岬のそれとを現地において区別することはむずかしいが、当海岸にみられる灰色泥岩礫の供給源はこれらの海蝕崖であることは明らかであるとしている。したがって、九十九里海岸は図-2.5に示すように東側の屏風ヶ浦における軟岩から構成された海崖の侵食土砂と西側に流入する夷隅川からの少量の流送土砂が、しだいに海岸中央部に堆積して汀線が前進する傾向であると報告されている。

2) タイプB ($Q_R>0$ で端部流入型の場合)

海域への土砂の流送を伴う河川がどちらかと言えば海域の境界となる端部へ流入し、河川からの供給土砂が漂砂源となっている例である。この場合も長期的に波浪特性に見合った海浜を形成するが、波向の季節変動があると河川からの供給土砂が対象海域外へすべて、または、一部流失する場合がある。なお、このケースの場合流入河川が一端のみとは限らず、河川規模は異なるにしても両端へ流入する場合もある。

海域の端部に河川が流入し流送土砂を伴う海岸の例のうち、流入河川が1河川の海岸としては図-2.6に示すように鳥取県の皆生海岸をあげることができる。この海岸は東端の淀江港~境港市に至る延長約20kmの海岸であり、その大部分を弓ヶ浜が占める。この海岸には淀江港より約4km西側に流域面積約860km²の日野川（社団法人日本河川協会監修、1992）が流入している。

皆生海岸における風向風速の観測は、昭和37年日吉津小学校において開始された。風向風速の頻度分布は図-2.7に示すとおりであり、海風としてはNNE, NEが卓越する。

このため、弓ヶ浜は日野川からの流送土砂が沿岸流によって運ばれ形成されたものと考えられている。とくに歴史時代になってから形成されたと考えられる外浜は、日野川上流における砂鉄採取に伴う花崗岩地区の荒廃による流送土砂の増加によって発達してきたものといえる。しかし、大正10年ごろから日野川上流の

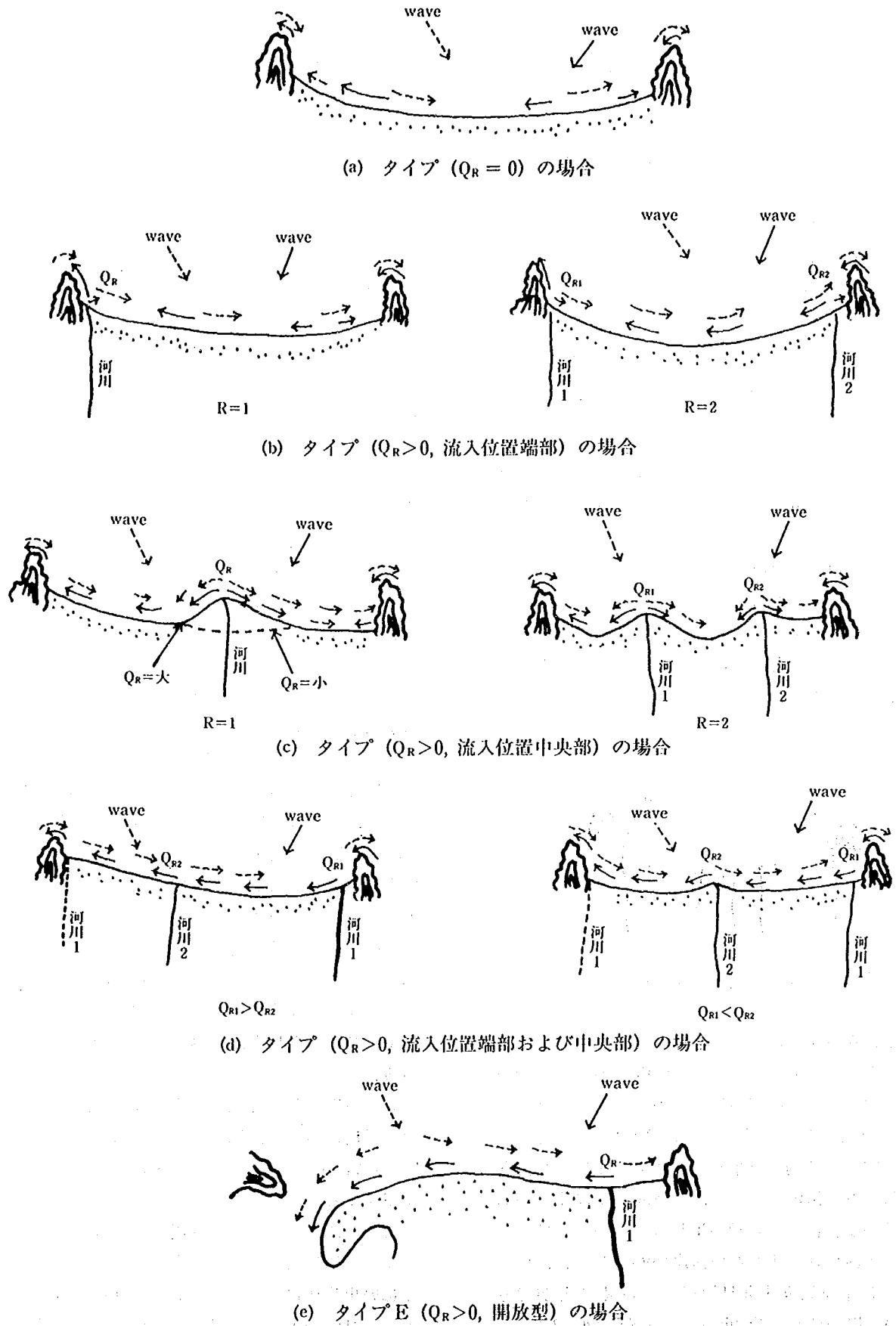


図-2.4 流入河川位置による砂浜海岸分類と沿岸漂砂の主方向
(Q_R は河川からの流入漂砂, R は流入河川数)

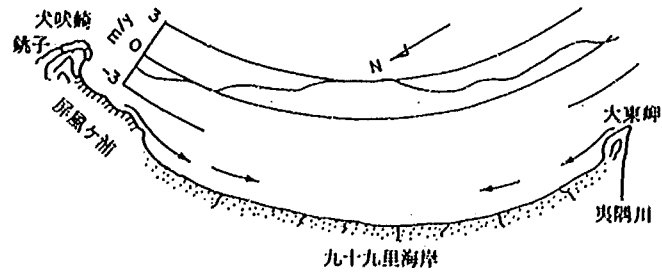


図-2.5 九十九里海岸における汀線変化と漂砂源

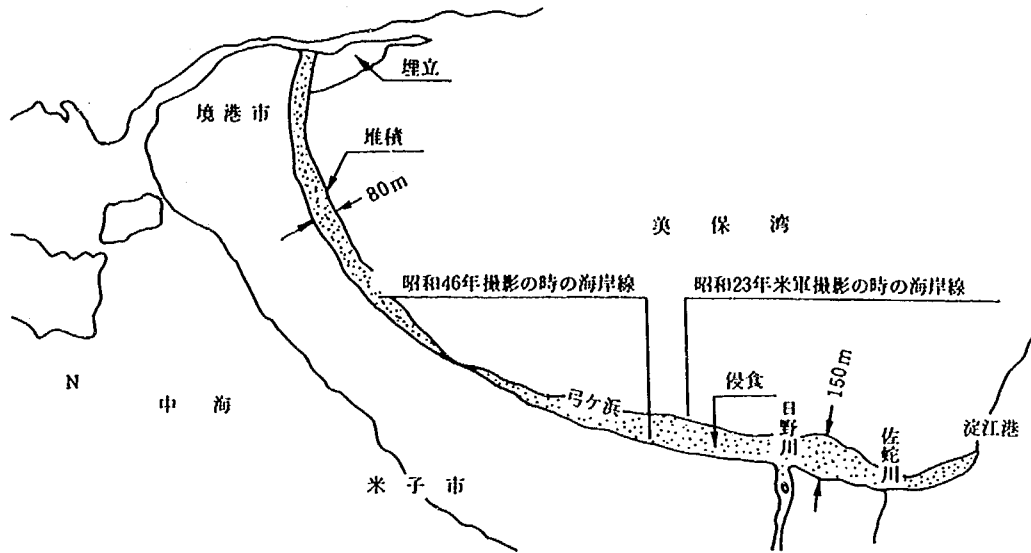


図-2.6 皆生海岸の航空写真に基づく汀線変化図

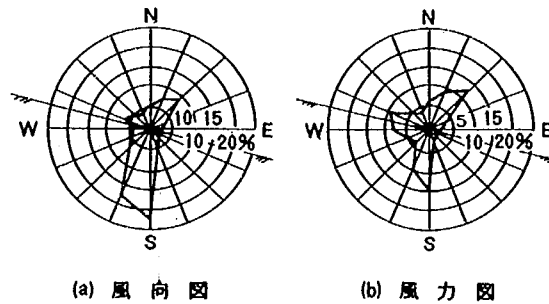


図-2.7 皆生海岸の風向・風速分布図

砂鉄採取鉱山が次々と閉山されてきたのを契機とするかのように、また、暴風波浪が生じたこともあり汀線後退が顕著になり始めた。この汀線の後退はその後もつづき、図-2.6に示すように昭和23年と昭和46年の航空写真の比較においても最大で約150mの後退が見られる。しかし、昭和46年以降は離岸堤の施工により、失われた海浜の復活も図られ、これと合わせて緩傾斜護岸、突堤などにより海浜の安定化が図られている(建設省河川局海岸課監修, 1981)。

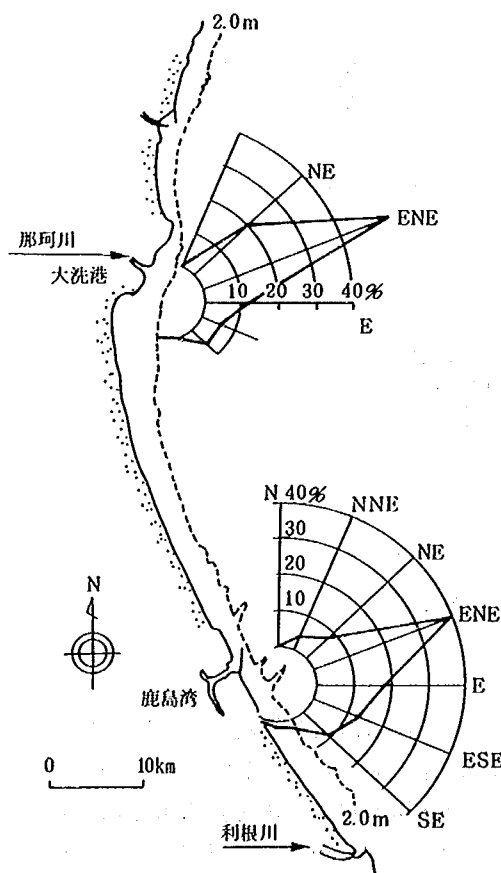
つぎに、流入河川が複数の海岸としては、茨城県の鹿島灘海岸をあげることができる。鹿島灘海岸は大洗港から利根川河口までの延長約70kmの海岸である。大洗港の北方約5kmは岩礁地帯となっており、ここに流域面積約3,270km²の那珂川(社団法人日本河川協会監修, 1992)が流入している。那珂川自体は一連の砂浜地域には流入してはいないが、台風時の河川濁水の拡散状況や底質粒径の沿岸方向分布などから考えられる沿岸漂砂の方向からすれば、流送土砂の一部は鹿

島灘海岸に寄与していると思われる。一方、最南端に流入する利根川は、約16,840km²に及ぶ日本最大の流域面積（社団法人日本河川協会監修，1992）を有する河川である。鹿島灘沿岸の波浪特性（茨城県河川課，1986）は図-2.8に示すとおりであり、卓越波向はENE方向であり、北向きの沿岸漂砂を生じさせる（建設省河川局海岸課監修，1981）。周知のように利根川は江戸時代に東京湾に注いでいた流路を人為的に現在の流路に付替え変更したもので、それ以前は図-2.9（建設省関東地方建設局監修，1987）に示すように常陸川水系（現在の鬼怒川，小貝川，霞ヶ浦水系などの総称）のみが鹿島灘海岸に注いでいた。また、利根川の流路変更の後は利根川水系の土砂が主に流送されるようになった。一方、北端に位置する那珂川も地質時代から流路変遷を繰り返し、海域へ土砂を流送してきた。こ

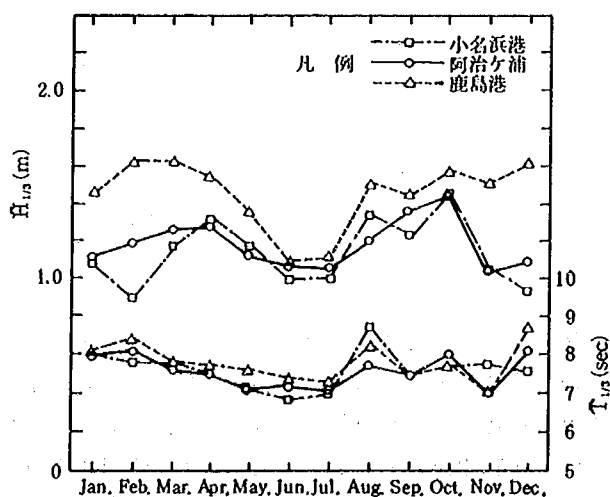
れら両河川から海域へ流入した土砂の一部は、図-2.8に示したような波浪の特性によって鹿島灘海岸に流送され、海浜を形成していったものと考えられる。

図-2.10は鹿島港建設後のデータであるが、前浜における底質の重鉱物含有率の沿岸分布である。海域の両端部において重鉱物の含有率が高くなっていることから、那珂川，利根川からの流送土砂が鹿島灘海岸の形成に寄与していることがわかる。

しかし、昭和20年代後半から利根川では河道改修や上流に大規模なダムが建設され、那珂川においても同様に昭和20年代から河道改修が盛んとなったことなどから流送土砂が減少し、また、昭和30年代の後半より大規模海岸構造物の建設が開始され、それにより沿岸漂砂が阻止されるなどの影響現れ、図-2.11に示すような著しい汀線変化が生じてきている。



(a) 波浪観測点と波浪特性



(b) 有義波高と周期の季節変動

図-2.8 鹿島灘沿岸における波浪特性

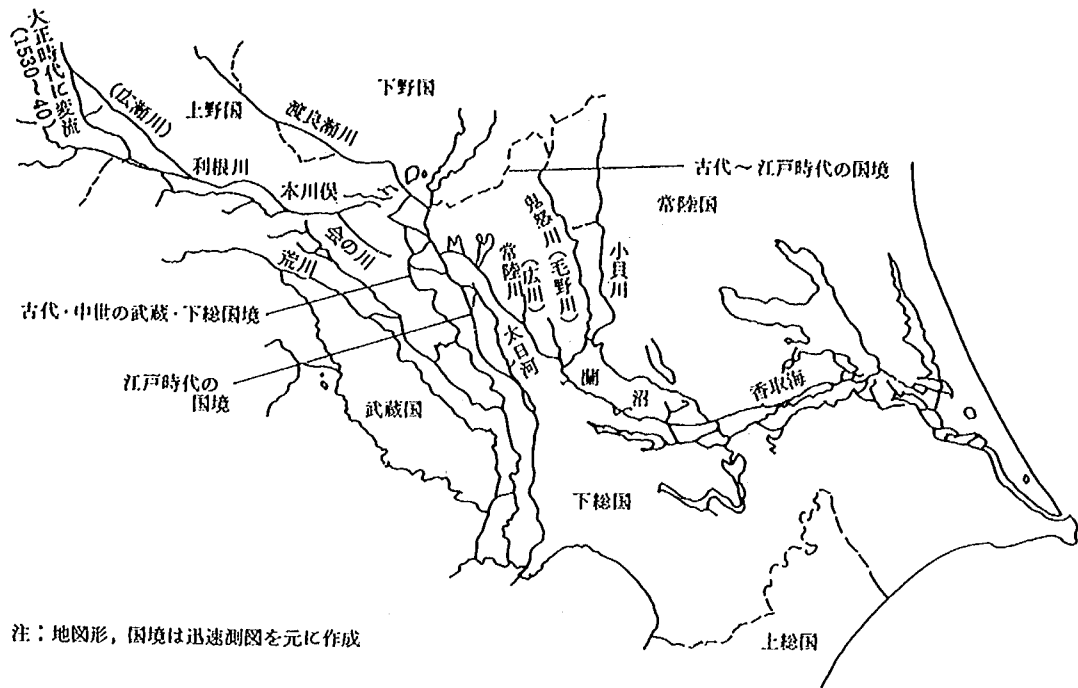


図-2.9 江戸時代以前の利根川の流路

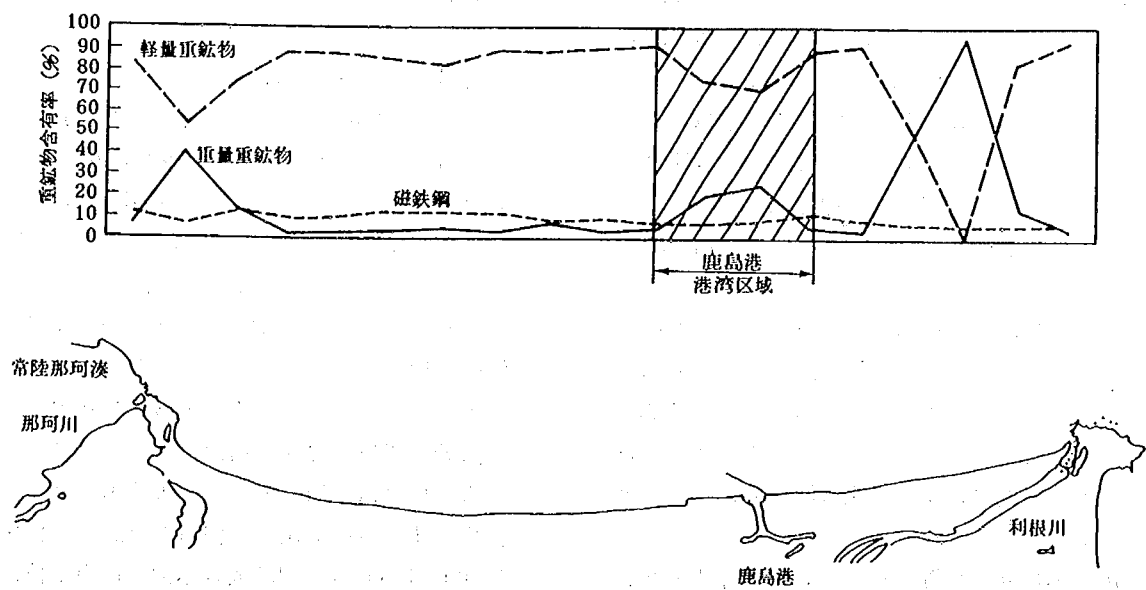
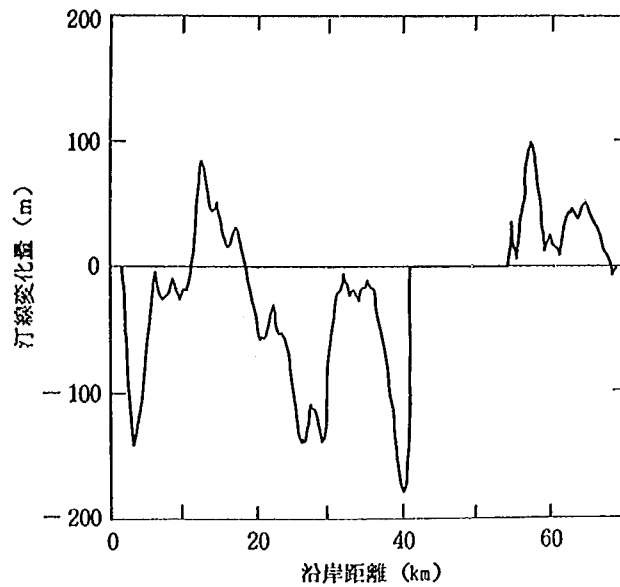


図-2.10 鹿島灘海岸の海浜砂の重金属含有率の分布



昭和36年～平成2年の場合

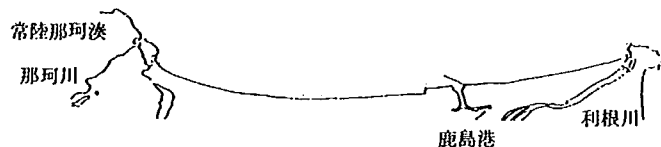


図-2.11 航空写真に基づく鹿島港建設以後の汀線変化

3) タイプC ($Q_R > 0$ で中央部流入型の場合)

これは流送土砂を伴う河川がどちらかと言えば海域の中央部に流入し、河川からの供給土砂が主要な漂砂源となっている場合であり。河川からの供給土砂量が波浪条件と海底形状に依存する沿岸漂砂量を越える場合は河口デルタが発達するが、逆の場合は広域的には凹状の海浜形状となる。河川からの供給土砂が多く、流入位置に対して来襲する波浪により生じる沿岸漂砂量が河口の左右岸に対してバランスすると、デルタの形状は河口を中心にして対称になるが、そうでない場合は非対称となる。また、両端部と河口デルタ間の地形も、河川の流入位置と卓越波向の関係で、長期的には波浪特性に見合った海浜形状となる。このような海岸においても一般的には1つの流入河川ではなく、複数の場合もある。

主要な流入河川が漂砂源となっている海岸として、遠州海岸や駿河海岸などがあげられる。このうち遠州海岸は静岡県のお前崎から愛知県伊良湖岬までの約115kmに及ぶ海岸であり、両端部の御前崎と渥美半島の先端は岩礁部となっている。沿岸漂砂はこの岬部の先端を通過しているようであるが(宇多, 山本, 1991), 本論文では御前崎と伊良湖岬を境界部の岬とみなしてこのタイプの海岸として分類する。遠州海岸には御前

崎から西方約40kmの地点に流域面積約5,090km²の天竜川が(社団法人日本河川協会監修, 1992)流入する。

遠州海岸の波浪特性(建設省中部地方建設局浜松工事事務所, 1987, 1988)は図-2.12に示すとおりである。図-2.12は天竜川河口近傍の浜松海岸における波浪観測資料に基づく波浪頻度分布図である。河口部にデルタが発達しているため、河川からの流送土砂は波向にかかわらず、河口左右岸に供給されるものと考えられる。このような沿岸漂砂の主方向は、服部, 鈴木, 佐藤(1974)の調査によっても確認されており、それによると天竜川からの流送土砂が漂砂源となる範囲は浜名湖今切口～弁財天川河口までとされている。

天竜川は富士川, 安倍川, 大井川などと同様に日本を代表する急流河川で、河口部付近での河床勾配は1/1,000～1/500(社団法人日本河川協会監修, 1992)であり、河口まで粗大な礫を運搬している。この多量の流送土砂が漂砂源となってデルタ地形が形成されたものと考えられる。

図-2.13は地形図を用いて天竜川河口部における地形の変遷を示したものであるが、河口部のデルタ地形の頻繁な変化とその安定状態をみると、天竜川からの流送土砂が漂砂の供給源になっていると考えられる。し

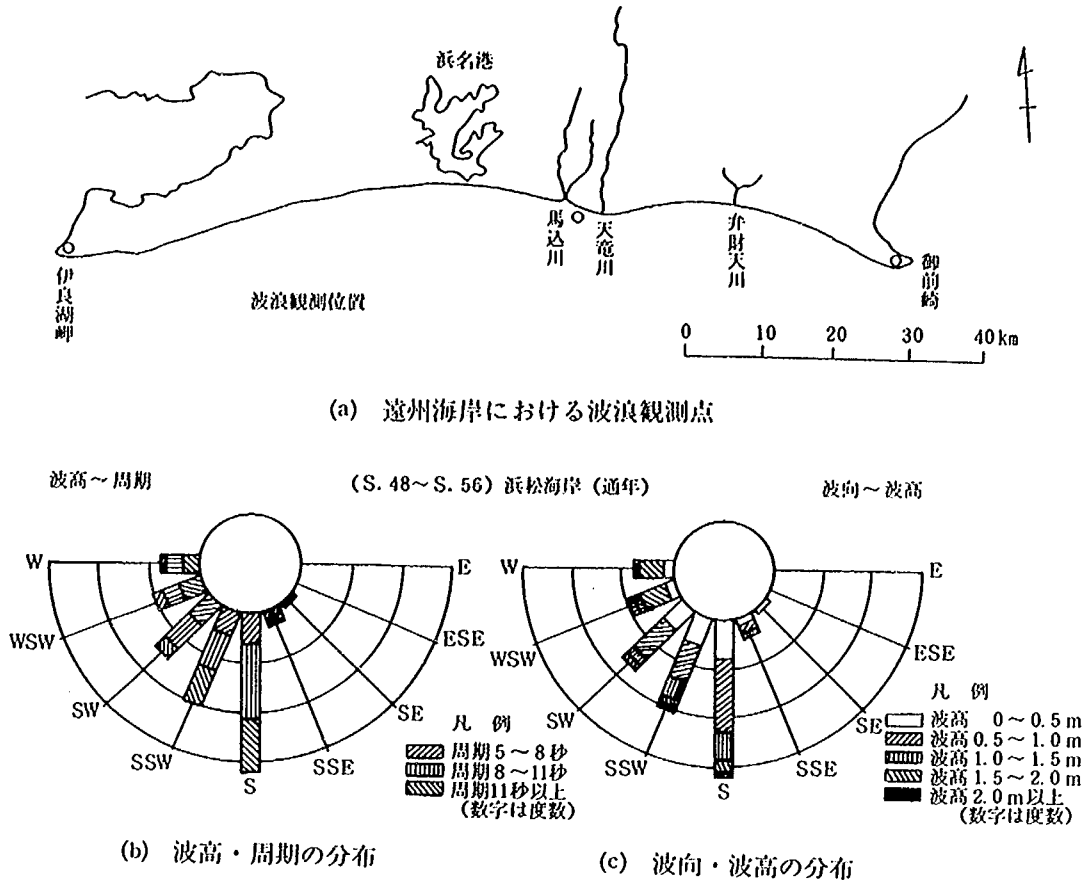


図-2.12 遠州海岸の波浪観測地点と波浪の出現頻度図 (昭和46年～昭和56年)

かし、昭和35年以降は上流部における大規模なダムの建設による生産土砂の打止や、多量の砂利採取による河床低下に伴う掃流力の低下によって、河口からの流送土砂が徐々に減少し、デルタ地形の縮小が生じていると考えられる。図-2.14には1962年および1971年における地形図の比較を示すが、河口デルタの著しい縮小が起っていることでもそれがわかる。また、図-2.15は航空写真による御前崎～静岡、愛知県境までの範囲における、1962年と1969年の汀線位置の比較（建設省中部地方建設局浜松工事事務所，1987，1988）であるが、これから天竜川河口左岸では汀線が前進しているが、右岸で著しく後退し、さらに、その西側約10 kmの間では汀線の大幅な前進が見られる。この右岸側における堆積現象は、天竜川の流送土砂が減少したことにより、右岸デルタにおける堆積土砂が侵食され漂砂となって、さらに西側に流送されたものと考えられる。この現象は1971年まで続いたので河口右岸には離岸堤が施工され、現在に至っている。

つぎに、流入河川が複数の海岸の例としては、新潟海岸をあげることができる。新潟海岸は図-2.16に示すように三面川河口から角田山に至る延長約70kmの

海岸である。この海岸の大部分は背後に砂丘を有する沖積性の砂浜海岸であり、北方より約40km南西部に流域面積約7,710km²の阿賀野川（社団法人日本河川協会監修，1992）が、さらに、南西約6kmの地点に流域面積約11,900km²の信濃川が流入している。この他に土砂を流送する河川としては、荒川、胎内川なども流入している。海岸の形状は加治川から角田山までは海に突き出た三角州を呈しており、加治川から三面川河口までは海に対して凹型の凹弧を描いている。

米襲波浪は図-2.17に示すとおりNNWの波浪が卓越している。この海岸は信濃川、阿賀野川両河川により、背後地から莫大な土砂の供給があり、形成されたものである。その発達過程は、一般の平野では堆積の過程として、前面の浅海がデルタとして埋められていくのに対して新潟海岸の東部では何列もの横列砂丘となって前面の海を埋め、汀線を前進させてきた。また、荒川、胎内川では扇状地が海に接し三角州を持たないので、砂は沿岸流に流されて南へ伸び加治川以南の堆砂形成に寄与している。このように、新潟海岸は著しい土砂供給による汀線前進によって、波浪とバランスを保ってきたと考えられる（建設省河川局海岸

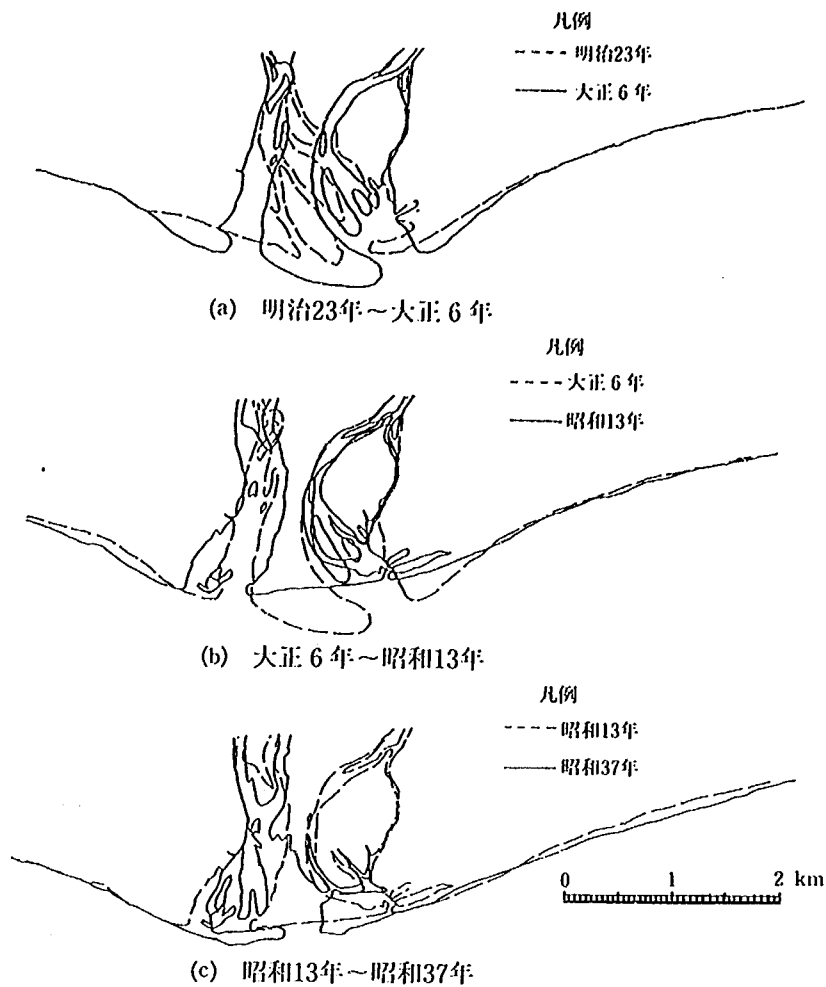


図-2.13 天竜川河口部海岸の地形の変遷

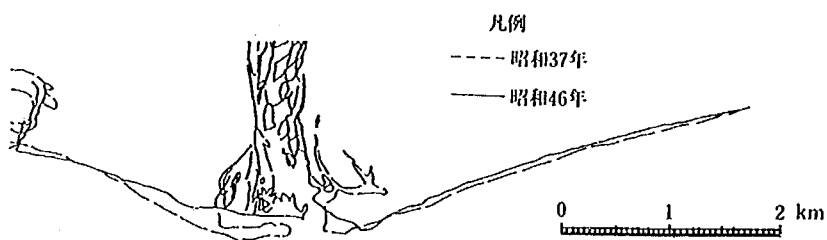


図2-14 天竜川河口部海岸における昭和37年および昭和46年の河口地形の比較

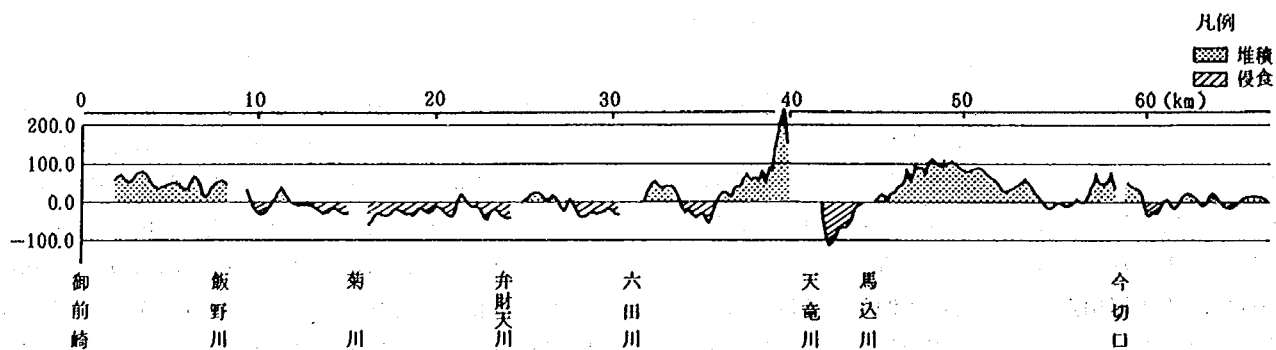


図-2.15 遠州海岸の航空写真による汀線変化 (昭和37年～昭和45年)

課監修, 1981)。しかし, 近年の地域全域にわたる開発の進行や大正11年の大河津分水による供給土砂の減少, さらに, 港湾防波堤の建設による沿岸漂砂の阻止および天然ガス採取による地下水汲み上げを原因とする地盤沈下ともあいまって, とくに信濃川以西の海岸の侵食が目立ってきている。

図-2.18は明治44年(1911年)～昭和22年(1947年)間の約40年間の汀線変化量を示したものである。新潟西港の防波堤の西側での汀線の後退現象および大河津分水路河口部のデルタが, 河口より南側に偏って発達していることなどからこの区域においては南下する漂砂が存在することがわかる。現在, 侵食が著しい地区においては離岸堤および人工リーフによる砂浜の復活と来襲波浪の低減を目的とした事業が進められつつある。

4) タイプD ($Q_R > 0$ で端部および中央部流入型の場合)

わが国においては, 主な漂砂源となる河川が海域の端部および中央部両箇所に入流する例はほとんど無いが, 一方が大河川であり他方は大河川ではないが, 比較的流送土砂量が多いと思われる中小河川が流入し, その供給土砂が漂砂源となる海浜も存在する。この場合も他のタイプの海岸と同様に, 長期的には卓越波向と供給土砂量に見合った海浜形状を形成するが, 波向

の変動がある場合は供給土砂の一部が海域外へ流失することもある。このタイプはタイプBやタイプCの海岸との明確な区分は困難である。

まず, 端部に大河川が流入する例として, 青森県の下北・八戸沿岸の小川原湖海岸があげられる。これは八戸市より六ヶ所村泊までの延長約60kmの海岸であり, その南端には流域面積2,050km²の馬淵川が流入している(社団法人日本河川協会監修, 1992)。また, 北端の泊から南方約23kmの地点には小川原湖からの流出河川である高瀬川が流入している。

下北・八戸海岸における波浪観測結果は図-2.19に示すとおりである(橋本, 宇多, 1979)。卓越波向はENE, E, ESEの三方向であることがわかる。図には沿岸の海底地形も示してあるが, 鷹架沼より八戸までの汀線はN軸に対して反時計回りに傾斜しているため, 沿岸方向のエネルギーフラックスは北向成分の方が大きくなり, 沿岸漂砂の卓越方向は北向きとなる。この海岸は, もとは複雑な沈水地形であったものが, 河川からの流送土砂が漂砂となって運搬され形成された砂州によって閉塞され, 現在のような地形になったと言われる(佐藤, 河西, 田中, 入江, 1972)。前述したように, 漂砂源となりうる流送土砂を供給する河川の1つは馬淵川であり, ついで高瀬川が考えられる。両河川より流送された土砂は, ENEの波浪のときは

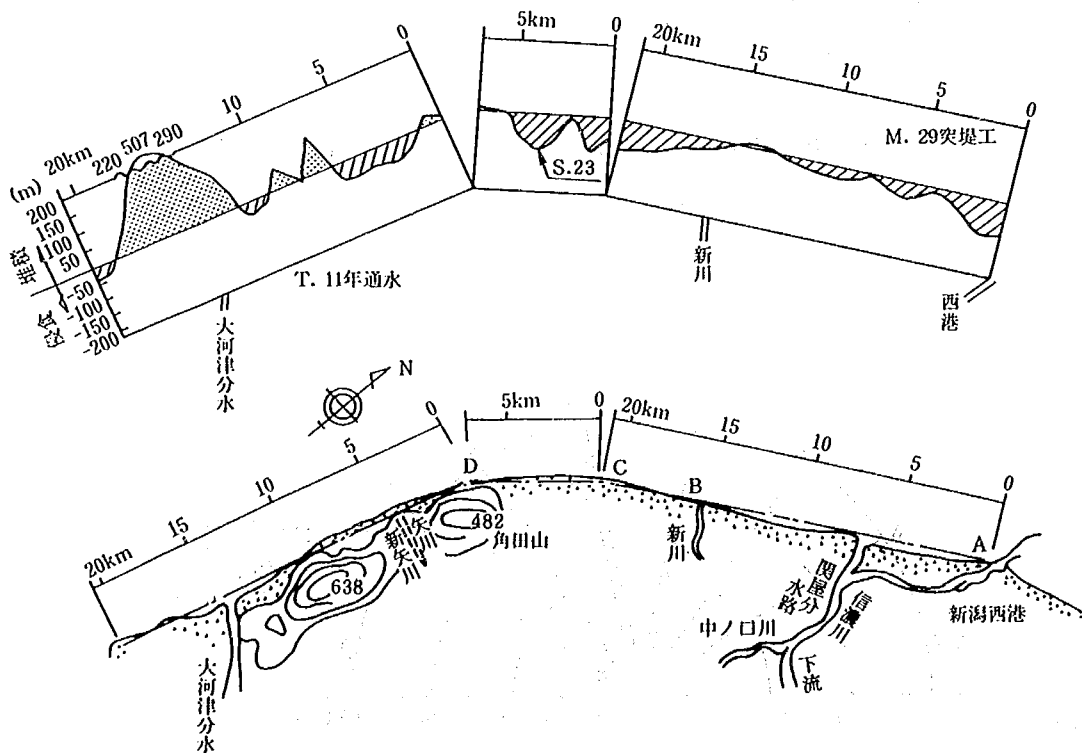


図-2.18 新潟海岸における汀線変化図(明治44年～昭和22年)

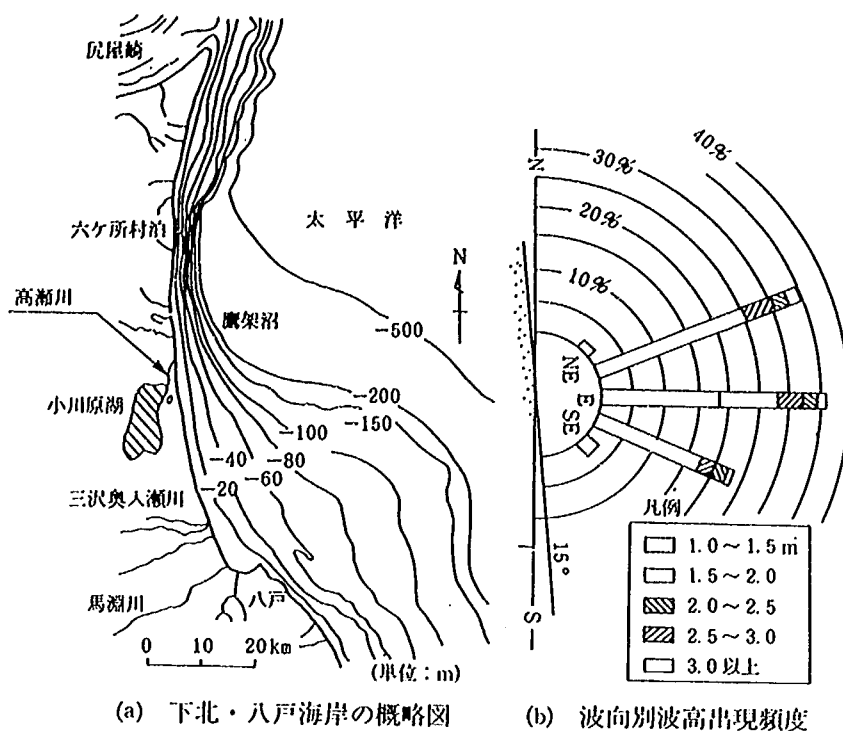


図-2.19 下北・八戸海岸における波向別波高頻度

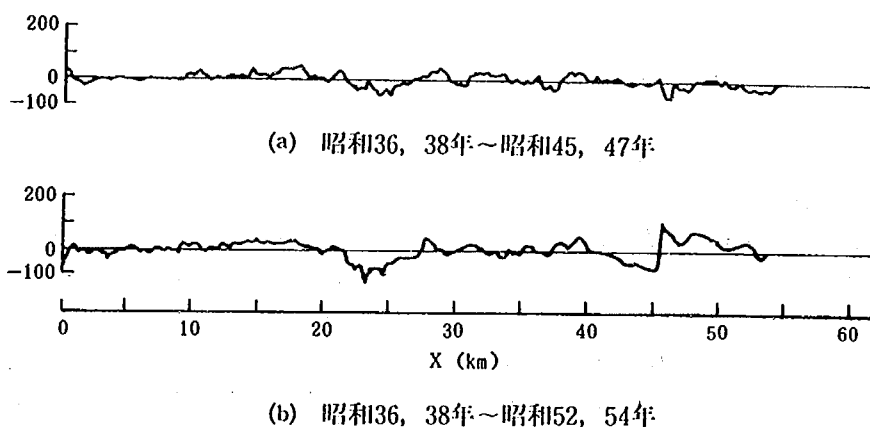


図-2.20 航空写真に基づく下北・八戸海岸における汀線変化図

南向きに、E, ESE の波浪のときは北向きに移動し海浜を形成したものと思われる。しかし、1950年の馬淵川河口の付け替えや、1965年以降の八戸港の整備開始に伴い、馬淵川は港内に流入する河川となり、海域への供給土砂が激減したため汀線の後退が生じている。また、八戸港北方約15kmの地点に1971年以降三沢漁港が建設されて漂砂が阻止され、さらに汀線の前進後退が著しくなっている。図-2.20は航空写真による汀線変化量の沿岸分布を示したものであり、前述したことが確認できる。これまで侵食対策として、消波工や緩傾斜護岸などを施工してきたがその効果は得られていない。

つぎに、海域の中央部に比較的流送土砂の多い河川が流入し、端部に少量の流送土砂をもたらす河川が流入する海岸としては、相模湾に面する湘南海岸があげられよう。これは東は鎌倉市の稲村ヶ崎から西は小田原市の早川河口までの延長約30kmの海岸であるが、この範囲の中にさらに江ノ島と大磯港という岬部に相当する海浜変形の境界条件を有している。海岸の中央部には流域面積1,680km²の相模川(社団法人日本河川協会監修, 1992)が流入し、西側の端部の近傍には酒匂川、さらに西端部には早川が流入する海浜である。湘南海岸の東寄りに位置する湘南港における風向風速(建設省河川局海岸課監修, 1981)は図-2.21に示す

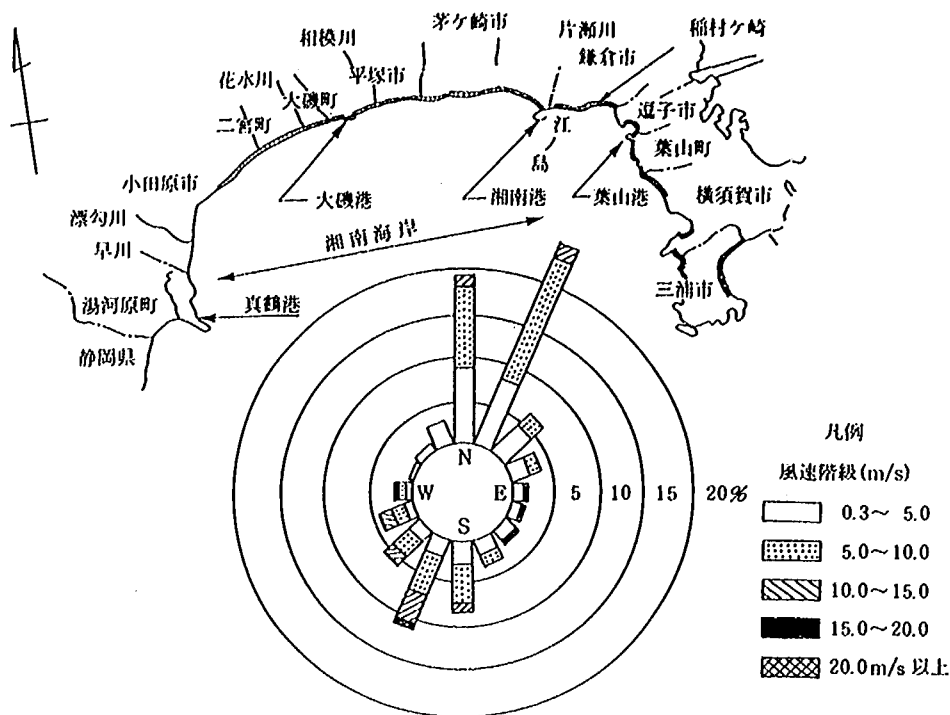


図-2.21 湘南海岸における沿岸地形の概要と風統計

とおりであり、海風としてはS, SSW, SWの3方向の風が顕著である。相模川はその流路をめまぐるしく変えており、現在のように相模湾に流入するようになったのは、およそ3万年ぐらい前からと言われている。当時は、現在の流路よりも東側に位置していたが、多摩丘陵には隆起軸があり、これと平行に現在の流路に沈降軸があったため、徐々に西進してきたと言われる。相模川、酒匂川ともに、流域面積がさほど大きくないため流送土砂量は前述してきたような河川に比べて多量とは言いがたいが、松本、飯塚（1986）は相模川は河口から東側の海岸に対する漂砂源となっており、酒匂川は西湘区域の主な漂砂源と考えられるとしている。

相模川は、明治初期に横浜市の上水道供給源としての開発がなされたように、早くから神奈川県の水資源としての開発が計画され、1938年から開始された相模ダム建設を中心として、相模川河水統制事業などの大規模な水源開発および治水事業が進んだ。このためこれらの河川から砂利採取が行われ、河床の急速な低下が生じてきた。このような人為的な行為による流送土砂の減少と、海浜部に施工された構造物による漂砂の阻止により汀線後退が顕著になってきている。図-2.22は地形図より求めた汀線変化であるが、1954年以降は最大で100m程度の汀線後退を示している。

5) タイプE ($Q_R > 0$ で端部開放型の場合)

このタイプは、タイプA～Dのうち境界の一方の端

部が岬などによって形成されているものではなく、たとえば砂嘴のような開放型の海岸である。河川の流入位置は、開放型の境界とは反対側の岬部に近いところにあるのが一般的である。形状的にはタイプCと同様に、河川からの流送土砂が波浪条件と海岸形状によって規定され、沿岸漂砂量より大きい場合は河口デルタが形成されるが、逆の場合は広域的には凹状の海浜形状となる。

波浪特性は、どちらかといえば偏向性があり、沿岸漂砂の方向も卓越性があり、そのため砂嘴が形成される。また、開放型の境界部沖合には海谷などが存在することもあり、ここに漂砂が落ち込む場合もある。このタイプの海岸の形成には、河川からの多量の流出土砂と卓越した方向を有する沿岸流の存在が必要であり、典型的な例として静岡県の静岡市、清水市にまたがる延長約25kmの静岡海岸があげられる。静岡海岸は図-2.23に示すように駿河湾に面し、大崩から三保半島真崎までの延長約25kmの主に砂礫で形成されている海岸である。南西端に位置する大崩から東北方向約5kmの地点に、流域面積約567km²、幹線流路延長約51kmの安倍川が流入している（社団法人日本河川協会監修、1992）。安倍川は大井川、富士川、天竜川と並んで山腹の崩壊による土砂生産の激しい河川であるとともに、河口より上流4.0kmの手越地点における計画河床勾配は約1/210と急勾配河川であるため、洪水時に

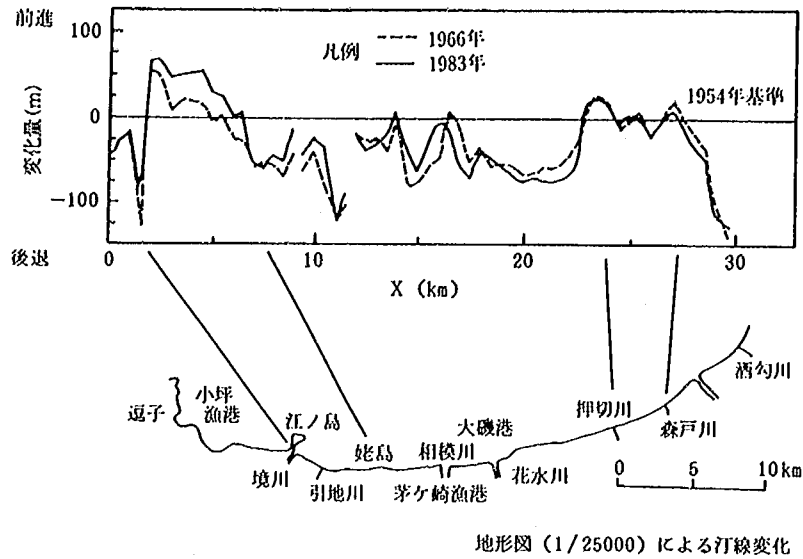


図-2.22 地形図に基づく湘南海岸の汀線変化図 (昭和29年～昭和58年)

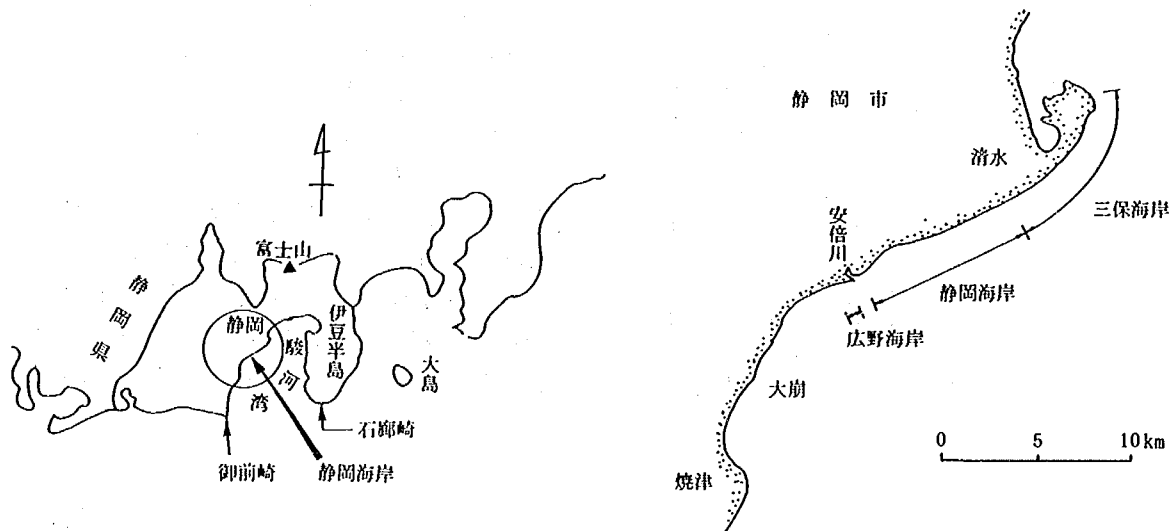


図-2.23 静岡海岸と三保海岸の位置図

は河口から多量の土砂が海域に流送されている。安倍川河口から南西約20kmに位置する大井川港における波向別波浪特性 (建設省河川局海岸課監修, 1981) は、図-2.24に示すとおりである。駿河湾は1,000mの等深線が湾奥まで深く入り込んでいるため、波浪がほとんど減衰せずに直接海岸近くまで押し寄せてくる。また、湾が比較的深くかつ南に向かって広がっているため、駿河湾において最も支配的な波となるのはS～SSEのうねりである。

このような地形および波浪特性のため、洪水時に河川から流送された土砂はおもに漂砂源となり河口デルタを形成し、それ以降の波浪により東北方向へ沿岸漂砂として流送され、現在のような地形を形成したもの

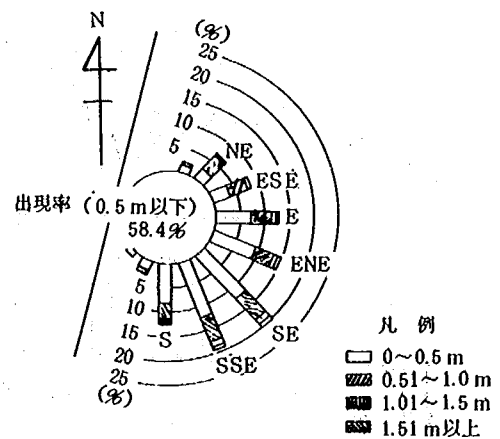


図-2.24 静岡海岸大井港における波向別波高頻度 (昭和44年12月～昭和49年11月)

と考えられる。図-2.25は縄文海進時の静岡海岸の地形である。この後、海面の低下に伴う汀線の前進と安倍川からの流出土砂が、有度山との間を埋めつくし静岡平野を形成し、さらに東方へ少しずつ埋立てが進み清水平野が形成されたと推定される。その後、さらに有度山の海側も埋められ、現在の静岡海岸が形成されたものと考えられる。しかし、昭和41年に安倍川が直轄河川となって以降、山腹崩壊を防ぐための砂防施設が建設されてきたこと、また、多量の砂利採取が行われたことなどにより河川からの流出土砂が減少したことに加えて、昭和40年代から施工されてきたコンクリート製の護岸による反射波の影響も加わって、侵食

現象が顕著になってきている。

図-2.26は峰村(1983)による静岡海岸の汀線変化図である。この図からもわかるように、安倍川河口部の近傍を除けば、昭和44年以降の汀線の後退が著しいことがわかる。しかも、安倍川河口に近い地区ほど、早い時期から侵食を受けており、またその侵食区域が徐々に河口から遠ざかっていることがわかる。このようなことから安倍川からの流出土砂が当海岸を形成したこと、そして供給土砂が減少したことにより生じた汀線後退の現象から、当海岸における漂砂の方向はほとんど一定であることがわかる。

2.2 漂砂海岸の大規模海浜過程

前節では、わが国の大規模な砂浜海岸を実例として、砂浜海岸を特徴づける漂砂系という新しい観点でそれらの分類を試みた。大規模な海浜の形成過程は、わが国の場合ほとんどその形成パターンが類似しており、いわゆる地質時代の地殻変動や海面変動に伴う海岸線の移動に伴い、河川からの流送土砂が堆積して形成された堆積層の陸地化に始まり、沿岸漂砂による漂砂の堆積過程から砂州を形成し、その背後に形成された低湿地が埋没し現在の比較的大規模な砂浜海岸の地形が形成された例が多い。このような海岸の形成過程を考えると、大部分の日本の大規模な海浜は縄文海進以降、近年海岸侵食が顕著になるまでは長期的には堆積性海岸であったと言える。しかし、近年、漂砂の供給源で

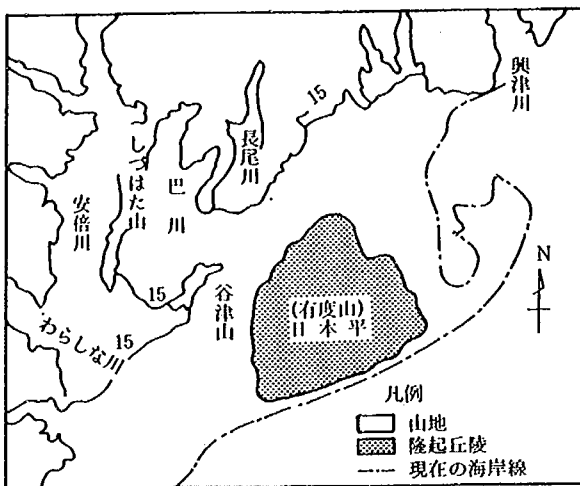


図-2.25 静岡海岸の縄文前期頃(約6千年以前)

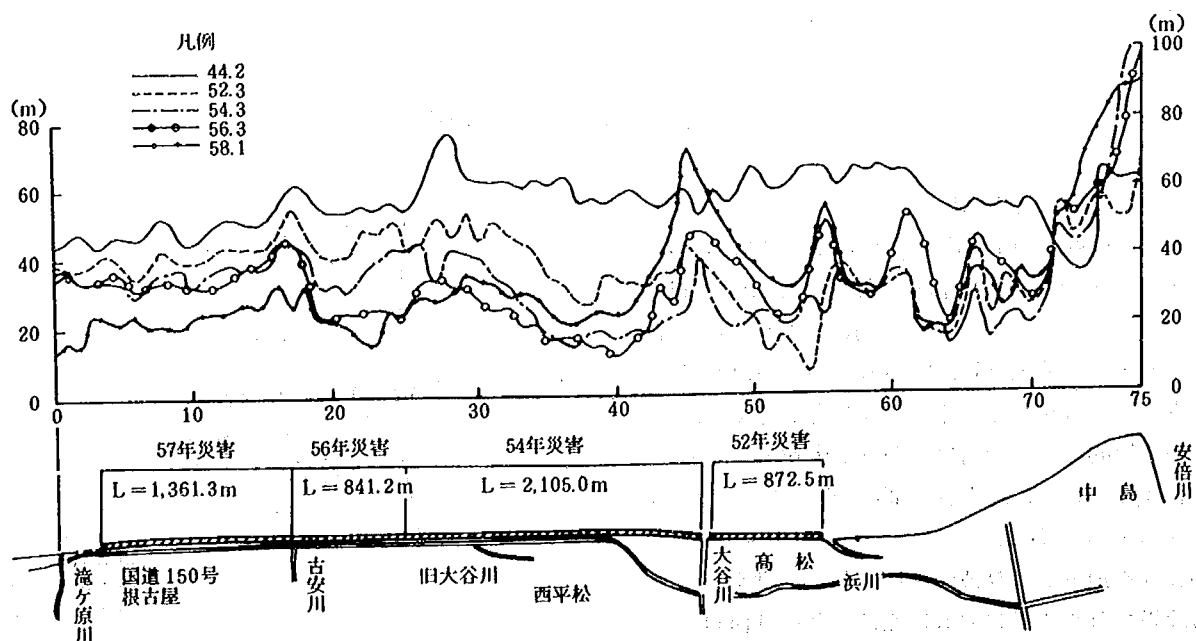


図-2.26 静岡海岸における汀線変化図と海岸堤防・護岸の被災位置

ある海食量や河川に何らかの人為的な行為が行われたこと、海岸構造物が建設されたことなどにより、漂砂の連続性のバランスが崩れ全域的に堆積性の海岸に侵食区域が生ずるなどの変化が起きている。前節では、このようないわば海浜変形の境界条件となる漂砂源の有無と、その位置に注目して分類を試みたものである。分類された砂浜海岸の一般的な特徴は前にも述べたとおりであるが、海浜の形成機構はつぎのように要約されよう。

第1にタイプAの砂浜海岸を除けば、海岸を形成する漂砂系としての土砂の供給は主として河川からの流送土砂であり、場合によってはこれに砂浜海岸の端部を回り込んでくる海域外からの沿岸漂砂が加わることがある。

第2に海岸は一般的に大規模なため、一部のタイプを除けば主な漂砂源の位置がどこに存在しても米襲波浪の特性によって、沿岸漂砂の向きが変化することが多い。しかも季節変動と場所による変動という2つの変化が生じるが、最終的には汀線形状は海に対して凹状になることが多い。そして海岸への流入漂砂量 (Q_{in}) と流失漂砂量 (Q_{out}) の関係によって、堆積性、侵食性、平衡海岸に分類される。

第3には、主な供給源の位置と卓越する波向の関係によって、2つの主な漂砂源を有する場合はその漂砂源の海岸形成への寄与率がほぼ定まり、卓越する波向の関係によって汀線形状が規定される。すなわち、沿岸漂砂の卓越方向の下手側に寄与率の大きい漂砂源がある場合と、逆の場合では汀線形状が異なることになる。

第4に汀線形状は前述した第3の条件のみで決定されるものではなく、海岸前面の海底地形によっても平面形状が変わる。すなわち、前面の海底勾配が一様でなく、たとえば沿岸漂砂の分布を規定する等深線が特異な分布を示す場合あるいは緩勾配の部分とか浅い部分が存在すると、その背後の沿岸漂砂量は若干減少する傾向を示すので、汀線は前進傾向となる。

そして、第5に、上記のような境界条件と波浪条件に基づき、大規模な海浜は主波浪に対して一定の平面形状を形成し、長期的には安定化する方向にむかっていると考えられる。

前節で述べた各タイプの砂浜海岸は主として、漂砂源となる河川の有無やその位置に基づき分類したものであるが、ここでは各タイプの砂浜海岸における大規模海浜過程として取り上げるべき問題点を明らかにするとともにこれらに対する一般的な考察を行う。

1) タイプA ($Q_R=0$ の場合)

漂砂源としての河川の流入がない海岸であり、主な漂砂源は端部を回って流入する沿岸漂砂や崖の侵食土砂である。一般的に、このタイプの場合は海底地形もゆるやかであり、海谷への漂砂の流出はない。したがって、沿岸漂砂量や漂砂源に変化がない限り、海浜の安定性は続くことになる。とくに、問題となるのは崖海岸の侵食土砂の寄与率が大きい海岸で、崖海岸の侵食対策が実施されれば、供給土砂量が激減し、漂砂源に近い区域に著しい侵食が生じ、その区域が徐々に拡大することになる。このタイプの海岸は、岬部を回って流出する沿岸漂砂が存在しない場合には、堆積性の海岸であったものが平衡海岸に変わることでとなる。そのため、海岸線は主波浪の波向に対して安定な形状に変化しようとし、いわゆるポケットビーチとしての砂浜海岸に近づくであろう。しかし、ポケットビーチに比較して海岸の規模が大きいこと、また、波浪特性の変化に伴って漂砂が生じ、一連の海域の中で堆積域と侵食域を生じつつ、次第に、たとえば土屋、Silvester、芝野 (1974) によるいわゆる静的に安定な海浜形状に近づくものと考えられる。このような海岸の大規模海浜過程としてとりあげるべきことは、1) 米襲波浪の変形特性、とくに卓越波浪が異なる方向から来襲する場合であっても、なぜ沿岸漂砂量がほとんど存在しない砂浜が形成されるのか、2) このときどのような海浜流系が形成され、漂砂が卓越波浪または異常波浪によってその漂砂系からなぜ流出していかないのか、さらに3) そのような波浪、海浜流系の海浜において、漂砂源の究明をして砂浜海岸の全体としての汀線変化あるいは海浜断面形状とその変動が長期的視点からなぜ平衡状態または静的に安定な砂浜を形成できるのかなどについて、それらの実態を究明しなければならない。すでに、土屋、河田、芝野、林 (1975) によってわが国の代表的なポケットビーチとしての砂浜海岸の1つである和歌山県の白良浜の海浜過程はよくこれらの事実を解明している。なお、通常このような海浜過程においては、前述の諸現象に飛砂がある海浜変形の過程が加わる場合が少なくなく、白良浜の場合にもこれが特記事項の1つとなっている。

2) タイプB ($Q_R>0$ で端部流入型の場合)

主な漂砂源となる河川が砂浜海岸の端部に流入する海岸であり、河川が一方の端部に流入する場合と両端に流入する場合が考えられる。一般的にこのような海岸の場合は、漂砂源からの供給土砂が沿岸漂砂として移動し、沿岸漂砂の場所的不均衡により海浜が形成さ

れる。海岸線の形状は、漂砂源と来襲波浪特性により生じる漂砂の沿岸方向分布により規定され、次第に動的に安定な海浜形状に近づくものと考えられる。このとき漂砂の沿岸方向分布は海岸線に沿った波エネルギー分布によって決まるが、沖合から来襲する波浪は海底地形の影響を受けて変形するので、年間の卓越する沿岸漂砂を規定するような波浪の変形に影響を与える等深線が特徴のある形状をしていれば、この等深線の分布によって沿岸漂砂量が規定されることになり、また、沿岸漂砂源の寄与範囲も規定される。しかし、漂砂源に変化があっても、漂砂の沿岸方向分布が変化しない限り漂砂源の地点を最大として侵食が生じ、しかも侵食域は波浪特性によって規定（要求）され漂砂量を供給するため海岸線の後退だけでなく汀線付近の海底勾配も急勾配となっていく。海岸はこのような変化を示しつつ、次第に漂砂源の変化に対応した安定な海浜形状に近づくものと考えられる。このような海岸の大規模海浜過程として取り上げるべきことは、1) 海浜形状は漂砂源の位置、量と来襲する波浪特性によって生じる漂砂の沿岸方向分布によって規定されることが考えられるが、年間の来襲波浪のうち海浜形成に寄与する波浪はどのような特性を有するか、2) この波浪特性が海岸線に達するまでにどのような要因によってどのような変形をし、変形した波浪による波エネルギー分布が海浜形状を表現しているか、さらに3) このような波エネルギー分布によって想定される漂砂源の寄与範囲が現場から得られる資料によって想定される範囲と大差ないかなどについて検討し、汀線および海浜断面の変化を含んだ海岸全体としての変化が長期的視点において動的に安定な砂浜を形成するかなどについて、それらの実態を究明しなければならない。土屋、山下、泉、鳥取（1993）は新潟県の上越、大潟海岸を対象にこのような観点での大規模海浜過程の解明を行い、特に長期の海浜変形を表現する代表波浪特性の特定に成果を見ている。

3) タイプC ($Q_R > 0$ で中央部流入型の場合)

主な漂砂源となる河川が中央部に流入するタイプであり、前述した端部に漂砂源があるタイプBの海岸は、主に海に対して凹型になるのに対して、このタイプは、漂砂源からの供給土砂量が多い場合は両端部と河口部を頂点として2つの凹型を持つ海浜形状となる場合が多い。一般的に、このような海岸において漂砂源からの供給土砂量が多い場合は、河口部を中心として来襲波浪特性によって卓越する沿岸漂砂の下手側に裾野の長いデルタが発達することが多い。海岸地形はタイプ

Bと同様に漂砂源から供給される土砂が、来襲する波浪によって沿岸漂砂となり輸送され形成されていく。ただし、漂砂源が中央部であるので河口部を中心とした左右岸へ漂砂が寄与することとなり、かつ、その寄与率が波向の変化にともない変化することがタイプBと異なる。沿岸漂砂の分布は河口部がピークを示し、河川から離れ端部に向かうにつれ徐々に減少する場合が多い。また、漂砂源から多量の土砂が供給される場合は堆積性の海岸となるが、漂砂源からの供給土砂量が減少すると河口部での侵食が顕著になり、河口部と端部の間に形成されている凹部に漂砂が次第に堆積し、動的に安定な海浜形状に近づくものと考えられている。

なお、河川からの漂砂源としての供給土砂量が少なく、河口デルタを形成しないような海岸の場合の海浜過程は、漂砂が漂砂源である河川の左右岸の海岸に寄与する点以外はタイプBとほとんど同じと考えられる。このような海岸の大規模海浜過程として取り上げるべきことは、タイプBで述べたことに加えて、1) 漂砂源としての河川の左右岸の海岸への漂砂の寄与率と、その範囲が来襲する波浪特性、とくに波向とどのような関係にあり、かつ、どのようにして海浜が形成されるか、さらに2) 河口デルタが発達している海岸において、河川からの供給土砂量が減少した場合、海岸線だけでなく海底地形にも著しい変化が起こると考えられるので、このような変化によって海浜がどのように動的に安定な形状に移行していこうとするのかなどを究明しなければならない。

4) タイプD ($Q_R > 0$ で端部および中央部流入タイプの場合)

このタイプの海岸は前述したタイプBとCの海岸の複合タイプといえる。大規模海浜過程として取り上げるべき問題点は、主な漂砂源となる河川が端部にあるタイプBの場合と、中央部にあるタイプCの場合とは同じである。ただし、海浜を形成する漂砂源が複数であるので、前述した諸問題に加えてこれらの各漂砂源の海浜形成への寄与率とその範囲が、来襲する波浪特性とどのような関係にあるのかを究明しておくことが必要であると考えられる。

5) タイプE ($Q_R > 0$ で端部開放型の場合)

このタイプの海岸は前述したタイプA～Dの各タイプの片方の境界に岬などがなく、開放型の境界となっている海岸である。このような海岸は、一般的には漂砂源となる主な河川の流入位置にかかわらず、来襲波浪の波向は一方向に卓越することが多いため、漂砂の

方向が一定となり、漂砂の下手側に砂嘴が形成される場合が多い。このタイプの海岸は、多量の土砂を輸送する波浪特性を有しているため、漂砂源がわずかでも減少すると波浪特性により輸送される土砂量には変化がないため、現存する海岸の土砂が漂砂源となって供給されることになる。その結果、汀線形状にすぐ変化が現れ、河口部付近を最大とした侵食が生じ、河口部から漂砂の下手側に向けて徐々に侵食域が拡大して行く場合が多い。このタイプの海岸の場合は、砂嘴先端まで沿岸漂砂が存在し、かなりの量の漂砂が砂嘴先端を通過して行くか、または、近傍の海谷へ流失して行くものと考えられる。このような海岸の大規模海浜過程として取り上げるべきことは、タイプBで述べたような問題点に加えて、1) 来襲波浪特性とくに卓越波浪の波向と沿岸漂砂の偏向性との関係、およびどのような波浪特性により海浜を形成する沿岸漂砂量が規定されるのか、2) 開放型境界部から流失する漂砂の量が、海浜の平面形状形成にどのように影響し、また、長期的に平衡状態あるいは動的に安定な砂浜がどのように形成されるのかなどについてその機構を解明しなければならない。

3 大規模海浜過程の予測

地理的および地形的にも、また、気象的にも高波浪に見舞われ易い宿命をもつわが国の海岸のうち、自然に存在する砂浜海岸は、一般に緩やかな勾配をもって陸棚に続き、波浪の持つ莫大なエネルギーを消散させて、それ自身で安定である砂浜海岸を形成してきたが、視点を変えれば、その過程または状態において海岸侵食やその他の海岸災害を防いできたといえる。近年、ウォーターフロントという言葉に象徴されるように、河川流域の開発にとどまらず海岸の沿岸域の高度利用が盛んになってきている。それとともに海岸侵食が国土保全の問題とあわせて自然環境の保全の問題としてもにわかに深刻になってきた。水質の浄化作用に絶大な効果のある砂浜と生態系を維持し、利用・景観上も優れた砂浜海岸の復元をめざした海岸侵食対策が要望されてきている。

自然界に存在する安定した砂浜海岸は、これらの要件を満たす優れたものである。したがって、この安定した砂浜海岸の形成過程と漂砂系の機構を究明し、海岸保全、環境保全のための有効な工法に活用し、砂浜海岸を創成し維持していくことができれば、これに優る侵食対策はないといえる。

ここでは、前節で考察した大規模海浜過程のうち、とくに大規模な砂浜海岸の漂砂系における長期の汀線変化の予測法を提案し、これによって砂浜海岸の形成過程を漂砂系として制御する方法を示し、最終的には安定した砂浜海岸の形成過程を探究・予測するための数値モデルを構築する。まず、海浜変形の主要な外力として、波浪を対象とし、その代表波浪の設定方法について検討し、1ラインモデルに基づく長期的な汀線変化予測モデルを提案する。これは、外力となる波浪の伝播変形現象を表現する数値モデルと、2次元的な汀線変化を予測し表現する数値モデルとからなる。そして、構築した長期的汀線変化予測のための数値モデルの適用性について、海岸地形の形成のみならず、代表波浪の変形、長期汀線変化の予測の観点からそれぞれ検証する。

3.1 代表波浪

わが国のほとんどの海岸がそうであるように、大規模海浜過程の主要な外力はその海浜に來襲する波浪であると考えられる場合には、一般的に、不規則で多様な波浪場の特徴を知ることにより、その海浜過程に寄与するいくつかの沖合における代表波浪成分を抽出する。そして当該大規模海浜過程としての長期の汀線変化の予測は、その代表波浪成分を外力とした海浜過程モデルを用いることにより行うことになる。

その代表波浪を推定する手懸かりとして、従来よりよく使われている手法は、沿岸域、とくに既存の港湾で観測された波浪観測資料を用いることである。この沿岸（一般的には浅い海域）での波浪観測資料は、通常、逆屈折計算と呼ばれる方法で、屈折による波形の変形のみを考慮して Snell の法則に従い、沖合の波浪場に変換される。

この方法にはいくつかの問題点を指摘することができる。まず、波浪が沿岸域に到達するまでには、すでに海底地形の影響により屈折し、変形しているので、波浪の侵入方向はほとんど汀線に垂直であり、沖合における波浪の波向がかなり違っても沿岸域においては、極く小さな波浪の伝播方向の違いとしてしか現れない。それにもかかわらず、通常の波浪観測資料における伝播方向は16方位以上に分類されていることは少ないので、逆屈折計算により算出された沖合の波浪場言い替えば沖波としての波向は、沿岸波浪観測資料の誤差を増幅していることになる。

つぎに、1つの大規模な海浜において波浪観測を実施している港湾やその他の観測所は、せいぜい1また

は2カ所である。ところで、波浪は浅い海域に到達するとその付近の局所的な海底地形に応じて、屈折だけでなく回折し、さらに海底摩擦による減衰などを経て複雑な変形を受ける。すなわち、個々の沿岸波浪観測資料には、1つの大規模な海浜の一般的な波浪の特徴だけでなく、その観測地点の局所的な海底地形に基づく波浪変形の結果が反映されている。それゆえ数少ない観測地点において、しばしば欠測の多い沿岸波浪観測資料のみから沖波としての代表波浪を推定することには、かなりの誤差を伴うことに注意する必要がある。

ここでは、沖合の代表波浪を推定する1つの方法として、船舶による外洋波浪の長期観測資料を用いる方法について述べる。WMO（世界気象機構）の決議「世界気候図帳の海洋編刊行を目的とする海上気候一覧表と資料収集のための国際協定」に基づいて、世界の海を10海区に分割し、9ヶ国がそれぞれ担当海域を受け持つ海上気象統計を作成する国際気象統計業務が実施された。わが国の担当海域は赤道から北緯43°まで東経120°から西経170°までとなっており、1952年以降、気象業務法に定められた船舶（1600トン以上）が離岸距離50カイリ以遠を航行する場合には気象観測通報を行っている。このような海洋気象観測資料のうち、

1964年から1973年の10年間の資料を解析したのが、「北太平洋の風と波の統計図表」（社団法人日本造船研究協会、1980）である。対象海域を図-2.27のようにさらに小海区に分割し、それぞれについて統計解析を実施している。このうちE05Sが、後述するような長期汀線変化の予測モデルを適用するモデル海岸とした、鹿島灘海岸沖合を含む海域となっている。

この海域の月別平均波高、季節別平均波高、通年波高波向統計をそれぞれ表-2.1、2.2および2.3に示す。

表-2.1 鹿島灘海岸沖月別平均波高

月	1	2	3	4	5	6
平均波高 (m)	1.87	1.68	1.68	1.67	1.70	1.52
月	7	8	9	10	11	12
平均波高 (m)	1.52	1.55	1.79	2.09	1.93	1.74

表-2.2 鹿島灘海岸における季節別平均波高

季 節	春	夏	秋	冬	通年
平均波高 (m)	1.81	1.57	2.00	1.76	1.72

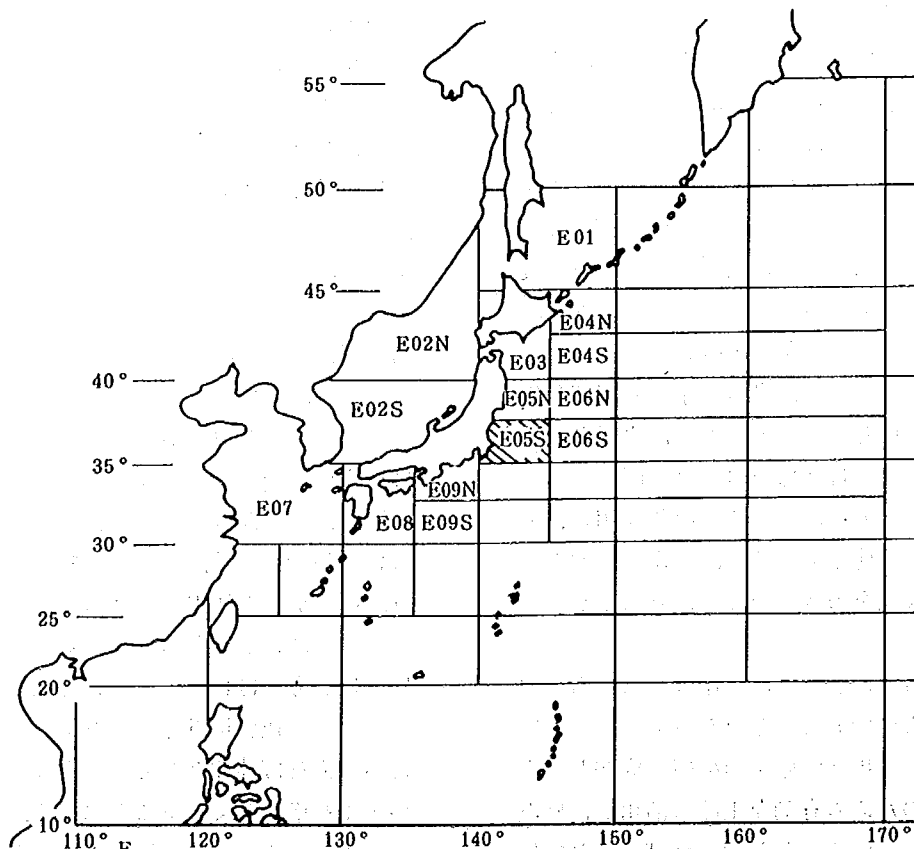


図-2.27 WMOの協定に基づく北太平洋海域の風・波の観測区域

表-2.3 鹿島灘海岸沖における通年波高波向の出現頻度

波高 (WH)	波向 (WD) 90° (N) 60° 30° 0° (E) -30° -60°						(%)
CALM							3.8
~0.75m	1.5	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	7.5
0.75~1.75	4.0	5.0	5.0	3.3	2.3	2.3	21.9
1.75~2.75 (2.21)	2.5	2.5	2.8	2.2	1.3	1.6	12.9
2.75~ (3.37)	1.9	1.9	1.6	1.3	1.1	1.1	8.9

表-2.4 鹿島港および常陸那珂港における観測波浪の特性

(a) 鹿島港の場合 (1989~(1990) (%)

	春	夏	秋	冬	通年
NNE	—	—	—	—	—
NE	3.1	4.3	0.6	4.6	3.2
ENE	36.9	28.1	6.6	30.0	23.7
E	51.9	43.8	34.5	45.2	42.8
ESE	6.9	21.5	54.6	19.3	28.3
SE	1.6	2.3	3.8	0.9	2.3
SSE	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—
波高2.0以上	24.4	15.6	7.5	17.6	15.3

(b) 常陸那珂港の場合 (1985~1991) (%)

	春	夏	秋	冬	通年
NNE	0.1	0.1	—	—	—
NE	0.3	0.1	—	—	0.1
ENE	10.9	7.3	2.6	5.5	6.3
E	58.8	34.0	24.7	39.4	37.4
ESE	26.5	47.8	58.7	47.8	46.8
SE	2.4	9.0	13.9	7.2	8.7
SSE	0.5	0.6	0.1	—	0.3
S	0.5	1.1	—	—	—
波高2.0以上	9.8	12.5	5.2	13.0	10.0

表-2.3通年波高および波向の出現頻度表において波高1.75m以上の確率は21.8%であり、表-2.4に示す鹿島港における波浪観測資料の波高2m以上の確率15.3%および常陸那珂港における観測資料の波高2m以上の確率10.0%に比べてやや大きめである。ちなみに、鹿島港および常陸那珂港の波浪観測箇所（水深25m程度）の浅水係数 K_s は周期5秒で1.0、周期10秒で0.91である。したがって、この外洋波浪資料から波高1.75m未満の波浪成分は、全波浪エネルギーに比し小さいので、波高1.75m以上のものを対象とすれば、岬などの特殊な地形を除いて沿岸で波高2m以上の波浪を対象とすることができたと考えられる。

こうして抽出した波浪の累計による継続時間は1年当たり

$$\text{継続時間/年} : 365.25 \text{日} \times 0.218 = 79.6 \text{日}$$

となり、波高2mの波浪の米襲継続時間として実用上差し支えないと言える。そこで、表-2.3の中の点線で囲んだ12種類の波高と波向の組み合わせをもつ代表成分波を考えることにする。すなわち、2つの波高の範囲1.75~2.75m および2.75m以上のそれぞれの代表波高の波高分布が Rayleigh 分布

$$P(x) = \left(\frac{\pi}{2}\right) x \cdot \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4}\right) x = \frac{H}{H} \quad (2.1)$$

となることをもちいれば、波浪エネルギーの平均は

$$\begin{aligned} \langle H \rangle^2 &= \frac{\int_{H_1}^{H_2} H^2 P\left(\frac{H}{H}\right) dH}{\int_{H_1}^{H_2} P\left(\frac{H}{H}\right) dH} \\ &= \frac{4}{\pi} \bar{H}^2 \frac{(y_1+1)e^{-y_1} - (y_2+1)e^{-y_2}}{e^{-y_1} - e^{-y_2}} \quad (2.2) \end{aligned}$$

ここに H_1 および H_2 はそれぞれ波高範囲の下限と上限であり、は平均波高である。また y_1 および y_2 は次式に定義される。

$$y_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H_1}{H}\right)^2, y_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H_2}{H}\right)^2 \quad (2.3)$$

したがって、波高範囲が $H_1=1.75\text{m}$ および $H_2=2.75\text{m}$ であれば、その平均波浪は $H=1.72\text{m}$ であるので、エネルギー平均としての平均波高は表-2.3に示すように $\langle H \rangle = 2.21\text{m}$ となる。同様に、波高範囲が $H_1=2.75\text{m}$ および $H_2=\infty$ では $\langle H \rangle = 3.37\text{m}$ となる。

さらに、表-2.5に示す波高と周期の相関関係に基づき、周期の観測結果を9秒以下と10秒以上の2つのグループに分けて、それぞれの代表周期は波高範囲

表-2.5 鹿島灘海岸沖における波高および周期の発生

データ平均: 1.81m

データ数: 24,791

周期S 波高 m	~ 5	6 ~ 7	8 ~ 9	10~11	12~13	14~	CALM	合 計
0.00~	2,875	107	51	50	14	7	154	3528
0.75~	7,072	1,992	802	145	119	78		10,208
1.75~	2,541	2,103	1,173	256	125	90		6,288
2.75~	626	988	828	198	116	43		2,799
3.75~	124	306	408	111	72	38		1,059
4.75~	19	60	127	49	38	13		306
5.75~	9	27	40	20	19	5		120
6.75~	4	50	44	12	17	7		134
7.75~	4	4	6	4	14	5		37
8.75~	3		3	4	3	3		16
9.75~	1	2			2	1		6
10.75~					1			1
11.75~			1	2		1		4
12.75~								
13.75~						1		1
14.75~								
CALM							554	554
合 計	13,278	5,639	3,483	851	540	292	708	24,791
波高最大値	10.00	10.00	12.00	12.00	11.00	14.00	0.00	14.00

(1.75~2.75m, 2.75m 以上) ごとに観測された周期 (5秒以下は5秒, 6~7秒は6.5秒, 8~9は8.5秒, 10~11秒は10.5秒, 12~13秒は12.5秒, 14秒以上は14秒とした) の観測数で重み付きの平均をとることとした。代表周期を求めるための波高範囲と周期範囲の区分は表-2.5中に点線で示してある。

こうして、つぎのような代表周期を得て、波高と波向の組み合わせに対応する分配率に、さらに寄与確率を乗じてつぎのような代表波浪を指定することにする。

- 1) 代表波浪波高; 2.21m;
T1=6.2秒および寄与確率93%
T2=11.7秒および寄与確率7%
- 2) 代表波浪波高; 3.37m;
T1=7.0秒および寄与確率82%
T2=11.7秒および寄与確率18%

こうして沖波から入射する代表波浪は 波高について2種類、波向について6種類および周期について2種類の組み合わせとして、合計24ケースの合成として与えられることになる。具体的には、たとえば、波高3.37m, 波向-30° および周期11.7秒のケースの入射沖波の年間継続時間は、 $365.25\text{日} \times 24\text{時間} / \text{日} \times 0.011 \times$

$0.18 = 17.4\text{時間}$ により、17.4時間と推定し、評価される。

3.2 長期的汀線変化予測モデル

現在、海浜変形を表現する数値モデルは一般に海岸線変化モデルと3次元海浜変形モデルの2つに大別される (本間・堀川, 1985)。海岸線変化モデルは汀線変化モデルなどとも呼ばれ、その名のとおりに、海浜変形を海岸線位置の時間的变化によって代表させ、その変化を基本的には沿岸漂砂量の海岸線に沿う分布から予測する手法である。したがって、沿岸漂砂量の算定において必要となる波浪場の計算においても、海岸線に沿っての碎波波高や波向の評価が主たる対象となる。海岸線変化モデルとして最もよく用いられているのはいわゆる1ラインモデルであるが、沖方向漂砂の存在を考慮してそれを発展させた2ラインまたはマルチラインモデルなども提案されている。これに対し3次元海浜変形モデルは対象海浜全域にわたって波浪や海浜流場を計算し、それらより漂砂量の空間分布を求め、それを海浜変形の連立方程式に代入して3次元的な海浜地形の時間変化を予測するモデルである。このモデルは平面2次元モデルあるいは水深変化モデルなどと呼ば

れることもある。これら2種類のモデルは、それぞれ長所と短所をもっているため、予測の目的や対象により使い分ける必要がある。ここでは、対象とする海岸の規模が比較的大規模であり、また予測の対象が長期の汀線変化であることから、海岸線変化モデルを用いることにする。ここで使用する海浜変形予測モデルはいわゆる1ラインモデルであり、代表波浪の各成分の沖側境界から砕波地点までの波浪伝播変形計算と、その結果得られる汀線に沿っての砕波波高と砕波角から推定される沿岸漂砂量の収支を用いて海浜変形の連立方程式から汀線変化を計算するものであるが、とくに長期の汀線変化の予測が推定できるようにその代表波浪の推定法と汀線変化の計算法に特徴がある。

(1) 波浪の伝播変形計算

ここで使用する波浪の推定、変形計算の基礎方程式はいわゆる緩勾配方程式 (mild-slope equation) であり (Berkhoff, 1972), その解法は Ebersole, Cialone, Prater (1986) に概ね準拠して、若干の工夫をしたものを用いる。

まず、緩勾配方程式が次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(cc_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(cc_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \phi = 0 \quad (2.4)$$

ここに、 x 軸はほぼ汀線に平行な座標軸、 y 軸はそれに垂直な沖へ向かう座標軸、 c は波の位相速度、 c_g は群速度および ω は角速度である。さらに、波の速度ポテンシャル ϕ を絶対値 a と位相 s に分けて、次式が与えられる。

$$\phi = a \exp(is) \quad (2.5)$$

ただし進行波を仮定できる場合には、次式から与えられる。

$$a(x, y) = gH(x, y) / 2\omega \quad (2.6)$$

この式 (2.6) は進行波のポテンシャルの振幅であり、 $s(x, y)$ は位相に対応する。ここに、 g は重力加速度、 H は波高である。式 (2.6) を (2.4) に代入してその実部と虚部をとると、それぞれ次式のようになる。

$$\frac{1}{a} \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{1}{cc_g} (\nabla a \times \nabla (cc_g)) \right) + k^2 - |\nabla s|^2 = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \times (a^2 cc_g \nabla s) = 0 \quad (2.8)$$

式 (2.7) と (2.8) が、緩やかな勾配の海底上を進行する屈折と回折による波の変形を表している。図-2.28に示すように波の進行方向が x 軸の正の方向から反時計回りに θ の角度とすると

$$\nabla s = |\nabla s| \cos \theta \vec{i} + |\nabla s| \sin \theta \vec{j} \quad (2.9)$$

$$\nabla x \nabla s = 0 \quad (2.10)$$

の関係が成立するので、 $\vec{i}$, $\vec{j}$ はそれぞれ x および y 方向の単位ベクトルとして次式が与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (|\nabla s| \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial y} (|\nabla s| \cos \theta) = 0 \quad (2.11)$$

同様に式 (2.8) は次式のように変形される。

$$\frac{\partial}{\partial x} (a^2 cc_g |\nabla s| \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (a^2 cc_g |\nabla s| \sin \theta) = 0 \quad (2.12)$$

このエネルギー保存則式 (2.12) と式 (2.7) および (2.11) により、 $|\nabla s|$, θ および a が計算される。進行波の場合には、これらの変数の変化する特徴的長さは波長よりもずっと大きいので、これらの微分方程式を離散化する際格子間隔 (Δx , Δy) は波長よりも大きくすることができる。

つぎに、砕波帯内での波の変形について述べる。砕波条件は、次式による Munk の条件を用いる。

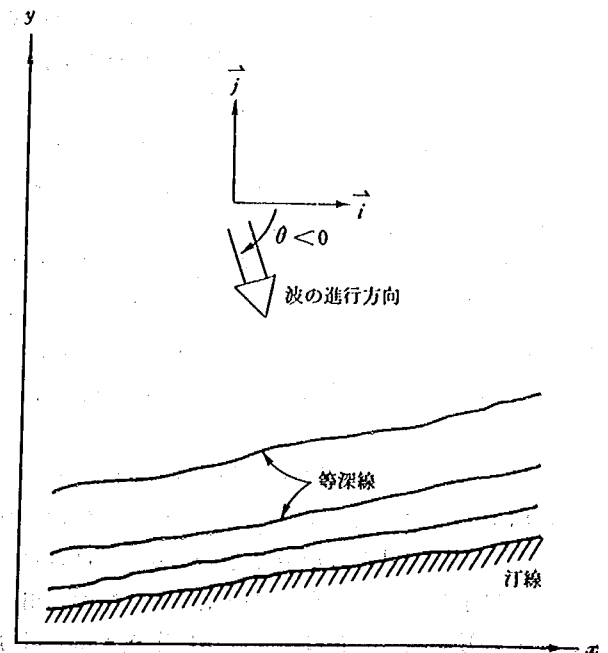


図-2.28 汀線および波向線と座標系

$$H_b = 0.78 h_b \quad (2.13)$$

ここに、 H_b は砕波波高および h_b は砕波水深である。これに対応して、砕波帯内では砕波減衰を考えるために、式 (2.8) の右辺に砕波による減衰項を加え、次式のように表す。

$$\nabla \times (a^2 c c_g \nabla s) = \frac{-\kappa}{h} \left(a^2 c c_g |\nabla s| - \left(\left(\frac{g}{2\omega} \right)^2 H s^2 c c_g |\nabla s| \right) s \right) \quad (2.14)$$

ここに、 κ は砕波による減衰率で実用上 $\kappa = 0.2$ とし、また添え字 $()_s$ は、 $()$ 内の物理量の砕波帯内での漸近値を表す。

既往の1ラインモデルを用いる海浜変形シミュレーションの中には、波浪伝播変形計算を単純に Snell の法則に従った屈折計算のみで済ます場合がある。しかし、これでは汀線付近の複雑な平面形状と水深変化の影響を十分に取り入れることができないし、また、海底地形による波の回折効果を考慮することがないので、本計算におけるように、緩勾配方程式 (2.4) を採用するのが一般的になってきた。その場合、沖側境界に境界条件 (波高、波向) を与えて (反射波を無視して)、図-2.29の y 座標の大きい方から順に小さい方に向かって解を求めてゆく。図-2.29で y 座標に対応する節点座標 $j-1$ の解を求めるためには、その1つ沖側の節点座標 j におけるすべての解がわかっている必要はない。その際、1ラインモデルを用いる海浜変形シミュレーションのために必要な波浪伝播変形計算の出力は砕波時の波高と波向のみであるので、砕波後の波浪変形を考慮する必要はないと速断して、砕波帯内の波浪変形を全く考慮していない方法が数多く見受けられる (たとえば、伊藤、谷本, 1971, 1972)。しかし、図-2.29のようにすべての自然海岸は湾曲しており、節点座標 j の海域は砕波帯外の部分Bのみならず砕波帯内の部分AおよびCをも含むので、これらの砕波帯内での波浪場の解も正確に求めておく必要がある。

つぎに、これら基礎方程式の数値解法について述べる。まず、砕波帯外では、式 (2.7), (2.11) および (2.12) を連立して $|\nabla s|$, θ および a を求めるが、これらの式は差分法により以下のように離散化する。なお、用いる格子の番号を図-2.30に示すように定義する。微分方程式に現れる微係数は、 x 方向 (汀線にはほぼ平行) には中央差分、 y 方向 (汀線にはほぼ垂直) には後退差分 (沖

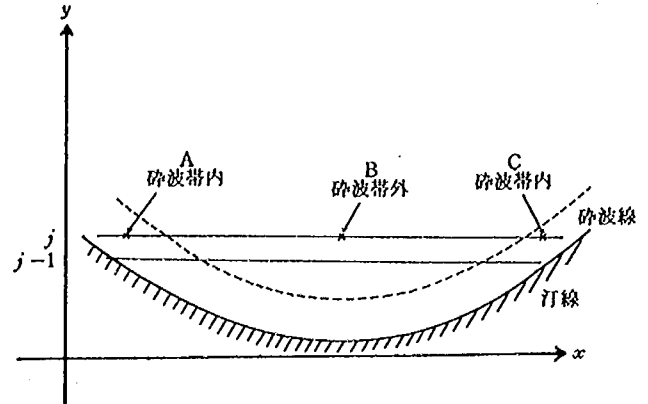


図-2.29 大規模な海浜における長期汀線変化予測モデルの計算範囲と砕波帯の概念図

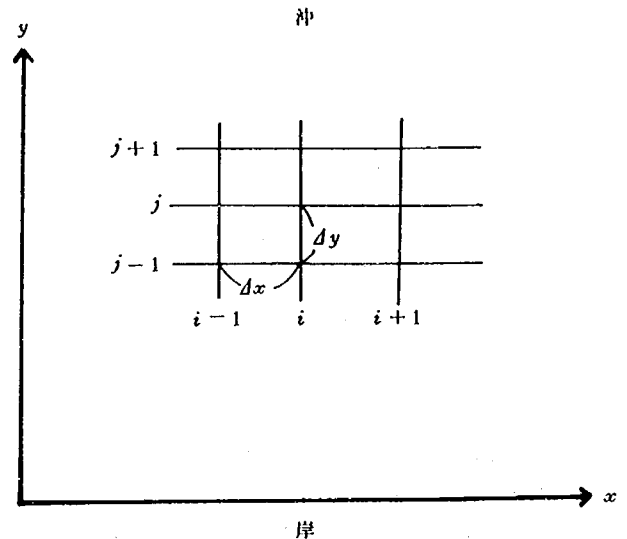


図-2.30 波浪伝播・変形計算における差分格子

合側の値から順次汀線側の値を計算する) を用いてつぎのように、離散化する。

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_{i+1,j} - F_{i-1,j}}{2 \Delta x} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{-3F_{i,j} + 4F_{i,j+1} - F_{i,j+2}}{2 \Delta y} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \frac{2F_{i,j} - 5F_{i,j+1} + 4F_{i,j+2} - F_{i,j+3}}{(\Delta y)^2} \quad (2.18)$$

この式 (2.15~18) により式 (2.7) を離散化すると、次式のようになる。

$$(\nabla s)_{i,j}^2 = \kappa_{i,j}^2 + \frac{1}{a_{i,j}} \left\{ \frac{2a_{i,j} - 5a_{i,j+1} + 4a_{i,j+2} - a_{i,j+3}}{(\Delta y)^2} \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{a_{i+1,j} - 2a_{i,j} + a_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \\
& + \frac{1}{(cc_g)_{i,j}} \times \frac{-3a_{i,j} + 4a_{i,j+1} - a_{i,j+2}}{2\Delta y} \\
& \times \frac{-3(cc_g)_{i,j} + 4(cc_g)_{i,j+1} - (cc_g)_{i,j+2}}{2\Delta y} \\
& + \frac{a_{i+1,j} - a_{i-1,j}}{2\Delta x} \times \frac{(cc_g)_{i+1,j} - (cc_g)_{i-1,j}}{2\Delta x} \} \\
& \quad (2.19)
\end{aligned}$$

この式から任意の点 (i, j) における波動の位相関数の勾配の大きさ $|\nabla s|_{i,j}$ が求まる。式 (2.11) および (2.12) はいずれもつぎの保存式の形をしている。

$$\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

したがって、これを離散化した差分式は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
& \frac{F_{i,j} - F_{i,j-1}}{\Delta y} + W \left(\frac{G_{i+1,j-1} - G_{i-1,j-1}}{2\Delta x} \right) \\
& + (1-W) \left(\frac{G_{i+1,j} - G_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) = 0 \quad (2.21)
\end{aligned}$$

ここに W は重み関数であるが、ここでは 1.0 (後退差分による陰解法) とする。

さらに次式によって i 方向に平滑化をする。

$$F_{i,j} = \alpha F_{i+1,j} + (1-2\alpha) F_{i,j} + \alpha F_{i-1,j} \quad (2.22)$$

ここに、 α は i 方向の隣り合う格子2点と自点を含めた場合に自点の重みを隣り合う2点の倍とした場合の平滑化の係数であり、 $1/6=0.167$ とする。結局、式 (2.20) は次式のように離散化することになる。

$$\begin{aligned}
F_{i,j-1} &= \alpha F_{i+1,j} + (1-2\alpha) F_{i,j} + \alpha F_{i-1,j} \\
& + \Delta y \left[W \frac{G_{i+1,j-1} - G_{i-1,j-1}}{2\Delta x} \right. \\
& \left. + (1-W) \frac{G_{i+1,j} - G_{i-1,j}}{2\Delta x} \right] \quad (2.23)
\end{aligned}$$

この式に、

$$G = -|\nabla s| \cos \theta \quad (2.24)$$

$$F = |\nabla s| \sin \theta \quad (2.25)$$

を代入すると、式 (2.11) は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
\sin \theta_{i,j-1} &= \frac{1}{|\nabla s|_{i,j-1}} \left\{ (\alpha |\nabla s|_{i+1,j} \sin \theta_{i+1,j} \right. \\
& \left. + (1-2\alpha) |\nabla s|_{i,j} \sin \theta_{i,j} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \alpha |\nabla s|_{i-1,j} \sin \theta_{i-1,j}) \\
& - W \frac{\Delta y}{2\Delta x} (|\nabla s|_{i+1,j-1} \cos \theta_{i+1,j-1} \\
& - |\nabla s|_{i-1,j-1} \cos \theta_{i-1,j-1}) \\
& - (1-W) \frac{\Delta y}{2\Delta x} (|\nabla s|_{i+1,j} \cos \theta_{i+1,j} \\
& - |\nabla s|_{i-1,j} \cos \theta_{i-1,j}) \} \quad (2.26)
\end{aligned}$$

これから、点 $(i, j-1)$ における波向の正弦 $\sin \theta_{i,j-1}$ が求まる。同様に

$$F = a^2 A \quad (2.27)$$

$$G = a^2 B \quad (2.28)$$

$$A = cc_g |\nabla s| \cos \theta \quad (2.29)$$

$$B = cc_g |\nabla s| \sin \theta \quad (2.30)$$

を式 (2.23) に代入すると、式 (2.12) は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
a_{i,j-1}^2 &= \frac{1}{A_{i,j-1}} \\
& \left\{ \left[aa_{i+1,j}^2 A_{i+1,j} + (1-2\alpha) a_{i,j}^2 A_{i,j} \right. \right. \\
& \left. + aa_{i-1,j}^2 A_{i-1,j} \right] + W \frac{\Delta y}{2\Delta x} (a_{i+1,j-1}^2 \\
& + B_{i+1,j-1} - a_{i-1,j-1}^2 B_{i-1,j-1}) \\
& + (1-W) \frac{\Delta y}{2\Delta x} (a_{i+1,j}^2 B_{i+1,j} \\
& - a_{i-1,j}^2 B_{i-1,j}) \} \quad (2.31)
\end{aligned}$$

こうして導いた式 (2.19), (2.26) および (2.31) から砕波帯外の各格子点における $|\nabla s|$, θ および a が計算される。

砕波帯内でのエネルギー保存式 (2.14) には砕波による減衰項が付加されているので、その差分式は式 (2.31) の右辺に、次式の減衰項を加えたものになる。

$$\text{減衰項} = \Delta y D^* / A_{i,j-1}$$

ここに、 D^* は、式 (2.14) の右辺の減衰項を差分化したものであり、波の進路にわたって平均するために、格子点 $(i, j-1)$ とその波がやってきた方向の1つ手前の格子点 $(ikey, jkey)$ における値との平均値で評価し、また水深 h も同様に、波の進路にわたって平均することにすれば、 D^* は次式で計算できる。

$$D^* = \frac{\chi}{h} \left\{ \frac{(a^2 cc_g |\nabla s|_{ikey, jkey} + (a^2 cc_g |\nabla s|)_{i,j-1})}{2} \right.$$

$$-\left(\frac{g}{2\sigma}\right)^2 \frac{\gamma^2 h^2 c c_g |\nabla s|_{key, key} + \gamma^2 h^2 c c_g |\nabla s|_{l, j-1}}{2} \quad (2.32)$$

ただし,

$$\bar{h} = \frac{h_{l, j-1} + h_{key, key}}{2} \quad (2.33)$$

これらの差分式は具体的には以下の手順で数値計算する。まず、各格子点における水深と入射波の波高 H_0 、方向 θ_0 、および周期 T を入力し、つぎに分散関係式を用いて水深と周期から各格子点での波数 k を計算し、これを $|\nabla s|$ の第一近似値とする。同時に、位相速度 c も求まるので、Snell の法則 (2.34)

$$\frac{\sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta_0}{c_0} \quad (2.34)$$

を用いて各格子での波向 θ の第一近似値とする。ここに、 c_0 は沖波の位相速度であり、ここでは、等水深線が x 軸に平行であると仮定している。波数 k および波向 θ から、各格子点での屈折係数 K_r および浅水系数 K_s をそれぞれ

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (2.35)$$

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{(1+2xh/\sin 2\theta h) \tanh xh}} \quad (2.36)$$

から求め、これから波高 H の第一近似値を次式から計算する。

$$H = H_0 \times K_r \times K_s \quad (2.37)$$

沖側の境界から、順次これらの初期値を用いて、式 (2.19)、(2.26)、(2.31) の収束解として $|\nabla s|$ 、 θ および a を反復解法により求める。

(2) 汀線変化の計算

海浜変形の連続方程式としての基礎方程式は、沿岸漂砂量の不等流性と汀線変化との連続性から次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (2.38)$$

ここに、図-2.31に示すように、 t は時間、 x は沿岸方向座標、 y_s は汀線の岸沖方向座標、 Q は沿岸漂砂量、 q は沿岸方向座標 x 地点における漂砂量 (流入を正とする)、 D_c は漂砂移動限界水深であるが、実際には海浜変形の限界水深である。

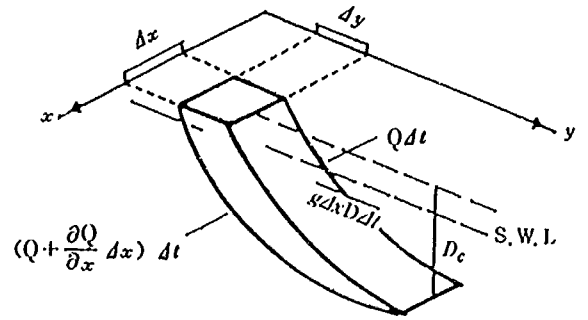


図-2.31 漂砂の連続条件の表示

沿岸漂砂量 Q には、小笹・Brampton (1979) の式を用いる。

$$Q = \frac{k_1 (E c_g)}{(\rho_s - \rho) g (1 - \lambda)} \left(\sin \alpha_b \cos \alpha_b - k_2 \cot \beta \cos \alpha_b \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad (2.39)$$

ここに、 k_1 および k_2 は無次元定数、 ρ_s および ρ は土砂と水の密度、 g は重力加速度、 λ は空隙率、 $\tan \beta$ は海底勾配、 α_b は碎波点での波峰線と汀線のなす角、 H_b 、 E は碎波点での波の波高とエネルギー ($E = 1/8 \rho g H_b^2$)、 c_g は碎波点での波の群速度である。沿岸漂砂量により変化した後、移動限界水深 D_c までの海底の水深 (プロファイル) は Dean (1977) による平衡海浜断面形状に従うものとするが、それは次式で表せるものとした。

$$D = A y^{2/3} \quad (2.40)$$

なお、パラメータ A は勾配の実測値から推定する。

汀線変化を計算する式 (2.38) の中の沿岸漂砂量 Q は、波浪伝播計算から求まる碎波点におけるパラメータから式 (2.39) により決定されるので、計算対象海岸の全区間において、沿岸方向座標 x の地点における漂砂量 Q が正確に与えられれば汀線変化量 $\partial y_s / \partial t$ が求められる。とくに漂砂源となる河川が対象海岸に流入している場合には、河川からの流出土砂量のうち汀線付近に留まって漂砂源として海浜形成に寄与する量を正確に把握して、沿岸方向の座標 Δx の計算格子のどの範囲に寄与するかを正確に与える必要がある。

計算上からは、計算対象海岸の範囲はとくに岬から岬までと言うような地形上の境界条件を含むことは必ずしも必要とはしないが、計算対象範囲両端においても他の点と同様に式 (2.39) から求められる沿岸漂砂量 Q 以外には特別な境界条件を必要としない。ただし、つぎのような場合は沿岸漂砂量 Q を求めるのに式 (2.39) をそのまま適用できない。すなわち、計算対

象範囲内に防砂突堤又は港湾の防波堤などの沿岸漂砂を阻止する構造物が設置されている場合は、その先端における水深 D_g が漂砂移動限界水深 D_c より大きいときにはその構造物により沿岸漂砂は完全に阻止される。もし先端での水深 D_g が移動限界水深 D_c より小さいときは、式 (2.39) で算出される沿岸漂砂量のうち、構造物の先端を通過する沿岸漂砂量の割合はつぎのように表せるものとする。

$$1 - D_g/D_c$$

また、海岸護岸などの汀線の後退を制御するような構造物が設置されている場合には、汀線位置はこの構造物の位置よりは後退しないという条件で計算を実施する。

3.3 予測モデルの適用性

前述した代表波浪と大規模海浜過程としての長期汀線変化予測モデルの適用性を調べるために、若干理想化した海岸地形における長期の汀線変化の予測計算を実施し、代表波浪による漂砂系とそれに伴う沿岸漂砂の沿岸方向分布および汀線変化の実態を調べる。

(1) 対象海岸の地形

長期の汀線変化の予測計算を実施してこの予測モデルの適用性を調べるための対象海岸の地形としては、一般的に論じるために鹿島灘海岸における沖合の等深線の複雑さによる波浪変形の影響を最小限に押えるため海底地形を図-2.32のように平滑化したものを用いる。

(2) 代表波浪の変形

各代表波浪成分の伝播変形の計算は図-2.32の領域について行った。この領域は基線の延長69kmの両側

に1.5kmずつ広げた横(ほぼ沿岸方向、すなわち x 方向) 72km、縦(ほぼ岸沖方向すなわち、すなわち y 方向に) 20kmの長方形である。差分格子間隔は、 $\Delta x = 300\text{m}$ および $\Delta y = 200\text{m}$ とした。沖側境界の水深は、中央付近で約80m、右端付近で約60mであり、周期によっては波長の半分より小さくなるので、沖波から沖側境界までの波浪変形を考慮する必要がある。そのため、沖側境界より以遠の等深線は沖側境界に平行であるとして、浅水係数 K_s および屈折係数 K_r を用いて計算したがそれらの計算手順はつぎのとおりである。

まず、全領域 (20km×72km) で各波浪成分の伝播変形の計算を行う。その際、沖側境界での波浪条件は、沖側境界での等深線がそれより沖合では平行であると仮定し、沖波から Snell の法則に従って浅水変形と屈折を考慮して求める。この計算結果において、沖側境界から8km (陸側境界から12km) の格子線上 (図-2.32中の太線) での計算結果を記憶させておく。汀線変化による影響は、これより沖側の波浪状態には及ばないと考えられるので、それ以後再計算は行わない。汀線変化に伴う水深変化を反映するため、計算領域 (20km×72km) 内の汀線側部分 (図-2.32中の太線より陸側で12km×72kmの範囲) で、各波浪成分の伝播計算を5日ごとに更新する。この計算結果において、水深6mの点(各 x 格子点ごとに、 y 方向に水深を内挿して求める) での計算結果を記憶させておく。さらに、水深6mの等深線と碎波地点の等深線は平行であると仮定し、Snell の法則に従って浅水変形 (浅水係数) と屈折を考慮して碎波位置、碎波波高、および碎波角を求める。これらの結果が求められると、それぞれについて沿岸方向に移動平均する。計算間隔は0.5日とし、その際にも汀線変化による水深変化を反映させることと

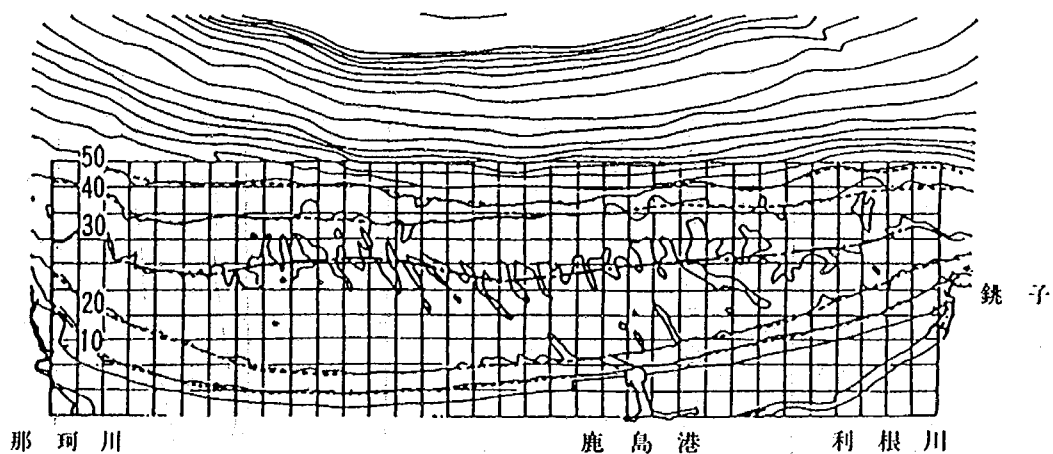
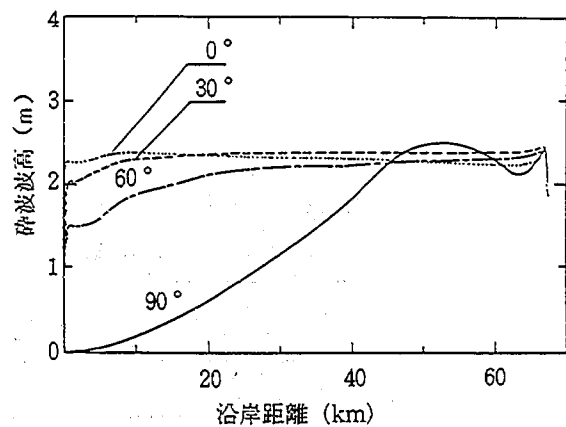
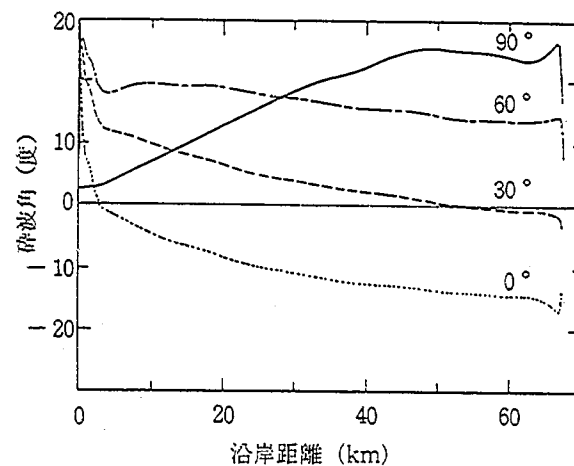


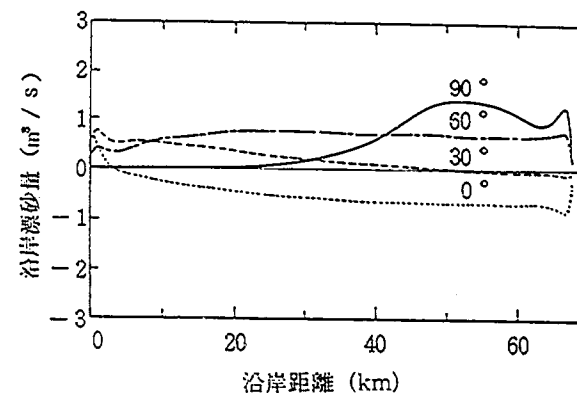
図-2.32 予測計算の対象とする海域の地形と計算範囲



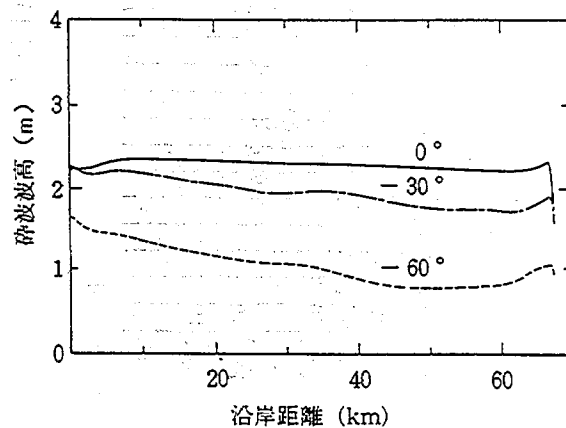
(a-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



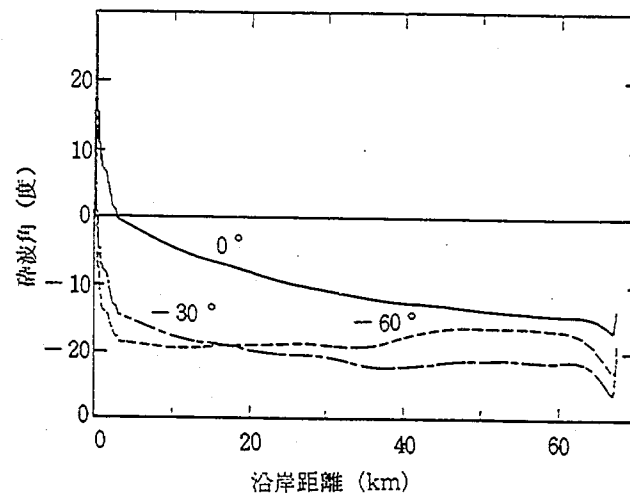
(b-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



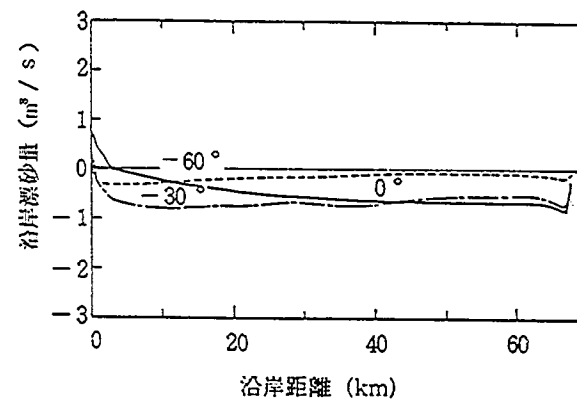
(c-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



(a-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合

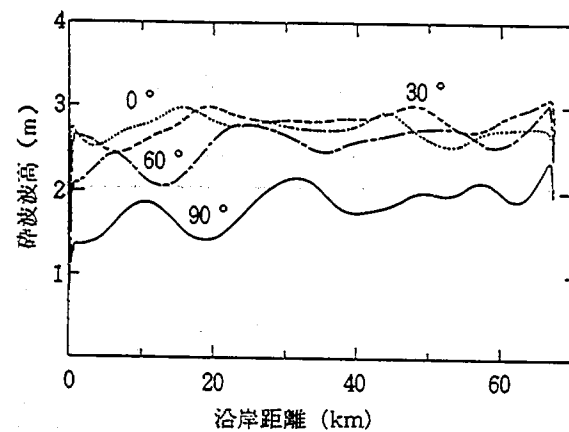


(b-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合

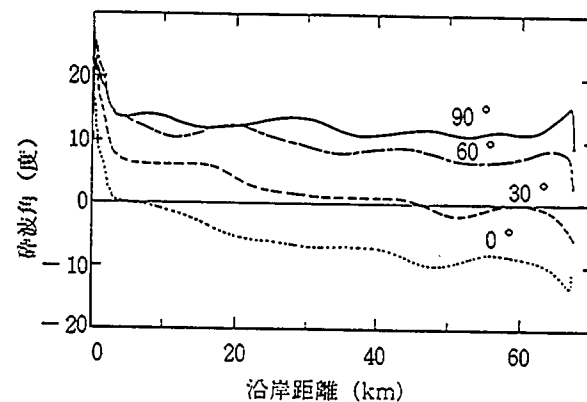


(c-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合

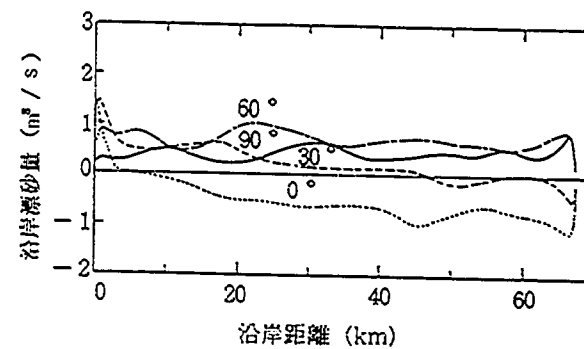
図-2.33 $H_0=2.21\text{m}$, $T_p=6.2\text{s}$ のときの碎波波高の沿岸方向分布



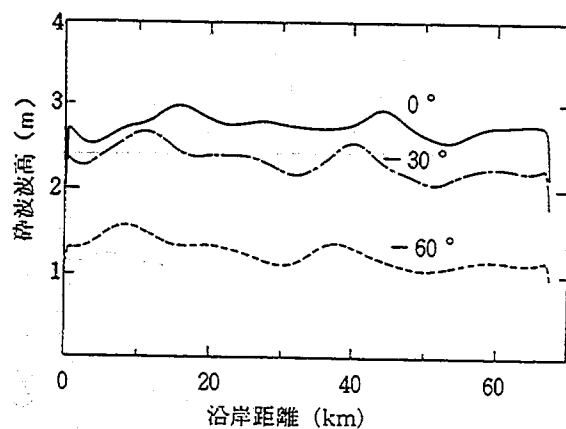
(a-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



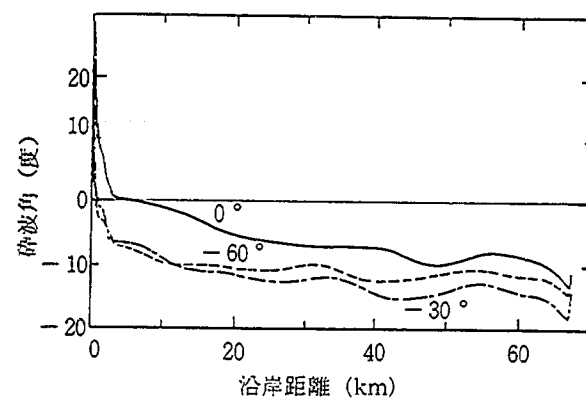
(b-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



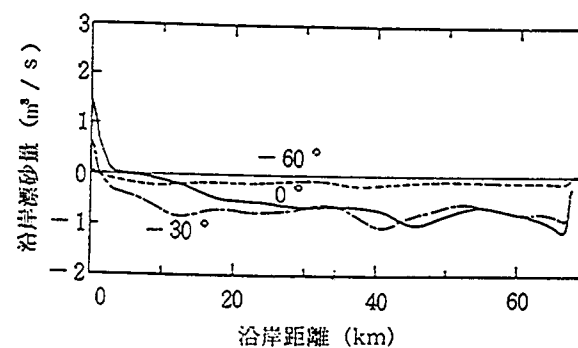
(c-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



(a-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合



(b-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合



(c-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合

図-2.34 $H_0=2.21\text{m}$, $T_0=11.7\text{s}$ のときの碎波波高の沿岸方向分布

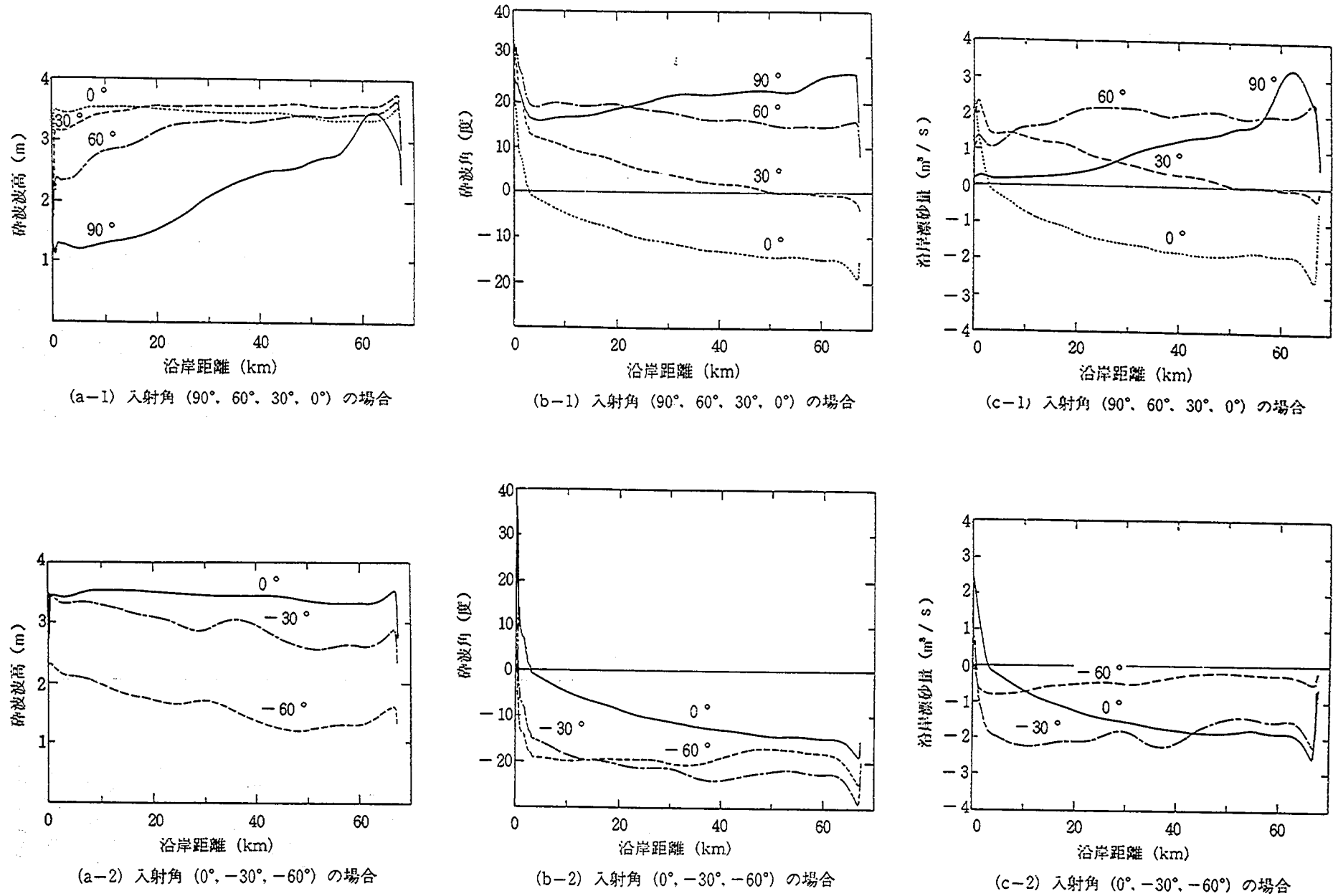
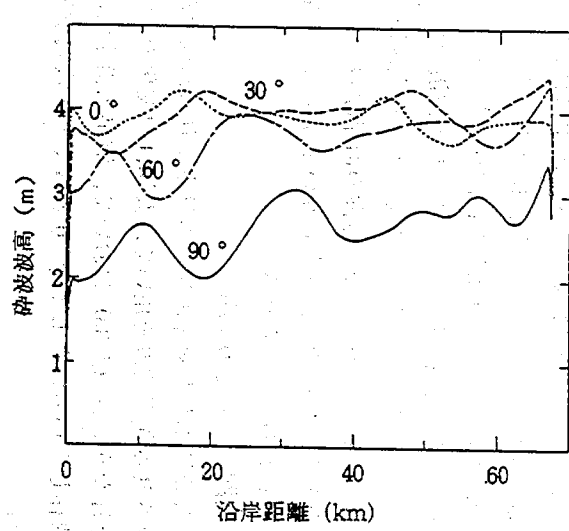
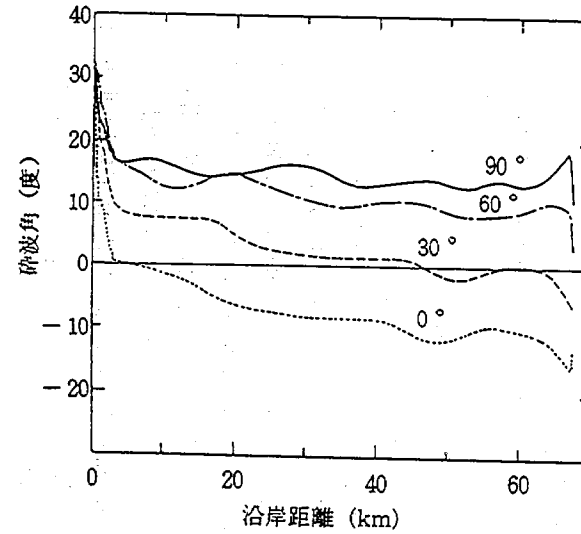


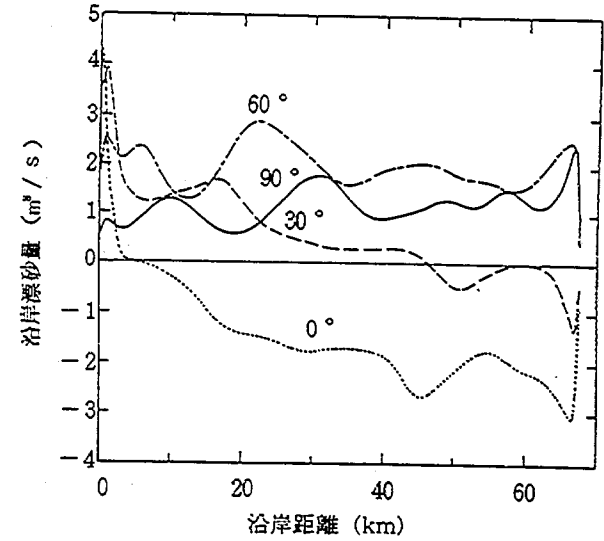
図-2.35 $H_0=3.37\text{m}$, $T_0=7.0\text{s}$ のときの砕波波高の沿岸方向分布



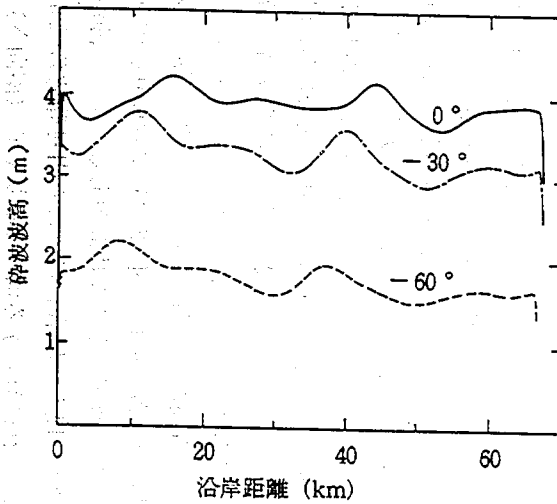
(a-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



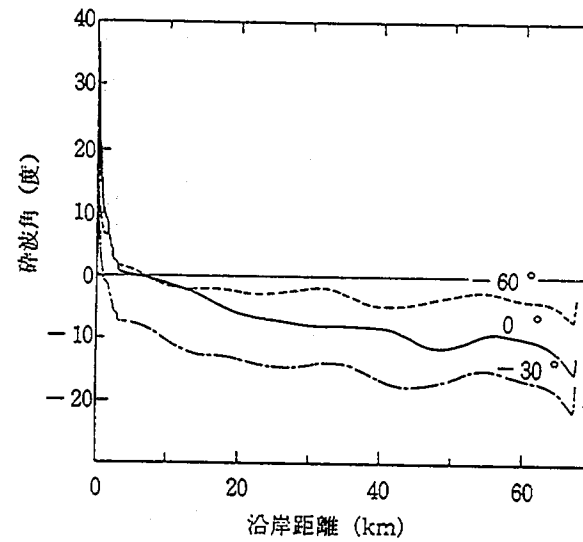
(b-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



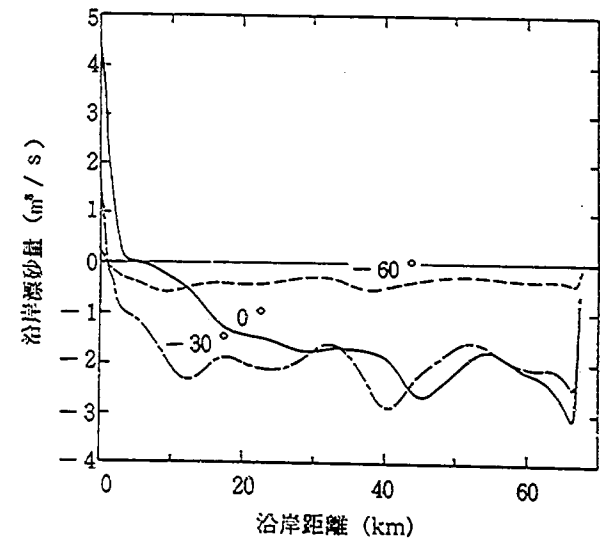
(c-1) 入射角 (90°, 60°, 30°, 0°) の場合



(a-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合



(b-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合



(c-2) 入射角 (0°, -30°, -60°) の場合

図-2.36 $H_0=3.37\text{m}$, $T_0=11.7\text{s}$ のときの碎波波高の沿岸方向分布

する。こうして求めた碎波波高および碎波角を用いて、前述した汀線変化予測の1ラインモデルにより汀線変化を計算する。このとき $\Delta x = 150\text{m}$ および $\Delta y = 200\text{m}$ とし、計算間隔は同じく0.5日とする。また、沿岸漂砂量式 (2.39) におけるパラメータは、 $k_1 = 0.15$, $k_2 = 2k_1$, $(\rho_s - \rho)/\rho = 1.65$ および海浜土砂の空隙率 $\lambda = 0.4$ とする。なお、汀線変化に伴う水深の変化は、移動限界水深 D_c を10mと仮定し、そこまでの式 (2.40) に従って起こるものとする。この場合の汀線変化に対する対象海岸の両端における境界条件は、そこでは沿岸漂砂量の流出入が零であると仮定して、次式を用いる。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.41)$$

このような条件において計算した24ケースの波浪伝播変形計算結果を図-2.33~36に示す。図-2.33~36において(a)は碎波波高 H_b の沿岸方向分布、(b)は汀線の法線方向から北向きに測った碎波角 $(\alpha_b - \alpha_N)$ の沿岸方向分布、(c)は沿岸漂砂量 Q の沿岸方向分布(南向きが正)である。碎波波高 H_b の沿岸方向分布を示した図-2.33~36の(a)を相互に比較すると、つぎのような特徴がある。まず、周期6または7秒の波浪と比較して周期11.7秒の波浪の碎波波高の方が沿岸分布における変化が大きい。これは後に詳述するように、周期6秒の波浪は水深30m以浅の浅海域の海底地形の影響による(主に屈折)変形しか受けないのに対して、周期11.7秒の波浪は水深100m以下の広い海域の海底地形の影響による変形を受けるからである。その沿岸方向分布の変化の仕方が細かい波打ちではなく、ゆっくりと大きく変化するのは北よりの波浪である。周期6.2または7秒の波浪で沖波の入射角が90°および-60°の場合には、碎波波高の沿岸方向分布に一樣なトレンドが存在することがわかる。これらの条件では、入射角が岸沖方向(y軸)とかなりの角度をもっており、しかも波浪が屈折変形を受ける水深30m以浅の浅海域の幅が比較的狭いことに基づく計算誤差が大きいと考えられるので、このトレンドの信憑性は小さいものと考えられる。沖波の入射角が30°および0°の場合には、周期と波高のどの組み合わせにおいても、碎波波高の沿岸方向分布に顕著な特徴を見出すことはできない。

汀線の法線方向から北向きに測った碎波角 $(\alpha_b - \alpha_N)$ の沿岸方向分布を示した図-2.33~36の(b)を相互に比較すると、つぎのような特徴がある。まず、沖波の入射角が60°以上の場合には、この相対碎波角は正值を示し、それに対応する沿岸漂砂量も正(南向き)

となっている。また、入射角30°の場合には、相対碎波角は南端を除いて正であり、対応する沿岸漂砂量も南端を除いて正(南向き)となるが、入射角0°の場合には、相対碎波角は北端を除いて負であり、対応する沿岸漂砂量も北端を除いて負(北向き)となっている。-60°以下の場合にはこの相対碎波角は負であり、対応する沿岸漂砂量も負(北向き)となっている。これからわかるように、相対碎波角はいずれの場合にも北から南へ向かうに従って減少する傾向にあり、その例外となっている入射角が90°で周期6.2および7秒の波浪に関する結果にはある程度の計算誤差によるものがあると考えられる。そして、相対碎波角には、碎波波高の沿岸分布に見られたような顕著な極大値は現れない。沿岸漂砂量 Q の沿岸方向分布(南向きが正)は碎波波高および碎波角を用いて推定されるものであるで、その特徴は両者の特徴を反映したものとなる。図-2.33~36の(c)を相互に比較すると、つぎのような特徴がある。まず、沖波の入射角が60°以上の場合には、沿岸漂砂量は常に正(南向き)となっている。30°および0°の場合には北端で正(南向き)であり、これが次第に減少して負(北向き)に転じている。これらの波浪は漂砂をこの海岸の両端から中央に向かって運搬する。入射角-60°以下の場合には、沿岸漂砂量は負(北向き)となっている。北より90°および60°の場合の高波浪(3.37m)で長周期(11.7秒)の場合には、顕著な極大が見られるが、その他ではおしなべて滑らかな変化に小さなバラツキが重なっているだけである。とくに比較的波高の小さい波浪(2.21m)で低周期(6.2秒)の場合では、その沿岸方向分布はほぼ一定値となっていることがわかる。

図-2.37は各成分波の沿岸漂砂量 Q に、表-2.3(さらに周期別に配分した)に基づく生起確率(日数)を掛けて加え合わせたものであるが、ほとんどすべての領域で沿岸漂砂量が正值(北から南向き)となっている。これは外洋波浪統計において北よりの波浪の生起確率が大きかったことによるもので、安定な大規模な海浜においては、このような一方向の沿岸漂砂は変動するけれども、平均的には存在しないようになって平衡しているものと考えられる。

(3) 長期汀線変化の予測

図-2.32に示した対象海岸におけるこれら24成分から構成される代表波浪を用いて、長期汀線変化の予測計算を行なう。式(2.38)において、流出入沿岸漂砂量に依存しないものとして $q = 0$ とおくと、次式が得られる。

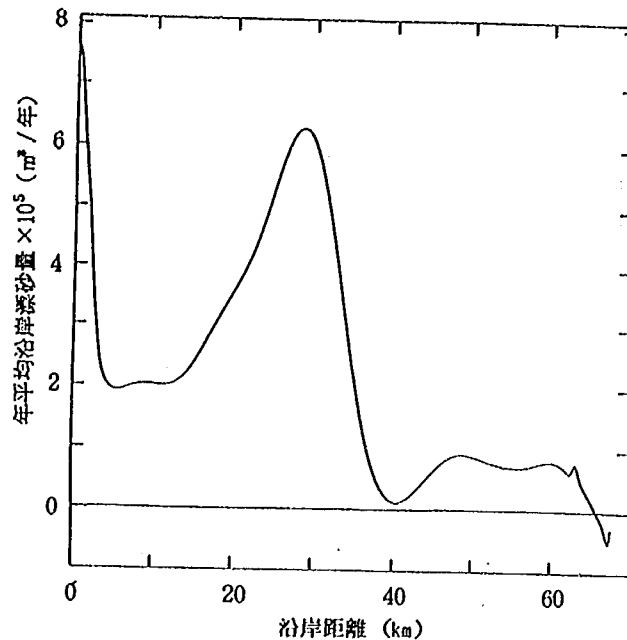


図-2.37 年平均沿岸漂砂量

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} = -\frac{1}{D_c} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2.42)$$

これによれば、汀線の変化率は沿岸漂砂量の沿岸方向微分の符号を変えたものに比例することになるので、まず代表波浪24成分それぞれの波浪による汀線変化の傾向を知るために、図-2.33~36の(c)に示した沿岸漂砂量 Q の沿岸方向微分をとったものが図-2.38~41であるが、縦軸は相対スケールであり絶対値に意味はなく、これらの図で縦軸の値が負の部分が堆積性であり、正の部分が侵食性であることを意味する。比較的短周期(6.2および7秒)の場合には、入射角 30° の場合を除いて、沿岸漂砂量の微分はほとんど零であり、この海岸全般にわたって堆積から侵食に変化するというような傾向は示していない。しかし、長周期(11.7秒)の場合には、2ヵ所で堆積傾向を示すピークが現れるものが多く、とくに北よりの波浪ではその傾向が大きくなる。

これら24成分の代表波浪による長期汀線変化の予測計算の結果を図-2.42に示す。これによれば、長期の汀線変化に寄与する波浪外力そのものは、一般に汀線変化の影響を受けて変化するが、100年間における汀線変化の程度は一番激しい地点で約10kmの区間にわたって約400mの汀線の前進として現れる程度である。

ので、汀線の向き(法線方向)は 5° ほどしか変化しないことになる。そのために、波浪外力は汀線変化によって少ししか変化しないので、図-2.42はほぼ相似な形状を示している。なお、波浪の伝播計算の範囲における両端付近では、汀線および等深線が y 軸に平行に近くなるために計算精度が落ちているので、汀線変化の計算からはその部分を除外した。この間において5km付近に現れた堆積(汀線の前進)傾向はこの精度の悪い部分を取り去りきれなかったために起った現象と考えられる。

このような若干の問題点を有してはいるものの、本節で提案した長期汀線変化予測モデルを用いて大規模海浜過程としての長期の汀線変化を予測した結果から、1)比較的大規模な海浜の汀線変化は代表波浪を形成する波浪の変形により生じる沿岸漂砂量の沿岸方向分布により規定されること、2)この際、長期の汀線変化に寄与する波浪外力そのものが一般には汀線変化の影響を受けて変化するが、その影響は少ないことが究明された。また、本節で提案した1)代表波浪の選定方法、2)代表波浪の変形計算方法および3)長期の汀線変化の予測モデルが大規模海浜過程としての比較的大規模な海浜の形成過程および長期の汀線変化を予測することに有効であることが認められた。

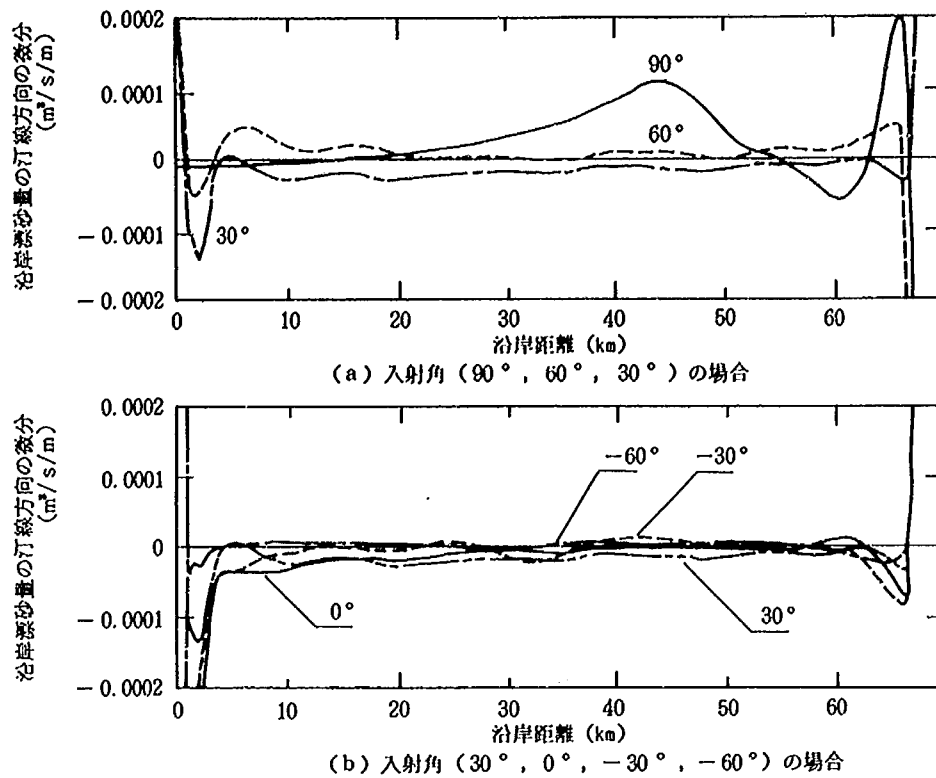


図-2.38 $H_0=2.21\text{m}$, $T_0=6.2\text{s}$ のときの 6 方位からの沿岸漂砂量の汀線方向微分

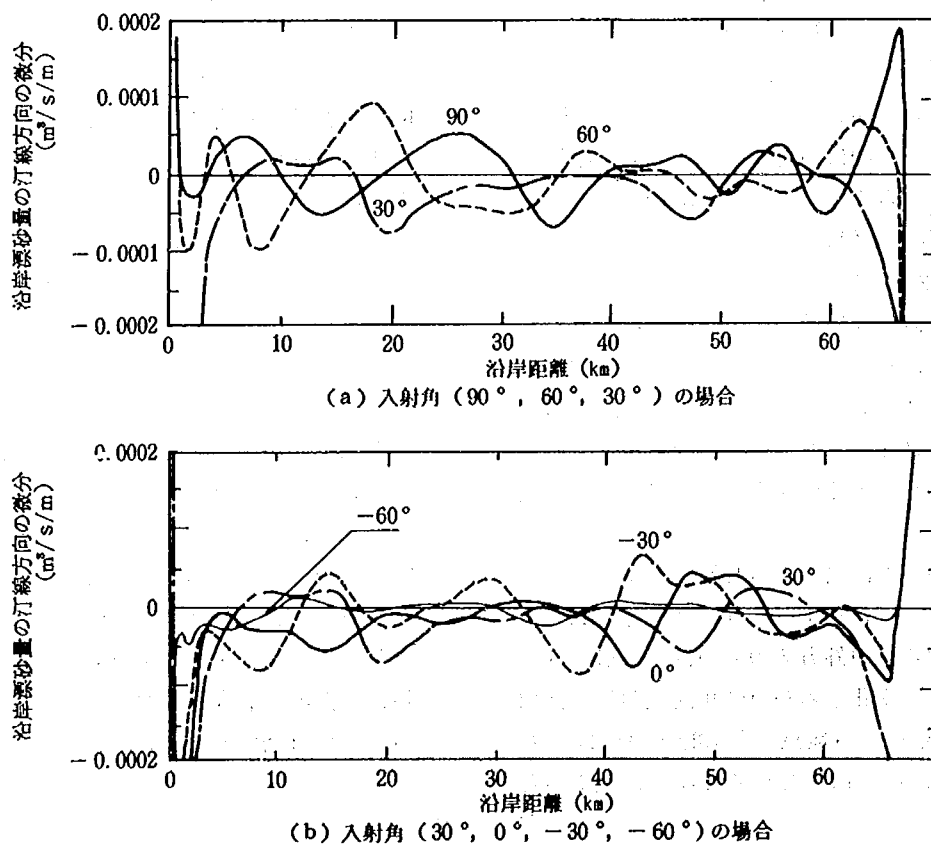
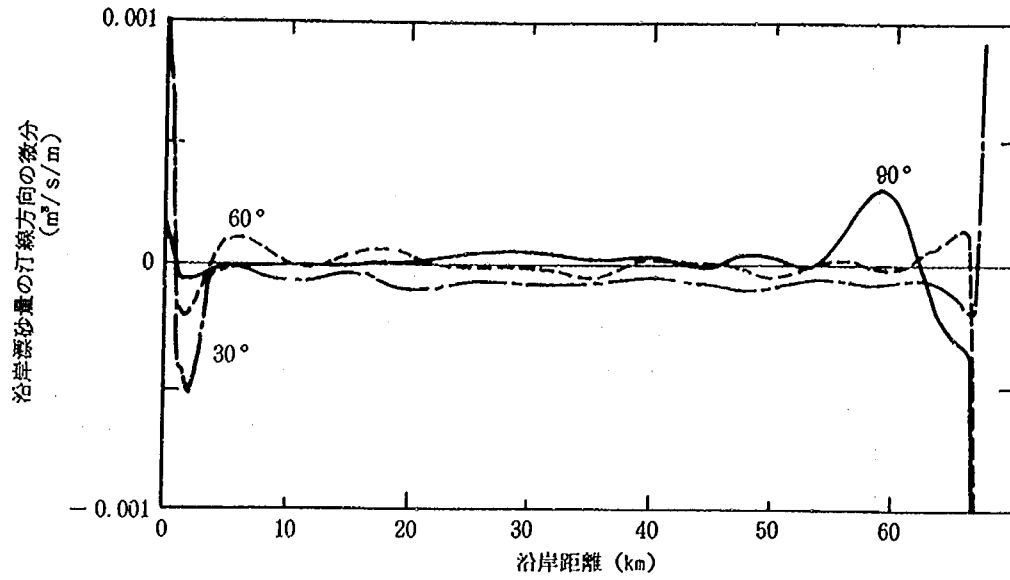
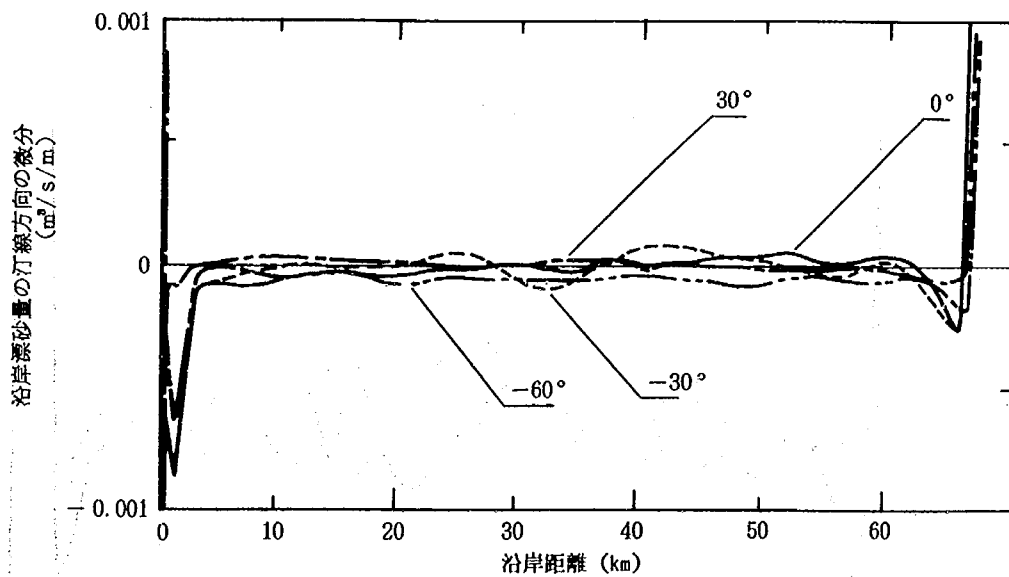
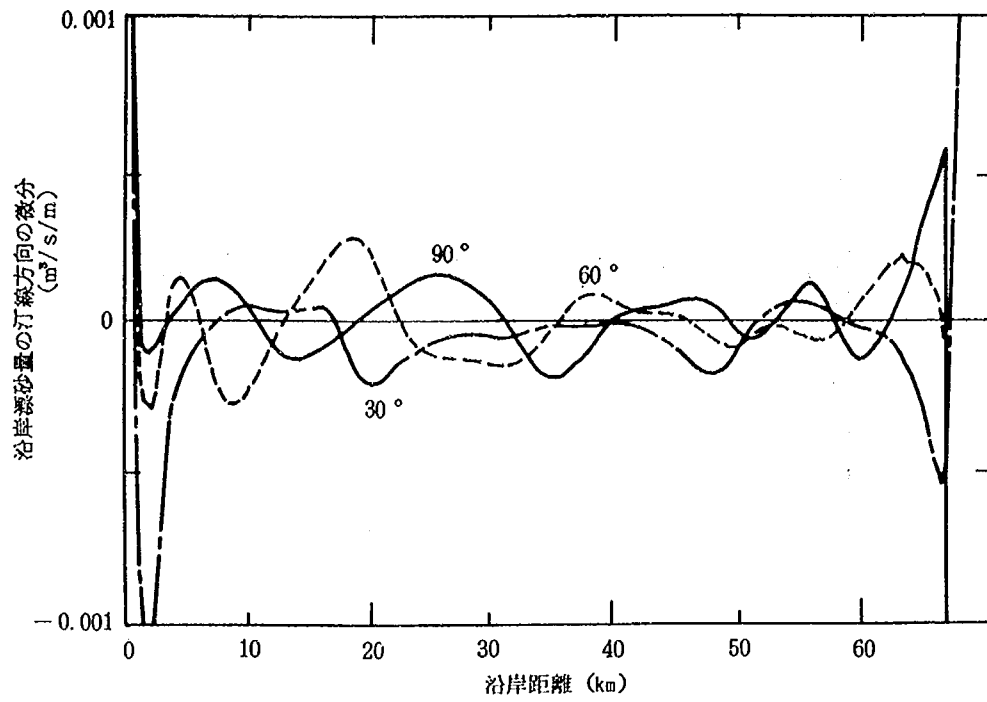
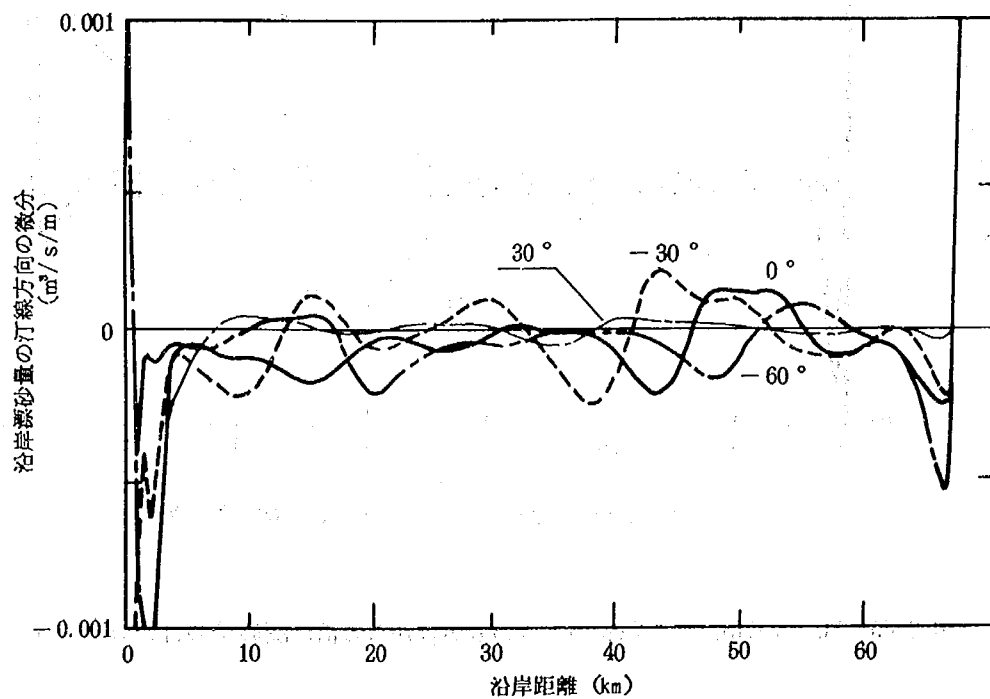
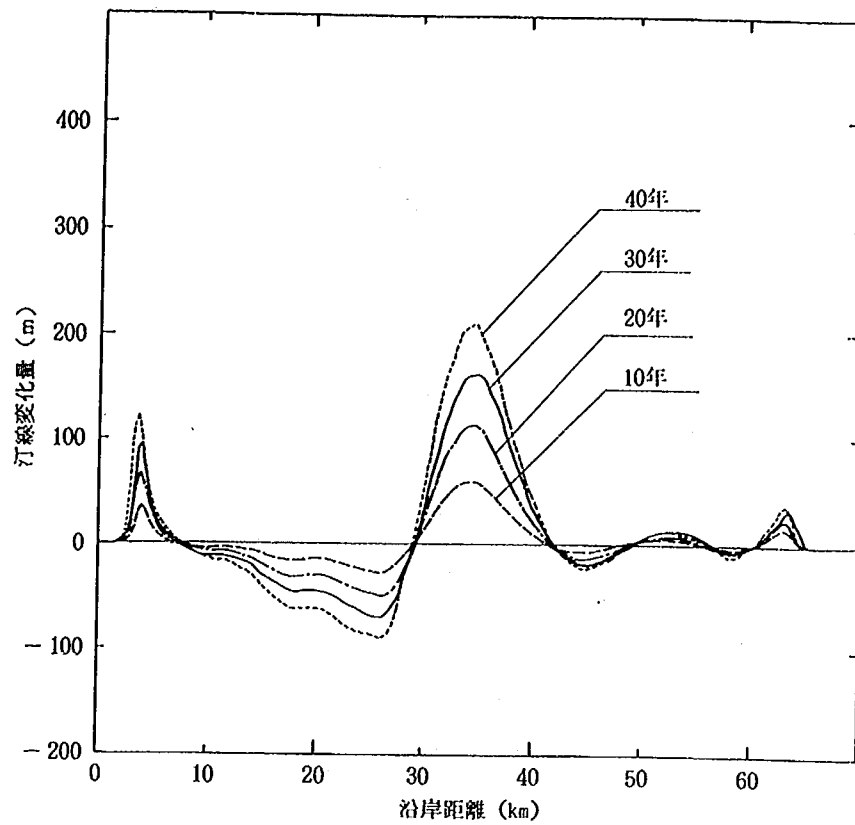


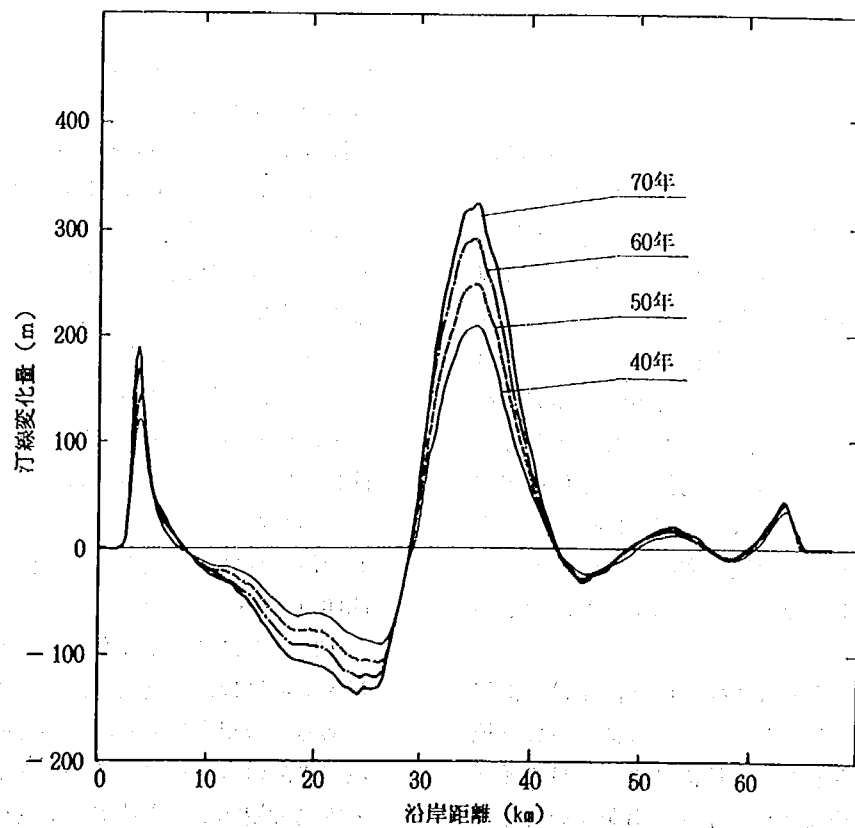
図-2.39 $H_0=2.21\text{m}$, $T_0=11.7\text{s}$ のときの 6 方位からの沿岸漂砂量の汀線方向微分

(a) 入射角 (90° , 60° , 30°) の場合(b) 入射角 (30° , 0° , -30° , -60°) の場合図-2.40 $H_0=3.37\text{m}$, $T_0=7.0\text{s}$ のときの6方位からの沿岸漂砂量の汀線方向微分

(a) 入射角 (90° , 60° , 30°) の場合(b) 入射角 (30° , 0° , -30° , -60°) の場合図-2.41 $H_0=3.37\text{m}$, $T_0=11.7\text{s}$ のときの6方位からの沿岸漂砂量の汀線方向微分

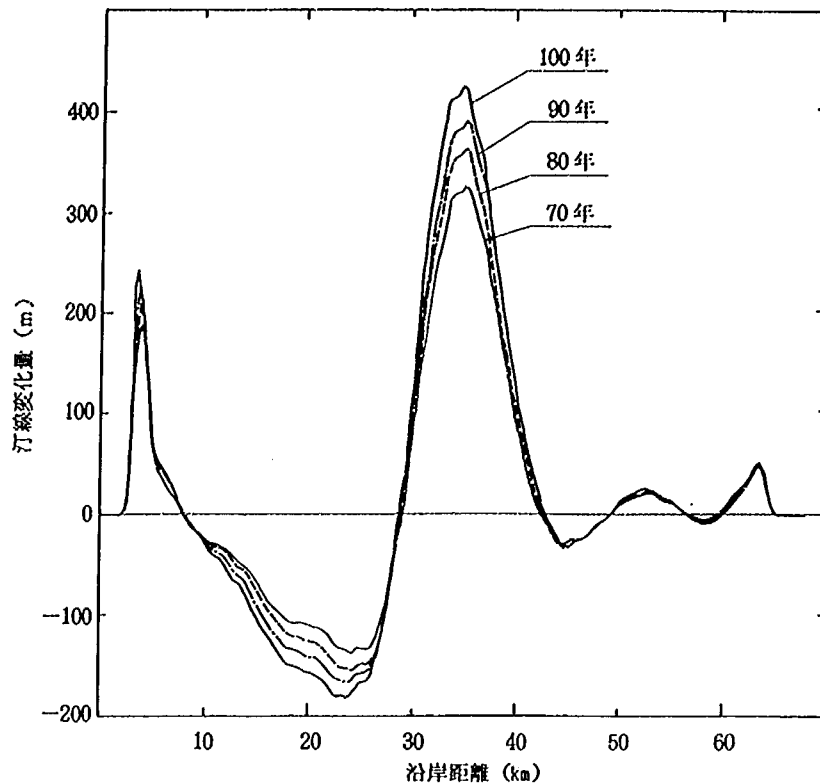


(a) 10, 20, 30, 40年後の場合



(b) 40, 50, 60, 70年後の場合

図-2.42 24成分の代表波浪による自然海浜の場合の長期汀線変化予測結果



(c) 70, 80, 90, 100年後の場合

図-2.42 24成分の代表波浪による自然海浜の場合の長期汀線変化予測結果

4 結 語

以上、この章においては、砂浜海岸を1つの漂砂系としてとらえて、その両端部における境界条件のほか流入河川の有無とその位置によって5つに類型化しそれぞれに実例を示して、波浪特性などの関係から大規模海浜過程としての取り扱い方を述べた。つぎに、大規模海浜過程として長期の汀線変化を予測できる数値シミュレーションモデルを構築し、具体的に実海岸を模倣した海岸地形に適用して、大規模海浜過程としての長期の汀線変化と海岸地形との関係を、それを形成させる沿岸漂砂量の動態について考察することにより、本数値予測モデルの適用性を究明した。

この章で得られた主要な結果を要約すると、つぎのとおりである。

(1) 本論文で対象とする大規模な砂浜海岸は、海岸全体を1つの漂砂系としてとらえて、端部における境界条件や流入河川の有無とその位置によって1) タイプA (両端部が岬で漂砂源となる流入河川がない海岸)、2) タイプB (両端部が岬で端部に漂砂源となる河川が流入する海岸)、3) タイプC (両端部が岬で海岸の中央部に漂砂源となる河川が流入する海岸)、4) タイプ

D (両端部が岬で端部と海岸の中央部に漂砂源となる河川が流入する海岸) および5) タイプE (一方の端部が開放型でもう一方の岬である端部との間に漂砂源が流入する海岸) の5つに分類されることを示した。

(2) これらの海岸は端部の境界条件、漂砂源とその流入位置および供給量等に違いはあるが、このような条件と海岸に来襲する波浪特性および波浪の変形をもたらす海底地形等によって一定の平面形状を形成すること、また、漂砂源の減少や海岸構造物の建設などによる漂砂の阻止により海岸線の変化が生じるが、長期的には安定化する方向に向かっていることを実例に基づき示した。また、このような現象の理解の上に分類した海岸毎に、大規模海浜過程として取り上げるべき問題点を明確にした。

(3) 両端に境界条件を有する大規模な砂浜海岸の大規模海浜過程は、長期の汀線変化としてとらえるべきであるとの視点に立ち、その海浜過程に寄与する代表波浪成分の選定に当たっては、従来の沿岸域とくに既存の港湾で観測された波浪観測資料を用いることは、1) 観測波浪は海底地形の影響を受けており、波浪の侵入方向は汀線に対してほとんど垂直であるにもかかわらず、これを逆屈折計算によって沖波としての波向に換

算しても沿岸波浪観測の誤差を増幅していることおよび2)大規模な海浜のある特定の場所での観測波浪は局所的な海底地形による波浪変形の影響があり、大規模な海浜の一般的な波浪の特徴を反映していないことに問題があることを指摘した。

(4) 本論文では、海浜変形の代表波浪の選定手法として、船舶による外洋波浪観測資料を用いて主に海浜変形をもたらすと考えられる高波浪を確定し、対象波浪の年間の継続時間を決定した。さらに、この波浪の波高を分割した波高範囲のエネルギー平均波高を算出し、かつ、波高と周期の発生頻度の相関関係より代表周期を各周期の重み付きの平均で求め、波高と波向の組み合わせに対応する分配率に代表周期の寄与確率を乗じて代表波浪を設定する方法を検討し採用した。

(5) 海浜変形予測モデルはいわゆる1ラインモデルとした。代表波浪を構成する各成分の沖側境界から砕波地点までの波浪伝播計算は、Snellの法則に従った屈折計算ではなく、汀線付近の複雑な平面形状と水深変化の影響および海底地形による波の回折効果を考慮できる緩勾配方程式を基礎式とする計算を選定した。この際、砕波地点までの波浪伝播計算をするにあたっては、隣接する砕波帯内での砕波減衰を含む波の変形について定式化する必要のあることを述べた。また、汀線変化計算の基礎式は沿岸漂砂量の不等流性と汀線変化との連続性から与えられる式によったが、沿岸漂砂量により変化した後の移動限界水深までの海底の水深(プロファイル)はDean(1977)による平衡海浜断面形状に従うものとしたモデルを選定した。

(6) 両端に境界条件をもつ大規模な海浜における長期汀線変化の予測モデルすなわち前述した(4)、(5)で示した代表波浪とその伝播変形計算および汀線変化計算を用いて、実海岸を模倣した海岸地形に対して計算を実施しこのモデルの適用性を検討した結果、1)比較的大規模な海浜の汀線変化は、代表波浪を形成する波浪の変形により生じる沿岸漂砂量の沿岸方向分布により規定されること、2)この際長期の汀線変化に寄与する波浪外力そのものが一般には汀線変化の影響を受けて変化するが、その影響は少ないことがわかった。

(7) また、このことによって本論文で提案したこれらのモデルが、大規模海浜過程としての比較的大規模な海浜の形成過程および長期の汀線変化を予測することに有効であることが認められた。

参考文献

- 1) Berkhoff, J.C.W. : Computation of Combined Refraction-Diffraction, Proc. 13th. ICCF, ASCE, vol. 1, 1972, pp. 471-490.
- 2) Dean, R. G. : Equilibrium Beach Profiles • U.S. Atlantic and Gulf Coasts, Ocean Eng. Tech. Rep., No. 12, 1977.
- 3) Ebersole, B.A., Cialone, M.A. and Prater, M. D. : Regional Coastal Processes Numerical Modeling System, Report 1A linear Wave, 1986.
- 4) Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. : On the tectonic and morphologic classification of coast, Jour. Geology, Vol. 79, No. 1, 1971, pp. 1-21
- 5) Le Mehaute, B. and Soldate, M. : A numerical model for predicting shoreline changes, Misc. Rep. No. 80-6, 1980, U.S. Army Corps of Engineers, WES, CERC, p. 72
- 6) Shepard, F.P. : Submarine Geology, 1973.
- 7) 伊藤喜行, 谷本勝利 : 数値波動解析法とその応用—構造物周辺の波—, 第18回海岸工学講演会論文集, 1971, pp. 67-70.
- 8) 伊藤喜行, 谷本勝利 : 波向線交差領域での波の屈折—数値波動解析法の応用(2)—, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 325-329.
- 9) 茨城県河川課 : 茨城県海岸侵食対策調査について, 豊かな自然の残る潤いある海岸を目指して (S.59~60の調査結果), 海岸, vol. 26, 1986, pp. 139-149.
- 10) 宇多高明, 山本幸次 : 遠州海岸の1960年代以降における海浜変形, 土木技術資料, vol. 33-10, 1991, pp. 10-11.
- 11) 小笹博昭, Brampton, A.H. : 護岸のある海浜の汀線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, vol. 18, No. 4, 1979, pp. 77-104.
- 12) 建設省河川局海岸課監修, 社団法人全国海岸協会編集 : 海岸30年のあゆみ, 1981, pp. 391-408.
- 13) 建設省関東地方建設局監修, 社団法人関東建設弘済会発行 : 大利根百話, 1987.
- 14) 建設省中部地方建設局浜松工事事務所 : 遠州海岸総合整備計画調査業務報告書, 1987, 1988.
- 15) 佐藤昭二, 河西輝夫, 田中則男, 入江 功 : 小川原湖海岸の漂砂について, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 7-11.

- 16) 芝野照夫：漂砂の動態に基づく砂浜海岸の特性とその変遷に関する研究, 京都大学学位論文, 1985.
- 17) 社団法人日本河川協会監修, 国土開発調査会編集：河川便覧1992 (平成4年版), 1992.
- 18) 社団法人日本造船研究協会：北太平洋の風と波の統計図表, 1980
- 19) 土屋義人, Silvester, R, 芝野照夫：安定海浜工法による海岸侵食制御について, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974, pp. 191-194.
- 20) 土屋義人, 河田忠昭, 芝野照夫, 林省吾：白良浜の海浜過程について, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975, pp. 343-347.
- 21) 土屋義人：海岸侵食の制御, 土木学会論文集, vol. 387, 1987, pp. 11-23.
- 22) 土屋義人, 芝野照夫：砂浜海岸の分類と底質特性について, 第32回海岸工学講演会論文集, 1985, pp. 326-330.
- 23) 土屋義人, 山下隆男, 泉達 尚, 鳥取一雄：大規模海浜過程の予測—上越・大海海岸の場合—, 海岸工学論文集, Vol.40, 1993, 投稿中
- 24) 橋本宏, 宇多高明：経験的海浜変形モデルの小川原湖海岸への適用, 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 215-219.
- 25) 服部昌太郎, 鈴木隆介, 佐藤政夫：遠州海岸中央部の海浜変形と漂砂, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974, pp. 127-134.
- 26) 堀川清司, 砂村継夫：千葉県九十九里海岸における漂砂の卓越方向に関する研究, 第18回海岸工学講演会論文集, 1971, pp. 417-421.
- 27) 本間仁監修, 堀川清司編：海岸環境工学, 東京大学出版会, 1985.
- 28) 松本直也, 飯塚富弘：湘南海岸のなぎさづくり, 河川, vol. 483, 1986, pp. 53-60.
- 29) 峰村一敏：静岡海岸の現状と対策について, 海岸, vol. 23, 1983, pp. 98-108.

Report
of
Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 192, January 1994

CONTENTS

1 . Development of Surveying Systems for

Detecting Seismic Damage Using Helicopters	Dr. Kazuhiko KAWASHIMA	1
	Hideki SUGITA	
	Takashi KANO	
	Tomoru NAKAJIMA	
	Shigeki UNJOH	
	Hiroyuki IIDA	

2 . Study on Prediction Model of

Large Scale Coastal Behaviour	Tokuji TOMARU	77
-------------------------------------	---------------	----
