

北海道北部地域における地震に関する調査報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

財団法人 地震予知総合研究振興会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Cooperation Section, Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute, 4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

北海道北部地域における地震に関する調査

高 木 章 雄

要 旨

本調査では北海道北部地域の幌延町を例として、地震活動が深部地質環境の長期安定性に及ぼす影響を評価するための研究について、必要とする各種観測に関する基本的情報を調査すると共に、短期、長期に実施すべき観測研究計画の概要を提示した。観測点の数や観測項目等調査・観測計画の詳細については、次年度以降予算や立地条件などの制約を考慮してさらに検討を加えていく必要がある。

基本的情報としては、本地域並びに国内、外における地震、地殻変動観測、地下水観測、水圧の動的変化、地下深部の地震動特性に関する比較的新しい文献を調査し、文献リストを作成した。

更に、観測計画の策定に必要な情報として、本地域における既存の地質調査成果、日本海東縁の地殻活動研究成果等を解説し、それに基づき各種観測計画の概要を解説した。

地震については本地域の地震活動の既往の観測研究による知見をレビューしつつ、観測点の配置、地震計の機種・個数、データ伝送・収録システムを示し、広域の基盤観測データの活用も図ることとした。

A E・微小地震観測については、その適用の現況をレビューし、観測機器・手法、データ処理・解析システム・解析手法について、最近の先端的な技術を示した。

地下水観測については、過去の地震発生と関連した観測成果の有用性を説明し、観測項目・計画の提案を示した。

地殻変動については、各種観測項目を解説し、本地域の観測手法・機器として、深層観測井に設置する3成分歪計を中心とした総合観測計画を提案した。

本地域で発生する群発地震に対して、地下水流動と地殻変動に関する伊東沖群発地震の研究事例を紹介し、群発地震発生の機構についてモデルを示した。

また、地震工学については、最近の耐震評価手法について調査し、兵庫県南部地

震後の見直しの動向と検討課題を示した。

以上の観測計画の提案を総合して 20 年間の年次計画表を作成し、本地域における Hi-net, K-Net, GPS 電子基準点の高密度観測網の配置を地図上に示した。

本報告書は、(財)地震予知総合研究振興会が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

契約番号： 110C0232

機構担当部課室および担当者： 立地推進部

山崎 眞一 (研究主幹)

JNC TTJ1440 2000-002

March, 2000

Survey of Earthquakes in the Northern Hokkaido Region

Akio Takagi

Abstract

This report of investigation presents an outline of an observation-research plan as well as fundamental information related to a variety of necessary observations, in order to evaluate influence of earthquakes on long-term stabilization of geological environments at depth, in northern Hokkaido as an example.

As for the detailed research-observation plans such as the number of observation sites and items is necessary further examination taking into account for restrictions in yearly budget from next fiscal year and in the site condition of the research facility.

As fundamental information, surveyed were earthquakes, crustal deformation observation, groundwater-related observation, hydraulic pressure change at depth, and characteristics of earthquake ground motion at depth in the region under consideration, other Japanese region, etc. based on relatively new literatures, and a list of the literatures were made.

Furthermore, as necessary information for planners, the exciting results of geological survey in the region under consideration and the results of research on crustal activities in the eastern margin of Japan Sea were interpreted, and the outline of the plan of various observations was explained based on those.

The report includes the survey results on recent evaluation methods for earthquake engineering, a trend of their re-evaluation after the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake, and subject for examination.

Integrating the proposals for observation plans mentioned above, a yearly program for 20 years is presented and location maps of high density observation networks of Hi-net, K-Net, GPS over the region are shown.

This work was performed by the Association for the Development of Earthquake Prediction under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

Contract No. : 110C0232

JNC Liaison : Shinichi YAMASAKI (General Manager, Senior Geologist, Site Planning Division)

北海道北部地域における地震に関する調査報告書

目 次

1. 目的・背景	1
2. 内容	2
3. 調査期間	5
4. 調査結果	5
4. 1 文献調査	5
4. 1. 1 文献調査の項目	5
4. 1. 2 文献リスト	6
4. 2 調査観測計画の策定	16
4. 2. 1 地震観測	18
(1) はじめに	18
(2) 地震計の設置点	19
(3) 設置する地震計の機種・個数	20
(4) データ伝送・収録システム	20
4. 2. 2 AE・微小地震観測	28
(1) 観測機器および手法に関する調査	28
(2) 他の研究機関におけるデータ処理・解析システム, 解析手法に関する調査	31
4. 2. 3 地下水観測	34
(1) 地下水観測の有効性	34
(2) 観測計画	34
4. 2. 4 地殻変動観測	35
(1) はじめに	35
(2) 観測項目	36
(3) 観測手法・観測機器	36
(4) 幌延における深部ボアホール総合観測の提案 －中期, 長期計画に向けて－	37
(5) 幌延における深部ボアホール総合観測の提案	38
4. 2. 5 地下流体が引き起こす群発地震と地殻変動	43
(1) はじめに	43
(2) 伊東沖群発地震に伴う地殻変動	43
(3) 群発地震活動に前駆する地殻変動	44
(4) 地殻変動観測成果の意味	44

4. 2. 6 地震工学	50
(1) 最新の耐震評価手法に関する調査	50
5. 観測点配置計画図	
(1) 高感度地震計・地殻変動観測機器配置図	54
(2) 地下水観測点配置図	55
(3) G P S 観測点配置図	56
6. 基盤観測点位置図	
(1) 高感度地震観測網 (Hi-net)・観測地点位置	57
(2) G P S の観測点 (電子基準点) 位置	58
(3) 強震観測網 (K-net)・観測点位置	59
7. 北海道北部における地震に関する調査年次計画表	60
用語説明	61

1. 目的・背景

深部地質環境の長期安定性に関する研究は、急激に、または緩慢ではあるが累積的な変動を特徴とする天然現象によって、その地質環境が如何なる影響を受けるかを詳細に調査研究することを基本としている。

この研究の一環として地震・断層活動に関しては、その活動が地下の地質環境へ及ぼす影響を調べるために、地震発生の際の、岩盤の破断・破碎とそれに伴う地下水移行経路の形成・変化、地震動による岩盤や地下水の性質の変化などについて研究が進められてきている。

これらの研究成果を取りまとめた地層処分研究開発第2次取りまとめには、わが国の地震・断層活動は、既存の活断層帯で過去数十万年にわたり繰り返し発生しているが、その分布は限定されており、断層活動に伴う岩盤の破断・破碎や変位の及ぶ範囲が明らかにされている。地震動については、ゆれの大きさは地表に較べて地下深部では小さいこと、地震時の地下水位・水質の変化は短期的であることなどから、深部地質環境への影響は小さいことが示され、変動帯に位置するわが国においても、地震・断層活動による重大な影響が及ばない地域があり、十分安定した地質環境が存在し得ることが示されている。

本件の目的は、北海道幌延町を中心とする北海道北部地域の地震に関する観測・研究計画の策定である。

北海道北部地域は、最近活発な地震活動を惹き起こしている日本海東縁のユーラシアプレートと北米プレートの境界の北部延長上にあり、歪集中帯の一部であるとともに、群発地震発生地域も散在し、深部地下水も塩淡境界の存在が知られている。地質的には幌延町の東側と西側で大きく異なり、東側は先新第三紀の古い地層が卓越するのに対し、西側は新第三紀から第四紀の新しい堆積層が卓越しており、東西圧縮の褶曲構造と断層も顕著である。

このような地質環境を踏まえ、深部地質環境の長期安定性研究の観点から、本地域の特徴に着目した研究課題を抽出し、地震研究計画を提案する。観測体制を考えるにあたっては、関係機関の周辺観測網との連携により地域防災への貢献も視野に入れた観測研究計画を立案する。

2. 内 容

本調査では、まず、地震に関係する観測項目とその最新の研究情報について文献調査を行い、リストの作成と文献収集を行った。

更に、調査観測計画の策定に当たっては、観測項目毎の最新の研究成果、観測機器に関する情報を説明し、本調査研究から期待される成果への展望を描き、計画策定の基本的な枠組みを検討した。以下にその概要を述べる。

本調査では、北海道北部地域の幌延町を例として、地質環境の長期安定性に関する研究を目的として、地上からアプローチする調査研究の期間（第Ⅰ期）に最初に整備する諸観測の種目、観測点配置等について取りまとめ、それらの配置図を作成すると共に、それら観測データを用いた研究計画を策定した。また、その後の地下施設建設時の調査研究期間（第Ⅱ期）および地下施設における調査研究期間（第Ⅲ期）についても、第Ⅰ期に整備した観測網に加えて、必要となる観測・調査研究について第20年目（平成30年度、2018年）までの長期的な調査研究の展望を年次計画表として取りまとめた。

第Ⅰ期における観測点配置に関する基本的考え方は、観測施設整備・運用に必要な社会的基盤にアプローチ可能と判断される場所であることも念頭において、これまで調査・観測された幌延地区内の地質構造および地殻活動等の環境条件に基づいて策定した。

幌延町の地質的特徴は、大曲断層により東西に分断され、断層の西側では地層が緩い傾斜で比較的新しい地層が分布しているのに対し、東側では古い地層が複雑に分布している。

幌延町とその周辺における地震活動は1928年以来、幌延2回、豊富2回、問寒別3回とM4クラスの地震の発生が報告されているが、群発地震が卓越しており、大きな地震は経験していない。

しかしながら、広域的に見れば、北海道北部地域は、北米とユーラシアの二つのプレートの境界に位置しており、最近の研究によればその境界は線状ではなく、幅を持った歪集中帯を形成し、一つの活動帯であることが報告されている。

したがって、その活動帯の中に位置する幌延町における両プレートの運動の係り合いは、本調査においても重要な視点である。

一方、阪神・淡路大震災を契機として、政府の地震調査研究推進本部は、地震の全国的調査研究による地震防災を推進するために、高感度地震計、加速度計、GPS等の基盤観測網を、20~30km間隔で全国的規模で展開している。北海道北部地域においても、それら観測網の整備は殆ど完成しており、今後は更に補強される計画が進行している。

本調査で計画した幌延町内の高密度観測網は、上記の基盤観測網と連結すれば、

幌延町を核として、東はオホーツク海から西は礼文島に至る北海道北部を横断する広域観測網が構築されることになり、この地域の地震テクトニクス（地震発生に係る動的な構造）の解明という学術的研究にも貢献できる。

このような本地域の諸環境条件を踏まえ、当面の各種観測網の配置は、大曲断層を中心として、その両側の褶曲による向斜・背斜構造の地質層序に配慮して決定した。

第Ⅰ期に整備する観測項目と観測施設の数、および調査研究の計画概要は以下の通りである。

（１）観測網の整備

観測項目	観測施設の数	備 考
①高感度地震計（３成分）	9	1000m 級ボアホール内
②地殻変動		
3成分歪計	9	同上と併設
2成分傾斜計	9	同上
③加速度計（３成分）	9	同上
④温度計	9	同上
以上①～④	までは地殻活動総合観測装置として同じ匡体中に入れる。	
⑤A E	9	上記ボアホールに併設する
⑥地下水		
水位・温度・水質等	1 2	1000m 級ボアホール
⑦G P S		
固定観測点	3	
臨時観測点	4	
⑧強震計	1 1	10m 程度の浅孔底

（２）観測データの処理・解析システムの整備と運用

上記で整備された諸観測データおよび北海道北部の基準観測網からのデータを観測項目別に処理・解析する情報システムについては、基本的な設計を第３年目に行い、順次観測網の整備に対応して拡張・補強し、運営することとする。

（３）観測技術の開発研究

本地域は、厳寒積雪地であり、社会的基盤へのアプローチも困難であること、地盤の地質も堆積層が厚いこと、現地での作業可能日数が限られること等の制約が多いと考えられる。従って、観測施設には特別な技術的要求および工夫が必要

と考えられる。

当面は上記観測を有効に実施するための観測技術の研究開発が必要である。

(4)本調査の重点研究課題は、「北海道北部地域の地殻活動と地震発生に関する研究」である。そのために地震活動、地殻変動、地下水変動とその関連性を総合的に研究する。

(5)地域の地震防災に関する研究も、地元の要望を踏まえ、上記の研究と関連して実施する。

第II期、第III期に実施する観測および研究課題

第I期で整備される観測網の運用、維持・補強、並びに上記の諸研究は、第II期、第III期も継続して実施されるが、第I期後以降に実施を計画した研究を以下に述べる。

(6)地下施設内観測網の整備・運用

第II期では地下施設建設時の調査研究として、地下施設の建設の進捗状況に対応した諸観測が、第I期で整備された観測施設で実施される。一方、地下施設内で更に高感度地震計・AE、歪計・傾斜計、地下水の水圧・水質等の観測が必要となる。これら観測施設の整備は、地下施設の建設に対応して順次整備し、地下施設の建設が周囲の地盤や地下水などの変動に及ぼす影響の評価を目的として実施される。

(7)観測技術の開発研究

第I期では主として地表からの観測施設に必要な技術開発であるが、第II期の地下施設の中に整備する観測機器および測定技術は、より効果的な研究の推進のために、必要に応じて開発することとした。

(8)地殻活動が地下施設に及ぼす影響に関する研究

地殻活動が地下施設の長期安定性に及ぼす影響を評価するための研究を、第III期においては実施する。観測は第I期、第II期において整備された観測網を、必要に応じて更に追加補強して研究を実施する。

以上については、「北海道北部地域における地震に関する調査研究年次計画表」に一覧として巻末に示されている。

3. 調査期間

平成12年2月1日 ～ 平成12年3月28日

4. 調査結果

4.1 文献調査

4.1.1 文献調査の項目

(1) 地震

(2) 地殻変動観測

(3) 地下水観測

(i) 地下水観測手法

(ii) 地下水観測の有効性に関するもの

(a) ラドン

(b) 地下水位

(c) 化学組成

(d) 地下水全般

(iii) 北海道の地下ガス組成

(iv) 群発地震と地下水の関係

(v) 総説(英文)

(vi) 参考

(4) 水圧の動的变化

(5) 地下深部の地震動特性

4. 1. 2 文献リスト

(1) 地震

北海道北部地域における地震・地殻変動に関する文献 (1985 年以降)

北海道北部に関する文献は多くないので 1985 年以前のものも挙げてみる。北海道北部とは、ここでは北緯 43 度以北、東経 144 度以西 (日本海, サハリンを含む) を目安とした。

1985 年まで

阿部勝征・森谷武男・笹谷努・岡田弘・中島徹：豊富群発地震, (1975 年 12 月) の調査, 昭和 50 年度自然災害特別研究代表田治米鏡二, 調査報告書, (1976).

Solove'v S.L., Seismicity of Sakhalin, Bull. Earthq. Res. Inst., 43, 95-102, (1965).

森谷武男：北海道天塩名寄地方の微小地震観測, 北海道大学地球物理学研究報告, 25, 219-227 (1971).

1985 年以降

北海道大学理学部：北海道北部および日本海東縁部の地震活動, 地震予知連絡会会報 52, 7-10 (1994).

勝俣啓・笠原稔・S.セン・C.キン・S.セルゲイ・A.イワシェンコ・R.タテウオシャン・S.ルキアネンコ・K.プルトネフ・V.ストラホフ：1995 年北サハリン地震日ロ合同余震観測, 北海道大学地球物理学研究報告, 59, 177-188 (1996).

森谷武男：浅い地震活動と起震歪力から見た北海道のテクトニクス, 地団研専報, 31, 475-485 (1986).

森谷武男：北海道北部の広域群発地震活動 (1986 年 8 月), 地震学会講演予稿集昭和 62 年度春期大会 A03 (1987).

森谷武男：北海道南西沖地震後活化した北海道北部の地震活動, 地球惑星科学関連学会 1994 合同大会予稿集, C21-05 (1994).

森谷武男：北海道とその周辺における地震のメカニズム解から推定される地殻内部応力場，月刊地球，21-9，557-563 (1999).

Nakanishi, I., et al., : The November 13, 1990 Earthquake off the coast of the Primorskij region, the Eastern Russia, Geophys. Res. Lett., 19, 549-552 (1992).

大村 猛・他：1995年5月23日北海道新十津川町の地震 (M5.7)の余震観測，北海道大学地球物理学研究報告，60，45-60 (1997).

札幌管区気象台：北海道・空知支庁地方の地震(1995年5月23日・M5.6)，地震予知連絡会会報，55，25-28 (1996).

札幌管区気象台：北海道地方とその周辺の最近の地震活動 (1998年5月～1998年10月)，地震予知連絡会会報，61，1-5 (1999).

山本明彦・森谷武男：北海道の重力異常と地下構造，月刊地球，11-6，377-385 (1989).

(2) 地殻変動観測

Gladwin, M.T. : High-precision multicomponent borehole deformation monitoring, Rev.Sci.Instrum, 55, 2011-2016 (1984).

石井 紘：ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震，地震予知連絡会会報，58，254-263(1997a).

石井 紘：深部ボアホール地殻活動総合観測と今後の地震予知研究，月刊地球号外，No.18，109-114 (1997b).

石井 紘：深部ボアホール地殻活動総合観測の重要性・今後の短期予知研究と地殻変動連続観測，月刊地球号外 新地震予知研究，No.20，198-204 (1998a).

石井 紘：地震予知研究のためのボアホール地殻活動総合観測装置と岩盤工学への応用，第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，3-10 (1998b).

石井 紘 : ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方群発地震, 地震予知連絡会会報, 60, 256-261 (1998c).

石井 紘・藤森邦夫・向井厚志・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣 : 深度 800m のボアホールにおける地殻活動総合観測, 月刊地球号外 断層解剖計画, No.21, 14-20 (1998d).

Ishii, H., T.Yamauchi, and F.Kusumoto : Development of high sensitivity bore hole strain meters and application for rock mechanics and earthquake prediction study, Rock Stress, 253-258, Balkema (1997a).

Ishii, H., G.Chen, and Y.Ohnishi : Estimation of far-field stresses from borehole strainmeter observations, Rock Stress, 259-264, Balkema (1997b).

Ishii, H. and T.Yamauchi : Multi-component borehole Instrument for earthquake prediction study and it's application for rock mechanics, Proceedings of International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments, W2-5, 1-6 (1998).

Kasahara, K. : The source region of the Matsushiro swarm earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., 48, 581-602 (1970).

気象庁地震予知情報課 : 伊豆半島東方沖の群発地震と東伊豆で観測された歪変化の関連について, 地震予知連絡会会報, 37, 220-223 (1987).

気象庁地震予知情報課 : 伊豆半島およびその周辺の地震活動, 地震予知連絡会会報, 58, 229-238 (1997).

気象庁地震予知情報課 : 伊豆半島およびその周辺の地震活動, 地震予知連絡会会報, 61, 218-221 (1999).

国土地理院 : 伊豆半島およびその周辺の地殻変動 地震予知連絡会会報, 58, 290-311 (1997).

Kusumoto, F., H. Ishii, and K. Soma : A study on rock behavior of diverging tunnels using the new measuring system, Proceedings of ISRM 8th Congress, 1403-1406 (1997).

萩野 泉・萩原弘子 : 伊豆半島付近の地震活動 (1997年11月~1998年1月), 地震予知連絡会会報, 60, 234-242 (1998).

Okada, Y. and E. Yamamoto : Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan, J. Geophys. Res., 96, 10361-10376 (1991).

Okada, Y., E. Yamamoto, and T. Ohkubo : Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 105, 681-692 (2000).

Sacks, I. S., S. Suehiro, D. W. Evertson, and Y. Yamagishi : Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary information concerning strain steps, Papers Meteorol. Geophys., 22, 195-208 (1971).

坂田正治 : 新しく考案したボアホール式3成分ひずみ計, 国立防災科学技術センター研究報告, 25, 95-126 (1981).

坂田正治 : 神奈川県西部におけるIBOSによる地殻変動連続観測結果, 地震予知連絡会会報, 50, 220-231 (1993).

佐藤春夫ほか : 孔井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発, 地震 2, 33, 343-368 (1980).

Sibson, R. H. : Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence, Tectonophysics, 211, 283-293 (1992).

高橋 誠・佃 栄吉・小泉尚嗣・佐藤 努 : 伊豆地域におけるテレメータによる地下水位・自噴量・水質観測結果 (1996年1月~1997年5月) (15), 地震予知連絡会会報, 58, 312-317 (1997).

恒石幸正：光波観測による伊東付近の地殻変形（1997年3月），地震予知連絡会会報，58，272-277（1997）。

山本 明・長谷川昭・佐藤博樹：地震波速度から推定した東北日本地殻内温度構造と浅発地震の深さ分布，日本地震学会講演予稿集，No.2，A45（1997）。

Yamamoto, E., Y.Okada, and T.Ohkubo：Ground tilt changes preceding the 1989 submarine eruption off Ito, Izu Peninsula, J. Phys. Earth, 39, 165-176（1991）。

山本英二・岡田義光・大久保 正：1997年3月の伊豆半島東方沖の群発地震活動とそれに伴う傾斜変動，地震予知連絡会会報，58，264-269（1997）。

山内常生・石井 紘・松本滋夫・平田安廣：初期応力測定用メモリー内蔵回収型歪計の開発，第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，73-78（1998）。

（3）地下水観測

（i）地下水観測手法

Noguchi, M. and H.Wakita：A method for continuous measurement of radon in groundwater for earthquake prediction, J. Geophys. Res., 82, 1353-1357（1977）。

（ii）地下水観測の有効性に関するもの

（a）ラドン

Igarashi, G. and H.Wakita：Groundwater radon anomalies associated with earthquakes, Tectonophysics, 180, 237-254（1990）。

Wakita, H.：Precursory changes in groundwater prior to the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, Earthquake Prediction, An International Review, D.E. Simpson and P.G. Richard, Eds., Maurice Ewing Series, vol.4, 527-532, Amer. Geophys. Union（1981）。

Wakita, H.：Groundwater observations for earthquake prediction in Japan, Proceedings of the International Symposium on Continental Seismicity and Earthquake Prediction, 494-500, Seismol. Press, Beijing（1984）。

Wakita, H., Y.Nakamura, K.Notsu, K.Noguchi, and T.Asada, : Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, *Science*, 207, 882-883 (1980).

Wakita, H., Y.Nakamura, and Y.Sano : Groundwater radon variations reflecting changes in regional stress fields, *Proceedings of the U.S.-Japan Seminar in Practical Approaches to Earthquake Prediction and Warning, Earthq. Predict. Res.*, 3, 545-557 (1985).

Wakita, H., Y.Nakamura, and Y.Sano : Short-term and intermediate-term geochemical precursors, *Pure Appl. Geophys.*, 126, 267-278 (1988).

Wakita, H., G.Igarashi, Y.Nakamura, Y.Sano, and K.Notsu : Coseismic radon changes in groundwater, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 417-420 (1989).

Wakita, H., G.Igarashi, and K.Notsu : An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: a possible precursor? *Geophys. Res.Lett.*, 18, 629-632 (1991).

(b) 地下水位

Igarashi, G. and H.Wakita : Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, *J. Geophys.Res.*, 96, 4269-4278 (1991).

Igarashi, G., H.Wakita, and T.Sato : Precursory and coseismic anomalies in well water levels observed for the February 2, 1992, Tokyo Bay earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1583-586 (1992).

King, C.Y., S.Azuma, G.Igarashi, M.Ohno, H.Seto, and H.Wakita : Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells, in Tono, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, 104, 13073-13082 (1999).

Ohno, M. H.Wakita, and K.Kanjo : A waterwell sensitive to seismic waves, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 691-694 (1997).

Ohno, M., T.Sato, K.Notsu, H.Wakita, and K.Ozawa : Groundwater-level changes in response to bursts of seismic activity off the Izu Peninsula, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2501-2504 (1999).

Wakita, H. : Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, 189, 553-555 (1975).

Wakita, H. : Precursory changes in groundwater prior to the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, *Earthquake Prediction, An International Review*, D.E. Simpson and P.G. Richard, Eds., Maurice Ewing Series, vol.4, 527-532, Amer. Geophys. Union (1981).

(c) 化学組成

Sato, T., H.Wakita, K.Notsu, and G.Igarashi : Anomalous hot spring water changes: Possible precursors of the 1989 volcanic eruption off the east coast of the Izu Peninsula, *Geochem. J.*, 26, 73-83 (1992).

Tsunogai, U. and H.Wakita : Precursory chemical changes in groundwater: Kobe earthquake, Japan, *Science*, 269, 61-63 (1995).

(d) 地下水全般

Silver, P. and H.Wakita : A search for earthquake precursors, *Science*, 273, 77-78 (1996).

Wakita, H. : Geochemical challenge to earthquake prediction, *Acad. Sci. USA*, 93, 3781-3786 (1996).

(iii) 北海道の地下ガス組成

Sano, Y. and H.Wakita : Helium isotope ratio and heat discharge rate in The Hokkaido Island, Northeast Japan, *Geochem. J.*, 22, 293-303 (1988).

Urabe, A., T.Tominaga, Y.Nakamura, and H.Wakita : Chemical compositions of natural gases in Japan, *Geochem. J.*, 19, 11-25 (1985).

Wakita, H., Y.Sano, A.Urabe, and Y.Nakamura : Origin of methane-rich natural gas in Japan: Formation of gas fields due to large-scale submarine volcanism, *Appl. Geochem.*, 5, 263-278 (1990).

(iv) 群発地震と地下水の関係

Mizoue, M., Y.Sano, and H.Wakita : Wakayama seismic swarms and high ^3He emanation observed in non-volcanic forearc region, *Proceedings of China-Japan Symposium on Earthquake Prediction*, Guoyu, D. Ed., 101-116, Seismological Press, Beijing (1989).

Wakita, H., N.Fujii, S.Matsuo, K.Notsu, K.Nagao, and N.Takaoka : "Helium spots": Caused by a diapiric magma from the upper mantle, *Science*, 200, 430-432 (1978).

Wakita, H., Y.Sano, and M.Mizoue : High ^3He emanation and seismic swarms observed in a non volcanic, forearc region, *J. Geophys. Res.*, 92, 12539-12546 (1987).

(v) 総説 (英文)

Silver, P. and H.Wakita : A search for earthquake precursors, *Science*, 273, 77-78 (1996).

Wakita, H. : Geochemical challenge to earthquake prediction, *Acad. Sci. USA*, 93, 3781-3786 (1966).

(vi) 参考

角皆潤, 脇田 宏, : 1995 年兵庫県南部地震前の地下水の化学組成の変化, 月刊地球/号外, No.13 190-193 (1995).

脇田 宏 : 地下水中のラドン濃度は地震に伴って変化する, *化学*, 50, 546-548 (1995).

脇田 宏 : 地震と地下水の変化 : 地震予知の試み, *水環境学会誌*, 19, 342-348 (1996).

(4) 水圧の動的変化

Biot, M.A. : Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid, J. Appl. Physics, 23, 997-10 (1952).

長谷川誠・宮下国一郎・清水勝美・岡本明夫 : 地震による岩盤水理挙動－地下石油備蓄申木野基地の事例－, 土木学会論文集, No.631/III-48, 481-494 (1999).

川辺岩夫 : 地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震 2, 44, 341-364 (1991).

King, C.Y., S.Azuma, G.Igarashi, M.Ohno, H.Seto, and H.Wakita : Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells, in Tono, Central Japan, J. Geophys. Res., 104, 13073-13082 (1999).

Mavko, G.M. and E.Harp : Analysis of wave-induced pore pressure changes recorded during the 1980 Mammoth lakes, California, Earthquake sequence Bull. Seism. Soc. Am., 74, 1395-1407 (1984).

Roeloffs, E.A. : Hydrologic precursors to earthquakes : A review, Pageoph., 126,177-209 (1988a).

Roeloffs, E.A. : Persistent water level changes in well near Parkfields, California, due to local and distant earthquakes, J. Geophys. Res., 103, 869-889 (1988b).

(5) 地下深部の地震動特性

Fukushima, Y. and T.Tanaka : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 80,757-783 (1990).

Rojstaczer, S. and S.wolf : Permeability changes associated with large earthquakes : An example from Loma Prieta, California, Geology, 20,211-214 (1992).

Shimizu, I., H.Osawa, T.Seo, S.Yasuike, and S.Sasaki : Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine, Engineering Geology, 43,107-118 (1996).

高橋克也・武村雅之・藤堂正喜・渡辺孝英・野田静男 : 様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測, 第10回日本地震工学シンポジウム, C1-4, 547-550 (1998).

White, J.E : Elastic waves along a cylindrical bore, Geophysics, 3, 327-333 (1962).

Н.А. Урбан, Е.А.Воробьева, М.Н. Рудик : ЗЕМЛТРСЕНИЕ 5 АПРЛЯ 1987 ГОДА НА ЮЖНОМ САХАЛИНЕ, ЮЖНО-САХАЛИНСК (1988).

4. 2 調査観測計画の策定

地下の地質環境の長期安定性を評価するためには、地層環境に変化をもたらす可能性のある地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・沈降、浸食、気候・海水準変動等の天然現象の特徴や地質環境への影響を把握することが重要となる。特に、わが国は太平洋、フィリピン海、ユーラシア、北米の四つのプレートに囲まれた変動帯に位置していることから、地震や火山活動などに対しては十分な注意が必要となる。

核燃料サイクル開発機構は、幌延町において、地震観測による地震動データの取得・蓄積を行い、北海道北部地域の地震活動の特徴やその断層などとの関係を把握するとともに、試錐孔を用いた地下水のモニタリングデータと合わせて、地震が地下水に与える影響の評価を行う。

本件は上記研究の目的を全うするための最適な観測網を構築しようとするものである。その策定に際しては、幌延町および北海道北部地域の地震テクトニクス、最近報告された幌延町直下の地質環境の特徴等を基本としている。

1999年3月、科学技術庁により報告された「日本海東縁部における地震発生ポテンシャル評価に関する総合的検討」中に、歪み集中帯の概念がていねいに説明されている。要約すれば、日本海東縁部の海域で海底の地形や地下構造を調べ、また、沿岸から陸域にわたって活断層や地層の変形を詳しく調査した結果、過去二百万年前後以降に大きく歪んだ場所は南北方向に帯状に分布し、その数本の帯が日本海東縁部の海と陸を平行して走っていることがわかった。測地測量の調査でも、また地震活動の調査でも同じ傾向が見出されたので、地質学的歪み集中帯、地形学的歪み集中帯、測地学的歪み集中帯、地震学的歪み集中帯として、それぞれを抽出した結果、集中帯が重複しているところはいくつかあり、長期的にみても短期的にみても歪みが集中していることが示され、地震発生ポテンシャルの高い地域であることがわかった。その結果、日本海東縁部では、プレート境界が線で表されるようなものでなく、幅広い帯状の地域に分散しているという重要なことが提言されている。

北海道日本海沿岸域は日本海東縁部歪み集中帯の北東端に位置するが、資料が少ないので詳細については不明の点が多い。北海道北部は上記の報告で明らかにされた歪み集中帯の中に位置するが、詳しい調査はなされていないので、今回この地域の地質環境や地震テクトニクスを明らかにするための広域な地震、GPS観測等を実施する必要がある。

1998年10月と1999年12月に核燃料サイクル開発機構は幌延町およびその周辺地域の地質調査の結果を報告書（JNC TJ1400 98-001 北海道北部地域の地質に関する研究、JNC TJ1440 99-005 北海道北部地域における地質環境データ収集・

整理)にまとめ公表した。要約すると、本地域内には増幌層、稚内層、声問層および勇知層の各層が分布している。またこの地域内には北-南あるいは北北西-南南東トレンドの褶曲構造が発達し西から幌延~川口、六志内、豊富~大曲~雄興、北豊富、新目梨といった数条の背斜系列が並走している。そのうちの豊富背斜の西側には豊富断層が、西落ちの逆断層として発達している。また大曲断層は大曲背斜の西側から雄興背斜の西側にかけて延長する西落ち、東傾斜の長大な逆断層であり、両背斜の西翼を切断し、あたかも両背斜が東側からのし上げているような形態を呈している。大局的にみると、本断層を境に東側と西側とでは構造形態や分布する地層が大きく異なり、断層の西側では断層直近で傾斜が急になるものの、声問層より上位の地層が比較的緩い傾斜で分布しているのに対し、東側では声問層や稚内層、増幌層が、多くの断層に寸断されながら分布している。

また、重力データによれば、上記断層の西側では、地表の背斜は重力値の低い地域となっており、通常とは逆の現象であることが推定された。川口背斜の頂部付近に掘削された試錐井のデータによれば、深度 800m から掘止深度 4.505m までは異常高圧層となっていることが判明した。本井の掘削結果、特に、泥岩を主体とする鬼志別層が本背斜頂部で極端に層厚を増していることは、塑性流動によるダイアピル状の変形をしたためと考えられ、また重力値との関係も説明可能とされている。

さらに地質調査の結果、声問層は主部相と上部相とに分けられ、声問層主部相は声問層上部相と部分的に不整合関係にある。この不整合面は珪藻化石層序に基づけば約 240 万年前で、現在のこの不整合面の 1000m 以上におよぶ起伏はおよそ 240 万年前以降の地殻変動を示していると考えられる。

声問層主部相の上面の等深線図から単純に計算すると、ウブシ原野では最大 0.6mm/y の速度の沈降があり、大曲断層東側の丘陵では最大 0.1mm/y の速度の隆起が見られる。声問層上部相の基底をなす不整合面が示す地殻変動は現在の地形と調和的な分布を示している。

この地域には、1928 年 4 月幌延、1951 年 3 月豊富、1960 年 8 月問寒別、1960 年 10 月問寒別、1968 年 7 月問寒別、1975 年 12 月豊富(群発)、1986 年 8 月幌延、にそれぞれマグニチュード M4 クラスの地震が起こっており、また微小地震も南北の地質構造のトレンドに沿って発生しているなど、地震の規模は小さいが地域内に震源のある地震がしばしば認められている。しかし、この地域は観測の歴史が浅く、観測点の数が十分でなかったため、断層や活褶曲と地震との関連については不明な点が多い。このような地殻環境下で、地震による岩盤の破断・破碎とこれにともなう地下水経路の形成・変化、地震動による岩盤や地下水の性質の変化などを調べる調査観測は、地層科学研究の重要な研究テーマである。そのためには、この地域に高精度各種観測計器の高密度な展開を必要とし、かつそれらの

観測システムを着実に整備することにより、地質環境評価の基本となる研究成果が得られるものと期待される。

4. 2. 1 地震観測

(1) はじめに

北海道北部で地震観測が最初に行われたのは意外に古い。1930年ころ羽幌町に地震計が置かれたことがあったが、すぐ地震活動の高い浦河に移設されたようである。これは明治時代にいくつか小規模の被害地震が起こったためであろう。現在の北海道では過疎化が激しく進行しているが、太平洋戦争後10年間程度は引揚者の戦後入植によって町村部では現在よりもはるかに人口が多かった。各地に民間人に気象観測を委託した区内観測所が設けられ、地震の震度も報告義務があったようである。地震計のない場所・時代の震度データは大変貴重なもので、これだけでもある程度のマグニチュードや震央位置は推定可能である。この震度データは札幌管区气象台によって発行されていた北海道地震火山月報に記載されている(札幌管区气象台, 1985)。

1976年まで北海道北部の地震観測体制は気象庁の「稚内」、「留萌」、「旭川」しかなく幌延町までの距離はそれぞれ50km, 110km, 150mであり、1977年から運用された高感度観測点(1万倍)「旭川」2でも110km離れていた。幌延町で有感地震が発生しても震源位置が決まらないことが多かった。

森谷(1971)はこのような資料に基づいて地震活動を推定してみると、北海道北部では意外にもかなりの地震が発生していた。そこで北海道北部の幌延町、遠別町、中川町において3か月間連続地震観測を行って、微小地震が1日1個の割合で発生していることを見いだした。さらに森谷(1974)は北海道北部の地震活動と国土地理院(1970)が発表した地殻変動が意外に大きい三角辺長歪を示していたので、北海道北西沖で大地震が発生準備段階にあるのではないかと考えた。その10年後日本海中部地震が、さらに20年後北海道南西沖地震が発生して日本海北東縁部が注目されるようになった。森谷は北海道北部での地震活動をしらべるために1975年から連続地震観測を開始した。幸いなことに北海道北部には北海道大学農学部附属演習林があり、高い安全保障が得られる場所が多数見つかった。しかし観測条件の良いノイズレベルの低い場所には電源や人家が見つからず、観測点の決定には高い安全保障を優先せざるを得なかった。以来北海道北部では4-5か所の観測点を維持してきた。観測された地震は、地元の微小地震のほかに北海道およびその周辺で発生した地震の調査、たとえば深発地震の震源位置やメ

カニズム解を決定することにも威力を発揮した。北海道北部には高感度の地震観測点がなかったためである。深発地震の観測は北海道北部の走時異常について興味深い結果が得られることになった。図 4.2.1(1)に 1977~1995 年に起こった、震源の深さが 50km 未満の地震の震央分布を示す。

北海道北部に震源を持つ地震活動にはいくつか特徴があることがわかってきた。震源の深さ分布は数 km から 30km におよんでいた。通常地殻内部で発生する地震の震源は 5-20km 程度の範囲であることが多い。ここではやや深い地殻下部で発生していることがわかった (図 4.2.1(2)参照)。また群発性があつてきわめて小規模な群発から、2 週間ほど継続する比較的活発な地震活動が観測された。1975 年暮れから 1976 年正月にかけて、1986 年 8 月 (図 4.2.1(3)参照)、1988 年 8 月、および 1989 年 11 月に起こった群発地震活動が顕著であつた。また北海道北部で地震活動が観測される時期には他の北海道の地域でも活発になる傾向があつた。1993 年 7 月北海道南西沖地震の直後から北海道北部一帯で地震活動が高まり 3 か月以上も続いた (森谷, 1994)。メカニズム解から求められた北海道北部の応力場は、東西の圧縮力、南北の張力が卓越している (図 4.2.1(4))。

岡 (1986) は北海道北部にも活断層があつて後期新生代から活動していると主張している。幌延断層は稚内東方から南下する。一方大曲断層は稚内南方から南下し幌延町でほぼ会合する。幌延町東部間寒別では活褶曲構造が見られる。このような断層群の深部構造がどのようになっているのか、あるいは地震活動とどのような関係にあるのかは大変重要な問題である。

(2) 地震計の設置点

幌延を中心とした北海道北部の地震活動の特徴は、震源の深さが 0-30km とやや深いことである (図 4.2.1(2))。地震観測点は最低でも 5 か所程度は必要であるが、地震活動は北海道北部に広範囲に分布するので、北海道北部に広範囲に観測点が設けられることが望まれる。現在稼働中および建設途中の地震観測点の配置を考慮し、観測点を空間的に均一に配置することが重要である。

北海道北部は地震観測に適した堅い岩盤が少なく、地盤が悪いところが多い。幌延町は特に堆積軟岩が発達しているのでノイズレベルが高く、観測点設置には条件が悪い。しかしこの地下で起こっている現象をとらえるためには直上での質の高い観測が欠かせない。そこで幌延町における地震観測の方法としては堆積層を深く掘り下げ、堅い岩盤上に地震計を設置してノイズレベルを下げ、地震観測をすることが最上の方法である。この方法は多額の経費を要するがデータの質の高さには換えることはできない。このような深さ 1000m 級のポアホール地震観測点を幌延町内に大曲断層を挿んで 9 か所設置し、他の機関の地震観測点のデータ

も利用するのが最も良い方法と考えられる。

なお気象庁の最寄りの地震観測点には、稚内、北見枝幸、利尻島、焼尻島、初山別の5か所があり、稼働中である。また最寄りの北海道大学の地震観測点には、礼文島2か所、天売島、天塩中川、苫前の5か所があり、稼働中である。

また現在建設中の科学技術庁防災科学技術研究所の地震観測点（ハイネット）は19か所（北緯44度以北）ある。幌延町内には上問寒にあり、隣接して天塩町雄信内にも設置されている。さらに同研究所が計画中の観測点は13か所もある。このように既存ないし、まもなく完成する地震観測点は幌延町を中心に30か所以上にもなって震源決定精度やメカニズム解の決定精度も高くなるために、これらのデータを十分に活用する観測システムを構築することが重要である。

このようにすれば、幌延町の高品質ボアホール地震観測データと周辺観測点データを合わせて使用することによりきわめて高精度な地震観測網を構築できる。

さらに、幌延町内の強震観測点は、電力供給可能な駅を主体として11点を深さ10m程度の浅井戸観測点として整備する。これらは防災科学技術研究所の北海道北部（44度以北）に展開する強震観測点約30点と連携して観測を実施する。

（3）設置する地震計の機種・個数

高精度な地震活動の監視を行うためには、高感度地震計、強震計の2種類での観測が最低の条件である。高感度短周期地震計は微小地震観測に威力を発揮し、詳細な地震活動や震源分布を知るために必須の地震計である。長周期地震計はメカニズム解や震源過程の解析に非常な威力を発揮する。自然地震観測により地域および深部地盤の地震動応答特性等、地震動災害対策に資する調査観測を実施する。特に幌延町の軟弱な地盤の地震波増幅特性を計測するためには孔底と地上での強震動観測が必要である。ボアホール内孔底では2種類の地震計、地上では強震計を設置する。また地盤特性をさらに研究するために地上に多数の地震計を配列し地震波動、脈動などの微動を群列観測（アレイ観測）することも重要であり、町内に設置される強震計の浅井戸観測点を基準に臨時的な多数の地震動観測網を設置した観測研究が望まれる。

孔底地震観測点には地震計の他に地殻変動測定用の歪計、傾斜計、地下水温測定用温度計など各種の物理計測センサーも装填して地震観測とともに観測することが必要である。このような意味では、幌延町の地震観測施設は地殻活動総合観測施設（図4.2.1(5)）をネットワークとしたいわば“地殻環境観測所”という性格づけができる。

（4）データ伝送・収録システム

現在の地震観測には通常電話回線や衛星回線を使ったデジタルマルチチャン

ネルテレメータ方式が用いられている。A/Dコンバータのダイナミックレンジは24ビット、サンプリングは100ヘルツである。気象庁、大学および科学技術庁の地震観測においても互換性のある観測方式が用いられているので、幌延町の地震等観測施設においてもこれらと同じシステムが導入されることが望まれる。収録システムには、やはり現在多機関で使用されているWINシステムが有力である。

図4.2.1(6)に仮称幌延“地殻環境観測所”の地殻活動総合観測施設によるデータと伝送の、概念図を示す。

参考文献

- 森谷武男：北海道およびその周辺の浅発地震活動，地震予知連絡会会報12, 7-9, (1974)。
- 建設省国土地理院：北海道の地殻変動，地震予知連絡会会報2, 3-5, (1970)。
- 岡孝雄：北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス，地団研専報，31, 295-320, (1986)。
- 田村 慎：北海道北部地域の地震活動と地殻構造，北海道大学理学部 地球惑星科学専攻修士論文，1999。

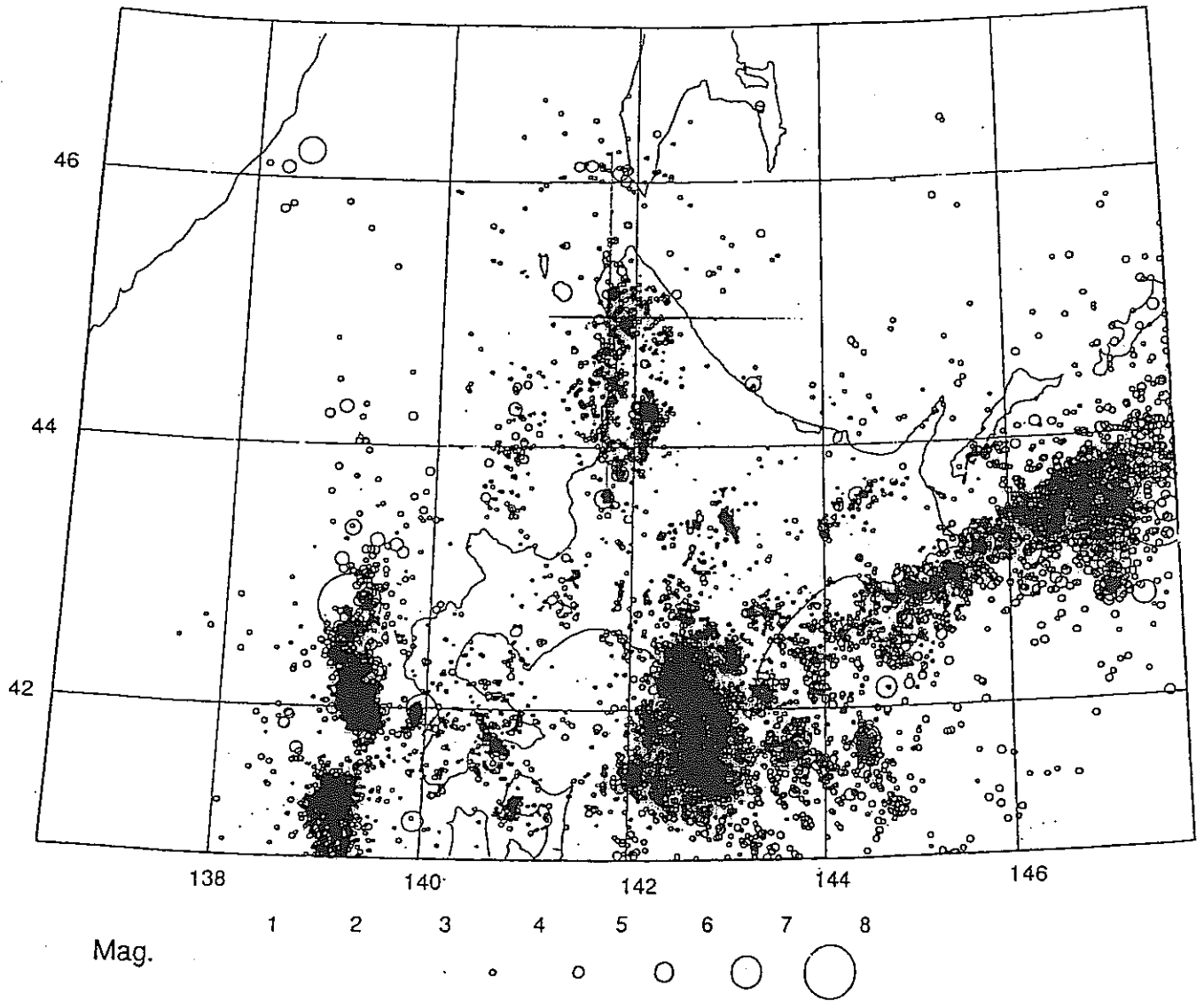


図4. 2. 1 (1) 北海道とその周辺に起きた震源の深さが50km未満の地震の震央の分布(森谷, 1999).

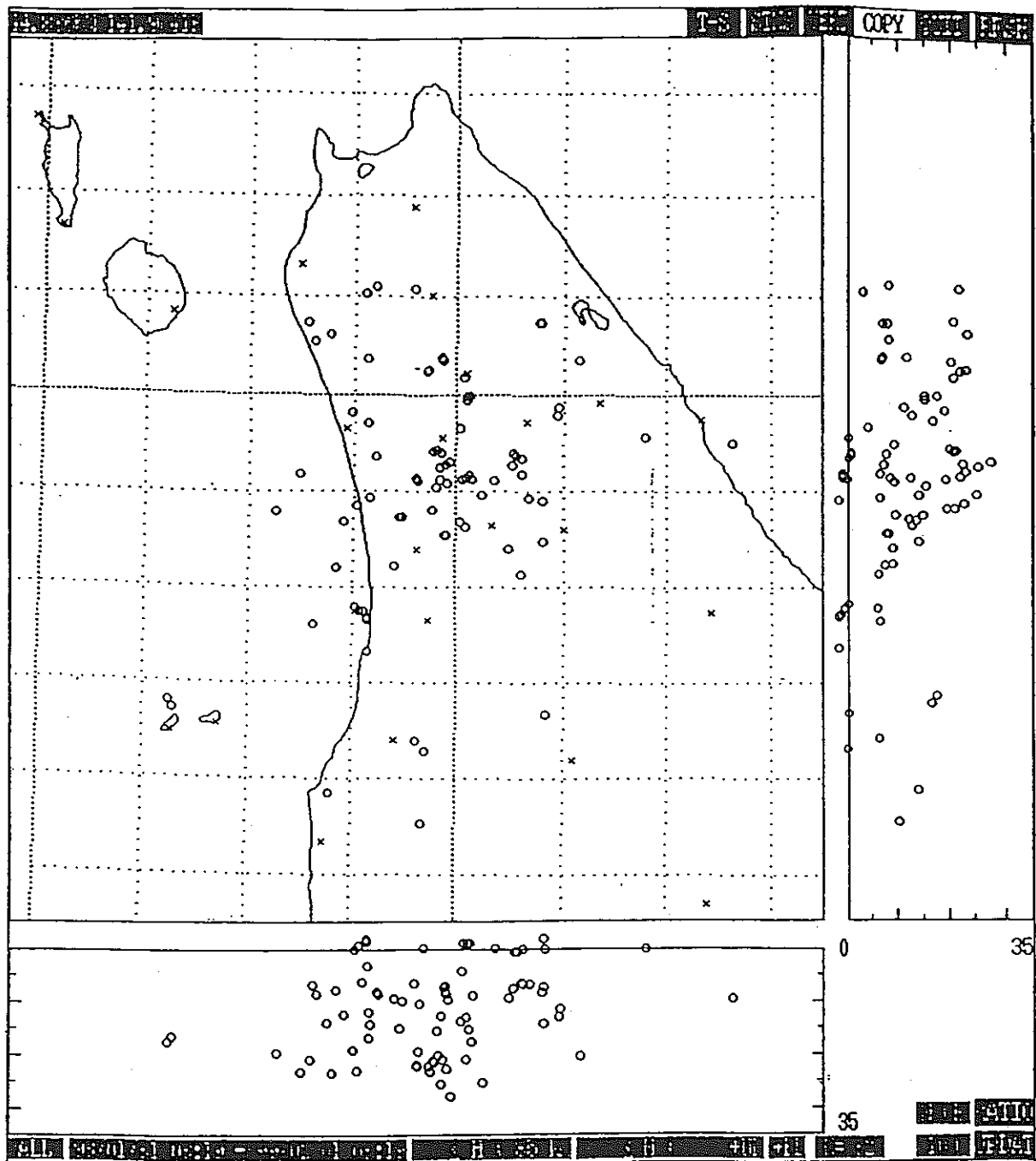
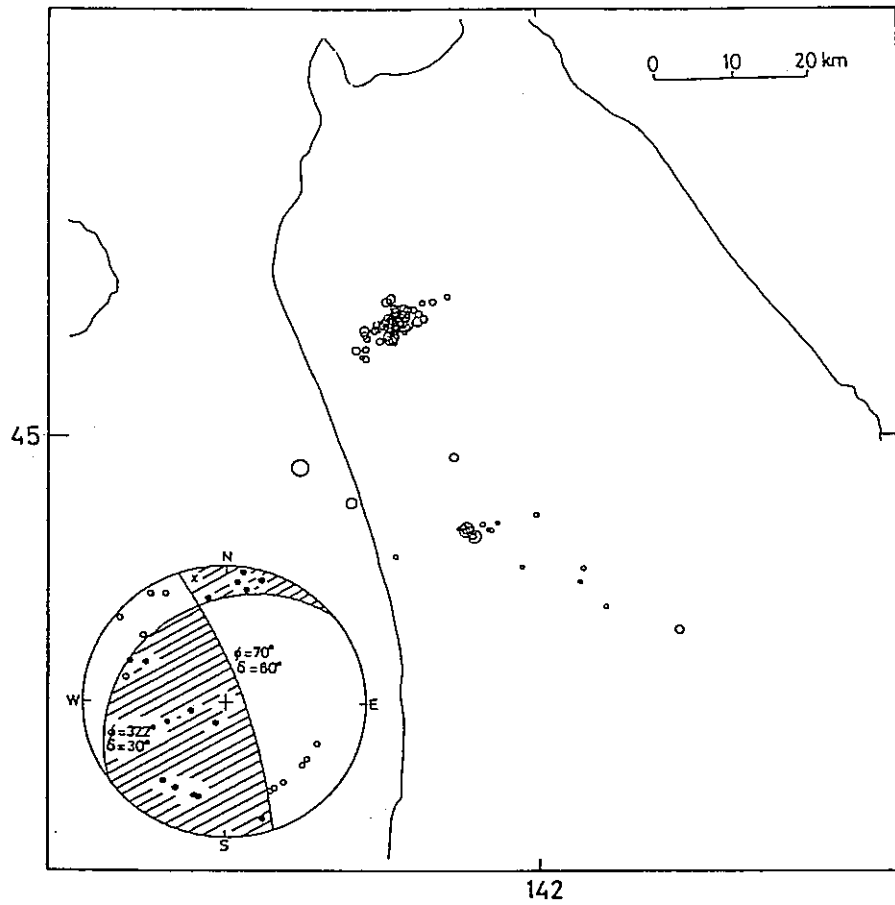


図4.2.1(2) 北海道北部における臨時地震観測による震源分布の例1.
1998年に行われた地震観測の結果を示す(田村, 1999).



142

図4. 2. 1 (3) 北海道北部における臨時地震観測による震源分布の例2.
1986年8月の広域群発地震活動 (森谷武男, 1987).

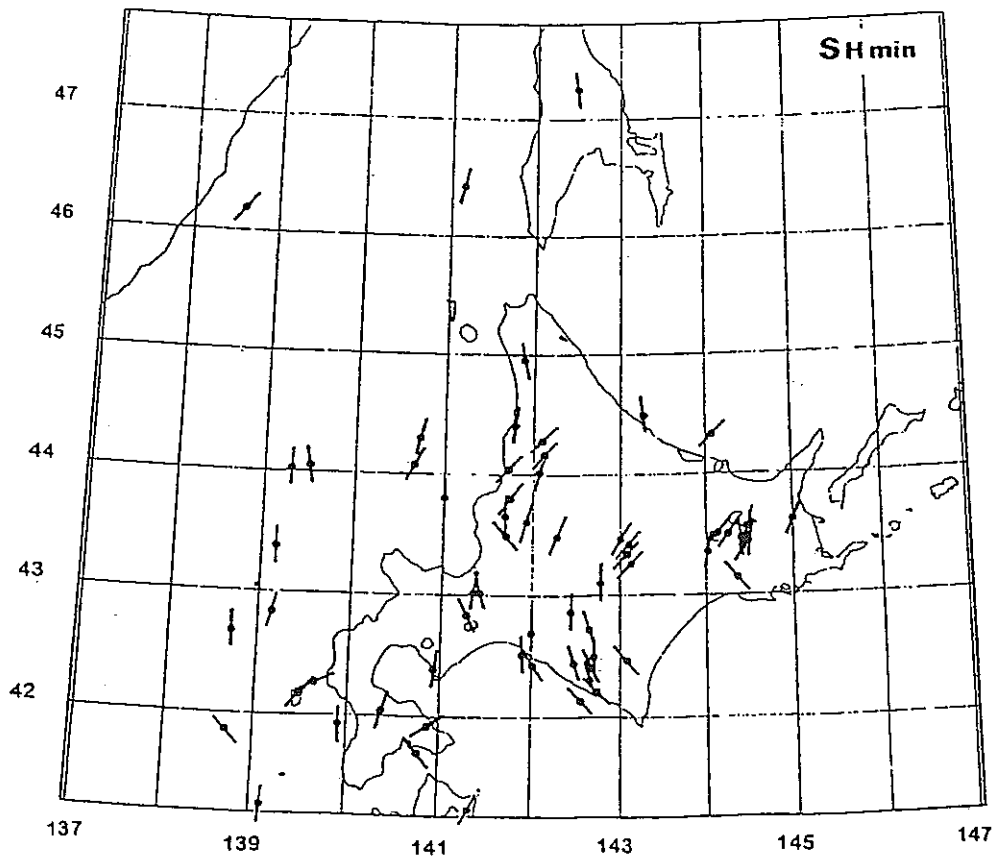
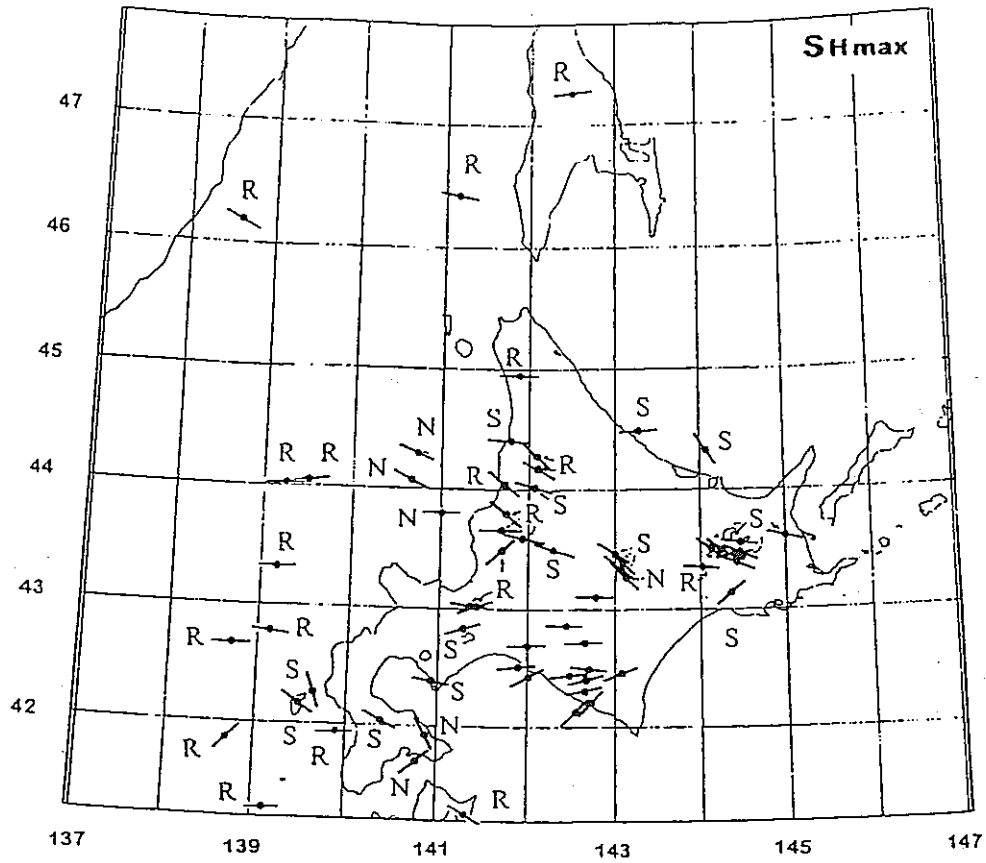


図4. 2. 1 (4) メカニズム解から推定された最大水平圧縮力の方向の分布.
R: 逆断層型, N: 正断層型, S: 横ずれ型 (森谷, 1999).

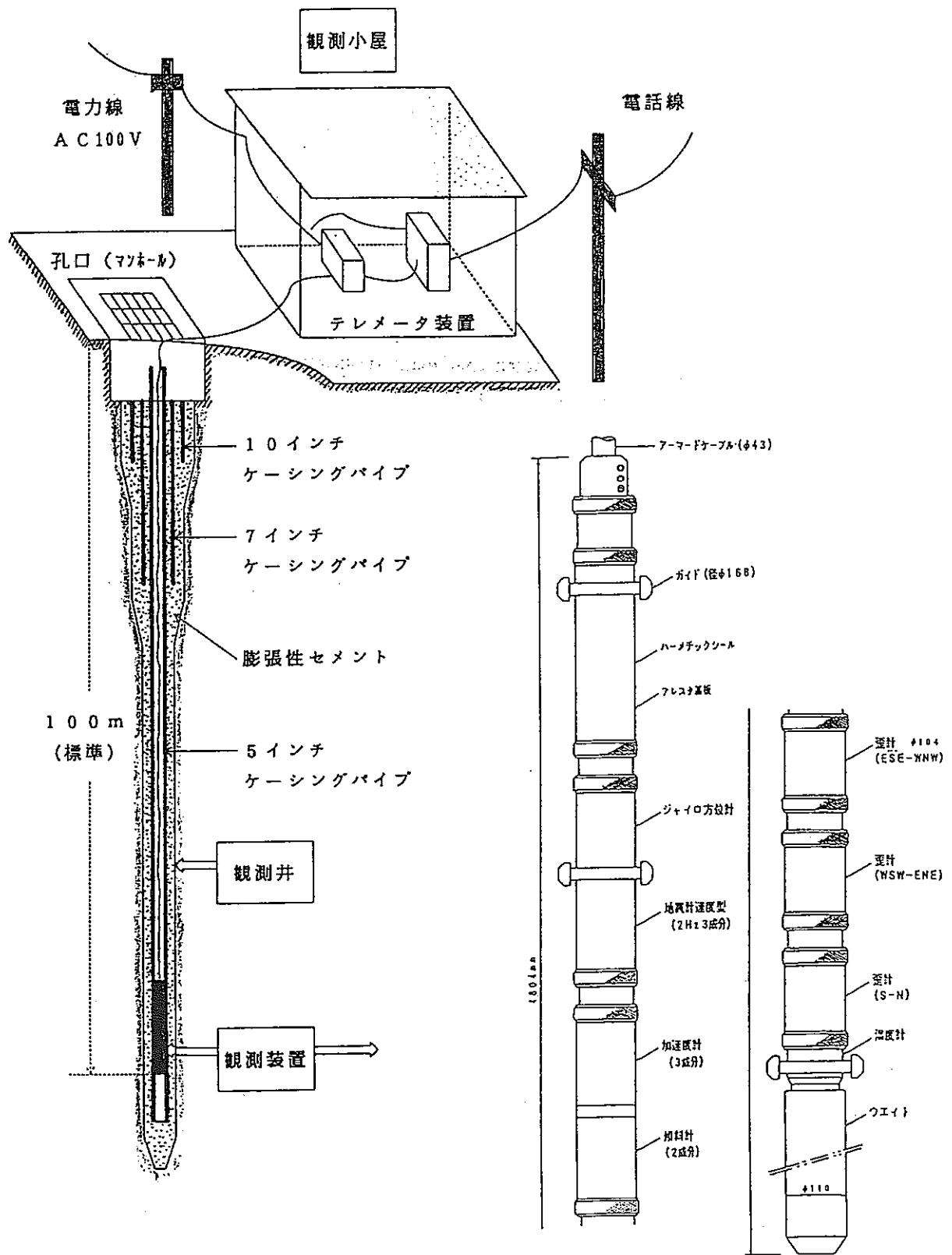


図4. 2. 1 (5) 地殻活動総合観測施設

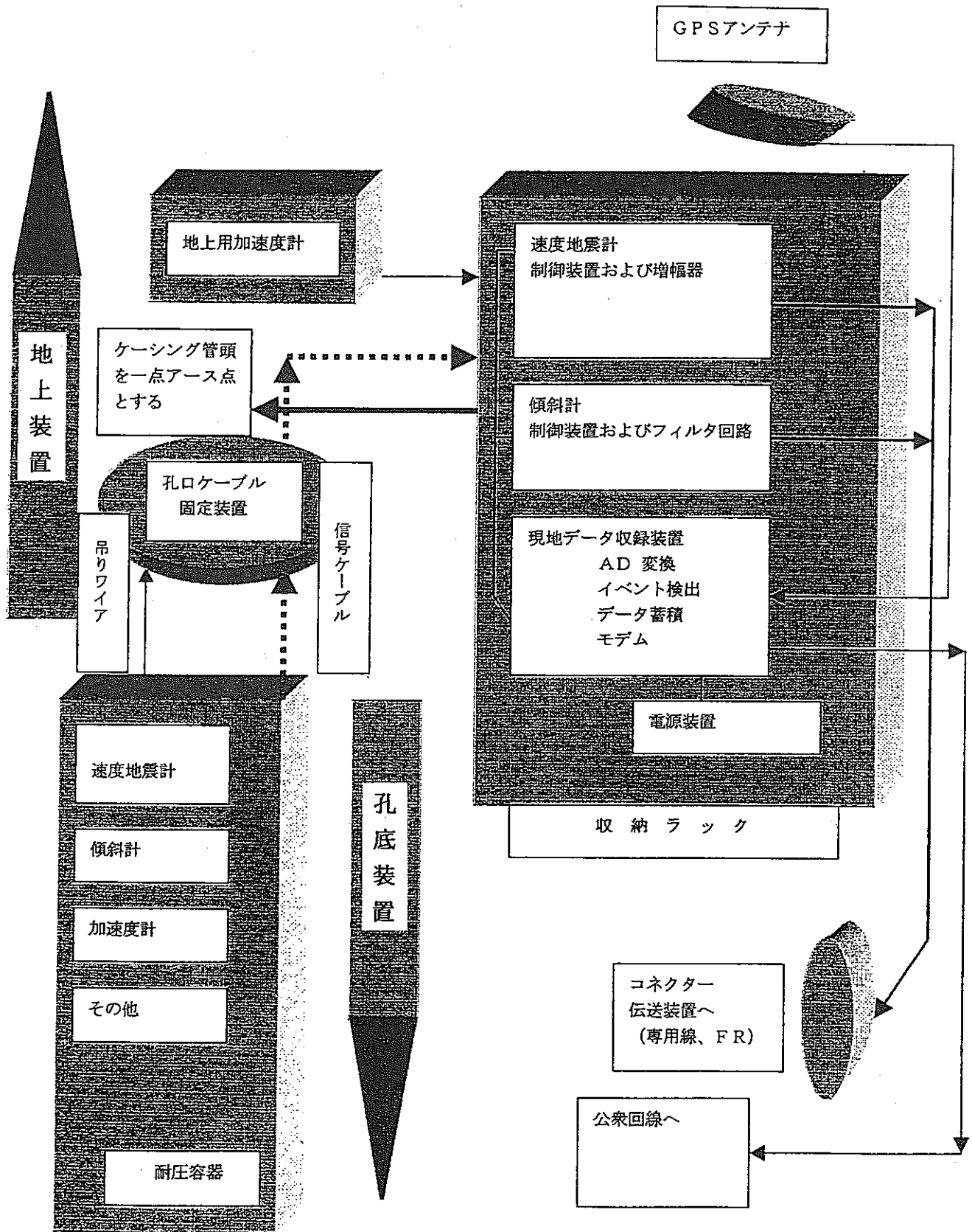


図4. 2. 1 (6) 地殻活動観測装置

4. 2. 2 AE・微小地震観測

アコースティック エミッション (Acoustic Emission) AEは物質内部の応力集中源における微小破壊,あるいは結晶転位すべりなどによる急激な運動によって生成される高周波数の弾性波(数10kHz~1MHz)である。脆性岩石のAEは主として応力集中源における微小破壊の発生・成長によるものである。したがってAEを観測することにより,岩石内部の微視的破壊過程を知ることが可能である。岩石に外部から応力を作用させると,AEが発生するが,応力増加に伴いその活動が増大し,やがて岩石は破壊に至る。破壊前に低い周波数のAEの発生比率が相対的に増大するのが一般的に認められている。破壊の前に石本・飯田の式の m 値が減少することと調和的である。このような特性を利用して,音響学的手法で物質内部の状態を評価することをAE法と呼び,1950年代以降,金属の圧力容器の健全性評価や耐圧試験などに使われてきた。その後トンネルや坑井の掘削にともない直接発生するAEも観測されるようになり,AE法の適用範囲が広がり地下工学の計測へ応用されるに至り,その観測周波数帯域も100Hz以下の帯域まで拡大されている。

一方,同じ1950年代,自然地震の検知能力・震源の決定精度の向上や発生機構の解明のための微小地震観測システムの構築が始められ,1960年代には地震の規模 $M1$ の微小地震,あるいはそれ以下の極微小地震も観測できるようになった。1970年代に入り,微小地震観測による鉱山の山はねの検知・予知の試みが広く行われるようになった。この手法を微小地震法と呼んでいるが,約1Hz~20Hzの地震の観測帯域を可聴音の帯域(下限は16~20Hz,上限は16~20kHz程度)まで周波数域を拡げてきたわけである。鉱山やトンネル工事などの地下工学の分野で,AEと微小地震の観測技術の融合が生じたといえよう。微小地震・AE法は鉱山における山はねの検知,トンネル,地下空洞掘削の監視や地熱・石油貯溜層の探査と評価,地熱・石油井の水圧破碎のモニタリングなど地下工学の広い分野で実用化されてきた。

(1) 観測機器および手法に関する調査

(i) AE

地熱発電所において,ビルドアップ時に発生するAEの監視や,水圧破碎にともなうAEの挙動を調べるために坑井式3成分AE計測ゾンデが東北大学により開発された。ボーリング坑内のAE観測の代表的なシステムとしてその内容を簡単に紹介する。ゾンデの中には3成分圧電型加速度センサー,プリアンプ,方位計などが組み込まれている。この加速度計の信号はアーマードケーブルにより地表に送られ,分解能16ビットPCMデータレコーダに記録される。

同時に自動 A E 読取り装置で A E 信号が自動検知され、パーソナルコンピュータによりハードデスクに記録される。ソンドは直径 10 cm、長さ 1.2m の円筒形で、外筒にはステンレス鋼が用いられており、20Mpa、150°Cの地下熱水環境下に耐えられる設計になっている。

また、鉾山坑内の超音波測定により地震時に速度変化が観測されたという重要な報告もある。山口大学と西松建設技術研究所のグループは釜石鉾山 550m レベル、坑口より約 2.5 km 離れた花崗岩坑道内で 1994 年 11 月より、岩盤内部の弾性波速度の精密連続観測を実施している。そこでは 1994 年 12 月 28 日の三陸はるか沖地震をはじめ、多数の地震にともなう速度変化が観測されている。佐野他は室内で計測された花崗岩の弾性波速度の圧力依存曲線に基づき三陸はるか沖地震時に観測された速度ジャンプ量 120ppm を 15~17kPa 応力低下にともなうドライクラックの開口によるものであると推定している。図 4.2.2(1) に観測システムの概念図を示す。送信子には圧電素子が使われ電圧 1 kV 繰り返し周波数 26kHz 弾性波が送信され、受信子には二つの加速度計が 16m 離れて設置されている。超音波の弾性波が 16m 伝播するに要する時間を測定しているのである。受信子で得られた波形は分解能 10 ビットでトランジェント イベントレコーダに記録され処理される。最近、より精度の高い測定を目指して測定間距離を約 50m 近くに設定していると聞いている。

1993 年、京都大学防災研究所住友則彦教授（当時）は科学研究費による「国際共同研究；地震発生の半制御実験」という課題で「南アフリカ金鉾山での地震発生の研究」を立ち上げた。現在、大学や国立研究機関の 20 名をこえる研究者が地震の震源の直近で「地震の一生をとらえ」ようと、地下約 2600m の水平坑道の長さ 200m の部分を利用して各種観測を展開している。9 台の 3 成分加速度計がトンネルの壁に開けられた長さ約 15m の穴の中に設置されている。加速度計の固有周波数は 16kHz で周波数応答は 0.5Hz から 7kHz まで平坦である。観測された波形はサンプリング周波数 14kHz、分解能 16 ビットで A/D 変換され光ケーブルで地上に送られる。

(ii) 微小地震

微小地震法は A E 法に比べより低周波帯域の観測となる。よって、微小地震観測に用いられる地震計は動電型（ムービングコイル型）の短周期速度型地震計が一般的である。これは永久磁石の中をコイルが振り子となって動くことにより生じる起電力を利用するもので、上下動は振り子を螺旋状のバネでつるし、水平動は板バネで支えられた水平振子の構造となっている。地震計の固有周波数は 1~5 Hz が平均的に用いられるが、固有周波数 2Hz の地震計が広く使用されている。自然地震法では地震計の数、配置が適切であることが必要であり、

またデータの収録方法、記録方式についても、目的に応じていろいろ工夫することが求められる。

地下の流体の圧入にともなう微小破壊の震源要素や地下の散乱体の抽出のためには、第一に高精度震源決定が要求される。そのためには、坑井内地震計を中心とした多点観測網の構築による高品質のデータの収集が重要な課題となる。多くの地震計を適当な間隔で配列した観測をアレイ観測と呼び、観測された記録に対して、適切なデータ処理によってS/Nを上げ必要な信号のみを抽出することにより、散乱源のマッピングが可能となる。不均質構造の詳細を知るためには、短波長不均質構造を検出可能とするアレイ観測が必要である。短波長不均質構造は地震波の波長と同程度かあるいはそれ以下のものを指し、走時解析からは検出が難しく、散乱体として振る舞うことが知られている。短波長不均質構造内を伝播する地震波は散乱して様々な方向、強度を持つ散乱波を生み出すことになる。短波長不均質構造を推定するにはこれらの散乱波を検出する必要がある。この点から、アレイ観測は波の伝播方向、速度などの性質を特定することが可能で最も適切な手法であると考えられる。

データの収録については、各観測点でデータの収録を行う分散型システムと、データのテレメタリングによる集中型の二つに大別される。それぞれのシステムに特徴があるが、集中型システムが分散型システムに比較してかなり有利な点は、リアルタイム解析が可能のこと、地震のイベント判定が分散型に比べはるかに容易であることがあげられる。

微小地震観測を目的として、アンプ部、トリガー機能、刻時機能、記録部などが一つのケースに納められている分散型の観測機器が開発され、既に、市販されている。微小地震観測や構造探査のために用意された製品で、ゲイン、ローパスフィルター、サンプリングレートなどの設定をパソコンで制御する設計になっていて、徹底した小型軽量化が図られている。その結果、多数の観測点の設置を効率的に行うことができ、テレメータ方式が困難な山間部などの臨時観測に威力を発揮している。

一方、テレメータ方式を前提にしたいろいろな収録機器が発表されているが、最近NTTの回線を使用することにより、地震計そのものの性能を伝えると言っても過言でない革命的な収録装置が出現し微小地震観測研究に大きな貢献をするものと期待されている。

また、最近、既存の地震探査器に地震波動自動検出のアルゴリズムを搭載した微小地震観測システムが開発された。この観測システムは最大入力数が96チャンネル(120ch)と多いことから、地震探査で用いられているCDPケーブルと組み合わせて群列観測を効率的に行うことが可能で、これを兵庫県南部地震の余震観測や、東北脊梁山地合同地震観測に用い、高品質なデータを得た。

最近、この装置を使った微小地震の群列観測が各地で実施されている。

(2) 他の研究機関におけるデータ処理・解析システム、解析手法に関する調査

4.2.1(2)でも述べたように(p.21)、他の研究機関の地震観測点のデータを利用することにより震源決定精度やメカニズム解の決定精度が高くなるため、これらのデータを十分活用する観測システムを構築することが重要である。そのため、他の研究機関で使用しているデータ処理・解析システムや解析手法について下記の項目を調査した。

(i) 記録波形フォーマット

収録された波形は分解能 16 ビットの観測であれば 1 サンプル 2 バイトのバイナリーコード、分解能 24 ビットの観測であれば 1 サンプル 3 バイトのバイナリコードでデジタル記録されているのが通常の形であろう。この記録をそのまま処理するのは、その記録サイズが大きいため解析効率も悪いし、また他機関のデータとの相互利用や併合処理を考えた場合には共通の波形フォーマットが定められていることが望ましい。

(ii) “WIN システム”

WIN システムは、多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで、UNIX 上で動作する多くのプログラムから構成されている。プログラムそれぞれは独立しており、使用者の環境にあわせてのカスタマイズが容易な汎用性の高いシステムである。また主要作業はグラフィカル・インターフェースによって行うため、UNIX に詳しくない人でも操作が楽な仕様となっている。

データフォーマットは WIN フォーマットと呼ばれる特殊フォーマットを定義している。このフォーマットはデータを圧縮して取り扱いを容易にし、テレメータなどによるデータ転送に向けた仕様となっている。また各機関でデータの収集・収録に異なったフォーマットを使用しているも、公開されている仕様にそってデータを変換することで WIN での使用を可能にできる。プログラムのソースコードも学術研究目的に限るという条件つきではあるが公開されており、それによって多くの機関が独自に変更を加えて利用することを可能にし、国内に広まっている。

現在、気象庁・各大学・防災科学技術研究所がそれぞれで収録している観測データを、同じ WIN フォーマットに変換してデータ交換を行う準備をすすめている。

<主な機能>

- ・波形データの受信、保存（オンライン自動収録機能）
- ・記録波形の表示（多チャンネル表示、波形のフィルター処理）
- ・手動・自動による読取り
- ・平田・松浦の方法による震源決定（発震時、震源位置、マグニチュードの決定）
- ・押し引きプロット
- ・地図表示（平面分布、深さ表示、時系列表示など）

(iii) 地震のメカニズム解の自動決定

地震研究所の自動決定システムは1993年10月より開始した。

遠地地震については、Harvard大学のDziewonski et al.(1981)によって開発された、地球の自由振動の理論に基づいたモーメント・テンソル決定方法を使用している。この方法は周期50秒以上の比較的長周期の波形をデータとして用い、発震機構を調べるのに適している。主に表面波を用いた方法で、グローバルなPOSEIDONデータに適用している。

近地（日本国内）の地震についても、同じHarvard CNT法を用いるが、空間的centroidはもとめず、時間だけを決める。ローカルな構造の影響を少なくするため、周期70秒より短周期の波形は使わない。POSEIDON観測点の広帯域波形データに適用している。

両方とも、地震発生後30分以内での自動決定が可能である。

防災科学技術研究所のシステムは1998年に構築、報告された。

計算処理などによって、比較的構造の影響を受けにくい20~50秒といった周波帯域で卓越する表面波を使用し、主に近地地震について自動で震源メカニズムを決定する。（グリーン関数を用いた波形インバージョン）解析には震源位置・マグニチュードの情報が手に入った後、約5分で解析を終了できるという即時性に優れ、また震源を十分にとり囲む観測点配置でなくても解が精度良く決まるため、海溝型の地震の解析にも優れている。FREESIAプロジェクトにより全国に展開された広帯域地震観測網のデータに適用している。

参考文献

物理探査学会：物理探査ハンドブック（手法編），第3章 微小地震・A E，153-191，（1998）。

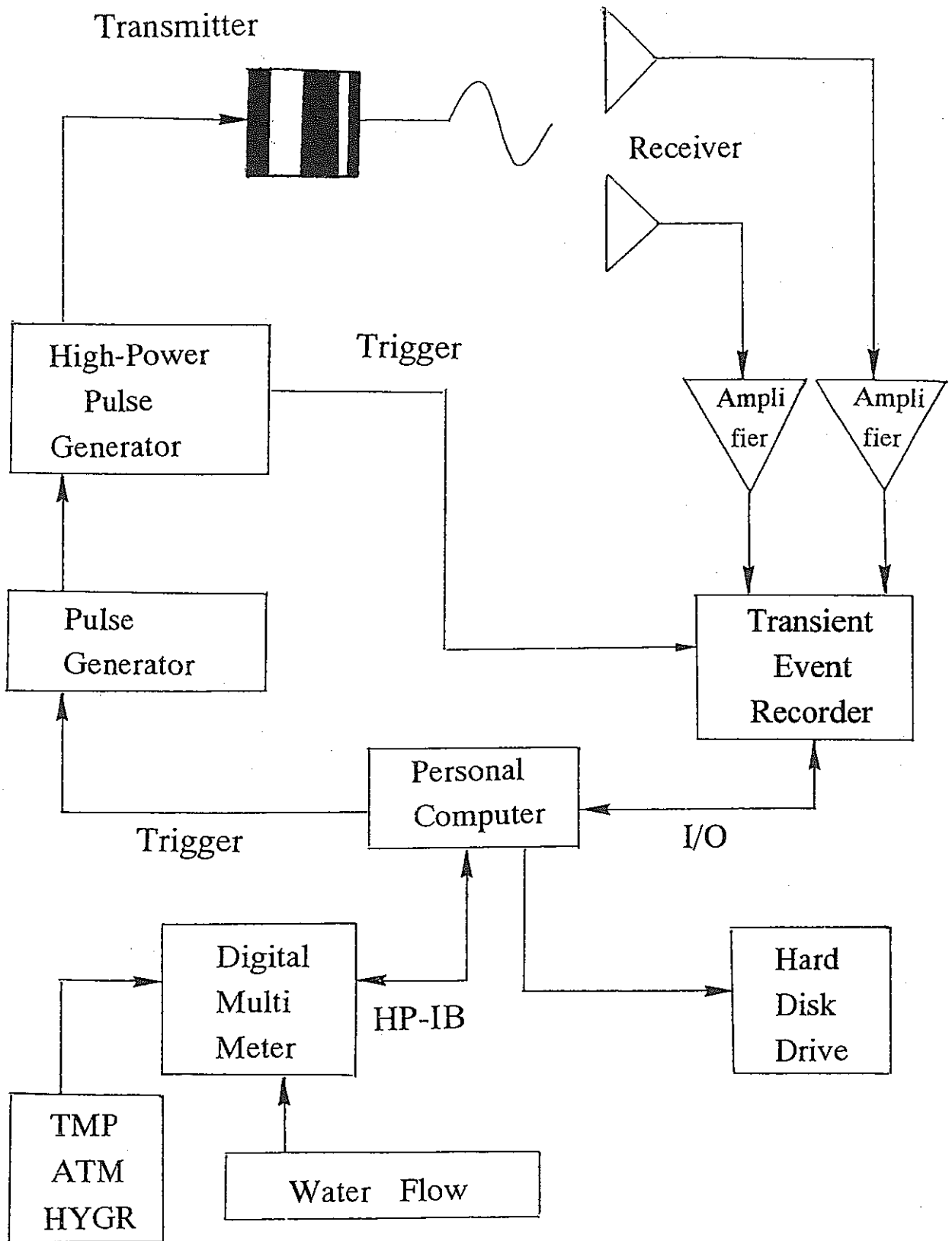


図4. 2. 2 (1) 観測システムの概念図

4. 2. 3 地下水観測

(1) 地下水観測の有効性

地殻は固体である岩石のほか地下水や各種の気体から構成されている。地殻内の地下水やガスは地震前後に起こる地殻の歪みに感度よく応答すると考えられている。地震の発生には、地下深部に存在する流体の作用が密接にかかわっており、地震の発生や予知に関する研究には、地下水やガスに関する知識が欠かせない。

地震前に地下水が変化したという報告例は多い。地下水変化は増幅率が高く、S/N比が大きいという特徴がある。1000 kmをこえるような遠距離の地震に対しても明瞭な応答性を示すなど、計算される歪み量からでは説明のつかない側面をもっている。これまでの研究から、少数ではあるが、地震応答性のきわめて高い井戸が存在することも知られている。また、地震応答の感度は地震発生後など、広域応力場が大きく変化した場合には、感度も変化するなど興味ある現象も知られている。

幌延地域は日本海に面し、地下水は海水の影響をうける。また、この地域は堆積層が厚く、天然ガスが賦存することでも知られている。さらに、地下 20 数kmの深部で活発な群発地震活動があるなど、解明されなければならない課題が多い地域である。東方部には大規模な蛇紋岩体（成因には超塩基性岩石と水との反応が深くかかわっている）の分布がみられ、その中間に大曲断層が走行するなど学問的興味の多い地域である。

(2) 観測計画

本観測では、幌延町を中心とした地域に、多点の深部孔井掘削を行い、各種観測により、地下水の水理特性、ガス移動などを三次元的に把握し、当該領域の地質環境に対する理解を深めていく。この間、平常時の変化を蓄積し、気象変化、人為的变化などによる影響などの要因に関する理解を深めていく。

地下水観測にあたっては、地殻変動観測と密接に連携して、観測研究の効率化を高めていく。

以下の地下水観測を行うことによって、これら諸点の解明を目指す。

(i) 深層ボーリング

深度 1000m 程度の孔井を地殻活動観測地区と対応して 12 か所掘削する

(ii) 観測項目

(a) 地下水位・水圧・ガス放出率測定

- (b) 水温測定
 - (c) 地下水、ガスの化学組成・同位体組成の測定
 - (d) 揚水試験、注水実験
- (iii) 観測手法・観測機器
- (a) 水位計（投込式液面発信器・感度 1mm）
 - (b) 水圧・ガス放出率計
 - (c) 水温計（水晶温度計・光ファイバー温度計）
 - 水晶温度計（分解能 1/10000）
 - ツウイン式超精密温度計（分解能 10 万分の 1 度，この器機により従来とは全く異なる新しい知見がえられる）
 - サーミスター温度計（分解能 1/1000）
 - 光ファイバー温度計（1,000m ループ，この器機により地表から孔底までの温度分布変化を記録できる）
 - (d) 気圧計・気温計・雨量計
 - (e) 地下水、ガスの化学組成・同位体組成
 - (f) データ収録・伝送システム

4. 2. 4 地殻変動観測

(1) はじめに

地震は地殻内部の断層破壊であるが物質が壊れるときには前兆的变化，特に変形が必ずあると考えられる。研究室における岩石破壊の研究においても前兆的変形が観測されているし，われわれの日常生活においても物の壊れる前に前兆的現象をほとんど見ることができる。例えば割り箸を曲げて折るときのことを考える。箸に力を加えると変形（曲がり）が生じミシミシと音がし始めて最後にポキンと折れる。この曲がる状態が地殻変動に対応し，ミシミシという音が微小地震・前震に対応し，折れる前の前兆的現象とみなされる。しかしながらこの状態を遠く離れたところやスリガラスをとおして見ると変形もよく見えないし音も小さくなる。また雑音の大きいところで見ると変形はわかるが音はよく聞こえない。これが現在前兆変化が観測されにくい状況に対応する。震源からの距離による地震の波と地殻変動の減衰を比較してみると地殻変動の方が 1 桁減衰が早い。これらのことを考慮すると地震が起こる領域と同じ岩盤内の地下深部における地殻活動総合観測体制を確立することが必要である。

(2) 観測項目

地殻変動観測に関する観測項目は以下のとおりである。なお、項目に* 印を付した項目は、巻末の用語解説を参照されたい。

(i) GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)連続観測

(ii) 測地測量

(a) 三角測量または三辺測量*

(b) 水準測量*

(iii) 傾斜計・歪計・験潮器(験潮儀)による観測

これらは、地殻の歪みや地盤の隆起、沈降、伸縮、傾斜等の変化、すなわち地殻変動を連続的に観測するものである。

(a) 傾斜観測*

(b) 歪計による観測*

(c) 験潮(検潮)*

(v) SLR * (Satellite Laser Ranging: 人工衛星レーザー測距)による観測

(vi) SAR インターフェロメトリー* (Synthetic Aperture Radar Interferometry, INSAR: 干渉合成開口レーダー)

(3) 観測手法・観測機器

Sacks ほか(1971)はポアホール体積歪計を開発し、1971 年代から歪観測に利用しはじめた。この計器は円筒容器中にシリコンオイルを封入し、体積歪の変化をオイルの移動に変換する方法であり、計器を大きくすることにより感度を上げられる高感度の計器である。変位センサーは差動変圧器を用いており、感度は通常 10^{-10} 程度は可能である。この計器は気象庁により関東・東海地域 31 か所に埋設設置されている。

その後、この体積歪計の原理を用いて 3 成分歪計が坂田(1981)により開発され、現在数か所のポアホール観測点において観測に用いられている。その後、坂田(1993)は佐藤ら(1980)により開発されたポアホール傾斜計や速度型地震計などを組み込んだ複合観測装置 (IBOS)として発展させ歪、傾斜、地震の観測を一つのポアホールで可能にした。

一方、Gladwin(1984)は歪と傾斜が観測可能な観測計器を開発した。歪計の原理は容器の口径変化を測定するもので 120 度の間隔で方向を変えた 3 成分の歪を測定する。口径変化は固定された板と変形する容器部分の差動変化をキャパシティブセンサーにより測定するものである。California のサンアンドレアス断層のところに数カ所設置してある。

石井ほか(1992)は原理を異にする小型多成分歪計を開発した。この歪計は口径変化を測定するものであるがテコの原理を適用したメカニカルな拡大装置を開

発し、取り付けることにより口径変化を40倍近く変位拡大し、マグネセンサーにより電氣的な出力に変換するものである。全長50cm、外径9cm以下の大きさに10⁻⁹以上のオーダーの3成分以上の歪の測定が可能である。また、石井ほか(1993)は震研93型並行二枚バネ式可搬型傾斜計の開発を行った。地震研究所(1995)ではこれらの計器を基にしボアホール地殻活動総合観測計器を開発した。この計器は3成分歪、2成分傾斜、速度型地震計3成分、加速度計3成分、温度計などが組み込まれており、必要な成分のみの組み合わせも可能である。その上、この計器には前述の複合観測装置にはない新開発したジャイロも搭載してある。歪計を搭載したボアホール計器は岩盤と一体化するために膨張性のセメントにより固め設置する。この場合に設置時の3成分の方向を決定する必要があるが開発したジャイロにより、1度以内の精度で決定可能である。この計器は地震後、兵庫県南部地震を発生させた野島断層の近傍の深さ800mのボアホールにも設置されている(石井ほか, 1988, 藤森ほか, 1998)。1本のボアホールで多成分・多チャンネルの観測を実施し、効果的に利用する事が重要である。

(4) 幌延における深部ボアホール総合観測の提案—中期、長期計画に向けて—

地震予知研究においては地殻変動観測は地震に関連した異常変化や前兆的变化を観測する上で重要な項目である。地殻変動連続観測においては歪や傾斜の連続観測を行っている。深部ボアホールによる地殻活動観測の有効性が明らかになりつつあり、地殻変動の観測も深部ボアホールで行われるようになってきている。しかしながら、実際に地震発生との関連において知りたいのは応力の絶対値とその変化である(Ishii et.al., 1997b)。観測計器設置前に計器設置地点における応力絶対値の測定後、歪観測により弾性常数の測定があれば、その後の応力変化を観測により知る事が出来る。地震研究所において開発した歪計は高感度であり、安定してデータを記録できることが観測経験から明らかになっている。このようなことを考慮して初期応力測定用インテリジェント回収型歪計を開発し実験を行っている。この計器は従来の地震研型の歪計の中にAD変換器、CPU、メモリー、バッテリーなどを内蔵している。この計器をボアホール内に膨張性のグラウトを用いて埋設設置し、グラウトの硬化を待ってオーバーコアリングを実施する。計器の埋設時期と回収の時期を考慮して観測開始と観測終了時刻をCPUにインプットしておくことによって一連のデータをメモリーに記録することができる。ボアホールの孔底から地上に計器を引き上げる過程においてボアホール内の水圧を利用して計器の検定を行う。このような観測されたデータから応力開放にともなう歪変化の観測および計器の検定のデータが得られ、初期応力を推定する事が出来る。図4.2.4(1)はこの計器を用いてボアホールにおいて埋設・設置、オーバーコアリングおよび検定などを行う場合のプロセスをスキマティックに示している。

現在まで8か所において計器の埋設・設置・回収を実施し、データを得ている。この方法の確立には計器の設計製作のほかに計器の設置・オーバーコアリングによる回収、感度検定、弾性常数の測定など総合的なシステム手法の開発が必要である。現在行われた最も深いボアホールは500mであったが良好なデータが得られている。将来は1km程度の深さにおける測定を目指している。

(5) 幌延における深部ボアホール総合観測の提案

図4.2.4(2)と図4.2.4(3)のように1000mクラスのボアホールを掘削する。この掘削過程において500m,750mと1000mにおいてインテリジェント回収型歪計を用いて初期応力の測定を行う。その後、総合観測装置を埋設設置して歪4成分(水平3成分,鉛直1成分),傾斜2成分,地震動(速度型,加速度型)各3成分,温度,地磁気4成分の連続観測を開始する。歪計は長周期地震動も良好に記録することができる。

長期的には1000mボアホール近くに900mと1100mボアホールを掘削し,圧力源を埋設設置する。定期的に圧力源を作動させ総合観測装置で観測するとともに数値解析により応力の時間変化を測定する。これは新しい試みである。900mと1100mボアホールには精密温度計を垂直に複数個設置し熱流量の測定や温度分布,温度の時間変化などを調べる。また,水位計も設置し水位の測定も行う。

適時注水実験を行い総合観測装置による観測から岩盤の物理的変化を調べるとともに地球化学的方法により水の伝播や浸透に関する研究も行う。

さらに,近くに150mのボアホールを掘削し複数の鉛直成分歪計を埋設設置することにより地盤沈下の様子を調べる。

参考文献

- 石井紘ほか：新しい小型多成分歪み計の開発と観測，地球惑星科学関連学会，1992年合同大会予稿集，205, (1992).
- 石井紘ほか：震研93型並行二枚バネ式可搬型傾斜計の開発と観測，地球惑星科学関連学会，1993年合同大会予稿集，88, (1993).
- 地震研究所：伊東における地殻活動総合観測装置による観測，地震予知連絡会会報，57, 340-346 (1997).
- 藤森邦夫・石井紘・向井厚志・中尾茂・松本滋夫・平田安廣：注水試験に伴う地殻変動，月刊地球号外，断層解剖計画，No.21, 38-43 (1998).

インテリジェント回収型歪計の地下深部への埋設とオーバーコアリングの概念図

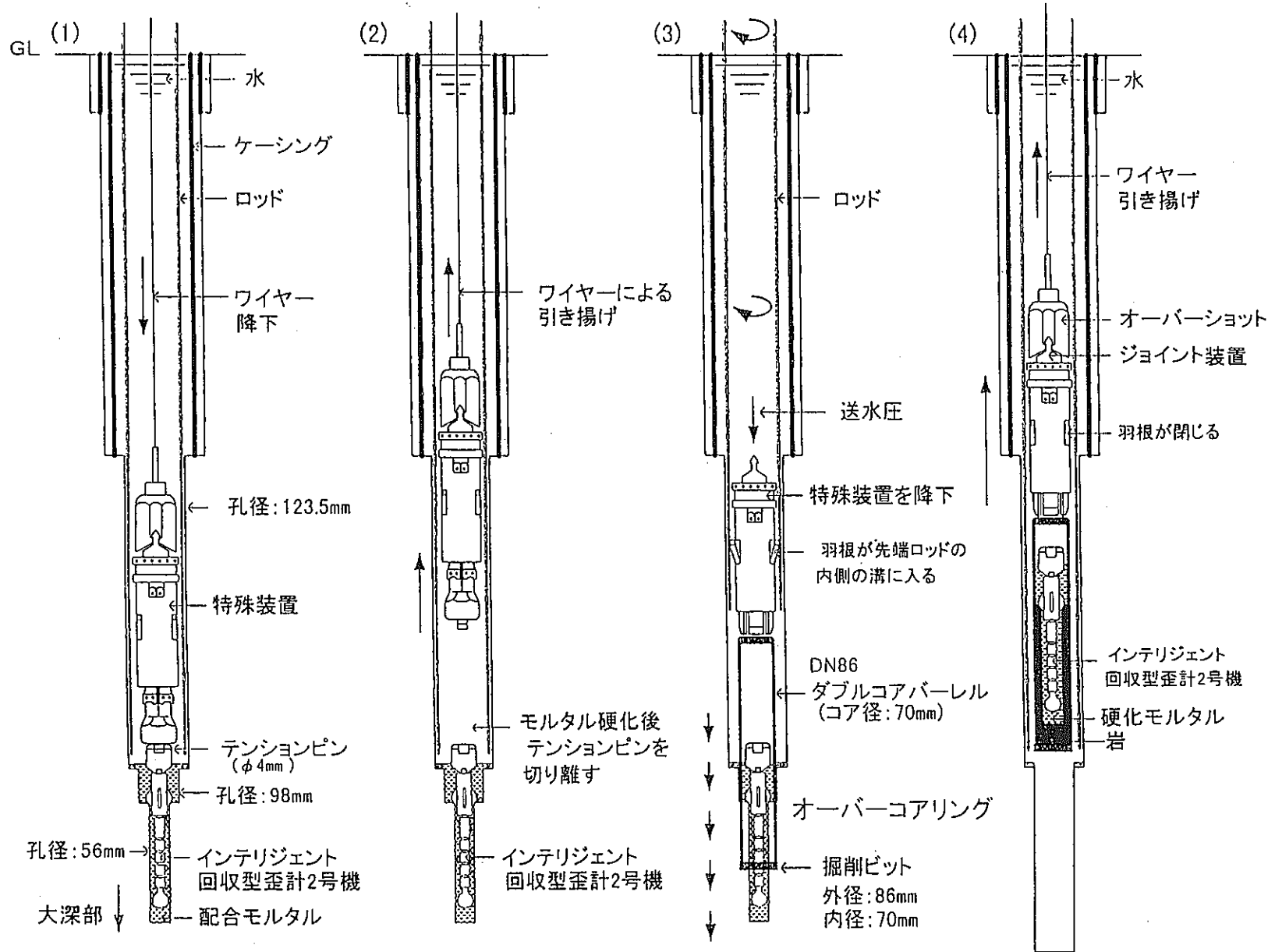


図4. 2. 4 (1) インテリジェント回収型歪計

深度 500m, 1000m, 1500mにおいてインテリジェント回収型歪計により初期応力測定

深度 1000mに地殻活動総合観測装置を埋設

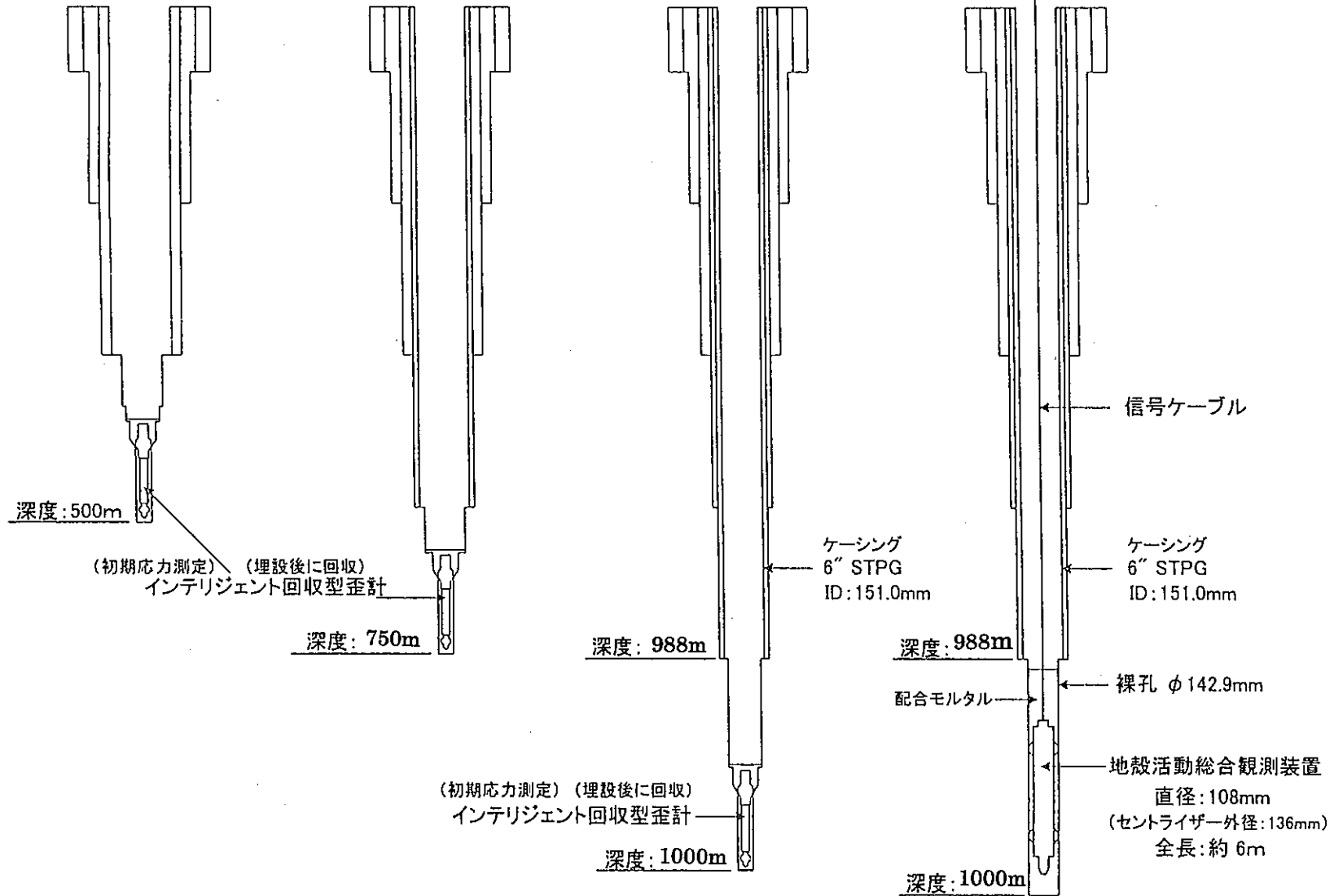


図 4. 2. 4 (2) 地殻活動総合観測装置

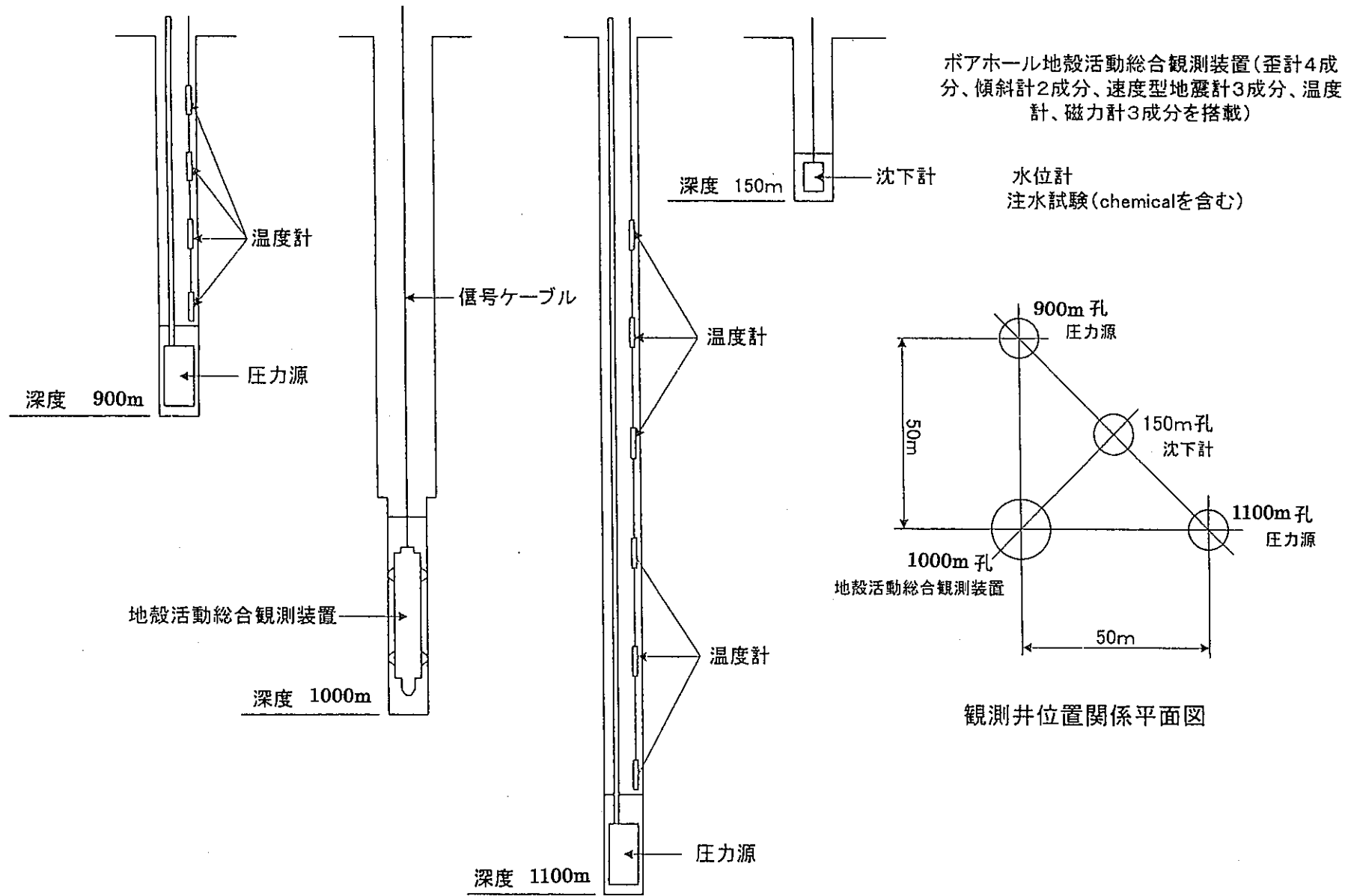


図4. 2. 4 (3) ボアホール地殻活動総合観測装置

インテリジェント回収型歪計の地下深部への埋設とオーバーコアリングの概念図の説明

(1) 埋 設

応力を測定する深度のボーリング孔底に小孔径 (56 mm) のパイロットホールを作る。このホールの中にベアラを用いて配合モルタルを充填する。インテリジェント回収型歪計をワイヤーライン式特殊装置に接続してロッド内を降下させ、モルタル充填内部に埋設する。

(2) インテリジェント回収型歪計の岩盤内定置

数日間のモルタル硬化期間を経た後、特殊装置とインテリジェント回収型歪計を切り離す。これによりインテリジェント回収型歪計が岩盤内に定置された状態になる。切り離しは、ワイヤーからの引張りテンションが特殊装置に伝達されると、ピンが自動的にはずれる仕組みになっている。

(3) オーバーコアリング

特殊装置にオーバーコアリング用の掘削ビット (円筒状) およびコアを採取するコアバーレル等を装着し、送水圧を利用してロッド内を搬送・降下させる。これらのアッセンブリーがロッドの先端、すなわちパイロットホールの上部に達すると、特殊装置の羽根が開いてアッセンブリーとロッドが一体化する。これにより地上の試錐機の回転力がロッドを介して先端の円筒状のビットに伝達されることになる。

オーバーコアリングは、インテリジェント回収型歪計を埋設したパイロットホールの外側の岩盤を包み込むようにして円筒状に切り込む形で行う。これにより切り込みを境にして、内側の岩盤の応力が外側の岩盤の応力から解放される。なお、切り込みはパイロットホールの孔軸と完全に一致させる。予定した長さまで岩盤を切り進んだ後、岩体から切り離し、コアバーレルに収納する。

(4) 回収および感度検定

コアバーレルに収納されたインテリジェント型歪計の回収は、アッセンブリーを降下させた工程の逆をたどる。特殊装置の上部はジョイント構造になっているので、ワイヤーライン方式によりこのジョイントをオーバーショットで接続し、特殊装置の羽根を閉じてロッドとアッセンブリーの一体化を解く。これにより、アッセンブリーは、ワイヤーによって高速に巻き上げられて回収が完了する。また必要に応じて、孔内に充たされている水の圧力を利用してインテリジェント回収型歪計の感度検定を実施する。回収されたコアからインテリジェント回収型歪計を取り出し、上端部を開けて内部コネクターから外部システムにデータの収集を行う。

4. 2. 5 地下流体が引き起こす群発地震と地殻変動

(1) はじめに

群発地震の発生と地下流体の挙動との関係については、1965年8月に始まった松代群発地震と、1978年6月から始まり20年にわたって継続している伊豆半島東方沖（伊東沖）群発地震の観測・解析事例が有名である。

これらに共通する事柄として、群発地震に伴って非常に大きな地殻変動が震源域の周辺で観測され、地震活動の消長と大変に調和的であり、何等かの膨張性をもった力源、即ち流体の関与が示唆されている。

さらに、伊東沖群発地震については、群発地震の開始に先行して前駆的地殻変動も生じていることが最近明らかとなり、その原因も地下における流体の動きであろうとの推測がなされている。

ここでは、このような群発地震活動に伴う地殻変動について、伊東沖群発地震での観測および研究事例を紹介する。

(2) 伊東沖群発地震に伴う地殻変動

地殻変動連続観測によって、群発地震活動に同期した地殻変動が観測されたと報告されたのは、1985年10月と1986年10月に気象庁の東伊豆に設置されていた体積歪計の観測によるものであったが、震源からの距離等からその信憑性は十分ではなかった。

1989年3月に、防災科学技術研究所によって震源に近い川奈に設置された深度92mのボアホール傾斜計は、その年5月に発生した小規模な群発地震活動に伴う明瞭な傾斜変化を捉えた。これに同期して東伊豆の体積歪計にも収縮センスの変化が観測され、相互に地殻変動の事象が確認された。

その後同年7月の大規模な群発地震の発生に伴い、非常に顕著な地殻変動が多くの観測所で記録され、岩脈貫入モデル (Okada and Yamamoto, 1991) による地殻変動の面的分布の解析が可能となった。

1989年のイベント以降、伊豆半島東部での地殻変動や地下水の連続観測点が関係機関によって強化され、その後のイベントについて、多種多様なデータが得られている。図4.2.5(1)は、顕著な一例として1997年3月の群発地震に伴った各種観測項目の変動の様子をまとめて示した。新井は東大地震研の傾斜・3成分歪変化、東伊豆は気象庁の体積歪変化、川奈は防災科技研の傾斜変化、大室山北は地

調の地下水位変化，GPSは地理院の小室山—初島間の斜距離変化，ITO-KIKは東大地震研の光波連続観測による距離変化，鎌田は気象庁による時間別地震回数を示している。観測点の配置は図4.2.5(2)に示す。

(3) 群発地震活動に前駆する地殻変動

ここ20m年間にわたって繰り返し発生している伊東沖の群発地震には，最近群発地震発生の際に，これに前駆する地殻変動が生じていることが明らかとなっている。

その例を図4.2.5(3)に示す。図の(a)は1997年3月の群発地震活動一週間前からの川奈における傾斜計の東西，南北成分の傾斜変動を示したものである。この図からは群発地震発生後には明らかな変動が認められるが，地震発生前はその変化は定かではない。そこで上記傾斜記録より傾斜のベクトル図を作成したのが図の(b)である。これは観測点が海岸に近く，海水の潮汐荷重変化を受けて規則的な傾動を示していたものが，地震発生一日前の3月2日6時からの傾動ベクトルが，15時頃から通常の変動とは異なる動きを示しており，3日0時過ぎから発生した群発地震の7～8時間前から，前駆的な北東下がり大きな傾動が検出されたことを示している。

川奈の傾斜計記録を前駆現象検出のためにさらに再検討し，潮汐変化の重複を取り除いて，これまでの大きな群発地震のイベントごとに解析した結果を，図4.2.5(4)に示す。これによれば1993年5月～1998年4月の間の5イベントに対して，川奈の傾斜計は伊東沖群発地震に対して，北東に傾動するという特徴がある。傾動ベクトル線上には1時間ごとに印しが付けてあり，特に地震前4時間は白丸，地震後4時間は黒丸で示されている。

このように，地震発生前8～10時間前から傾斜の異常が観測できることは，連続的な観測・解析により，数時間前には伊東沖の群発地震の予知は可能であることを示している。

このような前駆現象の観測は，東大地震研の3成分歪計，地調の地下水位観測でも得られており，GPS等も含めた地殻活動観測の重要性が実証されている。

(4) 地殻変動観測成果の意味

当地域の群発地震の発生は深さ10kmくらいから始まり，その後急激に浅くなる性質がある。岩脈の貫入が約10kmより深い所で生じている場合は，地殻変動のみを生じ，貫入が10kmより浅い所に侵入すると群発地震活動が始まるものと推定される。伊豆半島地域では10kmの深度では，地温は300～350℃に達すると推定されるが，ここになんらかの物性的に不連続な性質を持つ層が存在し，その不連続層が地震発生のコントロールをしていることが想像される。

このことは、伊東沖のみに限らず一般的な内陸地震の発生機構を考える上で重要な示唆を与えるものと考えられる。

これまでの地震の研究から、地殻内部には地震発生層の最下部付近に不透水性の層があり、その下部には高圧流体が存在すると推定されている。

そこで、この層を破って大地震の前兆としての「ずり断層」が生成されると、そこを通過して高圧流体が上部地殻内に供給され、本震の断層面周辺に大量の余震活動を生じさせたり、ある場合は、地表に地下水を噴出させたりすると考えられる。

これとの類推で、伊東沖の場合、岩脈マグマによる「開口断層」が不透水層をつき破って高圧流体が上部地殻に噴出し、群発地震活動を発生させると考えることができる。従って、地殻内流体の動きを解明することも、極めて重要な研究である。

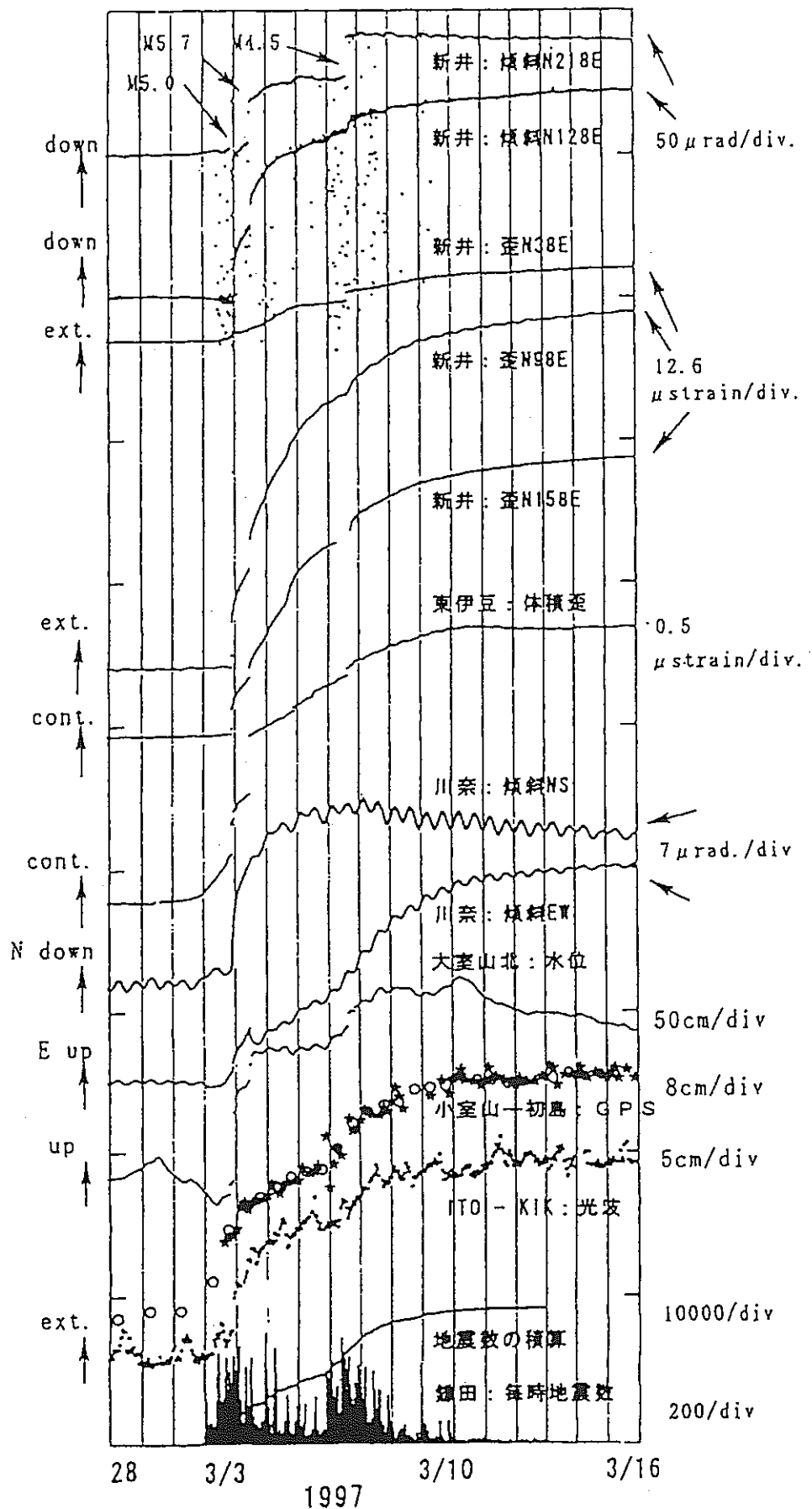
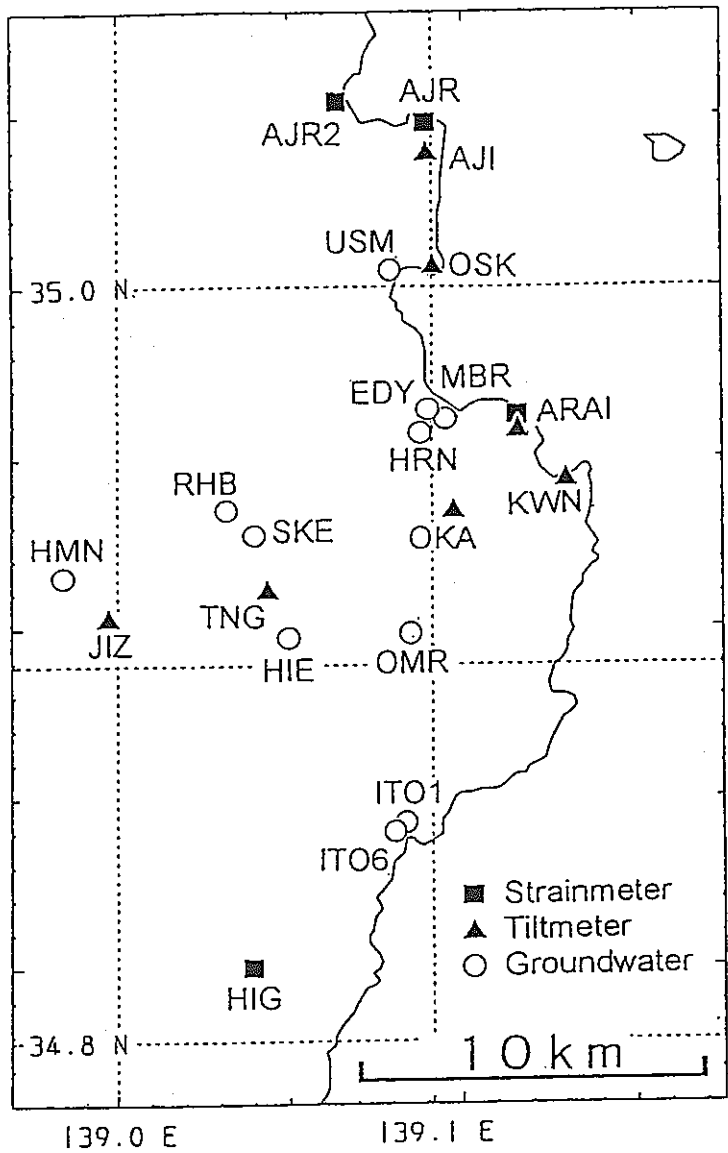


図4. 2. 5 (1) 1997年3月の伊東沖群発地震活動に伴い観測された傾斜, 歪, 地下水位, GPS, 光波測距の変動



伊豆半島伊東周辺の地殻変動観測点

観測点名称	観測機器種類	所属
AJR	体積歪計	気象庁
AJR2	同上	同上
HIG	同上	同上
ARAI	3成分歪計	東大地震研
AIJ	傾斜計(坑道)	同上
OSK	同上(孔井)	気象庁
ARAI	同上	東大地震研
KWN	同上	防災科技研
OKA	同上	同上
TNG	同上	同上
JIZ	同上(坑道)	同上
USM	地下水(水温)	気象庁
MBR	同上(水位)	地調
EDY	同上	東大
HRN	同上(水温)	東大
RHB	同上(ラドン)	東大
SKE	同上	同上
HMN	同上	地調
HIE	同上(水位)	同上
OMR	同上	同上
ITO1	同上(水温)	同上
ITO6	同上	同上

図 4. 2. 5 (2) 伊豆半島伊東周辺の地殻変動観測点

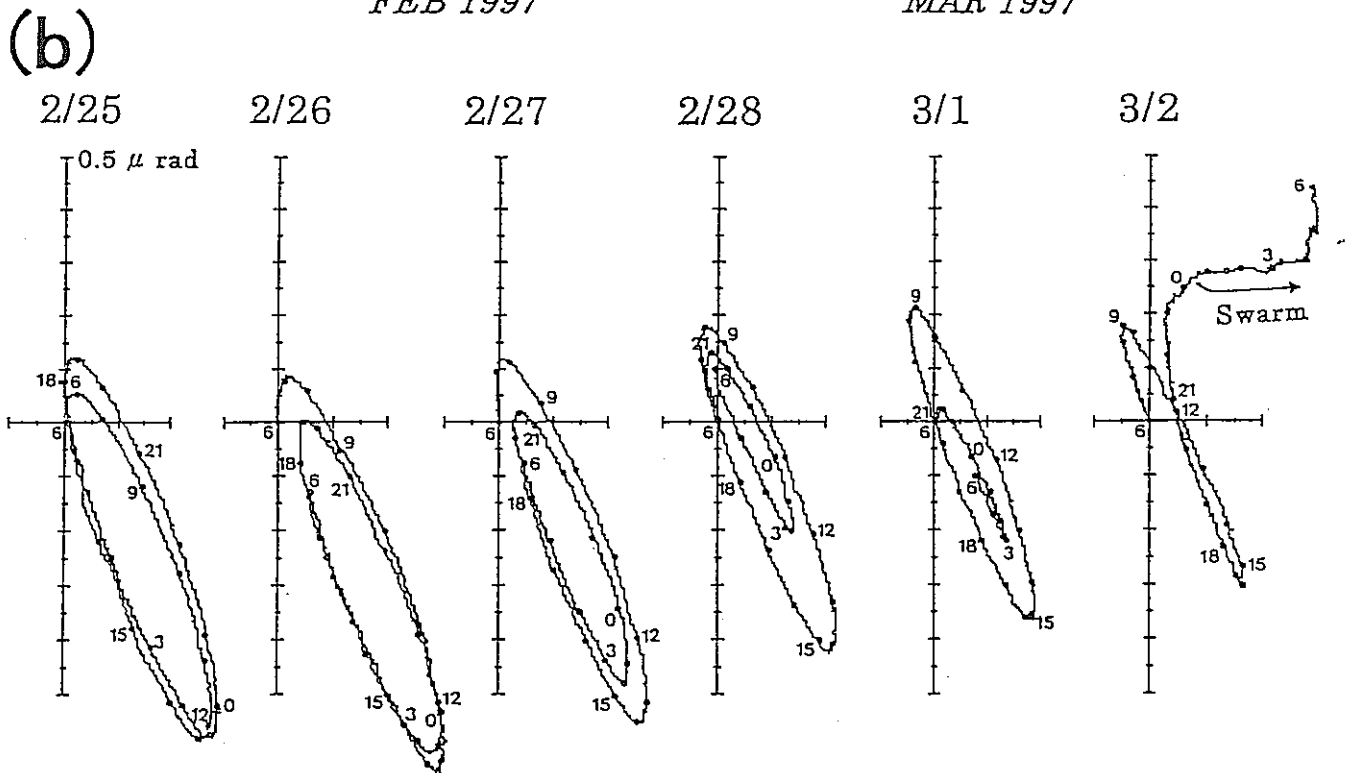
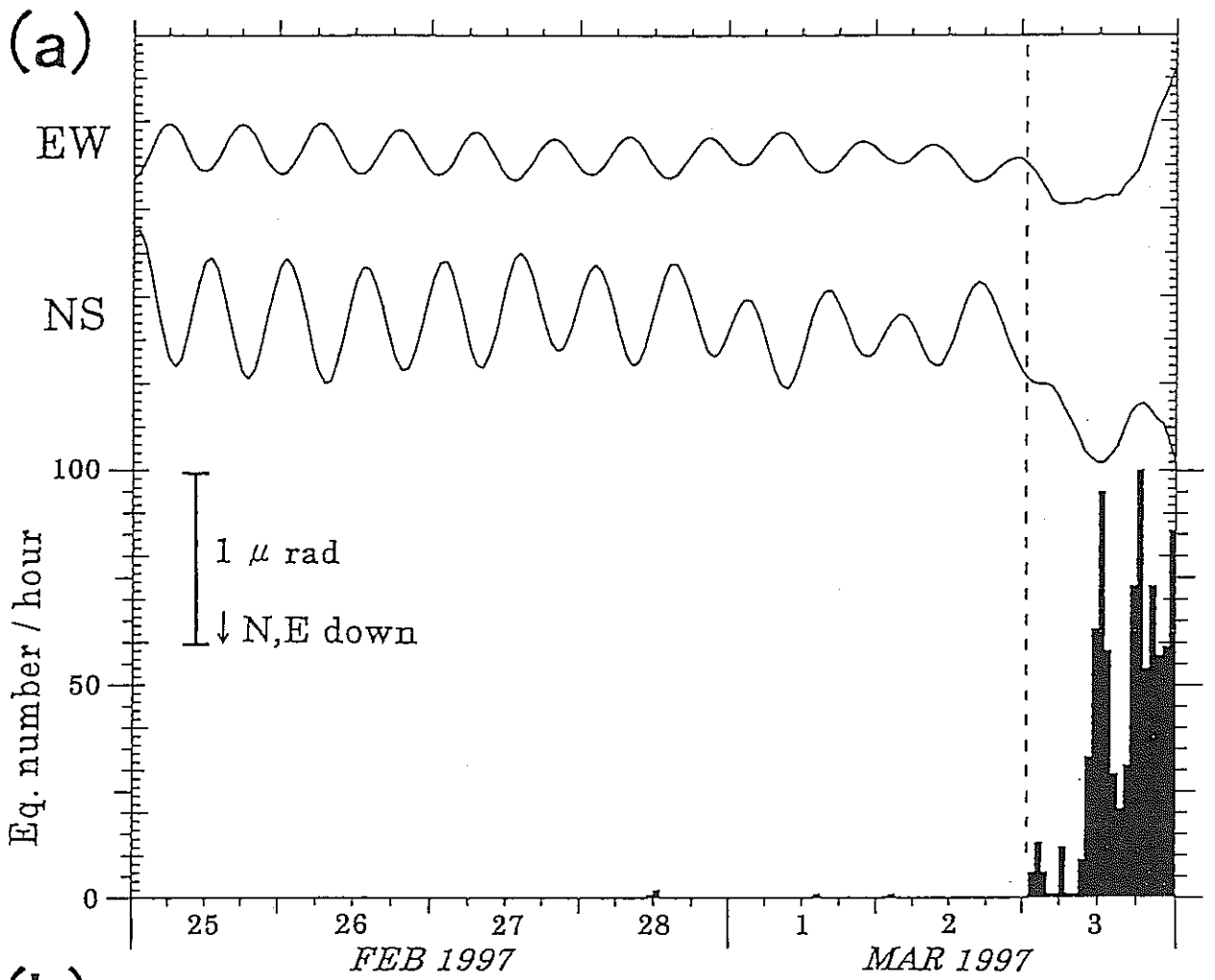


図4. 2. 5 (3) 1997年3月の伊東沖群発地震発生前後の川奈に設置された傾斜計の変動記録. (a) 東西, 南北成分の変動と群発地震の時間当たり発生回数, (b) (a) より求めた傾斜ベクトルと前駆的変動

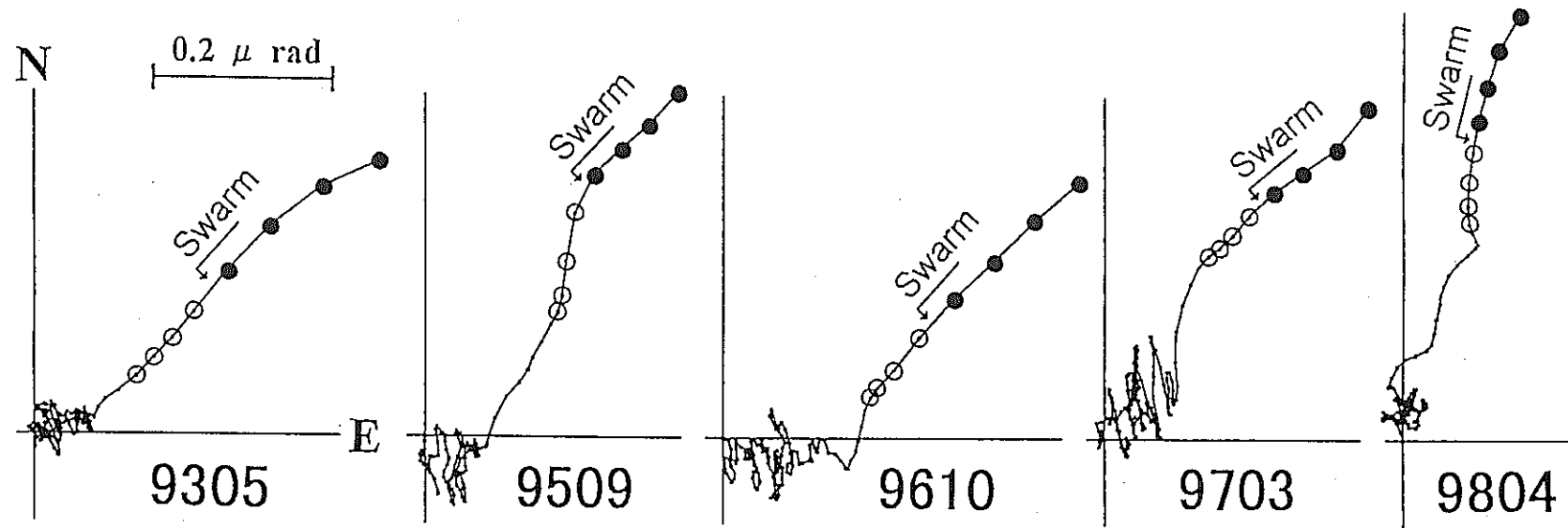


図4. 2. 5 (4) 伊東沖群発地震の5イベントについて、川奈の傾斜計記録の潮汐補正によるベクトル図からの前駆的地殻変動の検出

4. 2. 6 地震工学

地震工学については、最近の耐震評価手法について調査し、兵庫県南部地震後の見直しの動向と検討課題について検討する。

(1) 最新の耐震評価手法に関する調査

(i) 各種構造物の耐震性評価は、一般的に次のように行われる。

- ① 検討対象とする地震を想定する。
- ② 想定地震波の特性(強さ, 周波数特性, 継続時間等)を決定する。
- ③ 想定地震が起きたとき, 対象施設が保持すべき機能と, その機能保持を判定する基準を明確にする。
- ④ 施設の構造特性を考慮して, 各構造物の地震時応答解析手法を決定する。
- ⑤ 各構造物の地震応答を求め, 判定基準に照して耐震安全性を評価する。
- ⑥ 耐震安全性が不十分な場合は, 必要な対策をたて, ⑤に戻って再度安全性を評価する。

ここで特に地下構造物等, 特定の施設の耐震性評価にとって重要な手順は, ④の地震時応答解析, および⑤の耐震安全性評価である。

(ii) 地下空洞の耐震性

地下に構築される構造物の安全性を保証するために, まず地下空洞の周辺地盤のすべり, 支持力, 沈下, および構築物の耐力を評価しなければならない。そのためには, 地質・地盤の調査方法とその精度, 適用するモデル, 条件・手法の適否および評価の基準などが総合的で, かつ工学的に一貫した評価法で行われることが必要である。卓越した異方性, 顕著な不均質性, あるいは断層破碎帯等の弱層が認められる場合には応力的に不均衡が生じる可能性があるため, 有限要素法などの適切な数値解析法により詳細に検討しなければならない。

これらの解析にあたっては, 基準地震動, 設計用地震力, 物性, 解析手法, および安定性評価項目について具体的にその内容を定め行うものとする。

(iii) 設計用地震力

(a) 静的検討に用いる地震力

地下空洞の周辺地盤の安定性評価に用いる設計用水平地震力(加速度)は, 原則として基準地震動(設計用限界地震: 活断層による地震, 地震地体構造に基づく地震および直下地震のうち最も影響を与える恐れのある地震/ による地震動)に基づき地盤の震動特性を考慮して求めた地盤震度(加速度)とする。ただし, 過去の実績等を参考に地盤震度として 0.2g を用いることもできる。設計用鉛直地震力は設計用水平地震力の $1/2$ とする。

また、これまでの岩盤空洞ならびに地中の深度方向における地震観測記録や数値解析結果によれば、地中での地震力の低減が期待できることから、地下深くなるにしたがい地盤震度の低減する効果を、考慮できるものとする。

(b) 動的検討に用いる地震力

動的解析に用いる地震力は敷地の解放基盤表面で定義される基準地震動を用いるものとする。ただし、過去の実績等を参考に地盤震度として、基盤入力で最大値 0.1~0.15 g 程度を用いることもできる。

地下空洞の周辺岩盤の安定解析に用いる物性値は、地盤の調査・試験法による結果をもとに、解析手法と評価項目を勘案して適切に定めるものとする。

(iv) 解析手法

地下空洞の周辺地盤の安定性評価のための解析手法は基本的には在来立地と同様である。すなわち、必要に応じて、有限要素法、境界要素法等を用いた線形・非線形の応力・変形解析としての静的解析、動的解析による手法を適切に用いるものとする。

静的ならびに動的な解析は、基本的には地質構造、空洞の形状等を考慮して短軸二次元断面を選定し、二次元解析を行うものとする。このことは地下空洞の場合、長軸方向の二次元断面で解析を行うことは不合理な検討となること、さらに従来の実績から、二次元解析の結果が十分安全な安定性評価となること、などの知見に基づいている。

なお、必要に応じて静的あるいは動的な軸対称、あるいは三次元安定解析のいずれかの方法を用いるものとする。

(v) 耐震安定性評価

一般に地下空洞の周辺地盤の安定性評価は地盤の支持力、沈下・変形、すべりならびに鉄筋コンクリートの発生応力等の項目について検討する。

すべりに対しては、構造物底面、側壁、天端の鉄筋コンクリートとその周辺を含むすべり、ならびに断層・破碎帯の地質構造的な弱線に沿う大規模な地山のすべりなどが考えられる。ここですべり面の設定、すべりの評価式など、評価のための検討方法は、基本的には在来立地の検討に準じて行うものとする。

また、変形に関しては地下空洞の天端や側壁部分に断層・破碎帯等の弱線が存在したり、地質・地盤構造が複雑な場合などには詳細な解析的評価を必要とする。しかしながら、岩盤の変形に基づく破壊の基準は現時点で明確に規定されたものはなく、いまだ研究段階にある。そこで鉄筋コンクリートの天端や側壁とその周辺の岩盤を含む周辺岩盤すべり、あるいはそれらを収納する鉄筋コンクリート構造物に発生する応力の検討により、異常な変形が生じないことを確認し評価する

ものとする。

また、地下空洞は大規模な空間を地下に建設するため、施工時および使用中の安全確保の面で地下水の挙動をあらかじめ把握し、場合によっては適切な対策をとることが重要である。それゆえ、地下空洞周辺の地下水特性ならびに挙動についても必要に応じて十分検討を行うものとする。

地下構築物においては、これら鉄筋コンクリートと空洞周辺岩盤が一体となって挙動するものと考え、適切な解析モデルと解析手法により求めた鉄筋コンクリートに発生する断面力の検討により評価を行うものとする。

(vi) 兵庫県南部地震後の見直し

平成7年の兵庫県南部地震による震災を教訓に、各関係機関で耐震設計に関する規定の見直し作業が行われており、一部は改訂版の刊行されたものもある。改訂の基本方針は各構造物に対して共通するとみなされ、参考として道路橋の耐震設計において従来との相違点をみる。

まず、耐震設計で考慮する地震動を

a) 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動

b) 橋の供用期間中発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動

の二つに分けている。a)の地震動は従来の耐震設計で考慮されていたもので、b)が阪神大震災の教訓を生かしたものである。

さらにb)としては地震動の特性を考慮して

① プレート境界型の大規模な地震を想定した地震動

② 内陸直下型地震を想定した地震動

の二つのタイプを考えている。

つぎに、橋を道路種別およびその機能・構造に応じて、重要度が標準的な橋(A種の橋)と特に重要度が高い橋(B種の橋)に分けて、想定した地震動を受けたときにそれらが確保すべき耐震性能を規定している。すなわち、a)の地震に対してはA種、B種ともに「健全性を損なわない」と規定している。一方、b)の地震に対してはA種の橋には「致命的な被害を防止する」とし、B種の橋には「限定された損害にとどめる」と格差をつけている。

これを受けて地下構造物の耐震設計法を考えると、

① 地下構造物の重要度分類

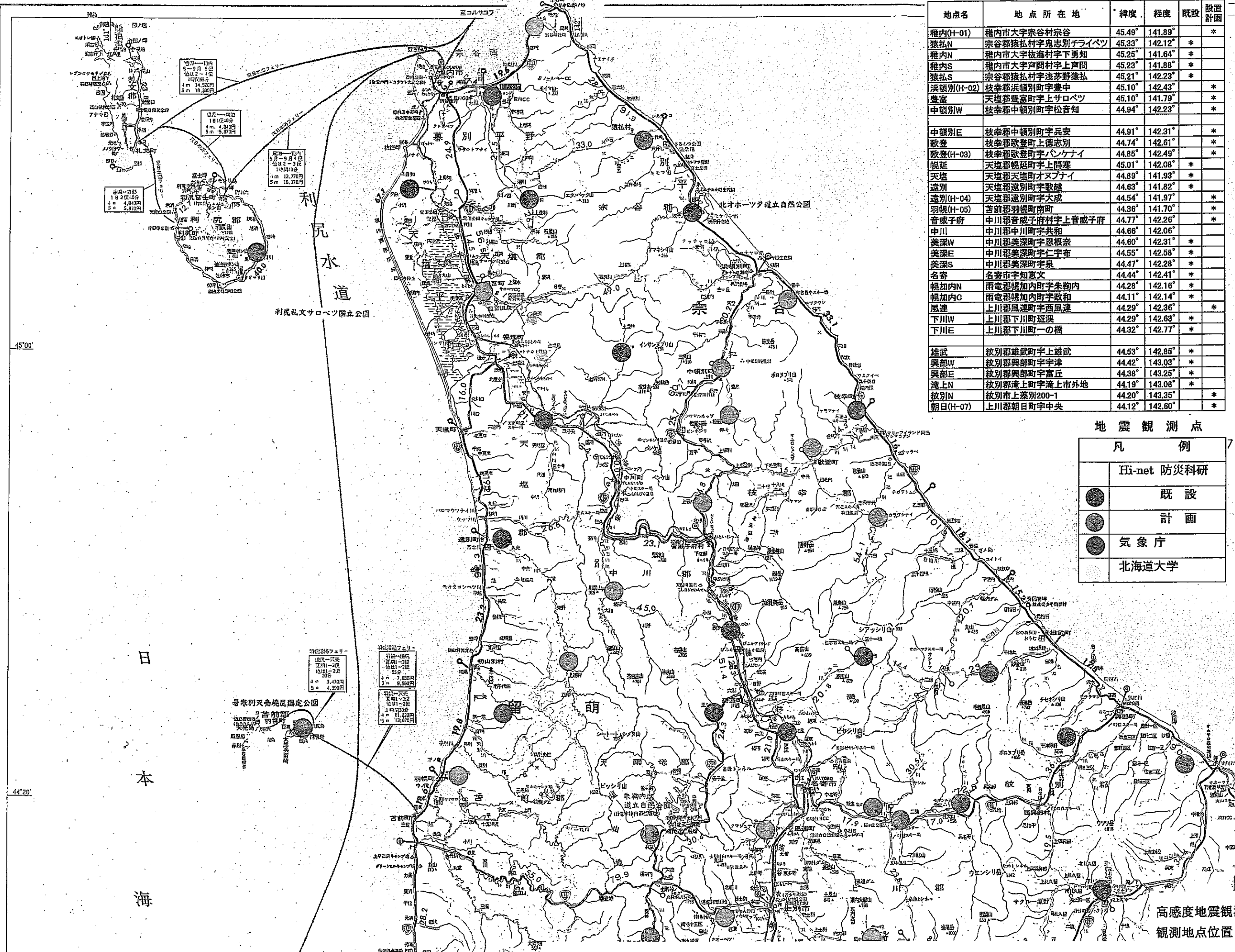
② 上記b)の発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動をどのように設定するか

③ 上記b)の地震動を受けたときに地下構造物が確保すべき耐震性能とその評価法

の3点が今後の検討課題と思われる。

参考文献

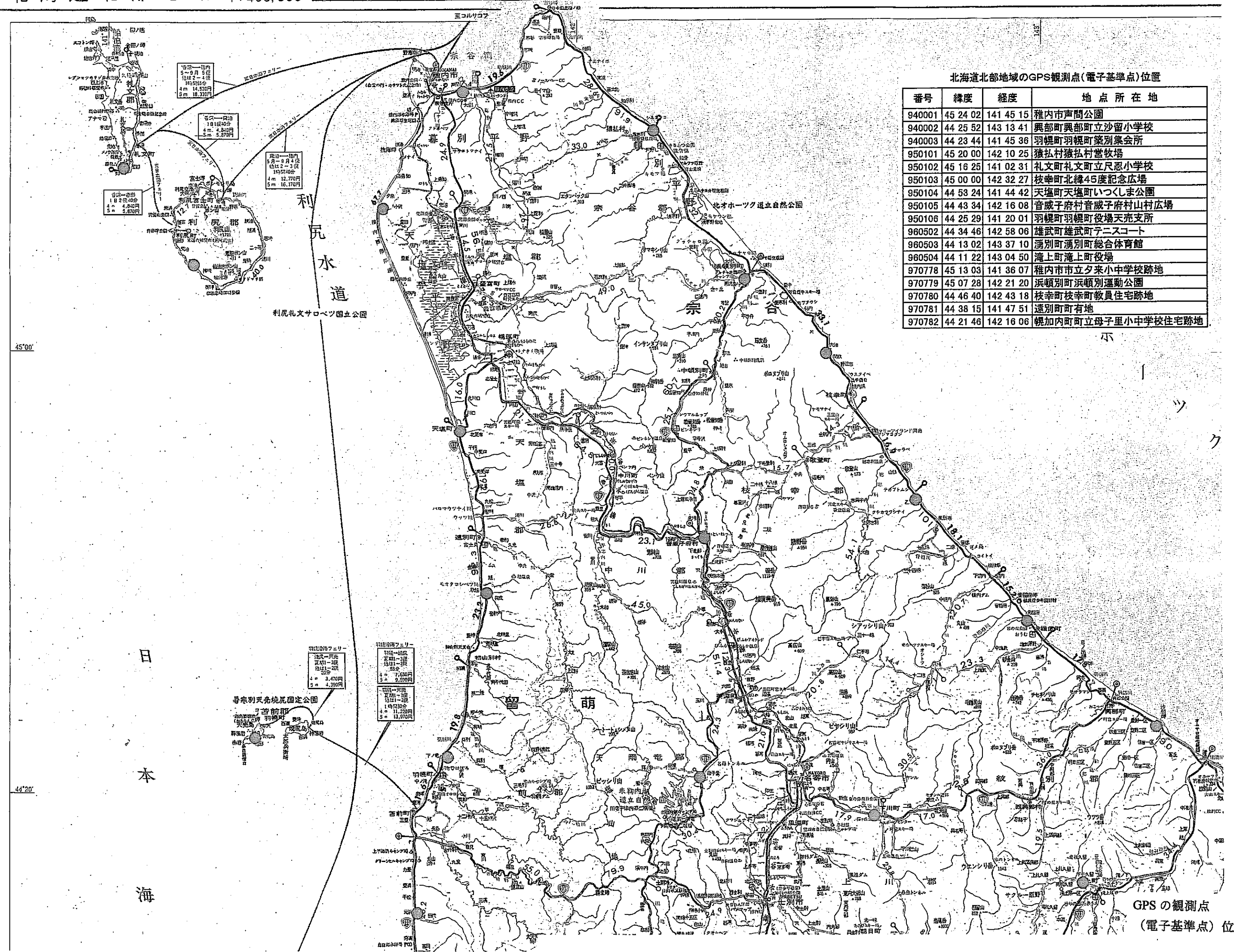
- 土木学会・原子力委員会：原子力発電所の立地多様化技術，第3編 地下立地技術，(1996).
- 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，(1987).
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，(1990).
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，(1996).
- 日本水道協会：共同溝設計指針，(1986).
- 資源・素材学会：地震に関する調査研究(XIV) 総合報告書，5.2 深部地下空洞の耐震評価手法の検討，(1998).



地点名	地点所在地	緯度	経度	既設	設置計画
種内(H-01)	種内市大字宗谷村宗谷	45.49°	141.89°		*
猿払N	宗谷郡猿払村字鬼志別チライバツ	45.33°	142.12°	*	
種内N	種内市大字板海村字下勇知	45.25°	141.64°	*	
種内S	種内市大字声間村字上声間	45.23°	141.88°	*	
猿払S	宗谷郡猿払村字浅茅野猿払	45.21°	142.23°	*	
浜頓別(H-02)	枝幸郡浜頓別町字豊中	45.10°	142.43°	*	
豊富	天塩郡豊富町字上サロベツ	45.10°	141.79°	*	
中頓別W	枝幸郡中頓別町字松音知	44.94°	142.23°	*	
中頓別E	枝幸郡中頓別町字兵安	44.91°	142.31°	*	
歌登	枝幸郡歌登町上徳志別	44.74°	142.61°	*	
歌登(H-03)	枝幸郡歌登町字ハシケナイ	44.85°	142.49°	*	
幌延	天塩郡幌延町字上間寒	45.01°	142.08°	*	
天塩	天塩郡天塩町オヌナイ	44.89°	141.93°	*	
遠別	天塩郡遠別町字歌越	44.63°	141.82°	*	
遠別(H-04)	天塩郡遠別町字大成	44.54°	141.97°	*	
羽幌(H-05)	苫前郡羽幌町南町	44.36°	141.70°	*	
音威子府	中川郡音威子府村字上音威子府	44.77°	142.26°	*	
中川	中川郡中川町字共和	44.66°	142.06°	*	
美深W	中川郡美深町字恩根奈	44.60°	142.31°	*	
美深E	中川郡美深町字仁字布	44.55°	142.58°	*	
美深S	中川郡美深町字泉	44.47°	142.28°	*	
名寄	名寄市字知恵文	44.44°	142.41°	*	
幌加内N	雨竜郡幌加内町字朱鞠内	44.28°	142.16°	*	
幌加内C	雨竜郡幌加内町字政和	44.11°	142.14°	*	
風連	上川郡風連町字西風連	44.29°	142.36°	*	
下川W	上川郡下川町字延浜	44.29°	142.63°	*	
下川E	上川郡下川町一の橋	44.32°	142.77°	*	
雄武	紋別郡雄武町字上雄武	44.53°	142.85°	*	
興部W	紋別郡興部町字宇津	44.42°	143.03°	*	
興部E	紋別郡興部町字富丘	44.38°	143.25°	*	
滝上N	紋別郡滝上町字滝上市外地	44.18°	143.08°	*	
紋別N	紋別市上藻別200-1	44.20°	143.35°	*	
朝日(H-07)	上川郡朝日町字中央	44.12°	142.60°	*	

地震観測点

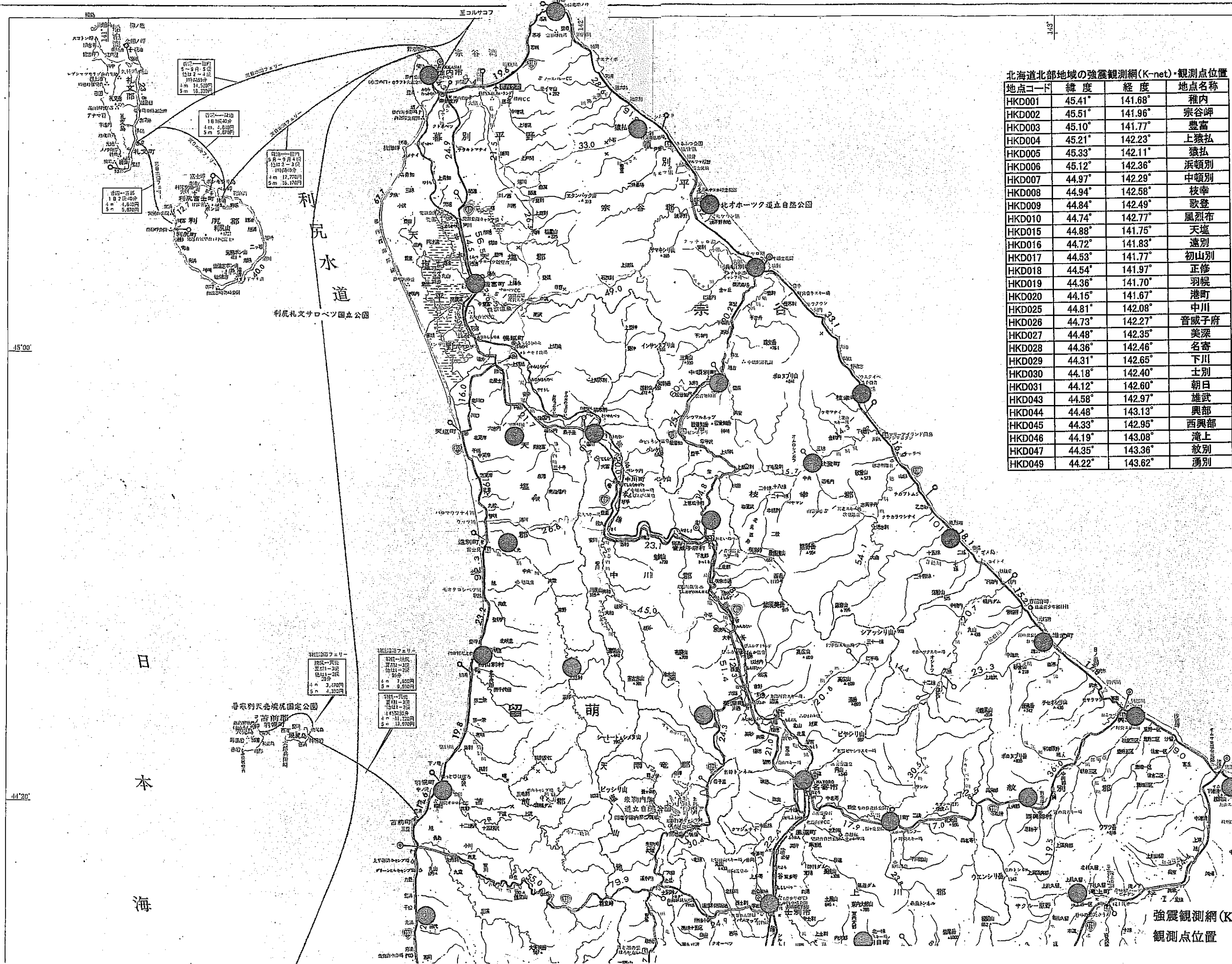
凡例	
	Hi-net 防災科研
●	既設
○	計画
●	気象庁
○	北海道大学



北海道北部地域のGPS観測点(電子基準点)位置

番号	緯度	経度	地点所在地
940001	45 24 02	141 45 15	稚内市声間公園
940002	44 25 52	143 13 41	興部町興部町立沙留小学校
940003	44 23 44	141 45 36	羽幌町羽幌町業別集会所
950101	45 20 00	142 10 25	猿払村猿払村営牧場
950102	45 16 25	141 02 31	礼文町礼文町立尺忍小学校
950103	45 00 00	142 32 27	枝幸町北緯45度記念広場
950104	44 53 24	141 44 42	天塩町天塩町いつくしま公園
950105	44 43 34	142 16 08	音威子府村音威子府村山村広場
950106	44 25 29	141 20 01	羽幌町羽幌町役場天売支所
960502	44 34 46	142 58 06	雄武町雄武町テニスコート
960503	44 13 02	143 37 10	湧別町湧別町総合体育館
960504	44 11 22	143 04 50	滝上町滝上町役場
970778	45 13 03	141 36 07	稚内市市立夕来小中学校跡地
970779	45 07 28	142 21 20	浜頓別町浜頓別運動公園
970780	44 46 40	142 43 18	枝幸町枝幸町教員住宅跡地
970781	44 38 15	141 47 51	遠別町町有地
970782	44 21 46	142 16 06	幌加内町町立母子里小中学校住宅跡地

GPSの観測点
(電子基準点)位置



北海道北部地域の強震観測網(K-net)・観測点位置

地点コード	緯度	経度	地点名称
HKD001	45.41°	141.68°	稚内
HKD002	45.51°	141.96°	宗谷岬
HKD003	45.10°	141.77°	豊富
HKD004	45.21°	142.23°	上猿払
HKD005	45.33°	142.11°	猿払
HKD006	45.12°	142.36°	浜頓別
HKD007	44.97°	142.29°	中頓別
HKD008	44.94°	142.58°	枝幸
HKD009	44.84°	142.49°	歌登
HKD010	44.74°	142.77°	風烈布
HKD015	44.88°	141.75°	天塩
HKD016	44.72°	141.83°	遠別
HKD017	44.53°	141.77°	初山別
HKD018	44.54°	141.97°	正修
HKD019	44.36°	141.70°	羽幌
HKD020	44.15°	141.67°	港町
HKD025	44.81°	142.08°	中川
HKD026	44.73°	142.27°	音威子府
HKD027	44.48°	142.35°	美深
HKD028	44.36°	142.46°	名寄
HKD029	44.31°	142.65°	下川
HKD030	44.18°	142.40°	士別
HKD031	44.12°	142.60°	朝日
HKD043	44.58°	142.97°	雄武
HKD044	44.48°	143.13°	興部
HKD045	44.33°	142.95°	西興部
HKD046	44.19°	143.08°	滝上
HKD047	44.35°	143.36°	紋別
HKD049	44.22°	143.62°	漢別

強震観測網(K-net)・観測点位置

7 北海道北部地域における地震に関する調査研究年次計画表

年次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
段階	第Ⅰ期					第Ⅱ期					第Ⅲ期										
全体計画立案委員会	予備的委員会	本委員会																			
1. 北海道北部地域の地殻活動観測																					
観測データの収集・処理研究																					
(1)対象地区内観測網の整備																					
①総合地殻活動観測アレイ (地震計, 歪計, 傾斜計)																					
②GPS観測アレイ																					
③地下水観測網																					
④AE観測網																					
⑤強震計観測網																					
(2)広域地殻活動観測データ等の 収集・処理施設の整備・運用																					
①地震観測データ																					
②GPS観測データ																					
③地殻変動観測データ																					
④地下水・AE観測データ																					
(3)地下施設内観測網の整備・運用																					
①地震計・AE観測網																					
②歪計, 傾斜計観測網																					
③地下水観測網																					
(4)観測技術の開発研究																					
①堆積層内・寒冷地環境での最適 観測機器・手法の開発																					
②地下施設内での観測機器・手法 の開発																					
2. 北海道北部地域の地殻活動と地震 発生に関する研究																					
(1)地震活動																					
(2)地殻変動																					
(3)地下水変動																					
(4)総合的研究																					
3. 地殻活動が地下施設に及ぼす影響 に関する研究																					
4. 地域の地震防災に関する研究																					

用語解説

(i) GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)連続観測

1980年代に登場した、人工衛星から発射される電波を利用した測位システム（地球上での自分の位置〔緯度、経度、高さ〕を求める装置）である。測位を行うには同時に4個の衛星からの電波を受信しなければならないが、地球上の任意の地点で常時測位ができるようにするため、24個の衛星を高度20,000kmの6種類の軌道に、それぞれ4個ずつ周回させるようになっている。

(ii) 測地測量

(b) 三角測量または三辺測量

日本国土は多数の三角測量網で覆われている。土地の水平方向の地殻変動は三角測量または三辺測量によって知ることができる。

現在では宇宙技術の発達に伴い、三辺測量からGPSによる測量方式（電子基準点測量）に移ってきた。

(c) 水準測量

地上に設けられた水準点相互の比高を求める測量である。この測量では2点にそれぞれ標尺を鉛直に立て、その中点にレベル（水準儀）を据えて整準し、その基準線上の標尺目盛の差から2点間の高度差を求める。この作業を繰り返して、最初的水準点に対する遠隔地点の高度差を、個々の測定高度差の総和として求める。

(iii) 傾斜計・歪計・験潮器（験潮儀）による観測

これらは、地殻の歪みや地盤の隆起、沈降、伸縮、傾斜等の変化、すなわち地殻変動を連続的に観測するものである。

(a) 傾斜観測

傾斜観測とは地面の傾斜変化を測定することであり、その測定器械を傾斜計という。このような方法で 10^{-9} 程度の地殻変動を検出することができる。傾斜計には大別して、振り子型傾斜計と水管傾斜計とがある。振り子型傾斜計はある一点に設置して、その地点での傾斜を観測するのに対し、水管傾斜計は数m～数十m離れた2点間を水管で結び両端の高さの差を測定して、土地の傾斜を測る装置である。

(d) 歪計による観測

歪とは「大きさ」の変化の度合いを示す量である。「大きさ」が長さ、面積、体積であれば、それぞれ線歪、面積歪、体積歪という。このうち線歪を特定する機器として伸縮計があり、現在多く使われているのは水晶管伸縮計である。

数 m~数十 m の距離をおいた 2 点に基礎の柱を埋め込み、溶融水晶管を横たわらせて一方を固定し、他方を自由端とする。

自由端での変位量を検出してそれを 2 点間の長さで割ると、この場所での歪（線歪）量が求められる。

体積歪は、体積歪計（地殻岩石歪計）によって求めることもできる。体積歪計は、円筒型の容器内にシリコンオイルを封入したものを縦孔内に埋め込んで、周囲の岩盤と一体になるように設置したものである。岩盤に周囲から力が加わったり、引っぱられたりすると、シリコンオイルの液面が上下するので、この変位を検出して体積歪を測定する。また、この容器を 3 分割し、3 方向の歪を測定して水平歪 3 成分を求めるようにした 3 成分歪計もある。また、目的により 4 成分歪計もある。

歪計は、GPS 連続観測網のような広域の歪の平均場の把握には向かないものの、分解能の点で優れており、東海地域等に地震予知等の目的で設置されている。

(e) 驗潮（検潮）

海洋潮汐の観測を驗潮（あるいは検潮）といい、そのための器械を驗潮器（または驗潮儀）という。驗潮器には、驗潮井戸内の海面に浮かべたフロート（浮標）によって、海面の昇降を計測するフロート式驗潮器と、水圧の変化によって計測する水圧式驗潮器と、海面までの超音波の到達時間を計測する超音波式驗潮器とがある。

(iv) VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉法)

天体電波源からの電波を二つの観測点で同時に観測し、同一波形を受信した時刻差を測定することによって、観測点間の相対的位置を精密に測定することができる。

(v) SLR (Satellite Laser Ranging: 人工衛星レーザー測距) による観測

逆反射プリズム（コーナーキューブ）を装着している人工衛星（ラジオス、あじさい等）に対し、地上の観測点から発射されたレーザーパルスを逆反射することによって、観測点との間の距離を測定する方法である。また、複数の観測点から同一の衛星を同時に観測することによって観測点相互の位置を高精度で求めることができる。現在、距離測定の精度は数 cm で VLBI と並ぶ精度をもっている。

(vi) SAR インターフェロメトリー (Synthetic Aperture Radar Interferometry, INSAR: 干渉合成開口レーダー)

合成レーダーは、マイクロ波のレーダーパルスを対象的に照射し、その反射を解析することにより、対象者の起伏や構造を明らかにすることを目的として開発されたものである。上空からレーダーで地上を観測する場合、分解能を向上させるためのもっとも簡単な手段はアンテナのサイズ、すなわち「開口」を大きくすることである。しかしそれには限度があるので、移動する飛翔体からマイクロ波を送受信し、大きな開口を持ったアンテナを使用した場合と同等な高分解能が得られるように、画像再生処理の段階で信号を合成するのが SAR と呼ばれるものである。