

JNC TN7400 2004-004

地質環境の長期安定性に関する 情報基盤の整備

(研究報告)

平成 16 年 9 月

核燃料サイクル開発機構

東濃地科学センター

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
Tel: 029-282-1122 (代表)
Fax: 029-282-7980
e-mail: jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2004

地質環境の長期安定性に関する情報基盤の整備

梅田浩司・野原 壯・藤原 治・浅森浩一・木下博久・中司 昇
(東濃地科学センター 地質環境研究グループ)

要 旨

核燃料サイクル開発機構は、1999年に地層処分技術に関する研究開発の成果を取りまとめ、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ」として国に報告を行った。この報告では、火成活動、地殻変動等の規則性・偏在性やそれに伴う地下水流动・地球化学、岩盤の熱・力学的影響等について、地球科学や土木工学等の分野から集積した様々な知見・情報等を基に検討されており、「地層処分システムの設置に適した地質環境がわが国にも存在し得る」といった結論を得ている。これらの検討のベースとなっている様々な知見・情報等については、今後の処分事業や安全規制に引き続き反映されるものであり、「第2次取りまとめ」以降も学術雑誌や書籍、サイクル機構の紀要等を通じて公表を進めてきた。

本報では、わが国の隆起・沈降・侵食、火成活動、地震・断層活動等の図幅、データベース等の情報を集約するとともに、そこから見出される知見を地質環境の長期安定性の観点から概観した。

目 次

1.はじめに	1
2.地質環境の長期安定性と重要な地質環境条件	3
2. 1 地質環境の長期安定性の評価に際して考慮すべき現象	3
2. 2 概要調査地区選定や安全規制に係わる要件	4
3.地震・断層活動	8
3. 1 日本列島の過去数十万年間の断層活動	8
3. 2 活断層 GIS データを用いた地殻の歪速度の推定	9
3. 3 日本周辺海域の断層と構造発達史	11
4.火成活動	19
4. 1 日本列島の第四紀の火山活動	19
4. 2 坑井温度データに基づく日本列島の温度構造	20
4. 3 日本列島の温泉・鉱泉の分布と化学組成	22
5.隆起・侵食	33
5. 1 日本列島の第四紀後半の地殻変動	33
5. 2 最近約 10 万年間の隆起速度	35
5. 3 ダム堆砂量に基づく侵食速度	37
5. 4 日本列島における地すべり地形の分布	38
6.気候・海水準変動	45
6. 1 日本列島周辺における第四紀後半の気候・海水準変動	45
7.おわりに	49

1. はじめに

地層処分における多重バリアシステムは、地質環境（天然バリア）とその地質環境の条件を考慮した工学的対策（人工バリア）を組み合わせたものであり、地層処分の安全性や信頼性を確保する上での基本的な考え方として、諸外国の地層処分の概念を取り入れられている（IAEA, 1989）。一方、プレート収束帯に位置する日本列島では、地層処分を進めている多くの諸外国に比べ地殻変動や火成活動が活発であることから、わが国の地層処分の概念は、「長期的な安定性を備えた幅広い地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置することを特徴とする（核燃料サイクル開発機構, 1999；梅木ほか, 2001）。

これらの概念に基づき地層処分の安全性を確保するためには、地層処分システムの性能が著しく損なわれないよう長期にわたって安定な地質環境を選定すること（サイト選定）、想定される地質環境の変動を見込んで人工バリアや処分施設を適切に設計・施工すること（工学的対策）、により地層処分システムが備えるべき固有の性能を確保するとともに、構築された地層処分システムの安全性を評価すること（安全評価）が重要となる。したがって、これらの安全対策の前提として、火成活動等のように地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼす可能性を有する地域の存在、地殻変動等によって生じる地下水の流動特性・地化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等の変動等（いわゆる、地質環境の長期安定性）を事前に把握することが重要であり、そのための基盤的な情報の整備が必要である。

わが国における地層処分技術に関する研究開発は、1970年代後半から動力炉・核燃料開発事業団（1998年に核燃料サイクル開発機構に改組）を中心とした機関として進められてきた。核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は、1999年にそれまでの研究開発の成果を取りまとめ、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）」（以下、第2次取りまとめ）として国に報告を行った。報告では、地層処分の工学技術や地層処分システムの安全評価に係わる研究成果のみならず、地層処分の観点からみたわが国の地質環境の特徴についても包括的に述べられている。

この中では、火成活動、地殻変動等の規則性・偏在性やそれに伴う地下水の流動特性・地化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等の変動等についても、地球科学や土木工学等の分野から集積した様々な知見・情報等を基に検討されており、「地層処分システムの設置に適した地質環境がわが国にも存在し得る」といった結論を得ている。

これらの検討のベースとなっている様々な知見・情報等については、大学や関係研究機関の協力のもと、全国レベルでの図幅やデータベース等として整備してきたが、これらのデータの透明性や信頼性、トレーサビリティ等を担保するといった観点から、「第2次取りまとめ」以降についても学術雑誌をはじめ書籍、サイクル機構の紀要等を通じて公表を進めてきた。

一方、2000年6月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（法律第117号）」（以下、最終処分法）が制定され、実施主体が最終処分施設を立地する場所の選定に至るまでには、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分建設地の選定といった3段階のプロセスを経ていくことが示された。特に、概要調査地区の選定に際しては、法令に定められている事項について文献調査を行い、「地震等の自然現象による著しい変動の記録がないこと」、「将来にわたって地震等の自然現象による著しい変動が生ずるおそれが少ないことと見込まれること」等を確認することが記されている。また、処分事業に対する安全規制の骨格となる基本的な考え方については、原子力安全委員会（2000）に述べられており、今後は精密調査地区の選定開始時期までに、安全評価に係わる安全指標、基準値、安全評価シナリオ等を定めた安全審査基本指針を策定することになっている。概要調査地区の選定や安全審査基本指針の策定は、広範かつ普遍的な情報に基づき進められる。したがって、上記で示したような図幅やデータベース等といった地層処分の基盤的な情報は、今後も処分事業や安全規制に反映されるものと考えられる。

本報では、「第2次取りまとめ」まで文献調査を主体として全国レベルで進めてきたデータの解析と、実際の地質環境に適用できる調査技術の開発や地殻変動、火成活動等に伴う地質環境の変化を評価する手法の開発等に必要な基盤情報の整備の内容を報告する。

2. 地質環境の長期安定性と重要な地質環境条件

2. 1 地質環境の長期安定性の評価に際して考慮すべき現象

地質環境の長期安定性に影響を与える可能性のある現象については、サイト選定や安全評価に際しての重要な変動要因として、国際的な議論を踏まえた網羅的なリストが作成されている（IAEA, 1985；IAEA, 1994）。また、諸外国においても、それぞれに応じた地質学的な特徴や自然環境を考慮して、検討の対象とすべき現象を抽出している（USDOE, 1982；AECL, 1994；Nagra, 1985；SKB, 1994）。例えば、高緯度に位置する北欧諸国では、氷期・間氷期サイクルに基づき、次の氷期の氷河形成による影響を考慮しており、（SKI, 1995），米国では処分候補地である Yucca Mountain の地質学的な特徴を考慮し、火成活動の評価に重点が置かれている（例えば、NRC, 1995）。

一方、わが国は複数のプレートが収束する沈み込み帯に位置しており、地層処分を進めている諸外国に比べて、地殻変動や火成活動が顕著である。そのため、わが国の地質環境の長期安定性の評価に際しては、汎地球規模の気候・海水準変動に加えて、地震・断層活動、火成活動、隆起・沈降・侵食等の諸現象を考慮する必要性が示されており（例えば、原子力委員会, 1997；原子力安全委員会, 2000），サイクル機構においても、これらの現象を対象に重点的な調査・研究が進められている。

これらの諸現象が地層処分システムに及ぼす影響については、土木学会原子力土木委員会（2001）や原子力安全委員会（2002）等により、具体的に以下の影響が想定されている。

地震・断層活動：

処分施設に対する地震動の影響、岩盤における地震時の地下水圧の変化等、岩盤の破断・破壊に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊と、周辺岩盤の力学的、水理学的变化による多重バリアの機能低下等の影響が考えられる（土木学会原子力土木委員会, 2001）。

岩盤の破断や破碎に伴って処分施設および廃棄体が直接破損すること、岩盤の破断や破碎に伴って卓越した地下水移行経路が形成されることや、岩盤歪みに起因し、地下水圧が変化すること等の地下水の流動特性や水質が変化すること等が考えられる（原子力安全委員会, 2002）。

火成活動：

マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的破壊と、熱・熱水の放出によ

る天然バリアへの水理学的、地化学的影響、人工バリアの性能低下等が考えられる（土木学会原子力土木委員会、2001）。

マグマの貫入あるいは噴出により処分施設および廃棄体が直接破損すること、マグマの熱等による地温上昇や熱水対流の発生、また、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等が考えられる（原子力安全委員会、2002）。

隆起・沈降・侵食：

処分場の地表への接近に伴い地下水流動特性や地化学的条件が変化（酸化雰囲気）して、核種移行が促進されるといった影響が考えられる（土木学会原子力土木委員会、2001）。

隆起・侵食の進行に伴って処分施設及び廃棄体が地表近くに接近すること、隆起・沈降・侵食により地下水の流動特性や水質が変化し、その結果として、廃棄体中に含まれる放射性物質が漏出し、周辺の地質環境中を移行し易くなること等が考えられる（原子力安全委員会、2002）。

気候・海水準変動：

降水量の変化、動水勾配の変化、沿岸域における塩淡境界の移動といった処分施設周辺の地下水流動および地化学的環境の変化の可能性が挙げられる（土木学会原子力土木委員会、2001）。

降水量の変化や海水平面の昇降により、地下水の流動特性や水質および侵食速度が変化すること、塩淡境界の移動により、地下水の流動特性や水質が変化すること等が考えられる（原子力安全委員会、2002）。

2. 2 概要調査地区選定や安全規制に係わる要件

前述したように高レベル放射性廃棄物の最終処分事業は、最終処分法に定められたところにしたがって、「概要調査地区等（概要調査地区、精密調査地区、最終処分建設地）の選定」、「最終処分施設の建設」、「最終処分」、「最終処分施設の閉鎖」、「閉鎖後管理」と順次すすめられる。このうち、事業の最初の段階である概要調査地区の選定は、実施主体が地震、噴火、隆起、侵食やその他の自然現象や活断層等、法令に定められている事項について文献調査を行い、調査を行った地区の中から概要調査を行う地区を選定することになっている。また、概要調査地区は以下の法定要件を満たす必要がある。

- ・地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと

- ・将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれがあるないと見込まれること
- ・地層が、第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと
- ・地層において、その掘採が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと

一方、原子力安全委員会（2002）は、概要調査地区の選定段階で考慮すべき環境要件を示した。これらは、将来の処分地としての適性や妥当性を決定するものではなく、処分地となり得る可能性を第一段階で広く調査する際に考慮すべき地質的環境要件であり、ここでは概要調査を行うまでもなく、文献調査によって明らかに処分地として不適切であると考えられる要件が示されている。それぞれの現象についての環境要件を以下に示す。

地震・断層運動：

処分施設を合理的に配置することが困難となるような活断層の存在が、文献調査で明らかな地域は、主に、処分施設及び廃棄体が直接破損することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない。

火山・火成活動：

第四紀に活動したことのある火山の存在が、文献調査で明らかな地域は、主に処分施設及び廃棄体が直接破損することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない。

隆起・沈降・侵食：

対象地域の隆起・侵食量からみて、処分場及びその周辺の地質環境に対し著しい変動をもたらすおそれがあることが、文献調査で明らかな地域は、主に処分施設及び廃棄体が地表近くに接近することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない。

以上のことから、わが国特有の現象である隆起・沈降・侵食、火成活動、地震・断層活動のほか、汎地球規模の現象である気候・海水準変動を対象に、これらの現象の規則性・偏在性やそれに伴う地下水の流動特性・地化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等の変動等を把握する観点から、関連する知見・情報等を収集し、図幅・データベース等として整備した（表 2.1）。

以下では、取りまとめた図幅・データベース等の解説とそこから見出され

た日本列島の地殻変動や火成活動等の特徴を地質環境の長期安定性の観点から概観する。なお、図幅・データベース等の詳細については、それぞれの文献を参照していただきたい。

表 2.1 これまでに取りまとめられた図幅・データベースの一覧

名称	資料分類	内容	関連資料名
200万分の1 日本列島活断層図 (基礎データ)	データベース	日本列島陸域における活断層の分布図および属性情報(活動様式、活動時期、変位量、平均変位速度、断層変位地形等)を収録。	200万分の1活断層編集ワーキンググループ：“200万分の1日本列島活断層図”，活断層研究, 19 (2000).
日本周辺海域の地質構造図	データベース	日本周辺海域の中新世最末期以降に活動した断層の分布図、属性情報(活動様式、活動時期、基準面、変位量等)、主な音波探査画像を収録。	徳山英一、本座栄一他：“日本周辺海域の中新世最末期以降の地質構造発達史”，海洋調査技術(2001)
第四紀火山カタログ	データベース	日本列島における348の第四紀火山について、火山カタログ(火山名、緯度・経度、グループの年代範囲等)および個別の火山体ごとの情報を収録した個別火山カタログ(火山体の構造分類、緯度・経度、火山体の面積・体積等)により構成。	第四紀火山カタログ委員会：“日本の第四紀火山カタログ(CD-ROM ver. 1.0)”，日本火山学会(1999).
日本列島地温勾配図	図幅	日本列島における坑井温度データ、泉温データを基礎データとした地温勾配分布図、地温勾配センター図および泉温センター図。	矢野雄策、田中明子、他：“300万分の1 日本列島地温勾配図”，地質調査所(1999).
坑井温度データベース	データベース	日本列島における1,215本の坑井温度データを公表文献より収集。各坑井について、坑井名、坑口座標(緯度・経度)、温度プロファイル測定条件等の付帯情報および温度プロファイル(深度-温度)の数値データを収録。	坂川幸洋、梅田浩司、鈴木元孝、梶原竜哉、内田洋平：“日本の坑井温度プロファイルデータベース”，地質第2輯, 57, pp.63-67 (2004).
温泉地化学データベース	データベース	日本列島における温泉・鉱泉分布のほか、これらの溶存成分に係わるデータを公表文献より収集。採取地点(緯度・経度)、井戸深度、採水標高、湧出量、pH、電気伝導度、Eh、化学分析値(陽イオン、陰イオン、非解離成分、遊離成分)等について、約20,800件のデータを収録。	浅森浩一、梅田浩司、他：“温泉地化学データベースの作成”，サイクル機構技術資料, JNC TN7450 2002-003 (2003).
日本の海成段丘アトラス	データベース 図幅	日本列島における海岸段丘の分布および年代と、それに基づく隆起量のデータベース。段丘分布図(1/5万, 1/20万, 1/200万)、および平野・盆地の第四紀の沈降量図を収録。	小池一之、町田 洋編：“日本の海成段丘アトラス”，東京大学出版会 (2001).
隆起速度分布図	図幅	過去10万年程度を対象とした、既存文献等の調査に基づく日本列島の隆起速度分布図。1/5万地形図の区画毎に最大隆起速度を表示。	藤原 治、柳田 誠、他：“日本列島の最近約10万年間の隆起速度の分布”，月刊地球, 26, pp.442-447 (2004).
日本列島における侵食速度分布図	図幅	地形の起伏強度と侵食速度との関係式を、ダムの堆砂量と流域の地形データを用いて求めた。この関係式を、数値地図から計算した全国の起伏分布に適用し、全国の侵食速度の分布を計算した。	藤原 治、三箇智二、他：“日本列島における侵食速度の分布”，サイクル機構技報, 5, 85-93(1999).
地すべり地形分布図	データベース	日本列島における地すべり地形の分布とその特徴を取りまとめたデータベース。1/20万および1/200万地すべり地形分布図をGIS(地理情報システム)データとして収録。	藤原 治、柳田 誠、他：“日本列島における地すべり地形の分布・特徴”，日本地すべり学会誌(2004), (印刷中).

3. 地震・断層活動

3. 1 日本列島の過去数十万年間の断層活動

わが国の過去の主な地震は断層活動によるものであり、それらのうち明治以降に発生し、内陸浅所に震源を持つ大地震は、地表付近の地形・地質に変位・変形を与えていた。このような地震や変位を引き起こした断層は、最近の地質時代において間欠的に繰り返し活動しており、今後も活動すると考えられるため、活断層と呼ばれている。日本列島全体の活断層分布をまとめた「日本の活断層」(活断層研究会, 1980), 「新編日本の活断層」(活断層研究会, 1991)では、最近の地質時代を第四紀(過去約200万年間)と定義している。

近年、全国で活断層調査が急速に進められ、活断層に関する情報が蓄積されるとともに、それらに地域性がみられることが明らかになってきた。現在と同様の断層活動が開始した時期は、東北日本の脊梁山地の断層系では約1.0Ma頃(Awata and Kakimi, 1985; 粟田, 1988), 西南日本全体では0.5Ma頃(藤田, 1993)で、その後継続して活動していると考えられる。わが国の中でも特異な地域と考えられている伊豆半島北部は、第四紀に伊豆半島の衝突により広域応力場が変化したが、約30万年前以降、現在と同様の断層活動が継続している(Ito et al., 1989)。このように、日本列島における活断層は、少なくとも過去数十万年以上にわたって継続して活動している。このような背景のもと、200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ(2000a, b)では、活断層の定義を新たに「最近数十万年間に概ね千年から数万年の間隔で繰り返し活動しその痕跡が地形に現れ、今後も活動を繰り返すと考えられる断層」とし、活断層の分布を含む属性情報(分布、活動時期、変位量、変位速度、断層長、活動様式など)の整備を目的に、過去数十万年前以降の断層変位地形を重視した調査を行い、全国の活断層分布図を作成した(図3.1)。

その結果、これまで山地境界にトレースされていた断層について、その前面に分布する段丘や低地に断層変位地形が見出されるようになり、分布調査の精度が向上したことで、断層位置の推定部分(位置が不明瞭な区間)や伏在部(地表に崖が見えない)が識別され、断層の位置・連続性に関する情報の信頼性が向上した(図3.2)。また、断層露頭や直線的な急崖(断層崖)があっても、そのリニアメント沿いの数十万年前以降に形成された地形面に断層変位地形が認められないものは、活断層としては抽出されず、主要な活断層が明瞭になった(図3.3)。

日本列島に分布する活断層は、地表付近でしばしば分岐したり、副次的な

断層（副断層）をともなう。したがって、活断層の性状を評価する際には、このような分岐断層や副断層を含めた活断層帯としての活動やその変化を把握する必要がある。このため、前述の高度化した調査技術を用いて得られた活断層の属性情報をもとに、活断層のグループ化（グループ化した活断層をここでは「活断層帯」とよぶ）を行い、日本列島の主な活断層帯の過去数十万年間の活動の特徴を検討した。活断層帯の分布をみると、稠密する地域や分布しない地域があるといった偏在性が認められる。また、断層変位地形が累積することから、活断層帯の出現と成長について検討した結果、“過去数十万年間”という時間スケールにおいては、活断層帯が新たに生じた例は無いことが確認できた。活断層帯の成長のうち、分岐に関しては、横ずれ断層である中央構造線断層帯や濃尾断層帯などの長大で活動性の高い活断層帯は成長を示す地形学的な証拠は認められない（活断層マップワーキンググループ、1999）。

一方、逆断層である横手盆地東縁断層帯では、過去数十万年以内に、断層の分岐、変形範囲の長期的変化が生じている。これについて、地形・地質学的調査および弾性波探査を行った結果、新たな分岐は、盆地側に偏って生じている可能性が高いことがわかった。また、既存の物理探査等の調査結果を踏まえて、同じ活断層帯の中の3地点で分岐や変形の様子を比較した結果、それらが生じた範囲（幅）は地点ごとに異なることがわかった（東京大学、2004）。一般的な傾向として、盆地の沈降・堆積速度が比較的大きい地点では、分岐や変形の範囲の幅は広く、かつ、盆地側の分岐断層が地表に明瞭に現れる傾向がみられる。また、分岐開始点が相対的に浅く盆地側に明瞭な褶曲構造が発達する地点と、分岐開始点が深く盆地側にそれらの発達がみられない地点とを比較した場合、前者の方が分岐・変形の範囲の幅は大きく、かつ、盆地側の分岐断層が地表に明瞭に現れる傾向が示唆された（サイクル機構、2004）。逆断層のうち、一部の活断層帯（例えば、十勝平野断層帯の広尾断層）では、過去数十万年に活断層帯の伸張が、周辺の既存の断層沿いに生じた可能性がある。活断層帯の属性情報から推定される将来十万年程度の伸張は、平均変位速度が0.1~10m／千年の活断層帯で、0.1~10km程度と見積もられる（サイクル機構、1999）。

3. 2 活断層 GIS データを用いた地殻の歪速度の推定

活断層の分布密度と活動性を考慮した地域性は、活断層による水平歪み速度の分布に反映される。歪み速度は、活断層のほかに、地震、測地および地質のデータからも求められており、それらの相互の比較が試みられている。

Kaizuka and Imaizumi (1984)は、活断層研究会（1980）の活断層データ等を用いて水平歪速度を算定し、活断層から求めた水平歪速度は、地震や地質断面、測地データから求めたそれよりも1～2桁小さいとしている。活断層から求めた水平歪速度が小さい主な原因としては、断層が関与しない永久歪み (Kaizuka and Imaizumi, 1984), 褶曲や断層周辺での塑性変形 (佐藤, 1989), 活断層の認定が不十分であること (Wesnousky et al., 1982)などが挙げられている。

前述した活断層 GIS データベースは、活断層を変位地形の特徴から厳密に定義し、全国の活断層に対してほぼ均質な情報を整備している。この特徴を活かし、活断層 GIS データベース用いて、過去数十万年間の断層活動から推定される地殻の水平歪速度を解析し、既存情報との比較解析を行った (野原ほか, 2000)。その結果、日本列島スケールの歪速度の観点では、第四紀と過去数十万年間の主な断層活動はほぼ同様といえること、最新の活断層から求めた歪速度と地質断面から求めた歪速度 (佐藤, 1989) を比べると、奥羽山脈沿いの地域では、両者はほぼ同じ値であるが、出羽丘陵から日本海側の褶曲構造が顕著な地域では、後者の値が前者より高く、主たる褶曲構造形成時期と断層活動の開始時期が異なる可能性があることがわかった。

一方、最新の活断層データから求めた歪速度の値は、GPS 観測結果から求めた歪速度の値より1桁以上小さい。これらの違いが生じる原因について詳しく調査した結果、GPS データは非断層活動時の比較的短期間の歪みで、片や地形地質学的データは断層活動時の長期間の変位の累積の平均値であり、異なる現象を比較したものなので、本来、それらが一致する必然性はないことが確認された。一方、断層活動に伴う定常的な地殻変動があるならば、その速度は、活断層を境とする両側のブロック運動を反映して、断層からある程度離れた2地点間の相対的な運動速度として、測地学的にも求められる。海外では、その様な例が示されている (Bourne et al., 1998)。

そこで、国内の主要な活断層 (糸魚川-静岡構造線断層帯 (中部), 阿寺断層帯, 跡津川断層帯, 濃尾断層帯, 養老-桑名-四日市断層帯, 山崎断層帯) について、その直近に基準点を仮定した GPS データの解析を行い、活断層両側の地殻変動速度 (図 3.4) を求めた (名古屋大学, 2004)。その結果、活断層から両側にそれぞれ 30～50 km 程度離れた2地点間の相対的な変動の方向と値は、個々の活断層で地形・地質学的に推定されているものと矛盾しないことが明らかになった。また、活断層地域の深部における変形は、ブロック境界に集中したものではなく、断層の周囲に幅を持った、流動的な変形である可能性が示唆された。

3. 3 日本周辺海域の断層と構造発達史

日本列島周辺海域のネオテクトニクスを明らかにする目的で、全海域に亘る地質構造マッピングを実施した（図 3.5a, b）。従来の日本列島周辺海域の活断層図（活断層研究会編, 1980, 1991）は、主にシングルチャンネル音波探査で得られた地下浅部の情報に基づいて作成されていたのに対し、本作業は、それらの情報に加えて、石油公団が実施した大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査で取得したマルチチャンネル音波探査記録の再解析結果をコアデータとし、海底地形図およびその他の既存のデータを統合したデータベースを作成し、中新世末期以降および第四紀以降において活動した断層の抽出を実施した。

このデータベースを用いた解析により、日本周辺海域で現在進行中のテクトニクス、つまり、南海トラフでの斜め沈み込み、沖縄トラフでのリフティング、日本海東縁から山陰沖における東西圧縮、オホーツク海-千島弧西端-日本海溝での東西圧縮、伊豆・小笠原弧のリフティングの大枠は 3Ma 以前、古くとも 6Ma 前には確立した事が明確となった。また、全海域同一の基準に基づき、日本周辺海域中新世末期以降に活動した証拠が見出せる断層 776 個を抽出した。これらの断層のうち、第四紀以降において活動した証拠が見出せた断層は 753 個である。これらの成果は、海域ごとに章別にまとめられ、地質ニュース（1999 年 9 月～11 月号）に掲載された。徳山・本座（2001）では、断層地形の抽出の基準とその手順を明記するとともに、抽出した断層のうち、第四紀以降に活動したと判断されたものを図示し、個々の断層の特徴を記述した断層の属性（断面および平面での特徴、変位基準、活動時期、変位している地層、認定度等）を掲載した。

断層解析に際しては、現時点で最も高解像のデータセットを使用したが、多くの地域において、断層活動の年代と断層の空間的広がりに関するデータの不足が問題として残されている。年代については、使用可能なデータが少ないとほかに、その精度に難点があり、断層地形が海底面で確認されていない断層の第四紀後期の活動性は評価が困難である。つまり、陸域の活断層と同様の基準を用いると、海域の断層の多くは、活断層と断定できる十分な証拠は得られていない。空間的広がりについては、断層地形が海底表層堆積物によって覆われている場合、音響地殻断面によって推定しているが、その側線間隔は一般に広く、断層の空間的広がりを精度よく求めるには、多くの場合不十分である。また、海底の断層と陸域の活断層との連続性の検討については、両者の活動性を評価する際の基準や情報量およびその精度が異なること、沿岸域のデータが極めて少ないと（技術的に調査は可能だが、多

くの場合、調査に際しての手続き的な問題による）から、現時点では精度の良い解析は困難である。したがって、個別の断層の活動性の評価を行う際は、これらの調査が別途必要な場合がある。

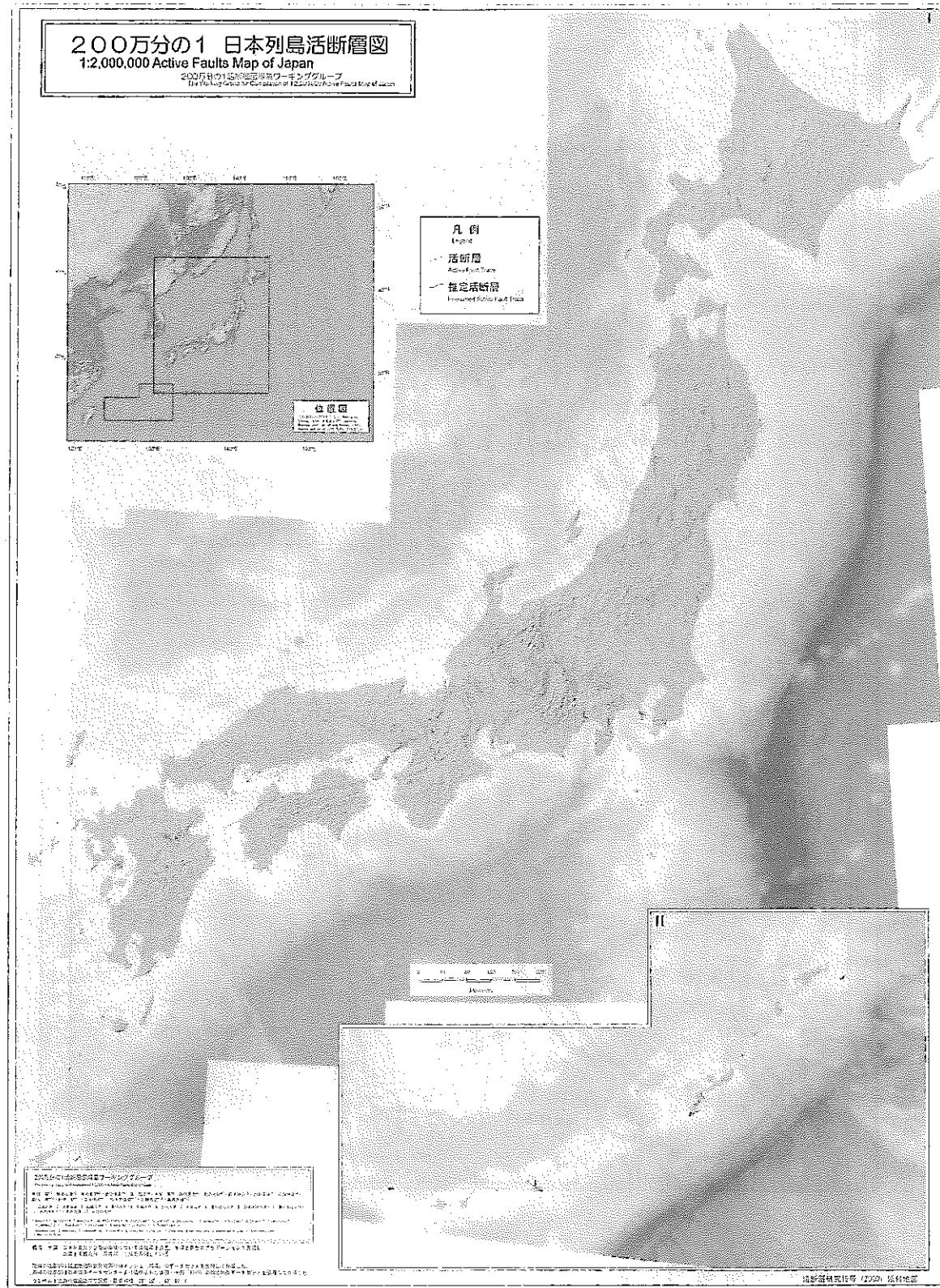


図 3.1 日本列島の 200 万分の 1 活断層図断層図

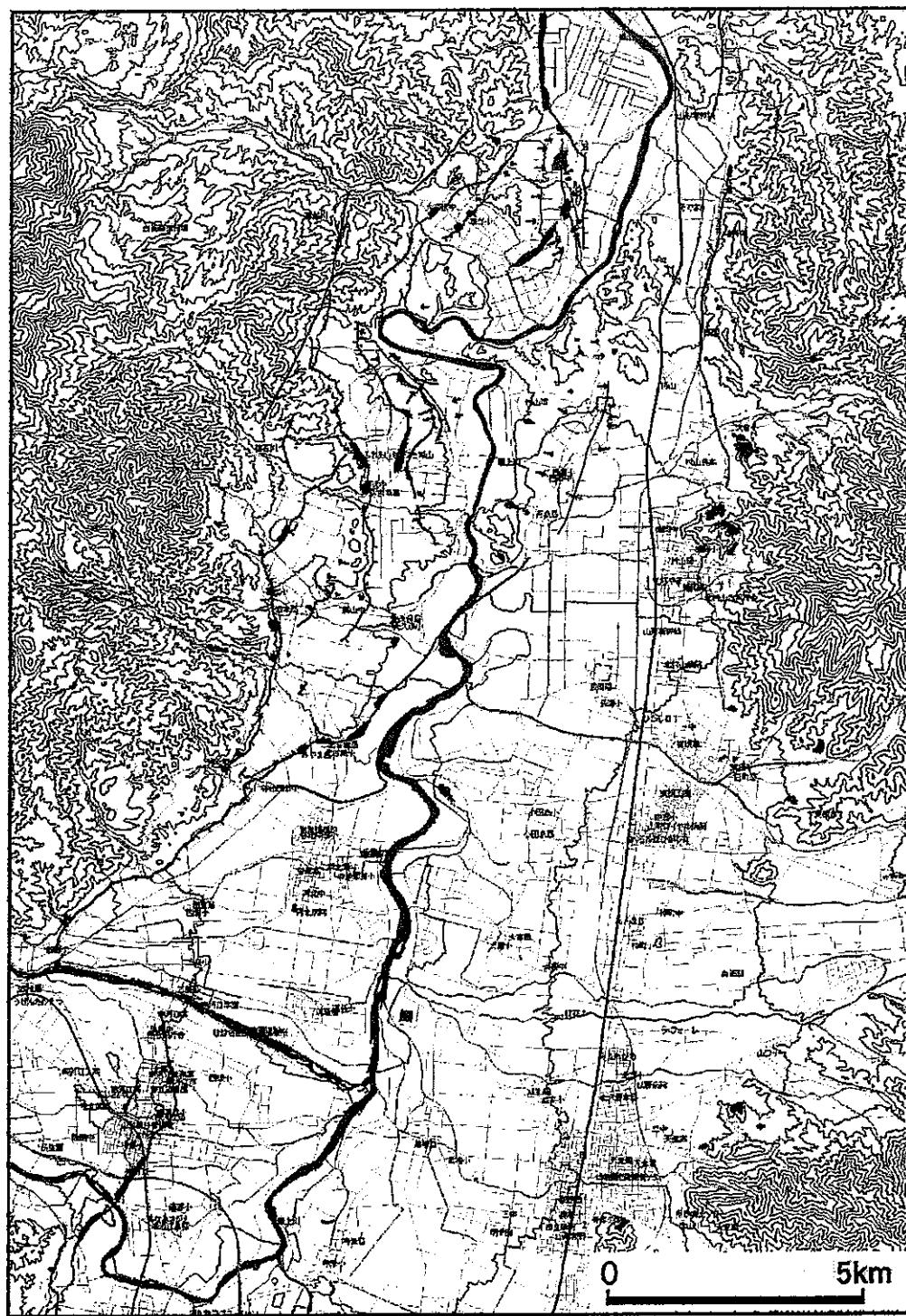


図 3.2 従来の活断層の延長で、新たに沖積面の変位を識別したことにより、
断続的に分布していた断層帯の主要構造が明らかになった例（山形
盆地北西部）（等高線間隔 50m）

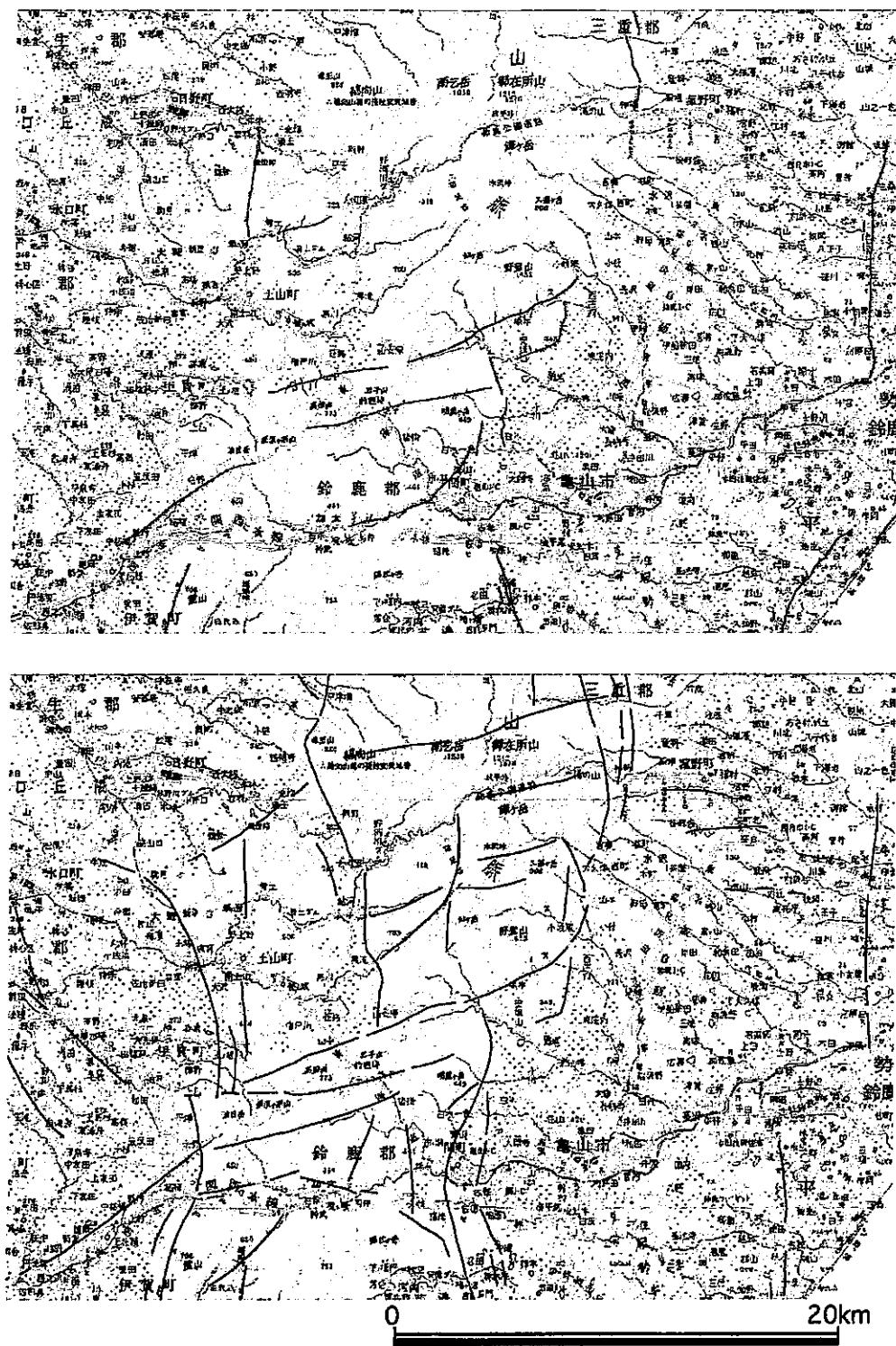


図 3.3 地形・地質学的な調査結果によって精度が向上した空中写真判読技術により、断層変位地を見直し、確実度Ⅱ・Ⅲの活断層（活断層研究会, 1991）が削除された例

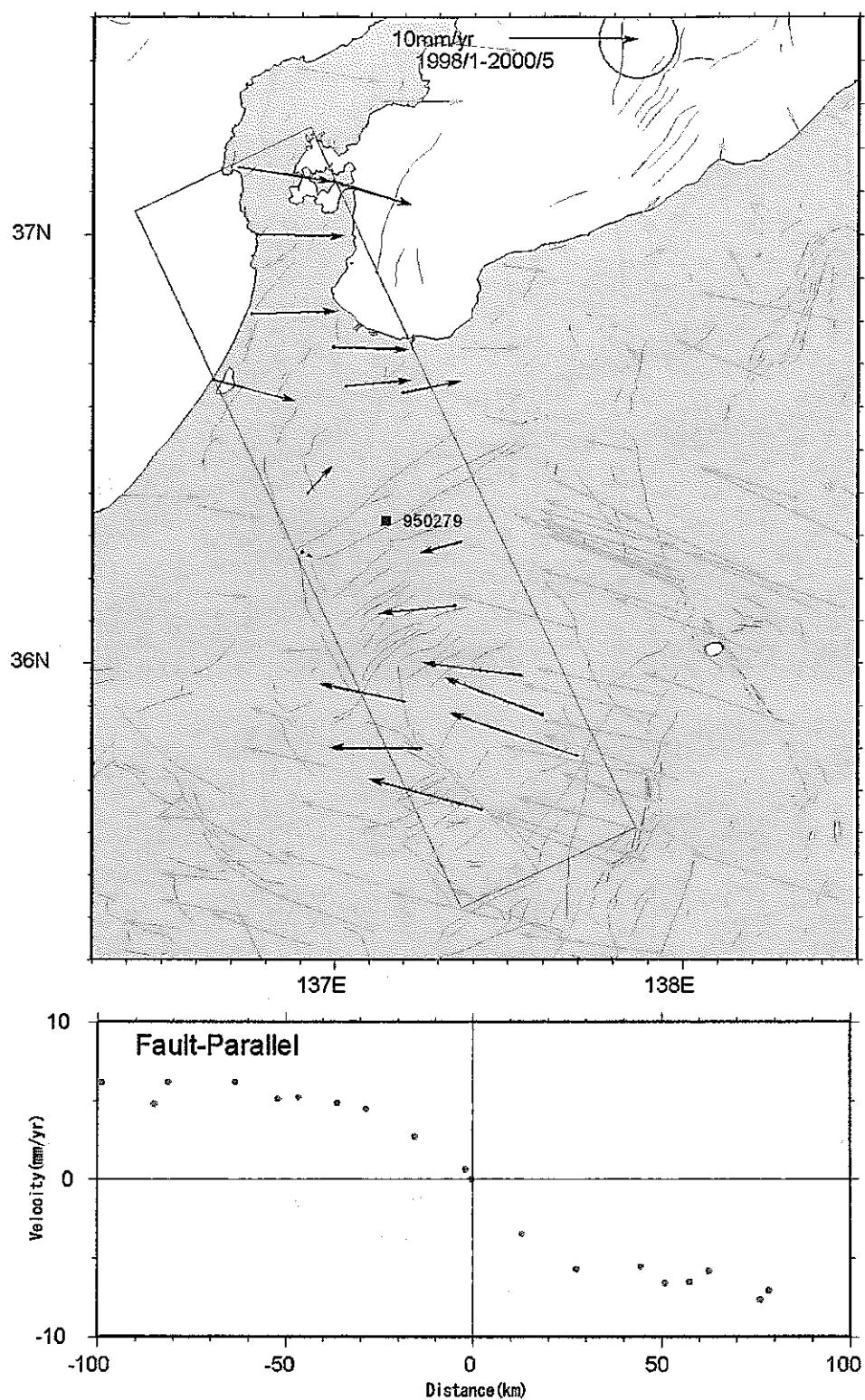


図 3.4 GPS データの解析により求めた跡津川断層帯周辺の地殻変動速度
950279 を定点としている。矩形領域は下図の地殻変動速度（断層走
向方向）の空間分布で表示したデータの範囲を示す。

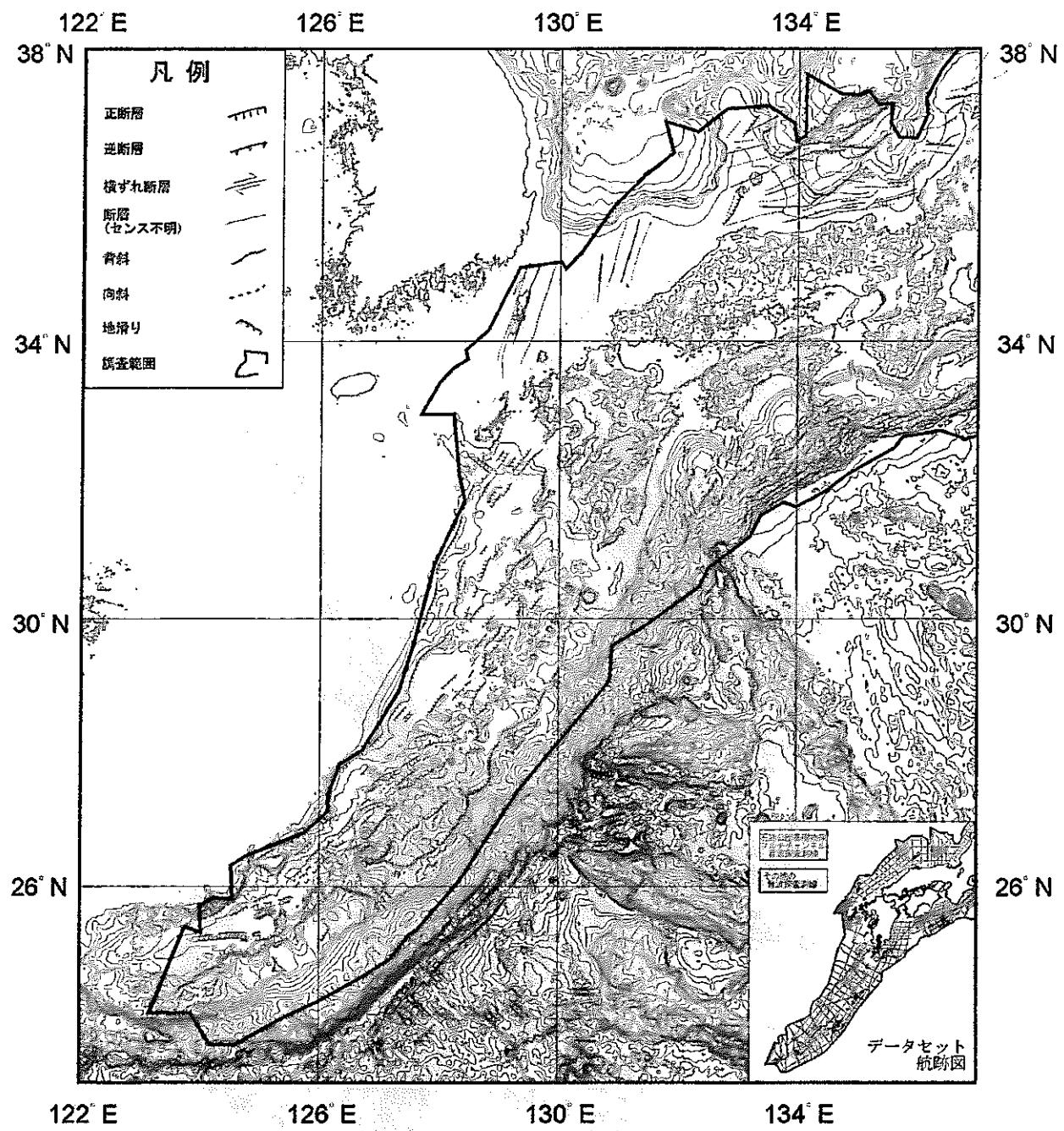


図 3.5a 6Ma 以降の西南日本周辺の海域地質構造図

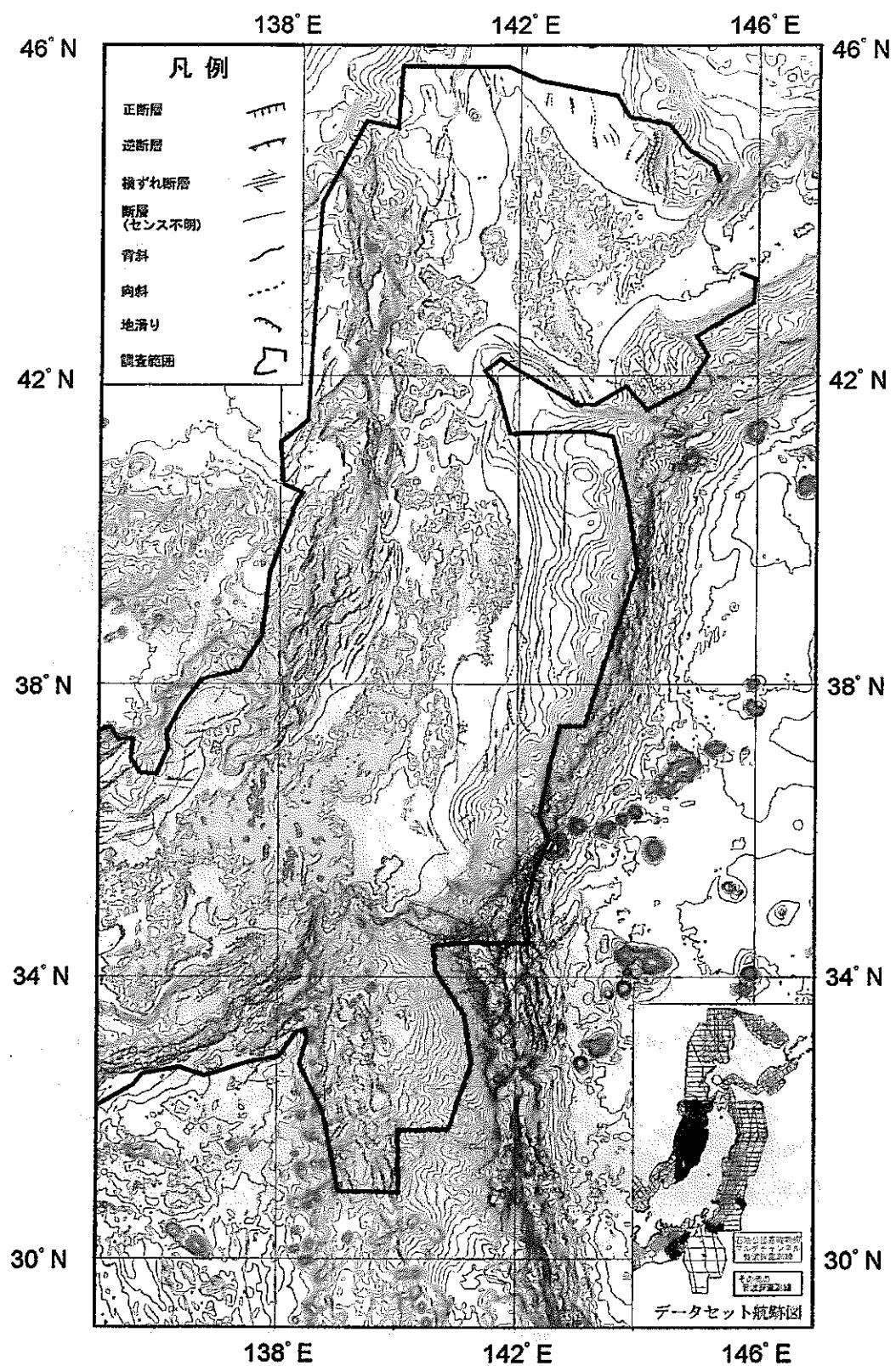


図 3.5b 6Ma 以降の東北日本周辺の海域地質構造図

4. 火成活動

4. 1 日本列島の第四紀の火山活動

第四紀火山の活動年代、規模、噴火様式などの特徴および活動域の時間的・空間的变化を把握するためには、第四紀火山の情報を収録したデータベースが必要である。日本列島における第四紀火山のデータベースとしては、1962年にIAVCEI（国際火山学地球内部化学会）の前身が刊行した活火山カタログや気象庁が刊行した日本活火山総覧、地質調査所による「日本の火山第2版」などがあるが、これらは活火山が対象であったり、収録項目が限られる等の問題があった。そのため、第四紀火山カタログ委員会は日本列島のすべての第四紀火山を網羅し、各火山の特徴を簡潔に記載した「第四紀火山カタログ」を取りまとめた（第四紀火山カタログ委員会、1999）。火山カタログの収録火山は、地質調査所による「日本の火山第2版」を基本として、その後、得られた年代測定結果などに基づき、第四紀火山の加除修正を行っている。その結果、第四紀火山として認定された火山は348となり、「日本の火山第2版」の245より大幅に増加した（図4.1）。

また、一つの火山が複数の火山体から構成される場合がある。そのため、「第四紀火山カタログ」は、認定されている一つの火山の情報（火山名、緯度・経度、グループの体積及び年代範囲、そのグループに含まれる個別の火山名）を集録した「火山カタログ」とそれを構成する個別の火山体ごとの情報（火山体の構造分類、緯度・経度、山頂の高度、火山体の面積と体積、噴出物の種類、活動年代、産出する岩石とその量比、 SiO_2 組成レンジ、文献リスト等）を集録した「個別火山体カタログ」の二つのデータベースによって構成されている。個別火山体カタログの例を図4.2に示す。

地質環境の長期安定性の観点からは、日本列島の火成活動の地理的な偏在性や時空変遷を検討することが重要となる。一般に、第四紀火山は千島、北海道、東北本州を経て伊豆諸島からマリアナに至る東日本火山帯と、山陰から九州を経て南西諸島に至る西日本火山帯に区分されている（Sugimura, 1960）。日本列島における第四紀火山活動の時間的・空間的变化を把握するために、0~0.5Ma, 0.5~1.0Ma, 1.0~1.5Ma, 1.5~2.0Maに活動が認められた火山の分布を図4.3a, bに示す（ここで、時代区分をまたがる火山、たとえば0.7~1.2Maに活動した火山については、0.5~1.0Ma, 1.0~1.5Maの二つの時代に図示されている）。これらによると第四紀火山は、東日本火山帯と西日本火山帯の中で活動しており、火山フロントの海溝側には活動が認められない。島弧における第四紀の火山フロントの時間変化の一例として、東北日本弧における、0~0.5Ma, 0.5~1.0Ma, 1.0~1.5Ma, 1.5~2.0Maの

火山フロントを図 4.4 に示す。2.0Ma 以降の火山フロントには、新第三紀中新世にみられるような顕著なフロントの移動は認められず（例えば、大口ほか, 1989），各時代の火山フロントは脊梁山地の東西 20~30km の範囲内に位置している。このように第四紀の時間スケールでは、島弧スケール（数百 km オーダー）の火山活動の変化、例えば、火山フロントの顕著な移動などは確認されない。

一方、火山帯の中の火山地域や火山列（数十 km オーダー）での活動の変化についてはいくつかの報告がなされている（例えば、横瀬ほか, 1998；大場・梅田, 1999）。ここでは、「第四紀火山カタログ」のデータによって解析された仙岩地域の第四紀火山の時空分布の特徴を紹介する。東北日本の仙岩地域には東西 50km, 南北 30km の範囲に岩手、秋田駒ヶ岳、秋田焼山などの活火山を含めて 37 の火山が分布する。これらの火山のうち 0~0.5Ma, 0.5~1.0Ma, 1.0~1.5Ma, 1.5~2.0Ma に活動が開始した火山の分布を示す（図 4.5）。これらによると、南西に分布する火山に比べて北東に分布する火山の活動の開始時期が新しい。

以上のように、日本列島の第四紀火山の時空分布を見る限り、島弧スケール（数百 km オーダー）での活動の場には顕著な変化は認められないものの、火山地域・火山列スケールでは活動域の拡大・縮小あるいは移動等の変化が生じている。また、これらの変化にはある一定の傾向（方向・速度など）が認められる場合がある。

4. 2 坑井温度データに基づく日本列島の温度構造

火山活動が生じている地域では、地下のマグマ溜りや高温岩体等から放出される熱エネルギーによって周辺岩盤の温度の上昇や熱水対流系の形成等の影響が生じることが想定される。火山とその周辺の温度構造の関係、さらに火山の地下に存在すると考えられる熱源（マグマ溜まりなど）からの熱の影響を定量的に把握するためには、まず、第一に日本列島における温度構造の特徴を明らかにすることが必要である。実測された温度データをもとに、日本列島の大局的な温度構造を明らかにしたものとしては、地殻熱流量図（松林ほか, 1992 ; Geological Survey of Japan and CCOP, 1997）や地温勾配図（大久保, 1993；矢野ほか, 1994）がある。しかしながら、これらはデータ数が限られており、かつ地熱地帯にデータが偏在しているため、火山帯の高温異常域と前弧側の低温域を示すような概括的なものであり、火山やその周辺地域の局所的な熱異常を十分に表現するまでに至っていない。

近年、温泉開発などによって、非地熱地帯においても多数の深層ボーリン

グが掘削され、地下の温度データが蓄積されてきた。ここでは、新たなデータの収集を行い、各坑井ごとの地温勾配値を計算したうえで、内挿処理による地温勾配図を作成した。

坑井温度データは、矢野・村岡（1986）によって、「地熱坑井データベース（SIGMA）」として取りまとめられている。前出の地温勾配図は、これらのデータをもとに作成されたものである。ここでは、それ以降に新たに掘削された坑井を中心に温度情報に関するデータ（緯度、経度、標高、掘削深度、温度検層プロファイル、坑底温度、スタンディングタイムなど）の収集を行った。また、これらのデータのほか、北海道の坑井温度データ（北海道立地下資源調査所、1995）さらに地殻熱流量データ（山野ほか、1997）をあわせて、総計1936点のデータを取りまとめた（矢野ほか、1999；田中ほか、1999）。また、坂川・梅田（2004）は、深度ごとの温度データ（いわゆる坑井温度プロファイル）のコンパイルを行い、1,215本の坑井温度プロファイルをデータベース化した。図4.6に坑井温度データベースの例を示す。

一般に地温勾配（ $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）は、深度対温度のデータ（温度プロファイル）に基づいて算定される。特に、直線的な温度プロファイル（伝導タイプ）の場合は、その値を明確に求めることができる。しかしここでは、できる限り多くの坑井データを生かす意味で、温度プロファイルが厳密には直線的でない場合も含めて、坑底温度（あるいは最高温度）と基準温度との差から地温勾配を算定した。基準温度については、各坑井の最寄りの気象官署における平年気温（国立天文台編、1997）を採用した（田中ほか、1999）。また、浅い坑井では、温度測定誤差が地温勾配に大きく影響すること、空隙率や浸透率が深部に比べて大きいため、地下の熱水流動の影響が大きくなることなどの理由から、掘削深度が300m以浅のデータは削除した。

地温勾配図はダブルリニア補間法、加重平均補間法、クリッギングおよびSmith and Wessel（1990）のアルゴリズムを試み、比較検討を行った。その結果、各手法ともデータ取り込み範囲などのパラメータを適切に設定すれば、部分的に多少の相違は生じるがほぼ同様なコンターを描くことが明らかとなった。図4.7はSmith and Wessel（1990）のアルゴリズムで日本列島全体の地温勾配値を内挿し、地温勾配コンター図としたものである。この際、格子の中央値をとることにより推定した0.025度間隔の格子点上での地温勾配値を、初期値として与え、坑井の深さで重みをつけた。なおこのアルゴリズムの計算および図の作成には、GMT systems ver.3（Wessel and Smith, 1995）を用いた。なお、上記のコンター図は、日本列島の大規模な地温勾配分布の傾向を把握するために作成したものであり、測定点以外の地点の値

は真の値と異なる可能性がある（矢野ほか, 1999）。

地温勾配図から、高温異常の背景となるバックグラウンドの値（広域的な地温勾配値）を読み取ると、北海道の日高西部、三陸海岸周辺、関東平野東部、関東山地周辺、濃尾平野周辺、琵琶湖周辺、中国南部、四国、九州北部と中央部の非火山地帯の各地域では $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 程度であるのに対して、北海道や東北、北陸、中部、近畿南部、中国北部、九州中央部、九州南部の各地域では $3\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とやや高い値を示す。また、地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温異常域は、北海道東部（知床、阿寒）、北海道中央部（大雪、十勝）、北海道南西部（定山渓、ニセコ、支笏洞爺、渡島半島）、東北脊梁山脈部（下北、八甲田、仙岩、栗駒、蔵王、吾妻、会津、肘折、那須、塩原、草津白根）、飛騨山脈周辺、伊豆半島東部、大島、八丈島、紀伊半島南部、山陰中部、九州中央部（別府～島原）、および九州南部（霧島、指宿）にそれぞれ分布しており、第四紀火山の分布と整合的である。しかしながら、富士、御岳、鳥海などは、活火山であるにも係わらず、火山周辺に高い地温勾配が認められない。このように、現在の高温異常域は第四紀の火山活動に関連していると考えられるが、すべての第四紀火山およびその周辺地域が高温異常域となるわけではない。

4. 3 日本列島の温泉・鉱泉の分布と化学組成

火山活動が地質環境に及ぼす影響については、上述したようなマグマ等による熱的影響のほか、マグマ性揮発物質が地下水に混入することによる地化学的な影響も考えられる。これらの影響を定量的に把握するための基盤的情報を整備するため、日本列島の温泉・鉱泉の分布のほか、これらの溶存成分等に係わるデータを収集した（浅森ほか, 2003）。データの収集にあたっては、1953年以降に公表された文献551編を対象とし、採取地点（緯度・経度）、井戸深度、採水標高、湧出量、pH、電気伝導度、Eh、化学分析値（陽イオン、陰イオン、非解離成分、遊離成分等）をデータベース化した。なお、データベースに取り込んだデータ数は20,772点である。

マグマ性の揮発性物質が地下水に溶解すると、 Cl^- 、 SO_4^{2-} を主体とした酸性の地下水が形成される。そのため、pHは火山活動による地球科学的影響を評価するためには、重要なパラメータの一つである。図4.8にpHが記載されている9,309点による、日本列島のpHの地理的分布を示す（浅森ほか, 2002）。pHが4.8未満の実質的な酸性（野田・高橋, 1992）の温泉は、主に北海道東部（阿寒）、北海道中央部（大雪、十勝）、北海道南西部（ニセコ、俱多楽、恵山）、東北脊梁山地（仙岩、栗駒、安達太良、那須、高原、草津

白根), 中部地方東部(八ヶ岳), 伊豆半島北東部, 九州中央部(別府, 雲仙), 九州南部(霧島, 指宿)に分布しており, これらの分布域は第四紀火山の分布と整合的である。また, 火山の中心から温泉までの距離とその温泉の pH との相関を見ると, 多くの火山から約 20km の範囲に酸性温泉が分布する傾向が認められる。

しかしながら, 火山から 20km 以上離れた地域においても酸性温泉が認められる場合もある。これらの地域にみられる酸性の温泉・地下水の原因に関しては, 堆積層中に存在する含硫黄鉱物の溶解等が指摘されている。

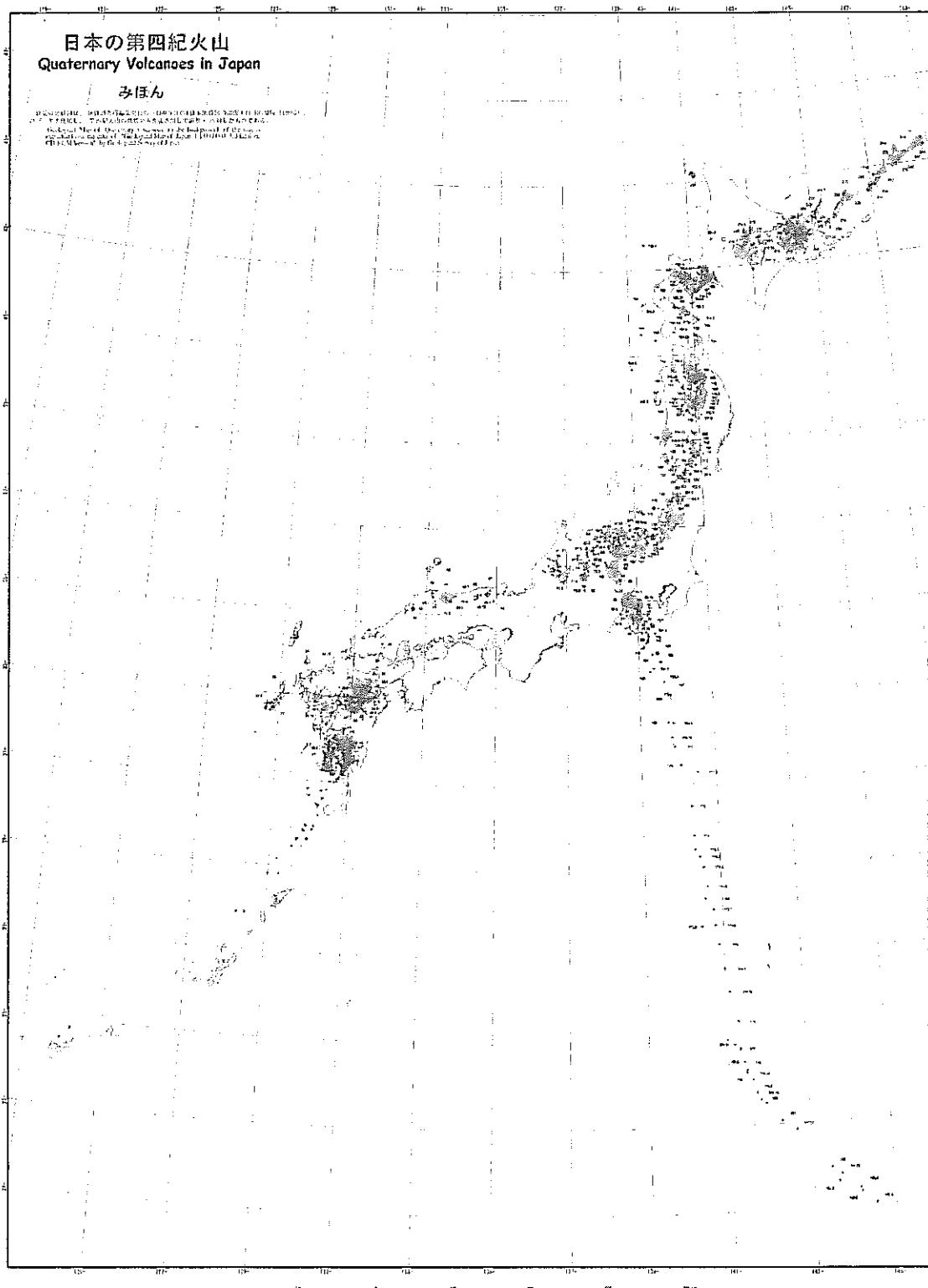


図 4.1 日本列島の第四紀火山の分布

English	レコード番号	個別火山体名	別名			
?	12	羊蹄	後方羊蹄、蝦夷富士、マッカリ			
火山番号	火山名	登録年月日				
194	羊蹄	1997.2.19				
日本の火山第1版	日本の火山第2版	修正年月日				
162	194	1998.12.26				
IAV 羊蹄山カタログ						
著者	兎玉浩・宇井忠策・中川光弘					
個別火山 体の 位置	緯度	経度	最高点高度			
地形的	N.	E	基底高度			
主火道	42°49'30" N.	140°48'42" E	分布面積			
			火山体体積			
噴出物 の 分類	玄武岩	安山岩	火成岩の分類			
	なし	構	玄武岩			
層序	羊蹄山は漸新と新第三紀層とその2次堆積物からなる海抜200-250mの台地上に生じた成層火山である。[2]			年代別定位		
				Yō-IIの下部のSofa-1, Sofi-1: 4200±1800 B.P., 14C校[3] 基層山東麓のYō-IIの直上と思われる層 部: 26270±1050 B.P., 14C校[4] Yō-IIとHin-en-ayuが重複して太田神古		
岩石名	玄武岩	玄武岩質安山岩	安山岩	テイサイト	流紋岩	その他
?	なし	構	大部分	少ない	なし	
分析値	(Mg-ol-bq-hyp-aug-andelite) [SiO ₂ =56.3-58.7%] [1] (16組)					
	aug-hyp-andelite [SiO ₂ =54.2-56.0%] [2] (36組)					
	ol-bq-aug-hyp-andelite [SiO ₂ =54.2-53.9%] [2] (7組)					
	Mg-bq-aug-hyp-andelite [SiO ₂ =53.9%] [2] (1組)					
	aug-hyp-andelite [SiO ₂ =53.9-55.9%] [2] (6組)					
備考	年代別定位値: Yō-II: 羊蹄第3軽石・スコリア層, Yō-II: 羊蹄第2軽石・スコリア層, Yō-I: 羊蹄第1軽石・スコリア層, En-a: 鹿庭					
引用文献	<p>[1] 佐藤泰一 (1992) 西南北海道・羊蹄火山周辺の火成岩と噴出物 - 火成岩と噴出物の変遷と成層性。</p> <p>[2] 富士田・大曾根 (1992) 羊蹄山の火成岩と噴出物。</p> <p>[3] 佐藤泰一 (1994) 支笏湖下鉢丘 (Sofa-1) の年代測定。第四紀研究, 22, 205-207。</p> <p>[4] 大曾根・井森行太・春日井昭・佐藤泰一 (1977) M-14C年代测定石層の14C年代と羊蹄火山のテフラ層と火成岩層の14C年代。日本の第四紀層の14C年代。</p> <p>[5] 佐藤泰一 (1970) 火成丘と噴出物における火成岩と噴出物の14C年代 - 日本の第四紀層の14C年代。</p> <p>[6] 佐藤泰一 (1970) 火成丘と噴出物における火成岩と噴出物の14C年代 - 日本の第四紀層の14C年代。</p> <p>[7] 佐藤泰一 (1972) 日本の第四紀層と日本のテフラ - 日本国立地理学研究所第4回年次研究会。</p> <p>[8] 佐藤泰一・片山雅之・吉田亮郎・佐々木清一・佐野正士・山田義之・木原義治・中川光弘 (1971) 火成丘と噴出物。</p> <p>[9] 中川光弘 (未公表)</p> <p>[10] Nakagawa, M. et al. (unpublished)</p>					

図 4.2 個別火山体力カタログの例（羊蹄火山）

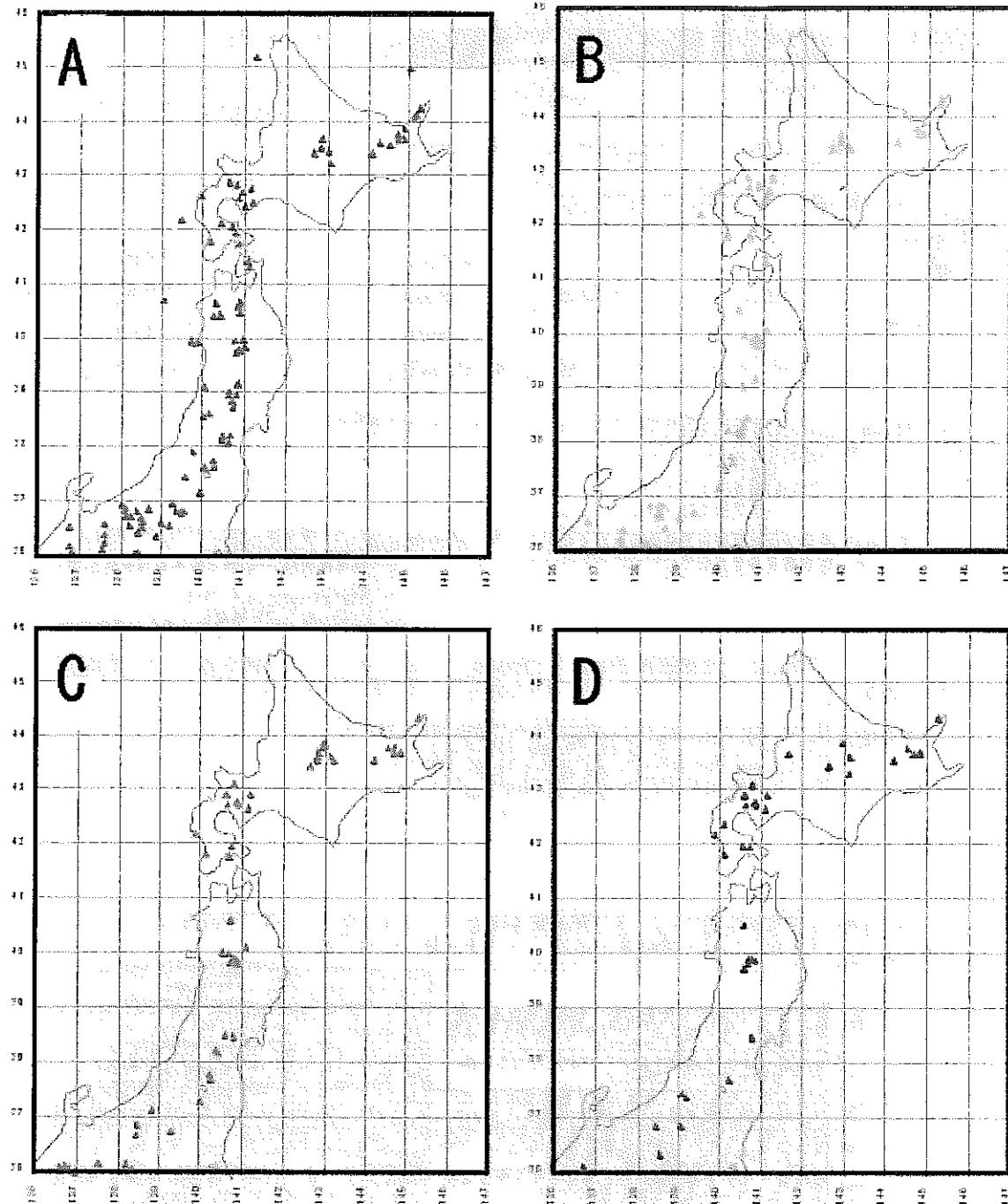


図 4.3a 東北日本の第四紀火山の時空分布
(A : 0~0.5Ma, B : 0.5~1.0Ma, C : 1.0~1.5Ma, D : 1.5~2.0Ma)

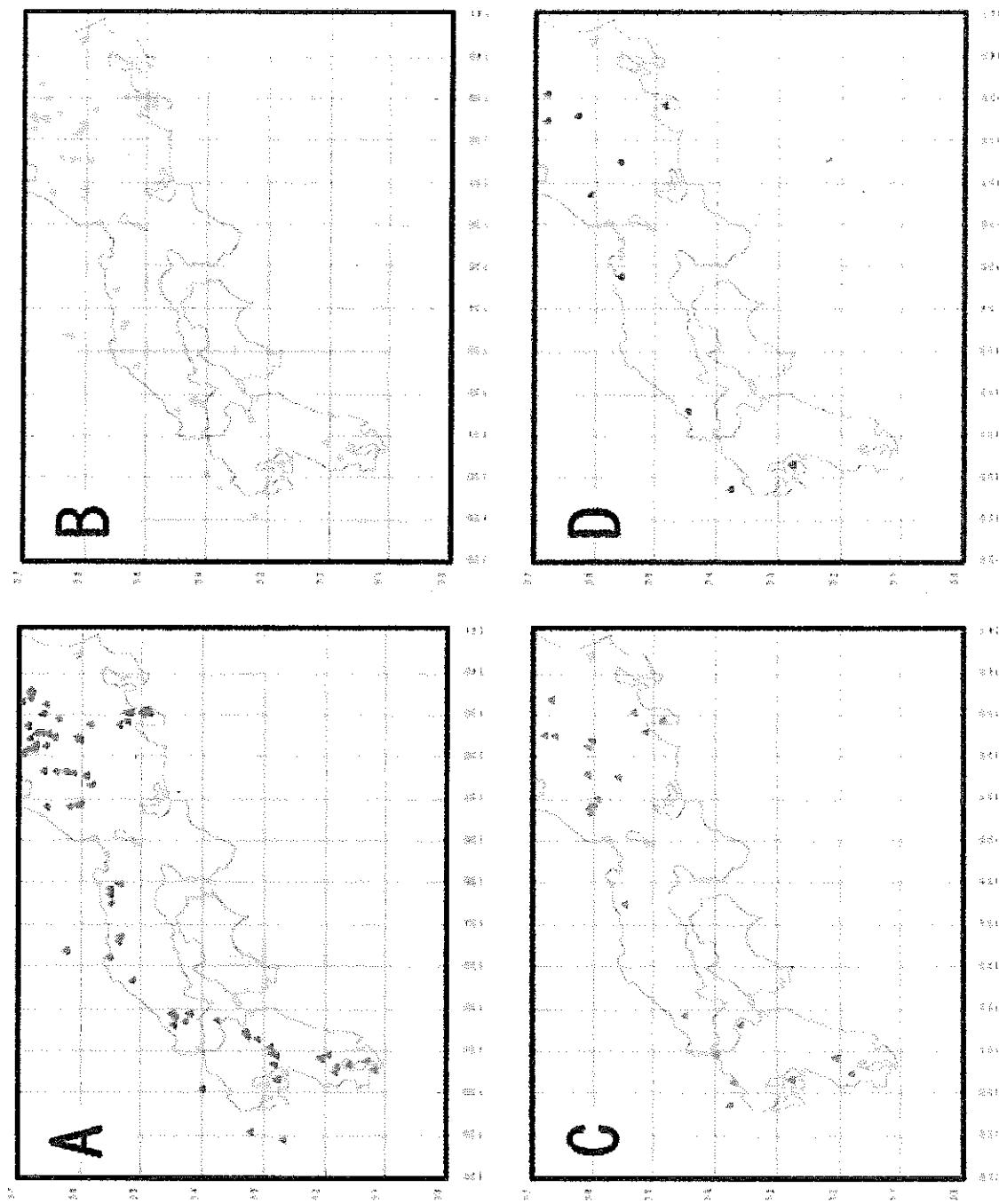


図 4.3b 西南日本の第四紀火山の時空分布
(A : 0~0.5Ma, B : 0.5~1.0Ma, C : 1.0~1.5Ma, D : 1.5~2.0Ma)

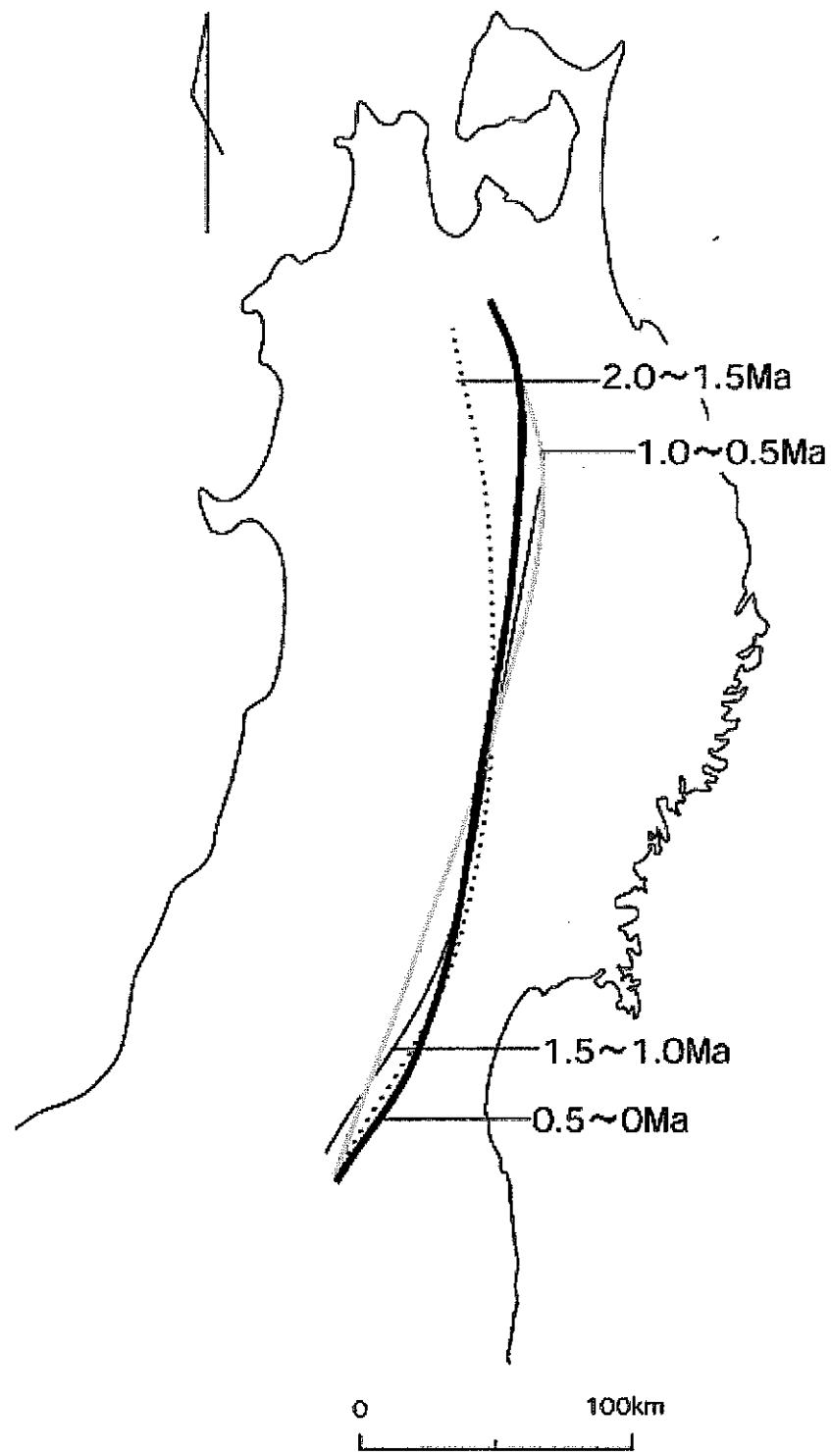


図 4.4 東北日本の第四紀火山フロントの変遷

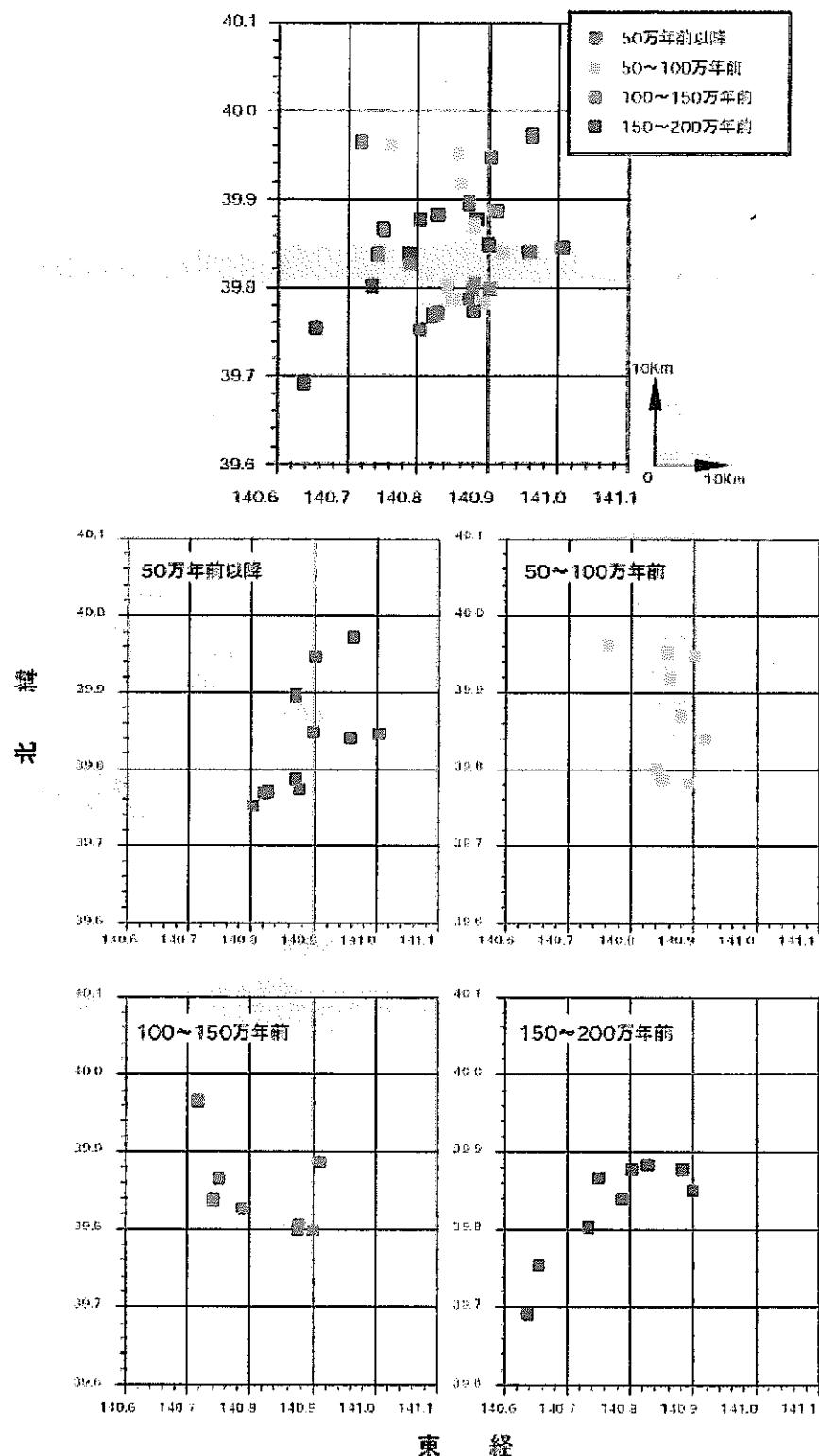


図 4.5 仙岩地域の第四紀火山の時空分布

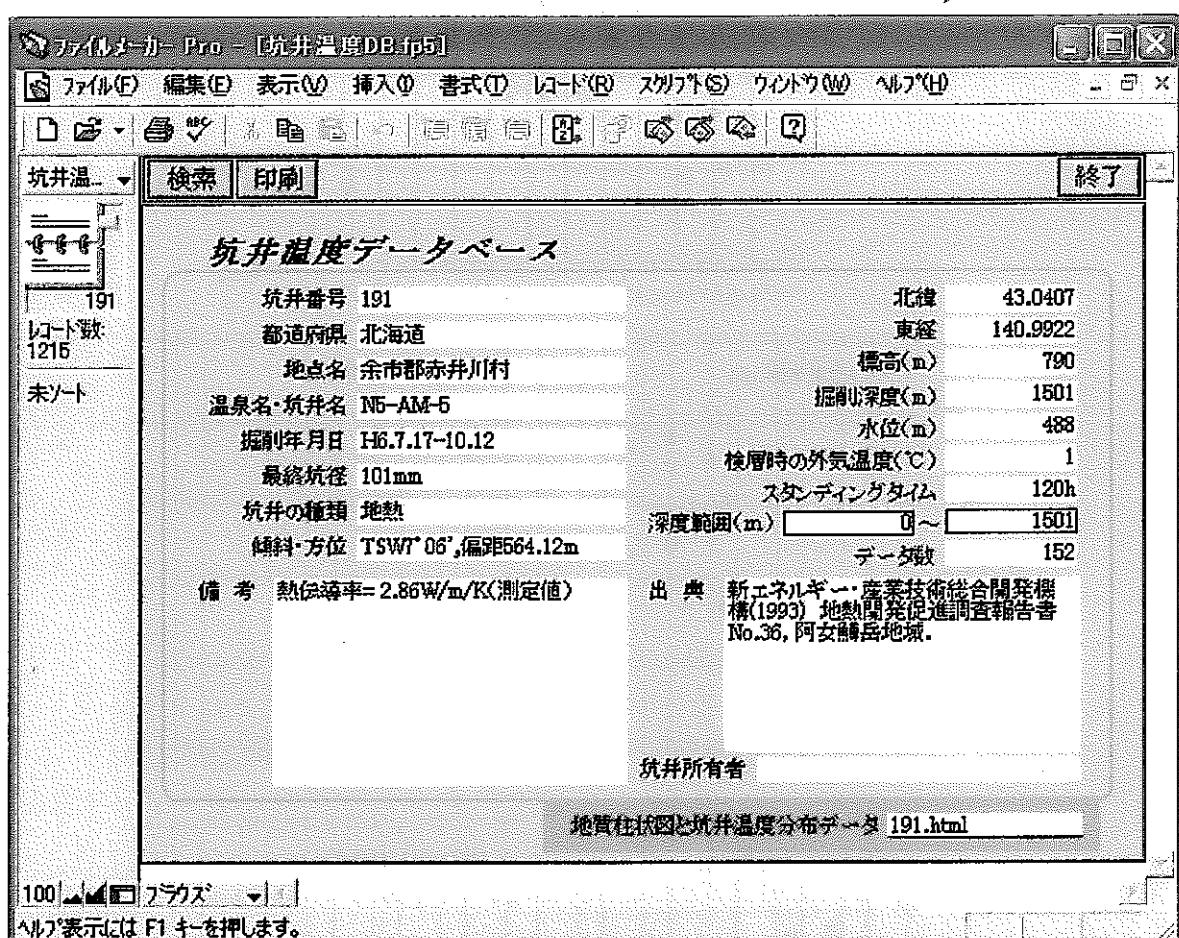


図 4.6 坑井温度データベースの表示例

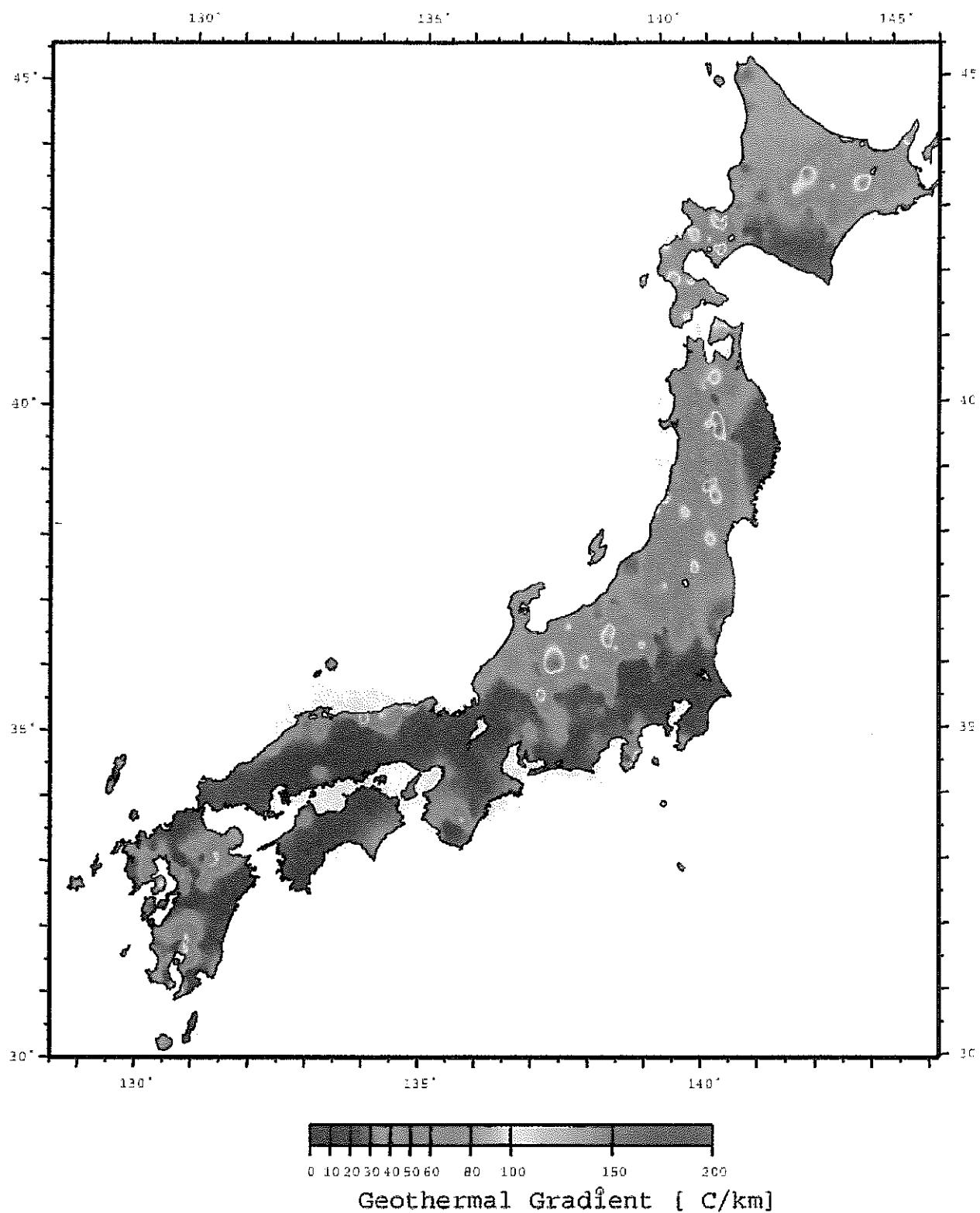


図 4.7 日本列島の地温勾配図

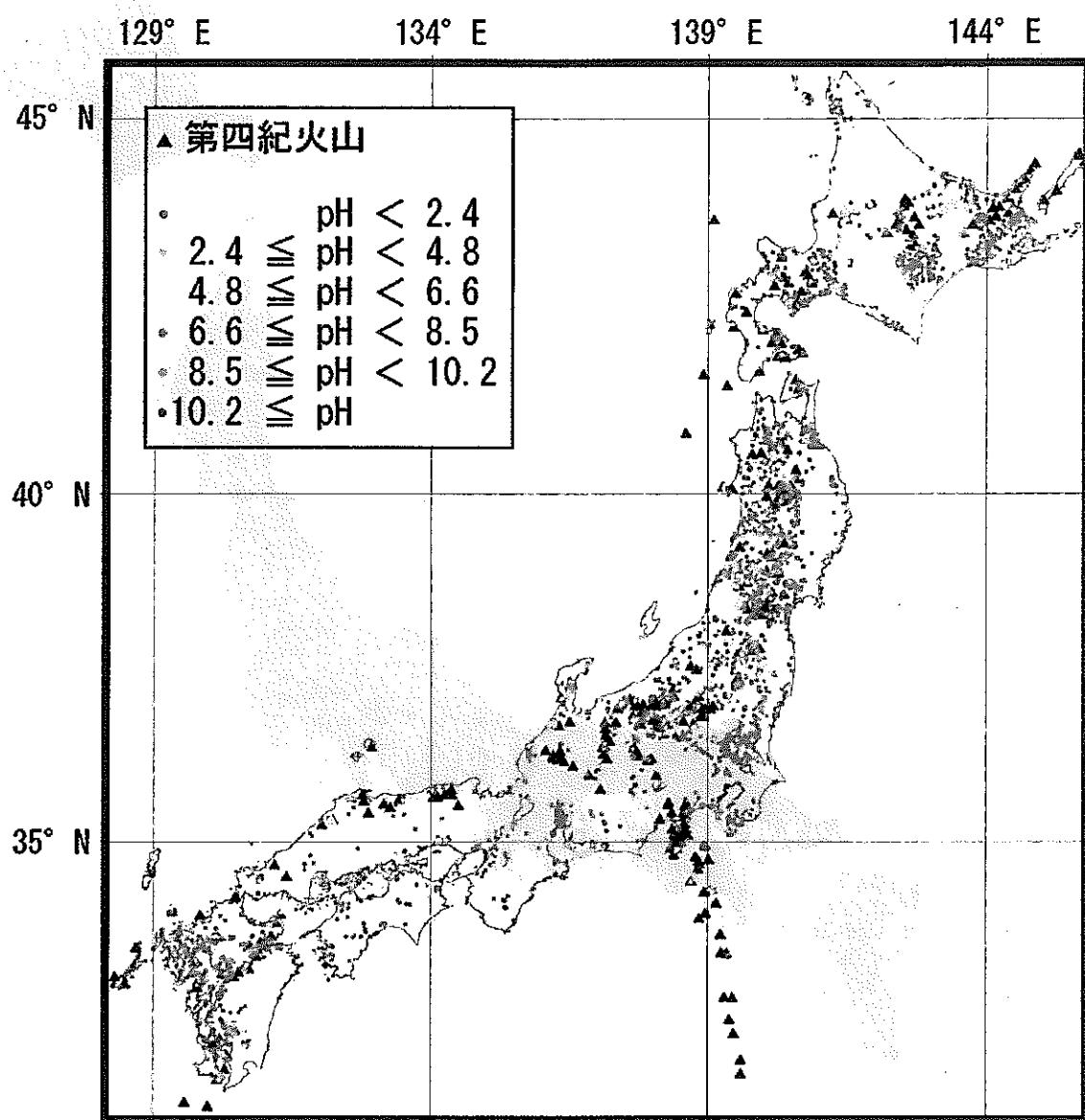


図 4.8 日本列島の温泉水の pH 分布図

5. 隆起・侵食

5. 1 日本列島の第四紀後半の地殻変動

第四紀後期における海岸部の地殻変動の速さや様式を考察するための基礎データとして、全国の海岸段丘の分布と年代に関するデータベースを作成した。この成果は、「日本の海成段丘アトラス」として東京大学出版会から2001年に刊行された。このデータベースの新しい点は、1) 完新世から中期更新世までの海成段丘の分布と年代が網羅されている、2) 関連する文献の充実したリストが付されている、3) 基図の縮尺が1/5万と大縮尺である（従来は1/200万程度）、などである。これらのデータはCD-ROMに格納され、パソコン上でさまざまな検索ができる。このデータベースの構築により、全国の沿岸部における地殻変動が、より高い時間分解能と空間分解能で解析できるようになった。この海成段丘アトラスは、一部の島嶼を除いて日本列島全ての海成段丘を網羅しており、以下のデータから構成されている。

① 1/5万段丘分布図およびその解説：

1/5万地形図1枚を1調査地域として、既存文献を参考し、さらに1/2万や1/4万空中写真判読、および現地調査によって段丘分布図を作成した（563図幅）。これらの図幅は、海岸から約20kmまでの内陸部までをカバーしている。また、一部では、大河川に沿って、低地に分布する河岸段丘も記載した。1/5万地形図ごとに年代測定値や火山灰層序、化石や古地磁気測定結果など、段丘の形成年代の推定に必要なデータを整理した。

海岸段丘については、隆起量の指標となる地形や地層の種類（旧汀線など）と、それらの位置および標高値が記載され、これらの変動基準の高度分布から地殻変動の量や様式が推定できる。変動量の推定精度は、変動基準の種類によって異なり、旧汀線を指標とした場合は±0.1m前後、1/2.5万地形図からの地形判読による場合は、±10m前後の誤差を含むと考えられる。変動基準の高度から海水準変動を補正して実際の上下変動量を求め、その値を形成年代で除することで、変動速度を推定できる。

② 1/20万段丘分布図：

1/20万地勢図に酸素同位体ステージごとに海岸段丘の高度分布などをプロットし、それらのデータに基づいた旧汀線高度の等值線図を作成した。図面の総数は約250枚で、この図から海水準変動を補正すると隆起量図が得られる。

③ 1/200万段丘分布図：

1/20万段丘分布図をコンピュータ編集して、1/200万の全国図を2葉作成した。1枚は最終間氷期（ステージ5e）、もう一枚はステージ7と9の旧汀

線の高度分布を示しており、第四紀後期の地殻変動の特徴を概観することができる。また、これらの図には、代表的な地域の 1/60 万の旧汀線高度分布図も挿入されている。これらの図は「段丘アトラス」に付図として添付されている。

④ 平野・盆地の沈降量図：

主要な 27 の平野・盆地について、既存文献を元に「第四紀層」の基底深度分布図を作成した。これらの地層は主に浅海に堆積したものであり、基底から地表までの層厚がおよその沈降量に相当し、本書に付された「第四紀層」基底の年代を考慮すると沈降速度を見積もることができる。

小池・町田（2001）は、段丘アトラスにまとめられたデータから分かる日本列島の地殻変動の特徴を図 5.1 にまとめた。その概要を以下に抜粋する。

- ・ 北海道：オホーツク海沿岸では、知床半島を除いて、隆起速度は過去数十万年間 0.5 m/千年以下であることが多く、北海道の中で地殻変動が少ない。太平洋岸でも過去数十万年間ほぼ一定の傾向で変動が継続しており、隆起速度は 0.5m/千年以下であることが多い。日本海沿岸では南北性の軸を持つ波長 30~50 km 程度の褶曲構造が発達し、北部で 0.5~1 m/千年程度、南西部の半島部では同程度かやや速い隆起速度を示す。石狩低地は著しい沈降を示す。
- ・ 東北日本海岸～北陸：南北性の軸を持つ波長 20~50 km 程度の褶曲構造が発達し、向斜部は平野や盆地となり、背斜部は丘陵（日本海では島）を形成する。隆起速度は 0.5~1 m/千年程度で、半島の先端部でより速い。
- ・ 東北太平洋岸：0.5m/千年以下の速度で緩やかに隆起している地域が多い。
- ・ 関東：この地域は南から順に、A:全体として北へ傾動する地震性隆起地域、B:その北側で南西～北東に延びる沈降帯（秦野～横浜～千葉沈降帯）、C:その北側で安定または緩慢な隆起を示す関東平野中央部に分けられる。A 地域では、南部ほど隆起速度が大きく最大で 1 m/千年以上に達する。C 地域の東部には、南北性の軸を持つ隆起帯がある。
- ・ 東海：駿河湾西岸で 1 m/千年を越える大きな隆起速度を示す地域があるが、その他の地域は比較的隆起速度が小さい。
- ・ 紀伊半島・四国南岸：これらの地域の半島部は、南海トラフ側から北へ傾動する地震性の変動区である。特に室戸半島では隆起速度が大きく、1 m/千年を越える。
- ・瀬戸内沿岸：この地域は全体として沈降傾向を示し、海岸段丘の分布は非常に限られる。大阪湾周辺では、六甲山地の速い隆起と大阪平野の大きな沈降が対称的である。

- ・山陰海岸：ごく一部に最終間氷期の海岸段丘（旧汀線高度 10 m 程度）が分布する他は、海岸段丘が殆ど分布せず、地殻変動が穏やかな地域と考えられる。
- ・九州：九州南東部は、宮崎平野で比較的大きな隆起が認められる。北部から西部の沿岸は隆起速度が小さい（0.1 m/千年未満）か、僅かに沈降傾向にある。別府－島原地溝は著しく沈降している。種子島や屋久島は隆起速度が大きい。
- ・南西諸島：全体として隆起しており、外弧にある喜界島は日本で最も隆起速度が大きい地位場所の一つである。

5. 2 最近約 10 万年間の隆起速度

日本列島の隆起速度を明らかにすることは、将来の地形変化量を予測し、地層処分の安全性を評価する上で重要な情報である。藤原ほか（2004）は、過去 10 万年程度の期間を対象に、全国の隆起速度を既存の文献などを使って調査し、分布図に取りまとめ、その結果に基づいて日本各地の隆起の特徴を議論した。

この論文では、主に次の 3 つの方法で隆起速度が推定されている。

- 1) 海岸部については、12～13 万年前の最終間氷期に形成された海岸段丘の旧汀線高度分布（海面変動を補正した値；小池・町田, 2001）から計算。
- 2) 内陸部で年代の分かる河岸段丘が発達する地域については、吉山・柳田（1995）の「TT 法」によって、河岸段丘の比高から過去 10 万年間程度の隆起速度を算定。
- 3) 山間部について、「第四紀における隆起・沈降量図」（第四紀地殻変動研究グループ, 1969）から計算。

これは、第三紀末に形成されたと想定される“小起伏侵食面”，および第四紀層と第三紀層の境界を基準面として、それらの現在の高度分布から第四紀の累積変動量を推定したものである。こうして求められた隆起速度は、1), 2), 3) の順に信頼度が低下する。1) や 2) のような確実な隆起速度の指標がないところは、周辺で分かっている隆起速度を内挿・外挿した。その際には、第四紀地殻変動研究グループ（1969）のほか、山地周辺に堆積した第四系の年代と層相（たとえば、厚い礫層の堆積開始は、そのような粗粒物質が生産されるほど背後の山地が高くなつたことを示す）、山地高度などを参考にした。

また、主な平野については、第四系の基底高度分布（藤原, 2001）から

推定した過去 10 万年間の沈降速度を示した。

隆起速度に関するデータの密度は地域ごとに大きく異なり、データがまばらな地域もかなりある。データのまばらな地域での平均的なデータ密度は、山脈の内部など顕著にデータが少ない地域を除くと、1/5 万図幅一枚（緯度 10 分、経度 15 分：およそ 20km 四方）につき 2~3 点程度である。段丘地形の発達が悪い中国地方と、第四紀後半に噴出した火碎流群に広く覆われ地殻変動に関する情報が乏しい九州地方では隆起速度を求めていない。また、第四紀火山は噴火活動と関連して急速に隆起や沈降することが知られているが、これは長期間にわたって一定の方向性と速度を持つものではない。したがって、ここでは第四紀火山は隆起速度を求める範囲から除外した。こうして求めた隆起速度を 1/5 万地形図のグリッドごとに示した（図 5.2）。一つのグリッドに複数のデータポイントがある場合は、周辺のデータを参照しつつ、平均的な値を採用した。

北から順に隆起速度の大まかな特徴を述べる。沿岸部については、上記の段丘アトラスの解説と一部重複がある。北海道はオホーツク海沿岸で地殻変動が少なく安定しているが、一方、日本海沿岸では隆起が活発である。これは、いわゆる日本海東縁の変動（大竹・平、2002）を反映していると考えられる。日高沿岸では最近約 10 万年間の隆起速度は 0.3~0.5 mm/y と推定される。この値はさらに古い時代の海成段丘群から推定される値とも調和的で、この地域については少なくとも過去 40 万年程度は等速で隆起している。

東北地方は三陸沿岸の緩やかな隆起と日本海沿岸の速い隆起が対称的である。また、日本海沿岸では、能代平野と秋田平野に代表される沈降速度の大きな平野が分布する。こうした日本海沿岸の大きな変動速度は、日本海東縁の変動を反映している。また、東北地方の隆起速度分布は南北方向に断続する海岸平野や内陸盆地の地形をよく現している。この隆起・沈降部の分布は新第三系以降の地層に発達する褶曲や断層構造と調和的にみえ、変動の開始が第四紀以前に遡ることを示唆する。

関東平野とその周辺では、プレート収束境界とほぼ平行している房総半島南部、三浦半島、大磯丘陵で隆起速度が大きい。伊豆半島と本州の衝突境界では隆起速度が特に大きい。関東平野の地下には厚い第四系が堆積しており、更新世中期までは沈降傾向にあったと考えられる。しかし、この地域には最終氷期の海岸段丘が広く分布しており、更新世後期以降には隆起に転じたことがわかる。

中部山岳地帯は日本列島で最も隆起速度が大きい地域であり、1 mm/y (10 万年で 100 m) を越える地域もある。こうした速い隆起は、飛騨山脈におけ

る第四紀花崗岩の削剥速度（原山ほか,2000）や過去約100年間の水準測量（鷺谷・井上, 2003など）とも調和しているように見える。

中部地方では中部山岳地帯から濃尾平野西縁に向かって、大局的に傾き下がる変動が読み取れる。阿寺断層の北東側で相対的に隆起速度が大きく、南西側で小さい。近畿三角地帯では濃尾平野、琵琶湖、京都盆地、大阪湾の沈降と養老山地、鈴鹿山地、生駒山地、比良山地、六甲山地などの隆起とのコントラストが明瞭である。これは活断層を境界にした地塊運動と考えられ、山地と沈降する平野や盆地との間には活動性の高い活断層があることが多い（例えば、藤田,1976）。

紀伊半島は地震性地殻変動のため南方に向かって隆起速度が大きくなる傾向がある。紀伊半島の中心部では限られたデータであるが山地高度と対応するような隆起速度は認めにくく、今後の検討を要する。

中国地方は段丘地形の発達が貧弱で、地形がなだらかなことも考慮すると総じて変動がおだやかな地域と考えられる。数少ないデータではあるが、10万年あたり10m前後のゆっくりとした隆起、あるいはほとんど変動していないと考えられる地域が多い。

四国地方も南部で隆起速度が大きくなる半島部の隆起が特徴的である。この変動のパターンは測量データから得られた海溝での巨大地震に伴う変動と地震間の変動の総和とよく似ており（吉川ほか,1964），そのような地震性と非地震性の変動が周期的に長期にわたって累積していることを良く表している。

5. 3 ダム堆砂量に基づく侵食速度

長期的な侵食は、隆起と相まって土被り厚や勾配の変化などを通じて地下水の水理・水質などの地質環境を変化させることが想定される。したがって、将来の侵食が各地域でどの程度の量に達するかを予測することは、地層処分の長期的な安全性を評価する上で重要な情報である。そのためにはまず、日本列島全体を対象に、現在どのような速さで侵食が進みつつあるかを整理した。

現在進みつつある侵食速度は、河川流域に設置されたダムに堆積した土砂の量からある程度推定できる。その値は日本国内では地質や気候条件などである程度の差異はあるものの、地形の起伏状態（高度分散量で代表）と高い相関を持つことが経験的に知られている（例えば、Ohmori, 1978）。藤原ほか（1999, 2001）は、全国82箇所のダムについて、堆砂量、ダム建設からの経過年数、ダムの集水面積のデータから集水域の侵食速度を計算した。また、その値と数値地図から計算した集水域の高度分散量とを解析し、両者の

関係式を導いた。そして、数値地図から計算した全国の高度分散量のデータに、この関係式を適用することで全国の侵食速度の分布を推定した(図 5.3)。

侵食速度は中部山岳地帯で最も大きく、 1 mm/y を越える地域がかなりあり、山地の中心部では $2\sim3 \text{ mm/y}$ の値を示す地域がわずかながら認められる。これに次いで侵食速度が大きいのは、日高山脈、東北日本の背孤側の山地列、関東山地、西日本の前孤側の山地である。これらの山地でも中心部では山地中心部で $1\sim2 \text{ mm/y}$ の値を示す地域に囲まれて、 $2\sim3 \text{ mm/y}$ の値を示す地域が認められる。一方で、侵食速度が小さいのは、北海道中央部から北部、東北日本の太平洋側の山地、中国地方の山地である。これらの山地の侵食速度は、 1 mm/y を越えることは希で、一般に $0.3\sim0.5 \text{ mm/y}$ 未満である。丘陵部や平野はさらに小さな値となっている。こうして計算された侵食速度は、ダム堆砂という最近数十年程度のデータから経験的に求められたものである。しかし、限られたデータではあるが、扇状地などの体積から推定した千年から万年オーダーの侵食速度や、河岸段丘や熔岩台地の比高から求めた万年オーダーでの河川の下刻速度からも、比較的近い侵食速度が得られている(藤原ほか, 1999, 2001)。

こうしたことから、図 5.3 は長期的な侵食速度の分布傾向をも示していると考えられる。また、侵食速度と過去 10 万年程度期間における隆起速度(藤原ほか, 2004) が調和的な分布を示すことから、こうした侵食速度の地域的な分布様式は、主に隆起速度に規制されていると考えられる。

5. 4 日本列島における地すべり地形の分布

地すべりは、山地が多い日本列島において地形変化を生じさせる大きな作用の一つである。地すべりは数十年から百年オーダーで起こる地形変化だけでなく、万年オーダーの山地の隆起とも関係がある(藤田, 1990)。したがって、地すべり地形(過去に生じた、および現在起こりつつある地すべりの痕跡)の地理的な分布や地形・地質との関係を明らかにすることは、長期的な観点から、地形変化の起こりやすい場所とその規模を推定する資料となる。

こうした地すべり地形の全国的な分布とその特徴を取りまとめたデータベースを作成した。この成果は、藤原ほか(2004)として印刷中である。このデータベースの新しい点は、1) 日本列島全体について出来るだけ統一した基準で地すべり地形を抽出している、2) 基図の縮尺が $1/20$ 万と大縮尺である(従来の主要な地すべり地形分布図は $1/400$ 万程度)、3)、地すべり地形の分布と地形や地質条件との関連が全国を対象として解析されてい

る、などである。このデータベースの構築により、全国の地すべり地形の分布が、より高い時間分解能と空間分解能で解析できるようになった。

このデータベースは、一部の島嶼を除いて日本列島全ての地域を網羅しており、以下のデータから構成されている。

① 1/20 万地すべり地形分布図

既存の地すべり地形分布図と、新たな読図作業（国土地理院の縮尺 1/2.5 万地形図を使用）の結果を編集して縮尺 1/20 万地すべり地形分布図（基図は国土地理院の 1/20 万地勢図）を作成した。ここでは、全国的な分布図を作成するという観点から、小規模な地すべり地形は除き、奥行きが約 200 m 以上のものを示した。これは 1/20 万地形図上で 1mm の長さになり、分布図としての識別限界もある。図幅の枚数は、沖縄と島嶼部を除いて全国で 106 枚である。

② 1/200 万地すべり地形分布図

地すべり地形の全国的な分布状況を俯瞰するため、1/20 万地すべり分布図を基に 1/200 万の全国図を編集した。図 5.4 では縮小されて個々の地すべりが区別できない場合が多いが、基図（1/20 万）では一つ一つの位置を確認できる。また、日本の山地のかなりの部分には地すべり地形が認められることがわかる。

③ 地形・地質条件との比較

地すべり地形分布図をデジタル化して、GIS（地理情報システム）上に登録した。これらの情報を数値地質図（地質調査所, 1995）や数値地図（国土地理院, 1997, 1999）と重ねあわせ解析を行い、全国的な視野から地すべり地形の分布を規定する地質区分や地形特徴は何かを定量的に検討した。

このデータベースから分かる日本列島における地すべり地形の分布の特徴について、概略を述べる。

- ・地すべり地形の分布密度には、地域的な偏りが見られる。特に分布密度が高いのは、東北地方背弧側、信越、北陸、四国三波川帯で、一方、地すべり地形が少ないのは、北上山地、阿武隈山地、中国地方である。こうした分布特性は、後述の地質条件や地形特性と関連している。
- ・地質区分との関連では、大局的に見て、新第三紀海成堆積岩、中新世火山岩類（グリーンタフ火山岩類）、古第三紀～新第三紀挟炭層に地すべり地形が多く、逆に後期中生代～古第三紀堆積岩類、中・古生代堆積岩、花崗岩、結晶片岩では地すべり地形が少ない。
- ・地質構造との関連からは、背弧側を中心に地すべり地形が北東～南西方向

の帶状に密集しており、新第三紀後期から第四紀の褶曲帯で地すべりが多発していることを示している。また、四国の中構造線沿いでは主に三波川帯の変成岩地帯で発生する地すべりの分布が帶状に目立つ。

- ・地形量と地すべり地形との関連については、起伏量 200~600m の山地では地すべり地形も卓越し、また、平均傾斜でみると $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の山地に地すべり地形が多い。

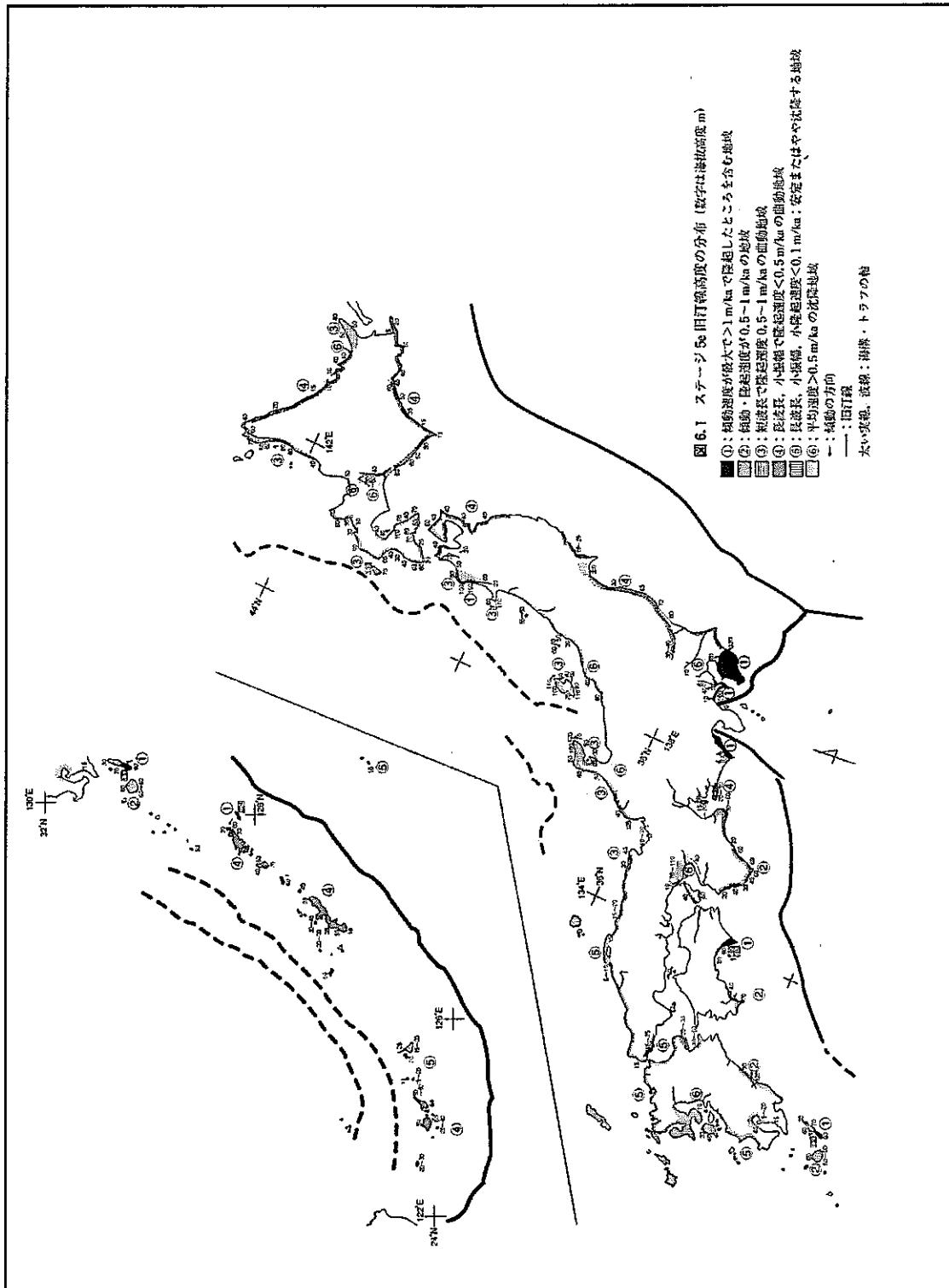


図 5.1 日本の海成段丘アトラス

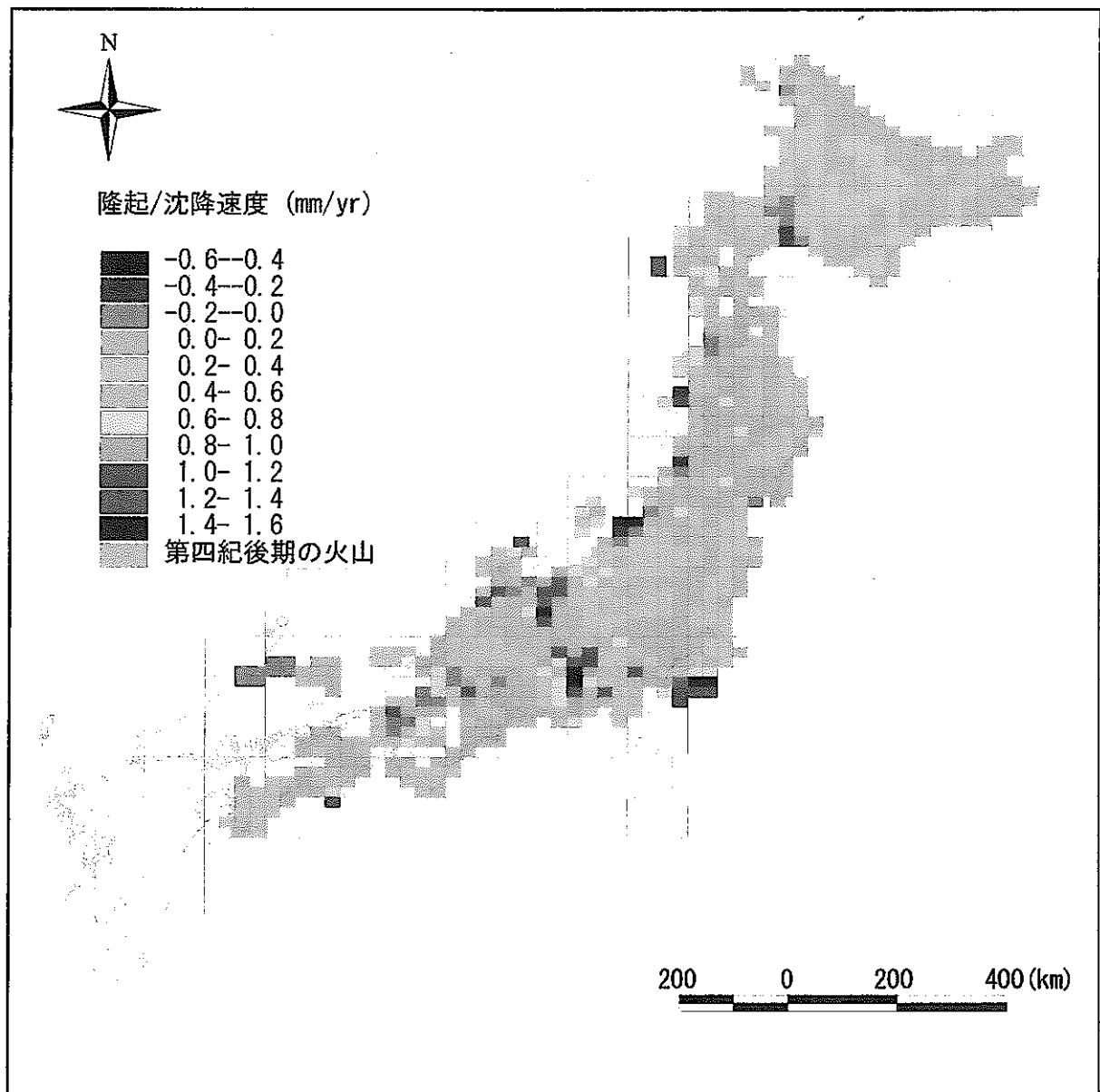


図 5.2 日本列島の隆起速度の分布

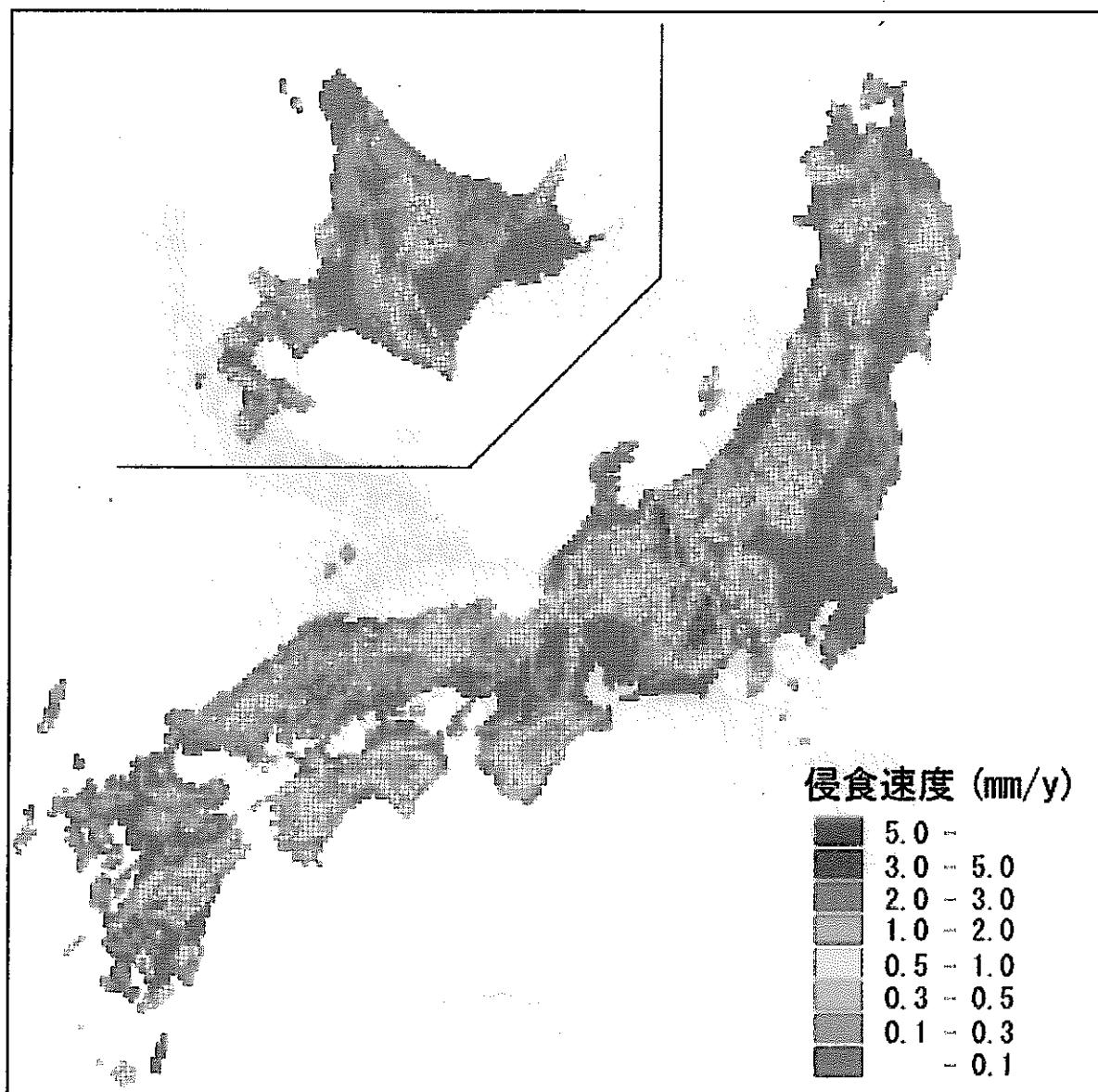


図 5.3 日本列島の侵食速度の分布

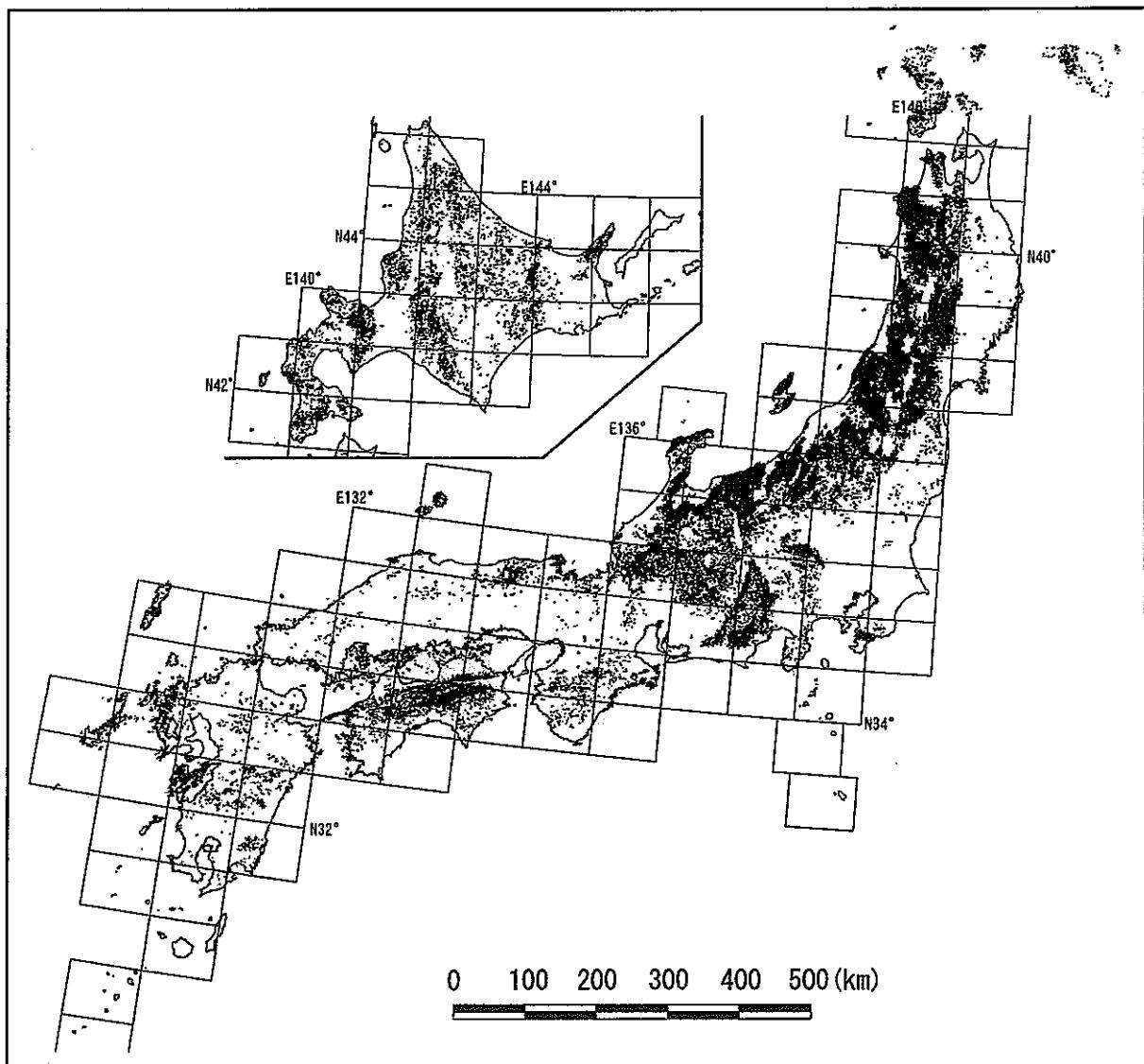


図 5.4 日本列島の地すべり地形の分布

6 気候・海水準変動

6. 1 日本列島周辺における第四紀後半の気候・海水準変動

地形を変化させる原動力として、気候変動の役割は大きい。例えば、氷期には山地を中心に凍結融解の繰り返しによる風化作用が強まり、後氷期に降水量が増加すると、氷期に生産された岩屑などの移動が活発になる。また、降水量や気温が変化すると、地下水の涵養量なども変化する（例えば、松末ほか、2000）。海水準の変動によって沿岸での堆積作用が変化し、海岸線の移動に代表される平野地形の変化が起こる。こうした海岸線の陸－海方向の移動は、日本列島では千年あたり数 km に達することがある。これは海水システムと淡水システムの境界位置が大きく移動することになるため、広域の地下水流动に与える影響を検討する上でも重要な現象である。このような気候・海水準変動に伴う侵食、土砂運搬、堆積作用の変化は、後述する地形変化シミュレーションに組み入れる必要がある。

気候変化の原因は、太陽活動、火山活動、地球の自転・公転にかかる周期的変動などが複雑に組み合わさっている。また、それらがどのように相互作用して気候変化を生じるかと言うメカニズムはよく分かっておらず、このために気候が将来どう変化するかを正確に予測することは出来ない。第四紀後半に氷期と間氷期が比較的規則的に繰り返したこと、また、現在が間氷期に当たることも事実である。現状では、氷期と間氷期にどのような環境があり、また、その下でどのようなプロセスで地形変化などが進むかについて、事実を積み上げている段階である。

海面の上下変化の記録は、海岸の地形や化石などに残されていることがある。特に、旧汀線を示す海岸段丘上の地形や、限られた水深にのみ生息するサンゴなどの生物の化石は、過去の海面高度を示す指標として良く用いられる。地殻の上下変動が殆ど無い地域や変動速度が正確に分かっている地域では、こうした海面高度の指標から、過去にどの高さに海面があったかを復元出来る。それらの指標が形成された年代を火山灰層序や各種の年代測定によって推定することで、海面高度が時間と共にどのように変化したかが復元される。

炭酸塩からなる殻を持つ生物の化石からは、海水の酸素同位対比の変動を知ることが出来る。特に、深海底堆積物に含まれる有孔虫殻の酸素同位対比は海水の酸素同位対比を反映しており、これは主に陸上に蓄えられた氷と海水の量比を示唆する（Shackleton, 1967）ことから、氷河性海面変動の有力な指標とされる。

海水準変動の要因としては次のようなものがある（米倉、1989）。氷河性

海面変化（気候－氷河－海水量の変化）、氷と海水の加重変化を受けたアイソスターによる地形変化、地殻変動（テクトニクス）による地形変化、ジオイドの変化。対象とする場所（地球上での位置と空間的広がり）や時間の長さによって、これらの要因が複雑に組み合わさって海面高度（相対的海水準）が決まる。図 6.1 には過去約 45 万年間の海水準変動の記録を示した（Labeyrie et al., 2002）。これは上記の指標を組み合わせたもので、変動の周期と共にその振幅（海水準変動の幅）もかなり一定であることがわかる。

図 6.2 には日本列島周辺での完新世の海水準変動を示した。これは、1 本ないし数本の連続したボーリングコアについて、化石や堆積物の特徴から海面高度が復元され、さらに詳しい ^{14}C 年代測定によって、コア掘削点での海水準変動が高い時間分解能で判明している例である。これらは、主に、氷河性海面変化と各地点の地殻変動が合わさった相対的海水準変動を示している。東京湾と奥東京湾は、完新世には地盤の上下変動が少ないので、これがおよそ日本列島周辺での標準的な氷河性海面変動と考えられる。氷河性海面変動は日本列島周辺ではほぼ同じ値なので、残りの 4 本のグラフの海面高度や最も海面が高い時期が異なるのは、主に地域的な隆起・沈降速度の差である。九十九里浜および三浦半島は隆起傾向にあり、仙台平野および大阪湾は沈降傾向にある。三浦半島では 8000 年前頃に海岸の地震隆起による相対的海水準の急激な低下が見られる（藤原ほか, 1999）。

日本列島の主な海岸平野はこうした過去 6000 年程度の海水準の安定期ないし僅かな低下に対応して、河岸が埋め立てられて（海岸線が海側へ前進して）形成されたものである。このような海岸の前進速度は、九十九里浜（長さ 60 km, 幅 10 km）で 1.5 km/千年程度（増田ほか, 2001a, b）、濃尾平野（40 km × 25 km）では 5~10 km/千年（山口ほか, 2003）にも及び、海岸地形が海水準変動に非常大きく規制されていることが分かる。

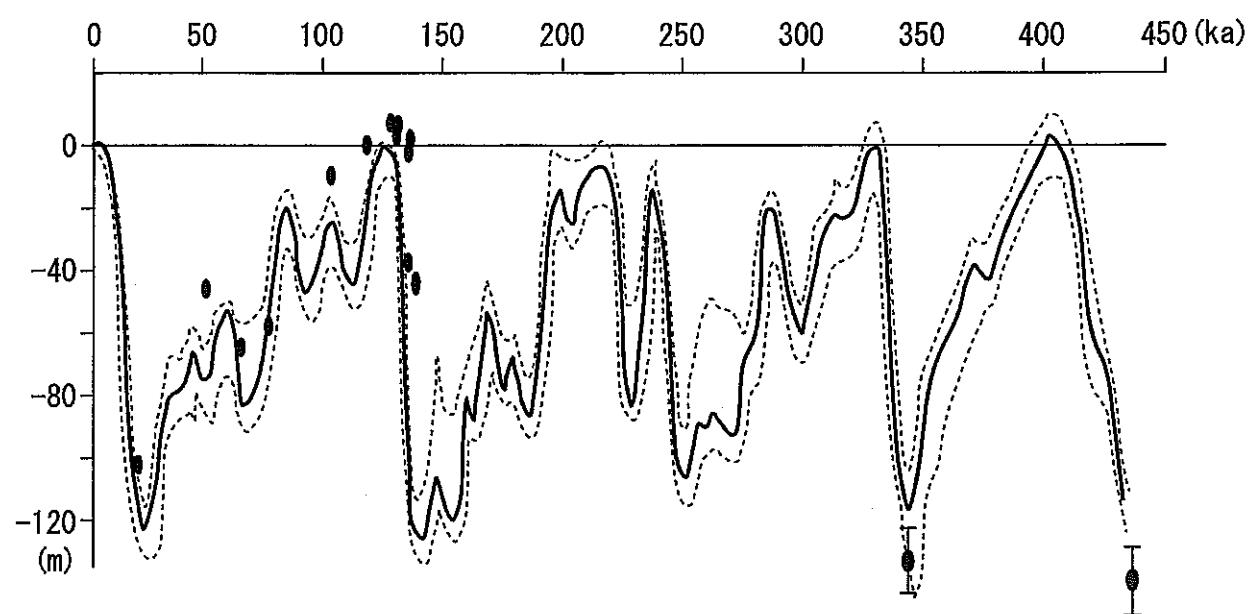


図 6.1 45 万年前以降の氷河性海面変化

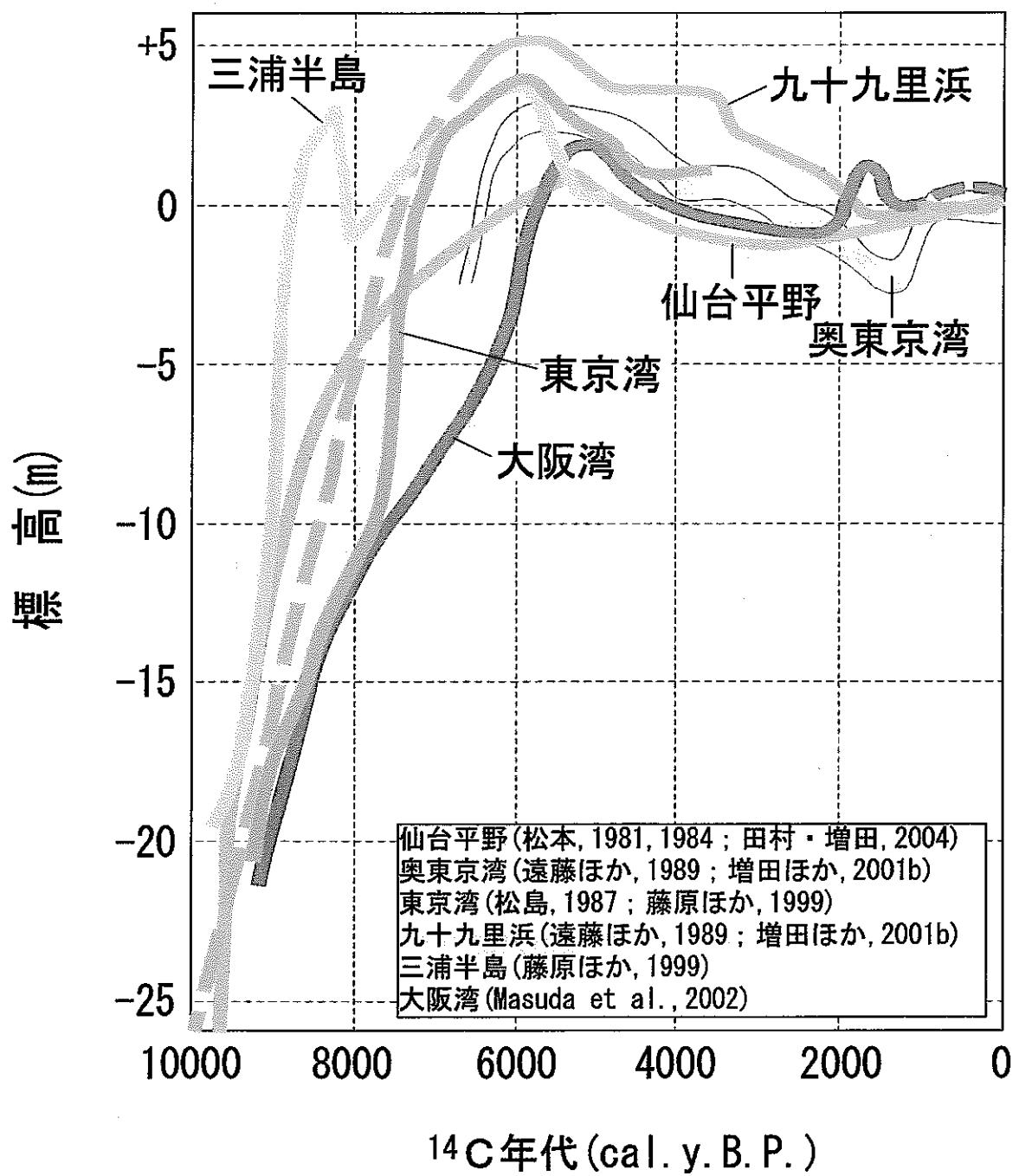


図 6.2 日本列島の完新世の海水準変動

7. おわりに

最終処分法に基づき、2000年10月には、最終処分事業の実施主体として原子力発電環境整備機構が設立されるとともに、2002年12月には「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が始まった。公募にあたっては、考慮すべき事項とその評価の考え方をまとめた「概要調査地区選定上の考慮事項（原子力発電環境整備機構、2002）」を踏まえ文献調査を行うことになっている。「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち、全国規模でデータが整備された情報に基づき、一律の基準により概要調査地区選定に関する法定要件への適合性が明確に判断される事項（全国一律に評価する事項）については、「200万分の1日本列島活断層図」（中田・今泉、2002）、「日本周辺海域の第四紀地質構造図」（徳山・本座、2001）、「日本の第四紀火山」（第四紀火山カタログ委員会、1999）が選定基準に活用されている。

これまでの地層処分技術に関する研究開発では、わが国における地層処分概念の成立性や安全評価の信頼性を示すことに主眼が置かれており、地質環境の長期安定性についても、「地層処分システムの設置に適した地質環境が我が国にも存在し得ること」を科学的な根拠に基づき立証するため、上記に示したような全国レベルでの基盤的な情報の整備が進められてきた。

しかしながら、精密調査地区の選定のための調査（概要調査）や安全評価に係わるシナリオや評価方法等を覗んだ今後の研究開発では、検討の対象となった地区に適用できる調査技術や将来の地質環境の安定性の評価手法を取り組んでいくことが重要となる。

精密調査地区の選定では、法定要件として「対象地層等において地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」等を明らかにすることが求められているが、そのためには、検討の対象となった地区において地層処分システムの成立性に重大な影響を及ぼす現象の存在や地質環境の変動履歴を予め確認するための体系化された調査技術の整備が不可欠である。また、将来の地質環境の安定性の評価については、地殻変動、火成活動等の現象のみならず、これらに伴う地下水の流動特性・地化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等の変動の程度を把握するための長期予測・影響評価モデルの開発が必要となる。これらについては、地層処分システムの設計・施工や安全評価と密接に関係することから、地質環境の長期安定性に関する研究も処分技術や安全評価等に係わる研究開発との一層の連携が求められている。

なお、地層処分技術のみならず科学技術に対する信頼性は、現時点での技

術レベルや現象の理解度とは無関係ではない。地層処分の技術的信頼性の更なる向上を目指すためには、最新の学術的知見や最先端の技術の導入により、深部地質環境に対する理解をより一層深めていくことが重要となる。そのためには、それぞれの現象のプロセスに係る最新の学術的知見やそのベースとなる工学技術（例えば、物理探査技術、年代測定法等）等に関する情報（研究情報基盤）の整備を図ることが重要である。

引用文献

- AECL :"Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, AECL-10711, COG-93-1, AECL, Canada (1994).
- 浅森浩一, 石丸恒存, 他 :"日本列島における火山周辺の酸性地下水分布", サイクル機構 技報, 15, pp.103-111 (2002).
- 浅森浩一, 梅田浩司, 他 :"温泉地化学データベースの作成", サイクル機構 技術資料, JNC TN7450 2002-003 (2003).
- 栗田泰夫 :"東北日本弧中部内帯の短縮変動と太平洋プレートの運動", 月刊 地球, 10, pp.586-591 (1988).
- Awata, Y. and Kakimi, T. :"Quaternary Tectonics and Damaging Earthquakes in Northeast Honshu, Japan", Earthq. Predict. Res., 3, pp.231-251 (1985).
- Bourne, S.J., P. C. England et al. :"The motion of crustal block driven by flow of the lower lithosphere and implications for slip rates of continental strike-slip faults", Nature, 391, pp.655-659 (1998).
- 土木学会原子力土木委員会地下環境部会 :"概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方", 土木学会, 102p. (2001).
- Geological Survey of Japan and Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (CCOP) :"Heat flow map of East and Southeast Asia", 1:5,000,000 Miscellaneous Map Series 36, Geological Survey of Japan (1997).
- 地質調査所 :"100万分の1日本地質図第3版 CD-ROM版", 数値地質図 G-1 (1995).
- 第四紀地殻変動研究グループ :"第四紀地殻変動図", 国立防災科学技術センター (1969).
- 第四紀火山カタログ委員会 :"日本の第四紀火山カタログ (CD-ROM ver.1.0)", 日本火山学会 (1999).
- 藤田和夫 :"日本の山地形成論", 今西錦司博士古稀記念論文集. I, 中央公論社, pp.85-140 (1976).
- 藤田和夫 :"西南日本, とくに近畿トライアングルをめぐるネオテクトニクス", 日本の地質学 100年, 日本地質学会, pp.237-244 (1993).
- 藤田 崇 :"地すべりー山地災害の地質学", 共立出版, 126p. (1990).
- 藤原 治, 増田富士雄, 他 :"過去 10,000 年間の相模トラフ周辺での古地震を記録した内湾堆積物", 第四紀研究, 38, pp.489-501 (1999).

- 藤原 治, 三箇智二, 他 :”日本列島における侵食速度の分布”, サイクル機構 技報, 5, pp.85-93 (1999).
- 藤原 治 :”第四紀構造盆地の沈降量図”, 小池一之・町田 洋編「日本の海成段丘アトラス」, 東京大学出版会, pp.85-96 (2001).
- 藤原 治, 三箇智二, 他 :”日本列島における侵食速度の分布(CD-ROM版)”, サイクル機構 技術資料, JNC TN7410 2001-015 (2001).
- 藤原 治, 柳田 誠, 他 :”日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布”, 月刊地球, 26, 442-447 (2004).
- 藤原 治, 柳田 誠, 他 :”日本列島における地すべり地形の分布・特徴”, 日本地すべり学会誌 (2004), (印刷中).
- 原子力安全委員会 :”高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方について(第1次報告書)”, 72p. (2000).
- 原子力安全委員会 :”高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について”, 21p. (2002).
- 原子力安全委員会原子力バックエンド対策専門部会 :”高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について” (1997).
- 原山 智, 高橋 浩, 他 :”立山地域の地質”, 地域地質研究報告, 地質調査所, 218p. (2000).
- 北海道立地下資源調査所 :”60万分の1 北海道地温勾配図および説明書”, 北海道立地下資源調査所, 44p. (1995).
- IAEA :”Procedures and Data, Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Systems”, Safety Series No.68, IAEA, Vienna, Austria (1985).
- IAEA :”Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high-level radioactive wastes”, Safety Series No.99, IAEA, Vienna, Austria (1989).
- IAEA :”Siting of Geological Disposal Facilities, A Safety Guide, A Publication within the RADWASS Programme”, Safety Series No.111-G-4.1, IAEA, Vienna, Austria (1994).
- Ito, T., Kano, K. et al. :”Tectonic evolution along the northernmost border of the Philippine Sea plate since about 1Ma”, Tectonophysics, 160, pp.305-326 (1989).
- Kaizuka, S. and Imaizumi, T. :”Horizontal strain rates of the Japanese islands estimated from Quaternary fault data”, Geogra. Rep. TOKYO Metro. Univ., 19, pp.43-65 (1984).

- 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊1 わが国の地質環境”, JNC TN1400 99-021 (1999).
- 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成15年度報告－”, サイクル機構 技術資料, JNC TN1400 2004-007 (2004).
- 活断層研究会：“日本の活断層－分布図と資料－”, 東京大学出版会, 363 (1980).
- 活断層研究会：“新編日本の活断層－分布図と資料－”, 東京大学出版会, 437 (1991).
- 活断層マップワーキンググループ：“日本の活断層詳細GISマップからわかること”, 月刊地球, 21, pp.687-693 (1999).
- 小池一之, 町田 洋：“日本の海成段丘アトラス”, 東京大学出版会, pp.97-105 (2001).
- 国土地理院：“数値地図 50m メッシュ(標高), CD-ROM 版 日本I(北海道), 日本II(東日本), 日本III(西日本)”, 国土地理院 (1997, 1999).
- 国立天文台編：“理科年表”, 丸善, 1043p. (1997).
- Labeyrie, L., Cole, J. et al.：“The history of climate dynamics in the Late Quaternary”, Paleoclimate, Global Change and the Future, Springer, pp.33-61 (2002).
- 増田富士雄, 藤原 治, 他：“千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程”, 第四紀研究, 40, pp.223-233 (2001a).
- 増田富士雄, 藤原 治, 他：“房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去6000年間の相対的海水準変動と地震隆起”, 地学雑誌, 110, pp.650-664 (2001b).
- 松林 修, 大久保泰邦, 他：“日本及び隣接地域熱流量・キュリ一点深度図, 日本地質アトラス(第2版), 地質調査所 (1992).
- 松末和之, 藤原 治, 他：“日本列島における最終氷期最寒冷期の気候”, サイクル機構 技報, 6, pp.93-103 (2000).
- 名古屋大学：“GPSデータを用いた地殻変動解析手法に関する研究”, 核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書, JNC TJ7400 2004-010 (2004).
- Nagra：“Project Gewähr 1985; Nuclear Waste Management in Switzerland: Feasibility Studies and Safety Analyses”, Nagra Project Rep., NGB 85-09, Nagra, Baden, Switzerland (1985).

- 中田 高, 今泉俊文 :”活断層詳細デジタルマップ（CD-ROM 版）”, 東京大学出版会, 68p. (2002).
- 野田徹郎, 高橋正明 :”地熱系に関する起源水の地球化学的分類とその意義”, 地球化学, 26, pp.63-82 (1992).
- 野原 壮, 郡谷順英, 他 :”活断層 GIS データベースを用いた地殻の歪速度の推定”, 活断層研究, 19, pp.23-32 (2000).
- NRC :”Technical Bases for Yucca Mountain Standards”, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., USA (1995).
- Ohmori, H. :”Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development”, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, 10, pp.31-85 (1978).
- 大場 司, 梅田浩司 :”八幡平火山群の地質とマグマ組成の時間－空間変化, 岩鉱, 94, pp.187-202 (1999).
- 大久保泰邦 :”日本列島の地温勾配図”, 日本地熱学会誌, 15, pp.1-21 (1993).
- 大口健志, 吉田武義, 他 :”東北本州弧における新生代火山活動域の変遷, 地質学論集, 32, pp.431-455 (1989).
- 大竹政和, 平 朝彦 :”日本海東縁の活断層と地震テクトニクス”, 東京大学出版会, 201p. (2002)
- 鷺谷 威, 井上政明 :”測地測量データで見る中部日本の地殻変動”, 月刊地球, 25, pp.918-928 (2003).
- 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平 :”日本の坑井温度プロファイルデータベース”, 地震第 2 輯, 57, pp.63-67 (2004).
- 佐藤比呂志 :”東北本州弧における後期新生界の変形度について”, 地質学論集, 32, pp.257-268 (1989).
- Shackleton, N. J. :”Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures reassessed”, Nature, 215, pp.15-17 (1967).
- SKB :”RD&D-Programme 92; Supplement, Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste”, Supplement to the 1992 Programme in Response to the Government Decision of December 16, 1993, SKB, Stockholm, Sweden (1994).
- SKI :”The Central Scenario for SITE-94: A Climate Change Scenario”, SKI Rep. 95: 42, SKI, Stockholm, Sweden (1995).
- Smith, W. H. F. and Wessel, P. :”Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, 55, pp.293-305 (1990).

- Sugimura, A. :"Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in Japan and its environs, Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec., 2, 12, pp.133-153 (1960).
- 田中明子, 矢野雄策, 他 :"坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル", 地質調査所月報, 50, pp.457-487 (1999).
- 徳山英一, 本座栄一 :"日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史", 海洋調査技術, 13, pp.27-53 (2001).
- 東京大学 :"逆断層帶の地質構造の三次元的モデル化のための弾性波探査手法に関する研究", 核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書, JNC TJ7400 2004-009 (2004).
- 梅木博之, 清水和彦(2001) "地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発2000年レポートー", 資源と素材, 117, 10, 768-774 (2001).
- USDOE :"10CFR Part960; Nuclear Waste Policy Act of 1982 ; General Guidelines for the Recommendation of Sites for the Nuclear Waste Repositories", U.S.Department of Energy, USA (1982).
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. :"New version of the Generic Mapping Tools released, Eos Trans., AGU, 76(33), p.329 (1995).
- 山野 誠, 木下正高, 他 :"日本列島周辺海域の地殻熱流量分布, 地質ニュース, 517, pp.12-19 (1997).
- 矢野雄策, 村岡洋文 :"坑井データベースシステム", 地質調査所報告, 265, pp.169-189 (1986).
- 矢野雄策, 大久保泰邦, 他 :"坑井データに基づく日本列島の温度勾配分布図, 物理探査学会学術講演会論文集, 91, pp.153-156 (1994).
- 矢野雄策, 田中明子, 他 :"300 万分の 1 日本列島地温勾配図", 地質調査所 (1999).
- 山口正秋, 須貝俊彦, 他 :"濃尾平野ボーリングコア解析にもとづく完新統の堆積過程", 第四紀研究, 42, pp.335-346 (2003).
- 横瀬久芳, 菊池 航, 他 :"九州南西部矢筈岳火山岩類の K-Ar 年代, 岩鉱, 93, pp.151-161 (1998).
- 米倉伸之 :"第四紀の海面変化とその将来予測", 日本第四紀学会編「百年・千年・万年後の日本の自然と人類」, pp.38-59, 古今書院 (1989).
- 吉川虎雄, 貝塚爽平, 他 :"土佐湾北東岸の海岸段丘と地殻変動", 地理学評論, 37, pp.627-648 (1964).
- 吉山 昭, 柳田 誠 :"河成地形面の比高分布から見た地殻変動", 地学雑誌, 104, pp.809-826 (1995).

Wesnousky, S. G., C. H. Sholz, et al. :"Deformation of an island arc: Rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data", J. Geophys. Res., 87, pp.6829-6852 (1982).

200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ :"200万分の1日本列島活断層図", 活断層研究, 19 (2000a).

200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ :"「200万分の1日本列島活断層図」－過去数十万年間の断層活動の特徴－", 活断層研究, 19, pp.3-12 (2000b).