



地殻変動の累積量推定モデルの開発

(受託研究)

Development of a Model for Evaluating Mechanical Effects of Crustal Movements
on the Disposal System in Japan
(Contract Research)

長澤 寛和 武田 聖司 木村 英雄

Hirokazu NAGASAWA, Seiji TAKEDA and Hideo KIMURA

安全研究センター

サイクル施設等安全研究ユニット

Fuel Cycle Safety Research Unit

Nuclear Safety Research Center

August 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

地殻変動の累積量推定モデルの開発
(受託研究)

日本原子力研究開発機構安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット
長澤 寛和*・武田 聖司・木村 英雄

(2010年4月30日受理)

地層処分の安全評価において、地震・断層活動や火山・マグマ活動等の地質関連事象による処分システムへの力学的影響（地殻変動）を評価するためのモデルが必要である。本研究では、地震等に伴う瞬間的な動き（一時的な動き）とそれ以外の日常的な動き（通常の動き）を積算することにより地殻変動を定量化するモデル（地殻変動の累積量推定モデル）の予察的検討を行った。

地殻変動の累積量推定モデルは、わが国の地殻変動の水平方向成分の速度を対象とした。本モデルにおいて、通常の動きは国土地理院の GEONET(GPS Earth Observation Network System；GPS 連続観測システム)公開データを統計学的方法により定量化し、一時的な動きについては、地震と火山噴火の双方の3次元的な変形を統一的に扱うことができる理論計算式である Okada Model を用いた数値モデルを適用した。

本報告では、通常の動きの導出方法、地殻変動の累積量推定モデルの定式化、ならびに地殻変動の累積量推定モデルを東北地方に試験的に適用した結果を示す。導出した通常の動きは、経度方向速度の大きさによって分類できること、および同一の経度方向速度の領域はプレート境界に沿った形状をもつことが明らかとなった。また、東北地方の経度方向速度の空間分布は、一時的な動きの影響の占める割合が小さく、通常の動きの傾向とほぼ一致する結果が得られた。

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院の委託研究、および原子力安全基盤機構の委託研究の一環として実施した研究成果の一部である

原子力科学研究所（駐在）〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※特定課題推進員（株式会社間組）

Development of a Model for Evaluating Mechanical Effects of Crustal Movements
on the Disposal System in Japan
(Contract Research)

Hirokazu NAGASAWA[※], Seiji TAKEDA and Hideo KIMURA

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 30, 2010)

In the safety assessment of geological disposal for high level radioactive wastes, it is important to develop the modelling for evaluating mechanical effects of crustal movements on the disposal system in Japan. In this study, the model on crustal movements is represented by accumulating two components of velocity magnitude of the crust to horizontal direction, caused by transient movements associated with fault and/or volcanic activities and ordinary movements with the other continuous factors.

We have quantified the ordinary movements with the statistical analysis of data included in the GEONET (GPS Earth Observation Network System) of GSI (Geographical Survey Institute). Okada Model is applied for evaluating the transient movements, which can handle three-dimensional movements of earthquake and volcanic activities theologically and comprehensively.

In this report, we provide the specification of the model on crustal movement and analyze the horizontal velocity in Tohoku region using the model. The result indicates that the ordinary movements are classified with magnitude of the longitudinal velocities. The cluster of longitudinal velocities has been distributed along the plate boundary. Because the velocities of the ordinary movements are greater than one of transient movements, the spatial distribution of longitudinal velocities in Tohoku region is similar to that of the ordinary movements.

Keywords: Geological Disposal, Crustal Movements, Ordinary Movements, GPS, Fault Activities, Volcanic Activities, Horizontal Velocities

This work was performed by Japan Atomic Energy Agency(JAEA) under contract with Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) in Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), and Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES).

※ Special Topic Engineer (Hazama Corporation)

目次

1. 序論.....	1
2. 現在の動きに関する調査方法.....	1
2.1. 調査概要.....	1
2.2. 使用データ.....	2
2.3. 水平速度の算出方法.....	3
2.4. 一時的な動きの分析方法.....	3
2.5. 通常の動きの分析方法.....	4
3. 現在の動きに関する調査結果.....	6
3.1. 一時的な動きの分析結果.....	6
3.2. 通常の動きの分析結果.....	11
4. 地殻変動の累積量推定モデル.....	21
5. 地殻変動の累積量推定モデルの適用例ー東北地方の場合ー.....	24
6. まとめ.....	32
謝辞.....	32
参考文献.....	33
付録.....	35
資料ー1 活火山の活動間隔の設定.....	35
資料ー2 活動セグメントの幅の算定式.....	40
資料ー3 地震の影響範囲に関する検討.....	43

Contents

1. Introduction	1
2. Methods	1
2.1. Methods overview	1
2.2. Detailed Data	2
2.3. Methods of estimation of horizontal velocities of the Present Movements	3
2.4. Methods of Analysis of the Transient Movements	3
2.5. Methods of Analysis of the Ordinary Movements.....	4
3. Results	6
3.1. Analysis of the Transient Movements.....	6
3.2. Analysis of the Ordinary Movements.....	11
4. Discussion of the Model for the Present Movements	21
5. Example application of the Model for the Present Movements - Tohoku district -	24
6. Summary.....	32
Acknowledgment.....	32
References	33
Appendix	35
Appendix—1 Average activity intervals of the mechanical impact of eruptions	35
Appendix—2 Wide length of Segments of active fault	40
Appendix—3 Study of the Mechanical Impact Area of Earthquakes.....	43

1. 序論

地震・断層活動や火山・マグマ活動等の地質関連事象による処分システムへの力学的影響は、一般に総括して「地殻変動」と呼ばれ、地層処分の安全評価において考慮されなければならない検討項目の1つであり、その影響を定量化するためのモデル開発が求められる。

地層処分のサイトにおける地殻変動の長期的な変化の予測については、斉一説に基づいて現在の変動と過去の変動とを結びつけた外挿法の考え方が旧核燃料サイクル開発機構の第2次取りまとめ⁽¹⁾に示されており、今後の処分サイトに対する安全審査時の地層処分の安全評価においては、その処分サイトの地質環境全般の情報を基にした同様の外挿法による評価が基本になると考えられる。

地殻変動のモデル化にあたり、外挿法の適用の基準となる現在の変動特性の理解が大切である。地殻変動は、地震や火山の噴火等の地質関連事象に伴う一瞬の変動（以下、一時的な動きと称す）と、それ以外の大半の時間の日常的な変動（以下、通常の動きと称す）との積算によって求めることができると考えられる。そのため、現在のわが国における地殻変動を通常の動きと一時的な動きの両者の成分を分離しそれぞれの力学的影響を把握することが、地層処分の安全評価における地殻変動のモデル開発のためには重要であると考えた。

こうした背景から、地層処分の安全評価における地殻変動の定量化のためのモデル開発を目指し、通常の動きと一時的な動きの双方の動きを定量化するとともに、通常の動きと一時的な動きを積算し地殻変動を定量化するモデル（以下、地殻変動の累積量推定モデルと称す）の予察的検討を行った。地殻変動の累積量推定モデルは、地殻変動の水平方向成分の速度を扱い、通常の動きについては国土地理院の GEONET(GPS Earth Observation Network System ; GPS 連続観測システム)⁽²⁾公開データを統計学的方法により定量化し、一時的な動きについては、地震や噴火に伴う地殻変動の観測結果との整合性が確認されている Okada Model(Okada, 1992)⁽³⁾を用いた数値モデルを適用した。地殻変動の累積量推定モデルでは、通常の動きを数年間の観測データにより設定したことから、地質学的手法による地殻変動と区別するために、一時的な動きと通常の動きを累積した地殻変動を、以下、「現在の動き」と称する。

本報告では、通常の動きの内容、地殻変動の累積量推定モデルの定式化、ならびに地殻変動の累積量推定モデルを東北地方に試験的に適用した結果について示す。

2. 現在の動きに関する調査方法

国土地理院が公開する GPS (Global Positioning System ; 全地球測位システム) データと地震や火山の噴火の履歴を分析し、現在の動きの列島規模や局所的な運動特性を把握するための調査方法を以下に示す。

2.1. 調査概要

現在の動きは、地殻変動の運動成分のうち水平方向成分を対象とし、水平速度で表す。水平速度を用いた理由は、列島の同時観測が可能な国土地理院の GPS データから比較的容易に求められること、およびプレートの運動の方向成分と一致することによる。現在の動きの分析は、ネオテクトニクスにおいて経験的に用いられているように、通常の動きと一時的な動きの2つに区分し行う。

一時的な動きの分析では、一時的な動きを「速度の日変化（速度増分）が日常的な変化傾向から逸脱しその要因が地震や噴火と関連づけることが可能な動き」として、その対象期間の抽出を行う。通常の動きの対象期間は、現在の動きの対象期間から一時的な動きの対象期間を除いた期間となる。

抽出された一時的な動きを対象として、地震等に伴う水平速度の経時変化および水平速度の影響範囲について分析を行い、時間の経過とともに通常の動きの傾向に戻ることに、および影響範囲が限定されることを確認する。

通常の動きの分析では、列島規模の運動特性を明らかにするために水平速度の分類分析を行うとともに、分類結果の時間的な共通性や空間分布の特性について分析を行う。また、いくつかの領域において水平速度の空間分布について分析を行い、局所的な空間分布の特徴を整理する。

2.2. 使用データ

(1) 電子基準点データ

国土地理院の GEONET は、水平方向の位置の変化を求めることに適した GPS を応用し、1200 箇所に設置された電子基準点と GPS 中央局からなる、測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的とした観測システムである (国土地理院, 2008⁽²⁾)。電子基準点データのうち「日々の座標値」⁽⁴⁾は、電子基準点の日々の観測データを基線解析した結果の値であり、観測誤差がさらに小さい。こうした背景から、地殻変動評価手法では、国土地理院の GEONET の電子基準点の「日々の座標値」を使用する。電子基準点データから速度データを求める期間は、1997 年 1 月 1 日～2004 年 10 月 8 日 (2,838 日間) とする。なお、速度は、365 日前の位置との差から算出するために、1998 年 1 月 1 日～2004 年 10 月 8 日 (2,473 日間) となる (2.3 項参照)。電子基準点データに含まれる保守作業の前後の食い違い等の異常値は、電子基準点の保守作業リスト⁽⁵⁾を用いて除外する。

(2) 一時的な動きを分析するための地震活動や噴火活動データ

(a) 地震・断層活動データ

地震・断層活動に関する情報は、防災科学技術研究所が公開している F-net (Full Range Seismograph Network of Japan; 広帯域地震観測網) システム⁽⁶⁾による 1997 年 1 月 1 日～2004 年 10 月 8 日に発生した地震 (Mj5 以上) とする。対象とした期間は、電子基準点データの期間と一致させた。

(b) 火山・マグマ活動データ

火山・マグマ活動データは、気象庁の地震・火山月報および年報⁽⁷⁾、火山の位置は、気象庁の火山の資料⁽⁸⁾と産業技術総合研究所の日本の第四紀火山⁽⁹⁾のデータにより設定した。わが国の火山の活動状況を示す指標としては、レベル 0 から 5 の数値で表される活動度レベルが用いられているが、レベルの定義は相対的なものである。そのため、噴火規模は、噴煙の高さから客観的に活動レベルが推定可能な VEI (Volcanic Explosivity Index; 火山爆発指数)⁽¹⁰⁾を用いた。火山・マグマ活動データは、1997 年 1 月 1 日～2004 年 10 月 8 日に噴火した火山全てを対象とした。なお、噴火した火山とは、気象庁の月報において噴火と記載された火山と定義し、前兆現象は対象から除外した。対象期間中に噴火した火山は、秋田焼山、浅間山、硫黄島、伊豆鳥島、有珠山、桜島、薩摩硫黄島、諏訪之瀬島、北海道駒ヶ岳、三宅島、および雌阿寒岳の計 11 火山であり、主として噴煙の高さから判定した VEI の範囲は 1～3 である。

(3) 地図データ

空間分析で使用する日本地図は、国土地理院承認平 13 総複第 367 号 白地図 MapMap ver6.0 により作成した地図を使用する。

2.3. 水平速度の算出方法

電子基準点データは、日々の大気の状態の変化やつくばを固定局とすることに伴う GPS の観測誤差、および季節トレンドを含む。そのため、水平速度の算出にあたっては、季節トレンドの影響を除外するために、任意時刻とその 365 日前の位置の差を用いて算出する。また、任意時刻の観測点の位置は、日々の大気の状態の変化等に伴う観測誤差を平滑化して速度の安定性を確保するために、30 日間の移動平均値を用いて算出する。電子基準点 i の時刻 t の経度・緯度方向の位置と水平速度は、下式で求められる。

$$\vec{U}_{it} = (\sum_{k=1, n_i} \vec{u}_{t+1-k}) / n_i \quad (1)$$

$$\vec{V}_{it} = (\vec{U}_{it} - \vec{U}_{i(t-365)}) / 365 \quad (2)$$

ここに、

\vec{U}_{it} : 電子基準点 i の時刻 t (day)の水平速度算出用の経度・緯度方向の位置ベクトル (deg)

\vec{u}_{t+1-k} : 電子基準点 i の時刻 $t+1-k$ (day)の経度・緯度方向の位置ベクトル (deg)

n_i : 電子基準点 i の時刻 $t-29 \sim t$ 間の位置ベクトルの有効データ数

注) $n < 25$ の場合、速度ベクトルを無効とする。

\vec{V}_{it} : 電子基準点 i の時刻 t の経度・緯度方向の水平速度ベクトル (deg/day). 速度を方向成分別に示す場合には、ドイツ語の *geographische Breite* (緯度) の B 、および *geographische Länge* (経度) の L を用いて、緯度方向速度を VB 、経度方向速度を VL と表記する。

式(2)が示すように水平速度は、誤差を緩和するために測地学的手法で一般に用いられる固定点に対する相対速度ではなく、絶対的な速度である。絶対的な速度を用いる理由は、相対速度を用いてトータル速度誤差を少なくすることより、多少の誤差は生じても日本列島の絶対的な運動を把握することの方が重要であると考えたためである。

2.4. 一時的な動きの分析方法

地震や噴火等に伴う一時的な動きは、水平速度の変化量として捉えた場合には、水平速度の算定式(2)の特性から、図 2.4-1 のように 365 日間以上の幅を持つ突起形状で示される。スロースリップイベントを含む地震による余効活動が活発な場合には、さらに突起形状の幅が長くなり初期速度に戻る時間を要することも想定される。また、プレート境界型地震においては、プレート境界のアスペリティの回復に時間を要することから残留速度が徐々に低下することも想定される。ただし、一時的な動きは、通常の動きに対する安定性に影響をあたえないと考え、図 2.4-1 に示す残留速度は生じないと仮定する。

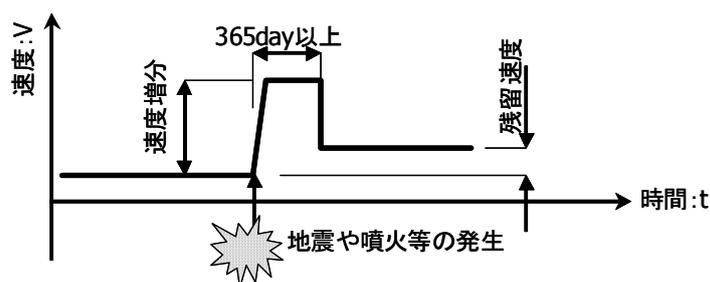


図 2.4-1 一時的な動きが生じた場合の水平速度の経時変化図：図中では残留速度を強調して表現しているが時間経過とともに残留速度は 0 に収束すると仮定する。

一時的な動きの抽出と分析は、以下の手順で実施した。

- ① 特定の時刻において速度増分（図 2.4-1 参照）の絶対値が $1\text{E-}09$ (deg/day) 程度を上回る電子基準点を抽出する。速度増分の絶対値の判定基準として用いた $1\text{E-}09(\text{deg/day})$ は、ランダムサンプリングによる 20 日分の速度の分析結果において、地震・断層活動や火山・マグマ活動と関連づけることができた電子基準点の速度増分の値である（長澤ほか, 2004⁽¹¹⁾）。
- ② 抽出した電子基準点において、条件 A：経時変化図の突起形状が存在すること、条件 B：関連事象（地震・断層活動や火山・マグマ活動）が存在すること、の 2 つの条件を満たす場合に、一時的な動きであると判定し、関連する事象とその影響期間を整理する。
- ③ 整理した事象の規模と同程度の事象を抽出し、その近傍の電子基準点が手順②の条件 A を満たす場合に、一時的な動きとして、関連する事象とその影響期間を追加する。
- ④ 手順②および手順③の結果を踏まえて、一時的な動きの事象と影響期間を集計する。
- ⑤ 事象別に水平速度の変化量の経時変化を分析する。
- ⑥ 事象の発生位置からの距離と水平速度の変化量との相関を分析する。

2.5. 通常の動きの分析方法

通常の動きは、一時的な動きの対象期間を除いた期間の水平速度の集合によって示される。1 つの水平速度データは、経度と緯度方向の 2 成分の速度のほか、電子基準点の位置、および時刻の情報をもつ。通常の動きの分析では、時刻を固定して水平速度の分類を行い、分類結果を時刻間で対比して分類の共通性を確認するとともに、水平速度の分類の空間的な特徴を分析する。

分析手順は、以下の通りである。なお、時刻データは、離散的なデータであり連続的ではないことから、以下では、ケースと称することとする。

① 水平速度のケース（時刻）別のクラスター分析

通常の動きを示すケース別に、水平速度の集合を 5 つのクラスター（水平速度群）に分類する。分類分析手法は、クラスター分析（k-means 法）を用い、分析の対象とする変数は、緯度方向速度、および経度方向速度の 2 変数とする。K-means 法は、分類数 K 個に係る仮説がある場合に最適なクラスターを得ることに適した方法である。分類数 K は、20 ケース（時刻）をランダムサンプリングし、 K を 3~7 で変化させてクラスター分析を行い、ケース間において共通性をもつ分類数の最大値 $K=5$ とする（長澤ほか, 2004⁽¹¹⁾）。分類分析により、水平速度の集合の 1 つの要素には、クラスターの No. が情報量として追加される。5 つのクラスターの名称は、分類の順にしたがいクラスター i ($i=1\sim 5$) とした。分析には、市販のコード：STATISTICA を用いた。

- ② クラスターの固定割合（各クラスターに属する割合）の算出
電子基準点別にクラスターの固定割合を算出する．例えば、任意の電子基準点 A について、 M ケースのうち N ケースがクラスター i に属する場合、電子基準点 A のクラスター i の固定割合は $N/M \times 100(\%)$ となる．
- ③ 時間的に共通性をもつ水平速度の分類形態の抽出
クラスター1～5 のいずれかのクラスター割合が、70%以上の電子基準点を抽出して、電子基準点を最大のクラスターの固定割合を示すクラスター i に分類し整理する．
- ④ クラスター別の水平速度の統計量の分析
クラスター i ($i=1\sim5$) の水平速度の標準統計量を求める．
- ⑤ クラスターの空間分布の分析
手順③の結果から全クラスター（以下、クラスターと称す）の空間分布図を作成し、クラスターの配列とプレート境界（海溝およびトラフ）等の大地形の形状との比較分析を行う．
- ⑥ クラスター間の水平速度の空間分布に関する分析
空間的に隣接するクラスター間の水平速度の空間分布について分析し、④の結果と対比して水平速度の空間分布の特徴を整理する．

3. 現在の動きに関する調査結果

第3章では、水平速度の算出結果に基づいた一時的な動きと通常の動きの分析結果を示す。

3.1. 一時的な動きの分析結果

(1) 一時的な動きの対象期間の抽出

速度の変化量の絶対値が $1E-09$ (deg/day) 程度を上回った電子基準点を合計 155 抽出した。抽出した電子基準点のうち、速度の経時変化が突起形状 (図 2.4-1) をもち、速度の変化が生じた時刻が地震・断層活動、および火山・マグマ活動と関連づけられるケースについて、事象とその影響期間を整理した (表 3.1-1 参照)。該当する事象は、火山・マグマ活動 3 事象、地震・断層活動 7 事象、計 10 事象である。このうち、伊豆半島中央部地震等 (伊豆半島中央部地震 1997/3/3 Mj5.2 ; 伊豆半島沖地震 1998/5/3 Mj5.4) は、一時的な動きを示す電子基準点が小室山、伊東八幡野の 2 点であることから影響範囲が小さいと考え、一時的な動きの対象から除外した。硫黄島噴火等についても、伊豆半島中央部地震等と同様の理由から除外した。また、石垣島北西沖地震等 (2001/12/28 Mj5.6) は、経時変化図の突起の形状が明確ではないことから別の理由による増分であると判断し一時的な動きの対象から除外した。紀伊半島沖地震は、地震の発生時刻が対象期間の終了時点であるため経時変化図の突起の形状が確認できないが、地震の規模が大きいことから一時的な動きに含めた。

表 3.1-1 水平速度の変化量の絶対値が $1E-09$ deg/day 以上となった要因として考えられる事象

No.	地質関連事象		規模	水平速度の変化の継続期間	
	区分名	地質関連事象名		開始	終了
1	地震・断層活動	伊豆半島中央部地震等 ^{*1}	Mj5.4	-	-
②	火山・マグマ活動	有珠山噴火	VEI=2 ^{*5} (h=3,500m)	2000/3/31	2001/5/22
③	火山・マグマ活動	三宅島噴火	VEI=3 ^{*5} (h=14,000m)	2000/6/30 ^{*3}	2001/11/4
④	地震・断層活動	鳥取県西部地震	Mj7.1	2000/10/6	2001/11/27
⑤	地震・断層活動	安芸灘地震	Mj6.4	2001/3/24	2002/5/5
6	火山・マグマ活動	硫黄島噴火等 ^{*3}	VEI=2 ^{*5,6} (h=200m)	(2001/9/21) ^{*4}	(2001/10/20)
⑦	地震・断層活動	宮城県北部地震	Mj6.2	2003/7/26	2004/9/17
⑧	地震・断層活動	十勝沖地震	Mj7.8	2003/9/26	2004/10/8
⑨	地震・断層活動	紀伊半島沖地震	Mj7.4	2004/9/5	2004/10/8
10	地震・断層活動	石垣島北西沖地震等 ^{*2}	Mj5.6	-	-

○: 最終的に抽出した事象

*1: 影響期間の増加に対して影響のある電子基準点が少ないため当面考慮しない。

*2: 水平速度の経時変化図の形状から除外。

*3: 噴火は2000年7月8日であるが水平速度の変化の開始時期を採用。

*4: 硫黄島噴火の時期を示す。

*5: VEIは火山爆発指数 (Volcanic Explosivity Index)、噴煙の高さhで判定した。

*6: 硫黄島噴火等は、海底噴火であるため実質的なVEIは3の可能性もある。

次に、表 3.1-1 に示す事象と同規模であり、かつ電子基準の水平速度の絶対値が 0.5 deg/day 以上変化した事象を抽出した結果、鹿児島県北西部地震 (1997/3/26 Mj6.5)、金華山地震 (2002/11/3 Mj6.2)、東海沖地震 (2003/7/3 Mj5.0) の計 3 事象が抽出された。しかし、これらの事象は、事象の近傍の電子基準点の経時変化図の突起形状が明瞭ではないため、一時的な動きの対象から除外した。

以上の結果から、一時的な動きとして最終的に抽出した事象は、表 3.1-1 において No.を○で囲った火山・マグマ活動 2 事象、地震・断層活動 5 事象、計 7 事象である。

抽出した 7 事象の水平速度の変化の重複する期間を整理し一時的な動きの対象期間とし、それ以

外の期間を通常の動きの対象期間とした（表 3.1-2 参照）。また、現在の動きの分類プロセスの流れを図 3.1-1 に示す。

表 3.1-2 現在の動きの分類（一時的な動きと通常の動きの対象期間）

動きの区分		開始	終了	ケース数(日数)
現在の動き		1998/1/1	2004/10/8	2,473
一時的な動き	区間1	2000/3/31	2002/5/5	766
	区間2	2003/7/26	2004/10/8	441
	計	—	—	1,207
通常の動き		—	—	1,266

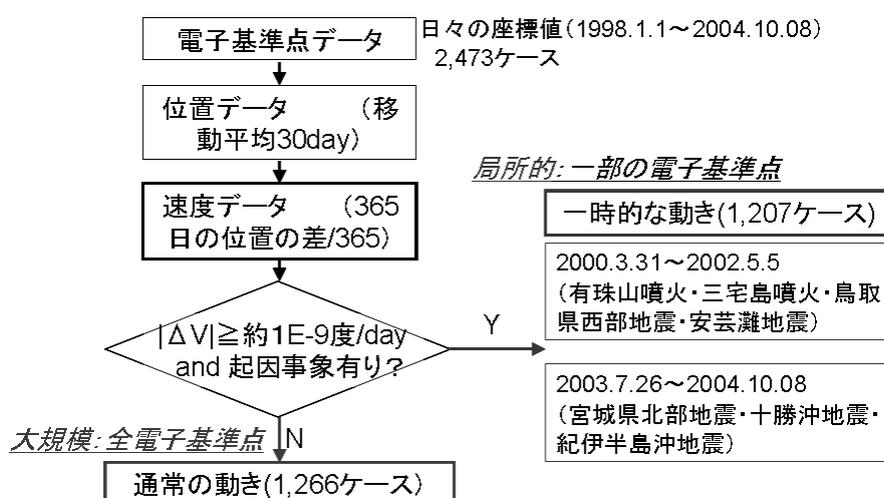


図 3.1-1 現在の動きの分類の流れ：現在の動きとして電子基準点日々の座標値データ（1998 年 1 月 1 日～2004 年 10 月 8 日）計 2473 ケースを、地震・断層活動や火山・マグマ活動による速度の経時変化が生じたことが確認できる局所的な領域が対象となる一時的な動き 1207 ケースと全電子基準点を含む大規模な領域が対象となる通常の動き 1266 ケースに分類した過程を示す。

(2) 一時的な動きの経時変化および影響範囲の分析

一時的な動きは、地震や噴火が生ずるたびに電子基準点データや余震分布との関連性のある断層モデルが事象別に公開されている（例えば、地震調査研究推進本部, 2008⁽¹²⁾）。しかしながら、観測された事象全てを対象として、事象の発生に伴う力学的な影響（変位等）の経時的変化、および影響範囲の特徴が整理された事例は見られない。以下に、一時的な動きで抽出された 7 事象について、水平速度の変化と影響範囲について分析した結果を示す。

7 事象の水平速度の経時変化図を図 3.1-2～3.1-3 に示す。7 事象はいずれも事象の発生に伴う速度の変化を示す突起形状（図 2.4-1 参照）が明確である。7 事象の経時変化図は、余効活動等の影響により、突起の幅が 365 日を上回り、また突起の形状は平らではなく傾きを示している。突起部の面積は、事象による最終的な力学的な変位を意味することから、図 2.4-1 に示す理想的な突起部の形状との差で余効活動等の影響が求められる。

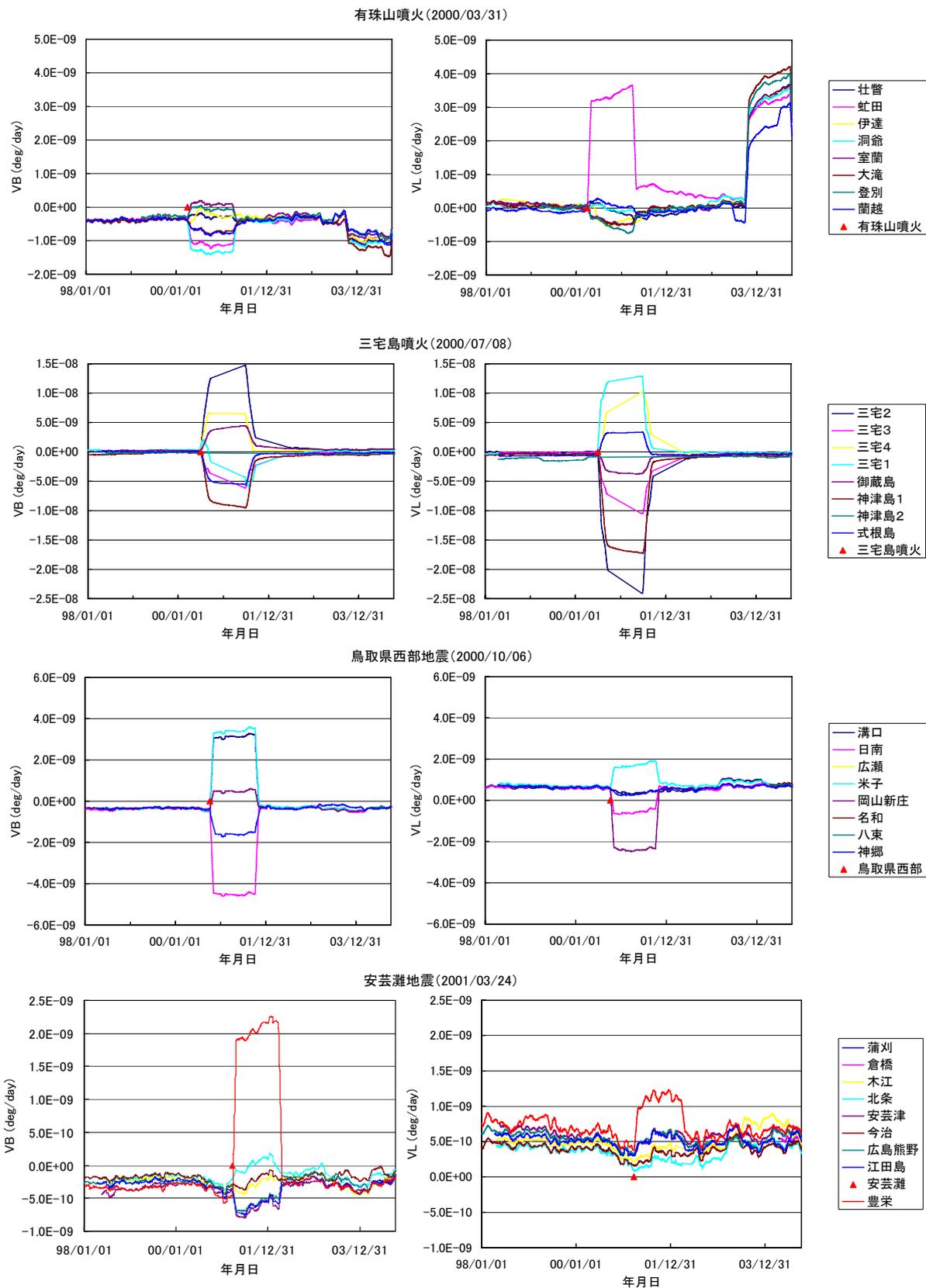


図 3.1-2 一時的な動きとして抽出された事象の経時変化図 (その 1) : VB は緯度方向速度, VL は経度方向速度を示す.

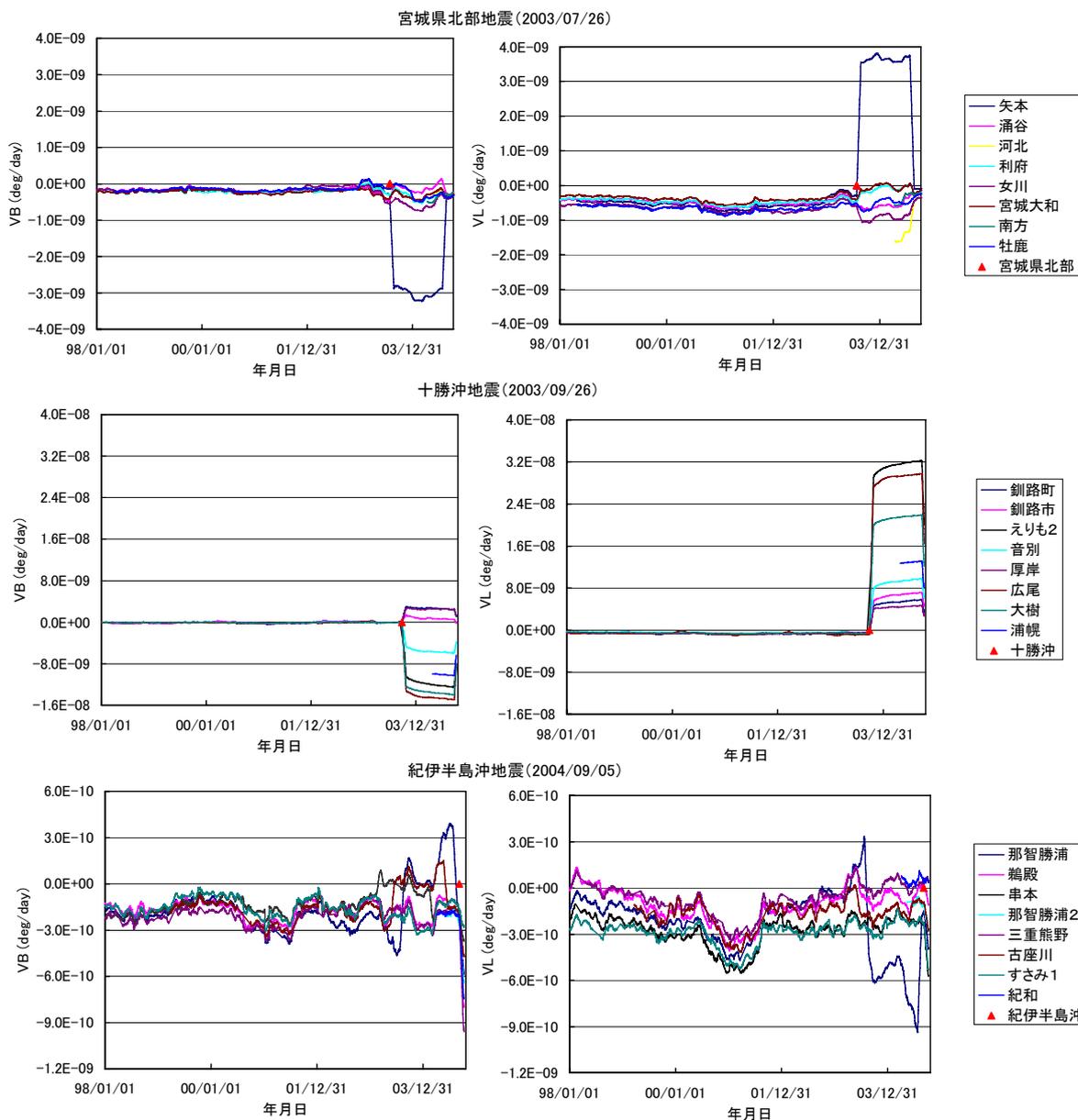


図 3.1-3 一時的な動きとして抽出された事象の水平速度の経時変化図 (その 2) : VB は緯度方向速度, VL は経度方向速度を示す。

2003 年十勝沖地震および紀伊半島南東沖地震は、データの対象期間の問題から事象発生前の速度への復帰が確認できないが、そのほかの事象は事象発生前の速度に復帰している。また、2004 年十勝沖地震についてはもとの速度への復帰の傾向が経時変化に見られる。

7 事象の影響範囲を明らかにするために、事象発生前後の速度の変化量と事象発生位置からの距離の関係を整理した結果を図 3.1-4 に示す。図 3.1-4 は地震発生前後の時刻間での水平速度の変化を整理した結果である。図 3.1-4 で用いた事象発生位置からの距離は、ヒュベニの式で算出した。7 つの事象が示す影響範囲は、2 つのパターンに分かれる。パターンの 1 つは、噴火や内陸地震が示す約 100km の範囲である。残る 1 つは、プレート境界型地震 (2003 年十勝沖地震) や沈み込むプレート内部地震 (紀伊半島南東沖地震) が示す約 400km の範囲である。紀伊半島南東沖地震は、大陸プレートに沈みこむフィリピン海プレートの内部の地震であるが比較的浅かつ南海トラフ付近で生じた逆断層の活動によるもので、プレート境界型地震と同様の力学的影響をもたらすものと考え

られ、ここではプレート境界型地震とみなす。今回使用したデータの範囲では、2つの影響範囲の中間的な範囲を示す事象は見られない。

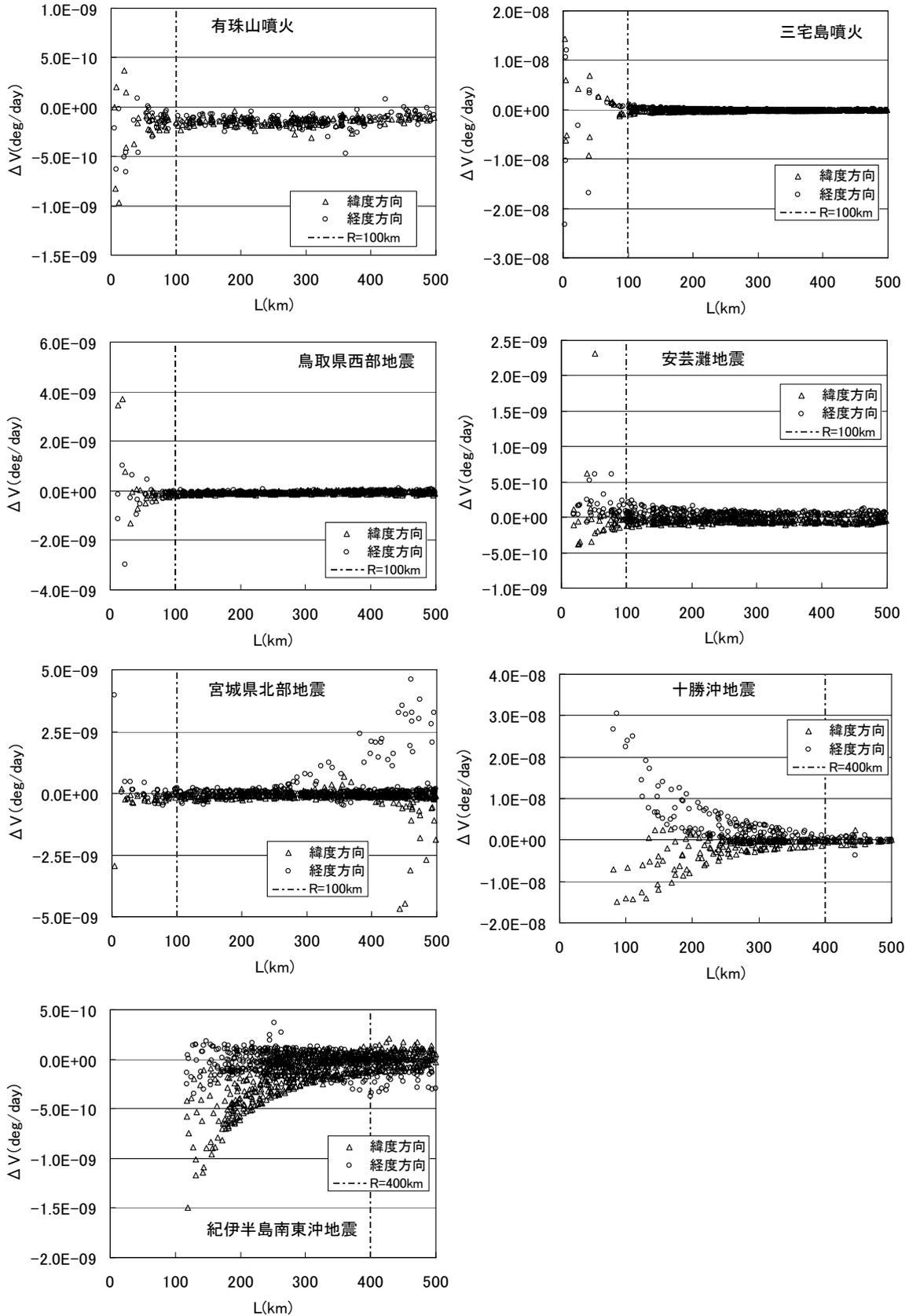


図 3.1-4 地殻変動の発生位置からの距離(L)と速度増分(ΔV)の関係

一時的な動きの経時変化および影響範囲の分析によって、(1)一時的な動きが通常の動きを変えるには至らないこと、(2)一時的な動きの影響範囲はみかけ有限でありプレート境界型地震とその他(火山噴火と内陸地震)の2つに大別されること、の2点が明らかとなった。影響範囲の特徴で興味深い点は、異なる噴火形式や噴火の規模(VEI)の有珠山噴火と三宅島噴火の影響範囲がほぼ一致しており、さらに内陸地震の影響範囲ともほぼ一致している点である。

3.2. 通常の動きの分析結果

(1) クラスタ分析の結果

通常の動きは、一時的な動きを取り除いた期間、1266 ケースが対象となる(表 3.1-2 参照)。列島全域の速度の空間分布傾向を把握するために、列島全域の水平速度の集合をクラスタ分析(K-means 法)により5つのクラスタに分類した。分類数5は、現在の動きのケース(2,473 日)からランダムサンプリングで抽出した20 ケースにおいて分類に共通性がみられた分類数の最大値である。電子基準点別の各クラスタに属する割合(以下、クラスタ固定割合と称す)を集計して頻度分布で示すと図 3.2-1 のように示される。頻度はクラスタ固定割合に対する電子基準点数を示す。電子基準点の有効データ数(頻度の合計値)は960 である。クラスタ固定割合の平均値は、85.7%であり高く、クラスタ固定割合が90%以上、80%以上、および70%以上となる電子基準点数は、それぞれ551(57.4%)、691(72.0%)、802(83.3%)である。クラスタ固定割合の分析結果は、K-means 法による通常の動きの分類(5つのクラスタ)が、時刻によらずほぼ同一となることを示している。

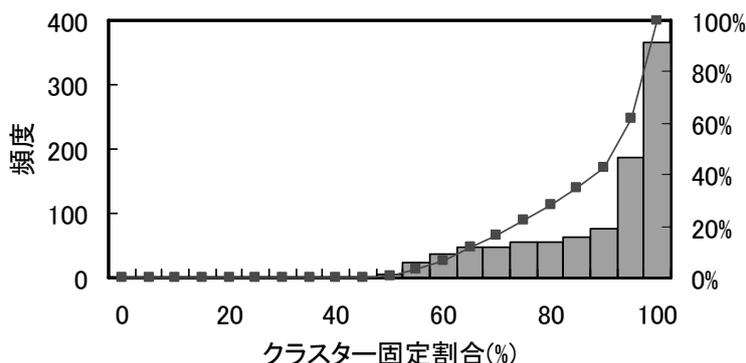


図 3.2-1 列島の水平速度のクラスタ固定割合の頻度分布と累積度数分布:列島の水平速度の集合を5つのクラスタに分類すると、電子基準点が同一のクラスタを示す割合(クラスタ固定割合)が高割合に偏り、列島の水平速度が時刻に対して共通の分類形態を示す傾向を示す。

(2) クラスタ別の水平速度の統計量

通常の動きを示す1266 ケースにおける電子基準点別水平速度の算術平均値を用いてクラスタ別の水平速度の統計量について分析する。電子基準点*i*の水平速度の算術平均値 \vec{V}_{il} は下式で求める。

$$\vec{V}_{ui} = \sum_{l=1}^{m_i} \vec{V}_{il} / m_i \tag{3}$$

ここで、

\vec{V}_{il} : 電子基準点*i*のケース*l*における経度・緯度方向の水平速度(deg/day)。式(2)により求められる。

m_i : 電子基準点 i において通常の動きを示すケース数 (≤ 1266)

\vec{v}_{ui} : 電子基準点 i の通常の動きを示す経度・緯度方向の水平速度の算術平均値 (deg/day)

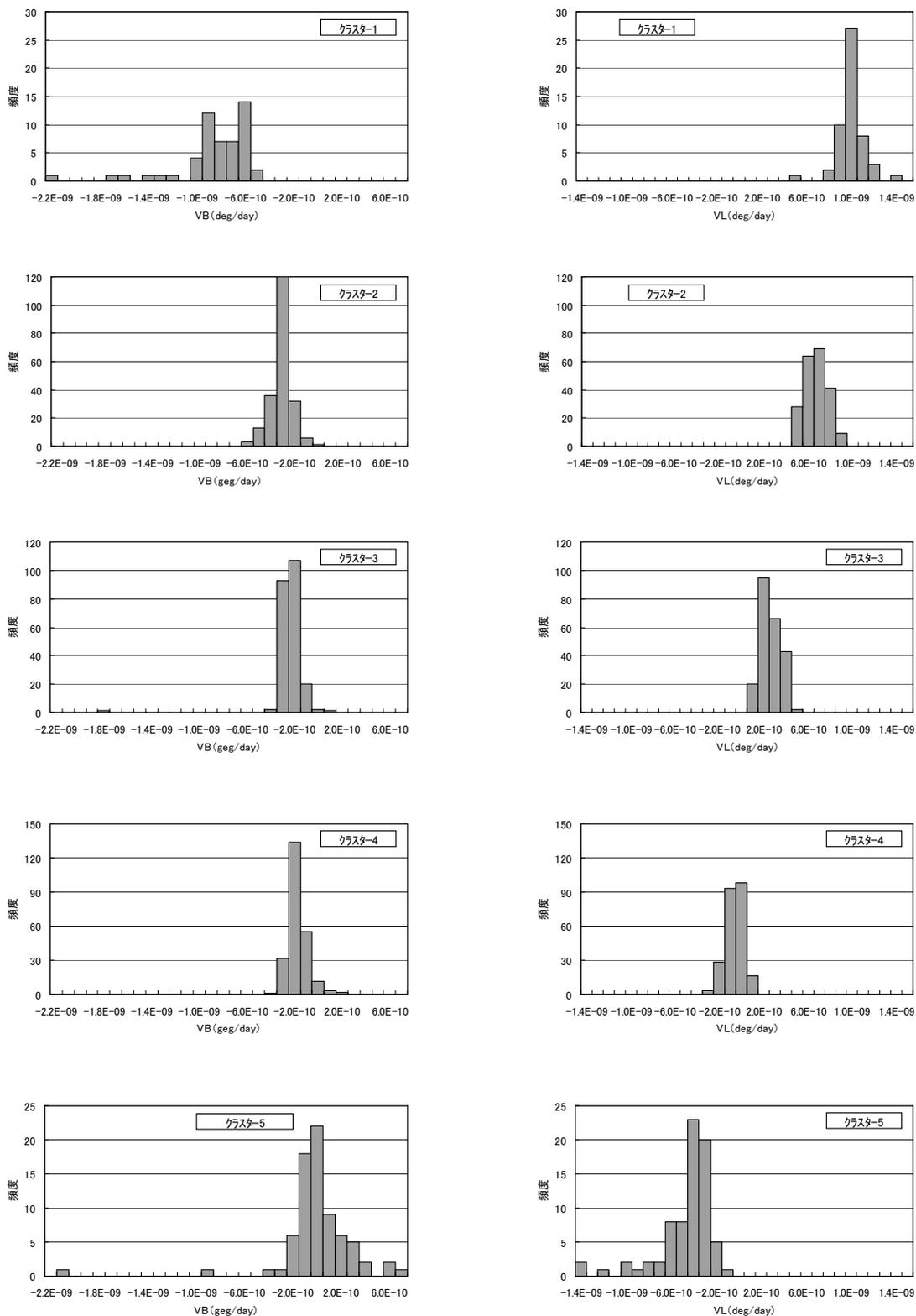


図 3.2-2 クラスター別の水平速度の頻度分布 (VB : 緯度方向速度, VL : 経度方向速度)

5つのクラスター別の水平速度の頻度分布は、図 3.2-2 のように示される。緯度方向速度の頻度分布は左図、経度方向の分布は右図に示されている。横軸は、VB、VL とともに 1 目盛り $1E-10(\text{deg/day})$ である。

水平速度の頻度分布は、緯度方向のクラスター1を除いて、ピークが明瞭であり、ほぼ正規分布に近い形状を示している。水平速度の頻度分布のピークは、クラスターの No.の増大に伴い、緯度方向は右側へ、経度方向は左側に移動している。この結果は、クラスターの No.と水平速度が、緯度方向では正の相関、経度方向では負の相関をもつことを示す。

クラスターと水平速度との関係进行分析するために、クラスター別に水平速度の算術平均値、5%値、25%値、75%値、および 95%値を求め、その結果を図 3.2-3 に示す。

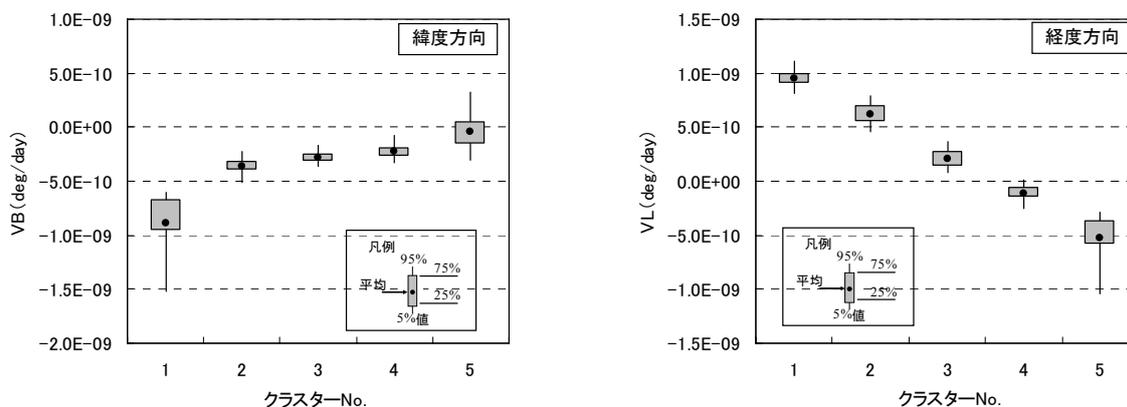


図 3.2-3 クラスター別の水平速度の統計量 (VB：緯度方向速度, VL：経度方向速度)

図 3.2-3 は、クラスターが、緯度方向速度に対し正の相関、経度方向速度に対し負の相関をもつことを示している。さらに、各クラスターの水平速度の算術平均値を用いて相関を求めると、水平速度とクラスターとの相関は、緯度方向速度で $R^2=0.827$ 、経度方向速度で $R^2=0.998$ であり、経度方向のほうが大きい。クラスター1 とクラスター5 との水平速度の残差 (絶対値) は、緯度方向で $0.85E-09(\text{deg/day})$ 、経度方向で $1.48E-09(\text{deg/day})$ であり、経度方向のほうが 2 倍近く大きい。この結果は、K-means 法がクラスター間の違いを最大とする分類を行うものであることから、主に経度方向速度によってクラスターが分類されていると解釈できる。

隣接するクラスター間の 5%値と 95%値を比較すると、緯度方向速度の場合、隣接するクラスター間で重複しているが、経度方向速度の場合、隣接するクラスター間で重複する範囲がなくクラスターが明確に区別されている。

経度方向速度がクラスターとの 1 次相関が極めて高いこと、および隣接するクラスター間の分布の重複が少ないことは、クラスターが No.の順に空間的な配列が見られる場合に、クラスター間やクラスター内部において連続的に経度方向速度が変化することを示唆する。

(3) クラスターの空間分析の結果

70%以上のクラスター固定割合をもつ電子基準点を対象として空間分布図を作成すると図 3.2-4 のようになる。図 3.2-4 には、クラスターの空間分布 (以下ではクラスターの形状と称す) とプレート境界の形状および方向性との比較を行うため、千島海溝、日本海溝、および南海トラフの形状が示されている。

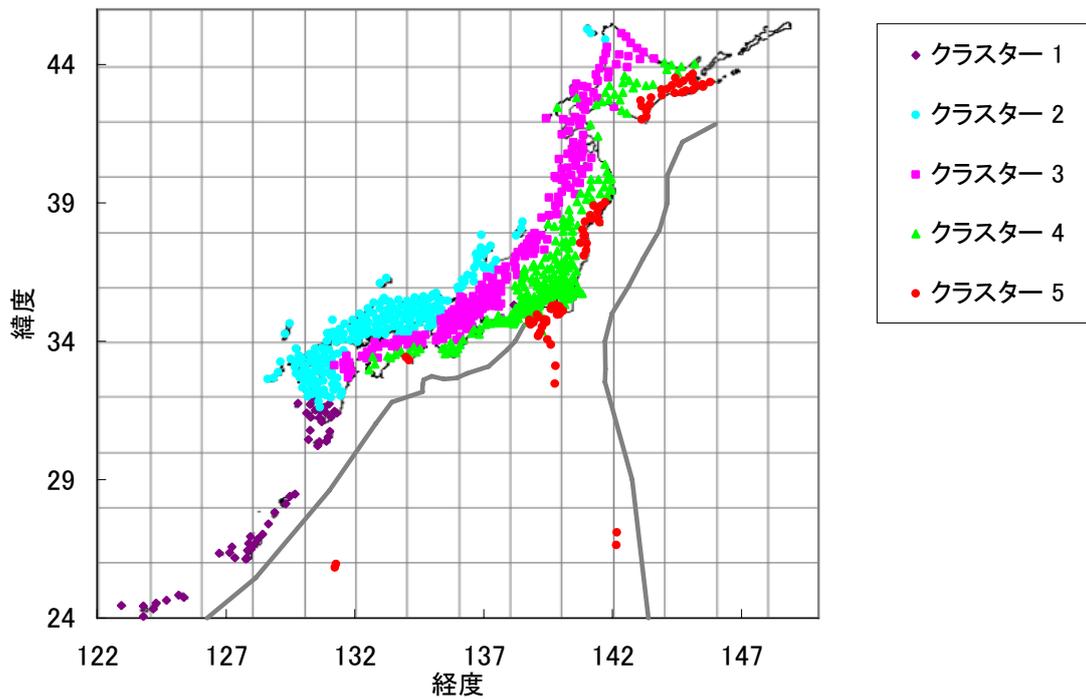


図 3.2-4 水平速度のクラスターの空間分布図：1266 ケースの列島内の水平速度の集合に対するクラスター分析の結果、同一のクラスターに所属する割合（クラスター固定割合）が70%以上となる電子基準点の空間配置図である。各クラスターは、1000km 以上におよぶ長大な分布形状を呈しており、東日本、西日本のいずれの領域においてもプレート境界（千島海溝、日本海溝、南海トラフ、琉球海溝）と平行な帯状分布をしている。

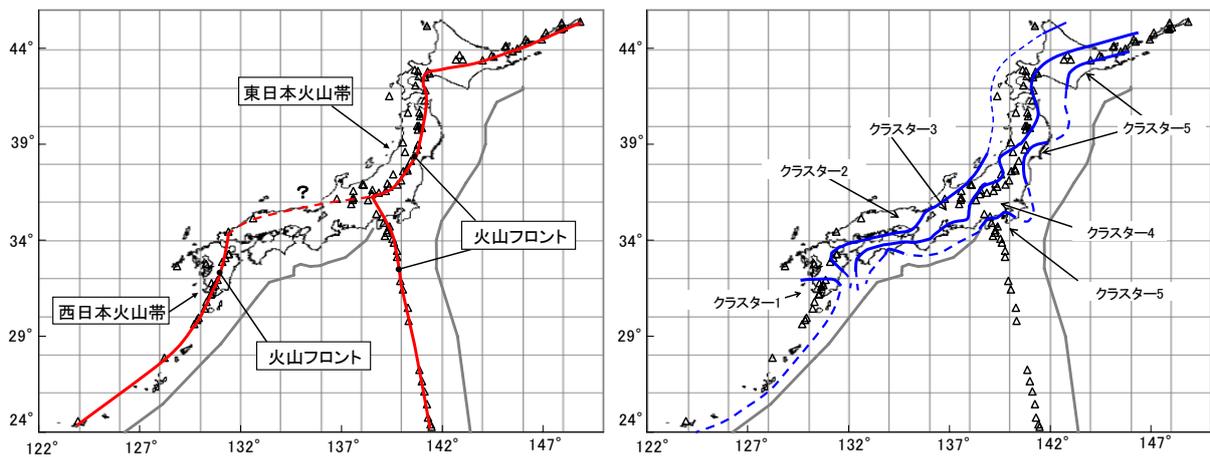


図 3.2-5 火山フロントおよび通常の動きの5つのクラスター（水平速度群）とプレート境界との比較：左図は活火山の位置と火山フロントの配置図。右図は通常の動きにおける隣接するクラスターの境界の配置図。火山フロントとクラスターの分布境界は、一部を除きほぼプレート境界と平行である。

クラスター1～4は、1000km オーダに及ぶ長大な分布形状を示す。クラスターは、渡島半島の北端の地域ではクラスターの配列が逆転するが、昇順に西から東に向かって配列している。

クラスターの分布形状は、火山フロントと同様に、千島海溝（又は千島・カムチャッカ海溝）、日本海溝、および南海トラフに至る弧の形状と、琉球海溝（又は南西諸島海溝）の弧の形状に沿っている（図 3.2-4～3.2-5 参照）。クラスターは、このように連続的で長大な分布形状をもち、プレート境界と平行であることから、通常の動きはプレート運動と関連性をもつ運動を示している可能性が高いと考えられる。

(4) クラスター間における水平速度の空間分布に関する分析

クラスターの空間分析結果は、通常の動きが剛体運動とは異なることを示した。ここでは、通常の動きの局所的な空間分布の特徴を明らかにするために、隣接するクラスター同士の境界（以下、クラスターの境界）を基準線とし、基準線から電子基準点までの距離と水平速度との相関分析を行う。

電子基準点のクラスターからの距離は、図 3.2-5 のようにして求める。基準線がクラスター境界と異なる場合と比較するために、クラスター境界を 0°、±30° 回転し、水平速度と離隔距離との相関を求める。基準線（回転角 0°）として用いたクラスター境界は、表 3.2-1 に示す 3 箇所とした。

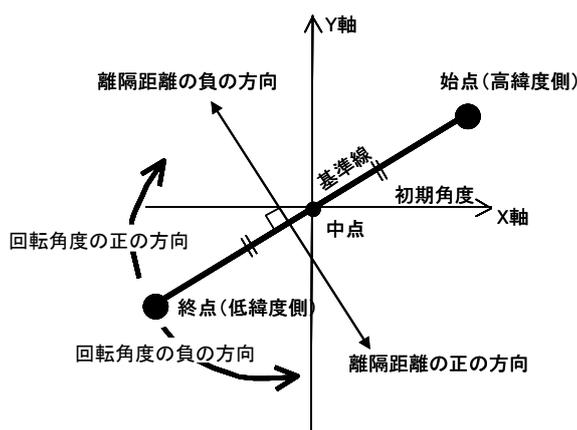


図 3.2-5 基準線に対する離隔距離の算出方法と基準線の回転角度の定義： X-Y 座標は、経度－緯度をランベルト正角円錐図法に変換した座標。回転角は、0°、±30°（回転角が 0° の場合基準線はクラスター境界）。

表 3.2-1 基準線の位置一覧(回転角度 0deg)

基準線名	クラスター境界	位置					備考	
		区分	都道府県	Site名	SiteID	緯度(deg)		経度(deg)
基準線1	クラスター2と3の境界	始点	新潟県	大潟	950241	37.2311	138.3336	活断層の配列と位置方向性が一致。
		終点	福井県	敦賀	940056	35.6026	136.1058	
基準線2	クラスター2と3の境界	始点	福井県	敦賀	940056	35.6026	136.1058	活断層の配列と位置・方向性が一致。
		終点	兵庫県	南淡	950363	34.2237	134.7365	
基準線3	クラスター3と4の境界	始点	岩手県	種市	950158	40.4052	141.7131	火山帯と交差。活断層と関連しない。
		終点	新潟県	村上	940049	38.2307	139.5096	

注) site: 電子基準点

基準線 1、および基準線 2 は、活断層の配列と方向性が一致するクラスター 2 と 3 の境界（基準線 1；図 3.2-6 参照）であり、基準線 3 は、火山帯（那須火山帯）を交差するクラスター 3 と 4 の境界（断面 3；図 3.2-8 参照）である。

電子基準点の速度は、通常の動きを示すケース（最大 1266 ケース）の算術平均値とする（式 (3) 参照）。離隔距離は、電子基準点の位置座標（経度, 経度）をランベルト正角円錐図法により X-Y 座標に変換して求めた。基準線別の水平速度と離隔距離との関係図を図 3.2-6～3.2-8 に示す。

水平速度と離隔距離との関係は、いずれの断面においても、緯度方向速度（VL）は距離に対し低い正の相関、経度方向速度（VB）は高い負の相関をもつ。この相関は、回転角度が 0° のとき（基準線をクラスター境界と一致させた場合）が最も高く、回転すると低下する。距離-50km～100km の範囲は、経度方向速度と距離との間に 1 次相関があるように見える。

基準線別に距離-50km～100km の経度方向速度と距離との回帰分析を実施した結果を図 3.2-9～3.2-11 に示す。回転角度が 0 度の場合、基準線 1～3 に共通し、経度方向速度と距離の相関は極めて高く（相関係数 $R^2=0.87\sim0.92$ ）、その勾配は同一のオーダーであり、 $3.5\sim3.9E-12$ (deg/day/km) の範囲である。

このように個別の電子基準点がクラスターの分布境界と高い相関をもつことは、クラスターの配列に応じて、速度の変化が連続的であり、かつ 1 次相関で近似できるような比較的単純な傾向をもつことを意味する。この結果から、図 3.2-3 が示した 5 つのクラスターの配列と速度との関係は、クラスターの内部の領域に及んでいると断定できる。また、この水平速度の空間分布の特性は、活動度の高い活断層の位置・方向性と一致またはほぼ一致する基準線 1, 2 と、火山帯と交差し、かつ活断層との関連性の低い基準線 3 で、ほぼ一致している。したがって、通常の動きは、数 10～100km 程度の内陸の地質構造の影響が見られず、図 3.2-3 が示すような広域の水平速度の空間分布によって説明することができる動きであると考えられる。

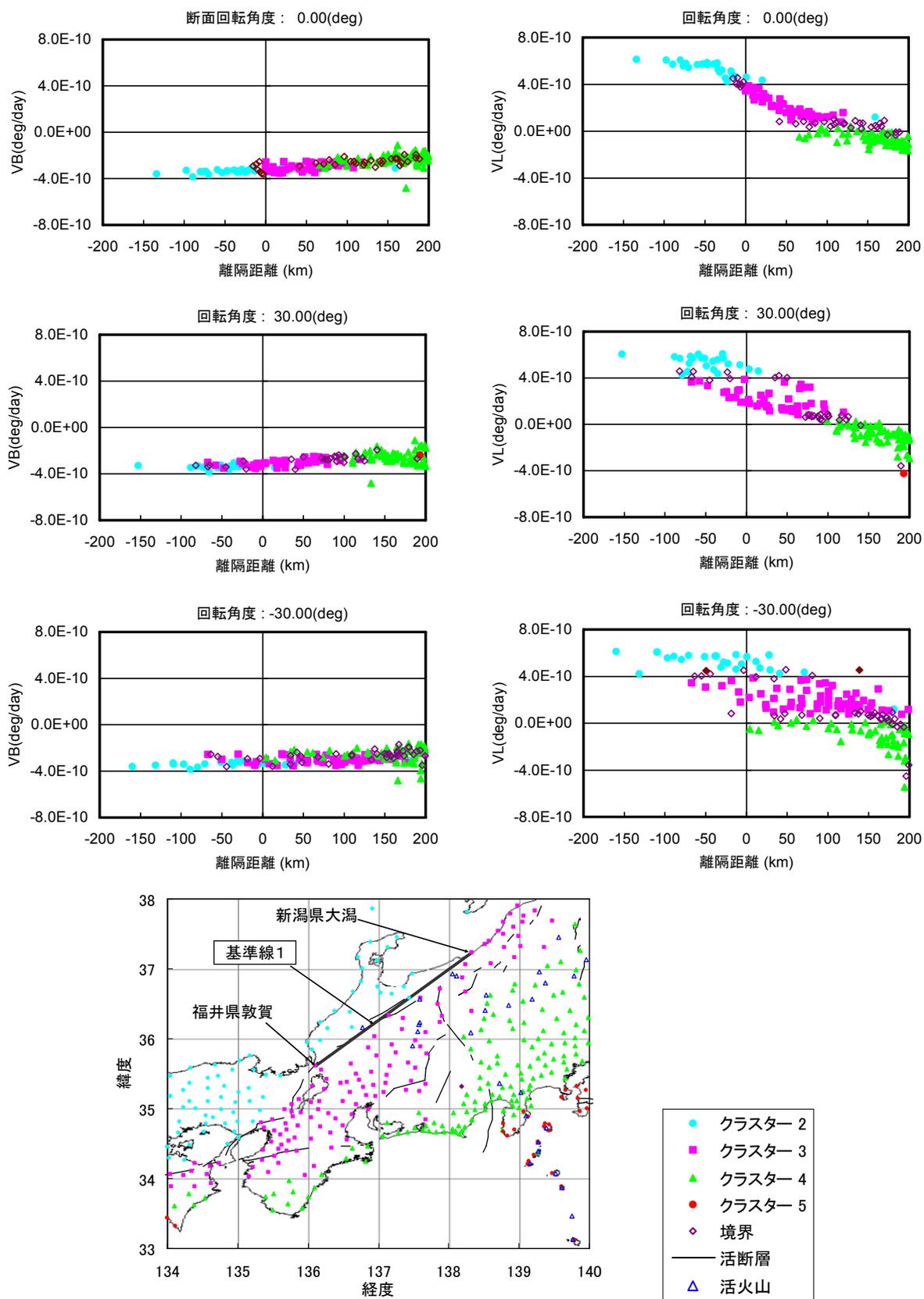


図 3.2-6 基準線1からの距離と水平速度との相関：VB は緯度方向速度、VL は経度方向速度。活断層はクラスター境界の位置や形状と関連する主要なものを選択し示した。境界は、クラスター固定割合が70%未満の電子基準点。

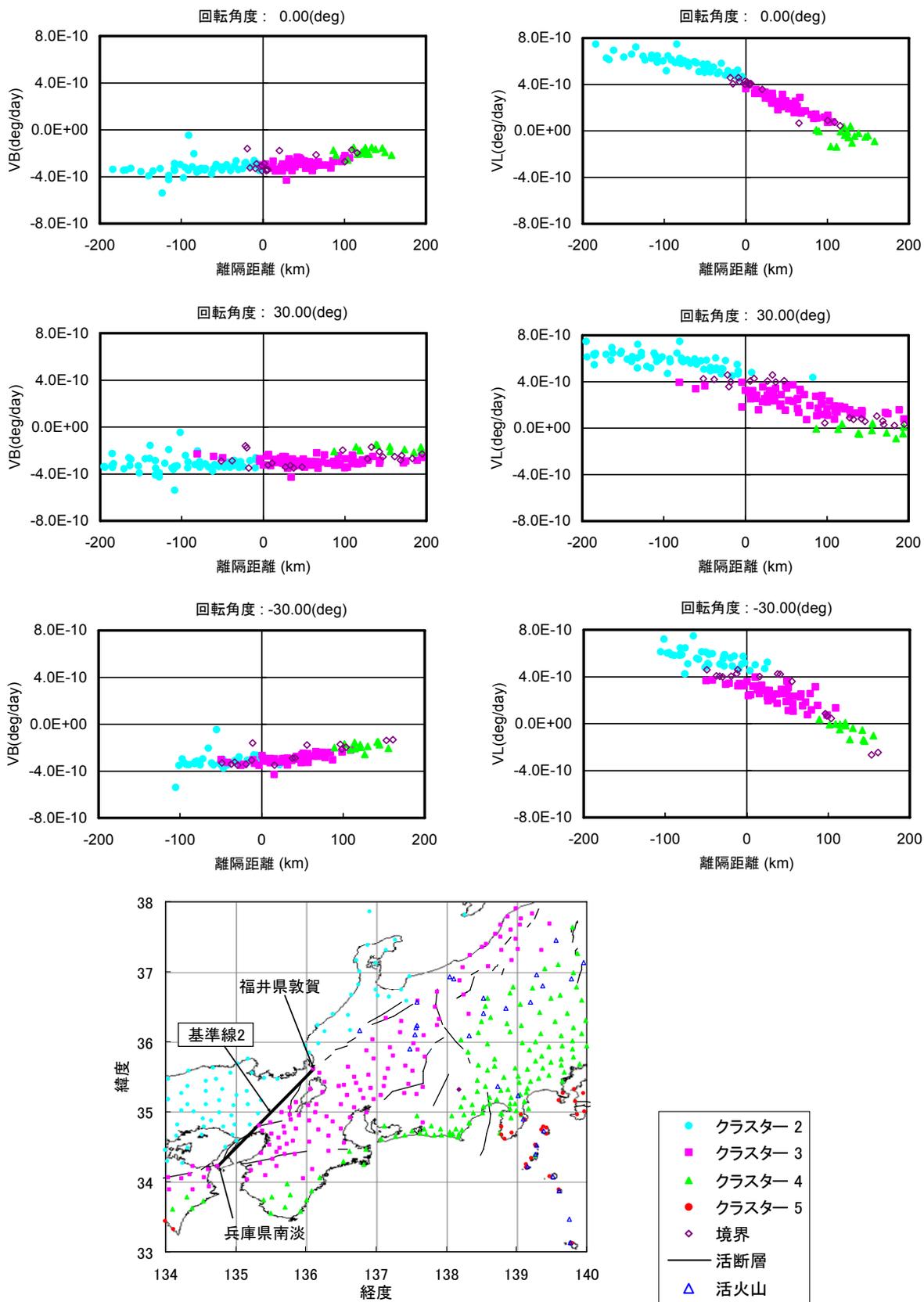


図 3.2-7 基準線 2 からの距離と水平速度との相関：VB は緯度方向速度、VL は経度方向速度。活断層はクラスター境界の位置や形状と関連する主要なものを選択し示した。境界は、クラスター固定割合が 70%未満の電子基準点。

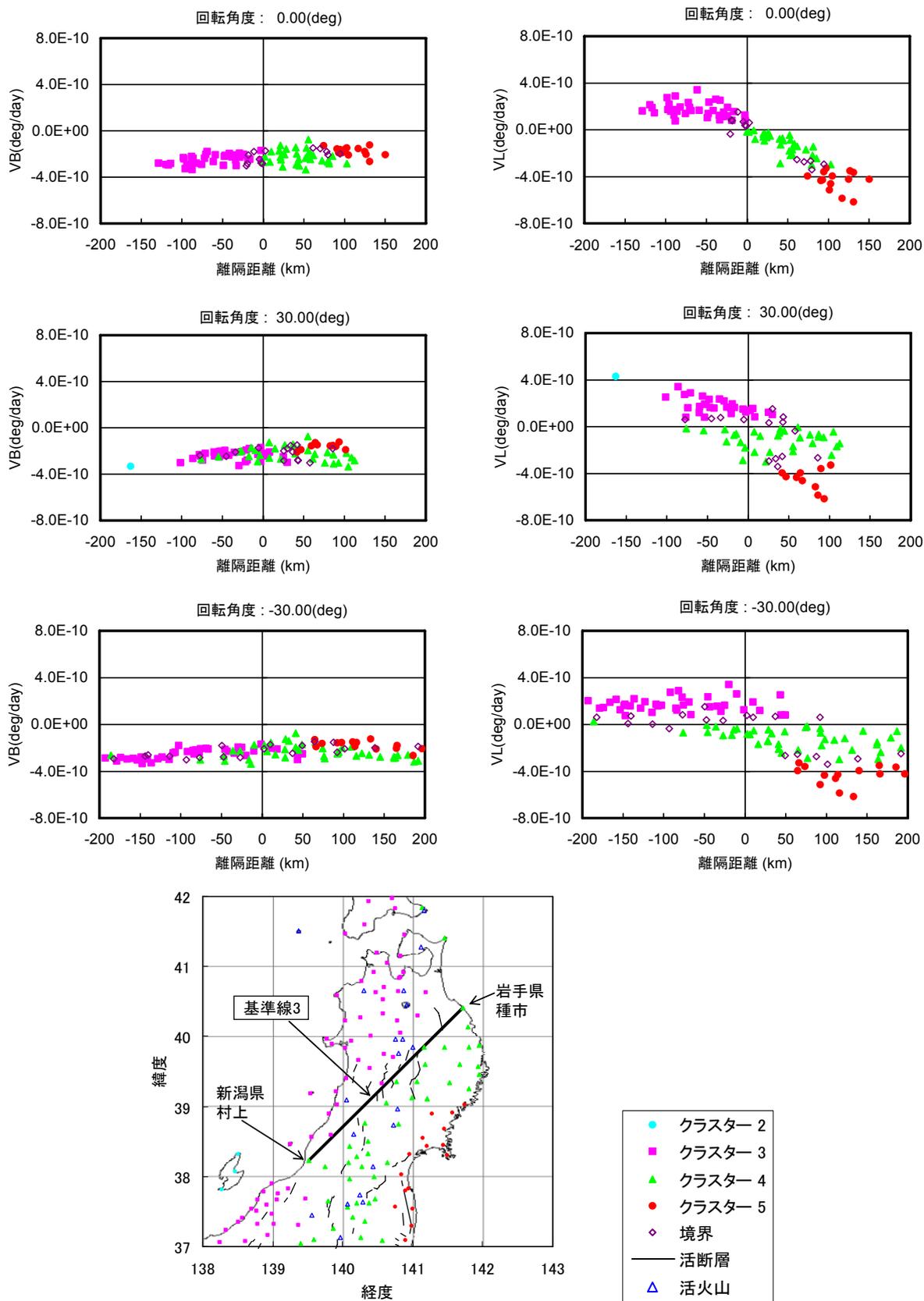


図 3.2-8 基準線 3 からの距離と水平速度との相関：VB は緯度方向速度、VL は経度方向速度。活断層はクラスター境界の位置や形状と関連する主要なものを選択し示した。境界は、クラスター固定割合が 70%未満の電子基準点。

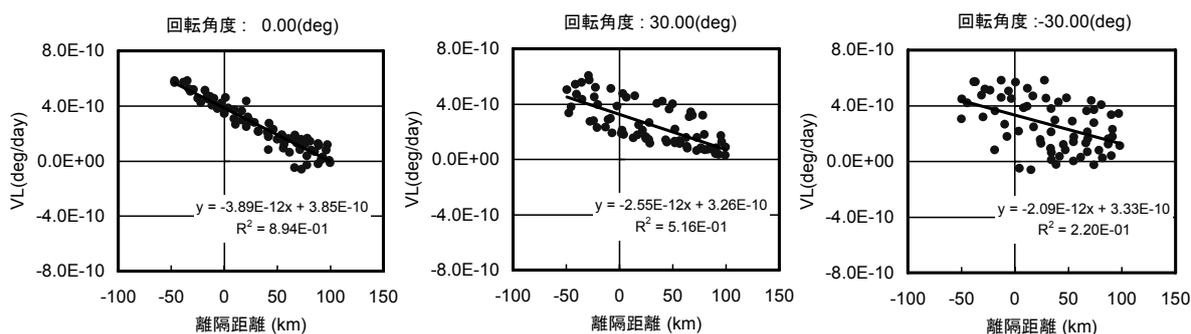


図 3.2-9 経度方向速度 VL と基準線 1 からの離隔距離との相関分析結果

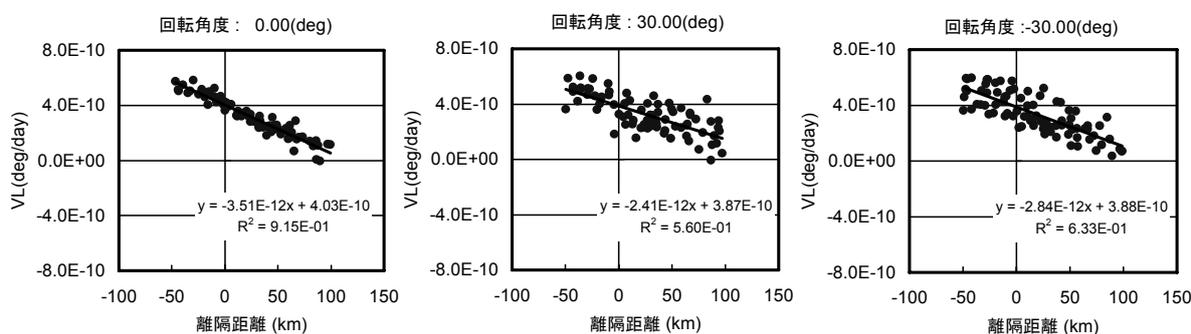


図 3.2-10 経度方向速度 VL と基準線 2 からの離隔距離との相関分析結果

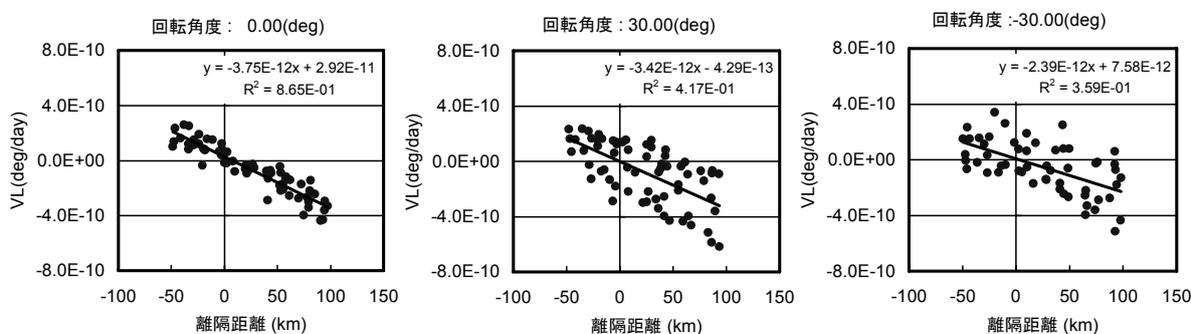


図 3.2-11 経度方向速度 VL と基準線 3 からの離隔距離との相関分析結果

4. 地殻変動の累積量推定モデル

観測によって得られる現在の動きのモデル（地殻変動の累積量推定モデル）は、第3章の結果から、通常の動きと一時的な動きの和で表現される式(4)で定式化することができる。地殻変動の累積量推定モデルの式(4)は、通常の動きと一時的な動きの和で形成される点についてはネオテクトニクスで経験的に知られている通りであるが、通常の動きと一時的な動きを明確に定義し通常の動きと一時的な動きにおいていくつかの補正項を考慮した点に特徴がある。

$$\vec{V}_i = (\vec{V}_{ui} + \vec{\alpha}_i) + (\vec{V}_{Ei} + \vec{V}_{Vi}) \tag{4}$$

$$\vec{V}_{Ei} = \sum_{j=1, n_{Ei}} a_{Ej} \vec{U}_{Eji} / T_{Ej} \tag{5}$$

$$\vec{V}_{Vi} = \sum_{j=1, n_{Vi}} a_{Vj} \vec{U}_{Vji} / T_{Vj} \tag{6}$$

ここで、

- \vec{V}_i : 電子基準点 i における現在の動き (m/y).
- \vec{V}_{ui} : 電子基準点 i における通常の動き (m/y). 式(3)で求められるベクトルの単位(deg/day)をヒュベニの式等を用いて(m/y)に換算し求める.
- $\vec{\alpha}_i$: 通常の動きの広域の空間分布特性を反映するための水平速度の補正項 (m/y). 水平速度の理想的な空間分布と \vec{V}_i との差から求められる速度である.
- \vec{V}_{Ei} : 一時的な動きのうち地震・断層活動に係る事象による電子基準点 i に対する影響の平均速度 (m/y). みかけの速度.
- \vec{V}_{Vi} : 一時的な動きのうち火山・マグマ活動に係る事象による電子基準点 i に対する影響の平均速度 (m/y). みかけの速度.
- n_{Ei} : 電子基準点 i の水平速度に顕在化する影響を与える地震・断層活動の事象数
- n_{Vi} : 電子基準点 i の水平速度に顕在化する影響を与える火山・マグマ活動の事象数
- \vec{U}_{Eji} : 地震・断層活動 j による電子基準点 i の変位ベクトル (m).
- \vec{U}_{Vji} : 火山・マグマ活動 j による電子基準点 i の変位ベクトル (m).
- T_{Ej} : 電子基準点 i の水平速度に顕在化する影響を与える地震・断層活動 j の平均的な活動間隔 (y).
- T_{Vj} : 電子基準点 i の水平速度に顕在化する影響を与える火山・マグマ活動 j の平均的な活動間隔 (y).
- a_{Ej} : 地震・断層活動 j による電子基準点 i に対する影響 (変位) に対する余震や余効活動等による補正係数.
- a_{Vj} : 火山・マグマ活動 j による電子基準点 i に対する影響 (変位) に対する余効的な活動等による補正係数.

式が成立するための通常の動きと一時的な動きの定義は以下の通りである。

- 一時的な動きとは、地震・断層活動や火山・マグマ活動の影響により速度の変化が顕在化する動きである。

- 通常の動きとは、地震・断層活動や火山・マグマ活動の影響による速度の変化が顕在化しない動きである。

モデル式(4)は、通常の動きと一時的な動きの単位として速度を用いている。一時的な動きは、間欠的な動きであることからその観測結果は変位として一般に扱われるが、過去の動きを扱う地質学や地形学の分野では、活断層の活動度の判定等のために、活断層の変位量を変位のもたらされた期間で除して平均変位速度を用いる場合がある(例えば、活断層研究会編, 1991⁽¹³⁾; 吉岡ほか, 2003⁽¹⁴⁾)。地殻変動の累積量推定モデルでは、この考え方を採用し、式(5)、(6)に示すように一時的な動きとして変位量を活動間隔で除し速度に換算した見かけの速度を用いる。

一時的な動きは、未発生である地震や火山の噴火の速度について配慮が必要となる。地震に伴う速度 \vec{V}_{Ei} は、活断層やプレート境界型地震の公開データを用いて断層パラメータを設定し Okada

Model (Okada, 1992)⁽³⁾を用いて個々の事象別に力学的な影響 \vec{U}_{Eji} を求め、これを平均活動間隔で除した事象別平均速度を集計して求める。Okada Model の入力パラメータ(断層の位置、走向、傾斜角、すべり角、すべり量)や平均活動間隔として、日本周辺のプレート境界型地震の断層モデルや数百に及ぶ活断層に係る公開データ(例えば、佐藤良輔 編著, 1989⁽¹⁵⁾; 地震調査委員会, 2005⁽¹⁶⁾; 吉岡ほか, 2003⁽¹⁴⁾; 産業技術総合研究所, 2007⁽¹⁷⁾)を用いる。なお、この地震の変位や速度の扱いでは、所定規模の地震が所定位置で繰り返して生ずること(固有地震の繰り返し)が仮定として含まれている。

噴火に伴う速度 \vec{V}_{Vi} は、変位 \vec{U}_{Vji} については Okada Model や茂木モデル (Mogi, 1958)⁽¹⁸⁾で求めることができるが、モデルの入力パラメータや平均活動間隔の情報が公開されていないため算出できない。そこで、一時的な動きにおける噴火の成分と地震の成分との相対比較を試みた。比較指標は、電子基準点の位置に影響を与える地震や活火山の個数(1年当たり事象数)を用いた。1年当たり事象数は、任意の電子基準点を影響範囲に含む地震や活火山の噴火の平均活動間隔の逆数を累計したものである。影響範囲は、プレート境界型地震とそれ以外に分け、各々半径 400km、100km とした。地震の影響範囲の中心は地表に近い断層の長辺の中央とし、佐藤良輔 編著(1989)⁽¹⁵⁾、吉岡ほか(2003)⁽¹⁴⁾、産業技術総合研究所(2007)⁽¹⁷⁾をもとに設定した。活火山の影響範囲の中心は、火山中心とし、気象庁(2006)⁽¹⁹⁾をもとに設定した。地震の平均活動間隔は、吉岡ほか(2003)⁽¹⁴⁾、産業技術総合研究所(2007)⁽¹⁷⁾および地震調査委員会(2005)⁽¹⁶⁾により設定した。活火山の噴火の平均活動間隔は、日本の第四紀火山⁽⁹⁾、活火山の活動度のランク⁽²⁰⁾、および活火山の活動度レベル⁽²¹⁾を基に推定した(資料-1 参照)。1年当たりの事象数を地域別に整理した結果を図 4-1 に示す。

図 4-1 は、九州を除いて活火山の噴火の割合が地震の割合と比べると極めて小さいことを示す。伊豆大島や三宅島など活動的な島嶼を含む関東や有珠山を含む北海道は、その他の地域と比較して火山の割合が比較的大きいものの、地震の割合と比較すると小さい。この結果は、活火山の平均活動間隔の設定根拠や変位の大きさによる事象の重み付け等の問題があるものの、現在の地震や活火山の噴火の活動状況と整合しているように思える。

以上の結果から、現在の動きのモデルでは、一部の例外として九州が存在することを踏まえつつ、当面、一時的な動きとして地震の影響のみを考慮したモデルを設定することとする。

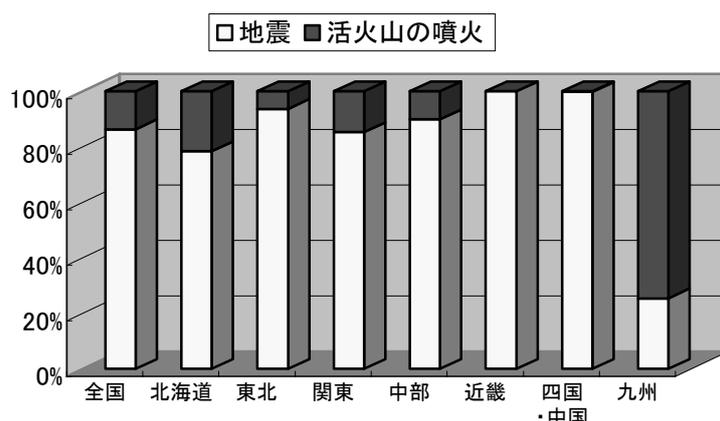


図 4-1 一時的な動きにおける地震と活火山の噴火の割合 (1年当りの事象数の比較) : 電子基準点約 1200 箇所に影響を与える地震や活火山の噴火の 1 年当りの事象の数を割合で示した。1 年当りの事象数は、地震の占める割合がほとんどの領域で高い。九州では、活動的な活火山が多いため、活火山の占める割合が地震よりもはるかに大きい。

式(5)および(6)に示される係数 a_{Ej} , a_{Vj} は、余震や余効活動を含めた事象別の変位を補正する係数である。この項を正確に求めるには、地震前の水平速度を正確に求める必要があるが、電子基準点データには誤差が含まれている。現時点では、 a_{Ej} は 3 つの設定値 (0.0、1.0、2.0) を用意し、モデルの目的等に応じて事象別に設定することとした。 $a_{Ej}=0.0$ は、通常の動きをモデル化する場合や感度解析的に特定の地震の影響を取り除くための仮想の値であり、 $a_{Ej}=1.0$ は一般的な地震を想定した値、 $a_{Ej}=2.0$ はプレート境界型地震に適用するスロースリップイベントの影響を考慮した値である。 $a_{Ej}=2.0$ は、1994 年三陸はるか沖地震の発生後に地震を伴わないで本震に匹敵する変位を伴うスロースリップイベントが生ずること (Heki et al., 1997⁽²²⁾) を参考とした値である。

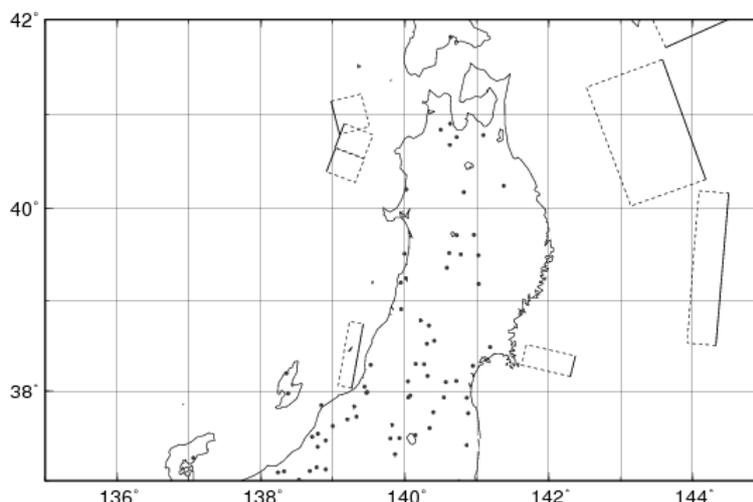
式(4)の $\vec{\alpha}_i$ は水平速度の空間分布による水平速度の補正項である。3.2 項の通常の動きの分析から列島の運動は経度方向速度の違いで特徴付けられるため、列島のほとんどの領域では、空間分布で考慮すべき速度の成分は経度方向であると考えられる。ただし、クラスター1 に所属する南西諸島やクラスター5 に所属する伊豆諸島は、緯度方向速度の変化量が大きいことから、緯度成分を含む $\vec{\alpha}_i$ の設定を行う必要があると考えられる (図 3.2-3 参照)。

5. 地殻変動の累積量推定モデルの適用例－東北地方の場合－

東北地方は、鮮新世以降の水平方向の運動学的なデータや知見が体系的に整理されている領域である（例えば、佐藤, 1989⁽²³⁾；栗田, 1999⁽²⁴⁾）。ここでは、東北地方に地殻変動の累積量推定モデルを適用した結果について報告する。地殻変動の累積量推定モデルの適用条件は、以下の通りである。

- 領域：東北地方 (38.0N-41.5N)
- 想定する地震の影響：活断層よる内陸地震（海底地震含む）・プレート境界型地震 計 68
- モデルケース Case1：通常の動きのみ
 - Case2：通常の動き+68 地震の影響
 - Case3：通常の動き+68 地震の影響+スロースリップイベント
 - －沈み込むプレート内部地震
- 影響範囲：内陸地震：100km
内陸地震以外（プレート境界型地震）：400km

考慮した活動セグメント、プレート境界型地震、および沈み込むプレートを含むプレート内部地震の配置図を図 5-1 に、地震リストを表 5-1 に示す。プレート境界型地震およびプレート内部地震の断層パラメータを表 5-2 に示す。活動セグメントの幅は、データがないため便宜的に資料-4 に示す方法で算出した。活動セグメントの配置は、地表に近い断層の切片中央の位置を示している。図は、ハワイ大学が開発した GMT (The Generic Mapping Tools)⁽²⁵⁾を用いて作成した。なお、地震リストで示す地震名は、断層パラメータの識別を目的とした便宜的な名称であり、理科年表等の過去の地震を対象とした正式な地震名称とは異なっている。



注) 断層パラメータが設定できない23地震を考慮していない。

図 5-1 考慮した 68 地震の配置図

表 5-1 考慮した 68 地震のリスト (文献(14)~(17)を参考として作成)

No.	活動セグメント名又は地震名	No.	活動セグメント名又は地震名
1	旭山活動セグメント	35	常楽寺活動セグメント
2	安達太良活動セグメント	36	新潟県北部沖の地震
3	円田一坪沼活動セグメント	37	新庄盆地活動セグメント
4	遠刈田活動セグメント	38	新鶴活動セグメント
5	加治川活動セグメント	39	青森湾西岸活動セグメント
6	加茂活動セグメント	40	折爪活動セグメント
7	花巻活動セグメント	41	千屋活動セグメント
8	花輪東活動セグメント	42	川桁山活動セグメント
9	釜ヶ台活動セグメント	43	川舟活動セグメント
10	関東地震	44	村松活動セグメント
11	宮城県沖地震(A1)	45	台山活動セグメント
12	虚空蔵山活動セグメント	46	大内活動セグメント
13	金沢活動セグメント	47	長井活動セグメント
14	楡形活動セグメント	48	長町一利府活動セグメント
15	桑折活動セグメント	49	鳥越活動セグメント
16	月岡活動セグメント	50	津軽山地西縁活動セグメント
17	原町活動セグメント	51	田沢湖東方活動セグメント
18	高戸屋山活動セグメント	52	塔寺活動セグメント
19	国中南活動セグメント	53	入内活動セグメント
20	黒石活動セグメント	54	能代活動セグメント
21	左沢活動セグメント	55	函館西活動セグメント
22	鮭川活動セグメント	56	八雲活動セグメント
23	三郡森活動セグメント	57	半郷活動セグメント
24	三陸沖北部のプレート間大地震	58	尾花沢活動セグメント
25	三陸沖北部のプレート内部大地震	59	富並活動セグメント
26	山辺活動セグメント	60	米沢活動セグメント
27	雫石盆地西縁活動セグメント	61	片貝活動セグメント
28	若松活動セグメント	62	北上西活動セグメント
29	秋田県沖の地震	63	北由利活動セグメント
30	十勝沖の地震	64	牟礼山北西活動セグメント
31	小滝活動セグメント	65	野辺地活動セグメント
32	小田活動セグメント	66	弥彦活動セグメント
33	庄内平野東縁活動セグメント	67	悠久山活動セグメント
34	沼越峠活動セグメント	68	巨理活動セグメント

表 5-2 プレート境界型地震およびプレート内部地震の断層モデル (文献(15)(16)を参考として作成)

No.	地震名	θ (°)	δ (°)	λ (°)	長さ (km)	幅 (km)	深さ (km)	単位変位量 (m)	平均活動間隔 (千年)	最新活動時期	モデルの座標		震源座標	
											緯度	経度	緯度	経度
1	関東地震	294	25	140	95	54	1.9	4.80	0.2197	1923/9/1	34.92	139.89	35.10	139.50
2	秋田県沖の地震	345	25	90	40	40	-	4.00	1.0000	1983/5/26	40.79	139.09	40.35	139.08
		20	25	90	30	40	-	5.00	-	-	40.65	139.03	-	-
		20	25	90	30	40	-	5.00	-	-	40.39	138.91	-	-
3	新潟県北部沖の地震	189	56	90	80	30	0	3.30	1.0000	1964/6/16	38.74	139.42	38.35	139.18
4	宮城県沖地震(A1)	190	20	76	26	65	25	2.00	0.0371	1978/6/12	38.39	142.37	38.15	142.17
5	三陸沖北部のプレート間大地震	156	20	38	150	100	1	4.00	0.0970	1968/5/16	41.58	143.58	40.73	143.58
6	三陸沖北部のプレート内部大地震 (正断層)	180	45	270	185	50	1	6.60	0.4000	1933/3/3	40.16	144.50	39.23	144.52
7	十勝沖の地震	241	23	124	92	90	15.7	4.84	0.0722	2003/9/26	42.05	144.64	42.05	144.64

注記) θ : 断層の走向角、 δ : 断層の傾斜角、 λ : 断層のすべり角

佐藤良輔編著, 日本の地震断層パラメータ―ハンドブック, 鹿島出版会, 1989より断層モデルを設定した。

十勝沖地震は、国土地理院のモデルを参考として設定した。

深さが不明な場合には、0kmとした。十勝沖地震を除き旧座標系である。

活動間隔は「地震調査委員会, 地震調査研究推進本部, 全国を概観した地震動予測地図, 分冊1 確率論的地震動予測値図の説明, 2005」より。

活断層データベース⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾で提示されている列島全域の活動セグメント 547 のうち、断層モデルが設定できない表 5-3 に示す計 170 の活動セグメント（東北地方では 23）を除外した。

表 5-3 断層モデルが設定できない活断セグメント一覧

調査に使用できない活断層	活動セグメントの個数
断層型が「活断層でない」	11 個
断層型が「正断層」かつ変位の向きが「- (特定不能)」	4 個
単位変位量のデータがない	152 個
平均活動間隔のデータがない	3 個

東北地方において除外した約 25%の活動セグメントは、表 5-3 から、列島全域で除外した活動セグメントの割合約 30%と同等以下である。この活動セグメントの欠損の割合は、将来の内陸地震の観測により位置が判明する 2008 年岩手・宮城内陸地震 (Mj7.2) のような活動セグメントを加えるとさらに増大することも予想される。しかしながら、除外したセグメントの多くは、活動性や変位速度が必ずしも大きなものではない。また、活動セグメントによる運動は、プレート境界型地震と比較すると、平均活動間隔や規模の違いから、一時的な動きにしめる割合が小さいと考えられる。そのため、プレート境界型地震を領域内に含む東北地方においては、25%の活動セグメントを仮に除外したとしても、東北地方の運動の基本的な特性を把握するためのモデルとしては十分であると考へ、表 5-1 に示す活動セグメントを用いた。

モデルケースは、地震・断層活動による余効活動等に伴う影響の補正係数 a_{Ej} の 3 種類の値 (0, 1, 2) に基づくものである。 $a_{Ej} = 2$ (Case3) は、スロースリップイベントを考慮した値であり、事象 j は三陸沖北部のプレート間大地震とする。三陸沖のプレート内部地震は、正断層の活動であるため、逆断層の活動である三陸沖北部のプレート間大地震による速度を過度に減少する可能性がある。そのため、Case3 では、三陸沖北部のプレート間大地震の速度を強調するケースとし、68 地震のうち三陸沖のプレート内部地震の a_{Ej} を 0 とした。

東北地方における通常の動きは、領域内ではクラスター2 はほとんど無く、クラスター3~4 がほとんどの領域を占めている (図 5-2 参照)。緯度方向の水平速度の分布形は正規分布に近いが、経度方向の分布はかなり偏りが見られる分布形状を示している。この結果は、列島の運動区分が経度方向速度によって分類できると整合しており、経度方向速度の空間分布分析が必要であることを示している。

Case1 の東北地方の経度方向速度(VL)と経度との関係は、図 5-3 の通りである。VL と経度との関係は、東北地方の全領域において負のトレンドをもつことを示すが、その相関は低い。

VL と経度との関係を詳細に分析する。佐藤 (1989) ⁽²³⁾ が東北地方を緯度方向に分割し、数十万から数百万年間の短縮率を整理していることから、この分割の概念を本モデルに適用し、領域別に VL と経度との相関を求めた (図 5-4 参照)。領域は、緯度方向を 0.5 度間隔で分割し 7 領域とした。

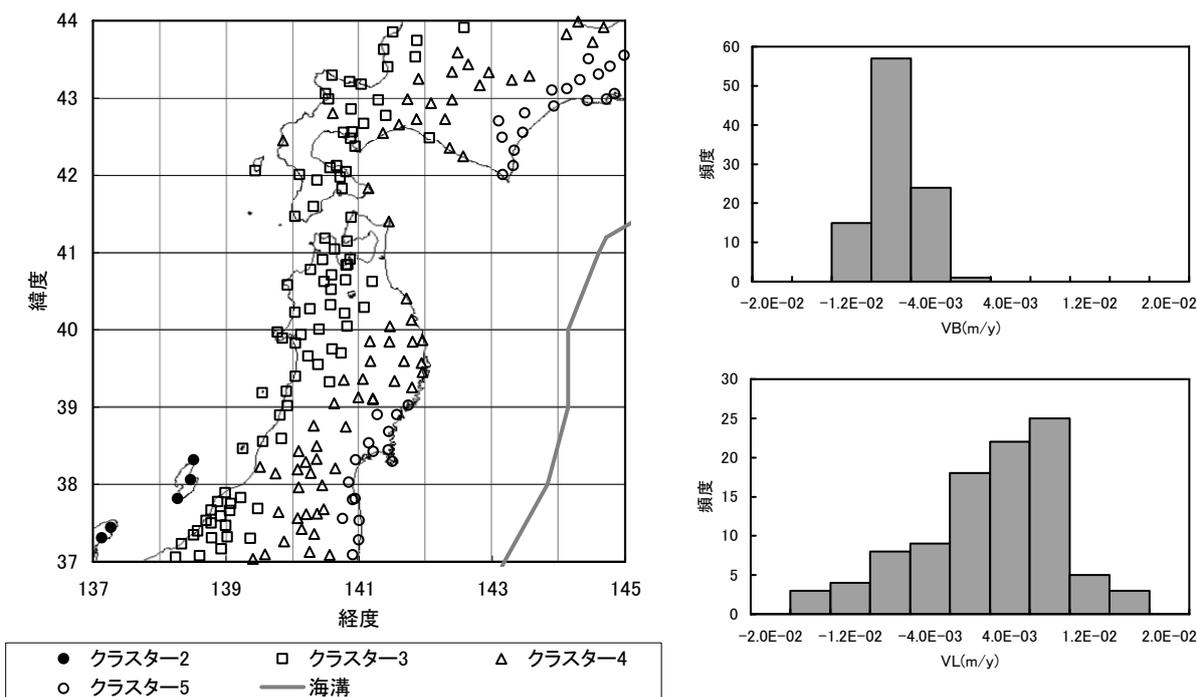


図 5-2 東北地方における通常の動きの空間分布と頻度分布：VB は緯度方向速度、VL は経度方向速度を示す。東北地方の水平速度は西から東へクラスターの昇順に配列する。

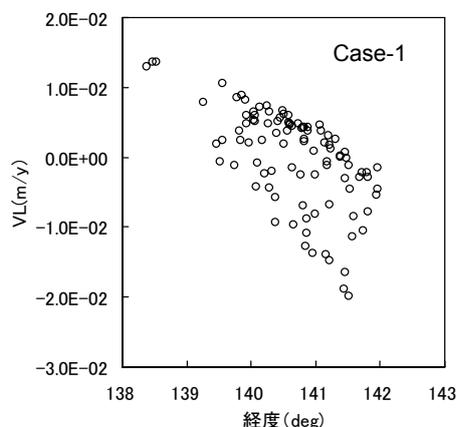


図 5-3 東北地方の経度方向速度 (VL) と経度との相関：東北地方の全領域を対象とした場合に VL は、経度に対して負の相関をもつが、その相関は低い。

緯度方向で分割した 7 つの領域別に VL と経度との相関を求めた結果、図 5-4～5-7 に示すように経度方向速度と経度が高い負の 1 次相関をもつことが明白となった。この結果は、緯度を固定すると速度の距離勾配 (単位は 1/y) がほぼ一定であることを示す。距離勾配は、佐藤(1989)⁽²³⁾の短縮率を短縮期間で除して求められる歪速度と同様の数値である。つまり、過去の動きと現在の動きは、歪速度の比較が可能である。この歪速度は、領域分割し 1 次元的な扱いにより求められる数値であり、平面的な歪と意味が異なることに注意が必要である。経度方向速度と経度が負の 1 次の相関をもつことは、経度方向速度が東を正とするため圧縮を意味しており、通常の動き、および現在の動きは、東北地方が緯度を固定すると東西方向の圧縮の歪速度が一定であるという性質をもつ。

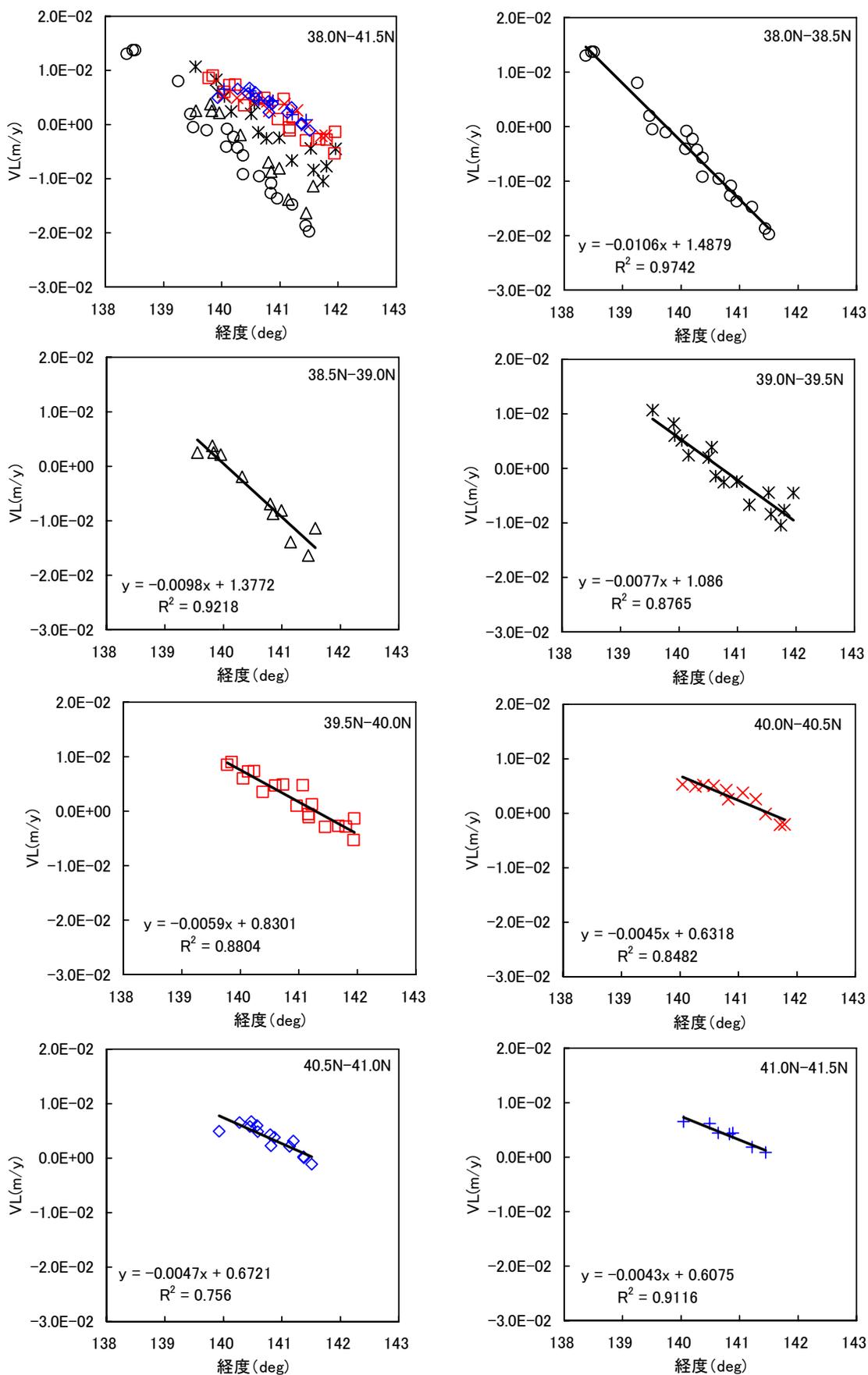


図 5-4 V_{ii} の経度方向成分 (VL) と経度との相関 (Case1)

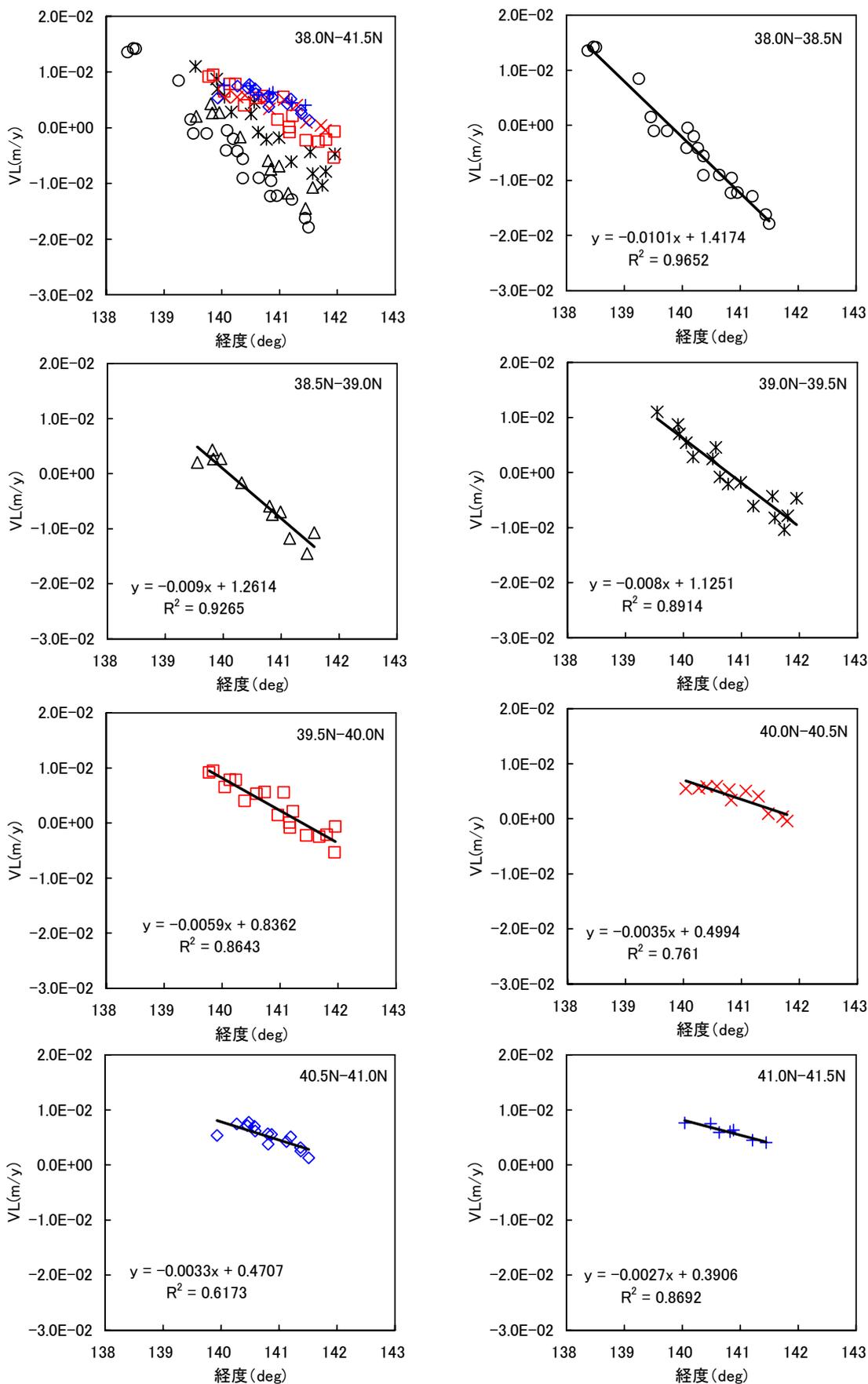


図 5-5 V_{ui} の経度方向成分 (VL) と経度との相関 (Case2)

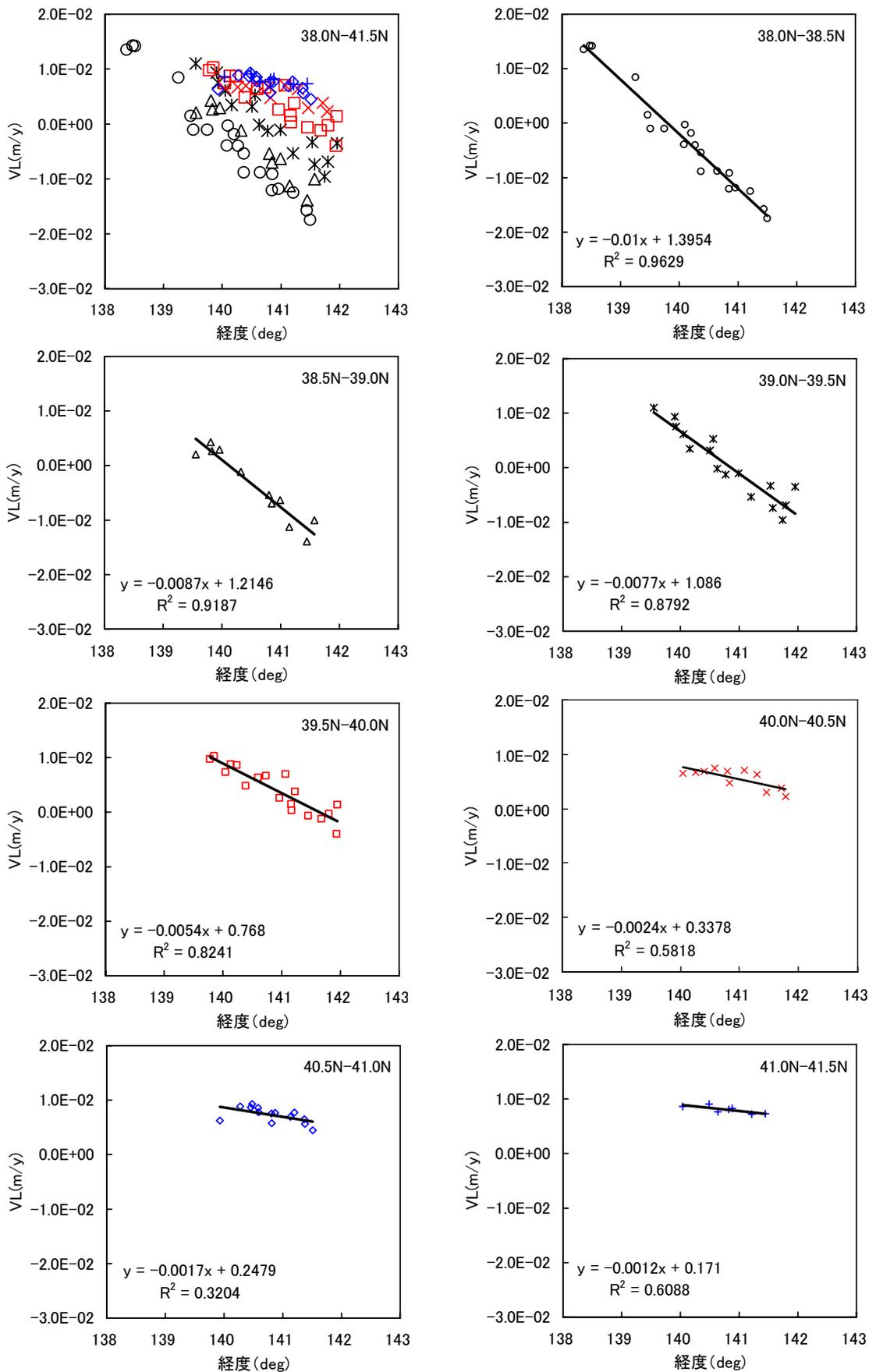


図 5-6 V_{ui} の経度方向成分 (VL) と経度との相関 (Case3)

Case2 と Case3 の VL と経度の相関が、Case1 と同様であることは、現在の動きの空間分布の基本的な特性が、通常の動き (Case1) により定まっておき、プレート境界型地震を含む地震の影響を考慮してもその特性には影響が生じないことを示している。したがって、東北地方の現在の動きは、一時的な動きによる擾乱の摂動による特性の変化が極めて小さな運動、つまり安定した運動であると解釈できる。

図 5-4~5-6 は、高緯度になるに従い速度の距離勾配 (歪速度に相当) が小さくなる傾向を示しており、その傾向が Case によって異なるように見える。そこで、Case 別に歪速度と緯度との相関を比較した結果、地震の影響は、緯度と歪速度との 1 次相関の傾きの違いで説明できることが明らかとなった (図 5-7 参照)。また、緯度と歪速度との相関は、通常の動き (Case1) より現在の動き (Case2 と Case3) の方が高い結果が得られた。

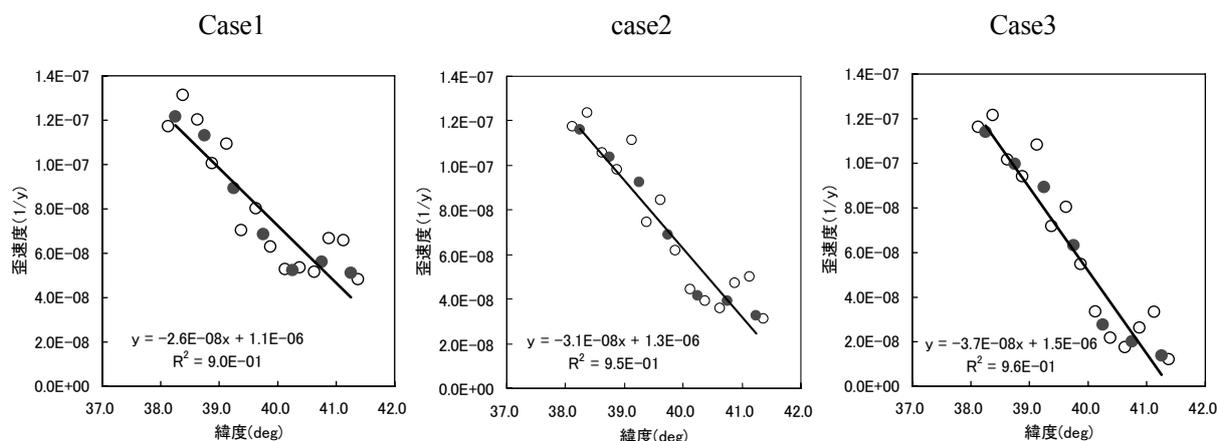


図 5-7 水平速度の距離勾配から求めた歪速度と緯度との相関：図中の●は東北地方を 7 領域に分割した場合の数値、○は参考として東北地方を 14 領域に分割した場合の数値。相関分析の結果は、7 領域に分割した場合の値。Case 1~3 は、緯度と歪速度が 1 次の相関をもつ点が共通であるが、傾きの絶対値が Case3>Case2>Case1 である点が異なっている。

橋本 (1990)⁽²⁶⁾は、測地学的な歪み速度と地質学的な歪み速度を比較して 1 桁大きいと指摘したが、鷲谷 (2002)⁽²⁷⁾は歪み速度の不均質な分布を考慮すると差は小さいとしている。測地学的な歪速度の算定には、均一な歪み速度の分布を仮定した内挿関数が用いられる。ところが、東北地方は、図 5-7 が示すように、歪み速度と緯度は 1 次の相関を示す。地質学的な歪み速度と現在の歪み速度の比較を正しく行うには、図 5-4~5-7 に示す様に、経度方向速度と経度や緯度の相関を反映し、歪み速度の空間分布を反映する必要がある。

東北地方における地殻変動の累積量推定モデルの補正項 α_i (式 (5) 参照) は、図 5-4~5-7 の相関分析を基に、例えば 1 次相関の残差を最小とする問題として解くことが可能であると考えられる。

6. まとめ

地層処分の安全評価に資するために、地殻変動の定量化のためのモデル開発を目指し、地殻変動を構成する地震等に伴う瞬間的な動き（一時的な動き）とそれ以外の日常的な動き（通常の動き）を速度として定量化するとともに、この2つの動き(速度)を積算し地殻変動を定量化するモデル（地殻変動の累積量推定モデル）の予察的検討を行った。

通常の動きについては、国土地理院の GEONET⁽²⁾公開データから速度を求め、地震や火山の噴火の影響のある期間を除外し、速度を統計学的方法により定量化した。1200 個以上の時刻別に実施した分類分析結果から、通常の動きは、経度方向速度によって分類できること、および同一の経度方向速度の領域はプレート境界に沿う長大な帯状配列を示した。この通常の動きの分析結果を踏まえ、通常の動きのモデルとして、所定の期間の水平速度の平均値にその空間分布を反映し補正することとした。考慮すべき空間分布の範囲は、分類分析により得られたクラスターの空間配置が同一の傾向をもつ領域から推定した。また、速度の空間分布を反映する方法として、佐藤(1989)⁽²³⁾を参考とし、等間隔で緯度または経度方向に領域を分割し、この領域別に距離と速度との関係を整理する方法を採用した。

一時的な動きについては、地震と火山の噴火の双方の3次元的な変形を統一的に扱うことができる理論計算式である Okada Model(Okada, 1992)⁽³⁾を用いて求めた力学的影響を平均活動間隔で除して速度を算出した。一時的な動きのモデル化にあたっては、活火山との地震との間で、平均的な活動間隔を用いて求めた1年当りの事象数や1事象あたりの速度分布等に関する予察的な比較を行い、九州地方を除けば一時的な動きに占める地震の割合が高いことが示唆された。この予察を踏まえ、一時的な動きは、九州地方や活火山の近傍の地域では噴火に伴う影響の可能性があることを認識した上で、地震のみをモデル化した。

通常の動きと一時的な動きとの定量的な関係の把握を目的として、地殻変動の累積量推定モデルを運動学的データや知見が体系的に整理されている東北地方に適用した。その結果、東北地方では、通常の動きが一時的な動きに比べて大きく、2つを積算した速度の空間分布は、通常の動きの傾向「緯度を固定した場合には、経度方向速度の経度方向の距離勾配(歪み速度に相当)は一定であり、また、この歪み速度は緯度方向の距離と相関関係をもつ」と一致した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、首都大学東京の山崎晴雄教授には、有意義なご助言をいただきました。産業技術総合研究所の吉岡敏和氏には、活断セグメントの位置データをご提供いただきました。防災科学技術研究所岡田義光氏には、Okada Modelをご提供いただきました。(株) ヴィジブルインフォメーションセンターの横山直美氏、富田賢一氏、龍福進氏には、列島の水平速度の空間分析に関してご協力をいただきました。また、本研究報告をまとめるにあたり、日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門の安江健一氏、安全研究センターの松末和之氏には重要なご指摘をいただきました。本研究では、電子基準点データは国土地理院の GEONET、地震の履歴データは防災科学技術研究所の F-net、活火山の噴火の履歴は気象庁の地震・火山月報、活断層データは、産業技術総合研究所の RIO-DB 活断層データベースを使用しました。これら貴重なデータの公開に携わる皆様に深く感謝します。

参考文献

- (1)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 ー地層処分研究開発第2次取りまとめー 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, 1999
- (2)国土地理院, GPS連続観測システム, 国土地理院HP, http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_1.html, 2008
- (3)Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile fault in a half space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992
- (4)国土地理院, 電子基準点日々の座標データ, 国土地理院 HP, http://terras.gsi.go.jp/inet_NEW/ngs060.php, 2005
- (5)国土地理院, 保守作業リスト, 国土地理院 HP, http://terras.gsi.go.jp/inet_NEW/ngs060.php, 2005
- (6)防災科学技術研究所, F-net検索, 防災科学技術研究所 HP, <http://www.bosai.go.jp/japanese/info/labo/disclosure/index.html>, 2004
- (7)気象庁, 地震・火山月報及び年報, 気象庁 HP, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_report/monthly.htm, 2004
- (8) 気象庁, 火山の資料, 気象庁 HP, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/volcano.html>, 2004
- (9)産業技術総合研究所, 日本の第四紀火山, 産業技術総合研究所 HP, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm, 2008
- (10) Smithsonian National Museum of Natural History , VEI (Volcanic Explosivity Index), Global Volcanism Program, <http://www.volcano.si.edu/gvp/world/eruptioncriteria.cfm#VEI>, 2004
- (11)長澤寛和・武田聖司・木村英雄, GPSデータを用いた地殻変動データ整理手法, 日本原子力学会「2004年秋の大会」, 日本原子力学会, 2004
- (12)地震調査研究推進本部, 地震調査研究推進本部 HP, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>, 2008
- (13)活断層研究会編, 新編 日本の活断層ー分布図と資料, 東京大学出版会, p.437, 1991
- (14)吉岡敏和・伏島祐一郎・栗田泰夫・宮本富士香, 活断層データベースの構造とデータ構成, 活断層・古地震研究報告書, No.3, pp.185-190, 2003
- (15)佐藤良輔 編著, 阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典 共著, 日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- (16)地震調査委員会, 地震調査研究推進本部, 全国を概観した地震動予測地図, 分冊 1 確率論的地震動予測値図の説明, 2005
- (17) 産業技術総合研究所, 活断層研究センター, 活断層データベース, RIO-DB, <http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/cgi-bin/index.cgi>, 2007
- (18)Mogi, K., Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around them, Bull. Earthq., Res., Inst., 36, pp.99-134, 1958
- (19)気象庁, 気象等の基礎知識, 火山, 気象庁 HP, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan.html>, 2008
- (20) 気象庁, 火山噴火予知連絡会, 火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類 (ランク分け) について, 報道発表資料, 2003
- (21)気象庁, 火山活動度レベル, 火山活動度レベル表, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/level_toha/level_toha.htm, 2006
- (22) Heki, K., Miyazaki, S. and Tsuji, H., Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, Nature, 386, pp.595-598, 1997
- (23)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

- (24)栗田泰夫, 東北本州弧内陸における断層の活動セグメントーその規模と活動性ー, 日本列島の6Ma以降の地殻変動史, 月刊 地球, vol.21, No.9, pp.564-568, 1999
- (25)SOEST, SOEST HP, maintained by Wessel P., The Generic Mapping Tools, <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, 2007
- (26)橋本学, 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I) : 本州・四国・九州, 地震 2, 43, pp.13-26, 1990
- (27)鷺谷 威, 明治期以降の歪み集中帯, 第9章, 大竹政和・平朝彦・太田陽子 編集, 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, pp.133-150, 2002

付 録

資料－1 活火山の活動間隔の設定

火山・マグマ活動は、地震と比較すると活動期間が長く GPS 等で地殻変動を観測することが容易であるが、平均的な活動間隔や代表的な変位をもたらす噴火の形態や規模に係るデータが整備されていないのが現状である。その理由としては、周辺に変位をもたらす規模の噴火の平均的な活動間隔が極めて長期であり活火山の数が活断層と比較してはるかに少ないため観測の機会が限定されていること、活火山によって噴火の形態を支配するマグマの種類が異なり、また同一の活火山であっても噴火毎にマグマの種類が異なること等があげられる。

ここでは、地殻変動の累積量推定モデルにおける活火山の扱いについて検討を行うため、活火山の活動間隔を設定したプロセスを示す。

平均活動間隔は、2003年1月における火山噴火予知連絡会による活火山活動度の分類（ランク分け）⁽¹⁾と火山活動度レベル⁽²⁾を用いて設定した。なお、火山活動度レベルは平成19年に廃止され、現在、噴火警戒レベルが用いられているが、長期的な予測において火山活動度レベルは理解しやすいのでこれを用いた。活動履歴のデータとしては、気象庁の火山活動度レベルに記載された履歴を用いるが、記載が無い場合には日本の第四紀火山のデータ⁽³⁾をここでは用いた。活火山活動度の分類の定義を表 App. I-1 に示す。また、気象庁による火山活動度レベルの定義を表 App. I-2 に、火山活動度レベルを提供している活火山の一覧を表 App. I-3 に示す。なお活火山は、複数の火口から成立している場合がある。本調査では、気象庁や産業技術総合研究所が定義する活火山を1つとして扱い、複数の火口の履歴が存在する場合には、履歴を重ね合わせて平均活動間隔を求めた。下記に設定方法を示す。

- 気象庁により火山活動度レベルが設定されている火山のうち、レベル5の活動履歴が明瞭なものは、活動履歴から平均活動間隔を算出する。
- 気象庁により火山活動度レベルが設定されている火山のうち、レベル5の活動履歴において「有史以来の記録がない」との記載があるものについては、平均活動間隔を2,000年とする。
- 気象庁により火山活動度レベルが設定されていない火山で火山活動度がA～Cランクであり、地殻変動が想定される噴火の活動履歴が明瞭な火山は、噴火履歴から平均活動期間を算出する。
- 火山活動度がAランクであり、活動履歴が不明瞭でかつ火山の履歴から規模の大きな噴火の判別が困難な火山は、同一ランクの気象庁火山活動度レベルの履歴の記載がある活火山の平均値（300年）とする。
- 火山活動度がBランクであり、地殻変動を伴う活動履歴が不明瞭なものは、平均活動間隔を有史以来の2,000年とする。
- 火山活動度がC又はDランクであり、地殻変動を伴う活動履歴が不明瞭なものは、平均活動間隔を活火山の定義で設定された10,000年とする。
- ランク分け対象外の活火山は、地殻変動を伴う活動履歴が不明瞭なので平均活動間隔を活火山の定義で設定された10,000年とする。

気象庁により火山活動度レベルが設定されている火山について平均活動間隔を求めた結果を表 App. I-4 に示す。AランクとBランクの平均活動間隔の平均値は、各々300年、2000年である。

表 App. I-5～App. I-6 に108の活火山の平均活動間隔を設定した結果を示す。なお、これらの数値は、火山の影響が地震の影響に対してどの程度であるかを相対的に把握するために使用するデータであることに注意が必要である。

表 App. I -1 活火山活動度の分類の定義

ランク	説明	ランク毎の火山の数 (個)
A	100年活動度または1万年活動度が特に高い活火山	13
B	100年活動度または1万年活動度が高い活火山	36
C	100年活動度および1万年活動度がともに低い活火山	36
対象外の火山	火山のデータが不足しているためランク分け対象外となっている	23

表 App. I -2 火山活動度レベルの区分

レベル	噴火活動	備考
5	極めて大規模な噴火活動	噴火活動等広域で警戒が必要
4	中～大規模噴火活動等	火口から離れた地域にも影響の可能性があり、警戒が必要
3	小～中規模噴火活動等	火山活動に十分注意する必要がある
2	やや活発な火山活動	火山活動の状態を見守っていく必要がある
1	静穏な火山活動	噴火の兆候はない
0	長期間火山の活動の兆候がない	

表 App. I -3 火山活動度レベルが設定された活火山の一覧

火山名	所在地
吾妻山	福島県
草津白根山	群馬県、長野県
浅間山	群馬県、長野県
伊豆大島	東京都
九重山	大分県
阿蘇山	熊本県
雲仙岳	長崎県
霧島山	宮崎県、鹿児島県
桜島	鹿児島県
薩摩硫黄島	鹿児島県
口永良部島	鹿児島県
諏訪之瀬島	鹿児島県

表 App. I -4 気象庁が火山活動度を示している活火山と想定される平均活動間隔

火山名	活動度 ランク	活動間隔 (年)	履歴(活動度レベル4~5を対象とした)
雲仙岳	A	160	1663年, 1792年, 1991年の噴火履歴から設定.
諏訪之瀬島	A	190	レベル5として1813年の噴火による文化溶岩流の記載はあるが、その前後の履歴が不明である。レベル4において1844年明治溶岩流の記載はあるがその後の記載がみられない。そのため、1813年以降2006年に至るまで1回として間隔を仮設定した。
伊豆大島	A	210	安永の大噴火(1777-1779), 1986年山腹割れ目噴火(ただしレベル4)の履歴から設定.
桜島	A	240	3回のプリニー式噴火(1471-1476年(文明大噴火), 1779年(安永大噴火), 1914年(大正大噴火))を対象とした。ここでは、1946年(昭和大噴火)を、溶岩流が発生したが被害が少ない、ブルカノ式の噴火であるということから、その他の噴火と比較して規模が小さいと判断し除外した。
浅間山	A	680	1108年, 1783年の二つの大噴火の履歴により設定.
薩摩硫黄島	A	-	レベル4として、1934年の火山活動に伴う昭和硫黄島の形成があるものの、活動履歴が不明である。
阿蘇山	A	-	噴石飛距離が1kmを超える噴火が1933-1990までに数回(5回)生じているが地殻変動との関連性が不明瞭
霧島山	B	460	新燃岳(1716)、御鉢(788、1235)の数値を組合せ使用。レベル5を対象。
九重	B	2000	有史以来なし
草津白根山	B	2000	有史以来なし
吾妻山	B	2000	有史以来なし
口永良部島	B	-	記載なし
Aランクの平均値		300	レベル5の設定なAランクの活火山は、7火山のうち5火山である。
Bランクの平均値		2000	レベル5の設定なBランクの活火山は、5火山のうち4火山である。

表 App. I -5 活火山の平均活動間隔 (1/2)

No.	地域	火山名		活動度 ランク	平均活 動間隔 (年)	平均活動間隔設定根拠
		気象庁	日本の第四紀 火山			
1	北方四島	茂世路岳	茂世路岳	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
2	北方四島	散布山	散布山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
3	北方四島	指臼山	指臼山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
4	北方四島	小田萌山	小田萌山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
5	北方四島	挾捉焼山	挾捉焼山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
6	北方四島	挾捉阿登佐岳	挾捉阿登佐岳	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
7	北方四島	ベルタルベ山	ベルタルベ山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
8	北方四島	ルルイ岳	ルルイ岳	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
9	北方四島	爺爺岳	爺爺岳	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
10	北方四島	羅臼山	国後羅臼山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
11	北方四島	泊山	泊山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
12	北海道	知床硫黄山	知床硫黄山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
13	北海道	羅臼岳	羅臼岳	B	600	約2000年間に3回のプリニー式噴火が生じていることから設定した。
14	北海道	摩周	摩周	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
15	北海道	アトサヌプリ	アトサヌプリ	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
16	北海道	雌阿寒岳	雌阿寒岳	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
17	北海道	丸山	東大雪丸山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
18	北海道	大雪山	大雪山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
19		十勝岳	十勝岳	A	300	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクAの代表値300年とした。
20	北海道	利尻山	利尻山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
21	北海道	ニセコ	ニセコ火山群	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
22	北海道	羊蹄山	羊蹄山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
23	北海道	樺前山	樺前山	A	100	火砕流及び溶岩ドームの形成の年代(1667年、1739年、1867年)から設定した。
24	北海道	恵庭岳	恵庭岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
25	北海道	倶多楽	倶多楽・登別	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
26	北海道	有珠山	有珠山	A	60	昭和南山の形成(1943年)から2000年の噴火までの期間とした。
27	北海道	北海道駒ヶ岳	北海道駒ヶ岳	A	80	火砕流の発生、新火口の形成に関連する1600年以降の履歴(1640年、1694年、1856年、1929年、1942年)をもとに算出した。
28	北海道	恵山	恵山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
29	北海道	渡島大島	渡島大島	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
30		伊豆大島	伊豆大島	A	210	安永の大噴火(1777-1779)～1986年山腹割れ目噴火(レベル4)までの期間とした。
31		利島	利島	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
32		新島	新島(火山群)	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
33		神津島	神津島(火山群)	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
34	伊豆南方	三宅島	三宅島	A	40	溶岩流が流出した1600年以降の履歴(1643年、1712年、1763年、1835年、1874年、1940年、1992年、1983年、2000年)を基に算出した。
35	伊豆南方	御蔵島	御蔵島	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
36.1	伊豆南方	八丈島	八丈西山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
36.2	伊豆南方	八丈島	八丈東山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
37	伊豆南方	青ヶ島	青ヶ島	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
38	伊豆南方	ペヨネース列岩	明神礁	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
39	伊豆南方	須美寿島	須美寿島	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
40	伊豆南方	伊豆鳥島	鳥島	A	300	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクAの代表値300年とした。
41	伊豆南方	姉崎岩	姉崎岩	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
42	伊豆南方	西之島	西之島	B	30	1973-1974年 海底噴火 & ストロンボリ式噴火による新島出現より2006年現在までの期間とした。
43	伊豆南方	海形海山	海形海山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
44	伊豆南方	海徳海山	海徳海山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
45	伊豆南方	噴火浅根	噴火浅根	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
46	伊豆南方	硫黄島	硫黄島	B	40	1889年、1922年、1976年の水蒸気噴火から設定した。
47	伊豆南方	北福徳堆	北福徳堆	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
48	伊豆南方	福徳岡ノ場	福徳岡ノ場	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
49	伊豆南方	南日吉海山	南日吉海山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
50	伊豆南方	日光海山	日光海山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
51	本州	恐山	恐山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
52	本州	八甲田山	八甲田山(北八甲田山)	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
53	本州	岩木山	岩木山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
54	本州	十和田	十和田カルデラ	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
55	本州	秋田焼山	秋田焼山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
56	本州	八幡平	八幡平	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
57	本州	岩手山	岩手山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
58	本州	秋田駒ヶ岳	秋田駒ヶ岳	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
59	本州	鳥海山	鳥海山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
60	本州	栗駒山	栗駒山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
61	本州	鳴子	鳴子火山群	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
62	本州	肘折	肘折	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
63	本州	蔵王山	蔵王山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
64	本州	吾妻山	吾妻山	B	2000	有史以来の大規模噴火の記録が存在しないため2000年とした。
65	本州	安達太良山	安達太良山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
66	本州	磐梯山	磐梯山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
67	本州	沼沢	沼沢	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。

表 App. I -6 活火山の平均活動間隔 (2/2)

No.	地域	火山名		活動度 ランク	平均活 動間隔 (年)	平均活動間隔設定根拠
		気象庁	日本の第四紀 火山			
68	本州	那須岳	那須岳	B	470	大規模水蒸気噴火の間隔1408年～1881年により設定した。
69	本州	高原山	高原山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
70	本州	日光白根山	日光白根山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
71	本州	燧ヶ岳	燧ヶ岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
72	本州	赤城山	赤城山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
73	本州	榛名山	榛名山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
74	本州	草津白根山	草津白根山	B	2000	有史以来の大規模噴火の記録が存在しないため2000年とした。
75	本州	浅間山	浅間山	A	680	1108年と1783年の二つの大噴火から設定した。
76	本州	妙高山	妙高山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
77	本州	新湯焼山	新湯焼山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
78	本州	弥陀ヶ原	立山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
79	本州	焼岳	焼岳	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
80	本州	アカンダナ山	焼岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
81	本州	乗鞍岳	乗鞍岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
82	本州	白山	白山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
83	本州	御嶽山	御嶽山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため2000年間隔とした。
84	本州	横岳	北八ヶ岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
85	本州	富士山	富士山	B	180	800年～1707年間(800年, 864年, 937年, 1033年, 1435年, 1707年)の溶岩流又はプリニー式噴火による火口の形成に関連した噴火6回により設定。
86	本州	箱根山	箱根山	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
87	本州	伊豆東部火山群	伊豆東部火山群	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
88	本州	三瓶山	三瓶山	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
89	本州	阿武火山群	阿武火山群	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
90	九州沖縄	由布岳	由布岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
91	九州沖縄	鶴見岳・伽藍岳	鶴見岳	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
92	九州沖縄	九重山	九重山	B	2000	活動度ランクBであり有史以来噴火履歴がないことが確認されていることから2000年とした。
93	九州沖縄	阿蘇山	阿蘇山	A	70	火砕流の発生、新火口の形成に関連する履歴(1485年、1522年、1558年、1587年、1828年、1884年、1958年、1979年)をもとに算出した。
94	九州沖縄	雲仙岳	雲仙岳	A	160	1663年、1792年、1991年の3回の大規模噴火が生じたとして設定した。
95	九州沖縄	福江火山群	福江火山群	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
96	九州沖縄	霧島山	霧島山	B	460	新燃岳(1716年)、御鉢(788年、1235年)の噴火履歴を組合せ、推定した。
97	九州沖縄	米丸・住吉池	米丸・住吉池	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
98	九州沖縄	若尊	若尊	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
99	九州沖縄	桜島	桜島	A	240	3回のプリニー式噴火(1471-1476年(文明大噴火)、1779年(安永大噴火)、1914年(大正大噴火))により設定した。1946年(昭和の大噴火)は、ブルカノ式の噴火であることから他の噴火と比較して規模が小さいと判断し除外した。
100	九州沖縄	池田・山川	池田	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
101	九州沖縄	開聞岳	開聞岳	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
102	九州沖縄	薩摩硫黄島	薩摩硫黄島	A	70	1934年の新島出現から2006年現在に至るまで地殻変動を伴う噴火が生じていないと想定し設定した。
103	九州沖縄	口永良部島	口永良部島	B	2000	有史以来の大規模噴火の記録が存在しないため2000年とした。
104	九州沖縄	口之島	口之島	C	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。
105	九州沖縄	中之島	中之島	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
106	九州沖縄	諏訪之瀬島	諏訪之瀬島	A	190	溶岩流が流出した1813年噴火を基に2006年現在との差から算出した。
107	九州沖縄	硫黄島島	硫黄島島	B	2000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため活動度ランクBの代表値2000年とした。
108	九州沖縄	西表島北北東海底火山	西表島北北東海底火山	D	10000	地殻変動が想定される噴火履歴がないため10000年とした。

資料-1の参考文献

- (1) 気象庁,火山噴火予知連絡会,火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類(ランク分け)について,報道発表資料,2003
- (2) 気象庁,火山活動度レベル,火山活動度レベル表,
http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/level_toha/level_toha.htm, 2006
- (3) 産業技術総合研究所,日本の第四紀火山,産業技術総合研究所 HP,
http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm, 2008
- (4) 産業技術総合研究所, RIO-DB, 活火山DB,
http://www.aist.go.jp/RIODB/strata/VOL_JP/active_rank.htm, 2005

資料-2 活動セグメントの幅の算定式

東北地方において所定の期間における地震活動に伴う地殻変動量を積算するには、各々の地震について、地震の活動の間隔、地下深部の震源断層の幅、長さ、1回当たりの平均的な変位量を求める必要がある。海溝型地震に関しては、断層モデルが構築されておりこれらの情報を入手することができる。一方、内陸地震については、産業技術総合研究所のRIO-DB 活断層データベース⁽¹⁾⁽²⁾により、地表地震断層の延長、活動の間隔、および1回当たりの変位量の情報が提供されているが、断層モデルとして整理されていない。そのため、以下、内陸地震に関する断層モデルの扱いについて示すこととする。

地表地震断層の長さ L_E は、図 App. II-1 に示すように必ずしも震源断層の延長 L_S とは一致しないが、経験的に L_E と地震モーメント (M_0) や地震マグニチュード (M_w) との関連性の検討が行われている。

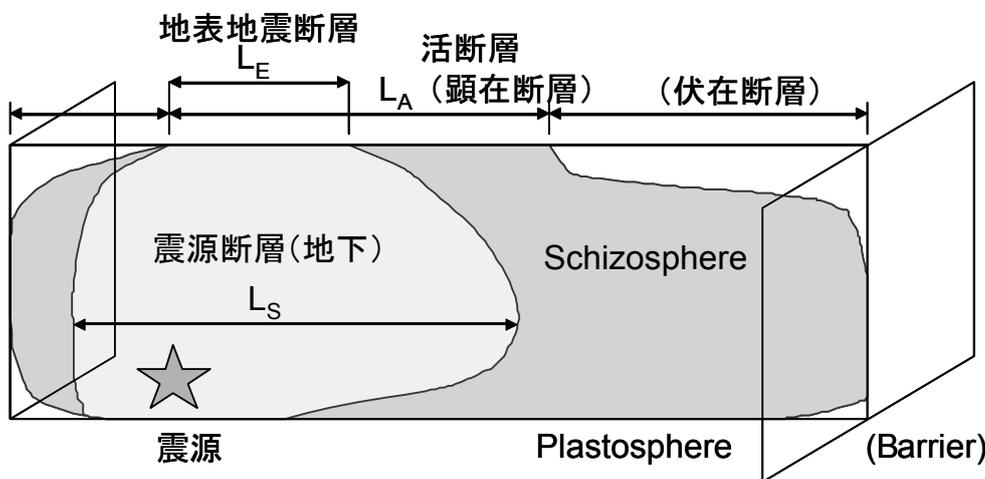


図 App. II-1 活断層、震源断層、地表断層の相互関係を示すモデル (垣見,MS) : 松田 (2003) ⁽³⁾ による加筆部を参考に作成した.

松田(1975)⁽⁴⁾は、地表にその影響が現れるような規模の地震について、地表地震断層の延長 L_E とマグニチュードに相関があることを示している。また、本調査では、1回の地震について厳密にその変位を求めることを対象としていない。そのため、本調査では、平均的な変位量を求める際の断層モデルの代表値として地表地震断層の長さを用いることとする。観測できない震源断層の上端は、推察する方法がないため、保守的に0kmとする。観測できない震源断層の幅は、地下深部の情報であり、その長さと同様に、調査によって明らかにすることは現段階では不可能である。震源断層の幅は、様々な経験式があるが、本報告では以下のようにして求めた。

松田(1975)⁽⁴⁾は、マグニチュードと地表地震断層の関係として、式(II-1)を示した。この式は、相関分析により経験的に求められたものである。

$$\log(L_E) = 0.6M - 2.9 \dots\dots\dots (II-1)$$

ここで、

- L_E : 地表地震断層の長さ(km) =L
- M : マグニチュード (-)

L : 断層の長さ(km)

松田が使用したマグニチュードは、厳密には気象庁マグニチュードと一致しないが、ここではほぼ一致すると考える。

$$M = M_J \dots\dots\dots (II-2)$$

ここで、

M_J : 気象庁マグニチュード (-). M_{JMA} で示される場合もある。

気象庁マグニチュードとモーメントマグニチュードの関係は、経験的に図 App. II-2 のように示される。図 App. II-2 の作成で使用した地震は、表 App. II-1 に示す通りであり、松田(1975)が示す関係が成立するために必要な地震の規模の条件 ($M6.8$ 以上) を満足している。

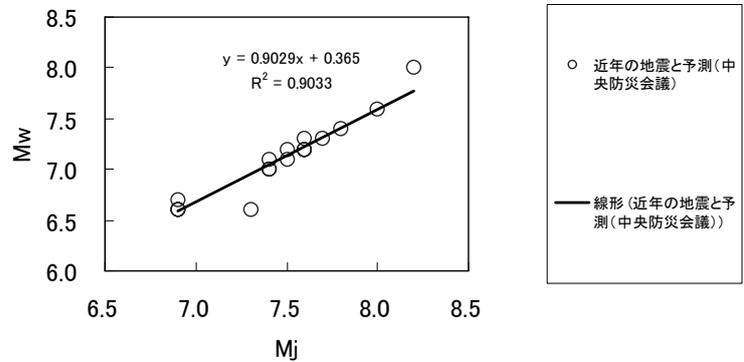


図 App. II-2 気象庁マグニチュードとモーメントマグニチュードとの関係

図 App. II-2 に示す相関の式は、中央防災会議⁽⁵⁾の予測から求めた値であるが、いくつかの近年の地震を加えても十分に高い相関をもつと考えられる。そのため、気象庁マグニチュードとモーメントマグニチュードの関係式を以下の通り設定する。

$$M_W = 0.90M_J + 0.37 \dots\dots\dots (II-3)$$

ここで、

M_W : モーメントマグニチュード (-)

モーメントマグニチュードと地震モーメントの関係は、式(II-4)の通りである。地震モーメントは、式(II-5)によって算出される。

表 App. II-1 気象庁マグニチュードとモーメントマグニチュードとの関係

応急対策 地震番号	地震名	Mj	Mw	文献
1	猿投-高浜断層帯の地震	7.6	7.2	中央防災会議事務局,中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(第26回)参考資料 中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布等の検討資料集,2006
2	名古屋市直下M6.9の地震	6.9	6.6	
3	加木屋断層帯の地震	7.4	7.1	
4	養老-桑名-四日市断層帯の地震	7.7	7.3	
5	布引山地東縁断層帯東部の地震	7.6	7.3	
6	花折断層帯の地震	7.4	7	
7	奈良盆地東縁断層帯の地震	7.4	7	
8	京都西山断層帯の地震	7.5	7.2	
9	生駒断層帯の地震	7.5	7.1	
10	上町断層帯の地震	7.6	7.2	
11	阪神地域直下M6.9の地震	6.9	6.6	
12	中央構造線断層帯(金剛山地東縁-和泉山脈南縁)の地震	7.8	7.4	
13	山崎断層帯主部の地震	8	7.6	国土地理院のモデルなど
-	鳥取県西部地震	7.3	6.6	
-	2003年十勝沖地震	8.2	8	
-	2007年能登半島地震	6.9	6.7	

$$M_w = (\log(M_0) - 9.1) / 1.5 \dots\dots\dots (II-4)$$

$$M_0 = \mu \times D \times S = \mu \times D \times L \times W \times 10^6 \dots\dots\dots (II-5)$$

ここで、

- M_0 : 地震モーメント(Nm)
- μ : 断層の剛性率 (N/m²)
- D : 断層の変位(m)
- S : 断層の面積(m²)
- W : 断層の幅 (km)
- L : 断層の長さ (km)

式(II-1)~(II-5)を用いて W を求めると以下の通りとなる。

$$W = \frac{10^{(2.25 \times \log(L_E) + 10.18)}}{\mu \times D \times L_E} \dots\dots\dots (II-6)$$

又は

$$W = 10^{(\log(L_E^{1.25} / (\mu \times D)) + 10.18)} \dots\dots\dots (II-7)$$

資料-2の参考文献

- (1) 吉岡敏和, 伏島祐一郎・栗田泰夫・宮本富士香, 活断層データベースの構造とデータ構成, 活断層・古地震研究報告書, No.3, pp.185-190, 2003
- (2) 産業技術総合研究所,活断層研究センター, 活断層データベース,RIO-DB,
<http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/cgi-bin/index.cgi>, 2007
- (3)松田時彦, 活断層からの地震の評価 -現状と課題-, Fukadaken Library, 深田研ジオ2003, フォーラム 深田地質研究所, p.75, 2003
- (4)松田時彦, 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 28, pp.269-283, 1975
- (5)中央防災会議, 中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(第26回)参考資料 中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布等の検討資料集, 2006

資料－3 地震の影響範囲に関する検討

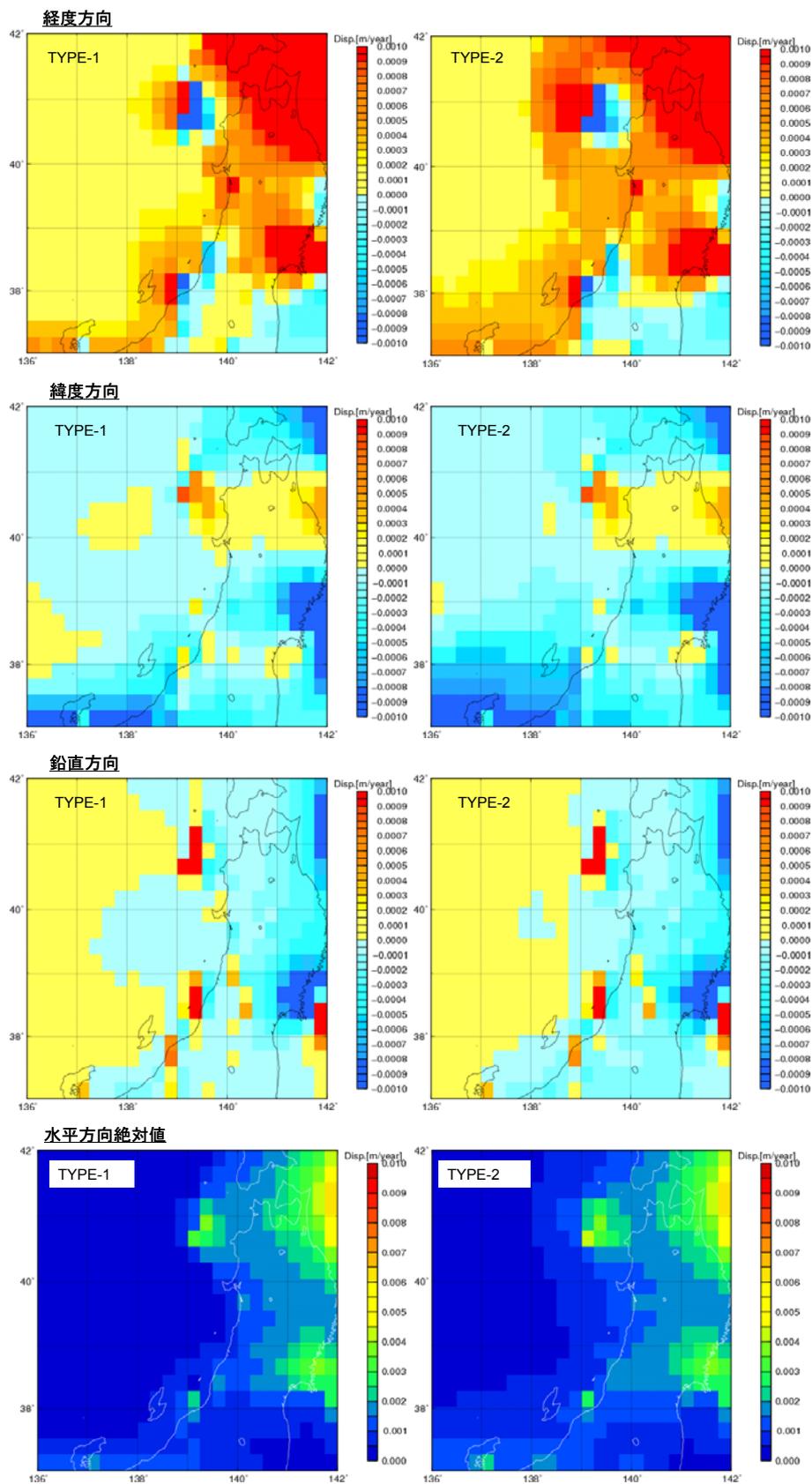
5章 地殻変動の累積量推定モデルの適用例－東北地方の場合－では、地震の影響範囲を固定している。この条件は、一時的な動きの分析により経験的に設定したものである。ここでは、影響範囲を固定することに伴う一時的な動きの算出結果への影響について検討する。5章のケースと区別するために、以下のように影響範囲の違いをTYPE1とTYPE2で区別することとする。

- TYPE1：内陸地震の場合（活動セグメント）100km
内陸地震以外の場合（プレート境界型地震や沈み込むプレート内部地震等）400km
- TYPE2：内陸地震の場合（活動セグメント）150km
内陸地震以外の場合（プレート境界型地震や沈み込むプレート内部地震等）500km

5章と同一の活動セグメント等の地震を考慮した場合の一時的な動きは、図 App. III-1 のように示される。図は、ハワイ大学が開発した GMT (The Generic Mapping Tools) ⁽¹⁾ を用いて作成した。経度方向速度、緯度方向速度、鉛直方向速度、および水平方向速度は、TYPE1 と TYPE2 との間で差がほとんど生じていない。したがって、東北における一時的な動きは、地震の影響範囲を固定し計算できると考えられる。

資料－3 の参考文献

- (1) SOEST, SOEST HP, maintained by Wessel P., The Generic Mapping Tools, <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, 2007



注)

図 App.III-1 地震の影響（速度）計算結果：左図（TYPE-1）の影響範囲はプレート境界型地震・海底地震：400km、内陸地震：100km、右図（TYPE-2）はそれぞれ 500km、150km。

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加減速	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

