

総説

関東平野の地下における新第三系の年代と地震波速度

林 広樹*・柳沢幸夫**・武田哲也***・関口渉次***・笠原敬司****

Geologic age and seismic velocity of Neogene sequences beneath the Kanto Plain, central Honshu, Japan

Hiroki Hayashi*, Yukio Yanagisawa**, Tetsuya Takeda***,
Shoji Sekiguchi*** and Keiji Kasahara****

* 島根大学総合理工学部, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

** 産業技術総合研究所地質情報研究部門, Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan / AIST

*** 防災科学技術研究所, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

**** 東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Abstract

Seismic velocity structure beneath the Kanto Plain plays an important role for estimating earthquake hazard of Tokyo Metropolitan Area. We present experimental equations of seismic velocity with depth and geologic age for Neogene sedimentary sequences beneath the Kanto Plain. Total sixteen deep wells in the Kanto Plain are compiled in the present study. The seismic velocity for Neogene sedimentary rocks is given by the experimental equations $V_p = 2.37D^{0.20} + 4.49 \times 10^{-2}T - 0.21$ and $V_s = 0.99D^{0.46} + 1.96 \times 10^{-2}T - 6.46 \times 10^{-2}$, where V_p is P-wave velocity in kilometer per second, V_s is S-wave velocity in kilometer per second, D is depth in kilometer and T is depositional age in million years.

Key words: deep well survey, Kanto Plain, Neogene sequences, seismic velocity

1. はじめに

関東平野は日本最大の平野であり、日本の総人口の1/4が集中するだけでなく、日本の政治および経済活動の中心となっている。したがって、関東平野の強震動予測を高精度に行うことは、我が国の都市防災上きわめて重要な課題である。こうした平野域の強震動予測を精度良く行うためには、地下の地震波速度構造を詳細に把握する必要がある。関東平野の地下には場所により4000mを超える厚い新第三系が分布し（鈴木, 2002; 林ほか, 2004b など）、先新第三系と比較して地震波速度の差が大きいため、地震動が増幅される。

関東平野地下の地震波速度構造については、屈

折法や反射法といった地震探査、微動アレイ探査、ボーリングによる検層等の手法により検討されてきた。屈折法探査は1950年代から関東平野の地下構造解析に用いられてきており（長谷川, 1988 や 瀧野, 1995 に詳しい）、一般に2層または3層で近似した地震波速度構造が得られている。反射法地震探査では地下の視覚的な構造断面が得られ、かつ地震波速度も同時に求めることができる。微動アレイ探査は簡便に実施可能であり、また多層近似された三次元のS波速度構造を求めることができるため、近年になって強震動予測を目的とした探査によく用いられている（例えば山田・山中, 2003）。これらの弾性波を用いた探査では、二次元

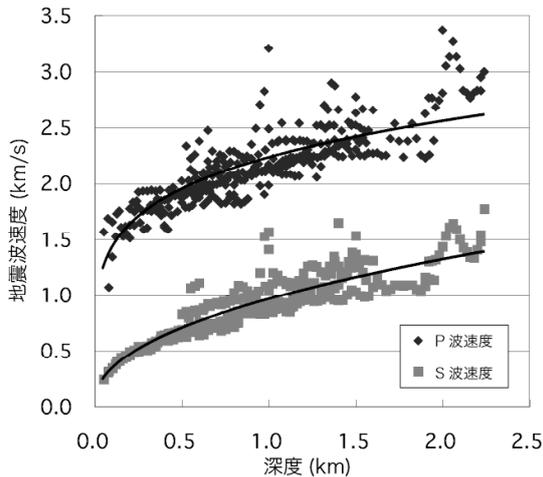


図2. 関東平野の孔井における深度と地震波速度との関係。回帰曲線の式は式(1)と式(2)で示した。

とほぼ同様の周波数帯を用いて（一般にP波で10-80 Hz, S波で10-60 Hzの範囲でスイープ発振）測定されている。強震動予測という観点からは特にS波速度の構造を知ることが重要であることから、本研究ではVSP法によるデータを採用し、音波検層のデータは岩相との関係を考察する際に用いた。なお、VSP法による地震波速度の測定において、掘削時の孔径の乱れやセメンチングの状態、岩盤の局所的な破碎・変質等の存在が誤差要因となりうる。また、解析過程では、初動走時の読み取りや発振源のオフセット補正時等に誤差が発生しうる。これら誤差を定量的に見積もる事は困難であり、引用元のデータでも誤差が示されていない。しかし、後述の通り大局的に音波検層等の結果と調和的であるため、信頼性があるものと考えられる。

岩柱状図は高橋ほか(1983)、鈴木・高橋(1983, 1985)、鈴木(1996)および鈴木・小村(1999)で公表されているものを用いた。

堆積年代は、原則として林ほか(2004a)によって微化石層序に基づき作成された各孔井の堆積速度曲線を用いて算出したが、岩槻、江東、下総、府中の各孔井については、柳沢ほか(2006)によって改訂された堆積速度曲線を用いた。年代決定には、堆積速度曲線のコントロール・ポイントが連続的に分布している区間を用い、各コントロール・ポイント間は直線で結んで補間した。不整合等で年代に不連続が認められる層準近傍、および

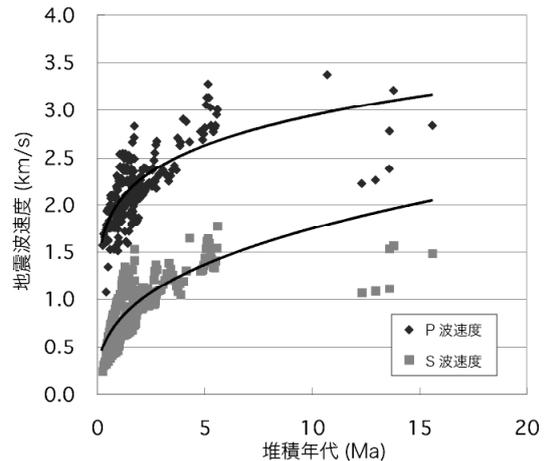


図3. 関東平野の孔井における堆積年代と地震波速度との関係。回帰曲線の式は式(3)と式(4)で示した。

コントロール・ポイントに乏しくて直線補間が困難な層準については、年代決定を行わなかった。なお、微化石分析のサンプリング間隔は深度方向に20-40m前後である。堆積速度は地点や層準によって異なるが、一般に数10 cm-1m/千年であることから(林ほか, 2004a)、十分にコントロール・ポイントによって制約されている層序区間については±0.1Ma前後の精度で年代決定されているものと考えられる。

3. 結果

深度と地震波速度との関係

VSP法により求められた各孔井のP波・S波速度と深度との関係を図2に示す。なお、ここで示したデータは、以降の結果と同じ条件で比較するために、堆積年代が得られている層準のみを用いている。いずれの孔井においても、地震波速度は深度にともなって増大しているが、その関係は直線的ではない。データの分布からは、地震波速度が深度の累乗に比例していることが予想される。この予想に基づき、以下の回帰式を算出した。

$$V_p = 2.23 D^{0.20} \quad \text{—— (式1)}$$

$$V_s = 0.96 D^{0.46} \quad \text{—— (式2)}$$

V_p : P波速度 (km/s), V_s : S波速度 (km/s),
 D : 深度 (km)

求められた回帰式に対する相関係数は比較的高く (V_p では 0.83, V_s では 0.89), 特にS波速度では回帰曲線への収束が良好なのが見て取れる。

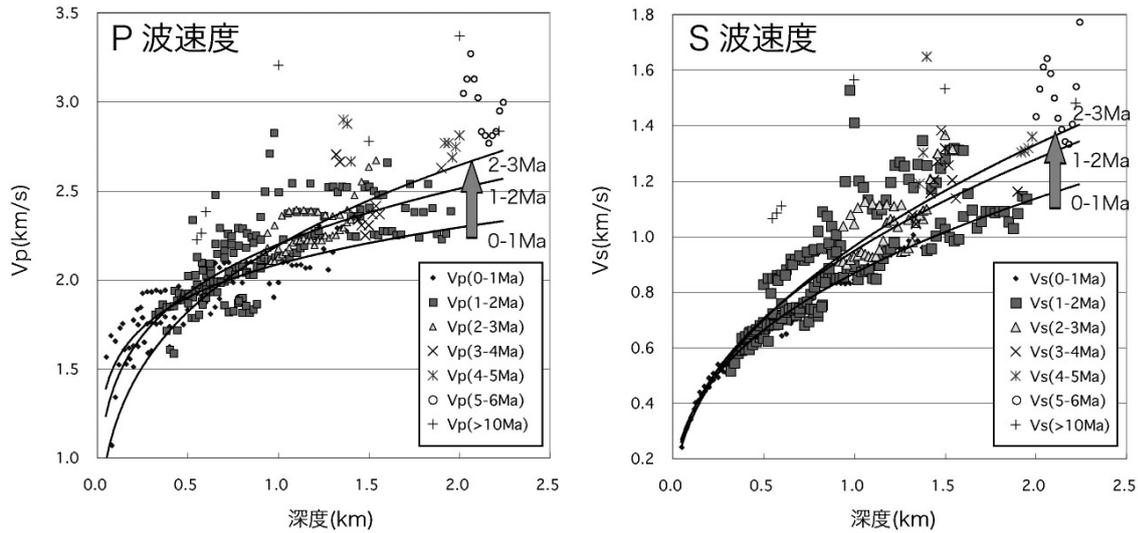


図4. 深度と地震波速度との関係(図2)を年代1 Ma 毎に示した。測定点の多い0-1 Ma, 1-2 Ma, 2-3 Ma の各年代区間については回帰曲線を示している。

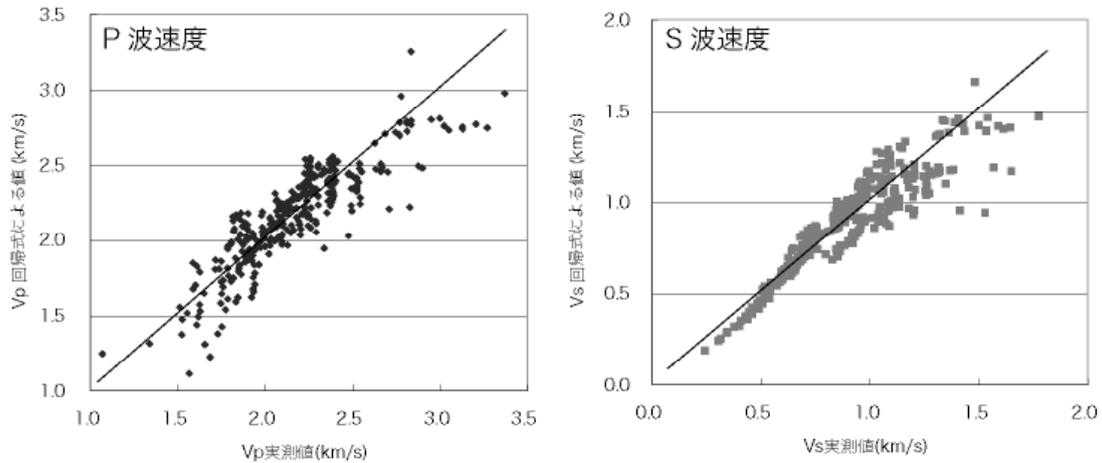


図5. 関東平野の孔井における地震波速度の深度・堆積年代による回帰式(式5, 6)と実測値との比較

堆積年代と地震波速度との関係

VSP 法により求められたP波・S波速度と、堆積速度曲線により求められた堆積年代との関係を図3に示す。この図で後期中新世に相当する年代区間のデータが乏しいのは、この年代の地層を東京都～千葉県北部以北では欠いていることと、この年代の地層が分布する房総半島中部以南では上位の上総層群が厚く発達するために、防災科研で実施した2000m級のボーリングでは回収されなかったことによる。こうした限定されたデータではあるものの、図2の深度—地震波速度の関係と同様に、地震波速度が堆積年代の累乗に比例して増大しているようなパターンが見て取れる。算出された回帰式は以下の通りである。

$$V_p = 2.01T^{0.16} \quad \text{—— (式3)}$$

$$V_s = 0.76T^{0.36} \quad \text{—— (式4)}$$

T: 堆積年代 (Ma)

回帰式に対する相関係数は V_p で 0.72, V_s で 0.70 となり、深度と比較すると若干相関が悪くなる結果となった。なお、多くの孔井では深度に伴って単調に堆積年代が増加するため、この結果は間接的に深度の影響を見ている可能性も否定できない。堆積年代の寄与を確認するため、深度と地震波速度の関係(図2)を堆積年代100万年毎に分けて示したものが図4である。この図によると、多少のばらつきはあるものの、同一深度では堆積年代が大きい(古い)ほど地震波速度が大きくなるという傾向が認められる。特にS波速度ではこの傾向が顕著である。

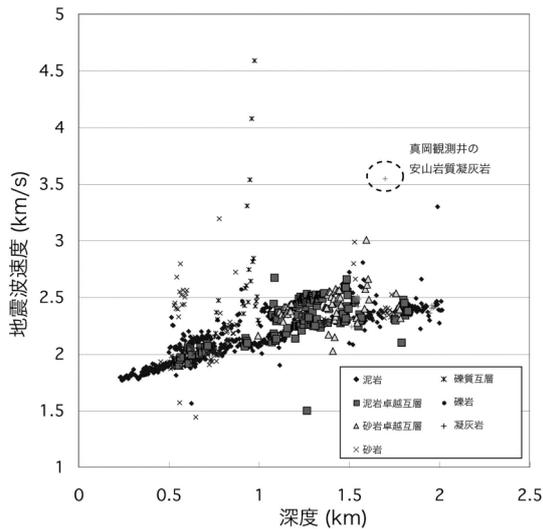


図6. 関東平野の孔井における岩相ごとの深度と地震波速度との関係。地震波速度は音波検層の結果を原データのまま用いている。

深度・堆積年代と地震波速度の関係

これまでの結果により、関東平野の新第三系では、特に深度の累乗と地震波速度の相関が顕著である(図2)。一般に、深度に伴って岩石にかかる拘束圧が高まるため、堆積層の圧密による空隙率の減少とそれに伴う地震波速度の増大が想定される。一方で、堆積年代が地震波速度に影響を与える要因については、流体や熱の作用によるセメンテーションの進行と構成粒子の物理化学的な変化等が考えられるが、具体的な機構については不明な点が多い。以上に基づき、本研究では第一に深度が地震波速度に大きく影響しているものと考え、その残差と堆積年代との関係についてさらに近似式を作成することによって回帰式を求めることとした。得られた式は以下の通りである。

$$V_p = 2.37D^{0.20} + 4.49 \times 10^{-2}T - 0.21 \quad \text{--- (式5)}$$

$$V_s = 0.99D^{0.46} + 1.96 \times 10^{-2}T - 6.46 \times 10^{-2} \quad \text{--- (式6)}$$

得られた回帰式に対する相関係数は V_p で 0.88, V_s で 0.92 となり、深度のみで作成された回帰式と比べて相関が向上した(図5)。なお、 V_p , V_s とも、低速度領域 (V_p で 1.5 km/s 以下, V_s で 0.5 km/s 以下) では僅かに実測値の方が高くなる傾向が認められる。この低速度領域は全て深度 300m 未満の測定点から構成されており、VSP 法の見積もりがやや過大となっている可能性がある。

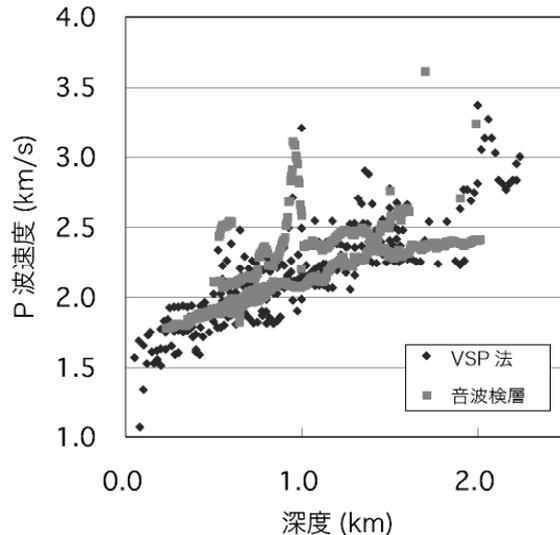


図7. 関東平野の孔井における VSP 法と音波検層の P 波速度の比較。音波検層の結果は深度 50m 区間で移動平均し、平滑化している。

岩相と地震波速度との関係

堆積岩の地震波速度は深度や年代のみではなく、岩相の違いにも影響されることが考えられる。岩相と地震波速度との関係を調べるため、音波検層による P 波速度と深度との関係を、7 種類に区分した岩相(泥岩, 泥岩卓越砂泥互層, 砂岩卓越砂泥互層, 砂岩, 礫質互層, 礫岩, 凝灰岩)ごとに示した(図6)。なお、音波検層のデータは深度 5 m 毎にリサンプリングした値を用いた。音波検層は裸孔で実施されているため、掘削時の孔径の乱れに起因するノイズを多少なりとも含むものと考えられる。また、発振源と受振点の間隔が近い場合、局所的な岩相変化や変質、破碎等の影響を大きく受ける可能性がある。しかし、本研究では柱状図に記載された岩相と厳密に対比するため、平滑化処理は行わなかった。なお、音波検層による P 波速度は、VSP 法による結果と大局的に良く一致している(図7)。

作成されたグラフ(図6)を見ると、岩相に関わらずほぼ同様の分布形態を示し、粒度の違いによる系統的な差異は特に認められなかった。ただし、礫質互層については、全体の傾向から明らかに外れた高い P 波速度を示す層準も認められた。また、凝灰岩で約 3.5 km/s の P 波速度を示す層準は真岡観測井の安山岩質凝灰岩であり、一部溶結しているため高速度となっている可能性がある。

4. 考察

本研究では関東平野の地下に分布する新第三系について、深度と堆積年代から地震波速度を求める経験式を作成した。作成された経験式と実測値との相関係数は、 V_p で 0.88, V_s で 0.92 の高い値を示し、関東平野地下の高精度な速度構造モデル構築において一定の有効性があるものと考えられる。しかし、大阪平野（大阪府，2006）や京都盆地（京都市，2005）で作成された経験式と比べると、今回の方がやや相関係数が低くなっている。これは、関東平野が大阪平野や京都盆地よりも広く、また地下に複数の堆積盆が伏在している（例えば高橋ほか，2005）ため、堆積環境やテクトニクス、地温勾配等が場所により異なっていることが影響している可能性がある。また、大阪平野や京都盆地の解析では、前提となる地震波速度として反射法地震探査に基づく速度値を用いている。反射法地震探査では、地表の発振源による反射波を地表で受振するため、本研究で用いた VSP 法と比べて深度や速度の決定精度が低くなる。したがって、本研究では VSP 法による詳細な地震波速度データを用いたために、岩相変化や埋没履歴などの局所的な要因がより詳細に反映され、結果的にモデルへの収束が悪くなっている可能性も指摘される。

岩相による地震波速度の違いは、図 6 で示したように、深度による違いと比べて小さい。例外として、礫質の岩相の場合にはしばしば全体の傾向より著しく大きな地震波速度を示す場合があるが、これは基盤岩類からなる硬質な礫と礫とが接触することにより、局所的に弾性波を高速で伝えた可能性が考えられる。Faust (1951) は、砂岩の方が頁岩よりも平均的な地震波速度が速くなることを指摘し、その要因のひとつとして炭酸塩鉱物による粒子間のセメンテーションの度合いを挙げた。彼は、こうした岩相の違いが平均的なトレンドからの偏差として現れている可能性を指摘している。また、柳沢ほか (2006) は、関東平野の孔井における泥質岩について珪藻化石の保存度と地震波速度との関係を考察し、堆積物中に豊富に含まれる生物源シリカの続成度によって地震波速度が不連

続に変化する可能性を示した。こうした続成度の差異を詳細に明らかにするためには、熱流量の履歴や堆積盆の形成過程といった地域的な特性の影響を考慮し、関東平野をいくつかの地域に分割して同様な解析を行う必要があると考えられる。しかし、大深度ボーリング調査は関東平野の地下に伏在する全ての小規模堆積盆を網羅するようには実施されていないため、孔井データのみに基づく分析ではこうした検討は困難である。関東平野では近年、大規模な反射法地震探査によって詳細な地下構造断面が広域的に得られつつある。こうした反射法地震探査による速度と孔井データを総合することにより、関東平野内での地域差を支配する要因を明らかにできる可能性がある。

さらに強震動予測を目的としたモデルの詳細化を行うためには、大阪平野（関口ほか，2002；大阪府，2006）や京都盆地（京都市，2005）で既に実施されているように、得られた経験式を用いて実際に三次元速度構造モデルを作成し、シミュレーションによる合成波形と観測波形を比較してチューニングを行うことが有効であろう。

謝辞

本稿は、2008 年 1 月 11 日に島根県松江市で開催された第 32 回フィッシュン・トラック研究会における、筆頭著者による特別講演「平野の地下地質と地震災害」の内容の一部について解説したものである。講演の機会を与えて下さった研究集会幹事の島根大学大平寛人博士に御礼を申し上げる。地球科学総合研究所の河村知徳博士および匿名査読者からの御助言は、本稿を改訂するうえで有益であった。本研究は大都市大震災軽減化特別プロジェクト(I)大都市圏地殻構造調査研究（研究代表者：平田 直）の一環として行われた。

文献

- Faust, L. Y., 1951, Seismic velocity as a function of depth and geologic time. *Geophysics*, 16, 192-206.
- 長谷川功, 1988, 地震探査から見た関東平野の基盤構造. *地質学論集*, no. 31, 41-56.

- 林 広樹・堀内誠示・高橋雅紀・笠原敬司, 2004a, 関東平野地下に分布する新第三系の層序と対比. 石技誌, 69, 404-416.
- 林 広樹・高橋雅紀・笠原敬司, 2004b, 関東平野の地下における新第三系の分布. 石技誌, 69, 574-586.
- 堀川晴央・水野清秀・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・末広匡基・Arben Pitarka, 2002, 大阪平野の3次元地盤構造モデルの作成. 活断層・古地震研究報告, no. 2, 291-324.
- 京都市, 2005, 京都盆地の地下構造. 京都市消防局防災対策室, 135p.
- 額綱一起, 1995, 首都圏の地下構造. 物理探査, 48, 504-518.
- 大阪府, 2006, 平成15年度地震関係基礎調査交付金 大阪平野の地下構造調査成果報告書[概要版]. 大阪府, 47p.
- 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・佐竹健治・杉山雄一・Arben Pitarka, 2002, 大阪平野による地震動予測の試み—動的地震破壊シナリオと3次元地下構造モデルによる地震動計算—. 活断層・古地震研究報告, no. 2, 341-357.
- 鈴木宏芳, 1996, 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造. 防災科研報, no. 56, 77-123.
- 鈴木宏芳, 2002, 関東平野の地下地質構造. 防災科研報, no. 63, 1-19.
- 鈴木宏芳・小村健太郎, 1999, 関東地域の坑井データ資料集. 防災科研研究資料, no. 191, 1-80.
- 鈴木宏芳・高橋 博, 1983, 下総深層地殻活動観測井の作井と地質. 国立防災科技センター速報, no. 48, 1-61.
- 鈴木宏芳・高橋 博, 1985, 府中地殻活動観測井の作井と坑井地質. 国立防災科技センター速報, no. 64, 1-84.
- 高橋 博・福田 理・鈴木宏芳・田中耕平, 1983, 岩槻深層地殻活動観測井の作井と坑井地質. 国立防災科技センター速報, no. 47, 1-113.
- 高橋雅紀・林 広樹・笠原敬司・井川 猛・川中 卓・須田茂幸, 2005, 関東平野下に伏在する中新世ハーフグラベン群—地表地質からみた地下地質構造の新たな視点—. 防災科研研報, no. 67, 13-28.
- 山田伸之・山中浩明, 2003, 関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション. 地震, 第2輯, 56, 111-123.
- 山水史生, 2004, 関東地域の中深層地殻活動観測井を利用したVSP法速度構造調査. 防災科研研究資料, no. 251, 1-75.
- 柳沢幸夫・渡辺真人・高橋雅紀・田中裕一郎・木村克己・林 広樹, 2006, 3.2.4. 大深度ボーリング試料による地質年代調査. 大都市大震災軽減化特別プロジェクト1:地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」(平成17年度)成果報告書, 296-329.