第２期中期研究　報告書

研究課題：［１］神奈川県西部地震の発生機構の解明

1.　研究計画の概要

県西部とその周辺は、我が国全体から見ても、地質構造が複雑な地域である。プレートテクトニクス運動からの説明によれば、フィリピン海プレートが日本列島に対して衝突している現場が伊豆半島であり、県西部はこのフィリピン海プレートが県土に対して沈み込んでいる場所であるとされ、それゆえ、県西部は歴史的に規模の大きな地震が繰り返し発生してきた。このため県では、今後起きることが想定される地震に備える目的で県西部地震の被害想定調査を実施してきている。このような特殊な場所に位置する温泉地学研究所の地震研究においては、究極的には地震予知であるが、一般的に、地震が「いつ起きるか」という時間的な予測については現在明確に示すことは困難である。そこで、県西部地震についても地震発生のメカニズムと地震が起きる場所の解明を中期研究計画の目標とし、サブテーマとして、以下の二つを掲げた。

［1－1］県西部地震の震源断層モデルの検証

［1－2］県西部地域の地殻変動モデル構築

2.　５カ年の取り組み及び研究成果

2.1. サブテーマ１「県西部地震の震源断層モデルの検証」

表１：当初の年次計画

<table>
<tr><td colspan="6">［1-1］県西部地震の震源断層モデルの検証</td></tr>
<tr><td>内容・目的</td><td colspan="5">機動観測によって得られた地震波を解析することによって、震源断層に密接に関係する速度不均質構造及び異方性分布を推定する。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次実施計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="2">①地震活動のまとめ
（震源分布、相似地震、深部低周波地震の解析監視）</td><td></td><td></td><td rowspan="3">成果等のまとめ</td></tr>
<tr><td colspan="4">②S 波偏向異常の観測・解析
（足柄平野北部、南部）</td></tr>
<tr><td colspan="4">③地殻構造の解析
（走時、レシーバ関数）</td></tr>
<tr><td>期待された成果</td><td colspan="5">① 地震活動のまとめ：精密震源分布図と想定断層との位置関係
② Ｓ波偏向異常の観測・解析：Ｓ波偏向異常分布と発生位置の推定
③ 地殻構造の解析：
波線追跡法による２・３次元地殻速度構造図
レシーバ関数解析による深部地下構造図</td></tr>
</table>

今後発生が予測されるM7 級の地震についてその震源域を特定するためには、温泉地学研究所の観測点のみでは分解能が不足している。中期計画開始時点では周辺の防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所の定常観測網を含めて 27 観測点のデータをモニターしていたが、順次取りこむ観測点数を増やし、最終的には 76 観測点の速度波形を使用して震源決定を行っている。また、これらの定常点に加え、年度ごとに増減はあるが、最大 22 か所で臨時観測を行っている。1~2 年ごとに観測点を移動して、詳細な 3 次元地震波速度構造・震源メカニズム・異方性などについて検討した。2005 年から 2008 年のデータを用いて地震波速度構造解析を行った結果、足柄平野から丹沢山地にかけて沈み込むフィリピン海プレートが明瞭にイメージングされた。また、丹沢山地の東と西で速度構造が大きく異なり、東側では沈み込むプレートの上にくさび状の低速度帯が存在し、多くの地震がその速度境界で発生していること（プレート境界の地震）が明らかとなった。一方、丹沢山地西側には、明瞭な低速度帯が存在せず、震源は高速度帯の中に厚みをもって分布し、プレート内部での地震と考えられることが分かった（図２）。

また、同様の観測網のデータから震源メカニズムについても詳細な分布が得られており（図３）、丹沢山地東側では、ほぼ関東地震の震源メカニズムと調和的なメカニズム解をもつ地震が多く分布し、関東地震の震源域である相模湾から連続するプレート境界であることを示唆している（図４）。また、西側については、逆断層や横ずれ断層などさまざまなメカニズムが混在しており、複雑な地下構造を反映していると考えられる。

丹沢山地南部から足柄平野付近にかけての震源は、丹沢山地東側の関東地震と同様のメカニズムを持つ地震が分布するプレート境界と考えられる面と、その数キロ下にも平行に震源が分布し、2 重の地震面を形成しているように見える。この下側の地震面で、2008 年 7 月 24 日に M4.4、同 10 月 1 日には M4.9 のこの地域ではめずらしい M4 以上の中規模地震が発生している。これらの地震は逆断層型で、余震の分布からプレート境界と平行な面での破壊であるように見えるが、やや関東地震のメカニズムとは走向が異なっている（図５）。

観測点周辺の応力場、特に主圧縮軸の方向は、S 波スプリッティングを解析することで、速いＳ波の振動方向から推定できる。S 波スプリッティングの解析からは、丹沢山地周辺の観測点で、北西 - 南東方向の LSPD（速い S 波の振動方向）が得られ、GPS などから推定される広域応力場の主圧縮軸の方向と調和的であるのに対し、丹沢山地南部から足柄平野直下を通る波線で、広域応力場よりもやや東西よりの LSPD が得られており、2007 年に発生した二つの中規模地震のメカニズム解と調和的である（図６）。また、GPS の解析からも足柄平野付近で西に傾いた圧縮軸を持つ応力場が推定されており、これらの中規模地震のメカニズムがある程度の広さの領域の応力場を反映していると考えられる。神奈川県西部地域では、小田原地震に代表されるような M７クラスの地震の発生が懸念されているが、石橋（1993）等によれば、小田原に被害をもたらすような M6 程度の地震の記録もあることから、2007 年に発生したような低角な逆断層型の地震がそういった被害地震を引き起こした可能性もある。

課題

第２期中期研究計画の五カ年の研究期間の間に、詳細な地下構造の解析・震源メカニズム、震源分布の解析・Ｓ波スプリッティングの解析などから、県西部地域で発生する地震像について様々な知見が得られてきた。しかしながら、県西部地震の想定断層である西相模湾断裂と考えられるような地下構造の地震学的証拠は、残念ながら得られなかった。ただし、これから直ちに相模湾断裂モデルを否定されるものではないし、むしろ西相模湾断裂以外にも M6 程度の地震を発生させる可能性のある領域が推定できたという点では、県西部地域の地震防災にとって重要な成果と考えられる。

県西部地震は 1990 年代に発生するといわれながら、いまだに発生していない。県西部地域では、歴史的に M7、M6 クラスの地震の被害を繰り返し受けていることを考えれば、今後も地震学的測地学的手法によるモニタリングが必要である。そのためには第２期で明らかになった地下構造をより詳細に解析するとともに、地震活動の時間的な変化などについても注目し、地震活動が、どのような領域で、どのように時間変化しているかといったことを定量的に評価することも必要と考えられる。

実施課題

(1) 県西部周辺地域における地震波形解析に関する研究（H18 年度）
(2) 県西部地震想定域における地殻応力の不均質な領域の抽出（H19 年度）
(3) Ｓ波スプリッティングの解析による神奈川県西部地域の構造境界の解明（H18～H19 年度）
(4) 臨時地震観測網を用いた神奈川県西部周辺地域における 3 次元地震波速度構造解析（H20 年度）
(5) 神奈川県西部域における高精度震源決定ならびに速度構造変化の推定(H20～H22 年度）
(6) 微小地震波形解析による異方性構造及び応力場の時間・空間変化の推定（H20～H22 年度）

論文

(1) 本多亮、棚田俊收、S 波ｽﾌﾟﾘｯﾃｨﾝｸﾞの解析から明らかになった神奈川県西部地域の異方性の空間的・時間的変化、神奈川県温泉地学研究所報告書、38、47-52、2006.
(2) 永井　悟・棚田俊收・本多　亮、気象庁一元化震源に基づいた温泉地学研究所地震データベースの整備と今後の課題、40、51-58, 2008.
(3) 行竹洋平、棚田俊收、本多亮、伊東博、原田昌武、神奈川県西部域におけるメカニズム解の推定、神奈川県温泉地学研究所報告書、38、69-76, 2006.
(4) 吉田明夫、箱根の温泉と群発地震と伊豆衝突テクトニクス、温泉地学研究所報告、42、1-8. 2010

(5) 明田川保、地震クラスター抽出手法の改良、温泉地学研究所報告、42、33-48, 2010.
(6) 行竹洋平、武田哲也、吉田明夫、伊豆衝突帯北縁部における震源及びメカニズム解分布の特徴、温泉地学研究所報告、42、9-18, 2010.

学会発表

(1) 本多亮、棚田俊收、S 波ｽﾌﾟﾘｯﾃｨﾝｸﾞからみた箱根―足柄平野周辺の異方性構造、日本地球惑星科学連合 2006 年合同大会、2006.
(2) 本多亮、棚田俊收、S 波ｽﾌﾟﾘｯﾃｨﾝｸﾞから見た小田原周辺の異方性構造、日本地震学会 2006 年秋季大会、2006.
(3) Honda R., Y. Yukutake and T. Tanada, Spatial variation in the crustal anisotropy around Izu collision zone, Abstract of ASC 2008 Fall Meeting, Tukuba, Japan, X4-020, 2008.
(4) 永井悟、棚田俊收、伊豆衝突帯北東部における 3 次元地震波速度構造と地震活動、2010、日本地球惑星科学連合２０１０年予稿集、SSS024-04 , 2010.
(5) Nagai S. and T. Tanada, Temporary seismic observation in western Kanagawa Prefecture, central Japan, Abstract of ASC 2008 Fall Meeting, Tukuba, Japan. X4-019, 2008
(6) 棚田俊收、行竹洋平、本多亮、伊豆衝突帯である神奈川県西部地域で発生した微小地震および小地震のメカニズム解、日本地球惑星科学連合２０１０年予稿集、SSS024-P06, 2010.
(7) Yukutake, Y, Takeda, T., Honda, R., Yoshida, A., Spatial distribution of precisely determined hypocenters and focal mechanisms in the Izu-Honshu collision zone, central Japan, Abstract of 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, America, 2010
(8) 行竹洋平、武田哲也、吉田明夫、伊豆衝突帯北縁部における震源及びメカニズム解分布の特徴、日本地震学会 2010 年秋期大会予稿集、D11-09, 2010.
(9) 行竹洋平、棚田俊收、武田哲也、伊豆衝突帯周辺における詳細な応力場の空間分布、日本地球惑星科学連合 2009 年予稿集、S221-P007, 2009.
(10) Yukutake, Y., T. Tanada and T. Takeda, 2008, High resolved hypocenter distribution in and around the Izu-collision zone, Abstract of ASC 2008 Fall Meeting, Tukuba, Japan, 2008.
(11) 行竹洋平、棚田俊收、本多亮、伊東博、原田昌武、汐見勝彦、小原一成、神奈川県西部とその周辺域におけるメカニズム解空間分布の特徴、日本地球惑星科学連合 2007 年予稿集、S144-P008, 2007
(12) 行竹洋平、棚田俊收、本多亮、伊東博、原田昌武、2006、神奈川県西部域における応力場の空間変化の推定、日本地震学会予稿集、P206, 2006.

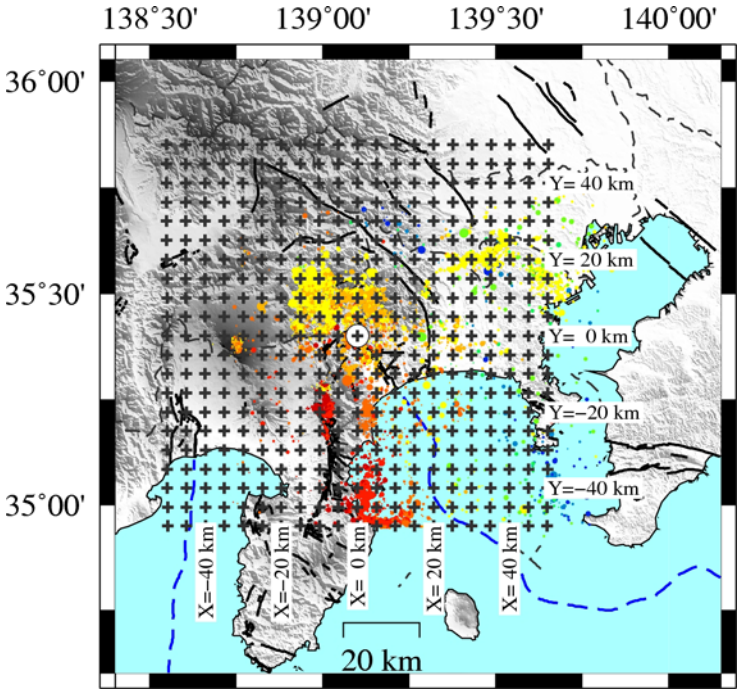


図１　地震波速度構造モデル解析の為のグリッドと観測点配置

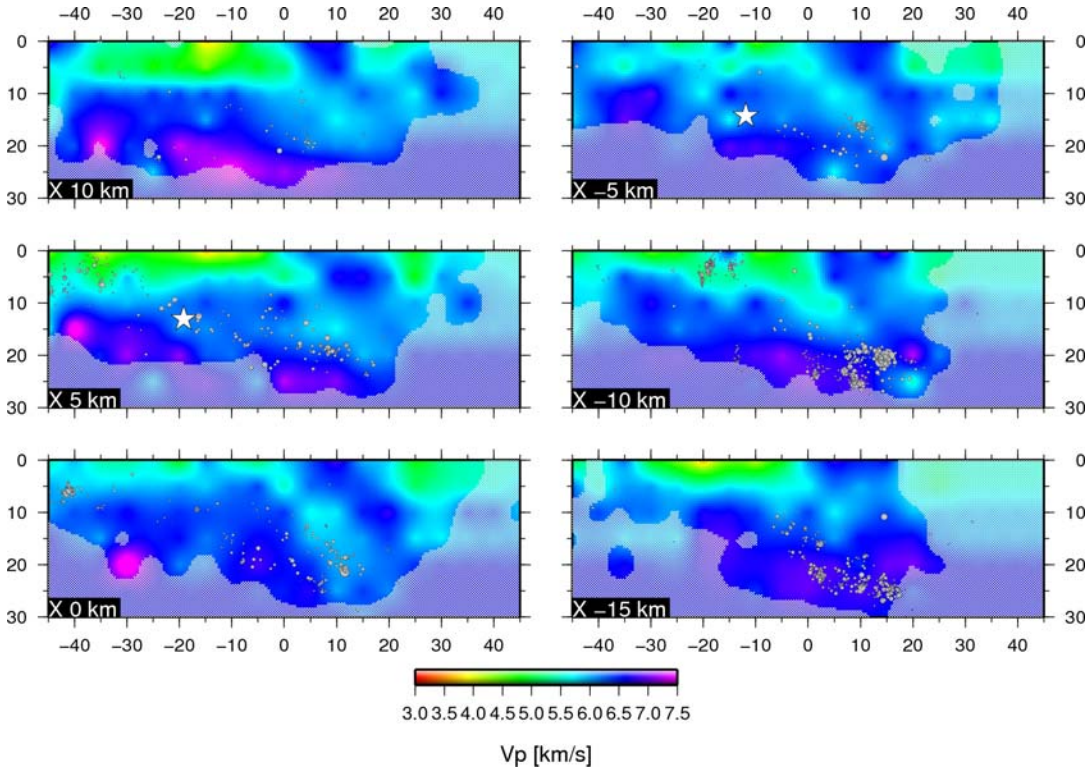


図２　３次元速度構造の断面図。X=0 から－10km の断面では、北に向かって楔形の低速度帯が存在する。低速度帯は X=－15km 断面より西側では明瞭に見えない。また、震源は X=－15km よりも西寄りでは厚みを持って分布し、東側では低速度帯との境界に分布する。

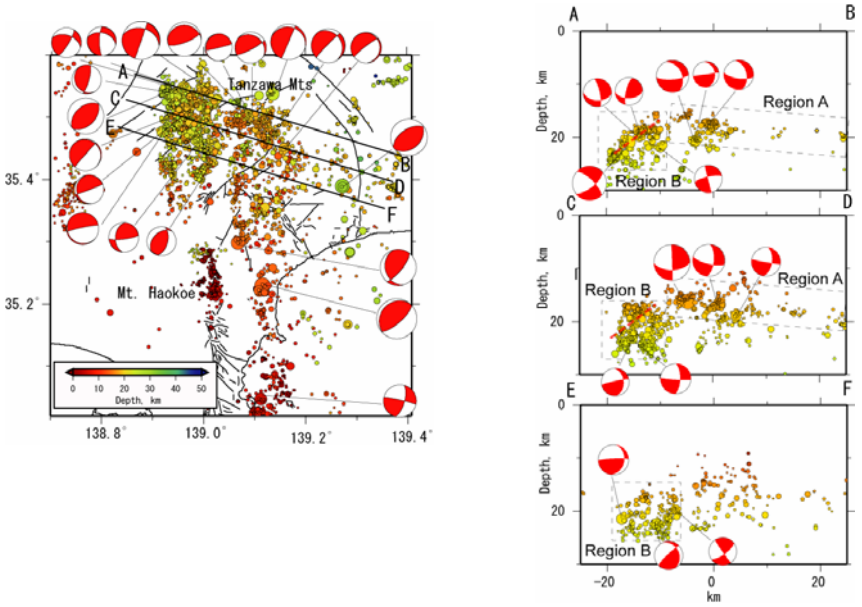
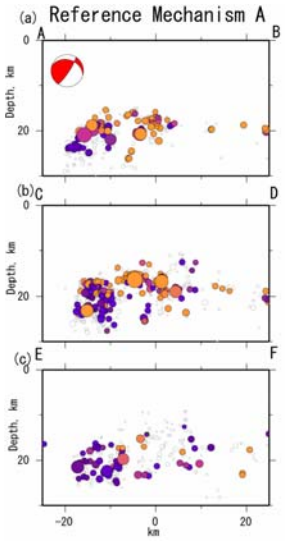


図 3　高精度震源分布とメカニズム解の分布。東側(Region A)については、大正関東地震の震源メカニズムと同様のメカニズムが見られる。西側（Region B）では横ずれ型や逆断層型のメカニズムが混在する。

図 4　Kagan 角(Kagan,1991)を用いた、プレート境界面で発生した地震の検出。リファレンス解は Matsu'ura（1980)の断層モデル及び、Seno (1993)のプレート沈み込み方向から仮定。Region A では reference 角に一致するが、Region B では Kagan 角がばらついて分布。



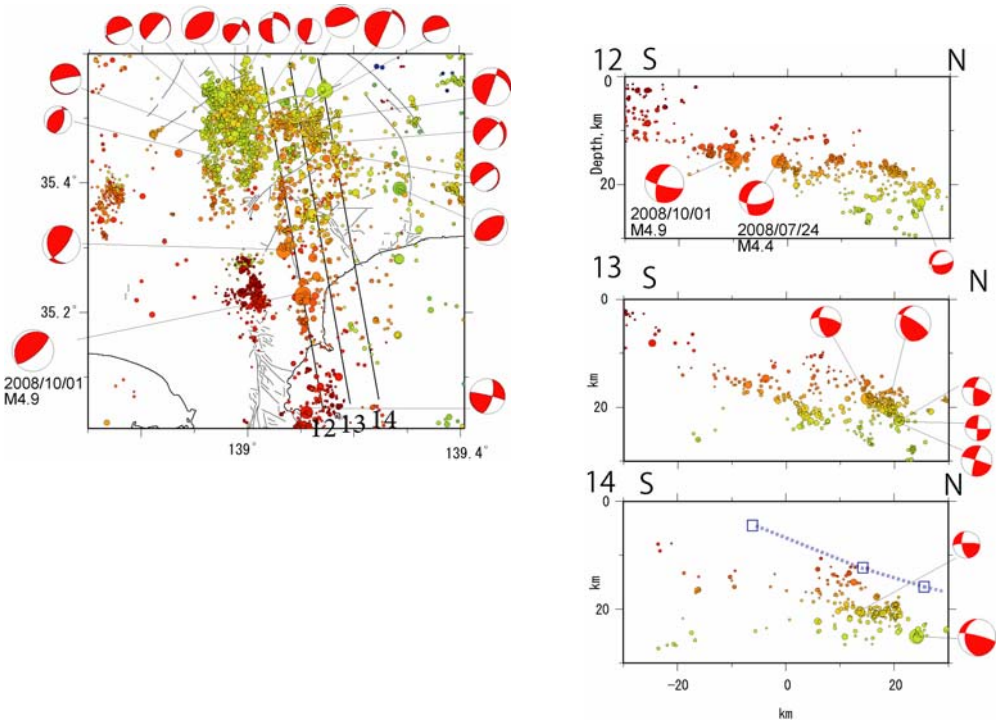
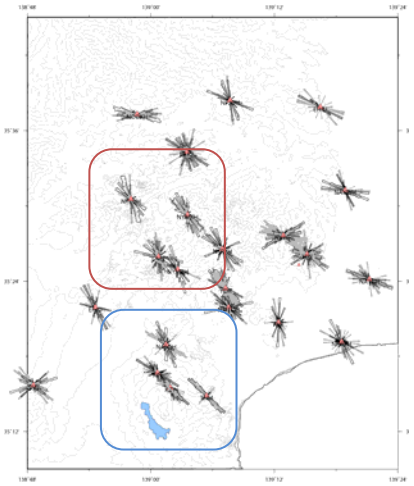


図 5　南北方向の断面図への震源メカニズムの投影。断面 13 に示した地震のメカニズム解は、大正関東地震とほぼ同じメカニズム。一方、その西側の断面 12 ではやや西寄りの P 軸をもつ低角逆断層となる。また、地震の分布する深さも大正関東地震の断層面（プレート境界面）よりも深い。

図 6　S 波スプリッティング解析の結果。丹沢直下を通ってくるパス（赤い□の観測点）に比べて、南足柄付近を通ってくるパス（青い□の観測点）ではやや西寄りの主圧縮軸を示す LSPD（速い S 波の振動方向）が卓越する。



2.2. サブテーマ２「県西部地震の地殻変動モデル構築」

表２：当初の年次計画

<table>
<tr><td colspan="6">［1-2］県西部地域の地殻変動モデル構築</td></tr>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">GPS 観測データを用いて県西部地震の想定断層面における非地震時のすべり欠損分布を計算し、アスペリティ分布を推定する。また、構築された地殻変動モデルにより傾斜・光波観測データが説明できるかどうかを検証する。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="2">①地殻変動のまとめ</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">②GPS 機動観測および国土地理院の GPS データの同化</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="4">③想定断層面におけるすべり欠損分布の計算</td></tr>
<tr><td>成　果</td><td colspan="5">① 地殻変動まとめ：観測データ（GPS・光波・傾斜）の経年変化の把握と観測点の戦略的配置の検討
② GPS 機動観測および国土地理院の GPS データの同化：広域と県西部地域の稠密な地表変位図、歪場の時空間変化
③ 想定断層面におけるすべり分布の計算：バックスリップモデルによる非地震時の断層面上のすべり欠損分布図、アスペリティ分布の推定</td></tr>
</table>

温泉地学研究所では、地殻変動を観測するために光波およびＧＰＳによる観測を行っている。サブテーマ２では、測地学的手法によって県西部地震の震源像を明らかにしていくことを目指す。

県西部に展開された測地観測網は、全国的にみれば高密度に配置されているが、M7 級の地震の監視を行う上では充分な密度とは言えない。そのため、周辺の GEONET 等の観測点との位置関係を見直し、新たに観測点を設置して空間分解能を向上させた（図１－２－１）。新たに設置されたのは「山北」・「元箱根」・「曽我谷津」・「開成」・「南足柄」・「温地研」・「酒匂」・「根府川」・「小山」で、このうち、山北は旧観測点からの移設である。さらに、周辺の GEONET のデータを自動的に取り込み、必要に応じて解析に利用できるシステムを整えた。また、光波観測網についても、小田原観測網の反射点を見直し、足柄平野を取り囲む 8 測線を整備した（図１－２－２）。これによって、特に国府津－松田断層帯のモニタリングを強化した。さらに反射点と測距儀のある観測点で同時に気象観測を行い、2 点での気象補正を行うことによって、通常 1 点（測距儀設置点）での気象補正に比べて精度良い結果が得られることが分かった。

以上のような観測精度・分解能を向上させる基礎的研究に加え、プレート衝突帯における箱根火山の存在がどのように応力場の蓄積に寄与するかを検討した。箱根火山においては 2001 年、2006 年、2008～2009 年に群発地震活動に伴って地殻変動が観測された（図１－２－３）。この中で最大の活動であった 2001 年の活動では、代田ほか（2009）により、

箱根の直下 7 ㎞付近の球状圧力源と浅部の２つの開口割目による力源モデルが提唱されている。2001 年と同程度の圧力変化があった場合、このモデルを用いて、現在想定されている神奈川県西部地震にどのような影響を及ぼすかについて計算を行った。現在の県西部地震の想定震源断層は、小田原から真鶴にかけての急傾斜の断層である（西相模湾断裂モデル)。国土地理院の球状圧力源モデルによるΔＣＦＦを計算すると、想定震源断層の浅部では地震の発生が若干促進される領域に位置する（図１－２－４)。すなわち、箱根での火山活動によって、県西部地震の発生間隔がばらつく可能性がある。このことは、また、箱根火山における圧力源のモデル化が、県西部地域の地震活動を考える上で、不可欠であることを示している。

このような考えのもと、上記の 3 回の活動について GEONET のデータ用い、地表での平面歪を求めて、再度圧力源のモデル化を行った。フォワードモデリングによって試行錯誤的に観測値との比較を行った結果、3 回とも同じ場所の深さが異なる位置での開口割れ目によって説明ができることが分かった。つまり、3 回の活動期間の地表面での平面歪は絶対値こそ異なるが、空間的パターンはほぼ同様で、圧力源の深さ、圧力変化の大きさもしくはその両方の違いによるものであることが示唆される。これらの開口割れ目モデルは、箱根火山の中央火口丘（駒ヶ岳南端）から外輪山の北北西（金時山）に伸びており、その南側は丹那断層、北側は平山断層につながるものと推定される（**図１－２－５**)。

群発地震等のインベントが発生していない定常的な歪蓄積過程では、特に三浦半島周辺部で面積歪の収縮が大きいことがわかった（**図１－２－６**)。また、主歪は神奈川県東部では北北西－南南東方向の圧縮が卓越しており、神奈川県西部地域に行くにしたがって北西－南東方向の圧縮が卓越することがわかった。これは、サブテーマ１のＳ波スプリッティングの解析による結果や震源メカニズムの分布などとも調和的な結果である。これらを総合して考えると、県西部地震が想定される神奈川県西部においては、フィリピン海プレート内部から地殻上部に至るまで、やや東西寄りの圧縮軸を持った応力場となっており、この付近で発生する大規模地震も、2008 年に発生した中規模地震と同様のメカニズムになる可能性がある。

課題

この研究期間のなかで、断層面を特定し滑り欠損を計算するまでには至らなかったが、将来大規模な地震が発生する際に支配的となる応力場がどのようなものかを、ある程度明らかにすることができた。今後は、今研究期間中に整備した稠密な地殻変動観測網の利点を生かし、箱根火山の活動とも関連も考慮しつつ、より詳細な歪蓄積過程を明らかにしていくことが必要である。

論文

(1)原田昌武・棚田俊收・伊東博，箱根・小田原地域における光波測量とGPSの比較観測，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.38，43-46，2006.

(2)原田昌武・棚田俊收・伊東博・本多亮，神奈川県西部地域の地殻変動，月刊地球号外，No. 57，133-139，2007.

(3)原田昌武・伊東博・棚田俊收，新しくなった小田原地域の光波観測網とその気象補正について，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.39，73-77，2007.

(4)Masatake Harada, Makiko Iwakuni and Toshikazu Tanada, Characteristics of Crustal Strain in the Western Kanagawa Prefecture, Japan, International Symposium on GPS/GNSS Proceedings, 69-77, 2008.

(5)原田昌武・岩國真紀子，GEONETデータから推定した神奈川県周辺地域の歪場の特徴，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.40，29-34，2008.

(6)原田昌武・棚田俊收・行竹洋平，2001年箱根群発地震活動に伴った地殻変動による神奈川県西部地震への影響，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.41，1-6，2009.

(7)原田昌武・小林昭夫・細野耕司・吉田明夫，2001年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.41，7-14，2009.

(8)岩國真紀子・原田昌武・棚田俊收・伊東博，温泉地学研究所と国土地理院のＧＰＳデータの統合解析結果から検出した箱根火山の地殻変動，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.41，51-56，2009.

(9)原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫，富士山周辺及び箱根カルデラの膨張歪と低周波地震活動，火山，第55巻，193-199，2010.

学会発表

(1)原田昌武・棚田俊收・伊東博，国府津－松田断層帯周辺での光波測量連続観測とその気象補正，日本地震学会，2007.

(2)岩國真紀子・原田昌武・棚田俊收・伊東博，2006年の箱根群発地震による地殻変動，地球惑星合同学会，2008.

(3)Masatake Harada, Makiko Iwakuni and Toshikazu Tanada, Characteristics of Crustal Strain in the Western Kanagawa Prefecture, Japan, International Symposium on GPS/GNSS 2008, 2008.

(4)Masatake Harada, Toshikazu Tanada and Makiko Iwakuni, Temporal Variations of Crustal Deformation in the Northern Margin of the Philippine Sea Plate, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008.

(5)原田昌武・小林昭夫・吉田明夫，2001年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動，日本火山学会，2009.

(6)原田昌武・棚田俊收・行竹洋平，2001年箱根群発地震活動に伴う地殻変動による神奈川県西部地震への影響，日本地震学会，2009.

(7)Masatake Harada , Toshikazu Tanada, Yohei Yukutake, Akio Kobayashi and Akio Yoshida, Pressure sources of crustal deformation associated with swarm activities in the Hakone caldera and their influence on the occurrence of the Western Kanagawa Earthquake, AGU Fall Meeting, 2009.

(8)原田昌武・小林昭夫・細野耕司・伊東博・明田川保・行竹洋平・本多亮・吉田明夫，箱根火山における地殻歪と浅部地震活動，日本地震学会，2010.

(9)原田昌武・細野耕司・伊東博・明田川保・小林昭夫・本多亮・行竹洋平・吉田明夫，箱根火山の群発地震と地殻変動，日本火山学会，2010.

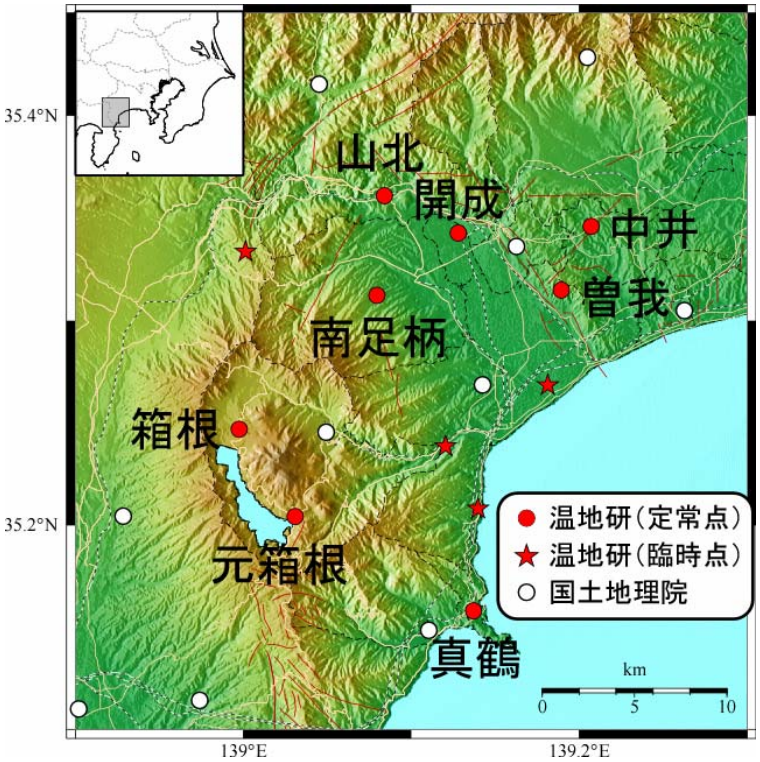


図１－２－１．　GPS 観測点分布図。●は定常観測点、★は臨時観測点、○は国土地理院による観測点を示す。

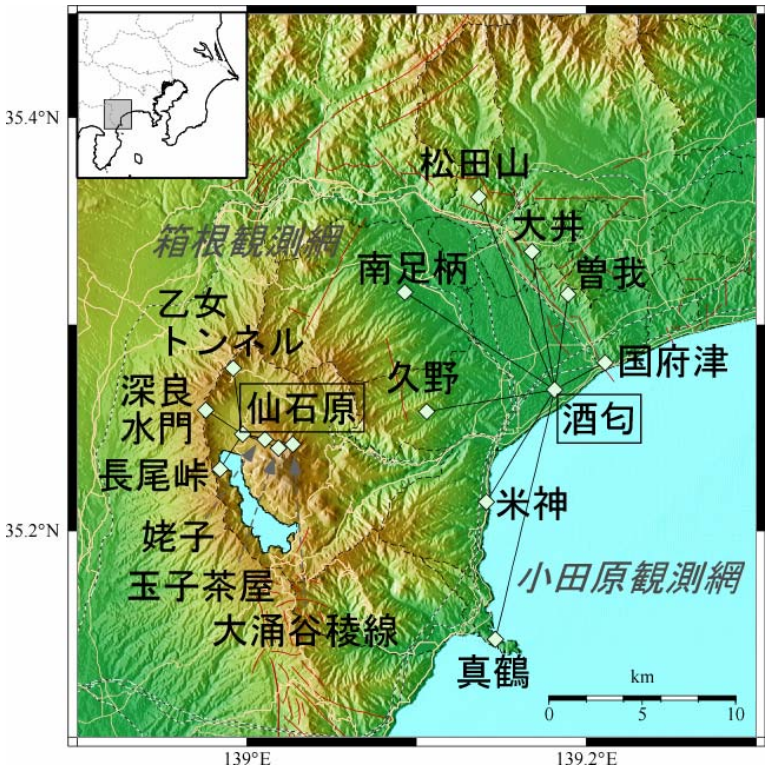


図１－２－２．　光波測量の観測点分布。

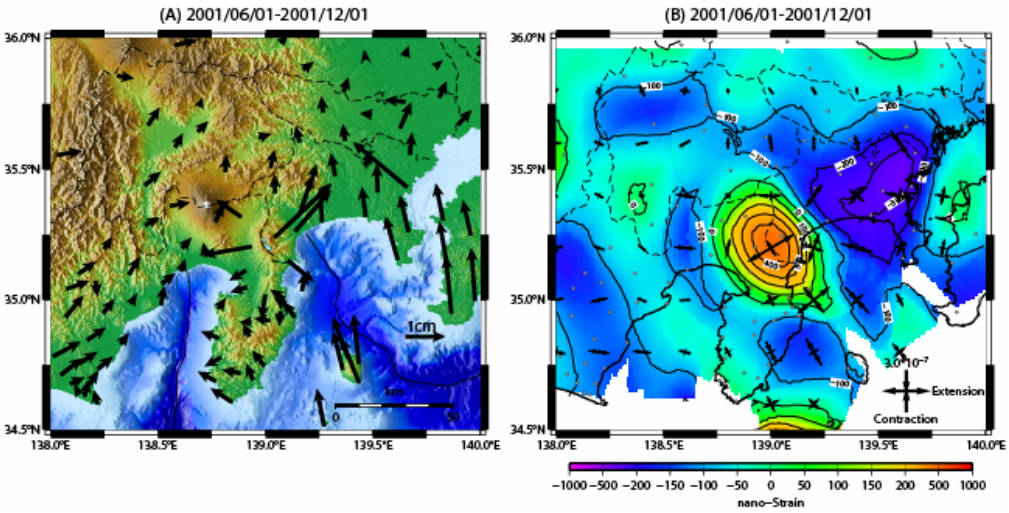


図１－２－３．　2001 年箱根群発地震活動に伴う地殻変動。(A)変位場、(B)歪場。

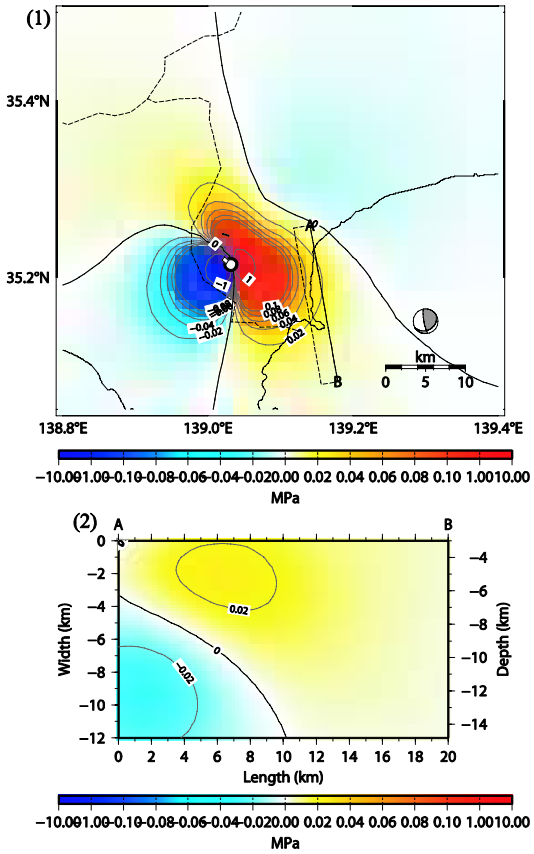


図１－２－４．　2001 年箱根群発地震活動によるモデル西相模湾断裂モデルの断層パラメータにおける応力変化量。数値の単位は MPa。(1)深さ 5km における応力変化量、(2)想定断層面上の応力変化量を表わす。

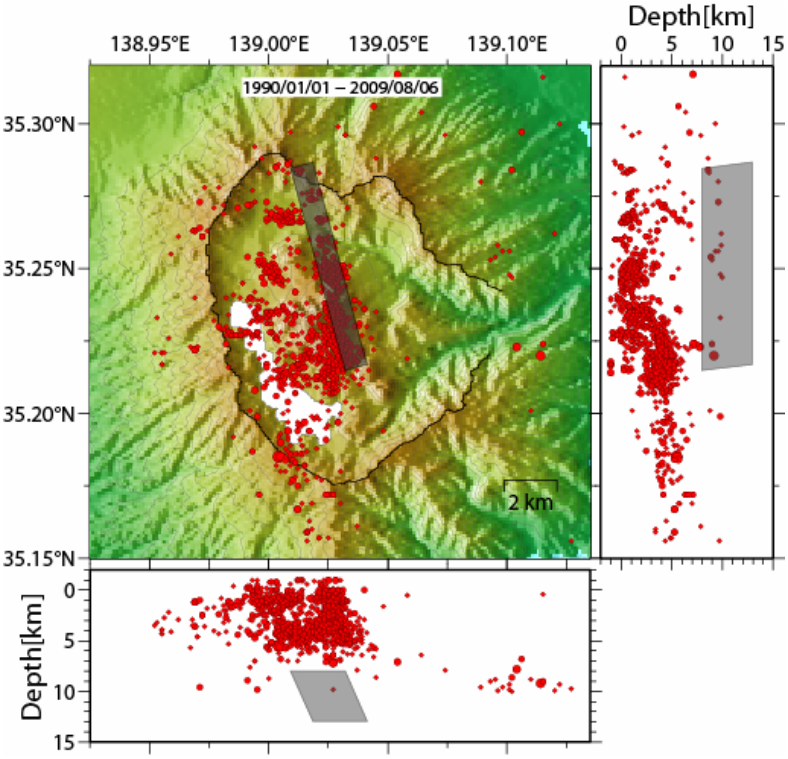


図１－２－５．　2001 年箱根火山活動の力源モデル。灰色の矩形が GPS データのフォワードモデリングから推定された開口割れ目モデルを示す。赤点は地震活動を示す。

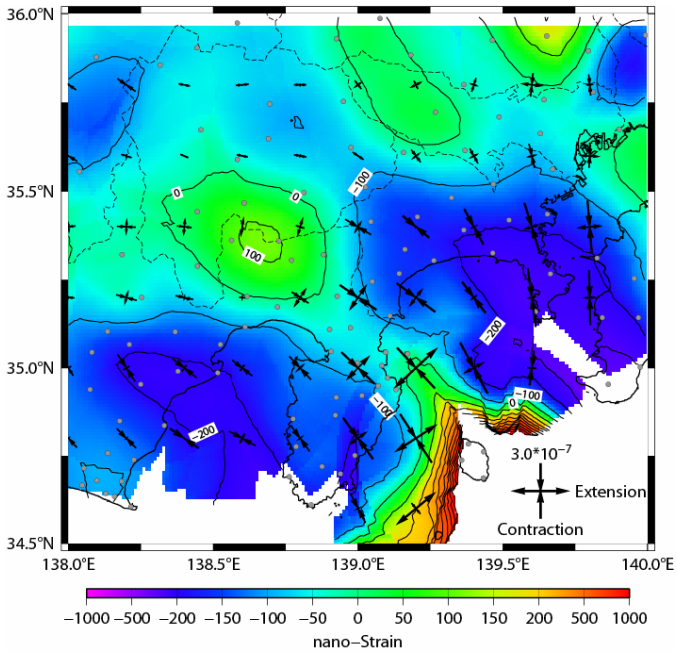


図１－２－６．　GPS によって推定された 2007 年の面積歪と主歪。計算に使用している GPS 観測点を灰色の丸で示している。面積歪の等値線の間隔は 100nano-strain。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［２］火山性地震の発生メカニズムの解明

1.　　研究計画の概要

箱根火山は現在も火山活動を続けているため、度々群発地震が発生している。最近では2001（平成 13）年に地殻変動を伴った数か月に及ぶ群発地震が発生した。中期研究計画では、当所がこれまで観測してきた箱根における地震観測を総括し、地震活動履歴をデータベース化するとともに、これまで把握してきていなかった箱根における深部低周波地震と火山性微動を検知できるよう、観測能力を向上させ、群発地震と深部低周波地震の関連に焦点をあてた発生メカニズムの解明を目指している。

2.　　５カ年の取り組みと成果

表１当初の年次計画

<table>
<tr><td colspan="6">［２］火山性地震の発生メカニズムの解明</td></tr>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">箱根火山で発生している群発地震や深部低周波地震などから地震活動の特徴や相関関係を解析調査する。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="4">①群発地震活動や深部低周波地震の相関調査</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">②深部低周波地震、火山性微動に対する観測体制の検討及びルーチン業務化</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">③箱根火山における地震活動のまとめ</td></tr>
<tr><td>成　果</td><td colspan="5">①地震活動からみた火山活動履歴のまとめ
②地震観測機能と体制の強化</td></tr>
</table>

本研究テーマは、温泉地学研究所での地震観測開始のきっかけとなった、箱根火山の微小地震の関するものである。温泉地学研究所では、箱根の群発地震について独自の基準を用いて監視を行っている。その基準は、1 時間に 10 個以上の地震が発生し、その前後 3 時間地震なしの期間で区切る、となっている。

第 2 期中期研究計画の期間中に観測された群発地震活動は、約 5000 回で、その中で単位時間あたりの地震活動が最も活発であったのが大きかったのは、湖尻周辺を活動域とする 2009 年 8 月に発生した群発地震活動である。この領域では 1989 年にテレメータ観測が開始されて以来、群発的な活動が観測されたことがなかった。地震数は 7 日間で 1000 個を超え温泉地学研究所の観測史上 2001 年の活動に次ぐ 2 番目の規模であった。この活動が開始する前から、箱根カルデラ内では臨時地震観測網を展開しており、平均観測点間隔 2～3ｋｍの非常に稠密な地震観測網が、震源域周辺に展開されていた。Yukutake et al., (2011)では、稠密観測網で記録された地震波形記録データを DD 法に適用し詳細な震源分布を求めた。その結果、西北西 - 東南東の走向をもつ４枚のほぼ垂直で厚さ 100m のうすい平面上

に震源が分布し、時間経過に伴って平面上を震源が移動していく現象が確認された（図２－１）。震源の時間－空間分布をもとに、流体の拡散係数（D:m2/s）を推定すると、D＝0.5～1.0（m2/s）という値が得られた。先行研究により、注水実験の際に誘発された地震活動から推定された拡散係数も、同様な値が得られている。従って、観測された事象は、地下深部からの高圧の流体が既存の破砕帯の中を拡散していく過程を反映していると考えると説明ができる。また、Yukutake et al., (2010)では 1995 年～2008 年において発生した群発地震について、DD 法による震源決定を行った結果、このような破砕帯は箱根火山の地下に恒常的に存在し、その走向はほぼ西北西 - 東南東もしくは東西方向であることが分かった（図２－２）。

2001 年の群発地震の際には、中央火口丘の観測点の傾斜変動が観測され、駒ケ岳観測点及び大涌谷観測点の極近傍で、北西 - 南東及び西北西―東南東の走向をもつ開口クラックが徐々に開いていくことで説明ができることが分かっている（代田ほか、2009）（図２－３）。ただし、この時深部から浅部への震源の移動などは見られないことから、マグマの貫入によるようなものではなく、浅部で水などの流体が移動したものと解釈されている。

また、箱根火山で発生した地震を用いた S 波スプリッティング解析からも、群発地震活動の震源分布や、傾斜変動から推定された開口クラックの走向と一致する LSPD が得られている（Honda et al., to be submitted）（図２－４）。この場合、LSPD は水平最大主圧縮応力軸の方向でなく、地下でのクラックの配列、すなわち破砕帯の走向を示しているものと考えられる。箱根火山内には微小な破砕帯のネットワークが発達していることが示唆される。箱根火山は、丹那断層と平山断層に挟まれたプルアパート場に位置しており、微細な断層ネットワークは 2 つの断層活動の相互作用によって形成されたことが考えられる。

原田ほか（2010）の解析により、近年の大規模な群発地震活動は、深さ 10km 付近の圧力源によると考えられる地殻変動を伴うことが明らかになった。箱根の群発地震活動は、地下深部でのマグマなどの活動による圧力増加がきっかけとなり、既存の断層破砕帯に流体が侵入することで発生している可能性が示唆される。過去の地震活動を調べると、温地研の地震観測を開始した 1963 年から 70 年代半ばまでと比較して 70 年代後半から 80 年代は、地震観測網の変遷を考慮しても活動度が低い。また一方、2001 年の最大規模の群発地震以降、地震活動度はやや活発となっている。これは、地下のマグマの活動と関係があるのかもしれない。さらに、原田ほか（2010）では、箱根カルデラ浅部の地震活動が活発化する数週間前から、深さ 10ｋｍ付近の圧力源による地殻変動が始まっていることを明らかにしている。

また、70 年代から 80 年代の震源分布は、ほとんどが大涌谷周辺の深さ１～４km 付近に集中していた。しかし、70 年代は中央火口丘に配置された 6 点の観測点で得られた S-P 時間をデータとして、さまざまな仮定を含んだ図式解放によって震源が決められており、現在の震源分布とは直接比較できなかった。そこで、本多ほか（2011)では、当時の観測点での理論 S-P 時間を、箱根火山を 500m に区切ったメッシュごとに計算し、理論値と 70 年代

の観測値がほぼ等しくなる震源位置をグリッドサーチ的に探した。この結果、70 年代の群発地震の震源域は、現在と同程度の分布の広がりを持っていることが分かった。また、それらの震源域は互いに重ならず、相補的な関係となっていることも分かった（図２－５）。このような特徴は、詳細な解析が行われている 2000 年以降の震源分布と調和的であり、箱根火山の群発地震の発生様式は少なくともこの 50 年間は大きくは変化していないものと考えられる。

なお、箱根で発生する深部低周波地震については、一元化震源では金時山付近の深さ 25 キロ付近にたびたび発生していることが分かっている。また、数は多くないが、大涌谷付近のごく浅いところでも観測されることがある。原田ほか（2010）は、箱根火山および富士山下で発生する低周波地震の発生様式および、低周波地震活動と地殻変動データから検出される膨張歪みとの関係を詳細に調べた（図２－６）。その結果、低周波地震活動の時間的な経過と発生層の深さの双方に関して，両火山域で明瞭な違いがあることが明らかになった。富士山直下の低周波地震は 2006 年末以後、地震発生数が増加傾向にあるが、箱根カルデラ下の低周波地震は 2006 年末以降、発生数が減っている。また，富士山直下の低周波地震の深さは 10-20km であるのに対して、箱根カルデラ下の低周波地震の深さは 20-25km とそれよりもやや深くなっている。箱根火山周辺では，2001 年，2006 年，それから 2008-2009 年に顕著な膨張歪が観測されたが、膨張源と低周波地震活動域とは一致せず、また膨張歪みに伴って箱根カルデラ下の低周波地震活動が活発化した様子が見えないことが明らかになった。一方で、富士山の場合は低周波地震の震源域と膨張歪の場所がおおよそ一致している。箱根火山の場合に低周波地震活動と膨張歪の間に関連が見られないのは、震源域と膨張源の相対的な位置関係が影響していることが推測される。

3. 今後の課題

群発地震活動については、発生のメカニズムについて、丹那・平山断層の相互作用によって形成された既存の破砕帯の存在、水（流体）の存在、地下での圧力源の存在が重要な役割を占めていることが分かってきた。しかし、深部低周波地震の常時モニタリングについては、残念ながら温泉地学研究所独自の検知システムを整えることができなかった。

今後、群発地震と温泉や火山ガスとの関係も含めて、箱根火山の統合モデルを目指すためには、深部低周波地震の震源分布や波形の特徴、速度構造との関係などについても、詳細に検討する必要がある。

また、カルデラ浅部の活発な群発地震に先行した深部の圧力源による地殻変動は、我々に火山活動を理解するために極めて重要な情報を与えている。つまり、「深部の圧力源の膨張」→「浅部の群発活動の活発化」→「地表での噴気活動変化・温泉温度や成分の変化」といった一連の火山活動の時系列変化に関して、説明する統一的な物理モデルが存在している可能性を示している。それぞれの現象についてさらに詳細な解析をすすめながら、統一的な物理モデルの解明を目指すことは、群発地震を初めとする箱根火山の火山活動の発

生メカニズムをより定量的に明らかにするとともに、短期的な火山活動の予測手法の構築にもつながることが期待される。

論文

代田　寧，棚田俊收，丹保俊哉，伊東　博，原田昌武，萬年一剛，2001 年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化に関する研究、火山　第 54 巻(2009) 第 5 号 223-234 頁

代田　寧・棚田俊收・伊東　博、2001(平成 13)年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動．神奈川県温泉地学研究所報告，34，35-44, 2002.

原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫，富士山周辺及び箱根カルデラの膨張歪と低周波地震活動，火山，第 55 巻, 193-199, 2010.

原田昌武・小林昭夫・細野耕司・吉田明夫，2001 年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動，神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.41, 7-14, 2009.

Honda, R. Y. Daita. Y. Yukutake, M. Harada and A. Yoshida, Seismological evidence for crack opening during the 2001 great earthquakes swarm in Hakone. to be submitted

本多亮・伊東博・行竹洋平・原田昌武・吉田明夫、S-P 時間を用いた再解析によって明らかになった 1970 年代の箱根群発震源域の特徴－最近の群発震源域との比較－、火山、56、1-17、2011.

本多　亮・伊東　博、1970 年代に箱根で発生した地震の震源再決定、神奈川県温泉地学研究所報告，41，81-84，2009.

本多　亮・棚田俊收、S 波スプリティングの解析から明らかになった神奈川県西部地域の異方性の空間的・時間的変化、神奈川県温泉地学研究所報告，38，47-52，2006.

棚田俊收、箱根大涌沢内における物理探査側線の測量、神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.41, 85-88, 2009.

棚田俊收・代田　寧・板寺一洋、箱根大涌谷から上湯場付近における硫化水素および二酸化硫黄のガス濃度と地温測定結果、神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.40, 23-28, 2008.

Yukutake, Y., H. Ito, R. Honda, M. Harada, T. Tanada, and A. Yoshida,　Fluid-induced swarm earthquake sequence revealed by precisely determine hypocenters and focal mechanisms in the 2009 activity at Hakone volcano, Japan,　J. Geophys. Res., doi:10.1029/2010JB008036, 2011.

Yukutake, Y., Tanada T., Honda, R., Harada, M., Ito, H., Yoshida, A., 2010, Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms, Tectonophysics, 489, 104-118.

行竹洋平、棚田俊收、2008、箱根火山で発生する群発地震の精密震源決定、神奈川県温泉地学研究所報告書、40、35-50.

学会発表

岩國真紀子・原田昌武・棚田俊收・伊東博, 2006 年の箱根群発地震による地殻変動, 地球惑星合同学会, 2008.

原田昌武・細野耕司・伊東博・明田川保・小林昭夫・本多亮・行竹洋平・吉田明夫, 箱根火山の群発地震と地殻変動, 日本火山学会, 2010.

Masatake Harada , Toshikazu Tanada, Yohei Yukutake, Akio Kobayashi and Akio Yoshida, Pressure sources of crustal deformation associated with swarm activities in the Hakone caldera and their influence on the occurrence of the Western Kanagawa Earthquake, AGU Fall Meeting, 2009.

原田昌武・小林昭夫・吉田明夫, 2001 年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動, 日本火山学会, 2009.

本多亮、棚田俊收、2001 年箱根群発地震で観測された S 波ｽﾌﾟﾘｯﾃｨﾝｸﾞの時間変化、第 5 回火山都市国際会議島原大会、2007.

伊東　博・棚田俊收・本多　亮・原田昌武・行竹洋平・杉原英和・吉田明夫、2009、神奈川県温泉地学研究所の地震観測網の歴史、日本火山学会 2009 年度秋季大会.

棚田俊收、伊東博、本多亮、原田昌武、行竹洋平、杉原英和、吉田明夫、2009、火山ガス・地温観測装置による噴気域の連続観測、日本火山学会 2009 年度秋季大会.

棚田俊收,CSAMT 調査による箱根大涌谷における浅部比抵抗イメージ, 日本火山学会, 2008 年度秋季大会、2008.

棚田俊收・代田　寧・原田昌武、2005、2001 年箱根群発地震活動と箱根大涌谷北側斜面における新たな噴気活動との関係について. 日本地震学会 2005 年度秋季大会講演予稿集, P035.

行竹洋平、伊東博、本多亮、原田昌武、棚田俊收、吉田明夫、2010、箱根カルデラ内および周辺域の 3 次元速度構造－稠密地震観測データを用いて－、日本地球惑星科学連合 2010 年予稿集、SS015-P11.

Yukutake, Y., Tanada T., Honda, R., Harada, M., Ito, H., Yoshida, A., 2009, Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms, Abstract of 2009 AGU Fall Meeting, San Francisco, America.

行竹洋平、吉田明夫、伊東博、棚田俊收、本多亮、原田昌武、2009、2009 年箱根カルデラ内における群発地震の震源分布から推定される微細断層構造及びその地学的考察、日本地震学会講演予稿集、P3-84.

行竹洋平、吉田明夫、伊東博、棚田俊收、本多亮、原田昌武、2009、2009 年箱根カルデラ内における群発地震活動の精密震源分布、日本火山学会講演予稿集、P06.

行竹洋平、棚田俊收、2009、箱根カルデラ内に発生する群発地震の精密震源決定、日本地球惑星科学連合 2009 年予稿集、V227-004.

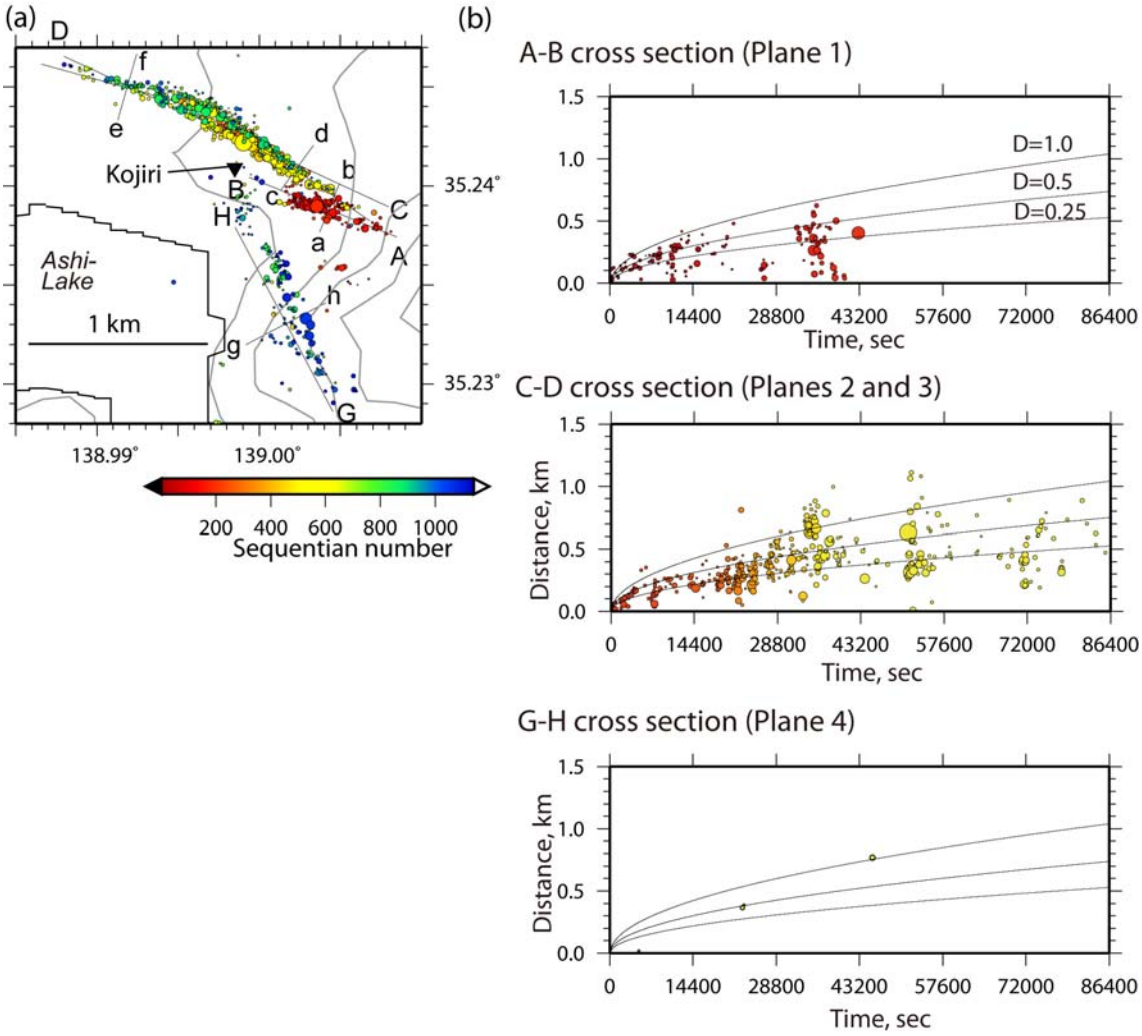


図２－１(a)稠密地震観測網データを DD 法に適用させることで得られた 2009 年 8 月の群発地震の震央分布。(b)面状分布 A-B, C-D, G-H 断面上において最初に発生した震源位置からの距離と時間との関係。放物線は、ある拡散係数（m2/s）を仮定した際の、震源位置を表す。

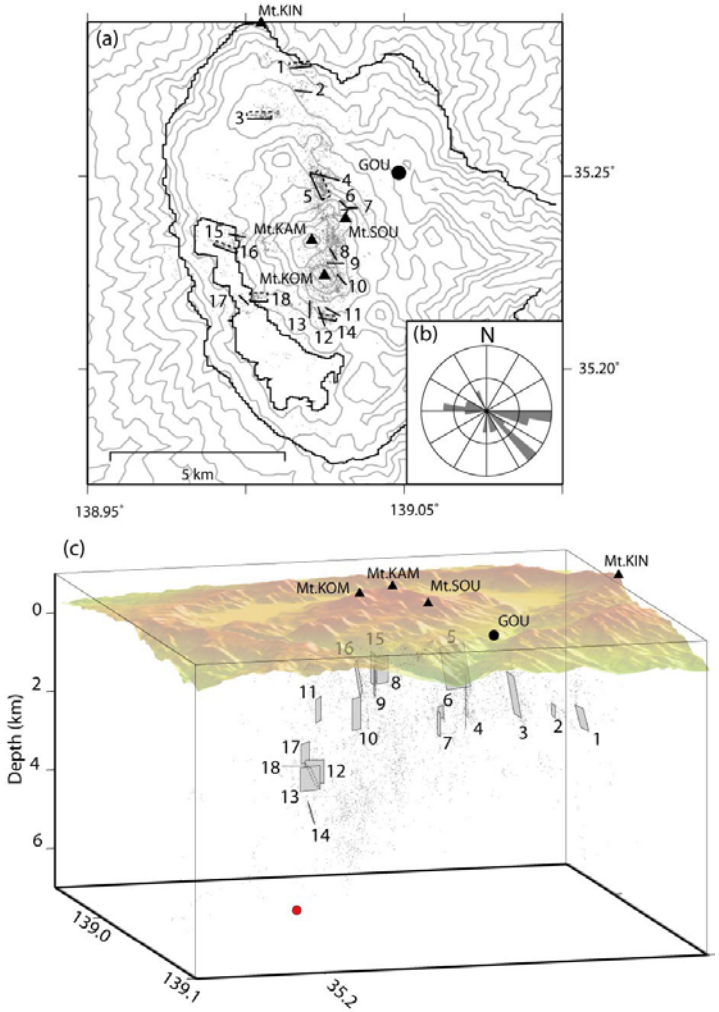


図２－２ (a)再決定した震源分布およびメカニズム解から推定した、微細断層の空間分布(b)断層方位角の頻度分布(c)3 次元分布

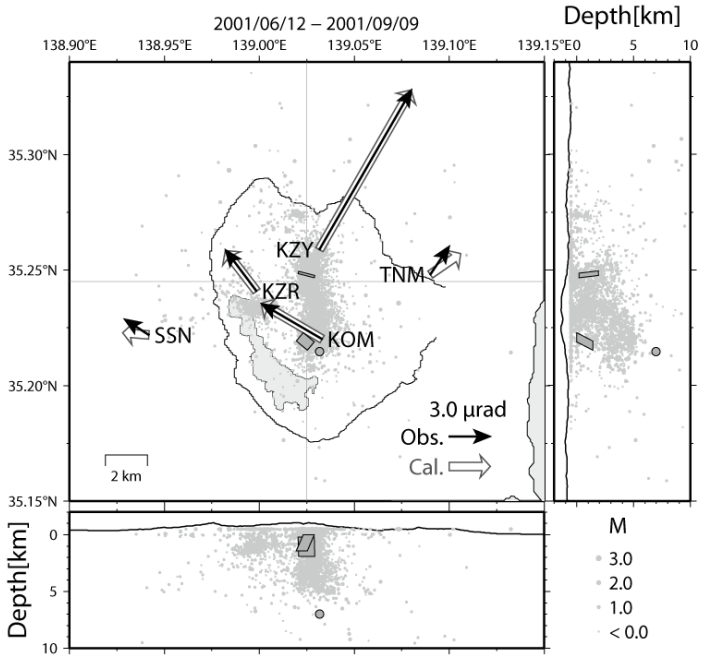


図２－３　6月12日から9月9日までの傾斜変動を説明する圧力源モデル。丸が球状圧力源、二つの矩形が開口割れ目、複数の灰色の点が震源を示す。

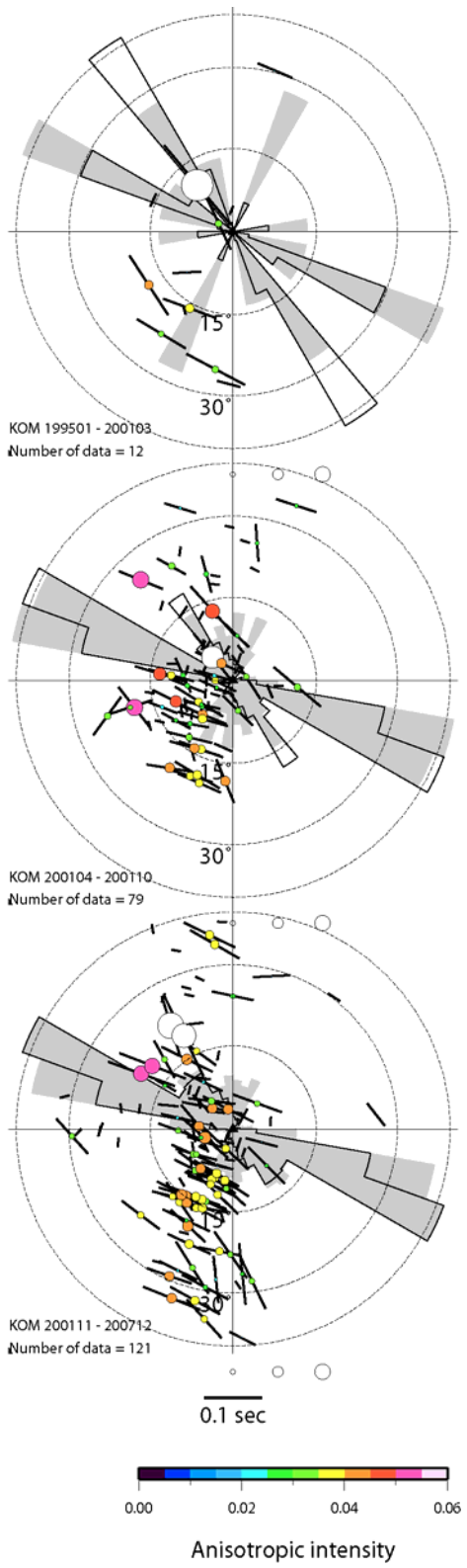


図２－４　速いＳ波の振動方向（LSPD）の分布。グレーのローズダイアグラムは、その方向の LSPD が観測された地震の積算数、白抜きのローズダイアグラムは、単位距離当たりの時間差で重みをかけたもの。黒棒とプロットの○の色は、時間差の絶対値と異方性強度を、等積投影したものである。

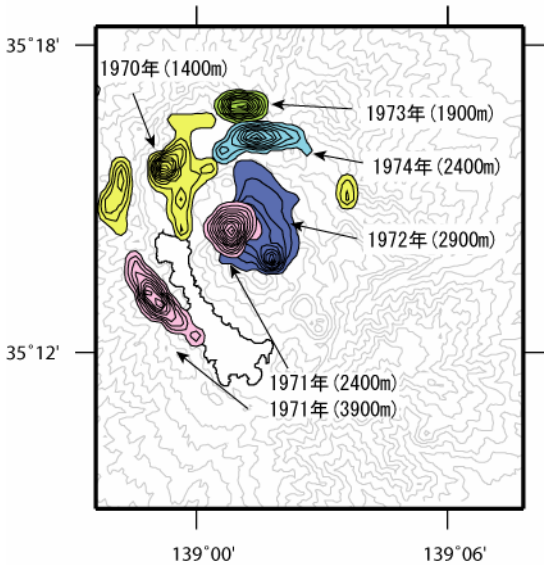


図２－５　70 年代の観測点で記録された S-P 時間データをもとに、グリットサーチを用いて推定された群発震源域の分布図

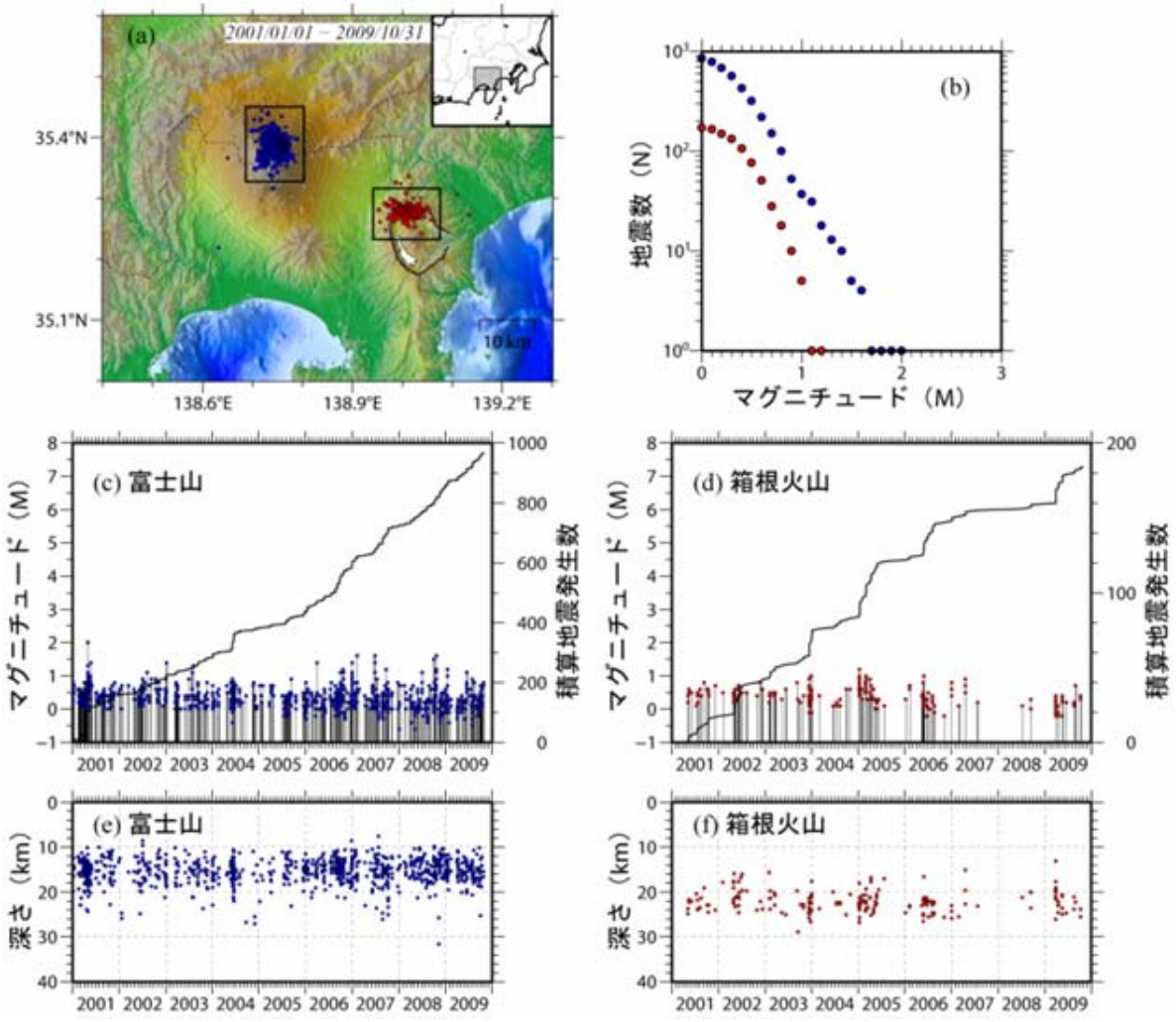


図２－６　(a) 富士山，及び，箱根火山の低周波地震活動の震央分布．(b) マグニチュード (M) の下限を変えていったときの地震数．青が富士山、赤が箱根火山の低周波地震活動を示す．(c) 富士山におけるマグニチュードと時間の分布（M－T分布），及び，地震発生数の積算曲線．(d) 箱根火山におけるマグニチュードと時間の分布（M－T分布），及び，地震発生数の積算曲線．(e) 富士山における震源の深さの時系列．(f) 箱根火山における震源の深さの時系列．

第２期中期研究　報告書

研究課題：［３］地球化学的手法による箱根火山活動の活発化指標に関する研究

1. 研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="6">本研究では、これまでの温泉分析データや群発地震活動の震源の推移を整理するとともに、新たに温泉や噴気ガス中の成分・同位体を分析調査することにより、箱根火山活動の活発化の指標になりうる(モニタリングの価値がある)源泉や噴気孔(蒸気井)を抽出し、それらの温度、成分、水位などの指標項目を明らかにする。なお、研究の対象としては火山ガスを重点におこなっていく。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td colspan="2">Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="2">①これまでのデータの整理(温泉及び地震)</td><td colspan="4"></td><td rowspan="3">成果のまとめ</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="4">②指標となりうる源泉の定期的な分析
(特徴的な成分(指標項目)を主に分析)</td></tr>
<tr><td colspan="2">③噴気ガスの採取･分析方法の検討</td><td colspan="4">噴気ガス(蒸気井)の成分調査・分析
(噴気地域別の特徴など基礎データの収集を含む)</td></tr>
<tr><td>期待された成　果</td><td colspan="6">① 温度や成分の経年変化から、火山活動の指標になりうる源泉及び成分をピックアップする(温泉データ)。また、群発地震活動の履歴と温度･成分変化との関係(周期性がないかなど)を明らかにする(地震データ)。
② ①でピックアップした源泉について、温度や成分の季節変化等の変動幅を明らかにする(平常時のデータ)。また､成分や同位体の分析結果に地質等の解析を加え､温泉(主に第Ⅲ帯)の起源や熱水の流動等の解明に向けた知見を提示する。
③ 各噴気地帯における平常時の成分分布図を作成する。さらに、経時的な変化を調査し、指標となりうるスポットを明らかにする。また、自然噴気等の起源や上昇過程の解明(地熱流体の起源や特性の解明)に向けた知見を提示する。</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	主任研究員・代田寧	噴気ガスと温泉水の採取・分析、成果のまとめ
共同研究者	専門研究員・伊東博 主任研究員・板寺一洋	群発地震活動の整理 凝縮水、温泉水の同位体分析
指導研究者 (客員研究員)	東海大学教授・大場武	火山ガス研究全般の指導

[1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果]

(1) 大涌谷の蒸気井および自然噴気の火山ガス組成

・研究実施内容

2001年の群発地震で暴噴した大涌谷の蒸気井およびその近くに位置する自然噴気を対象として、ガスの採取および成分分析を実施した。当所では始めて実施するテーマであり、サンプリングおよび成分分析のノウハウがないため、客員研究員制度を利用して平成18年度は手法の習得に費やし、その後平成20年度まで観測をおこなった。

・成果（大場・代田ほか（2008））

蒸気井および自然噴気の$CO_2/(H_2S+SO_2)$比と$CO_2/(H_2O)$比の値がほぼ同様の時間変化を示したことから、それらのガス起源は同じであると考えられた。また、大涌谷直下および湖尻付近における群発地震の発生と同期してそれぞれの値が増加しているように見えることから、群発地震の発生とガス組成の変化が関連している可能性があることが示唆された（図１）。湖尻付近で発生した群発地震においても大涌谷の火山ガス組成が変化していることから、大涌谷で放出されている火山ガスが深部から上昇する過程で湖尻方面へ分岐している（火山ガスの通路がある）可能性がある。

2001年の群発地震で暴噴したことや地下数百ｍ地点のガスであることから、蒸気井の方が火山活動の変化は現れやすいと考えられるが、民間業者が営業で使用しているため通常はサンプリングできない。一方、自然噴気はサンプリングに利便性がある。したがって、蒸気井ガスと同様の変化が認められた自然噴気をモニタリングすることが火山活動の監視に有効であり、CO_2、H_2S、SO_2、H_2Oを測定することが必要であると考えられる。

(2) 大涌谷北側斜面に新たに出現した噴気ガス（新噴気ガス）

・研究実施内容

2001年の活動以後、大涌谷北側斜面に新たな噴気が確認された（新噴気）。平成18年度および平成20～22年度にサンプリングを実施した。

・成果（代田・板寺（2010）、棚田・代田・板寺（2008））

平成18年度にサンプリングを実施した結果、新噴気ガスの水分除去後の主成分はCO_2であり98％以上を占め、H_2Sは800ppm程度、SO_2は0.5ppm以下であった。H_2Sが検出されたことから、新噴気にも火山ガスが含まれていることが明らかとなった。また、H_2S濃度が大涌谷噴気地帯と比較してかなり低い値であるのは、上昇過程において、H_2Sと岩石中の2価鉄との反応が関与していると推定された。この仮説が正しければ、時間の経過とともに噴気ガス中のH_2S濃度は高くなると考えられる。平成20～22年度に継続して観測を実施した結果、予想されたとおりH_2S濃度の増加が確認された（図２）。一方、凝縮水の酸素・水素同位体比は、ほぼ天水に近い値を示し、火山ガスの寄与が少ない結果となった。おそらく新噴気ガスは地下水との相互作用が大きく、上昇する過程で部分的に凝縮して失われたり、地下水が付加されたりして、天水に近い値を示したと考えられる。

大涌谷の蒸気井および自然噴気の場合ほど明確ではないが、新噴気ガス中のCO_2/H_2S比も群発地震の発生に関連して増加する可能性が見いだされた。2001年の活動で得られた地殻変動データから大涌谷の浅部に開口割れ目が生じたと推定されており（代田ほか、2009）、大涌谷で放出される火山ガスが地下で分岐し、この割れ目（亀裂）を通じて新噴気域が形成されたのではないかと考えられる。したがって、新噴気をモニタリングすることも、火山活動の監視に有効となる可能性がある。また、新噴気ガスは時間の経過とともにH_2S濃度が増加することが予想されるので、安全防災上の観点からも観測を継続する必要があるだろう。

(3) 温泉水の採取と分析

・研究実施内容

2001年の群発地震時に泉温の上昇が認められた２源泉について、不定期ではあるが平成18～22年度に採水を実施し、化学成分と同位体比の測定をおこなった。また、湖尻付近のいくつかの温泉に含まれる溶存炭酸の炭素安定同位体比を調べた（予備的な調査および検討)。

・成果（代田ほか（2011))

2001年の群発地震時に泉温の上昇が認められた２源泉について、NaやClなどの主要成分ならびに同位体比を測定し、平常時のデータを取得した。明らかに群発地震に関連したような変化は認められなかった（図３)。また、湖尻付近のいくつかの温泉に、火山ガス起源の可能性の高い溶存炭酸が含まれていることがわかった（表１)。このことから、湖尻方面へ火山ガスの通路があるものと考えられ、湖尻付近で発生する群発地震とも関連しているのかもしれない。

(4) 箱根火山の群発地震活動の整理（分担：伊東専門研究員）

・研究実施内容

過去の震源データの一部について震源再決定を行い、箱根火山とその周辺地域に決定された震源データのデータベース化をすすめ、時空間分布・経年変化を調べた。

・成果（本多・伊東ほか（2011))

70年代から80年代の震源分布は､ほとんどが大涌谷周辺の深さ１～４km付近に集中していると思われていた。しかし、観測点の配置の違いやさまざまな仮定を含んだ図式解放によって震源が決められていたことなどから、現在の震源分布とは直接比較できなかった。そこで、当時の観測点での理論S-P時間を、箱根火山を500mに区切ったメッシュごとに計算し、理論値と70年代の観測値がほぼ等しくなる震源位置をグリッドサーチ的に探した結果、70年代の群発地震の震源域は、現在と同程度の分布の広がりを持っていることがわかった。すなわち、大涌谷付近だけではなく、近年見られるような湖尻付近や金時付近でも群発地震が発生していたことがわかった。以前から湖尻付近でも群発地震が発生していたことは、(1)～(3)の成果から推定された湖尻方面へ火山ガスの通路があり、湖尻地区の温泉の成因や湖尻付近で発生する群発地震と関連している可能性があることと調和的である。

[2. 結論ならびに新たな課題]

大涌谷の蒸気井、自然噴気、ならびに2001年以後新たに出現した新噴気において、大涌谷付近および湖尻付近で発生する群発地震と関連してガス組成が変化する可能性が認められた。蒸気井、自然噴気、新噴気の全てで同様の変化が認められたことは注目に値する。サンプリングに利便性のある自然噴気が箱根火山活動の有効なモニタリング地点になる可能性があり、指標項目としてCO_2、H_2S、SO_2、H_2Oを測定することが必要である。また、湖尻付近のいくつかの温泉に火山ガス起源の溶存炭酸が含まれる可能性が高いことが明らかとなった。このことと、湖尻付近で発生する群発地震に関連して大涌谷の火山ガス組成が変化している可能性があることから、大涌谷で放出されている火山ガスが深部から上昇する過程で湖尻方面へ分岐している（火山ガスの通路がある）可能性が示唆された。平成22年度に湖尻に近い姥子の蒸気井２ヶ所を対象にサンプリングを実施したので、今後炭酸ガスの炭素安定同位体比を測定し、大涌谷のガスや湖尻付近の温泉と比較して炭酸ガスの起源について考察する予定である。

今後は、火山ガス組成の変化と群発地震との関連性をより明確にする（定量的な活動予測へ発展させる）ため、火山ガスの自動連続観測に向けた取り組みが重要となる（大場先生と共同で科研費に応募)。また、湖尻付近の温泉に含まれる溶存炭酸の炭素安定同位体比のデータをさらに増やすことにより、湖尻地区の温泉の成因解明に寄与できるものと考えられる。

[3. 投稿論文、学会発表などの成果]

代田　寧・板寺一洋（2010）2001年以後に箱根火山大涌谷北側斜面に現れた噴気中のガス組成等の時間変化，温地研報告，42，49-56.

代田　寧・大場　武・菊川城司・板寺一洋（2011）箱根カルデラ西部の湖尻・芦ノ湖地区の温泉水の酸素及び水素同位体比と溶存炭酸の炭素安定同位体比，温泉科学，投稿中.

代田　寧・棚田俊收・丹保俊哉・伊東　博・原田昌武・萬年一剛（2009）2001年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化，火山，54，223-234.

大場　武・代田　寧・澤　毅・平　徳泰・撹上勇介（2008）箱根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火山ガス組成の時間変化，温地研報告，40，1-10.

棚田俊收・代田　寧・板寺一洋（2008）箱根大涌谷から上湯場付近における硫化水素および二酸化硫黄のガス濃度と地温測定結果，温地研報告，40，23-28.

寺田暁彦・撹上勇介・大場　武・萬年一剛・代田　寧（2009）箱根火山大涌谷北側斜面の噴気地で得られた地表面温度と放熱量の経験的関係，温地研報告，41，15-22.

本多　亮・伊東　博・行竹洋平・原田昌武・吉田明夫（2011）S-P時間を用いた再解析によって明らかになった1970年代の箱根群発震源域の特徴～最近の群発震源域との比較，火山，56，1-17.

代田　寧・板寺一洋（2009）箱根火山大涌谷北側斜面における噴気ガス組成の時間変化，日本火山学会2009年度秋季大会講演予稿集，146.

代田　寧・棚田俊收・板寺一洋（2008）箱根火山大涌谷地熱地帯周辺の噴気ガスについて，日本火山学会2008年度秋季大会講演予稿集，113.

Takeshi OHBA, Yasushi DAITA, Takeshi SAWA, Noriyasu TAIRA, Yusuke KAKUAGE (2008) Temporal changes in the chemical and isotopic composition of volcanic gas at Hakone volcano, Japan, The Commission on the Chemistry of Volcanic Gases, México City.

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料

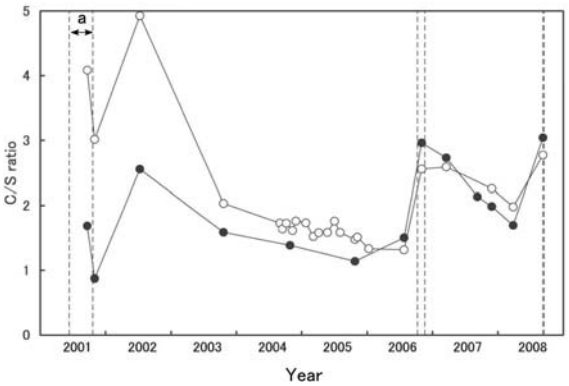


図１　$CO_2/(H_2S+SO_2)$比の時間変化。
黒丸が蒸気井ガス、白丸が自然噴気のガス、縦の破線が群発地震の発生時期を示す。群発地震の発生に同期して$CO_2/(H_2S+SO_2)$比が増加している。

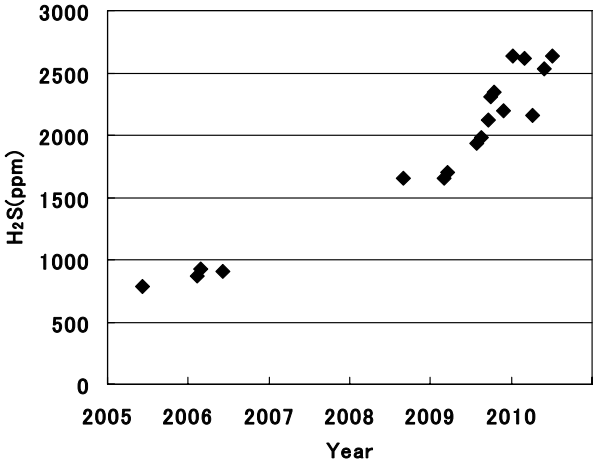


図２　新噴気ガス中のH_2S濃度の時間変化。
上昇過程において、H_2Sと岩石中の２価鉄との反応によりH_2Sが除去されている可能性がある。時間の経過に伴いH_2Sの除去反応が抑制され、噴気ガス中の硫化水素濃度が高くなると考えられる。

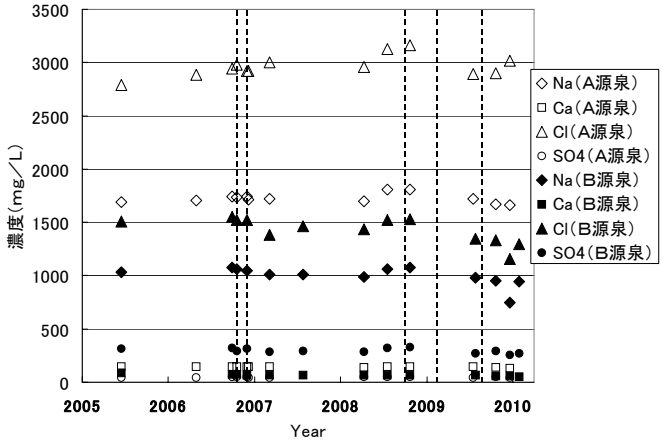


図３　温泉水中の化学成分の時間変化。
破線は比較的大きな群発地震が発生した時期を示す。群発地震の発生に伴う明らかな変化は観測されていないようである。

No.	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
1	−1.6	−8.22	−51.5
2	−2.1	−8.40	−52.7
3	−2.0	−8.39	−53.0
4	−5.8	−8.44	−51.1
5	−10.4	−8.13	−47.8

表１　湖尻付近の温泉の酸素および水素同位体比と溶存炭酸の炭素安定同位体比。
５源泉のみの調査ではあるが、No.1～3の温泉に溶存している炭酸成分は火山ガス起源の可能性が高いことがわかった。一方、酸素・水素同位体比の結果からは深部流体（火山ガス）の寄与が少ない結果であった。これらの結果の解釈については、今後検討していく必要がある。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［４］箱根火山の基盤構造および噴出物の研究

1. 研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">①カルデラ地域とその東側の地域の基盤構造と基盤層序を明らかにする。
②露頭の情報を収集し、地域の地震テクトニクスの解明などに役立てる。
③火山の噴出物について、最近数千年間を中心とする年代測定を実施し、噴火史を明らかにする。
④火山の噴火による被害予想に役立てるため、富士・箱根火山の噴火を中心に噴出物の解析をおこなう。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="2">カルデラ地域の基盤構造</td><td colspan="3">カルデラ東部地域の基盤構造</td></tr>
<tr><td colspan="5">中央火口丘付近の水蒸気爆発堆積物検出</td></tr>
<tr><td colspan="5">箱根火山の K-Ar 年代測定、全岩化学組成分析など</td></tr>
<tr><td>成　果</td><td colspan="5">①中央火口丘直下のカルデラ充填堆積物の分布と構造の解明
②箱根火山全体の基盤構造の解明</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	萬年一剛	全般
共同研究者	小田原啓	

［1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果］

箱根火山の基盤は、その構造や層序がよくわかっておらず、その解明は温泉帯水層の把握や、テクトニクスの理解に重要であると考えられる。本研究は、カルデラ地域とその東側の地域の基盤構造と基盤の層序を明らかにする事を目的とする。

a）平成18年度から19年度の研究と成果

・研究実施内容

カルデラ地域の構造のとりまとめを目的とし、これまでのデータ整理およびコア試料のうち未分析のものを順次整理した。それらに含まれる岩片の全岩化学組成分析（104件）、薄片の検鏡（381件）を実施し、基盤岩との分類方法について検討を行った。加えてカルデラ内に発達した湖成堆積物中の微化石分析を委託し、古環境解析、年代や成因を検討した。

・成果

強羅付近および湖尻付近にそれぞれ径3kmおよび1kmの陥没構造があることを明らかにし、その陥没を埋積する地質について報告を行い、それぞれ、強羅カルデラと湖尻カルデラという呼称を与えた。強羅カルデラについて図1、2に示す。また、強羅カルデラの中から見つかる普通角閃石を含む軽石の起源を重点的に探索した。既知の角閃石テフラと強羅カルデラ内のテフラの屈折率を比較したところ、強羅カルデラ内の角閃石は、TA1-1と類似しており、これが起源となるテフラであると推定された（図3）。

b）平成20年度から22年度の研究と成果

・研究実施内容

平成19年度までの検討結果について、理論の補強のための文献調査を加えて論文をまとめた。また、温泉ボーリング資料の解析を中心に、野外調査を加えた。ボーリング試料に関してはカッティングスについても積極的に検討を加えた。野外調査はサンプリングを主体とし、全岩化学組成に基づいてボーリングの地質を解析した。

・成果

陥没構造のある強羅付近および湖尻付近について、箱根カルデラ北部の地質構造発達史を構築した（図4)。

温泉ボーリング等の資料により、箱根火山の活動期に何回か飛来した角閃石テフラについてEPMA分析を系統的に実施した。その結果、宮城野で掘削されたコアから検出された角閃石は、屈折率からもっとも可能性が高いとされた、TAl-1のものではなく、TCu-4ないしTB-2である可能性が出てきた(図5)。このため、宮城野付近の陥没構造の推定形成年代がやや古くなることとなった。その他、基盤岩の粘土鉱物について、山北町で掘削された大大特コア試料について、XRD分析を実施し、また、箱根カルデラと類似している濁川カルデラについて、カルデラ内堆積物と噴出物の検鏡および化学分析を実施した。

［2. 結論ならびに新たな課題］

平成21年度に行った基盤岩の粘土鉱物のXRD分析結果については、大川・小林（2007）の結果と比較し、断層の有無や層準を検討する必要がある。また、カルデラ内堆積物と噴出物の検鏡および化学分析については、カルデラフィル堆積物に本質物質が含まれているか検討する必要がある。

本研究については、平成22年度に研究代表者が休職（自己研鑽のための短期留学）したため、平成21年度で事実上の中断となった。今後は研究を発展的に継続し、箱根地域のテクトニクス、群発地震の発生メカニズム、温泉の湧出機構などについての総合的なモデルの構築に資することが重要な課題となる。

[3. 投稿論文、学会発表などの成果]

萬年一剛・水野清秀・伊藤順一・山下浩之(2006) 箱根・強羅付近地下の地質構造-とくに湖成堆積物の分布とその堆積環境, 温地研報告,**38**,11-26.

萬年一剛・代田寧・本多亮・町田功・笠間友博・山下浩之(2007) プルアパート構造としての箱根カルデラ, 日本地質学会第114年学術大会.

萬年一剛(2008) 箱根カルデラ―地質構造・成因・現在の火山活動における役割―, 神奈川県立博物館調査研究報告（自然), **13**, 61-76.

山下浩之・萬年一剛・川手新一・笠間友博・平田大二・蛯子貞二・谷口英嗣(2008) 箱根火山基盤岩類の再検討, 神奈川県立博物館調査研究報告（自然), **13**, 135-156.

萬年一剛(2008) 箱根火山・強羅潜在カルデラの地質とその意義, 日本地球惑星科学連合2008年大会.

Mannen, K., Yamashita, H. , and Kasama, T. (2008) Hakone caldera as a complex of funnel shaped calderas, 国際火山学・地球内部化学協会 2008 年総会.

萬年一剛・笠間友博・山下浩之・水野清秀(2008) 箱根町宮城野南部のカルデラフィル堆積物, 温地研報告,**40**,11-22.

萬年一剛(2008) 箱根カルデラ北部で掘削された孔井の地質資料（1998-2008 年解析分）, 温地研報告,**40**,91-128.

萬年一剛・笠間友博・町田洋(2009) 箱根火山活動期における外来角閃石型テフラ（予報）, 地球惑星科学連合 2009 年大会.

萬年一剛(2009) 大涌谷噴気地帯における過熱蒸気- その歴史と消滅の理由, 温地研報告,**41**,23-32.

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料

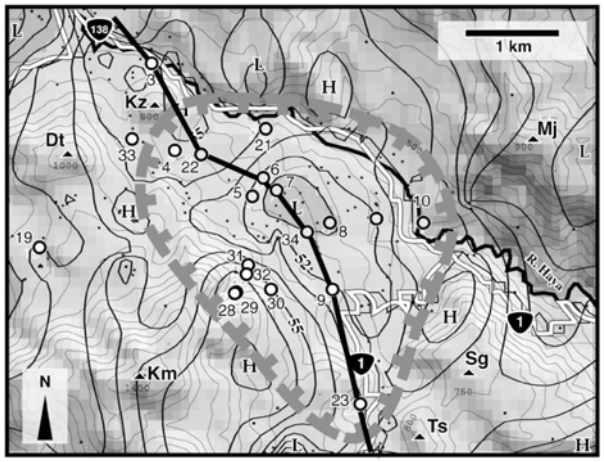


図１　強羅カルデラの範囲（太破線）と、地質解析をした温泉井戸。重力異常（高重力異常をH、低重力異常をL）も併せて表示。

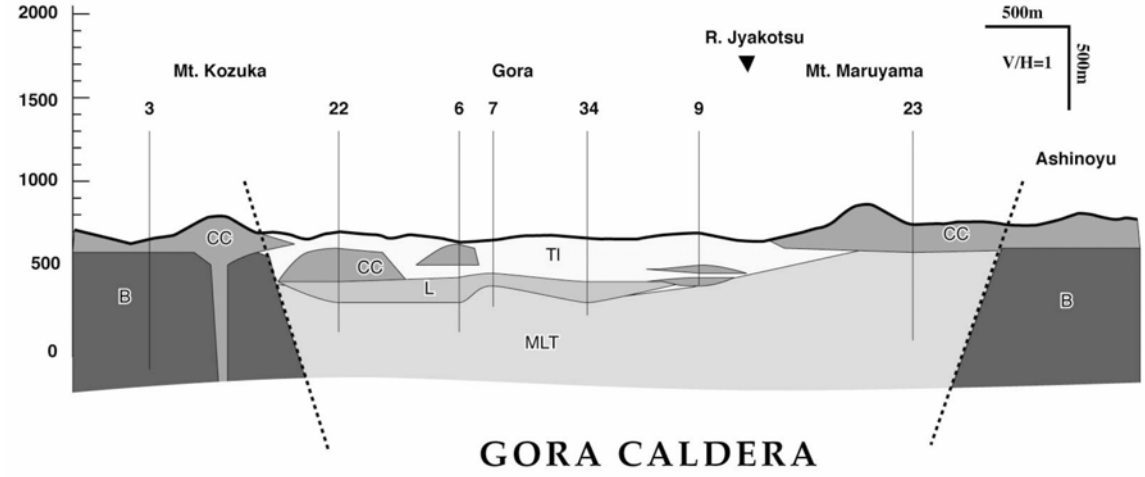


図2　強羅カルデラの断面図（図6.3.7.-1の実線の断面、数字は図6.3.7.-1の井戸番号に対応）

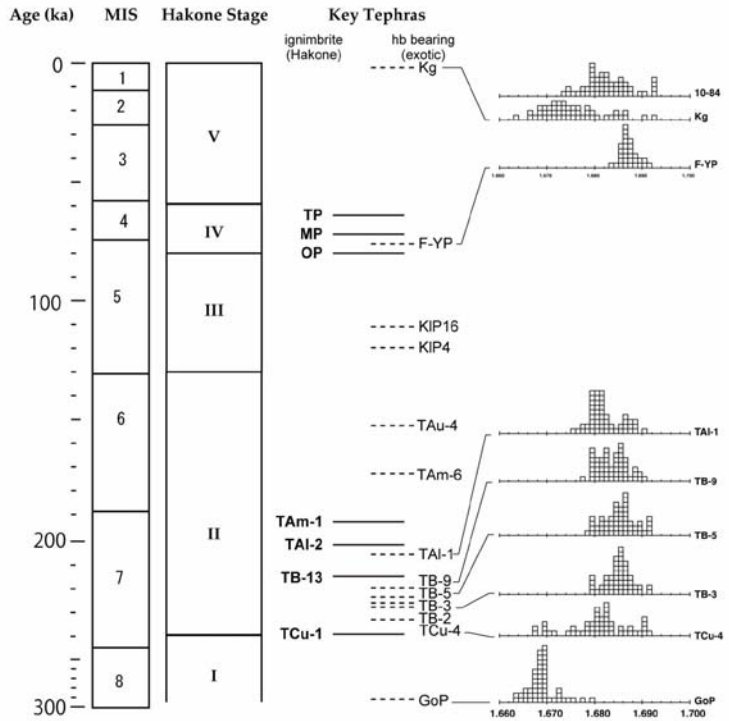


図 3　角閃石の屈折率測定結果。強羅カルデラ内の角閃石テフラ（10-84）と、既知の角閃石を含むテフラ中の角閃石の屈折率分布を示す。分布の幅やモードを比較するとTAI-1が最も近い。

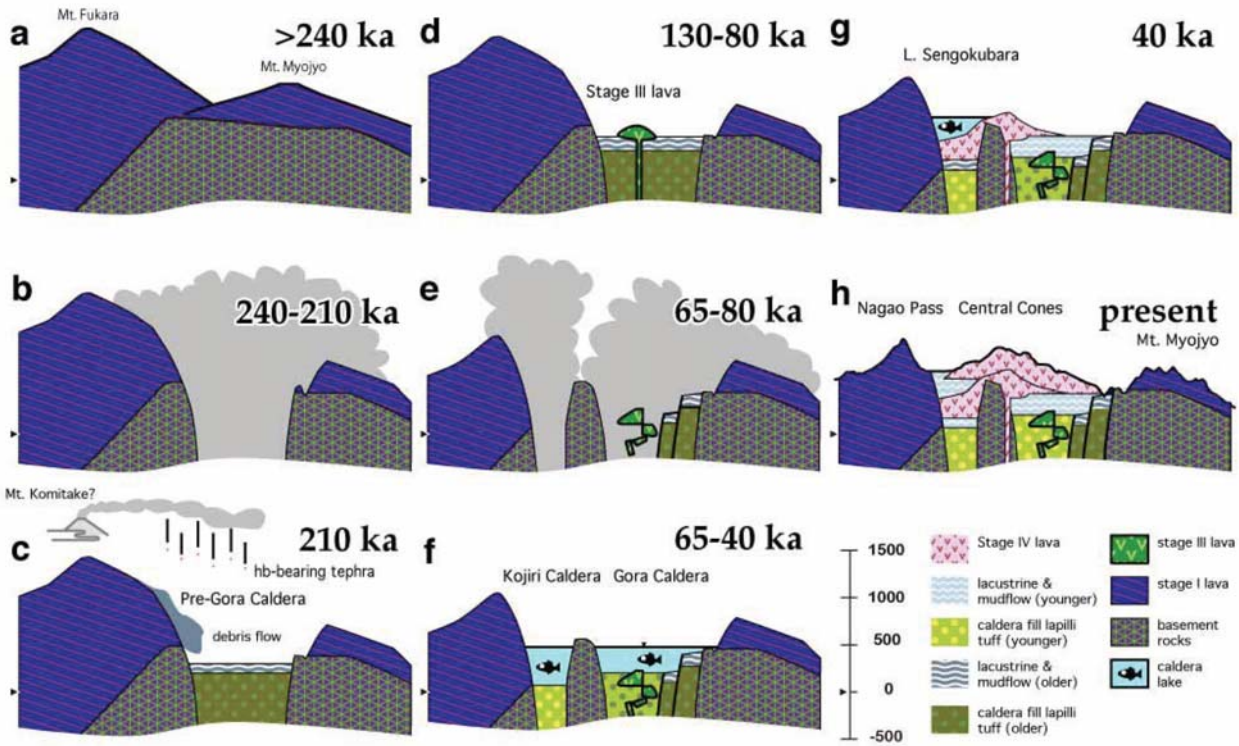


図 4　箱根カルデラ北部の地質構造発達史。図中、左が西、右が東。「ka」は千年前を示す

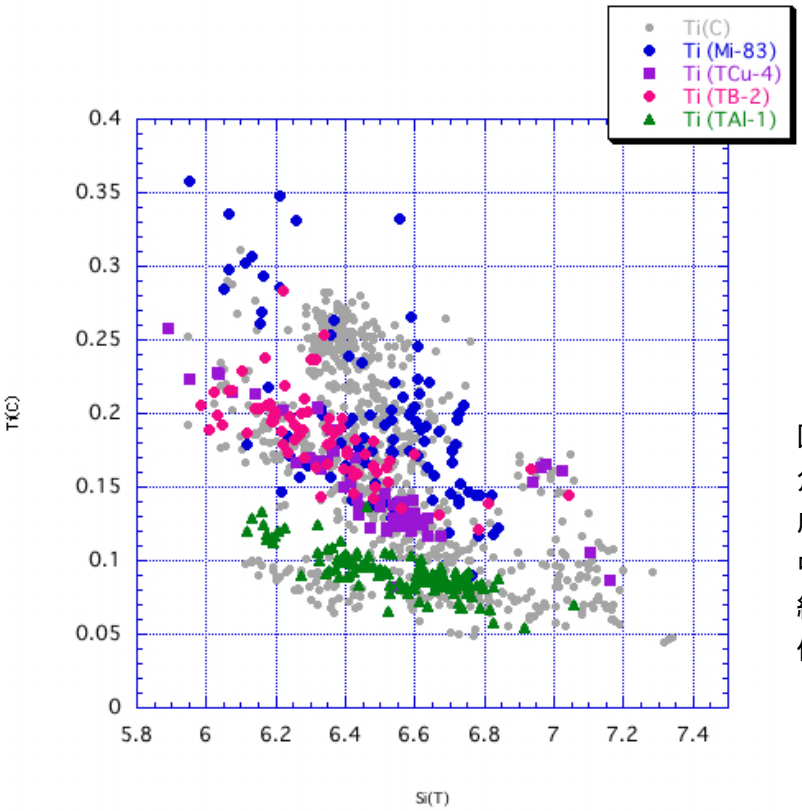


図 5　箱根地域に降下堆積した角閃石テフラ中の角閃石の組成範囲と、宮城野コア(Mi-83)中の角閃石組成。横軸は Si、縦軸は Ti の結晶内における配位数。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［５］大磯丘陵の地質に関する研究

1. 研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">大磯丘陵の地質調査を実施し、その層序区分の再検討や地質試料の解析をおこない、大磯丘陵の地質と隆起過程を明らかにする。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="4">地表踏査（地層の分布・岩相などの記載、サンプリング）
地下地質試料（ボーリング試料）の記載</td><td rowspan="3">調査結果の検討（含再調査）とまとめ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">文献・既存資料調査</td><td colspan="3">岩石試料の分析</td></tr>
<tr><td colspan="3">顕微鏡下における岩相等の記載</td></tr>
<tr><td>目標とした成果</td><td colspan="5">①大磯丘陵の修正地質図の作成
②県中西部の地下地質柱状図（とその対比図）の作成
③大磯丘陵の隆起陸化過程に関する知見</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	小田原　啓	全般
共同研究者		

[1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果]

県西部大磯丘陵は、プレート境界とされている相模トラフの東部に接する沖ノ山堆列と一連の地質体を成しており、同堆列の北西端部が、フィリピン海プレートの北西行に伴う地殻変動の結果として、隆起陸化した地塊と考えられている。同丘陵の地質構造や層序を明らかにすることは、地質学的に県西部地域のテクトニクスを議論する上において非常に重要である。しかしながら大磯丘陵の地質層序区分に関して研究者間で一致をみていないところが多く、再検討が必要であるため地質調査等を行い、大磯丘陵の地質と隆起過程を明らかにすることを目的とする。

b) 平成18年度から19年度の研究と成果

・研究実施内容

これまでに公表されている文献調査、および小田原市前川で行われた大深度温泉の地質調査を行った。

・成果

文献資料の精査を行った結果、大磯丘陵の第四紀地質、特にテフラ層序については、関東第四紀研究会（1987）によって詳細な地質図が作成されている。しかしながら第三系については、岩相に基づいて区分されているものの、その層序や対比について多くの問題が残されている。同丘陵の地質層序に関する研究については、1980年代後半以降、数例を除いてほとんど進められていない。現段階での知見をまとめると、

・大磯丘陵の第三系は、生沢断層を挟んで大きく２つの地塊に区分される(図 1)。

・最も古い地層は、高麗山に分布する高麗山層群とされている。

・大磯丘陵の第三系は、県東部地域に分布する葉山層群および三浦層群の相当層とされているが、その層序対比は明確になっていない。

ことが明らかとなった。

大磯丘陵南西部に位置する小田原市前川字向小原において深度1000mの大深度温泉が掘削され、スライム試料およびコア試料を入手した。これらの地質試料について実体顕微鏡下における鑑定を行い、以下の成果を得た。

・地表では、生沢断層を挟んで東側には高麗山層群相当層が露出しないが、小田原市前川の大深度温泉井の孔底-1000mでは同層群相当層が分布する可能性がある。

また、地質試料により地質柱状図（図2）を作成した。カッティングス試料の観察の結果、多少の変化はあるが基本的に孔底1000mまで礫岩層から構成された。石灰質ナンノ化石委託分析の結果、深度690mからCN4帯を示す化石が検出され、少なくともこの深度以深は、中部中新統葉山層群に対比された。また同温泉井の地質試料からは、CN9帯を示すナンノ化石が全く産出されず、大磯丘陵に分布する谷戸層、剣沢層、大磯層相当層を欠く可能性が示唆された。

c） 平成20年度から22年度の研究と成果

・研究実施内容

平成19年度中の台風後に二宮海岸に露出した谷戸層について、島根大学および生命の星・地球博物館との合同調査を行なった。

・成果

二宮海岸に露出した所属不詳層（サンプリング調査のルートマップを図3に示す）について、浮遊性有孔虫化石年代、石灰質ナンノ化石年代、フィッショントラック年代を求めた結果、浮遊性有孔虫から後期中新世ー前期鮮新世、フィッショントラックから後期中新世という年代を得た。岩相だけから判断すると葉山層群に類似すると考えられたが、これまでの先行研究と同様、三浦層群と同時期のものであることが明らかとなった。また、この結果は、石灰質ナンノ化石により谷戸層をOkada and Bukry (1980) のCN9帯とした先行研究（矢野、1986；蟹江ほか、1999）と矛盾せず、岩相上の類似や分布も考慮し、この所属不詳層を谷戸層に対比した（図4）。

一方、吾妻山、鷹取山に分布する谷戸層の石灰質ナンノ化石年代についても検討したところ、吾妻山からは産出しなかったものの、鷹取山の谷戸層の試料からはCN10を示す化石が検出された。これまで谷戸層の年代は吾妻山でCN9と報告されており、鷹取山の谷戸層からの年代の報告はない。また、谷戸層の上位の鷹取山層（鷹取山礫岩層）がCN10とされている。したがって鷹取山において谷戸層とされているものは、鷹取山層の泥質、砂質な部分である可能性もある。

［2. 結論ならびに新たな課題］

地質層序区分に関して研究者間で一致をみていない大磯丘陵について、断片的ではあるが新たな知見を積み重ねることができた。しかし、所期の目標とした成果を達成したと言うには不十分であった。これには、温泉地学研究所が平成21年度から3か年計画で始まった「神縄・国府津－松田断層帯の重点的な調査観測」プロジェクトに参加したため、同断層帯の北縁部の活断層調査に研究ウェイトを大きくシフトせざるを得なくなった事情もあるが、後半の研究がやや手薄になったのは反省点である。しかし、当該プロジェクトによって、今後、大磯丘陵を含む国府津－松田断層帯の新たな知見が数多く出される可能性が高い。本研究の成果をそれらと統合的に整理、検討しつつ、引き続き調査・研究を続けていくことが必要である。

[3. 投稿論文、学会発表などの成果]

論文

(1) 小田原啓，小田原市前川の大深度温泉の地質，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.39，85-88，2007.

(2) 小田原啓・林広樹・山下浩之，神奈川県二宮町梅沢海岸の谷戸層の微化石年代，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.41，47-50，2009.

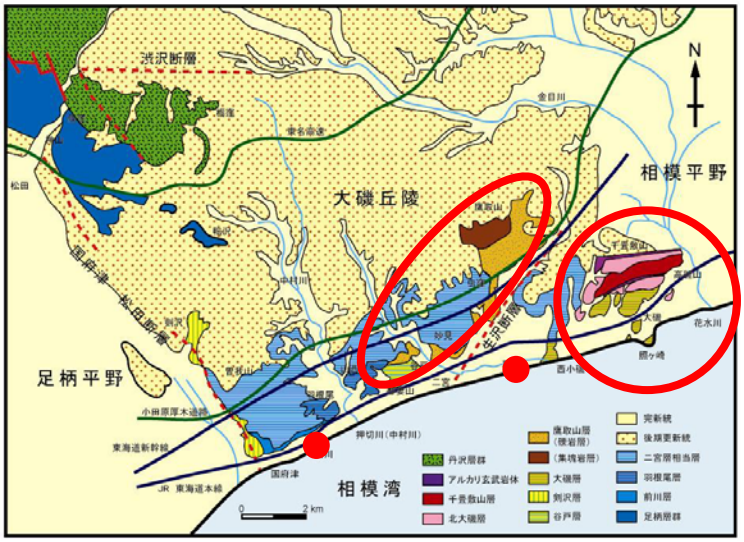
学会発表

(1) 小田原啓，神奈川県大磯丘陵で掘削された大深度温泉井の地質，日本地質学会第115年学術大会，2008.

(2) 小田原啓，神奈川県大磯丘陵鷹取山に分布する谷戸層について，日本地質学会第116年学術大会，2009.

(3) 石浜佐栄子・平田大二・小田原啓・檀原徹・岩野英樹，大磯丘陵に分布する新第三系谷戸層のフィッション・トラック年代，日本地球惑星科学連合大会予稿集（CD-ROM，SSS023-P03)，2010.

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料



● 大深度温泉井掘削地点（小田原市前川および大磯町）

図 1 大磯丘陵の地質図（蟹江ほか、1999 に加筆）

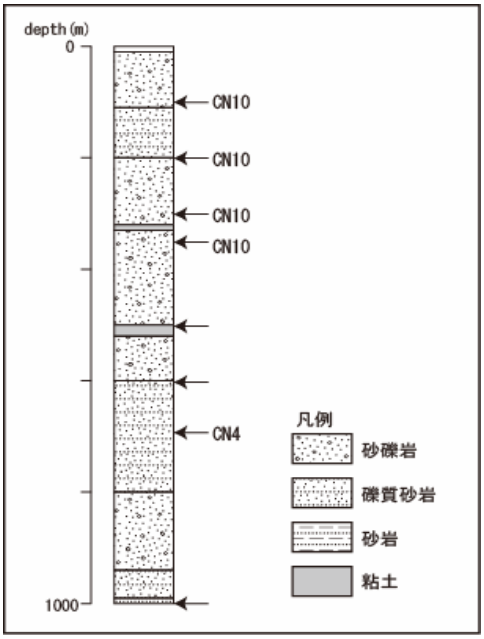


図 2

小田原市前川で掘削された大深度温泉井の地質柱状図。矢印は石灰質ナンノ化石分析を行った深度及びその結果を示す。

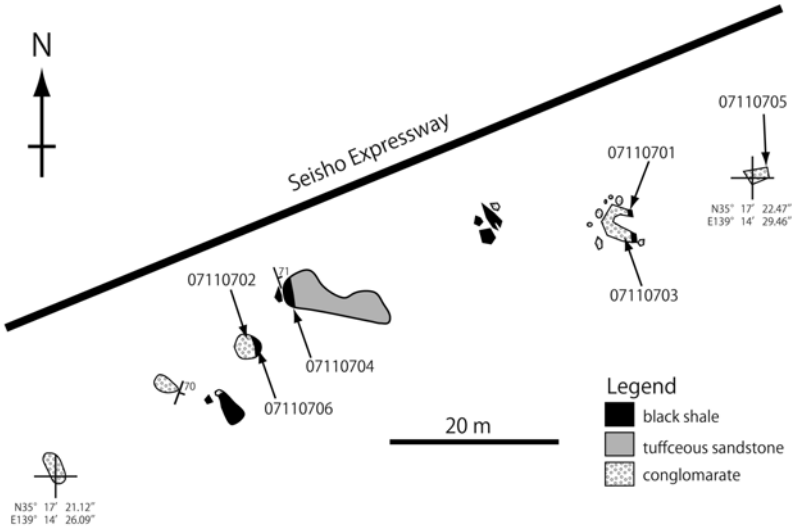


図 3　二宮町梅沢海岸に露出した地層のルートマップ
番号 07110701 より浮遊生有孔虫化石が産出した。

図 4
二宮海岸に露出した谷戸層。礫岩中にはサンゴや石灰藻球化石が含まれている。この礫岩の堆積場は、陸棚斜面のチャネルとした先行研究（Ito, 1986）と矛盾しない。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［６］県内の大深度温泉とその帯水層の水文・地質に関する研究

1. 研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="6">温泉帯水層となる地層の分布状況の把握や泉質や同位体分析結果にもとづく成因の分類を進め、水の起源や涵養減、地下水の流動･滞留時間などを検討する。これらの結果から化石海水と天水の関わり方などに着目した大深度温泉の湧出機構の具体像を提示する。</td></tr>
<tr><td rowspan="12">年次計画</td><td></td><td>H18</td><td>H19</td><td>H20</td><td>H21</td><td>H22</td></tr>
<tr><td rowspan="3">①</td><td colspan="2">実態調査結果の解析
→モデル化する現象抽出</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">補足調査</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">モデルの検討・解析→経年変化の原因解明</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">②</td><td colspan="5">試験結果収集・入力～</td></tr>
<tr><td>解析手法検討</td><td colspan="4">試験結果の解析による透水係数の算出～</td></tr>
<tr><td></td><td>ＤＢ定義</td><td colspan="3">透水係数・地質・成分等のＤＢ登録～</td></tr>
<tr><td rowspan="3">③</td><td>文献調査</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="3">既存試・資料の整理・再検討</td><td colspan="2">地質年代の決定</td></tr>
<tr><td colspan="5">新規大深度温泉井掘削試料の地質学的・堆積学的解析～</td></tr>
<tr><td>④</td><td colspan="3"></td><td colspan="2">とりまとめ・具体像の提示</td></tr>
<tr><td>期待された成果</td><td colspan="6">①源泉における経年変化の原因究明
②温泉採取層(帯水層)となっている地質の構造・分布の把握
③大深度帯水層の透水係数の分布
④透水係数・地質・成分データのＤＢ
⑤化石海水と天水の関わり方などに着目した大深度温泉の具体像の提示</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	主任研究員　板寺一洋	同位体分析と解析、透水性の検討
共同研究者	主任研究員　菊川城司 技師　　小田原啓	化学成分の分析と解析 地質資・試料の解析

[1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果]

a)平成18年度から20年度の取り組み

①経年変化についての検討

2008年度末までの実態調査結果について整理した。

②酸素・水素同位体比の測定と検討

2008年度までに採取した試料について同位体分析を実施した。成分・同位体比の特徴から、県内大深度温泉の成因を３つのグループに分類した。

③主要帯水層と透水性の検討

ボーリングコア等の地質試料、検層結果にもとづき、主要な大深度温泉帯水層の分類を行った。揚湯試験結果を、浅層帯水層と同様の方法で解析し、温泉取水層の透水性について検討した。

b)平成21年度から22年度の取り組み

①方針転換→現状の評価

経年変化の評価により、現象を抽出・モデル化できるほど十分な数のデータが揃わなかったことから、収集した成分・同位体比・地質のデータを総合的に検討し、現状を評価することを研究目的の主体とした。20年度までに行った３グループの分類をもとに、それぞれの温泉水の生成過程や起源について明らかにした。

②詳細の検討

①により、グループ２が県東部と西部で細分されることが明らかとなった。とくに硫酸イオン濃度が低いグループ２Aについて、その機構が地層と地下水の反応、あるいはバクテリアによる硫酸イオンの分解なのかについて検証するため、硫黄同位体比の検討を行っている。

[2. 結論ならびに新たな課題]

a)5年間で得られた成果のまとめ

・県内大深度温泉を３つ（４つ）にグループ化し、その成因を解明した。

・県東部における主要な帯水層が上総層群であることを明らかにするとともに、その形状を把握した。また、その透水性が浅層地下水のそれに比べて数オーダー程度低いこと、その中でも、横浜・川崎地域では相対的に透水性が高いことが推察された。

b)期待された成果の達成度

・調達できたデータ量に限りがあり、方針転換はあったものの、既存データの集約により、大深度温泉の成因を解明するという目的については、ある程度達成できた。

c)今後の課題

・ここまでの成果〈地域によって成因が異なること〉の見せ方に工夫が必要。また、これを踏まえて、将来予測等を行い、資源保全等のために必要な施策の構築について、行政と連携して取り組む必要がある。

・平成19年の事故発生以降、温泉に附随する可燃性天然ガスが問題視されたのを受け、県内の実態解明調査を実施した〈代田ほか〉。その結果、特に大深度温泉で高濃度のメタンガスが湧出していること、その原因が温泉の成因や、温泉取水層の地質と深く関わっていることが明らかとなった。これを踏まえ、温泉附随ガスの実態も含めて、総合的な説明が可能な大深度温泉成因モデルの構築が課題となる。

［3. 投稿論文、学会発表などの成果］

菊川・小田原・板寺(2007) 孔底温度から見た神奈川県内の地温勾配, 温地研報告, 39, 79-84.
小田原(2008) 横浜市及び川崎市内の大深度温泉井の掘削資料から推定される上総層群/三浦層群境界, 温地研報告, 40, 87-90.
板寺・菊川・小田原(2009) 神奈川県内の大深度温泉の流動、日本温泉科学会第６２回大会
板寺・菊川・小田原(2010) 神奈川県内の大深度温泉水の起源、温泉科学、温泉科学, 59(4), 320-339
板寺 (2010)温泉と地盤、(社)地盤工学会、関東支部神奈川県グループ編　大いなる神奈川の地盤　第3章第2節.

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料

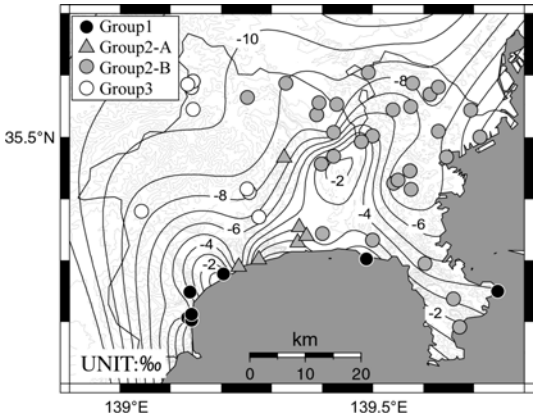


図１　大深度温泉のグループの別と、酸素同位体比の空間分布：主要成分の特徴や地下水・(化石)海水の混合の状況に地域性が認められる。

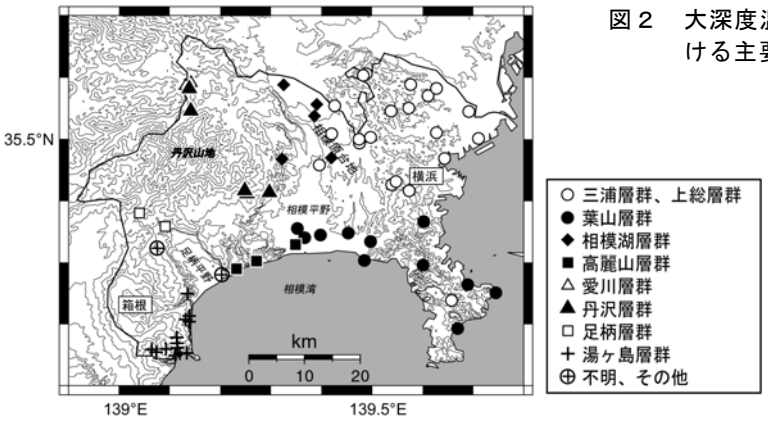


図２　大深度温泉取水層の地質区分　県東部における主要な温泉取水層は上総層群である。

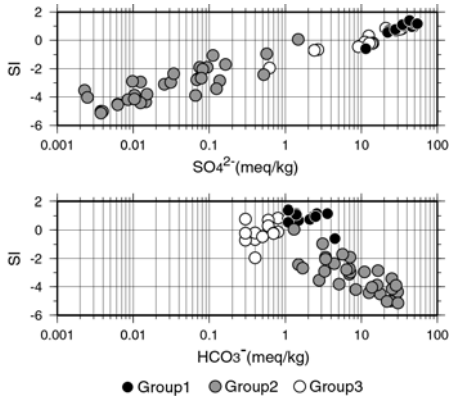


図３　温泉水の硬石膏に対する飽和度とSO_4濃度およびHCO_3濃度との関係：温泉水は硬石膏に対して著しく不飽和であり、硫酸還元バクテリアの関与について検討する必要がある。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［７］箱根の基盤岩中に胚胎される温泉の湧出機構について

1．研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">箱根温泉のうち湯本温泉をはじめとする基盤岩中に胚胎される温泉の湧出機構の解明に向け、各源泉の温度、量、水位、成分などの経年変化を解析することにより枯渇化のパターンを把握し、その原因を追求する。また、温泉の成分、水素酸素同位体比、温泉帯水層の地質などから、箱根温泉の第Ⅳ帯の再検証をおこなう。これらの結果から、箱根温泉の保護対策に対する提言をおこなう。</td></tr>
<tr><td rowspan="7">詳細な
年次計画</td><td>Ｈ１８</td><td>Ｈ１９</td><td>Ｈ２０</td><td>Ｈ２１</td><td>Ｈ２２</td></tr>
<tr><td colspan="4">地質試料の検討、検層データの再確認</td><td rowspan="3">第Ⅳ帯分類の
再検証</td></tr>
<tr><td colspan="2">湯本地区源泉の経年変化、枯渇状況の把握</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">湯本地区源泉の水素酸素同位体比の測定、温泉成分の分析</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">箱根上地区源泉の経年変化、枯渇状況の把握</td><td rowspan="4">保護対策への提言</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">箱根上地区源泉の水素酸素同位体比の測定、温泉成分の分析</td></tr>
<tr><td colspan="2">静水位データの整理</td><td colspan="2">水頭分布による流動解析</td></tr>
<tr><td>期待された
成果</td><td colspan="5">①基盤岩中の温泉について、地質試料の検討などにより温泉帯水層の解明
②湯本地区の源泉について、温泉の特徴、枯渇化のパターンを分類
③箱根上地区の源泉について、温泉の特徴、枯渇化のパターンを分類
④水素酸素同位体比、温泉成分などから、温泉の水の由来を把握
⑤第Ⅳ帯の源泉について再検証することにより、分布図の作成</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	主任研究員　菊川城司	化学成分の分析、とりまとめ
共同研究者	主任研究員　板寺一洋 主任研究員　萬年一剛	安定同位体比の測定 地質試料の検討

[1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果]

中期研究計画においては、箱根温泉のうち基盤岩中に胚胎される温泉の湧出機構の解明に向けた研究を行い、箱根温泉の保護対策に対する提言を行うこととした。5 年間の成果は次のとおりである。

・箱根湯本地区（箱根湯本温泉及び塔之沢温泉）の源泉について、一斉調査を行い、経年変化を評価した。同地区では、1990（平成 2）年以降は溶存成分の減少が穏やかになっている傾向が認められた。しかし、箱根湯本温泉の中心部では溶存成分の減少が進んで塩類泉が減少し、単純温泉が増加していることが判った。
・陰イオンの特徴などから、箱根湯本地区の温泉のソースを４つに仮定して，その混合により箱根湯本地区の温泉の成因が簡単に説明できることを示した。また，地域性から「湯坂山グループ」，「塔之沢・湯場グループ」，「古期外輪山グループ」及び「畑宿・須雲川グループ」の4つに分類した。
・大平台温泉、堂ヶ島温泉、宮城野温泉など箱根湯本地区以外の基盤岩から湧出する温泉について、一斉調査を行った。これらの温泉場に湧出する温泉は全てが基盤岩中の温泉とは限らないが、宮ノ下温泉や底倉温泉など中央火口丘の温泉と比較して明らかに異なった化学組成を持つことが明確となった。
・箱根湯本地区以外の源泉については、萬年(2008)の提唱する潜在カルデラ構造と関連づけて解析することとしたため、現在詳しく解析中である。
・温泉保護対策を進めるにあたって、枯渇化をどこまで回復させるか目標を明確にすることが重要である。現状維持を目的とするなら現在の保護対策程度で十分はあるが、過去の温泉が豊かであった時期と同等まで回復するためには現在の保護対策では不可能である。

[2. 結論ならびに新たな課題]

本研究により、箱根湯本地区の温泉について、その成因によるグループ分けが行われ、経年変化が把握できた。今後は枯渇化の傾向に基づき、グループ毎の将来的な温泉資源の変動の予測に利用されることが期待される。

本研究の成果に基づき、現在の温泉保護対策要綱が適切であるか判断し、より現状に即した形で見直し改定することによって、箱根における温泉保護対策がより強固なものとなる。また、更に研究を進め、箱根の基盤岩中温泉の利用適正量が把握できれば、湯量が減少する以前の本来の温泉地の姿に戻すための対策に資することが出来る。

今後は、箱根湯本地区以外の温泉についても、最新の箱根火山形成史に基づき温泉の生成機構の解明に向けて調査研究を進めることにより、箱根温泉全体の温泉保護対策に資するための情報提供ができる。

本研究で計画したうち、検層データの再確認、水頭分布による流動解析は未着手であるが、次期中期研究計画以降に進めることとしたい。

［3. 投稿論文、学会発表などの成果］

Kikugawa and Itadera(2008)Long-term Assessment of Hot Spring Waters in Hakone Volcano ～The case of Hakone-Yumoto area～，国際温泉会議ならびに第 62 期国際温泉気候連合大会

菊川・板寺(2008)箱根湯本地区温泉の泉質経年変化の評価，神奈川県博物館調査研究報告(自然),13,195-210

菊川・萬年(2006)箱根湯本温泉・湯本第 126 号源泉の特徴，温地研報告,**38**,83-86

菊川・板寺(2008)箱根湯本温泉、塔之沢温泉の経年変化と成因に関する考察，第62回日本温泉科学会大会

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料

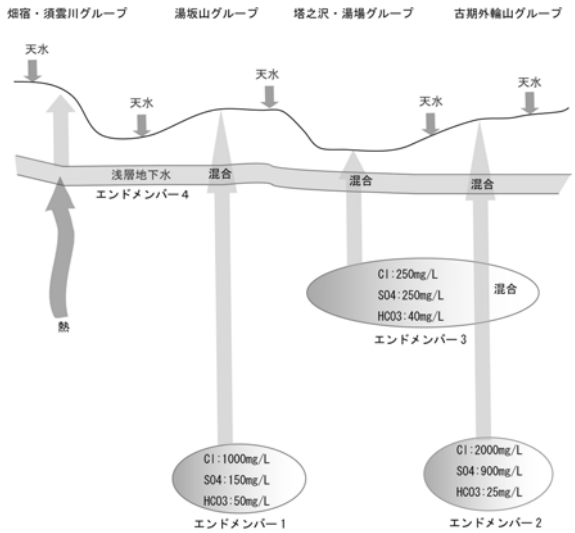


図１　箱根湯本地区温泉の成因モデル

箱根湯本地区温泉の生成機構は、含有する化学成分や酸素・水素同位体比の解析結果から、4つのエンドメンバーの混合によって、簡単に説明できることが判った。

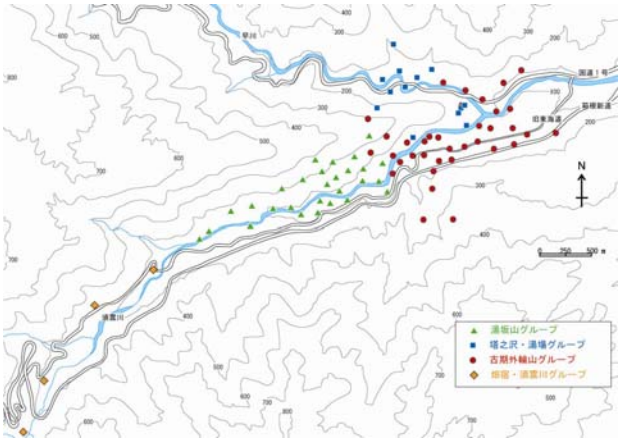


図２　箱根湯本地区の温泉分布図

各グループの分布は、地域的に特徴を持っている。「湯坂山グループ」は湯坂山南東麓、「塔之沢･湯場グループ」は塔之沢から湯場にかけての早川沿い、「古期外輪山グループ」は早川須雲川合流地点から須雲川沿い、「畑宿･須雲川グループ」は須雲川上流部に、それぞれ分布している。

第２期中期研究　報告書

研究課題：［８］地下水流動系の把握にもとづく地下水の水質形成機構の解明

1. 研究計画の概要

<table>
<tr><td>内　容</td><td colspan="5">⑴三次元地下水シミュレーションや、地下水位等の三次元的測定による地下水流動系の把握
⑵地下水流動系の把握にもとづく涵養域の土地利用と、土壌水・地下水との関係の解明
⑶土壌水の水質や土壌溶出・含有量の測定、環境同位体トレーサーやポテンシャル測定による土壌水・地下水の挙動と水質形成機構の解明
⑷地下水流動系の把握にもとづく、地下水流動経路における地質と地下水水質との関係の解明
⑸地下水流動系の把握にもとづく、流出域近傍における地表水と地下水との相互関係や硝化・脱窒域(いわゆるホットスポット・ホットパス)の実態解明。
⑹神奈川県内の湧水、自噴井、及び公共井戸(防災指定井戸)調査とデータベース化</td></tr>
<tr><td>年次計画</td><td>2006(H18)</td><td>2007(H19)</td><td>2008(H20)</td><td>2009(H21)</td><td>2010(H22)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(1)地下水流動経路の把握</td><td>三次元的な地形・地質データの収集</td><td>地下水シミュレーションモデル構築</td><td>地下水シミュレーションモデル検証</td><td>→涵養域・流動経路の特定</td><td>→涵養域・流動経路の特定</td></tr>
<tr><td colspan="3">三次元的な地下水流動系の測定</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>(2)土地利用と地下水の関係解明</td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">涵養域における土地利用と水質との関係の解析</td></tr>
<tr><td>(3)土壌水と地下水との関係解明</td><td>土壌水質と土壌溶出・含有量の解析</td><td colspan="2">土壌水の降下浸透過程における水質形成機構の解明</td><td colspan="2">土壌水と地下水の相互作用に関する研究</td></tr>
<tr><td>(4)地質と地下水との関係解明</td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">流動経路における地質と水質との関係の解析</td></tr>
<tr><td>(5)流出域での水質変化の解明</td><td>対象流域選定(過去調査地点精査)</td><td>調査地点、調査手法の検討</td><td>現地調査</td><td>現地調査</td><td>解析</td></tr>
<tr><td>(6)湧水等DB化</td><td colspan="2">湧水・自噴井リスト化と調査</td><td colspan="3">防災指定井戸情報の収集の検討</td></tr>
<tr><td>成　果</td><td colspan="5">①ある地点・深度で採水された地下水の涵養域や流動経路を、三次元的に測定もしくは推定するための調査手法や数値モデルを確立する。
②硝酸性窒素などの地下水汚染起源となる涵養域の土地利用を特定する。
③地下水の水質に与える、土壌水の影響を明らかにする。
④地下水中の陽イオン成分など、地質起源となる成分について、流動経路の地質の影響を明らかにする。
⑤地下水中における硝化・脱窒・希釈など、窒素浄化機能が生じている領域を特定し、実態を解明する。
⑥神奈川県内の湧水MAPを作成し、ホームページで公開する。</td></tr>
</table>

2. 研究報告

	職・氏名	分担
研究代表者	宮下雄次	全般
共同研究者	小寺浩二（法政大准教授）	(6)湧水等DB化

[1. 中期研究課題への５か年の取組み及び成果]

[1. 中期研究課題への取組状況及び成果]

(1)地下水流動経路の把握

(1-1) 三次元地下水シミュレーションによる地下水流動系の把握

過去に整備した流動解析システム(横山他,1994)の地下水位データ[浅井戸2,970地点、河床1,201地点、湧水134地点、計4,305地点]を抽出し、地下水シミュレーションモデルの初期水頭データとして用いる浅層地下水面データを250mメッシュで整備した。

過去に収集整備した地下地質資料(温泉地学研究所,1993)のボーリングーデータ[県内3,554地点]について、座標系の変換を行い、地下水シミュレーションモデル構築のための基礎データを整備した。

(1-2) 地下水位等の三次元的測定による地下水流動系の把握

これまで殆ど測定されることがなかった自噴井における自噴高について、自噴高測定用パッカー(図１)・スクリーン深度確認用パッカーを開発作成し、自噴高及びスクリーン深度から地下水ポテンシャル分布について調査を行い(図２)、自噴域における深層地下水の流動について明らかにした。また、足柄平野中下部に広く分布する自噴域について、新たに可能自噴域という定義を提唱し、現地観測による検証を進めている。

(3)土壌水と地下水との関係解明・(5)流出域での水質変化の解明

平成19日大卒業研究と共同で、地下水流出域の畑において土壌水の降下浸透過程及び地下水位上昇時における水質形成機構について、水質及び安定同位体比から解析した(図３)。

平成19年度調査の続きとして、地下水涵養域における畑において、土壌水の降下浸透過程及び水質形成機構について、水質及び水の安定同位体比から調査・解析を行った。

(6)湧水等DB化

県内の湧水中の主要溶存成分、湧出量、安定同位体比分布を明らかにすることで、降水の高度効果を明らかにし、同位体比を用いた涵養高度の特定や水系区分などを行うための基礎データとして整備した。

地下水流動や地形等のデータと湧水分布・湧水量・水質等を重ね合わせた湧水マップを作成した(図４)。

[2. 課題点]

(1)地下水流動経路の把握

(1-1)　地下水シミュレーションモデル構築まで到達できなかったので、引き続きデータ整備を行い、モデル構築とシミュレーション解析を進める。

(1-2)　集中的な現地調査を実施できなかったことから、(5)湧水等データベース化において進めてきた自噴井データの収集と合わせて、集中観測の実施を行う。

(2)土地利用と地下水の関係解明

サブテーマ(1)に掲げた地下水流動経路の把握が出来なかったため、土地利用と地下水の水質を結びつけた解析を行うことが出来なかった。

(3)土壌水と地下水との関係解明・(5)流出域での水質変化の解明

当所機材における土壌簡易ボーリングでは、地下水涵養域における土壌調査を行うことが出来なかった。今後は、より能力の高い調査機材の活用を検討する必要がある。

(4)地質と地下水との関係解明

サブテーマ(1)に掲げた地下水流動経路の把握が出来なかったため、地質と地下水の水質を結びつけた解析を行うことが出来なかった。

(5)流出域での水質変化の解明

当初の計画では、流出域に調査地域を設定し、数年間の現地調査を実施するとあるが、調査地域(対象流域)を設定することが出来ずに、流出域における1地点での土壌-地下水鉛直調査での対応のみとなっている。

(6)湧水等DB化

当初の計画では、公共井戸(防災指定井戸)調査とデータベース化をH20以降予定していたが、個人情報保護の問題から、研究ベースでの井戸情報(≒個人情報)の収集を断念し、計画から削除した。また、県内湧水の調査については、一部地域(箱根火山カルデラ内)を除いてほぼ完了したが、足柄平野に数多く分布する自噴井については、ほとんど調査を行うことが出来なかったので、今後も継続する必要がある。

[3. 投稿論文、学会発表などの成果]

投稿論文

宮下雄次(2006)地下水の硝酸性窒素汚染と周辺土地利用との関係,地下水技術,48(8),p.25-34
宮下雄次(2008)土壌・地下水汚染対策調査のための適正なサンプリング地点の選定方法,水環境学会誌,31(2),p.67-71
宮下雄次・清水裕太・徳原知靖・小寺浩二(2008)酸素位体比による三浦半島南部地域河川水への生活排水の影響,日本水文科学会誌,38(2),p.71-80
宮下雄次(2009)灌漑と地下水－足柄平野の事例－農の礎,69,p.41-44
宮下雄次(2009)土壌・地下水汚染対策調査における効果的な地下水調査の方法について,かながわ環境技術会誌,9, p.33-37

学会発表

2007(H19):小寺浩二・清水裕太・宮下雄次・徳原知靖,三浦半島南部における陸水の性質について-集約的農業地域の水環境と物質循環-,日本陸水学会第72回水戸大会
2007(H19):宮下雄次・清水裕太・徳原知靖・小寺浩二,酸素位体比による三浦半島南部地域河川水への生活排水の影響,2007年度日本水文科学会シンポジウム
2007(H19):清水裕太・小寺浩二・宮下雄次・小野寺真一,地域特性を考慮した硝酸性窒素による水環境汚染問題に関する水文科学的研, 2007年度日本水文科学会学術大会
2007(H19):清水裕太・小寺浩二・宮下雄次,三浦半島南部の水環境の現状と課題-都市近郊集約的農業地域の汚濁負荷量解析から-,陸水物理研究会
2008(H20):清水裕太・小寺浩二・宮下雄次,集約的農業地域小河川の流出特性-畑地作付けの変化が河川流出へ与える影響-,日本地理学会2008年春季学術大会
2008(H20):宮下雄次・清水裕太・小寺浩二,地下水中の硝酸性窒素濃度と地下水位の季節変化について, 地球惑星科学関連学会2008年合同大会
2009(H21):宮下雄次, 箱根火山における降水と湧水、河川水の安定同位体比について, 地球惑星科学連合2009年合同大会
2009(H21):西﨑 弘人・小寺 浩二・宮下雄次,神奈川県における湧水の水質特性と水温変動特性, 日本陸水学会第74回大会（大分大会）
2009(H21):西﨑 弘人・小寺 浩二・宮下雄次, 神奈川県における湧水の水質特性と水温変動について, 日本地理2009年度秋季学術大会
2009(H21):西﨑 弘人・小寺 浩二・宮下雄次, 神奈川県における湧水・名水の水質特性－湧水形態と地域性から－, 陸水物理研究会

〔備考〕研究のフローチャートや成果図など、研究成果等補足資料

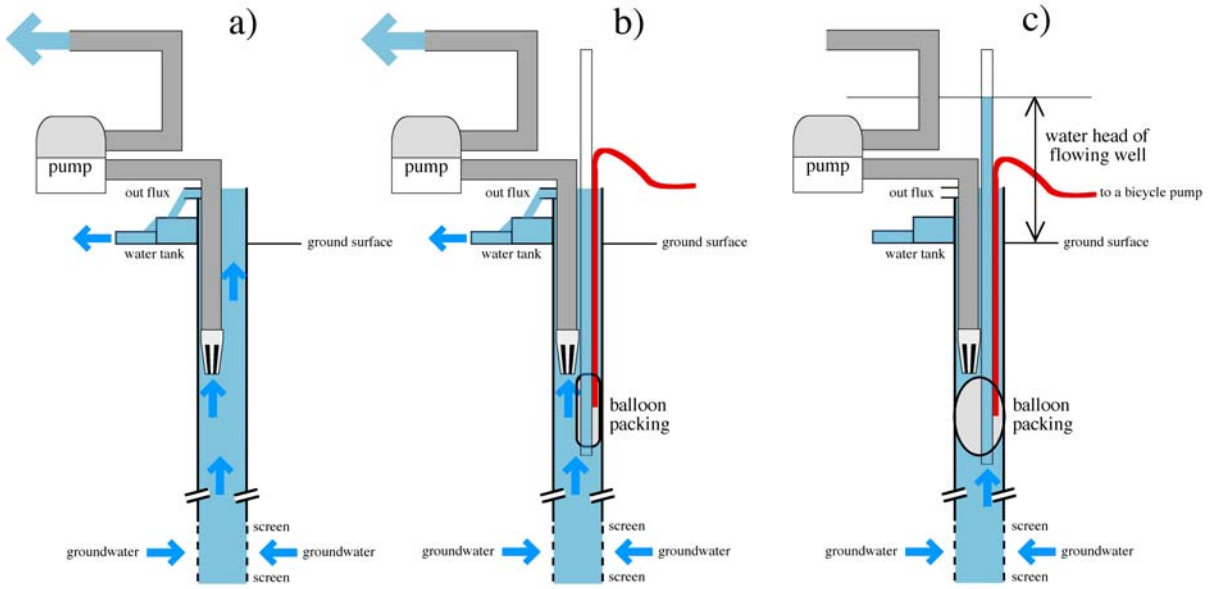
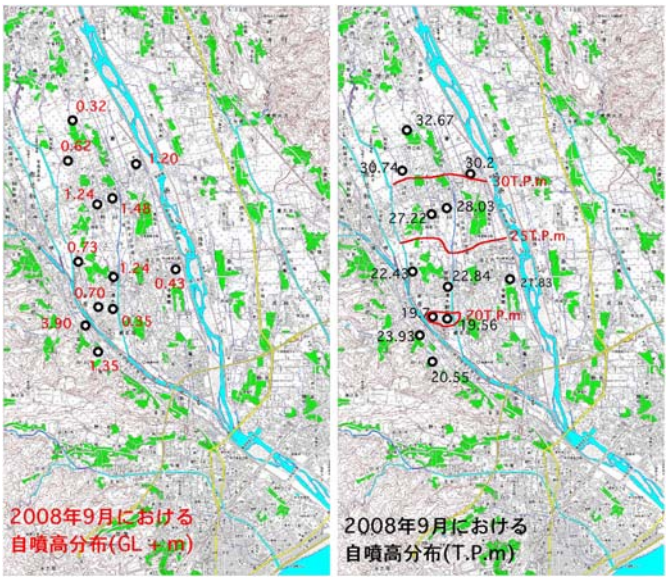


図１(上)　自噴高測定用パッカー模式図[a)通常状態,b)パッカー挿入,c)測定時]



井戸管とポンプの揚水管の20～10mm程度の隙間からパッカーのついたチューブを挿入し(Fig.1b)、揚水管の下部で水止め用のパッカーをふくらませる(Fig.1c)ことで、パッカーの下部からチューブ内のみを通って上昇した自噴井地下水の高さを測定する。

図２(左)　足柄平野酒匂川右岸域における自噴高分布（2008年9月調査)。

狩川・仙了川合流部付近がポテンシャルが低く、酒匂川から狩川方向に向かって被圧地下水が流動しているのが明らかとなった。

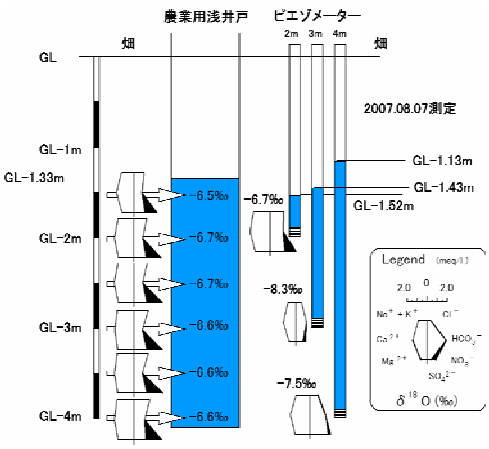


図３　流出域での水質変化

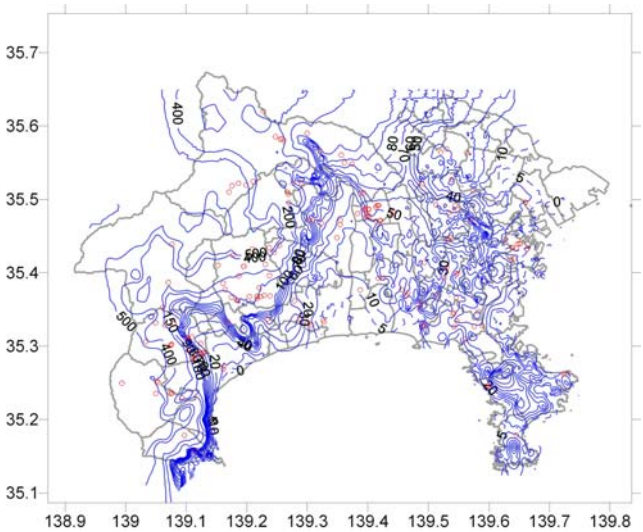


図４　浅層地下水面図及び湧水地点(湧水マップ)