



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

陸上科学掘削トピックス

井 龍 康 文
浅 沼 宏
廣 野 哲 朗

Current topics in on-land scientific drilling projects in Japan

Yasufumi Iryu • Hiroshi Asanuma • Tetsuro Hirono

いりゅう やすふみ : 東北大学大学院理学研究科
地学専攻
あさぬま ひろし : 産業技術総合研究所・
地圏資源環境研究部門
ひろの てつろう : 大阪大学大学院理学研究科
宇宙地球科学専攻

陸上科学掘削は、海洋科学掘削に比べ予算は少なく、コミュニティーの規模も小さいが、多くの科学的成果をあげて来た。その中心的な役割を担って来たのは、国際陸上科学掘削計画である。本論では、国際陸上科学掘削の枠組みで、日本で実施が予定、計画、立案中の3つの科学掘削計画を紹介する。

1. はじめに

科学掘削は、露頭からは得られない試料やデータを取得するための重要な手段であり、地球科学の発展に大きな役割を果たして来た。その代表例として、深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Project; DSDP) (1968 年開始) から統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program ; IODP) に至る一連の海洋底掘削を挙げることができる。一方、陸上掘削に関する国際共同研究である「国際陸上科学掘削計画 (International Continental Scientific Drilling Program ; ICDP)」は DSDP の開始から約 30 年後の 1996 年に開始され、雲仙科学掘削プロジェクトを始めとする重要な掘削が、その枠組みの中で数多く行われてきた (浦辺, 2013)。このような背景のもと、日本における地球掘削科学を推進するために 2003 年に結成された日本地球掘削科学コンソーシアム (Japan Drilling Earth Science Consortium ; J-DESC) には、IODP を推進する IODP 部会と ICDP をはじめとする陸上科学掘削を推進する陸上掘削部会が設置された。

我々は 3 名とも J-DESC 陸上掘削部会の執行部のメンバーであり、日本の陸上科学掘削の活動を活発化させるべく、それぞれの立場と科学分野で尽力している (例えば、井龍ほか, 2013)。本論では、我々が実施中 (2 で紹介する COREF 計画)、計画中 (3 で紹介する JBBP)、立案中 (4 で紹介する大都市直下型の活断層掘削) の陸上掘削科学計画を紹介し、日本の陸上科学掘削コミュニティーを覚醒したい。なお、2013 年 4 月に、地学雑誌 (東京地学協会刊) により「日本における陸上科学掘削の現状と展望」が出版された。同特集号は、今後、日本において陸上科学掘削を実施し

て行くうえで重要な内容を含む9編の論文で構成されており、是非、本論と併せて読んでいただきたい。

2. 第四紀気候変動に対するサンゴ礁・サンゴ礁生態系の応答を解明する COREF 計画

サンゴ礁の規模や分布ならびにサンゴ礁生態系を構成する生物の分布や群集組成は、水温、塩分、陸源性碎屑物の供給量、底質、波浪等の様々な環境要因に規制されている。このため、サンゴ礁堆積物から、環境変動に対するサンゴ礁およびサンゴ礁生態系の応答を読み取ることができる。なかでも、サンゴ礁の分布の北限や南限付近に位置するものは、熱帯低緯度のサンゴ礁の分布の中心域のものに比べ、環境の変化に対してより敏感に応答したと推定される。

琉球列島は太平洋におけるサンゴ礁の分布の北限という動物地理学的に特異な位置にある。また、琉球列島の島々の多くでは、第四紀更新世および完新世にサンゴ礁およびその沖合海域(以下、サンゴ礁複合体と呼称する)で形成された堆積物が、陸上に広く分布する。したがって、氷床の拡大・縮小により、温暖化・寒冷化や海水準の上昇・下降が繰り返して起きた第四紀における熱帯～亜熱帯の気候や浅海環境の変動とサンゴ礁・サンゴ礁生態系の相互関係を明確にするには、琉球列島は理想的なフィールドと思われる。

そこで、琉球列島で形成された第四紀サンゴ礁堆積物を掘削し、得られた試料から

- 1) 環境変動・海水準変動に対するサンゴ礁・サンゴ礁生態系の応答
- 2) サンゴ礁生態系の時空変化

を明らかにする科学計画である国際共同研究、COREF 計画を立案した。COREF 計画では、陸上掘削により、現在、琉球列島の島々の地表に露出する間氷期のサンゴ礁堆積物を、海洋掘削により、現在、海底下にある氷期のサンゴ礁堆積物を採取し、検討することを目指している。なお、COREF とは、サンゴ礁の分布の北限・南限を指すサンゴ礁前線 (Coral Reef Front; Iryu *et al.*, 2006)

に由来する語である。

2.1. 何をどこまで明らかにしようとするのか

前項の目的達成のためには、琉球列島の中で緯度によりサンゴ礁の形成過程やサンゴ礁生態系(造礁サンゴの群集組成)にどのような差異があったのかを明らかにする必要がある。そのためには、分布する緯度範囲が広く、各島内に広く露出する堆積物を掘削対象に選ぶ必要がある。そこで、琉球列島に分布する様々な時代のサンゴ礁堆積物の中でも、掘削対象を完新世と中期更新世(40～80万年)の堆積物に絞り込む。掘削を実施する島は、次の通りである(図1)。

完新世サンゴ礁堆積物: 種子島, 小宝島, 与那国島。さらに、沖縄本島で掘削されたコア試料を参考試料として活用する。

中期更新世サンゴ礁堆積物: 徳之島, 本部半島, 与那国島, 宮古諸島伊良部島で掘削されたコア試料を参考試料として活用する。

なお、サンゴ礁の形成過程や過去のサンゴ礁生態系を正確に把握するためには、各地点で過去のサンゴ礁を横断するように複数孔を掘削する。

得られたコア試料について、堆積相の解析、生物相の解析(サンゴ、無節サンゴモ、大型有孔虫)、ウラン系列年代測定、石灰質ナノ化石生層序による年代決定、造礁サンゴの金属元素濃度および同位体組成に基づく古環境復元、古地磁気の検討、続成作用の検討、岩石物性の検討を行う。なかでも、生物相(造礁サンゴ、無節サンゴモ、底生有孔虫の群集組成)および堆積相を重点的に検討し、これらを現在の琉球列島に分布するサンゴ礁の生物相・堆積相と比較する。以上を通じて、 $10^3 \sim 10^5$ 年のタイムスケールで、サンゴ礁生態系を構成する群集の緯度変化および環境変動に対するサンゴ礁・サンゴ礁生態系の応答とその南北差を描き出す。

2.2. 本研究の特色および予想される結果と意義

本研究では、ある特定の島・海岸でなく、南北間でサンゴ礁生態系に大きな差異の認められる琉球列島を縦断的に掘削することにより、第四紀の2つの時期(完新世および中期更新世)における

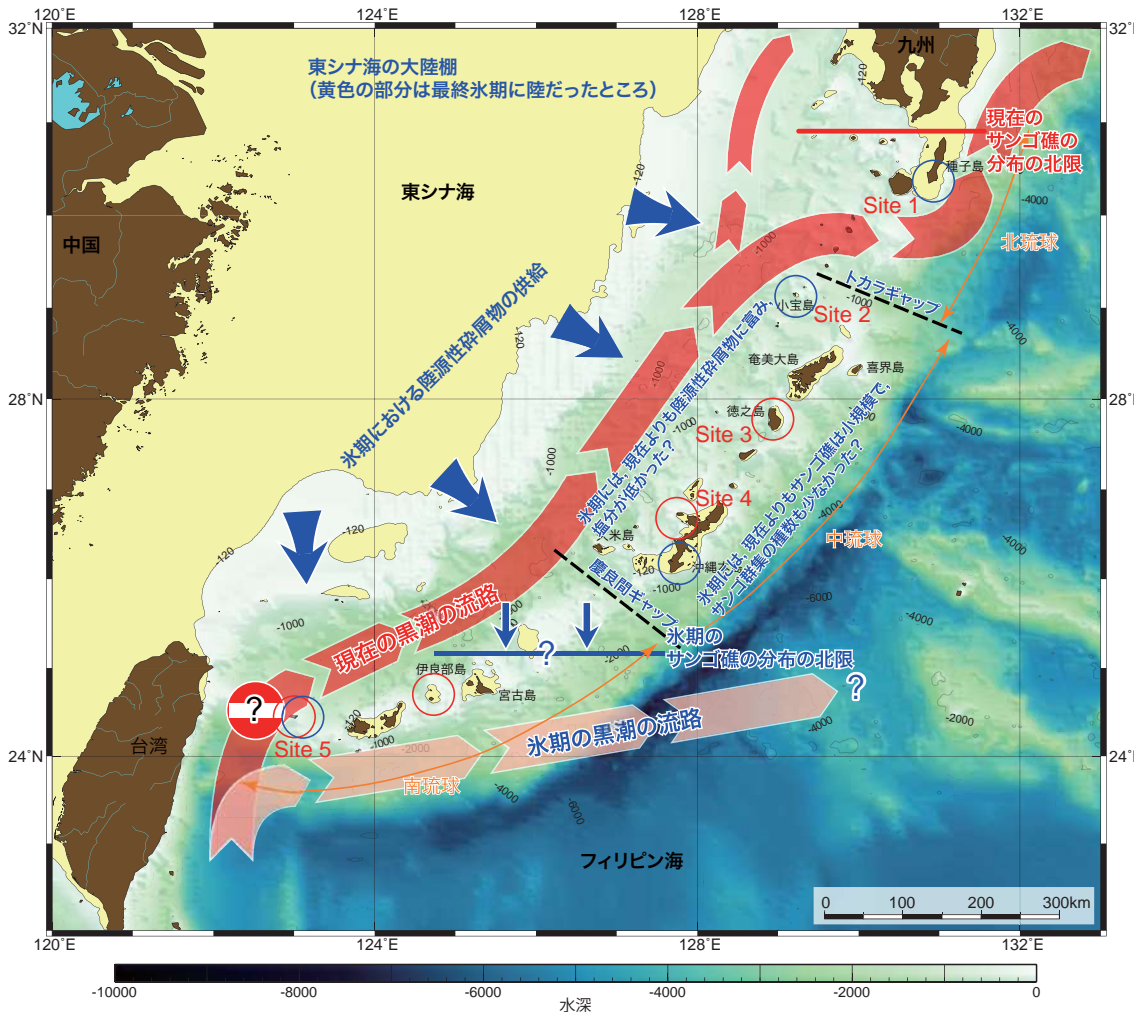


図1 COREF計画における掘削サイト。青色の丸で示したサイトでは完新世サンゴ礁堆積物を、赤色の丸で示したサイトでは更新世サンゴ礁堆積物を掘削する。併せて、琉球列島における氷期と間氷期の海洋環境の差を示す。

サンゴ礁生態系の緯度変化および環境変動に対するサンゴ礁・サンゴ礁生態系の応答の南北差が把握できる。

現在の琉球列島では、造礁サンゴの多様性は高緯度になるにつれ減少する。また、種子島にサンゴ礁の分布の北限があるが、そこでみられる造礁サンゴ群集は、奄美大島以南の亜熱帯性造礁サンゴ群集ではなく、九州・四国にみられる暖温帯性造礁サンゴ群集である。このような造礁サンゴ群

集の群集組成の緯度変化は“群集勾配”と呼ぶことができるが、この“緯度勾配”が第四紀環境変動に対してどのように変化したのかに関しては全く研究例がなく、本研究により初めて“群集勾配”の時代変化が明らかにできると期待される。この知見は、地球温暖化がサンゴ礁に与える影響、例えば、現在進行中の九州・四国におけるサンゴ群集の北上の予測にも応用可能である。

また、琉球列島においては、礁斜面の下限深度

は、列島南部の波照間島では水深約 80 m にあるが、北上するにつれて、その深度は浅くなり、種子島付近では水深約 30 m にある。これは、最終氷期後の海水準上昇のタイミングが南ほど早かったことに起因すると解釈されている。しかしながら、この仮説は地形学的な証拠にのみ基づいている。本研究では、このようなサンゴ礁形成の南北差についても、その有無や程度を明らかにできる。

2.3. まとめ

以上のように、COREF 計画は、1) 第四紀を通じてサンゴ礁の分布の北限があり、2) 活動的縁辺部に位置しているために、第四紀サンゴ礁堆積物が隆起して地表に広く露出しているという、極めてユニークな地理的・地質学的位置にある琉球列島でのみ可能な研究であり、第四紀環境変動に対応して、各島および琉球列島でサンゴ礁が形成・発達した過程を 3D で描き出すことができると期待される。

3. 脆性－延性境界以深での地熱開発を目指す JBBP (Japan Beyond-Brittle Project)

地熱エネルギーは、環境負荷、安定性、賦存量等の点で優れた再生可能エネルギーであることが広く認識されるようになり、近年、各国でその導入が進められようとしている。しかしながら、我が国においては、化石燃料に比して高いコスト、天然熱水系の規模、温泉への影響への懸念、自然保護地域内での開発に対する制約等により、1990 年以降、開発が進んでいない。その一方で、アメリカ、ヨーロッパ、オーストラリアの非火山地域では高温の地下に流体を注入し、人工的な亀裂システム（人工貯留層）を作成する EGS (Engineered Geothermal Systems) 型の地熱開発が主流となっている。我が国においても 1980 年代以降、国家プロジェクトとして EGS 型地熱開発のための基礎技術の研究開発が行なわれたが、作成された人工貯留層が解放系であることに起因して、注入した水の回収率が多くとも 40～50% であることやコストの問題から、本方式により発電を商用規模で行

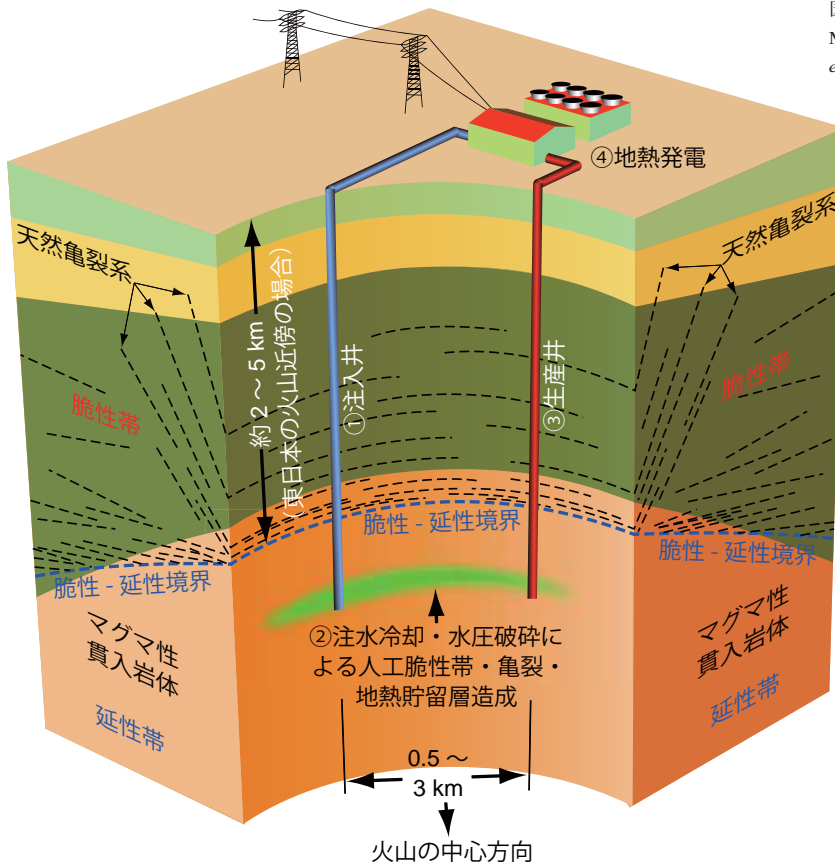
なうことは困難であるとされてきた。また、欧米での EGS プロジェクトにおいては貯留層の作成時、あるいは熱水の循環時における誘発有感地震の発生が重大な環境影響として取り上げられている。

このような背景のもと、国内の地熱研究者らは、我が国における地熱エネルギー利用量の飛躍的な増大のための科学的基礎を構築することを目指して、2012 年に JBBP (Japan Beyond-Brittle Project) を立ち上げた。JBBP は、脆性－延性境界 (BDT) 以深の領域に作成した人工地熱貯留層からのエネルギー抽出の可能性を探るプロジェクトであり、一連の基礎的研究・技術開発に引き続いて試験井を用いた試験、データ収集等を行なうことを目標としている。

我が国の地温勾配は他国に比して極めて大きく、特に東日本地域では、1 km あたり 100°C を越える地域が多数存在しており (矢野他, 1999)、BDT が比較的浅部に存在することが示唆されている。このことは岩手県葛根田地域で掘削された WD-1a 井の温度プロファイルにも現れている。すなわち、本坑井では、マグマ性貫入岩体中の深度約 3200 m で温度特性が対流型から伝導型へ遷移し、BDT へ到達したと解釈されている (Muraoka *et al.*, 1998)。このような浅部における BDT の存在は短縮テクトニクス場の火山帯に特有なものであるが、このことにより、東北地方においては BDT 到達のための掘削深度が小さくて済み、コストの削減や掘削リスクの低減につながる。

BDT 以深における岩体の性状や、人工亀裂システム造成工程に対する応答については科学的に未解明な部分が多いが、WD-1a の掘削により得られたデータによれば、BDT 以深では岩体の透水性は低く、また、応力は浅部の脆性領域に比して均質であるとされている (Muraoka *et al.*, 1998)。このことは、BDT 以深に浅部の水理系と独立した貯留層を作成可能であり、それによって温泉や地下水への影響を極力低減可能であることに加え、亀裂間隙水圧の上昇による誘発地震の発生も抑制できる可能性があることを示している。

図2 BDT以深でのEGSの概念.
Mock *et al.* (1997) およびTester
et al. (2006) に加筆.



EGS 型の地熱開発においては貯留層を構成する亀裂システムの性状、また、その制御可能性がエネルギーの抽出量、および持続性を左右する重要な要素となるが、これまでの研究によれば、BDT 以深においては、脆性領域での主たる亀裂生成メカニズムである地表からの注水による間隙水圧の上昇に比して、冷却に起因する熱応力による亀裂の生成が卓越する可能性が高い。すなわち、BDT 以深における人工亀裂システムは結晶粒界で生じた微細な亀裂がネットワーク状に複合したものとなる可能性がある。また、シリカの溶解度は BDT 付近において高い温度依存性を示すことから (Fournier and Potter, 1982)、流体温度をコントロールすることにより、卓越した流路の形成 (チャンネルング) や流路の閉塞を制御できる可能性も有している。

JBBP は最終的に地熱エネルギーの利用拡大を目指しているが、その過程で得られる科学的知見、例えば、マグマ脱水過程の理解、天然熱水系の形成メカニズムの解明、BDT 以深における地震発生メカニズムの理解等は地球科学の幅広い分野に寄与するものと考えられる。このため、JBBP のコアメンバーは様々なバックグラウンドを有する地球科学者の本プロジェクトへの参加を歓迎する。

JBBP では温度が 500°C、圧力が 60 MPa 程度の岩体内で人工亀裂システムを作成する予定であり、また、酸性物質の存在も想定される。WD-1a 井の掘削においては TDS (Top Drive System) 方式の掘削システムを導入し、掘削時に坑内を常時冷却することにより、地層温度が 500°C を超える花崗岩内部への到達に成功したが (Saito *et al.*, 1998)、それ以外の、坑井仕上げ、検層、モニタリ

ング等の工程において、これらの条件下でオペレーション可能な技術は必ずしも多くはない。すなわち、JBBPの最終ターゲットである実坑井掘削に向けた技術開発も本プロジェクト成功の重要な鍵を担っている。

本プロジェクトでは、実坑井の掘削はICDPの枠組を使って行なうことを想定している。現在、アイスランド、ニュージーランド、米国、ロシアでICDPの傘下での高温地熱プロジェクトが計画・実施されつつあり、ICDPコミュニティにおいても地熱関連科学掘削の重要性が認識されている。各国の高温地熱プロジェクトは各々異なる科学目標を有しているが、そこには共通の科学的・技術的基盤が存在する。JBBPコアチームは、各国の科学者、技術者と連携して、BDT以深での地熱開発の可能性を科学的に実証したいと考えている。

4. 大都市直下型の活断層掘削 — 上町断層帯を例として —

地震・津波が人間社会に与える影響は計り知れないほど大きく、地震多発国の日本のみならず、変動帯で活動する人類にとって、地震を理解するという事は共通の要求である。しかし、一言で地震の理解と言っても、その発生プロセスは震源核の形成、動的破壊の開始、広域への破壊伝播、地震波放出、地殻変動（津波発生）などと非常に複雑である。近年の地震観測および地殻変動観測の進展によって、地震時の断層の滑り様式や深部超低周波微動など、地震現象に関する新しい知見が次々と報告されつつあるが（例えば Obara, 2002）、物質科学的にどのような機構やプロセスによるものであるかはいまだ不明なことが多い。そのため、地震を理解するためには、観測のみならず、断層に着目した地震の物理・化学（物性科学）を研究することが極めて重要である。また、地震発生直後の震源断層の掘削研究によって、地震時の断層滑りパラメータ（摩擦発熱・剪断応力など）の推定が可能である（例えば、Kano *et al.*, 2006）。

このような背景のもと、我が国では1995年兵庫県南部地震を引き起こした野島断層の掘削、および海域では南海トラフの地震発生帯掘削と2011年東北地方太平洋沖地震を引き起こした日本海溝のプレート境界断層の掘削が実施されている。これらの計画および成果概要については、廣野ほか（2013）を参考にされたい。

ただし、これらの活断層・プレート境界断層以外にも、我が国では東京や大阪などの大都市直下に多くの活断層が潜んでいる。この中でも、大阪平野を縦断する上町断層帯（大阪府北部の豊中市から大阪市内の上町台地を経て大阪府南部の岸和田市まで約42km）は都市の重要な施設や人口密集地に位置しているため、仮に活動した場合、死者約42,000人、建物全壊約970,000棟という甚大な人的・物的被害が想定されている（内閣府, 2007）。さらに、大都市直下では調査地が大幅に制限されるため、上町断層帯の過去の活動履歴は不確定であり、最後の活動は約28,000年前～約9,000年前、平均活動間隔は8,000年程度と推測されているに過ぎない（地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2004）。さらに、地表1～2km付近では明瞭な断層面を呈さず、撓曲構造が発達している（この撓曲露頭も2013年8月現在、民間業者の開発によって地表からすべて消失している）。

そこで、断層の実体を明らかにするため、上町断層帯の深部掘削研究の推進が議論されている。掘削孔井での観測や掘削コア試料の分析を通して、現在の応力-歪状態の解明や過去の地震における断層滑りパラメータの推定などが期待される。今後、ICDPワークショップを計画・開催し、ICDPの枠組での掘削実行に進むことを期待したい。

また、大阪府民の上町断層帯への関心は非常に高いため、本掘削研究を研究コミュニティだけに留めるのではなく、市民向けのシンポジウムの開催や掘削コア試料・撓曲露頭の展示館の整備など地震・断層への防災啓蒙活動も重要であろう。

謝辞：本稿の執筆の機会を与えていただいた、川幡穂高氏、西弘嗣氏、梅津慶太氏に感謝する。

参考文献

- [1] Fournier R. O. and Potter R. W. II (1982) : A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 11, 3-12.
- [2] 廣野哲朗・小村健太郎・藤本光一郎・伊藤久男・ジェームズ・モリ・ジロウ・佐藤比呂志 (2013) : 断層掘削研究によって明らかになった地震時の断層滑り挙動とその物理化学的側面. *地学雑誌*, 122, 323-342.
- [3] 井龍康文・廣野哲朗・佐野修・小出仁 (2013) : 特集号「日本における陸上科学掘削の現状と展望」－巻頭言－. *地学雑誌*, 122, 227-229.
- [4] Iryu, Y., Matsuda, H., Machiyama, H., Piller, W. E., Quinn, T. M. and Mutti, M. (2006) : An introductory perspective on the COREF Project. *Island Arc*, 15, 393-406.
- [5] 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2004) : 上町断層帯の長期評価について. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04mar_uemachi/.
- [6] Kano, Y., Mori, J., Fujio, R., Ito, H., Yanagidani, T., Nakao, S. and Ma, K. (2006) : Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake. *Geophysical Research Letters*, 33, L14306, doi:10.1029/2006GL026733.
- [7] Mock, J. E., Tester, J. W. and Wright, P. M. (1997) : Geothermal energy from the Earth: Its potential impact as an environmentally sustainable resource. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22, 305-356.
- [8] Muraoka, H., Uchida, T., Sasada, M., Yagi, M., Akaku, K., Sasaki, M., Yasukawa, K., Miyazaki, S., Doi, N., Saito, S., Sato, K. and Tanaka, S. (1998) : Deep geothermal resources survey program : igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500°C at 3729 m depth, Kakkonda, Japan. *Geothermics*, 27, 507-534.
- [9] 内閣府 (2007) : 防災情報のページ, 中部圏・近畿圏直下地震対策. http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/index_chukin.html.
- [10] Obara, K. (2002) : Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, 296, 1679-1681.
- [11] Saito, S., Sakuma, S. and Uchida, T. (1998) : Drilling procedures, techniques and test results for a 3.7 km deep, 500°C exploration well, Kakkonda, Japan. *Geothermics*, 27, 573-590.
- [12] Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., DiPippo, R., Drake, E. M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nichols, K., Petty, S., Toksöks, M.N. and Veatch Jr., R. W. (2006) : The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st Century. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 358 p.
- [13] 浦辺徹郎 (2013) : 国際陸上科学掘削計画 (ICDP) の発足とわが国の陸上掘削, *地学雑誌*, 122, 250-257.
- [14] 矢野雄策・田中明子・高橋正明・大久保泰邦・笹田政克・梅田浩司・中司昇 (1999) : 日本列島地温勾配図 (1:3,000,000). 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 6 p.

