

サンシャイン計画と地熱エネルギー調査研究

ープロジェクト先鋒役としてー

長谷 紘和（地質調査所）

要旨

本文ではプロジェクトと個人研究との関わり、サンシャイン計画の地熱エネルギー研究開発計画が滑り出した時の状況、そして新エネルギー総合開発機構（以下 NEDO）が発足し、全国網羅的な地熱調査から、深部地熱エネルギー開発利用を目指して取り組んだ事業について、主として NEDO と密接な連携を取りながら、プロジェクトの一端を分担し進めてきた地質調査所の立場から述べる。また全国地熱資源調査で新技術として採択された地質リモートセンシング法に焦点を置きつつ、広域深部地熱エネルギー賦存についての事前モデルが、掘削調査や各種の調査によって見直されるに至ったモデルの変遷について述べる。最後にプロジェクトに深く関わった立場を通じて経験した、いくつかの思い出や思い出を綴って見る。

1. 入所当時の時代背景と研究生活の始まり

私が地質調査所に入所したのは 1964 年（昭和 39 年 4 月）、東京オリンピックが開催された年にあたる。オリンピック開会式当日は快晴で、ちょうど、当時新宿区河田町にあった東京分室にいたことから、空に見事に描かれた五輪のマークを印象深く眺めることができた。

学生時代にはよく知らなかったが、地質調査所は国土の地質理解と資源賦存調査に使命感を持って取り組んでいる人たちが多く、職場との印象が深く、調査機器が整い、専門家の分野也多岐にわたっていると感じた。社会は戦後の混乱から漸く脱却し、経済発展途上期で、科学技術立国が高く掲げられ、それへの実現努力が急がれていた時代だった。

所内では石油、石炭、核燃料など国内エネルギー資源の調査がほぼ終了し、金属鉱物資源、地下水資源の開発利用を進めるためのプロジェクトが進行中だった。前述、調査機器が整備されていると言う表現は、当時の大学の貧弱な設備との相対的比較で、現実には現地調査に行くのに四輪自動車車が使われるケースはむしろ希で、野外調査の移動手段はそれまでの自転車に代わって、漸く 125cc のバイクが導入されたという一例が示すように、現在とは格段に異なる時代のことである。

私はプロジェクトにすぐ組み入れられることは無く、地質調査所の基本的業務である 5 万分の 1 地質図幅作成の調査にかかわりながら「経常研究」という研究枠組みの中で研究できる機会が与えられた。その中で興味を持って取り組んだのが写真地質の延長と言ってもよい赤外線地質への取り組みである。

2. 写真地質の展開—非可視域情報の地質利用に向けて

日本では戦後間もなく米軍による国土全体の空中写真撮影が行われ、白黒空中写真は国土地理院管理のもと、一般でも利用できるようになってきていた。そして空中写真を地質分野に利用するうえで大きな出来事は、1961 年（昭和 36 年）に地質調査所が受け皿となり、国連主催による空中探査講習会が開催されたことである。これを機に、空中写真を地質分野に利用する本格的な道が開かれたと言ってよい。

地質調査所では松野久也さんが写真地質研究室を開設し、国内での地質判読利用技術の向上を目指していた。国連講師は米国地質調査所（United States Geological Survey、以下 USGS）の William A. Fischer さん他で、1940 年代に利用技術がほぼ確立された写真地質（Photo Geology）の手法移転が主な内容であったが、以後室長と同氏との研究交流を通じて写真地質分野における米国の最新研究動向も伝えられた。

1963 年、Fischer 他によって Science 誌に公表されたハワイ島の熱赤外調査の報告は、この手法が火山や地熱の調査にも適用できるのではないかとという興味と期待を私に抱かせ、松野さんのアドバイスもあって、この分野を当面の経常研究テーマとすることにした。とは言っても具体的な取かかりは周囲に何もない。運よく当時の電気学会誌に熱赤外撮像に成功した論文が公表されたのを知り、めくら蛇に怖じず、で、日本電気（株）中央研究所を訪れ、説明を聴くとともに装置を見せてもらった。この装置は、センサーとして Au doped Ge を用い、渦巻き型のスキャンをして対象の映像を得る方式の装置で、装置の光学部は人がひとり横になれるくらいの大きさの装置だった。

こちらの意向を伝え、米国ではすでに地質調査用空中撮像装置が利用されていることを伝えると興味を持ってもらい、まず手始めに試作装置を箱根大涌谷の地熱異常地に持ち出して夜間の撮像テストを行ったところ、地熱温度異常の大きい箇所がブラウン管上に白っぽく浮き上がりテストは成功し、会社として工業技術院の共同研究枠組みの中で空中熱赤外線撮像装置の開発に取り組んでもらえることになった。

当時の経常研究予算は貧弱ながらも研究者の興味が尊重され、研究意向実現に向けた自由度も結構確保されていたように思われる。1967 年（昭和 42 年）、会社は空中調査用の装置の開発を、地質調査所は調査データの利用技術の開発を目指す共同研究が開始された。

3. 米国留学による学習と研究

松野研究室の迅速な取り組みは Fischer さんも大変喜んでくれ、私が科学技術庁の留学資格が取れたことを報告すると、留学先として Stanford 大学 Ronald J.P.Lyon 教授のもとで研究ができるよう便宜を図ってくれ、1969 年 2 月から 1 年間の留学が実現した。当時は 1 ドル 360 円の固定相場のところで、自分の給料をドルに換算すると、研究室の女性秘書よりずっと低い時代だった。

Lyon 教授は赤外線領域の鉱物分光研究で、鉱物の放射分光特性が有色鉱物の含有割合に応じて放射率ピークが規則的に長波長側へシフトすることを明らかにしたことが注目され、

米国航空宇宙局（以下 NASA）の併任研究者として、スタンフォードに隣接する Moffett にある NASA の Ames Res. Center でこの特徴を活かした、空中からの岩石表面赤外線領域可視化研究に携わっていた。ちょうどその年の 7 月、NASA の Apollo 11 号による有人月面飛行が成功し、米国民と航空宇宙分野は興奮の中にあり、月の岩石標本が持ち帰られてきたこともあって、地球科学関係者は大喜びだった。この興奮は関係者の一人である Lyon さんを通じて教室にも伝えられた。

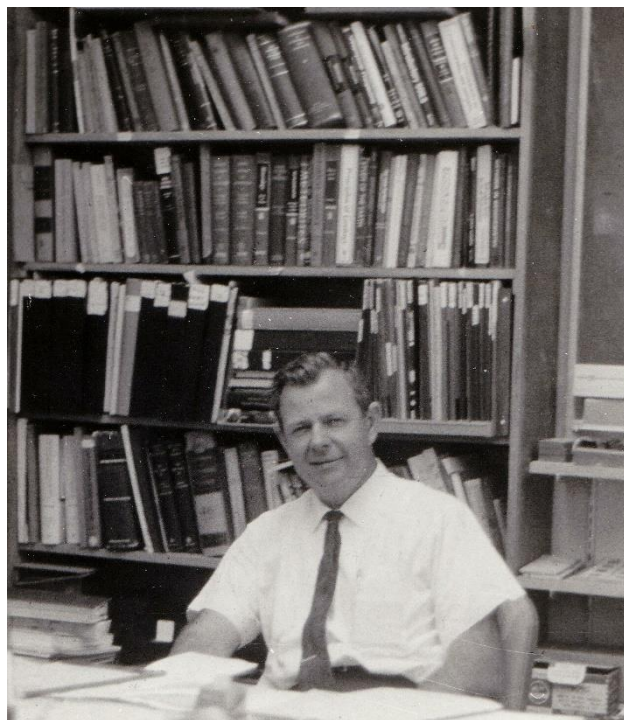
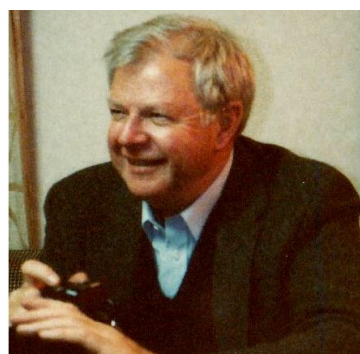


図1 若き日の R.J.P. Lyon 教授（左 1969 年当時）と NEDO の講演会来日時（右）



教授は地質リモートセンシングの先達として日本人を含む多くの研究者を育てた。「全国地熱資源総合調査」の折来日し講演会が持たれた。

Lyon さんは私の研究意向をきいて、地熱異常地表面からの有効放射を接地気層との関係を含めて理解把握することが重要ではないか、との貴重なアドバイスをしてくれた。私はサーミスター温度センサーを短い間隔で PVC パイプに封じ込めた接地気層・浅地下温度観測棒を工夫し、地表非接触温度は放射温度計で計測する装置一式を使って地熱異常地表面で調べることにした。

幸いなことに Stanford 大学から 2km 以内の近距離、Palo Alto 市に USGS の太平洋岸センターがあり、ここには Donald E. White さんという米国の地熱研究の大家がいることを聞いていた私は、White さんの研究室を訪ね、地熱異常測定実験の相談をした。USGS はちょうどこの当時イエローストーン公園で火山・地熱調査を行っているところで、広大な公園の中にある Mud Volcano 地域の地熱異常地で測定観測したらどうか、とアドバイスしてくれたのでそこで調査を行うことにした。そして自家用のオンボロ車で測定装置と借用の寝袋を公園内に持ち込み、一週間ほど滞在し日夜の測定観測を行った。季節は 9 月の始めだったが、夜間の気温は零度以下に下がった。

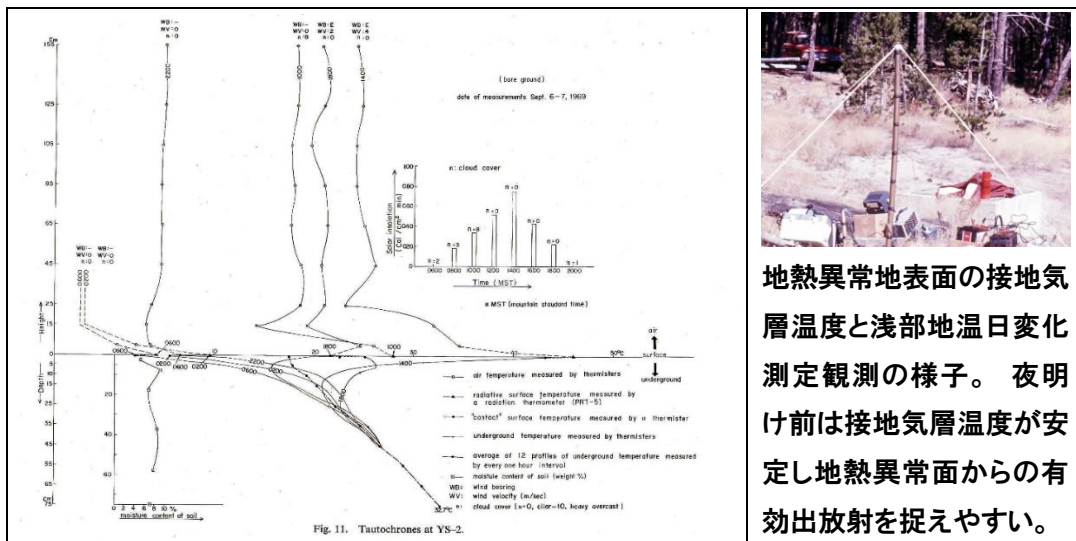


図2 地熱異常地表面の接地気層—浅部地下温度変化の例(YS-2)

4. 地質リモートセンシング

滞在中米国では可視域を超えた電磁波長領域を多波長帯域で可視化 (multi-spectral imaging) し、その情報を関連各分野に利用する研究が急速に進展しつつあり、赤外線地質もその一端に位置づけられることを知った。この分野の発展は研究仲間うちの慣用語がそのまま専門用語となるほど急速で、今でもリモートセンシングというあいまいな表現の技術分野で呼ばれる。ベースとなるハード技術は近赤外～熱赤外波長域を検知するセンサー技術、能動的なマイクロ波画像化技術である。また、センサー搭載高度も航空機高度から人工衛星高度まで多段的、かつデータ取得も時間選択可能な、リモートセンシング技術大系として構築されている。そしてデータの利用研究については NASA と USGS が先導していることを知った。

滞米中 USGS のナショナルセンターに Fischer さんを訪ね、自分が米国で進めてきた研究報告をした。ナショナルセンターがまだ Washington, D.C. にあった時のことで、間もなく同センターはヴァージニア州の Reston に移転した。この頃米国では USGS が提唱する地球資源観測計画 (Earth Observation Satellite Program : EROS 計画) として、人工衛星による広域調査計画を立案し、実施に向けて準備しているところだった。Fischer さんはその責任者で、彼を訪れた当日、これから公聴会で計画の必要説明をするので聴いていっただうかと誘ってくれ、参加させてもらった。公聴会では結構厳しい質問が出たように記憶している。彼は納税者 (tax payer) に気を使いつつ、何回かその言葉を口に出しながら、データ利用の民用化促進と広域地図情報取得の重要性を説明していたのが印象的だった。

帰国後私はモデルフィールドとして群馬県草津-万座地域を選んで研究を継続し、米国での観測結果と合わせて、地中から有効放射温度異常として捉えられる地熱エネルギーの最小限界が平均地殻熱流量の約 100 倍以上 (得られた経験では $150 \sim 900 \mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) 程度であることを経験的に明らかにし、地熱異常分布のマッピングへの手がかりをつかん

だ。ただし検出限界は、地表面を構成する岩石・土壌の熱伝導率、太陽照射エネルギーの季節変化や日変化、移流などによる接地気層に影響されることから、地表面で捉えられる限界値は結構高くなり、接地気層が安定する夜間でもマッピング可能な地熱異常地表面は地熱の影響を受けた変質裸地の一部に限定されることを知った。

他方撮像装置の開発研究は、インフラビジョンという名称で 3 号機までの改良機ができたが、それまで米国の軍事秘密に属していた熱赤外撮像技術が民用に開放されることになり、HgCdTe をセンサーとする優れた空中撮像装置が輸入可能となったことから、この装置を輸入して調査する民間会社もでてきて、国産の装置開発は実用には至らなかった。

空中赤外撮像装置による地熱調査法は地質調査所の特別研究「全国地熱基礎調査」(後述)の中で下記の地域で実施することを提案し受け入れられた。この特別研究はサンシャイン計画が発足する前年度から開始された研究項目である。

調査地域と適用目的

白山地域：地形が急峻で地表調査が困難な地域での地熱異常迅速マッピング検討
伊豆南部地域、鹿児島南部「薩南」地域：海底地熱水湧出のマッピング可能性検討
草津・万座地域：熱赤外データの利用効果を高めるためのクロスチェック
八幡平地域：広域地熱地域への適用調査研究

航空機搭載の撮像装置は地表分解能が 2mmstr 程度であるが、これは対地高度 1,000m で飛行すると計算上約 2m 四方の地表面が一つの温度単位ピクセルとして捉えられる。

図 3 に八幡平地域の「おなめもとめ」と呼ばれる地熱異常地の夜間赤外画像例を示す。地熱温度異常地は熱変質を受けた変質裸地の中に発達する。

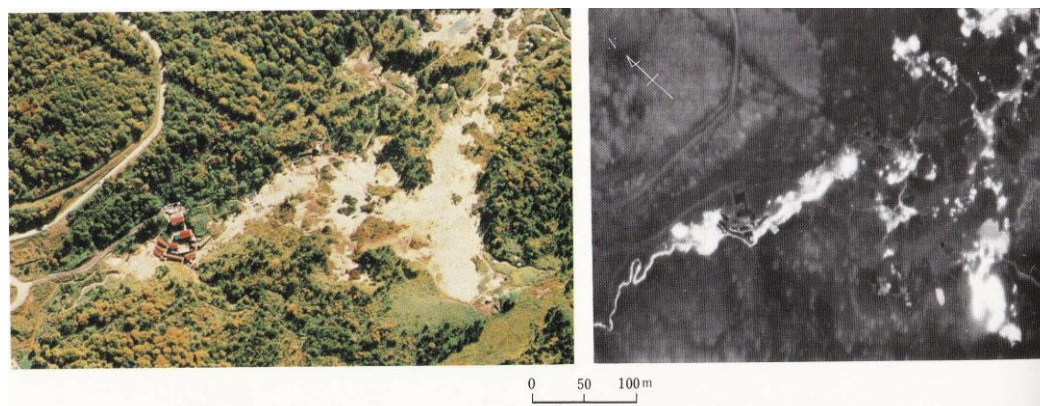


図3 八幡平にある代表的地熱異常地のカラー空中写真と夜間熱赤外映像例(竹内 均他、1979)

図 4 は空中熱赤外画像によって捉えられた八幡平地域の地熱異常地の広域分布である。この図では爆裂火口内の地熱異常のように、高温部が地熱異常直下にあることが推定される地点や、広範囲な溶岩流にマスクされ、その境界に沿って分布する側方流動タイプの地熱異常分布が示されている。

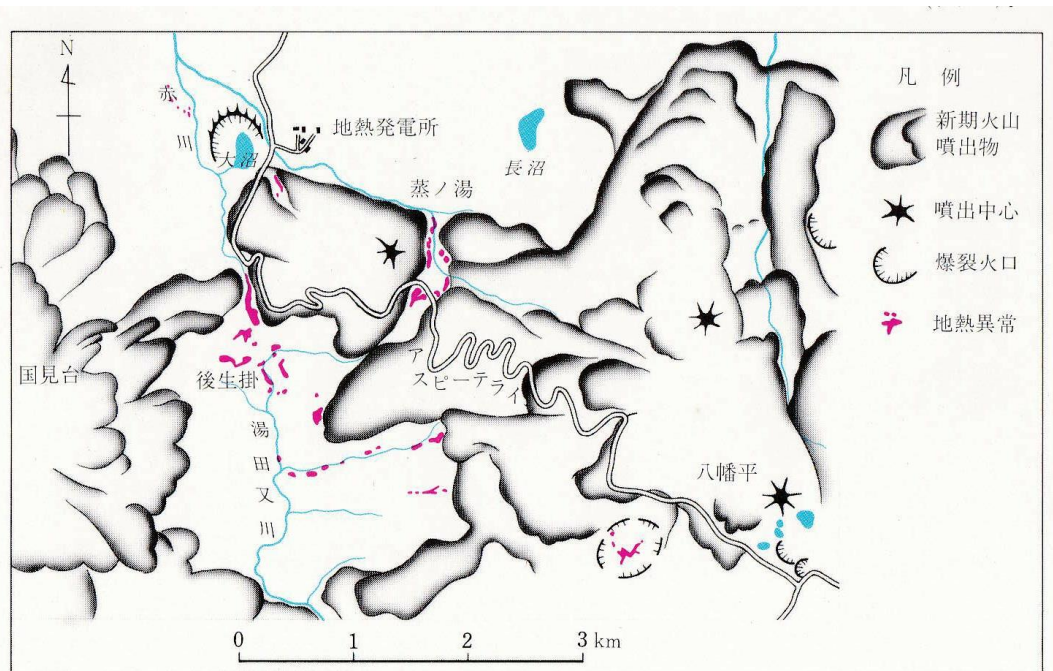


図4 八幡平広域地熱異常分布図(竹内 均他、1979)

1972 年（昭和 47 年）7 月、EROS 計画のもと、ERTS（Earth Resources Technology Satellite）と呼ばれる人工衛星（まもなく Landsat と呼ばれるようになった）が打ち上げられ、波長域 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ を、4 バンドに分けて撮像する多波長帯域（multi-spectral）撮像する技術を応用するリモートセンシングが知られるようになり、日本でも広域調査法として関心が高まった。

私は米国留学でこの分野の一端に早期から携わってきたという自覚があり、研究意欲は高かったが、他方自らの英語発言力の不足を感じていた。そのようなとき、工業技術院を通じて外務省による「国際機関派遣等英語研修」の募集がありこれに応募した。通商産業省（当時名称）からは計量研究所の山本さんと私の二人が選ばれ、他省庁の人たちと研修を受けることになった。外務省による英語研修受講の機会が研究所にきたのはこのときだけだったと記憶しており、幸運だったと言える。研修期間は 1973 年 9 月から翌年 2 月までだった。

研修修了後間もなく、所属長から呼ばれ、地熱エネルギーを含む石油代替エネルギー研究開発の必要性が迫っており、工業技術院が大々的に取り組むことになったのでその準備のために同院へ出向して欲しい、との意向が伝えられた。英語研修では「遊ばせてもらっている」との感覚もあったので、「承知しました」と回答した。

5. サンシャイン計画推進準備本部へ

サンシャイン計画推進準備本部は本計画が実際に動き出す 1974 年 7 月に先立って同年 2 月に組織されたもので、当初の計画として太陽エネルギー、地熱エネルギー、石炭のガス化・液化、水素の 4 テーマの研究開発利用が柱に据えられていた。当時工業技術院の建物は新築

ビルに囲まれた周囲の都市景観からはひととき目立つ旧い建物で、川崎市溝の口にあった地質調査所本所の建物とも似た灰色の建物だった。その7階に準備本部が設定され、石油ストーブで暖を取りながら本計画策定のための業務が始まった。準備本部は江崎弘造総括研究開発官他各テーマ担当の研究開発官と担当専門職、そして電子総合研究所の関根さん、公害資源研究所の山口さん、機械技術研究所の大橋さん、それに私を含め4人の出向者と、工業技術院総務・事務関係の人たちから成り立っていた（研究所名は旧称）。

地熱エネルギー研究開発については、三島 進研究開発官、清水専門職のもとで準備作業が始まった。最初の仕事は、一つは第一次石油危機以前にまとめられていた石油代替エネルギー開発の中の地熱エネルギー開発戦略書の内容理解であり、二つは計画実施に向けての戦略議論、専門家からのヒアリングだった。ブレインストーミングは毎日のように続いた。

実施計画議論では科学的理解を深めるための深化軸（X軸）と技術の発展軸（Y軸）とを接近させつつ目的達成を図る二軸接近法という考えが池口小太郎研究開発官から提案され、これを据えて大蔵省（当時）への予算説明がなされた。

計画発足当初は工業技術院が推進母体となることから、そこからの委託研究内容を固めるための予算資料作成が実務業務の中心だった。また、本格的な計画遂行に当たって実施専門機関の設立が必要である、との議論がなされ、そのための予算説明資料の作成も行った。この資料作成にあたっては、「可能な限り大きく高い発想で、最新技術を盛り込んだ内容で固めてよろしい」、との指示があり、いわば夢物語に近い予算説明資料作成をした記憶がある。自分の印象に残っているのは火山への積極的アプローチを盛り込んだことで、それはヒアリングで感じた火山専門家の期待や米国の火山エネルギー利用に向けた熱い挑戦に魅せられて作ったものだった。しかし専門機関設立に関する予算資料は大蔵省説明ではほとんど見向きもされず、ボツになった。

地熱エネルギー担当研究開発官は半年ほど後、三島 進さんから坂倉省吾研究開発官に引き継がれた。

地熱エネルギー研究開発テーマでは、

- （1）地熱資源の存在を網羅的に調査する手法の確立
- （2）高温の地熱環境を掘削・調査する技術の開発、
- （3）火山への積極的な働きかけを目指す高温岩体からの地熱エネルギー採取技術の開発

が柱となり、他に中・低温熱水を発電利用するバイナリー発電技術の開発、地熱エネルギー採取に伴う自然環境保全のための手法開発などの項目があった。

計画実施の一翼を担うことになった地質調査所は主として（1）の研究開発テーマを担う機関として選定され、前述のようにサンシャイン計画発足に先立って1973年4月から「工業技術院特別研究」予算で「全国地熱基礎調査」が開始されていた。地熱エネルギー開発利用に対する取り組みがサンシャイン計画に先行する形でスタートできたのは、地熱エネルギー開発への社会的期待が当時高かったことがあげられると思われる。日本最初の松川地

熱発電所（現在岩手県八幡平市）が 1966 年（昭和 41 年 10 月）に稼働したのに引き続き、翌年大岳地熱発電所（大分県九重町）が完成、また両地域の近隣にあたる大沼、八丁原でも開発が進むなど実用化が進みつつあった。

ただし蒸気・熱水を取り出す坑井掘削技術は未熟で、耐熱掘削ビットの開発、掘削泥水の高温下でのゲル化防止技術、耐熱坑井仕上げ用セメントの開発などは早急に対処が必要なテーマとして研究開発委託項目に含まれていた。地熱エネルギー利用にあたっては、既に開発利用が始まった 1,500m 深以浅程度の深度における開発促進とともに、更に深い地下からの地熱エネルギー開発利用への期待が大きかった。

地質調査所ではサンシャイン計画に対処するうえで専門家の層の薄さが一番の課題だった。戦後、工業技術院の前身にあたる工業技術庁が九州で地熱発電の技術開発を試みて以降、地熱資源の調査研究は細々ながらも継続的に進められ、ノウハウの蓄積があったが、地熱分野の専門家は実際にはペアでカバーしていた状態と言ってよく、中村久由さん（地質）・早川正己さん（地球物理）、そして角 清愛さん（地質）・馬場健三さん（地球物理）に引き継がれてきたのがサンシャイン計画発足時以前の姿だった。サンシャイン計画に対処するためには人材の確保が不可欠となり、地殻熱部という組織が新設され、新しい研究者が入所したことにより研究者層はぐっと厚くなった。

私は工業技術院出向から戻ると新設の地殻熱部の一員となり、まず前述の空中熱赤外線調査にあたった。これは変質帯調査、地化学調査、自然放熱量調査、電気探査、重力探査などとともに実施したものである。また、Landsat 衛星データの地質・地熱分野の利用効果についての検討や、サンシャイン計画推進本部が電源開発（株）に委託して九州北部「豊肥地域」で開始した、深部地熱エネルギーの調査、「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」の受託現地調査などに従事していた。

6. NEDO の発足とともに

サンシャイン計画発足時から議論されていた、計画の推進母体として、新エネルギー総合開発機構（発足当時の名称：後年新エネルギー・産業技術総合開発機構に改称、本文では NEDO）が 1980 年（昭和 55 年 10 月）に発足し、池袋のサンシャインビルで活動を開始することになった。自分が NEDO の最初の出向者になり、地熱事業に携わることになるとは夢にも思わなかったが、地殻熱部ができて新たに入所した若い研究者たちとともに NEDO 勤務が始まったのである。

NEDO では発足当初地熱調査部という組織体制ができており、部は地熱調査第一課、同第二課の構成だった。第一課は資源エネルギー庁が主導する「地熱開発促進調査」の企画、立案、管理にあたり、サンシャイン関係のテーマは第二課が担当した。そこでは「全国地熱資源総合調査」と「地熱探査技術等検証調査」という二つの事業項目で動き出すことになった。業務担当専門職員の課員構成は電力中央研究所からの出向者ひとりを除いて地質調査所からの出向者だった。サンシャイン計画の一環として電源開発（株）が受託実施中の「大

規模深部地熱発電所環境保全実証調査」は NEDO に事業移行することになったが、発足当初はまだ具体的に動き出していなかった。

首都圏にある工業技術院傘下の研究所は 1979 年（昭和 54 年秋）つくばに移転し、地質調査所もその一所として同年 11 月末に引っ越してきたのであるが、出向者たちは一年足らずの間に再び東京に勤務することになった。当時つくばから東京に行くには常磐線が唯一の交通機関だったが運転本数は少なく、勤務開始時間に合う朝の電車は一本だけで、これに乗ると都内勤務の NEDO 職員より早く着いてしまい、自分たちで鍵を開けて部屋に入る状態だった。また、夜は自宅に帰りつける最終電車を気にしながら仕事をこなすという毎日で、電車で立ちながら眠る方法、とか、途中で席を立つ人をいち早く見つける方法、などというのを教わりながらの仕事が続いた。しかし業務が立て込んでいたため皆頑張って仕事をこなした。当時は夢中だったが今振り返ると、いっしょに仕事をこなしてくれた方々に感謝の気持ちでいっぱいである。

NEDO の「全国地熱資源総合調査」では、レーダー映像法調査としてわが国で初めて実施する空中調査、キュリー点解析として地下温度構造を推定するために必要な空中磁気調査、及び基盤構造推定に必要な重力調査が含まれる。これら業務のうち、自分の専門分野に関係の深いレーダー映像法調査について記述する。この調査は石油資源開発（株）、出光興産（株）、（株）パスコ、からなるコンソーシアムが NEDO からの受託業務として実施した。

レーダー映像法による空中撮像技術は我が国には存在しないため、米国で商業化している最新技術を取り入れ、NEDO の事業として実施したものである。撮像方式は X バンド（波長 3cm）マイクロ波を能動的に機上から地表面に向けて照射し、その反射波を合成開口レーダー方式（SAR）によって画像化するもので、地表分解能はマイクロ波の照射方向で若干差があるが 10m～12m である。本法は撮像時の季節、天候などに影響されない全天候型であることが大きな強みであり、NEDO の飛行調査でも実期間は約 2 ケ月間と迅速だった。

しかしながら実際には調査開始までの準備作業はなかなか大変なものだった。一つには装置を搭載した航空機が日本にはまだ飛来したことのないフランス製の Caravel 機であったことによる。これまで持ち込まれたことのない航空機を使って国内調査をするためには、運輸省が定める航空法上の条件をクリアしなければならず、通常ではそのために必要な書類は膨大な量になるとのことだったが、特段の配慮、をいただき、なんとか間に合うことができた。二つにはマイクロ波を能動的に照射するため、関係省庁の了解を得る必要が生じたことである。運輸省電波管理局から、電波照射時に問題が発生しないか事前チェックが必要と言われ、とくにテレビ電波への影響を確認するため事前テストも行われたが問題はなかった。また防衛庁からは、北海道北部での調査に当たって能動的マイクロ波照射は隣国ソ連（当時）を刺激しかねず、対応準備措置が必要である、との忠告を受けた。以上のようにいろいろな課題や懸念もあったが調査は無事遂行された。

調査は日本列島上に設けられた測線に沿って飛行がなされ、第一成果物としてストリップ状の画像データが得られ、これを国土地理院が発行する縮尺 20 万分の 1 地形図に合わせ

た画像データ図として NEDO に成果物が納入された。

撮像に利用される波長域では、地質情報は基本的に地表面情報に限られるが、使用するコヒーレントな電磁波が地表物質に当たって反射・散乱した信号を見ることになるので、そこには地表構成物質の応答特性が反映される。植生はある程度透過性を持つことから、植生表面からの直接反射光が画像上に示される空中写真や Landsat 画像より火山地域の地質判読上効果が高いことが多い。それは植生とその下部の地質の反射・散乱波がテクスチャの違いとして識別されることによるもので、火山噴出物分布単位を識別する際にこの特徴が活かされ、噴出年代、噴出量の評価につながる（例えば村岡他 2, 1983）。

地熱調査上もっとも注目されるのは、航空機から側方に照射される電磁波の反射・散乱情報を記録することによる地形の強調効果である。これについては後段で少し詳しく述べる。太陽光が朝・夕斜めから照射したときに僅かな地形差が強調されて判読し易くなる陰影効果に似た地形強調効果が得られるが、実際にはマイクロ波を斜めに照射する角度に幅があるため、地表分解能や反射・散乱波がその影響を受け、判読に複雑に影響する。

NEDO の綿森 力理事長から「調査節目に当たって、関係者への報告はしっかりやる必要がある」との指示があり、調査途中、羽田空港の一角を借りた会場と NEDO で、立派な式典が開催された。このような華麗な式典は研究所出身のわれわれにとってはむしろ面食らうほどだったが、通商産業省からは佐々木義武大臣（当時）はじめサンシャイン計画関係者、他、調査関係者各位の出席があった。



図5 NEDO の式場で挨拶する綿森 力理事長(上)と羽田で行われた見学会(下)

レーダー法調査例として、九州北部地域の画像例を図6に示す。この例はレーダー画像とLandsat画像を重合させて表示したものである。同一地域のLandsat単一画像と比較すると、地形・地質情報がはるかに豊富に表示されていることが一目でわかる。

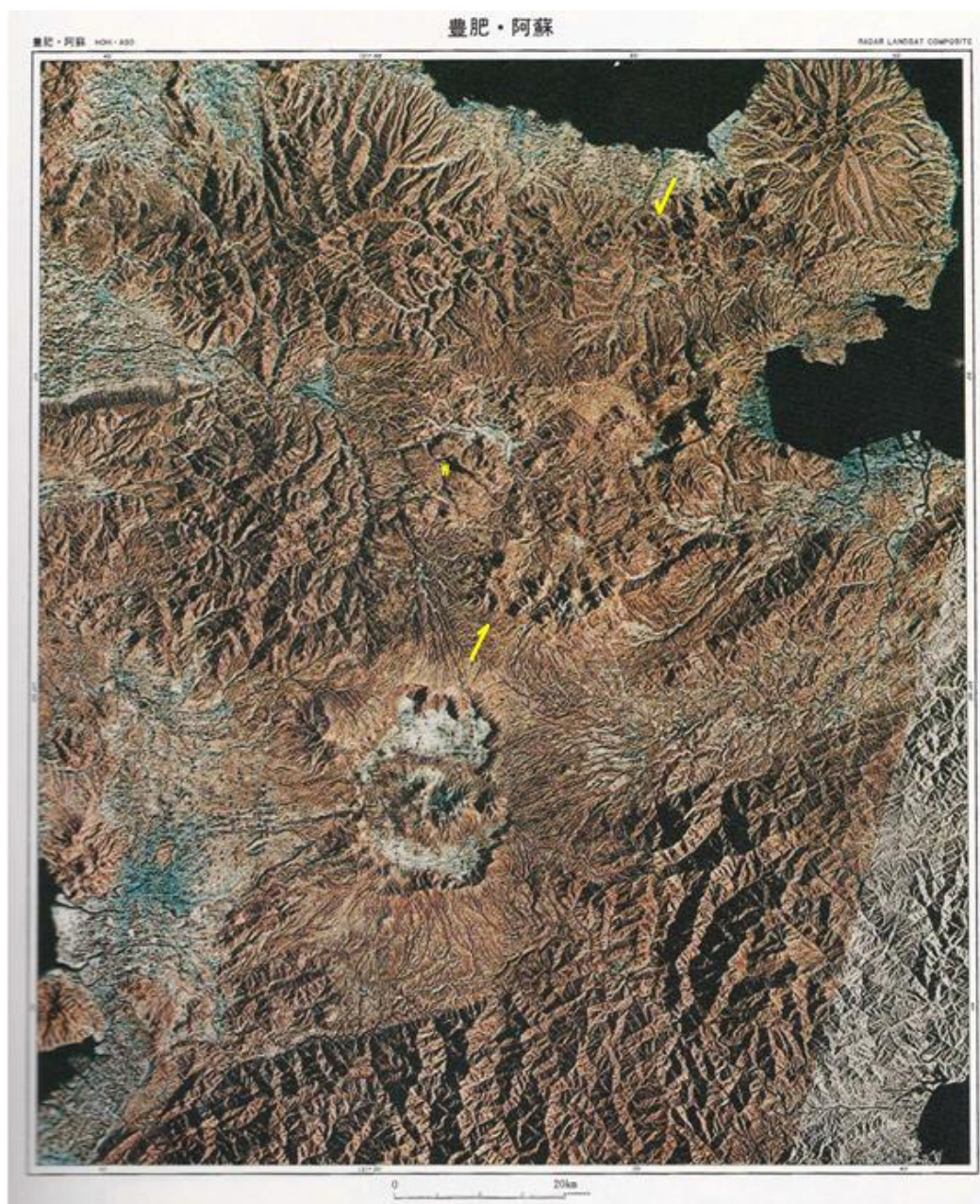


図6 九州北部、豊肥・阿蘇地域のレーダー・Landsat 合成画像(陶山淳治他 5,1982)

図6では、阿蘇カルデラとその噴出物が形成する比較的滑らかな火山地形がもっとも特徴的であるが、その北部にはNEDOが「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」として実施した「豊肥地域」が含まれ、図中W印湧蓋(わいた)山を含む地域がその中心である。黄色の矢印は後に示す本地域の基盤構造を示す断面線のおおよその端点位置である。

7. 全国地熱資源調査データのとりまとめ

地質調査所では小川克郎さんが研究リーダーとなって所内の研究計画を引っ張り、NEDO の「全国地熱資源総合調査」の結果をまとめて地熱有望地域を絞り込み評価するため、「国土地熱資源基本図作成に関する研究」を立ち上げていた。また、NEDO の「地熱探査技術等検証調査」に対応する研究グループが所内で立ち上げられた。NEDO の調査結果は構築された地熱データ・ベースシステムにバンキングされ、地熱資源評価がこのシステム上で行われた。研究計画のフロー概念は下図のように示される。

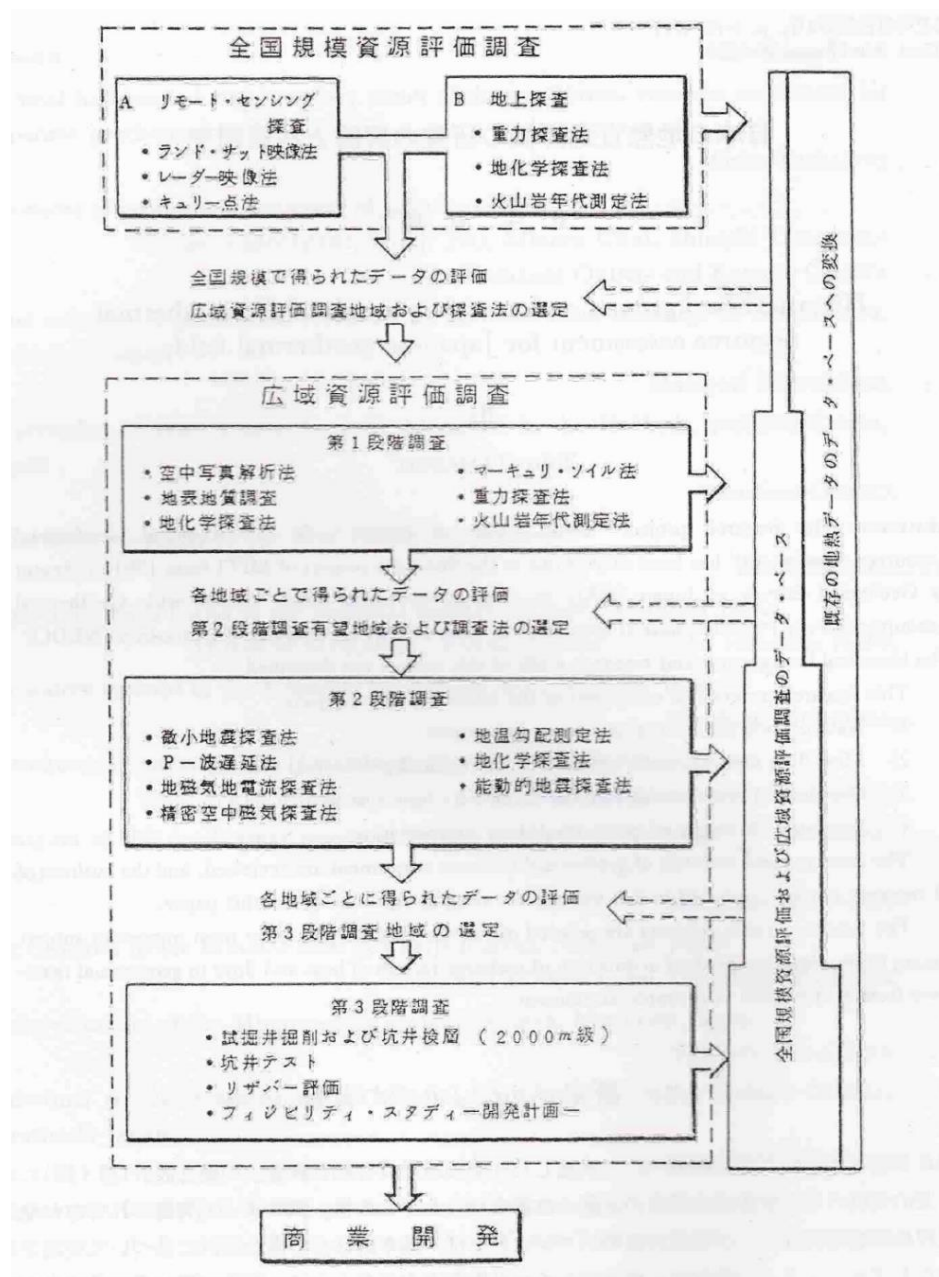


図7 全国網羅的な調査から次第に詳細な地熱資源評価に向かう概念的フロー(小川克郎)

私は NEDO で「全国地熱資源総合調査」と「地熱探査技術等検証調査」の立ち上げ業務に関わったが、前者では地質調査所からの担当職員が NEDO 職員として出向勤務していたので頻繁な業務相談も NEDO でできた。他方後者では地質調査所に赴いて相談する必要が生じた。私はレーダー映像法調査が終了した後、1982 年夏、地質調査所に復帰した。

8. リモートセンシング調査から

フロー図中にある「リモートセンシング探査」(地下構造解析手法であるキュリー点法はここでは除く) データは、以下のようにデータ情報の検討がなされ活用された。

マクロ画像情報として利用された Landsat データ (地表分解能 80m、画面 185km×185km) の最大の利用効果は俯瞰的、大観的視点 (synoptic view) による専門家の大規模火山活動域の把握である。少し時代が古い火山地域では侵食により活動域を適切に捉えることがこれまで困難だったが、Landsat データに代表されるマクロな画像データではそのような地域が環状の地形構造単位などとして捉えられるケースが多く、その情報をもとに現地確認調査が行われ、地熱有望地域の絞り込みに貢献している。

図 8 にその例を示す。東北地方北部では地質学的に若い火山として一般にもよく知られる十和田カルデラ (湖)、八甲田カルデラの他に、少し地質時代の古い沖浦カルデラ、碓ヶ関カルデラ、湯ノ沢カルデラなど大規模な火山・地熱活動の中心地域が調査の結果明らかにされた。

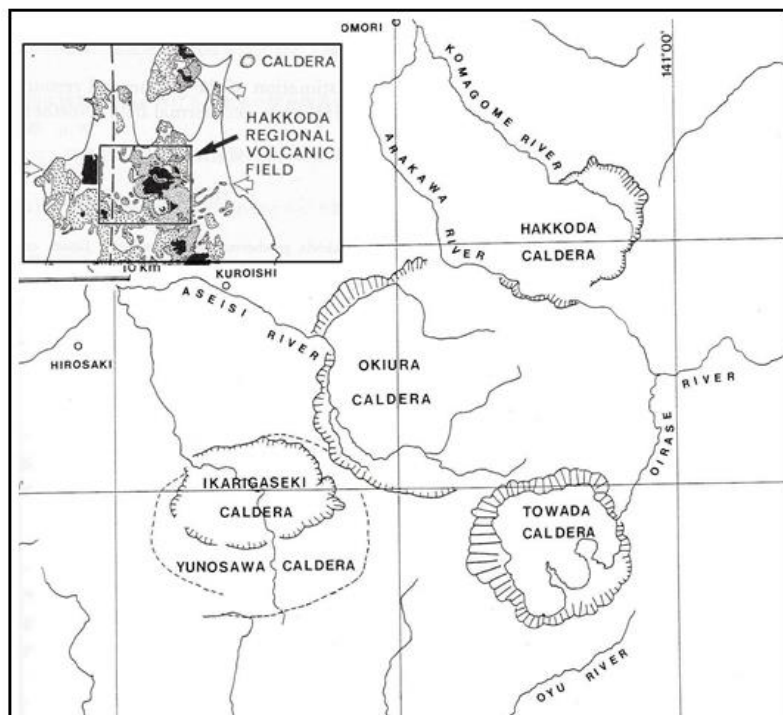


図 8 東北地方北部の大規模カルデラ群 リモートセンシングデータはカルデラ群の発見に寄与した(村岡、長谷 1991)

レーダー法による X バンドマイクロ波（波長 3cm）の画像情報がもつ最大の利点は、既述のように斜め方向に照射されたマイクロ波による地形の陰影強調効果(shadow enhancement)である。

地熱資源賦存に関連しては、線形（リニアメント）として表現される地質情報が断裂系との関係から注目された。この情報について画像上で検討した結果、小縮尺画像（Landsat）、中縮尺画像（レーダー画像）、大縮尺画像（空中写真）では解析者が抽出するリニアメントの長さや頻度分布について、解析者の眼の分解能と視野が関連する人間工学的要素の影響を受けることが報告された（山口、長谷、1982）。このことは抽出対象リニアメントの地表トレース把握に最適な画像の縮尺と画面範囲があることを示している。

断裂系として抽出されたリニアメントのうち、既に断層と定義された断裂系を除くと、多くは節理群発達部である。他には断層に支配された直線的基盤岩構造の高低差が上位層中に伝播（upward propagation）して、地表にその特徴が表れたものが存在すると考えられる。断裂系の地表面トレースはリモートセンシング法により高い精度で把握されるが、その断裂面が地下どの程度の深度まで発達し、またそれが地熱流体の通路としてどのように作用するかについての評価は今後の課題として残されている。

図 9 は中央自動車道恵那山トンネルでの比較例で、上段は地表調査によって確認された断層とトンネル断面で確認された断層を、直線的につないで作成した地質断面図である。下段は空中写真から判読した断層（細い実線）トレースと、Landsat から抽出されたリニアメント（灰色帯状線分）トレースを示したものである。この対比から、1）空中写真は地形立体視強調効果を利用することによって、地表トレースを高精度で把握することができる、2）地表トレース長が 1km 以上の断裂（ここでは断層）は、地表下 1km 深でも発達が推定される、3）Landsat データのような小縮尺画像から抽出されるリニアメントは幅の広い断層・断裂帯である可能性が示唆される、などの経験則が得られる。

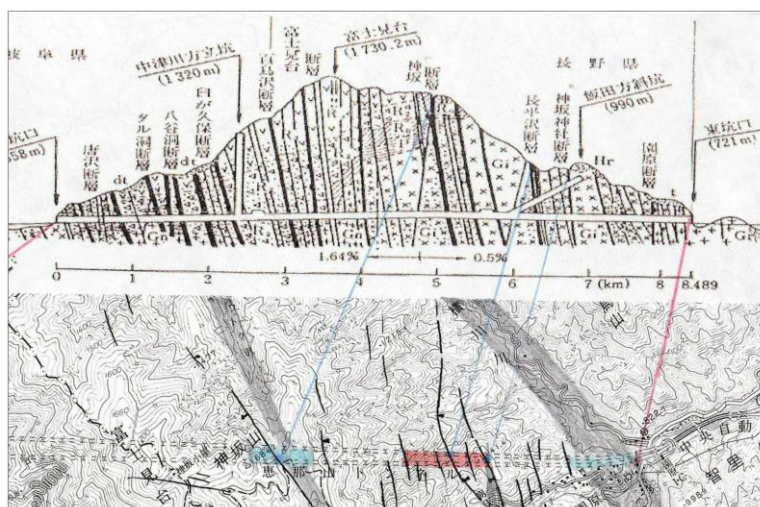


図 9 断裂系地表トレースと地下断面との対比例(恵那山トンネル)

NEDO では「地熱開発促進調査」として、地熱発電所の早期稼働を目指す調査が資源エネルギー庁のもとで実施されており、地熱有望地域の絞り込みが急務となっていた。このため、「全国地熱資源総合調査」に引き続き、広域資源評価調査が開始され、地質調査所はこれら調査の取りまとめも「国土地熱資源評価技術に関する研究」の中で対応実施した。

地熱資源賦存量についての広域的把握は、磁気データのキュリー点解析から推定される地下温度分布、重力データ解析から推定される基盤構造、その上部に堆積する地熱貯留部構成層の容積推定を組み合わせ、「容積法」という手法を基本に推定され、また、NEDO の調査データに既存データを加えた関連データをルール化することにより推定された。結果は資源論で定義される「アセスメント」評価としてまとめられた。また、データベースに入力された調査結果は CD-ROM として PC 上で利用できる形で整理されている（地質調査所、2000）。大胆な精度表現で言えばこの「アセスメント」評価は縮尺 20 万分の 1 精度の地熱エネルギー資源評価とすることができる。

9. 地熱探査・調査法の検証

サンシャイン計画では、それまでの開発主対象深度であった地下 1,500m 程度までにとどまらず、地下 2,000m 以深の地熱資源の開発・利用促進を図る観点から、「大規模地熱発電所環境保全実証調査」を計画し、前述のように九州北部九重火山群の北麓約 200km²に「豊肥地域」を設定し、1978 年（昭和 53 年 4 月）から電源開発（株）に委託してプロジェクトを開始していた。事業は NEDO に引き継がれ、地質調査所はその解析・評価を担当した。また、「地熱探査技術等検証調査」として新たに東北地方秋田県と岩手県にまたがる「仙岩地域」と宮城県「栗駒地域」が対象地域に加えられ調査が展開された。

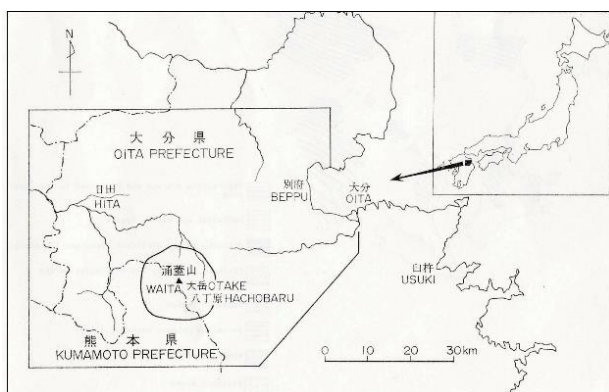


図 10 湧蓋(わいた)山を中心とする
「豊肥地域位置図」

「豊肥地域」を含め、「地熱探査技術等検証調査」では、1) 深部熱水の大量採取及び地下還元に与える環境影響の評価 2) 地熱資源の存在を網羅的に調査する手法の確立、3) 高温の地熱環境を掘削・調査する技術の開発、が主目標に据えられているが、地質調査所はそれぞれの地域を研究対象とし、主に 2) の目標の手法開発、評価ならびに各地域の総合的な取りまとめを担当した。

これら地域の本源熱源は「マグマ溜まり」であるが、火山体の地下についての科学的実証データはきわめて乏しく、調査に先立つ事前モデル作成においてマグマ溜まりの規模については概念が分かれた。マグマ溜まりの深度は地震データなどから 10km 程度と考えられているが、存在形態の推定には大きな差異があり、super volcano と呼ばれる火山噴出物量数 $100\text{km}^3 \sim 1,000\text{km}^3$ を超える大規模な火山から 1km^3 以下の小規模火山まで多様であり、地下 3,000m 深の地熱環境もそれに影響される。理論的には温度 750°C の酸性球状マグマが地下 10km に注入されると仮定すると、残存熱だけを考えても大規模火山の場合は 100 万年以上地熱熱源となり得るが規模の小さい熱源では数万年以下となる。

マグマ溜まりの規模が大きく、さらに火山の再生活動 (resurgency) として、構造的な隆起を伴う火山構造の存在可能性が貯留構造上望ましいと考えられ、「豊肥地域」、「仙岩地域」、「栗駒地域」の地熱賦存環境はこのような事前モデル概念から出発した。

「豊肥地域」は本州弧と琉球弧の接合部にあたる構造帯に位置し、調査域の中心部に位置する湧蓋 (わいた) 山をほぼ南北に切る地下断面についての先第三紀の基盤構造は、図 11 に例示されるように、湧蓋 (わいた) 山の南側 (図では Machida 付近) から北側に向かって大きく陥没した構造 (帯) を形成することが明らかにされた。また、この陥没域内で鮮新世～更新世にかけて発生した火山活動は、陥没構造の縁辺部から発生し、中心部にかけて累帯状に新しくなっている (鎌田、1985)。この地域の火山活動・構造は噴出活動を繰り返しながら、沈み込み、最新の火山活動は基盤の陥没境界付近で発生しているのが特徴である。

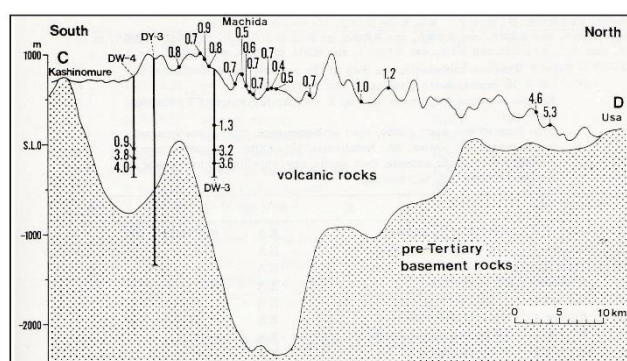


図 11 地域をほぼ南北に切る断面の
地下基盤構造図 (鎌田、1985)
(C-D 断面は図 6 の矢印参照)
数値は火山岩年代 (Ma)

「豊肥地域」では当初想定に適合する、広域にわたる地下高温熱構造分布と大規模な再生活動による透水性の高い貯留部の発達には調査深度では確認できず、むしろ陥没構造が顕著であったことなど、事前地下モデルとは異なる結果だったために、当初計画されていた 4,000m 級掘削調査は中止されることになった。調査では多くの掘削調査もなされ、その結果は熱構造も検討された縮尺 10 万分の 1 精度の地熱資源評価「evaluation」としてまとめられた (地質調査所、1985)。同様「仙岩地域」と「栗駒地域」で NEDO と地質調査所との連携によって実施された調査結果は、それぞれの地域に関する研究結果として取りまとめられた (地質調査所、1986、1988)。

図 12 に Landsat 疑似カラー画像による「仙岩地域」と「栗駒地域」の画像を示す。それぞれの中心域は図中 S 及び K で示されている。画像からも識別されるように、両地域は環状の地形構造で特徴づけられる。

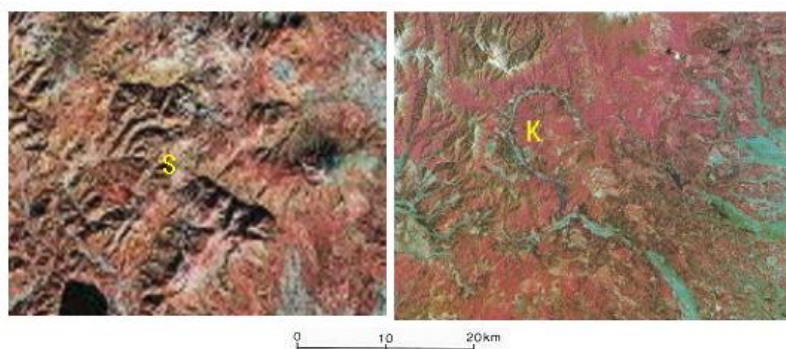


図 12 Landsat 疑似カラー画像で示された「仙岩地域」左と「栗駒地域」

「仙岩地域」の Landsat 画像で明瞭な環状地形部は、多量の流紋岩溶結凝灰岩を噴出した「古玉川カルデラ」の中心域であることが明らかにされたが、地熱ポテンシャルは中心部より周辺地域の若い火山地域で高い。この地域では更に坑井調査データの解析、評価のための調査と研究が、サンシャイン計画終了まで継続された。

「栗駒地域」の推定地下構造断面図によれば、ここは火山噴出量 50～100km³ 規模のカルデラを形成する火山体で、カルデラの中央部は隆起し、その下部には固結化したマグマ頭部が推定されている。地下 3km 程度の深度において地熱ポテンシャルが高いのは隆起部ではなく、カルデラ周辺に近い陥没域内地下浅所に貫入した新期火山岩体の寄与が大きいとの解析結果となっている (Yamada, E., 1988)。

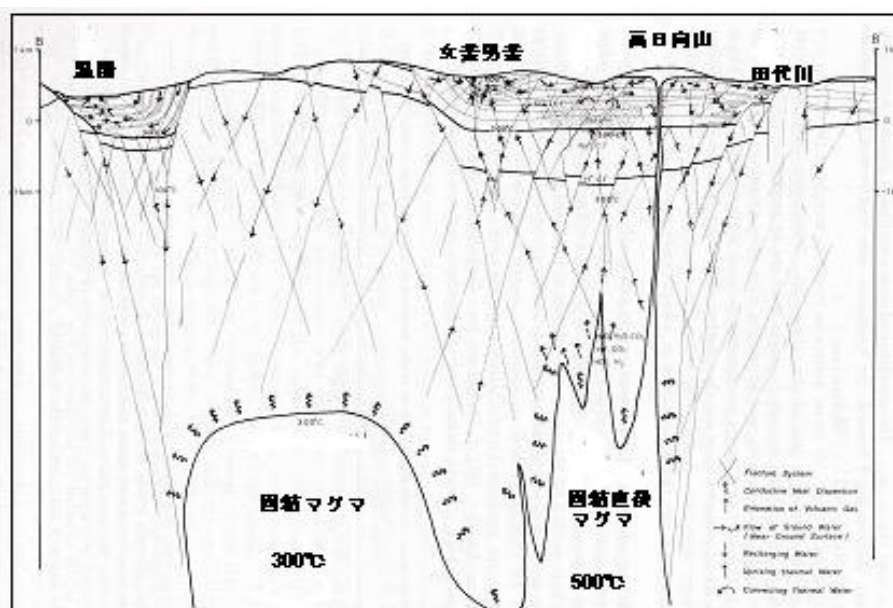


図 13 「栗駒地域」のカルデラを横断する地下推定断面図(Yamada,E.,1988)

サンシャイン計画のもとで、全国網羅的調査から始まり、多様な地熱探査法を駆使して地熱有望地域が絞り込まれ、掘削調査を含む詳細調査によって地熱構造がより具体的に解明された地域も出現したが、地下 2,000m 深程度の地熱資源賦存の場合は複雑で、地下深部の地熱流体を大量に取り出し、地下環境への影響を実証的に調査し、ひいては地熱エネルギー開発利用を加速化させる結果には至らなかった。また、多様な地熱探査法が試みられ、それぞれの探査効果が追究されたが、複雑な地熱資源賦存の場の探査法として選択肢の幅は広がったものの、深部地熱構造を高い精度で探査する手法は掘削調査に及ばない。

規模がそれほど大きくない火山ではマグマ溜まりの規模も限定され、地熱ポテンシャルの高い地域は新期火山の噴出中心部となる傾向が見られるが、それら地域の多くは自然公園に含まれ十分な調査ができないこともあり、地熱エネルギーの理解、利用上制約条件となっている。また地熱貯留部が断層系に支配された地下構造として発達するらしいことが次第に明らかになってきており、地下熱構造をさらに精度よく探査する技術、ノウハウの蓄積や地熱レザバ評価技術の向上に向けた新たな技術課題も生じている。地質調査所では「地熱探査技術等検証調査」に引き続き「仙岩地域」で、「深部地熱資源探査技術に関する研究」、「断層型地熱貯留層探査法に関する研究」をサンシャイン計画（ニューサンシャイン計画）終了まで継続した。

サンシャイン計画では火山地域の地下を対象に、地熱エネルギー開発・利用に向けた技術開発とともに、火山地域の地下構造解明という観点から積極的挑戦がなされた。しかしながら地下深部の地熱流体を大規模に採取、利用するという立場から当初期待された高温大規模な地熱貯留構造は、検証調査が進むにつれて事前モデルとの違いが生じたため見直しを迫られることになり、その存在をもとに計画された、深部地熱流体採取に伴う地下環境変化の実証調査や、最終目標である深部地熱エネルギーの大規模な開発利用には至らず現在（2016 年時点）に至っている。

おわりに一思いと思い出

サンシャイン計画のもとで地熱エネルギー開発利用に向けた研究開発は大幅に進み、火山地域で深度の大きな掘削調査が積極的に実施された結果、実証データが蓄積し、対象火山地域の理解も深まった。高温岩体プロジェクトや活動的火山への取り組みを通じて火山への積極的な挑戦がなされたことは、本プロジェクトの火山科学に対する大きな側面として特筆されて良いのではないと思われる。高温岩体プロジェクトは公害資源研究所が主として取り組んだプロジェクトであるが、ここでは地質調査所が参加協力したマグマ近傍の地熱理解に向けた予備的調査について少し述べさせていただきたい。

私は本テーマがサンシャイン計画の夢のある部分として大きな関心をもったが、委員の一人として、しかも途中までの検討機会しか参加できず、あまり述べる権利はないことを断っておく。

マグマは地熱の本源的熱源であるが、前述のように実態解明はほとんどなされていない。NEDO は 1992 年（平成 4 年度）に、「マグマ近傍の地熱資源に関する予備的調査」として、東電設計（株）に委託して国内外の調査を実施した。国内では有珠火山が主対象として選定され、国外ではニュージーランドの White 島が対象になった。「マグマ近傍」として定義された温度環境は 350℃～650℃であり、これはサンシャイン計画の具体的対象以上の温度設定である。高い目標設定はサンシャイン計画発足時の精神に適っている。この温度域で圧力、化学的性状ともに、人を寄せ付けない、hostile（日本語に適訳がない）な極限環境下での地熱理解に向けて国内外の多くの研究者が知恵を絞り、既存資料を持ち寄り、アプローチに努力した。国際的連携の中でまとめられた本調査は価値ある調査結果として今後に活かしていただきたいと願っている。

サンシャイン計画における地熱エネルギー研究開発プロジェクトは途中、中間見直しがなされて継続し、そして終了した。私は工業技術院、NEDO、そして資源エネルギー庁が関連した地熱エネルギー開発利用プロジェクトに深く関わった。関わり方は当初の個人研究的内容から、次第に現場を離れ、調整役や専門委員としての立場に移った。その経緯の過程ではいくつかの悩みもあった。若い時は、まだ研究に集中したい、という個人的悩みだったが、やがて他の研究者の悩みを共有する立場に置かれ、若い研究者の出向時の相談には共に悩みつつも自分の経験を話して納得してもらうしか方法が見つからないこともあった。プロジェクトに参加することが若い研究者にとって最善だったかどうか、それぞれの立場、思いはあろうが、プロジェクトで得た経験を活かして今後の発展につなげていただきたいと願うのみである。

NEDO の他事業ではノウハウをいかに公平に保持するかが結構大きなテーマとなっており、「ノウハウの封印」として、プロジェクト参加以前と、プロジェクト後新たに発生したノウハウの仕分け、扱いについて、結構時間をかけた議論がなされていた。NEDO 事業に参加した民間企業にとってはとても大事なことなのだろう。われわれが扱った事業では連携機関の地質調査所に多くノウハウが集まる結果となった。サンシャイン計画開始の際に地質調査所の諸先輩が蓄積したノウハウはとても重要な役割を果たしたように、新たな地熱エネルギー開発利用など、国土利用に関連した次のプロジェクト展開を考えると、碁・将棋の棋士が次の一手を繰り出す時と同様、蓄えたノウハウが重要な決め手になると思われる。

NEDO は発足当時、官民の総力をあげて石油代替エネルギー研究開発プロジェクトに取り組む組織と謳われ、発足当初は業務管理の整備が不十分なこともあって実施責任が担当に任されていたが、このような状況の中、迅速な業務遂行には民間流の融通が通用し、それは「官」出身の自分には効率的と感ずることも多く経験した。やがて業務管理体制が整備さ

れてくると、逆に「官」側が求める事務手続きの完璧さが煩雑さに影響し、気になることも出てきた。「全国地熱資源総合調査」では調査契約がドル建てだったため、為替変動が調査出来高に影響し、会計事務取扱上の課題となった。このような扱いに経験のない自分にとっては何ら具体的な解決策を建議できず、徒に時間を費やしてしまった。

NEDO への出向時、ひとつの思い出深いことがある。予算の行使について出向翌年、会計検査を受けることになり、自分にはひとつ懸念されることがあった。それは NEDO が発足した日付が 1980 年の 10 月 1 日であり、事業年度の過半が過ぎていたため、自分なりに、国費を使って出向してきている者が事業を遂行せずに半年過ぎずとしたら国費の無駄遣いに当たることになろうと判断し、年度内に取り掛かることができる調査業務契約について、自己責任で仮契約を結び業務を実施したことである。野外調査は積雪期を間近に控えてぎりぎりのタイミングだった。このことは検査官に事前に説明したが、検査官は事情にはふれず、「調査データは貴重な国土情報である。しっかり調査進めて欲しい」と逆に励まされた。この激励はありがたく感じられ、今も記憶に残っている。

参考文献

- 地質調査所 (1985) 豊肥地熱地域における研究、地質調査所報告第 264 号、443p.
- 同 (1986) 地熱情報データベース・システムの研究、地質調査所報告第 265 号、538 p.
- 同 (1987) 仙台岩地熱地域における研究、地質調査所報告第 266 号、596p.
- 同 (1988) 栗駒地熱地域における研究、地質調査所報告第 268 号、331p.
- 同 (1991) 日本の地熱資源評価に関する研究、地質調査所報告第 276 号、352 p.
- 同 (1995) 断裂型地熱貯留層探査法に関する研究、地質調査所報告第 282 号、413p.
- 同 (2000) 東北・九州地熱資源図、地熱資源図作成グループ、地質調査所研究資料集 n. 359.
- Fischer, W.A., Moxham, R.M., Polcyn, F. and Landis, G.H. (1964): Infrared surveys of Hawaiian volcanoes, *Science*, v.146, n.3645, p.733-742.
- Hase, H. (1971) Surface heat flow studies for remote sensing of geothermal purposes, *Proc., 7th Int. Symposium on Remote Sensing of Environment, Willow Run Lab., Univ. Michigan*, p.237-245.
- 長谷紘和、西村嘉四郎 (1973) 草津一万座地熱異常地域の熱赤外映像撮影結果、写真測量学会誌、v. 12, n. 3, p. 1-12.
- Hase, H. (1974) Geologic remote sensing of the Kusatsu Manza geothermal area, *Geol. Surv., Japan, Report No.252*, p.1-56.
- Hase, H., Matsuno, K. and Nishimura, K. (1975) Geothermal survey using thermal infrared remote sensing in Japan, *Proc. 10th Int. Symp. on remote sensing of environment, Environmental Res. Inst. of Michigan*, p.995-1005.

- 長谷紘和 (1982) Landsat データからの地熱変質帯広域抽出の試み、日本地熱学会誌、
v. 2, n. 2, p. 87-100.
- 長谷紘和、山口 靖、村岡洋文(1983)地形・地質情報としてのリニアメント、地球、n. 53、
p. 695-699.
- 鎌田浩毅(1985)九州中北部における火山活動の推移と地質構造、地質調査所報告第 264 号、
p. 33-64.
- Matsuno, K., Hase, H., and Nishimura, K.(1968) On IR imagery and its application to the
mapping of geothermal distributions, Photogrammetria, v.25, p.61-74.
- Muraoka, H. and Hase, H.(1981) Okiura Caldera, discovery of a Valles-type caldera in the
northern Honshu, Japan, IAVCEI Symposium-Arc Volcanism-abs., p.242-243.
- 村岡洋文、山口 靖、中澤 敏(1983) 南八甲田火山と八甲田カルデラの相互関係ーレーダ
ー画像判読とその現地検証、地質学雑誌、v. 89, n. 11, p. 661-664.
- 村岡洋文、山口 靖、長谷紘和 (1991) 八甲田地熱地域で見出されたカルデラ群、地質調査
所報告第 275 号、p. 97-111.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1993) マグマ近傍の地熱資源に関する予備的調査、報
告書 NEDO-P-9222, 280p.
- 陶山淳治、石井吉徳、山口 靖、鎌田浩毅、長谷紘和、小川克郎(1982)、合成開口レーダー
による日本列島の地熱資源調査、日本リモートセンシング学会誌、v. 2, n. 4, p. 57-65.
- 竹内 均他 21 名 (1979) 宇宙からの眼、朝倉書店、142p.
- 土田聡、山口靖、長谷紘和(1989)、リニアメント抽出過程におけるサイズ分布の変化、写真
測量とリモートセンシング、v. 28, n. 2, p. 4-13.
- Yamada, E.(1988) Geologic development of the Onikobe caldera, Northeast Japan, with
special reference to its hydrothermal system, Rept. Geol. Surv., Japan, Report No.
268, P.61-167, 11pls.
- 山口 靖、長谷紘和(1982) レーダー映像法による日本全国の地熱資源調査、測量 3 月号、
p. 12-20.
- 山口 靖、長谷紘和(1982) 多様な画像によるリニアメント頻度の解析ーレーダー画像の屋
久島地域への適用例についてー、写真測量学会誌、v. 22, n. 3, p. 4-13.
- 山口 靖、長谷紘和、矢野雄策、衣笠善博 (1984) レーダー画像による豊肥地域のリニアメ
ンと解析と土壌ガス法による現地検証、日本地熱学会誌、v. 6, n. 2, p. 101-120.
- Yamaguchi, Y., Hase, H., and Ogawa, K.(1992) Remote sensing for geothermal
applications, Episodes(international geoscience news magazine), p.62-67.

著者略歴

長谷紘和 (Hase Hirokazu)

1939 年 8 月 京城府生まれ

1964 年 4 月 地質調査所入所

1969 年 2 月 スタンフォード大学留学 (科学技術庁)

1974 年 2 月 サンシャイン計画推進準備本部出向

1980 年 10 月 NEDO 出向

1984 年 1 月 地殻熱部長

1994 年 6 月 次長

1996 年 6 月 所長

1997 年 5 月 JICA 生産性・品質向上プロジェクトチーフアドバイザー, ブラジルパラナ州
Curitiba 市

2000 年 9 月 深海鉱物資源 (株) 技術顧問

在職中 JICA 専門家としてペルー地質調査所 (INGEMMET)、トルコ地質調査所 (MTA)
において地質リモートセンシング技術移転に従事

2009 年 11 月 瑞宝中綬章受章

2009 年 12 月 地熱学会名誉会員

受理日 : 2016 年 10 月 24 日
