

地熱地質研究28年の思い出

角 清 愛 (地殻熱部)

Kiyoshi SUMI

1. 序章——初めての地熱地玉川温泉

「これからの地質屋は温度計位は持って歩かにか……。河野義礼さんにいわれたのは玉川温泉調査の準備をしていた時である。玉川温泉は八幡平地熱地域にあり北投石(鉛重晶石)の沈殿塩酸酸性日本最大の湧出量の沸とう泉などで著名である(第1図)。そこがウラン調査の対象となり昭和30年8月河野さんのほか早川正己さん佐野俊一さんと共に現地に向うこととなった。花輪線の八幡平駅(当時の小豆沢)から1日2本のバスにゆられること3時間荒涼たる“地獄”を初めて見た時はいい知れぬ感情のたかぶりを覚えた。新しい現場についた初日に感ずる“やろう”という意気込みと“やれるだろうか”という不安の入りまじった独特のあれである。たしかに温度計は持参したものの道具は基本的にはハンマーとクリノメータであるから地熱・温泉をどう攻めたらよいか見当がつかない。地熱・温泉の研究は地球物理学・地球化学の方が先行していて玉川温泉の場合も地質学的文献は無いに等しかった。地質調査所の河野部長がおいでになるとなれば予め地元新聞などに記事が出て県庁の人県会議員記者などの来訪であわただしい。マスクに貫禄のある佐野氏が大たい部長に間違えられていたようだが……。夜は我われの為に盆踊り大会も開かれたが私にとっては上の空であった。ここでの体験がその後の私の地熱地質研究の原点となる。

地質ニュースの地質調査所創立100年特集の一つとし

て地質調査所の地熱研究の歴史を執筆するはめになった。しかし昭和22年からの35年にわたる歴史のうち最初の8年間(22-29年)は私には全くかわりがない。次の15年間(30-44年)は所属が別のグループ員であったからこの計23年間についての網羅的なまとめを書くことは大変困難である。特に注文が研究の歴史ということであるから尚更である。それで全体史の執筆は断念して玉川温泉調査を原点とする私の地熱地質研究の体験の告白をつづることでお許し願うことにした。専門上地質学のことに限りテーマを地熱変質のゾーニング変質帯と第四紀層序地熱水理地質学および地熱地域の表層変動の4つに分ける。ねらいとしては研究の内容もさることながら社会のニーズおよび研究グループ長の指導のもとに計画実施されるプロジェクト研究と個人的発想をベースとするシーズ研究との調和の問題に光をあててみたい。これならばグループ員時代の思い出も無駄ではないことになる。視野の狭いことから来る見当はずれの点があるかも知れないがこれについては先輩諸賢からの御指摘が頂ければ幸である。

なお研究計画の具体的経緯については地質調査所年報がまたその地熱の部分だけの抄本(地質調査所地殻熱部1978)あるいは日本の地熱探査史(角1978)などがある。ただし便宜の為本文に関する事項を年表抄として第1表にかかげておく。

2. 地熱変質のゾーニング(1)——粘土化変質

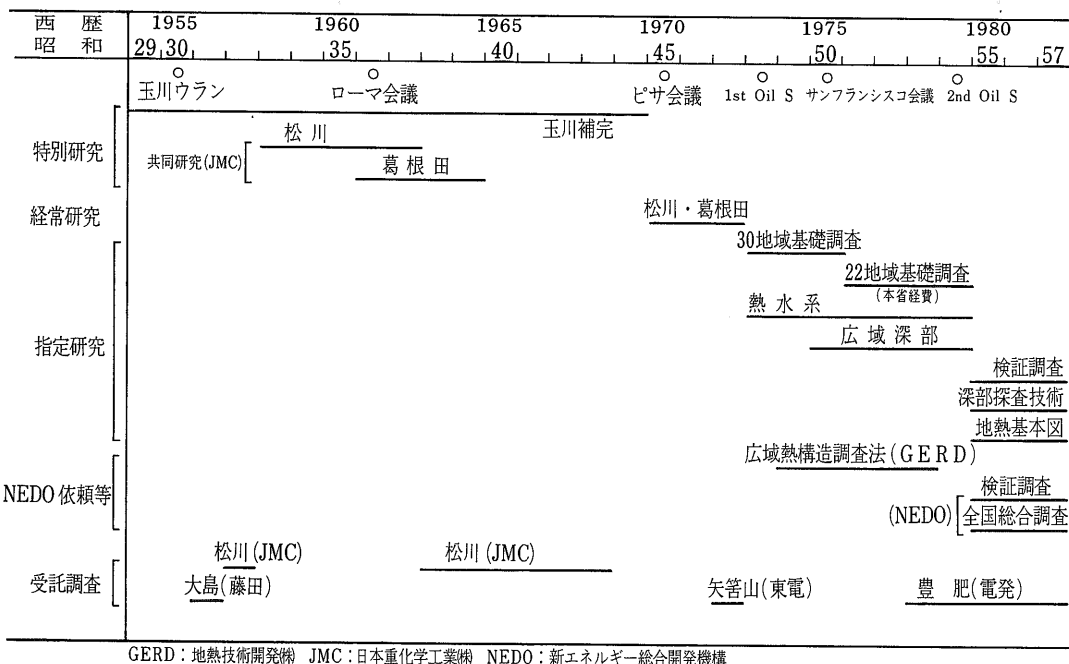
昭和29年入所当時の新入所員は将来の配属とは無



第1図 昭和30年当時の玉川温泉

凹地の右を流れる湯川の上流の白煙が大沸沸とう泉(水温98°C pH1.2 湧出量56t/h)の位置を示す。その左の円頂丘が東森その後方の台地は笹の台。左遠方は焼山山頂

第1表 地質調査所の地熱研究 (昭和29年～57年)



関係にまず地質部で5万分の1地質図幅を作ることになっていた。もともと調査所を志望した動機は 岩生周一先生の下で変質地質をやりたいということであったが 同氏はすれちがいに転任されていた。単なる希望で実績もない変質研究などが認められるわけもないから 業務として図幅作りが始まる。なるべく変質帯のある所ということで グリントフ地域を希望し 結局図幅課在籍17年間に10図幅を調査した。 終り頃には地質図作りの技術はかなりの域に達した。この間 地熱を含む他グループから何回もお座敷がかかって出かけたが それは常に“地質図作り”であった。調査業務で身についた技術は 人間に自信を与えるものである。

それに引きかえ“変質研究”の方は誰も相手にしてくれない。もともと学生の頃から学界をにぎわしていた熱水変質の研究 とくにそのゾーニング研究の進歩には大きい魅力を感じていた。その中心におられたのは須藤俊男・岩生周一両先生であった。従来ほとんど無視されていた熱水性鉱物に注目し 温度とか pH 等のパラメータを抽出していくそのプロセスは 丁度1900年代初頭のオスロ地方の変成岩ゾーニング成功の頃に似ており 心をとらえられていた。

最初のチャンスは意外に早く来た。それが昭和30年

の玉川温泉行きである。私の用務はもちろん地質図作りである。私が選ばれた理由は 同温泉が私の関係している5万分の1森吉山地質図幅の中にあるので 図幅作成の足しになるということだったと想像する。地質図作りを行うかたわら“サイドビジネス”の変質帯マッピングを行った。河野さんは岩石化学者らしく「粘土にみえても SiO₂ 90% 以上のものがある。珪化という概念はむずかしい」と注意された。結局 表層から地下へ向ってイオウ-珪化-白色粘土-硫化鉄含有粘土の累帯構造が明らかになった(河野ほか 1957)。しかし肉眼観察の限界を痛感した。この頃 小出博さんが地質調査所時代の経験をもとにして 箱根大涌谷の温泉変質帯について“変質分化作用”なるものを提唱された(小出 1955)。これは同氏の段戸地方の領家変成岩の研究に発源する思想で その斬新さには感動した。何故ならこのような変質岩は当時“温泉余土”と呼ばれ 字の示す通り“ごみ”のようなものとみなされていたからである。

2度目のチャンスは翌々年 昭和32年8月の松川温泉調査である。図幅調査に出かけようとしている矢先 東化工(現日本重化学工業)の受託調査の命令が出た。目的は地熱である。地熱のためには何をすればよいか見当がつかなかったが “何でもよいからとにかく行って

てこい”で その頃はそんな話が多く 事細かに指示することはなかった。復命の期日だけがいやに厳密で 図幅の日程は変更となる。前年の安藤武さん渡辺和衛さんの予察結果をみると変質帯があり 有機試薬による粘土試験が行われていた。早速渡辺さんの研究室に通って有機試薬による粘土の染色試験法を学んだ。松川は玉川とちがって噴気はなく 厚い植生におおわれていたが 至る所に赤褐色の変質帯が地肌をみせていた。染色によるゾーニングの結果 変質帯は露頭毎に分離したものでなく 植生の下で連続し 東西に伸びた巨大なものであることがわかった。翌33年は地質調査を目的として再び訪れ 肉眼的変質帯分布図を完成した(中村・角 1961)。

当時 地熱地帯の変質研究としては 1930年代にカーネギー地球物理学実験所が イエローストン国立公園で行ったものが唯一のものであった(Fenner 1936)。大変に詳細な記載であるものの 主たる研究手段が顕微鏡であるから 鉱物同定には迫りに欠けるものがある。孔井間対比もむづかしく 構想が雄大だけに物足りなさを感じたものである。

丁度この頃(昭和32年) X線回折装置が地質調査所河田町庁舎に導入された(地質調査所鉱床部 1958)。写真の黒化度の測定に頼るデバイシェラ環の強度を自動的に定量的に走査する装置があることは 北原順一先生から聞いてはいたが 意外に早く手のとどく所へ出現したのである。松川の2 3のサンプル分析を鉱床部に頼んでみた所 明確な反射がとらえられており 変質研究にとってはこれは本命の器械であると直感した。昭和33年4月 片田正人さんの世話で 飯高洋一さんがオペレートしている地球科学系では 日本最初の東大の“ソレルコ”(久野 1954)を見学に行き 同年7月には日本物理学会・日本結晶学会共催のX線講習会を受講した。そのうち 溝の口庁舎へもX線回折装置が導入され それからの数年は驚きと歓びの日々となる。肉眼的にも顕微鏡的に区別がつかないものから続々とデータが出て来る。結果的には有機試薬分帯と似た分帯が得られたが 何といたってその客観性の高さには及ぶべくもない。この装置は原子力予算で購入された鉱床部の備品であったが ウラン調査も次第に縮小されて行く中で “よそ者”が専用のように使わせてもらった。しかし本職はあくまでも図幅屋であるから時間的にハードなものであった。一般の理解度も低いもので “あああれですか”とレコーダーのペンの動きを指で空に描くしぐさが私の“研究”を指すサインであった。いずれにしる屈折率や光軸角を測定しないような研究は邪道であった。

顕微鏡はX線との併用でないと鑑識眼は養われない。ゆかいなのはズニアイトの発見である。大和栄次郎さんがある日 机の引出しから あめ色の鉱物を取り出して “これはズニアイトというもので 顕微鏡の下では正三角形にみえるものだ”と教えてくれた。薄片にしてみるとたしかにその通りで このコツはWinchellの教科書にも書いていない。松川の薄片をのぞいていたら 偶然それがあつたのである。この場合は顕微鏡からX線への逆探知であった。同じような例は 武司秀夫さんに教えてもらった紅柱石もそうであつた。

昭和35年7月に日本鉱山地質学会の講習会が開かれ この時に岩生先生の話に ニュージーランド ワイラケイのSteiner (1953)の画期的な地熱変質研究が紹介された。Fennerの果し得なかつたそのゾーニングの見事に眼をみはつた。それから平山健さんの紹介で 直接に岩生先生に教を乞うこととなる。

Steiner (1953)の論文はCoombs et al (1959)の沸石相の研究と互いに関連しているものの 変成作用でいう等化学反応に基づく ゾーニングとちがった交代作用を取り入れている。とくに近地表の酸性変質帯は“酸性溶脱帯”として完全な交代性ゾーンとして取り扱っている。松川の変質はワイラケイとちがった酸性変質であり 当然交代性ゾーニングが考えられ また実際大部分の人はそう考えていた。松川のゾーニングは基本的にはM(モンモリロナイト) — K(カオリン) — A(明ばん石)ゾーニングであるが 不思議に思ったことは 同じM—K—Aゾーニングでも浅所と深所では岩石の色 固さ 孔隙率などの物理的性質が非常にちがうことである。一口でいえば深所ほど“なま”の様相を呈するのである。そして実際に岩石の総化学組成の変化が小さい。つまり交代作用が深さによって変化するというところで 換言すればM—K—Aゾーニングを単純な交代作用で説明できないことになる。交代作用—本槍の変質研究に変成作用の概念を導入出来るのではないかと感じだしたのは 昭和38年も9月となつていた。ここで考えられるパラメーターは 合成実験の研究結果などから考えて当然pHが考えられる。このpHと交代作用とは 当時の論文はすべて同時進行の説明であつたから 両者独立進行のメカニズムをどのように解釈したらよいかが問題であつた。

昭和38年から40年にかけては 黒鉱ブームの北鹿地域の金属鉱床調査に動員されて 長期出張し また折から松川は生産井掘削の最中で コア鑑定を受託調査にも反復出張し 変質研究も約3年間中断する。

昭和40年の6月 地質部の談話会で話してみないかというさそいが来た。 やっとこの研究も認知してもらえそうだと張切ってしゃべったが 何といっても変成岩屋さんが多いから “ゾーンには反応式が必要だ” の一点ばかりで理解してもらえない。 地熱の場合は等化学的でないし 溶液・コロイドの反応等が 卓越しているからむづかしいだろうという慰めしかでてこないのにはがっかりした。 高橋清さんが 黄鉄鉱関連で Eh の研究をやってみたらという意見が唯一の具体的助言であった。 研究上の助言は主として鉱床部から得ていたが そちらは交代作用万能であるから 地質部でのきびしい批判はある意味でよい薬でもあった。

岩生先生は 当時イランに長期滞在していたが 自分の考えをまとめて御送りした。 御多忙中にもかかわらず8月には長い御返事をいただいた。 そして問題の整理不十分のまま開放系だの閉鎖系だのといっていると きびしく指摘され むしろ水流動の面から攻めたらどうかと示唆された。 聞いてしまえば何のことはないが これで眼がさめた。 pH に直接関連するのは溶解度であり 交代作用ではない。 交代作用には媒体の運動が必要なわけである。 先生は Korzhinskii (1958) や Thompson (1955) 等の論文で開放系における相律の勉強をするように勧められたが 私には彼等の仕事を理解する能力と時間(これも能力の関数であるか)がなかった。 結果的に それを引用した先生の宇久須の論文 (Iwao 1963) を引用することでかっこうをつけ 交代作用と変成作用とのかわり合いに力点をおいて鉱山地質に発表した (角 1966)。 この論文は後で (昭和44年) プライズを受けることとなる。

3. 地熱変質のゾーニング (2) ——沸石の崩壊

さて松川の研究は そのスタートの頃のお手本となった Steiner (1953) のワイラケイの結果とは どんどん異なったものになって来たことになる。 ワイラケイは 中性ないしアルカリ性の変質であり ゾーニングの基準鉱物の一部として 沸石が使用されていた。 そのため Coombs et al (1959) の沸石相の研究とかかわりがあったのである。 当時 Coombs et al (1959) の論文は日本で熱病のようにまんえんしていた。 これを日本の地熱地帯に応用したのは関陽太郎さんである。 関氏は鬼首でローモンタイト→ワイラケイの鉱物学的転移を実証し その地熱学上の意味を 水蒸気圧/岩圧比に帰せられた (関 1968; Seki et al 1969)。 この様な時代だから

「松川には沸石はないのですか」という質問をよく受けた。 私は沸石は晶洞や脈等の熱水性鉱物としては知っていても 変成鉱物としては見たことがなかったので松川で見落していることをおそれた。

沸石の問題になると粘土鉱物とちがって 地質部でも “認知” されており 助言者が現われてきた。 片田正人さんも変成岩屋として 粘土鉱物のゾーニングに否定的であったが 沸石でてこ入れできないかということで同氏の紹介で都城秋穂さんの所へ一緒に話を聞きに行ったこともある。 都城氏も時節柄 沸石を集めておられたが このコレクションを一色直記さんが分譲してもらって来てくれて これで X 線標準チャートを揃えた。 昭和40年1月 地質調査所溝の口庁舎で岩鉱学会が開かれたが その時 関さんが片田さんの所へ鬼首のワイラケイ標本を持参された。 それは一見してプロピライト質岩石であったから 松川で従来あまり問題としていなかった “弱変質帯” の岩石を調べることにした。 そしてやっと BR2調査井の深度400~500m 付近から斜長石を交代しているローモンタイトを発見した。 問題は M-K-A ゾーニングと沸石との成因関係である。 昭和41年の6月頃から約1年間は この研究に費した。 まず 浦和に関さんを訪問して 重液分離のコツ等を教った。 数100回この X 線分析・顕微鏡観察・化学分析を経て 遂にローモンタイトが混合層粘土鉱物と方解石との集合体に変化し ついで M-K-A ゾーニングに連続していることをつきとめ この結果を 金沢の地質学会 (昭和44年10月) で発表した。 この発表会場は希望に反して鉱物会場であったから いささか気おくれたが かねて反響は大きく多くの人々から問合せのお手紙をいただいた。 北原先生もその一人で そのおすすめにより 前の鉱山地質の論文と今回の研究とを合せて学位論文 (Sumi 1968) とした。 奇しくも提出先は10年前に玉川温泉に同行した河野先生であった。

始めて英文論文を出す時 今度は海外から多くの手紙が来るようになった。 そのうちの一人 USGS で水熱反応の実験的研究をしている J. J. Hemley 氏はとくに大きな関心を示し 現地を見たいといってきた。 彼は鉱山地質の論文の英文アブストラクトの時から注目していたという。 これを聞いて和文論文でも英文アブストラクトが如何に大切かを痛感した。 その中で large と small をとりちがえている部分があったので冷汗三斗の思いであった。 Hemley 氏はその後 昭和45年に地熱学の大家 D. E. White 氏と共に来日し松川へ同行討論する機会を得た。

第2表 松川のパイロフィライトと共生する粘土鉱物の組合せの出現ひん度

	C	C-C/M	C/M	C/M-M	M	計
S	15	7	7	2	0	31
S-S/M	6	10	14	4	6	40
S/M	0	3	7	1	1	10.8
S/M-M	0	0				1.1
M	0	0	0		0	0
計	21	20	28.3	6.6	7	83

C：緑泥石，C/M 緑泥石・モンモリロナイト混合層鉱物，
M：モンモリロナイト，S：セリサイト，S/M セリサイト・
モンモリロナイト混合層鉱物

彼等は松川の変質は活地熱地として世界に類例のないもので ポーフィーリー・カッパー・鉱床の原型ではないかということが 関心の中心であったが それから10年日本国内からは松川型のゾーニングは続々と報告されるのに 日本以外からは全くの報告がないのは不思議である。このタイプの変質作用の研究を掘り下げることは世界的な立場からみても日本の責任ではなからうか。この場合 Hemley 氏の哲学 (Hemley and Jones 1964 p.556) は開放系の考察が注意深く行われている点から参考になると思う。

4. 地質変質のゾーニング(3)——パイロフィライト

昭和44年5月頃から 松川の500m以深の蒸気生産層の研究にとりかかった。そこは浅所と異り M-K-A ゾーニングは余り顕著でなく パイロフィライト(P)がまんべんなく分布していた。Pは浅所にも また地表にも分布しており 特に珍しいわけではなかったが これまでは低温部であったから 化石変質とみなすことで解釈できたが ここは200°C以上の高温域であり Pが生きているかもしれない。K→Pという温度依存性の鉱物学的転移 すなわち典型的な“ゾーン”が生きている可能性がある。しかし共生鉱物としてはセリサイト・モンモリロナイト混合層鉱物(S/M)および緑泥石・モンモリロナイト混合層鉱物(C/M)が最も多かったから パイロフィライト帯の研究には混合層鉱物の研究は避けて通れなくなってきた。

混合層鉱物の研究は 前述のゼオライトの研究の際 その崩壊の過程で生成しつつあったので その鉱物学的研究がゾーニングの一つの手法にならないかと考え

た。その頃 武司秀夫さん 藤井紀之さん 大八木規夫さんが箱根大湧谷の地すべり研究に関連して 粘土鉱物学のセミナーを開いていたので これに参加させてもらい Brownの教科書を中心に勉強した。武司さんから Weaverの石油探査への貢献の話などを聞いてやる気を起した。昭和42年11月から3ヶ月ばかり須藤先生のもとへ流動研究員として通い 主として松川のBR2井の混合層鉱物のサンプルを研究したが 鉱物分離がむづかしく 最良条件でも (00l)反射を6こ得るにとどまった。これでは一次元フーリエ解析の精度が十分ではない。また概略の一次元構造解析の結果ではBR2井の500m付近では割れ目周辺のわずか数10mの範囲で 完全互層から完全ランダムまでのバラエティがある(角 1968MS)。このことから当初意図したゾーニングへの応用は困難として打切ったのである。そのようなわけで今回は鉱物学的転移を統計的に考察することとした。その頃アメリカのスチームボートでイライト→イライト・モンモリロナイト混合層の転移を暗示する報告が出た(Schoen and White 1965)。松川は酸性環境だから 溶脱性反応としてこれと逆の反応が想定される。すなわち セリサイト(S)→S/M→Mおよびまたは 緑泥石(C)→C/M→Mの2つの転移である。まずこれに関連する82個の鉱物組合せを検討したところ 第2表の結果が得られ S/M→Mの反応は存在しないだろうという予想を得た。一方193個のC/MおよびS/Mの(00l)格子面間隔値がC→Mは連続であるのに S→MについてはS→S/MのみでS/M→Mの部分が全く欠けていることをつきとめた。そして分布からみても 混合層帯の中心部にM帯があることから M→K→AゾーニングのM帯の外側に混合層帯(Mix)を確立することができた。

このように Mix→M→K→Aゾーニングを生産層の深部までふえんすることができた。問題のパイロフィライトはこのゾーニングと不調和に分布している。32個のP岩のうち半数以上の18個はM/Sを含まないこと その中にはP-S-C岩が3個 P-S岩が7個も含まれていることも混合層帯がP帯と無関係で CまたはS→Pの反応の可能性を示している。MやM/Sを伴わないこのようなゾーニングは湊(1965)によってまとめられており 松川の過去にそのようなゾーニングが存在し それと上述の現在の Mix→M→K→Aゾーニングとは たがいにテレスコピング現象をなすものとした。Mix帯の発達が著しく M-K-A帯の発達の悪いMR-2井の深部からは pH=6.9~8.6の中性ないし弱アルカリ性の熱水を産出するので これ

が Mix 帯の化学的環境を代表するものと考えられる。同じ場所に P 帯もデイッカイトを伴って顕著に発達するがこれが上記の pH 条件で生成することは考えられない。これもテレスコピングの一つの証拠である。この研究結果は1970年の国際地球化学・宇宙化学協会 (IAGC) 総会で発表した (Sumi and Maeda 1973)。

しかし林・山崎(1969)は八丁原の地熱井から P-D (ダイアスポア) 共生を報告しそれが高温部に現出するので生きた変質であるとしている。これと松川との比較研究とくに生成条件の比較は地熱探査上重要なことと思われる。

5. 地熱変質のゾーニング (4) ——プロピライト変質

松川のローモンタイトが現在崩壊しつつあることは明らかにし得たがしからばそれはいつ生成したのか。そしてそれは地熱に関連するのかという疑問が出て来る。原岩が鮮新・更新世の玉川溶結凝灰岩だから中新世のグリンタフ変質の可能性はない。地質調査・図幅調査の際のデータから緑色化地域の分布図を作ってみると松川・葛根田を中心とした直径20km位の区域が浮び上ってきた。このことは地熱との関連を疑わせるに十分であった。

昭和41年頃物理探査部の鎌田清吉さんが九州の大岳の重力探査の解釈のために大岳 T-1井(深度1030m)の薄片を作りこれを鈴木淑夫さんが検鏡していた。たまたま大岳へ行く機会があったのでそれをみせてもらったところ多量のエピドートに伴う立派なプロピライトでしかも原岩は鮮新・更新世の豊肥火山岩である。現地ですべてコアも見せてもらい松川と同じ広域緑色変質があるにちがいないと感じた。

この問題は八幡平地域については昭和51年から56年にかけて地熱開発基礎調査およびサンシャイン計画関連研究の中で金原啓司君を中心に同君のグリンタフ変質学のノウハウを適用して解明された(金原ほか 1979; 1982)。これによればこの緑色化帯の規模は最大15kmに達する。これは地表調査の結果得られたものであるが昭和56年度からは地熱探査技術等検証調査によってボーリングによる三次元的ゾーニングおよびそれと熱構造との関係が明らかにされようとしている。九州では一足先に昭和53年度から大規模深部地熱発電所環境保全実証調査が開始されボーリングによって6×10kmの緑泥石帯が実証された(角 1981)。現在大深度試錐によってそれと熱構造との関連が明らかにされようとしている。

地熱地帯におけるプロピライト変質については単発のボーリングについての垂直分布の報告は多いが水平分布に関する研究としては世界的に初めてのものであり深部地熱探査の立場からも今後の発展が期待される。

6. 地熱変質帯と第四紀層序

昭和30年の玉川温泉調査で変質帯には新旧があることを知った。同じ火口の中でも東部の噴気地帯の変質裸地から西方に向けて熱活動度の低下とともに変質帯の上に風化土壌・蘚苔類などが生成されついで低木帯高木帯へと移行して行く様子が観察され地熱層序学の必要性を感じた。この時は火口の侵蝕北投石沈殿の古河床などについての地形発達史的考察にとどまった。それから14年後の昭和44年にこの問題を想起することとなる。

昭和43年それまで長年続いてきた地熱特別研究が44年度で打切りと決った。昭和41年に松川42年に大岳と相ついで地熱発電所が完成しもう国が研究することもなかるうというのがその理由である。私は前にも述べたように特研グループへの地質部からのお手伝いであるから特研の消滅とともに原部復帰するのが自然の習いである。まわりからは不参加を示唆されたがその理由は「これまでの特研は対外的に意味があったがもうその役目は果たした。成果もあがらぬことだし……」ということである。役目とは何か成果とは何かこの言葉の持つ深い意味を地質調査所の研究者はよくかみしめる必要がある。この特研が最終的に得た科学技術庁長官賞(昭和42年本誌 no. 154参照)などは“成果”とは考えられなかったのである。

“地質調査”を“頼まれ”て変質岩石学をやっていた私も今度は主体性をもって“地熱地質学”について考えてみようと思った。地質調査所の地熱グループであるからには地熱現象を地質学という歴史科学の立場からみるテーマが含まれなければならない。14年前の玉川での地熱活動の時間的変化を思い出してみるに変質岩は常に“過去”のものであるから第四紀層序学と結びつけることが出来るはずである。根拠は大島で昭和32年以降中村一明さんが行った火山層序学的研究である。この中村さんの研究は昭和31年の大島地熱開発調査委員会の事業にその端を発しておりわれわれもそれに参加したことは後で述べるが同氏は大島の火山灰

の中に誰も気づかなかった新島の流紋岩質軽石層を発見したり 泥流を同定したりして 従来見むきもされなかった完新世堆積物の中へ見事な火山層序学を確立した (Nakamura 1960; 1961)。当時我々も見た同じ露頭からこれだけの学問を作り出した同氏に敬服させられた。その学問成立の秘密は同氏の岩波新書 (中村 1978) にくわしい。同氏の研究は当時学習院大学木越教授の所で確立された C-14年代測定という新技術開発 (一色ほか 1965) も一つの支えとなっているのは見逃せない。

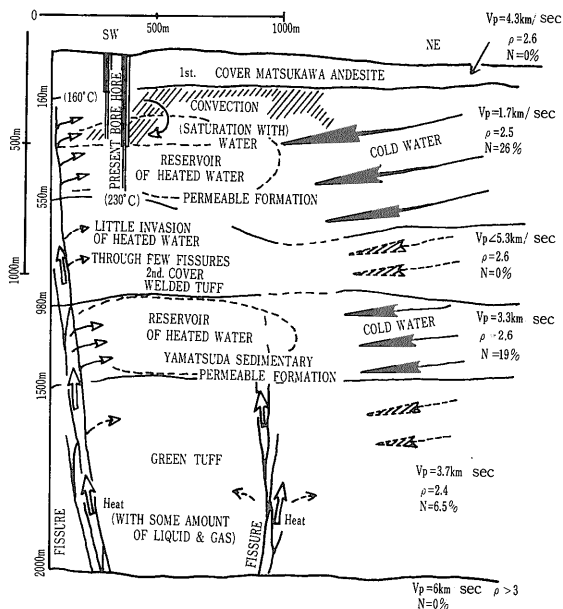
結局最終年度 (昭和44年度) に補完研究という形でこの研究を玉川でやらせてもらうことになった。文献調査をしてみると アメリカで氷河地質学と結びつけた類似研究があることを知り また意外にもこの種の着想がわが地質調査所でも霧島 (地質調査所地熱調査班 1955のうちの沢村孝之助さんの記述) と九重 (中村・安藤 1954) で行われていたことを知り意を強くした。

昭和45年の年頭になってから「地熱」グループを経常研究として存続させるという話になり 馬場健三グループ長のネーミングで「地熱活動の進化に関する研究」という看板で45-47年の3年間の研究を行うことになる。この結果は角 (1971) および角・高島 (1972) に報告し フィロソフィーは1971年の福岡の学会で発表した (角 1972)。経常研究を地熱とした時点で 私が地質部に在籍することは事実上形骸化しており 46年7月に 住みなれた地質部から離れて応用地質部へ移ることになる。「やとわれ」が「本職」になったということは言葉をかえていえば 地熱全体を考えるという意味での「かけ出し」であった。この時降って湧いたのが いわゆるオイルショックと関連する「全国地熱基礎調査」すなわち昭和48-50年の3年間の主要地熱地域30か所の緊急調査である。地質学関係調査としては玉川・松川での研究手法の実行以外は考えられなかった。当時の地質調査所には地質調査をプロジェクト調査として実行できるような態勢はなかったし このような一風変わった調査となれば尚更である。ここで調査所で初めての地質調査外注を思いついた。この結果は 角ほか (1978) 角ほか (1979; 1980) などにまとめ 日本の地熱変質帯の全容をほぼ明らかにし得た。しかし 難点は40,000年以前の測年のために採用したフィッション・トラック測年の進捗度が思うように進まなかったことである。現在の点はかなり改良されているので 現時点での再調査は意味のあることと思う。

7. 地熱水理地質学

昭和30年の玉川温泉行きを前に同地域の模式地下断面図を書いてみた。熱や重金属の起源は当然東方3kmにある焼山火山としか考えられない。マグマの深さは当時の教科書から5kmとしてみた。すると縦方向が以外と長いので 地質調査のスパンは相当長くしなければならぬと思った。これを早川さんに見せたところ “その精神で行こう” といってくれたのには勇気づけられた。しかし 今は 常識となった Craig の地熱水の天水起源の研究もなく 熱・水ともにマグマだまりに由来する図であった。

翌31年に藤田興業に大島地熱開発調査委員会 (兼子 勝委員長) が設立され その9月から翌年2月にかけて大島の地質調査を行った。用務は大島の深部地質として同火山の基盤の岡田玄武岩類の調査と 大島で現に利用されている地下水の賦存状態調査である。前者では小野晃司さんとともに 簡易測量によって延200mの柱状図を作成した (角ほか 1959) が その後のボーリングはこの地層には達せず 活用されなかった。地下水調査では 利用されている水源の大部分は谷を流下した溶岩の下部の自破砕部を帯水層とし その下位の風化火山灰層を不透水性基盤とするものであることがわかった。この様な産状の地下水をハワイでは perched spring と呼ぶことを沢村孝之助さんから教えられた文献 (Stearns and Macdonald 1942) で知った。一方 汀線湧水と呼ばれる 干潮時に汀線に出現する湧水も諸所に分布していた。これはヘルツブルグの法則にしたがって 海島の地下に賦存する純水に由来するものである。実際に汀線湧水のすぐ陸側に浅い水井戸が掘られ 利用されている。問題は汀線湧水の分布が一樣でなく 基本的には perched spring と同じであり ただその高度がちがうだけだということである。ヘルツブルグ型の海水・純水の境界面が 水理地質学的な透水性のちがいに基く動水勾配によって 変化する断面図を書いてグループ会議で説明した。しかし “単なるスペキュレーションは要らぬ 実証こそ大切である” ということであった。実証とは何か? 不思議な気がした。全く独立に元町の裏の方で深部電探と称して調査が行われていたが それは何を “実証” しようとしていたのであろうか。大島観光ホテルの水源のオタイサマ湧水で 我われの提言にしたがう横坑掘削によってあり余る程の水量を得たし 地の岡ではヘルツブルグ型の地下水井戸が成功して 大島の水資源問題は画期的に改善された。後者では我われの調査がどのように貢献したのかよくわからないが 地質



第2図 松川の熱水系モデル(早川, 1963)

れ 山津田層そのものが貯留層であるらしいという考えが強くなって来たが いまだに一つはぎれの悪いものがある。しかし流体の運動を示した断面図を作って大に議論していたら 問題がもっと能率よく掘り下げられたのと思う。早川さんは第2図のような図を書いてがんばったが 地質屋は地質断面図を書いて 満足していたきらいがある。それどころか 一部で玉川溶結凝灰岩の一部は 男助層かも知れないから命名がおかしいのではないかなどということを一生涯懸念議論した あるいはしようとした昭和40年頃の技術検討会なるものが不可解であった。早川さんは「過去のことも大切だがそれ以上に大切なのは現在どうなっているかですよ」とつぶやいておられた。

昭和43年頃 国際連合開発計画 (UNDP) で地熱専門家を募集しているということで応募したことがある。募集要項に“水理地質学者”はあっても“地質学者”がないことを奇妙に思った。結局候補者リストにはのつたもののお座敷がなかなかかからない。この銚衝をやっているのは 国連本部エネルギー課技術顧問の McNitt 氏とのことであった。昭和45年秋 イタリアのピサ市で開かれた国連地熱会議でたまたま McNitt 氏に廊下で会ったから「何故自分にはお座敷がかからないのか」と聞いたら「貴方は経歴をみると水理地質の実地経験も少いし 仕事の内容がアカデミックに過ぎるからだろう」といわれた。さもありろかと思ったが 今もって日本の地熱地質学には 水理地質学的観点が不足しているように思う。地質を透水係数に置きかえてみる努力が不足していることは 帯水層を示した断面図が日本には少ない(角 1979a)ことからもうかがわれる。そのような断面図があれば 地質以外の技術者 行政官 経営者にもよく理解してもらえるのでなからうか。

昭和48年に東京電力で伊豆の矢筈山で地熱探査をすることとなった。目標は約800年前に生成した矢筈山の石英安山岩の熱源冷却モデル(鮫島 1967)である。受託調査で現地に行ってみると 熱微候も変質もなく水質も全くの純水であった。しかも北東1kmの標高にして約500m低い場所に伊東市の上水道の井戸が稼働している。この場所は天城火山の山麓に位置しているので 山体中を流下する冷地下水が 深部に及んでいることを示すものである。そのために矢筈山の熱源は 完全にマスクされているだろうと結論したにもかかわらず ドームそのものはよかろうと ドームわきに77mの井戸を掘ってわずか12.5°Cの温度を得た。

屋のモデルから物理探査・試錐と進む態度が不足していたと思う。理論がなくては実証もないのに ことさら作業仮説を好まぬ風潮 これは 要注意であろう。想定される帯水層はいくつもないのだから 一つ一つの仮説を検証するという方向でない 地熱水理地質学も発展性がない。

昭和32年夏からの松川の調査も本来の仕事は地質であった。松川には 新期の火山岩しか分布していなかった。昭和33年の調査は松川よりもその周辺地域つまり7 km 南西の葛根田 5 km 北の北の又川であった。そして水平延長15kmに及ぶ断面図を画いたのである。米をかついで自炊した当時の葛根田は まましが多く閉口したものである。しかし それは単なる地質図で Grindley (1965) のワイラケイの断面などに較べると基本的な欠陥がある。つまり 帯水層の考察がないことである。事実経過を述べると この時 玉川溶結凝灰岩は凝灰質の部分もあるから 帯水層になり得 山津田層は頁岩だから不透水層の役割を果すであろう。そこで山津田層を買いた その下の部分に地熱があるだろうということであった。160m 深の松川安山岩とその下の玉川溶結凝灰岩との境界の状態は たしかに玉川溶結凝灰岩が貯留層となっていたのである。だから MR 1号井の成功の時 山津田層が貯留層とはにわかに信じがたいものがあった。依然として縦方向の構造線の考えが強かった。生産井がふえてくるにつ

昭和50年にサンシャイン計画の熱構造調査法の研究で再び同じような問題が起った。熱流量調査用開発された空気式掘削機を八幡平地域で実験し同時に同地域の熱構造も明らかにしようとした。孔数は80m 121孔 500m 4孔という大がかりなものであった。ところが掘削地点の大部分が第四紀火山の山頂や山腹に配置されているので浅層地下水による冷却で熱流量をキャッチすることの困難性を主張したがアクセス優先で変更されなかった。結局温度勾配はゼロ時にはマイナスという例が多くプラスのほとんどは既存熱微候地で掘らなくてもわかる所ばかりであった。その後イタリーのレポートを読んでいたらこのような地質条件の場合は第四紀火山岩の部分は掘進長に計算しないでその基底からの長さを有効掘進長と認めていた(Cataldi et al 1973)。またルーズベルト(Ward et al 1981)やロングバレー(Lachenbruch and Sorey 1976)でもこの問題には神経質なくらい注意を払っている。考えてみれば日本でこのような単純なことが教科書レベルにまで普及していないのは地質屋の責任ともいえるのであり地熱水理地質学者の一段の努力を要請したい。

8. 地熱地域における表層変動

昭和30年の玉川温泉調査に先だって文献調査してみると玉川の凹地を火口とする説と地すべりとする説とが対立していた。このため凹地内の小丘である東森についても中央火口丘説と地すべり地塊説とに意見が分かれるのである。現地で見ると凹地は基本的には地すべりによって生成したことをうかがわせた。問題の東森はその上に平にのっている溶岩が東の火口壁に露出する笹の台溶岩と同じものでしかも東へ逆傾斜しており地すべりによる回転運動を物語っている。結局地質図に多くの地すべりを記入したが地すべりに関する地質用語が整備されていなかったこともあってその表現については上司から何回も修正を求められた。

その後松川の調査をすることとなるがここでも松川地熱地帯の北側の丸森が溶岩円頂丘かどうかの問題があった。この山は地形的に溶岩円頂丘というには平べったすぎるしまた現地調査の結果でもどこも巨大な岩塊ばかりでしかも岩塊のすき間が中空でいかにも生々しい崖錐という感じである。その上には大木が生い茂っておりきちんとした露頭には中々お眼にかからなかった。当時原稿の状態にあった八幡平図幅(河野・上村 1964)では溶岩となっているから露頭をやっきに

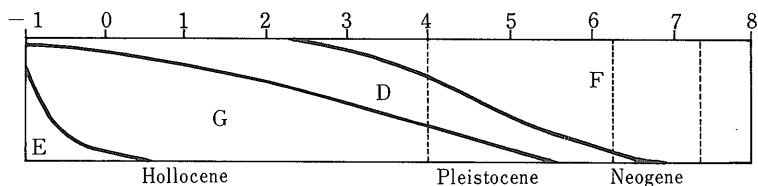
なって探した。山頂の南端の崖つぶちに露頭としか考えられないような巨大岩塊があったのでこれを丸森の岩石としてサンプリングした。しかしこれを検鏡するとかんらん石を含む塩基性安山岩で外輪山溶岩と同岩質であることまたそのような塩基性岩は粘性係数から考えても溶岩円頂丘を作る岩石にしては無理があった。

昭和43年9月の清水の学会で松川の地下構造の講演をしたところ久野久先生が立って「そのカルデラを岩手山の頂上から眺めると巨大地すべりのように見える。そのつもりで検討したら」と述べられた。私は「植生が密で」と上記の体験を申し上げたところ「冬にスキーで行きなさい」というお言葉にスキーの出来ない私は恐縮した。

昭和46年11月に三菱金属(株)の大沼地熱開発技術検討会で同社の与良三男さんが東大の地理の大学院生に航空写真判読してもらったら大沼地域は3×3kmの巨大地すべりらしいとその結果を示された。それは微地形まで判読したもので説得性のあるものでありスケールが松川以上の巨大なものであることに大きなショックを受けた。

この問題はシーズ研究として地熱経常研究の中でとり上げる必要を感じていたので昭和47年度に橋本知昌さんと松川の丸森山頂の調査を行った。その際発見した微地形等については未公表であるがその延長線上の研究として昭和55—56年度に地熱探査技術等検証調査の一環として大沼・松川を含む広域の空中写真判読を行っている。この調査に先だって鈴木隆介さんを招へいして同氏のノウハウを学んだがいわゆる構造地形学の最近の進歩は顕著なものがある。地球表層のphysical geologyを最近では地質屋さんよりも地形屋さんの方がよりよくカバーしているように思われる。昭和55年の9月インドネシアバンドン市を訪れた際にその北にそびえる伝説の火山タンクバンプラフの地質図をみたとき巨大地すべりが多く記入してあるのを見て20年昔の記憶がよみがえった。昭和33年頃コロポプランによるインドネシアの地質図幅調査を行っていた平山健さんの後を引き受ける予定(あとで中止)でVan Bemmelen (1949)のGeology of Indonesiaを勉強していた頃インドネシアの火山には“Volcanotectonics”として多くの巨大地すべりが記入されていておかしな気がしたものである。しかしこれは荒唐無稽のものではなさそうである。昭和52年11月にニュージーランドのHochstein氏が突然地質調査所溝の口庁舎を訪れて我々の研究室で懇談したが

E : 実験地熱鉱床学
 G : 火山性活地熱鉱床学
 D : 非火山性活地熱鉱床学
 F : 化石地熱鉱床学



第3図 地熱鉱床学の対象とする地質年代 (角 1979)

来日の途中インドネシアを訪れて この巨大地すべり問題に非常に興味をもったと話していた。こちらは松川の話をして はからずも意気投合した。この問題は地熱地域のバックグラウンド情報として 今後広範囲な研究が必要と思われる。

9. 地熱地質研究の将来

ハンマーとクリノメーターで地熱に立ち向ってみて 28年 結局地熱変質 第四紀層序 水理地質および表層変動の4つのキーワードができて来た。これらは 三題断ならぬ四題断としてどのようにまとめ得るであろうか。筆者の研究寿命も残り少ないので 若い人をお願いすべき事であろうが 夢としてはやはり 第四紀地質学の一環としてまとまることを希望したい。変質をもたらす化学反応溶液の多様性の最大要因は気液二相分化であり これをコントロールする温度・圧力条件は水理地質 とくに第四紀水位変動に支配される。開放系下における元素移動も勿論水理地質の影響下にある。表層変動は他の三つの解決のための共通的下敷である。

筆者は地熱鉱床学という言葉を作って それと地質時代スケールとの関係を論じたことがある(第3図)。これはそのまま地熱地質学といいかえてもよいのであり 研究者は第四紀地質学者のつもりで一層の努力をされることを期待したい。とくにプレートテクトニクス理論が海洋学や地球電磁気学の立場から端緒がつかまれたように 地熱地質学者は 先行している地熱地球物理学者・地熱地球化学者を共同研究者として持つ幸せを享受していることを強調しておきたい。

10. 終章——地質調査所の研究生活

地質調査所地熱グループでの28年間の研究生活についての体験的告白を長々と述べたが 執筆終えて感ずることは 地質調査所での研究のえもいわれぬ味わいである。プロジェクトの方向に全力疾走している満員電車

の中で ドアの方へ一歩一歩近づこうとするのにも似て 歩みはのろいし 急に反対方向へ押し返されたりすると 突然眼の前に思いもかけぬ美人が現れたりする。その中で多くのことを学ぶ。地質調査所就職の時のはなむけに 山根新次先生が“大学と勝負するには 広く物を見ることの出来る地質調査所の特長を生かすしかない”といわれたが地質調査所の本質は昔も今も変わらないと思う。変わったことは技術の長足の進歩である。技術=工学寄りの研究が益々求められている。工学というと 自ら工学的手法を用いることと感じがいている研究グループを見たことがあるが そうではなく それとの共同作業によって大学の研究とは一味ちがった研究の展開ができると思う。

最後に文中に登場された方々 および原稿を読んでいたいただいた花岡尚之・金原啓司両君に感謝の意を表して筆をおく。

文 献

CATALDI, R. and RENDINA, M. (1973) : Recent discovery of new geothermal field in Italy : Alfina. *Geothermics*, vol. 2, nos. 3-4, p. 106-116.

地質調査所地熱調査班 (1955) : 鹿児島県霧島地熱地帯調査報告。地質調月 vol. 6, p. 579-604.

地質調査所鉱床部 (1958) : 鉱物とX線。地質ニュース no. 41.

地質調査所地熱部 (1978) : 地質調査所における地熱調査研究の概要 (昭和22-52年度)。169p.

COOMBS, D.S., ELLIS, A. J., FYFE, W.S. and TAYLOR, A.M. (1959) : The zeolite facies; with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 17, p.53-107.

FENNER, C.N. (1936) : Bore-hole investigation in Yellowstone Park. *Jour. Geology*, vol. 44, p.225-315.

GRINDLEY, G.W. (1965) : The geology, structure and exploitation of the Wairakei geothermal field, Taupo, New Zealand. *N.Z. Geol. Surv. Bull. (n.s.)*, no.75, 131p.

早川正己 (1963) : 地熱地帯の地球物理学的構造。地学雑 vol. 72 p.16-29.

林 正雄・山崎達雄 (1969) : 九重火山群大岳地熱帯調査1号および2号井の層序と熱水変質。岩鉱 vol.62, p.289-298.

一色直記・小野晃司・平山次郎・太田良平 (1965) : 放射性炭素

- ^{14}C による年代測定. 地質ニュース no.133, p.20-27.
- IWAO, S. (1963) : Further considerations on the rock alteration in Ugusu, an extinct geothermal area. Japan. Jour. Geol. Geogr., vol. 34, nos.2-4, p.81-91.
- HEMLEY, J. J. and Jones, W. R. (1964) : Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism. Econ. Geol., vol. 59, p.538-569.
- 河野義礼・早川正己・佐野俊一・角 清愛 (1957) : 秋田県玉川温泉地質調査および放射能探査報告. 地質調月 vol.10, no.3, p. 7-20.
- 河野義礼・上村不二雄 (1964) : 5万分の1地質図幅「八幡平」および同説明書. 地質調査所.
- 金原啓司・大久保太治・角 清愛・千葉義明・斉藤清次 (1979) : 玉川溶結凝灰岩類の変質(その1) — 岩手県葛根田川および北の又川流域. 岩鉱 vol.74, p.433-442.
- 金原啓司・大久保太治・角 清愛・千葉義明 (1982) : 玉川溶結凝灰岩類の変質(その2) — 岩手県葛根田川上流および秋田県玉川上流地域. 岩鉱 vol.77, no.3.
- 小出 博 (1955) : 日本の地すべり 東洋経済新報社.
- KORZHINSKII, D.S. (1958) : Physicochemical basis of the analysis of the paragenesis of minerals. Consultant Bureau, N.Y., 142p.
- 久野 久 (1954) : ノレルコ X線分光器. 科学 vol.24, no.5, p. 223.
- LACHENBRUCH, A.H. and SOREY, M.L. (1976) : The near-surface hydrothermal regime of Long Valley Caldera. Jour. Geoph. Res., vol.81, no.5, p. 763-768.
- 湊 秀雄 (1965) : Pyrophylliteの生成に伴う鉱物組合せにみられる帯状構造. 鉱物学雑 vol.7, no.4, p.200-208.
- 中村久由・安藤 武 (1954) : 大分県大岳地熱地帯調査報告——特に変質帯と噴気・温泉との関係について——. 地質調月 vol. 5, p.15-22.
- 中村久由・角 清愛 (1961) : 岩手県松川地熱地帯の温泉地質学的研究 地質調月 vol.12, no.2, pp.73-84.
- NAKAMURA, K. (1960; 1961) : stratigraphic studies of the pyroclastics of Ōshima Volcano, Izu, deposited during the last fifteen centuries. Sci. Pap. Coll. General Educ. vol.10, p. 125-145; vol.11, p.281-319.
- 中村一明 (1978) : 火山の話. 岩波新書 岩波書店 228p.
- 鮫島輝彦・岩橋 徹・黒田 直 (1967) : 伊豆半島の地熱開発に関する基礎調査報告書 静岡県 88p.
- SCHOEN, R. and WHITE, D.E. (1965) : Hydrothermal alteration in GS-3 and GS-4 drill holes, Main Terrace, Steamboat, Nevada. Econ. Geology, vol.60, p.1411-1421.
- 関 陽太郎 (1968) : 地熱探査と沸石. 地熱 no.18, p.16-19.
- SEKI, Y., ONUKI, H., OKUMURA, K. and TAKASHIMA, I. (1969) : Zeolite distribution in the Katayama Geothermal area, Onikobe, Japan. Japan. Jour. Geol. Geogr. vol.40, nos.2-4, p. 63-79.
- STEARNS and MACDONALD (1942) : Geology and ground-water resources of Maui, Hawaii.
- STEINER, A. (1953) : Hydrothermal rock alteration at Wairakei, New Zealand, Econ. Geology, vol.48, p.1-13.
- 角 清愛・上村不二雄・小野晃司・一色直記 (1959) : 伊豆大島の地質に関する23の事実. 地質調月 vol.10, no.3, p.167-178.
- 角 清愛 (1968MS) : 地熱地帯の混合層鉱物の研究. 昭和42年度流動研究員研究結果報告書.
- 角 清愛 (1966) : 岩手県松川地熱地帯における岩石の熱水変質. 鉱山地質 vol.16, p.261-271.
- SUMI, K. (1968) : Hydrothermal rock alteration of the Matsukawa geothermal area, Northeast Japan. Geol. Surv., Japan, Rept., no.225, p.1-42.
- 角 清愛 (1971) : 松川地熱地帯の現世堆積物と ^{14}C 年代. 地質調月 vol.22, no.11, p.607-614.
- 角 清愛・高島 勲 (1972) : 秋田県玉川温泉地域の第四系とその ^{14}C 年代. 地質調月. vol.23, p.157-168.
- 角 清愛 (1972) : 熱史の化石としてみた地熱地帯の熱水変質. 地熱 ser. no.34, p.24-39.
- SUMI, K. and MAEDA, K. (1973) : Hydrothermal alteration of main productive formation of the steam for power at Matsukawa, Japan. Proc. Int. Symp. Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, vol.1, p.211-228, Clarke Co.
- 角 清愛・五十嵐昭明・高島 勲・金原啓司・西村 進 (1978) : 日本の地熱地域の熱水変質帯の地質学的研究 その1. 地質調報 no.259, 631p.
- 角 清愛 (1981) : 豊肥地熱地帯涌蓋山周辺の地熱モデルに関する地質学的・地球化学的問題点(演旨). 地質調月 vol.32, no. 5, p.305.
- 角 清愛 (1978) : 日本における地熱探査のあゆみ. 地熱エネルギー no.10, p.43-62.
- 角 清愛 (1979) : 日本の地熱資源評価. 地質ニュース no.295, p.1-9.
- 角 清愛・金原啓司・高島 勲 (1979) : 日本の熱水変質帯分布図 I. 鮮新世後期—完新世. 1 : 2,000,000地質編集図 no.19-1, 地質調査所.
- 角 清愛・金原啓司・高島 勲 (1980) : 日本の鮮新世後期から完新世の熱水変質帯・温泉沈殿物一覧. 地質調査所 84p.
- THOMSON, J.B., Jr. (1955) : The thermodynamic basis for the mineral facies concept. Amer. Jour. Sci. vol. 253, p.65-103.
- VAN BEMMELEN, B.M. (1949) : The geology of Indonesia, vol. IA. Government Printing Office, Hague, 732p.
- WARD, S.H., ROSS, H.P. and NIELSON, D.L. (1981) : Exploration strategy for high temperature hydrothermal systems in Basin and Range Province. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., vol.65, no.1, p.86-102.