

包有物研究の展望

北海道支所 矢島淳吉

1. はじめに

最近 包有物に関する研究は 非常に多くなり Economic Geology 誌などをみても 包有物を扱った論文がほとんど毎号のように見られるようになっている。ソ連邦では 包有物の専門的な研究者が 400 人以上いるといわれており 毎年出版される関係論文はおびただしい数にのぼっている。スペシャリスト以外にも 自分の研究に包有物の分析・測定結果もとり入れ検討を深める といった類の人も含めれば 相当数の人が包有物研究に携わるようになっているといえよう。

このような状況を反映して IAGOD (国際鉱床学連合) に 包有物委員会 (Commission on Ore-Forming Fluids in Inclusions 略称 COFFI) ができたのが 1967 年頃であった。こうして研究者間の国際的な連携も実現し 同委によって Proceeding of COFFI も発行され 今後も包有物に関する各国の文献がそこに集約されることになっている。包有物研究は 150 年にわたる歴史をもちながら 学界の中に一定の座席を与えられるようになったのは つい最近のことなのである。

その 150 年の歴史を簡単にふりかえてみよう。現代科学の曙時代ともいえる 19 世紀初頭に 包有物研究の嚆矢として名を留めているのは Sir H. DAVY と Sir D. BREWSTER の 2 人である。DAVY はかの有名なウエルナー・ハットンの論争にハットンを支持し 水晶の中にたたえられている液体を眺めながら そこにハットン説に有利な証拠があるのでは と想いをめぐらし その液

体を分析しようと試みた。一方 BREWSTER は 1823 年から 40 年ほどの間に 10 編ほどの包有物に関する研究を発表し その中で 天然・合成の鉱物数 10 種について詳細な包有物の記載を行ない 名実ともに 包有物研究の創始者といえる業績を残している。

この BREWSTER の仕事を受継ぎ 包有物研究に学問的な生命を吹込んだのが H. C. SORBY であった。偏光顕微鏡を岩石薄片に適用することを考え出し 顕微鏡岩石学の開祖ともなった彼は 同時にその顕微鏡を駆使して 包有物に関する多くの記載と考察を発表した。そこで彼は 液体包有物を加熱し その気泡の消失温度から 鉱物の生成温度を推定する方法 つまり 包有物を地質学的温度計として利用することを考えつき ここに BREWSTER によって開拓された含有物研究は SORBY によってその学問的基礎を築かれたといえよう。

彼の包有物に関する研究は その顕微鏡岩石学とともに ZIRKEL, ROSENBUSCH, VOGELSANG らに継承され 19 世紀末から 20 世紀初頭にかけての岩石学の開花となる。これら顕微鏡岩石学の巨匠たちが 包有物に関する記載を多く残しているのは故なしとしない。

20 世紀の前半は 包有物研究が 岩石・鉱物・鉱床学の各分野に導入されていき 包有物研究の開花期ともいえる時期である。20 世紀に入ると KÖNIGSBERGER, BURGER, NEWHOUSE などの地質学的な試料に基づいた仕事が見われ 単に地質学的温度計としてばかりでなく 鉱化母液の性質やその組成変化の追求も始められた。また 1940 年代から 50 年代にかけては 世界各国に専門的な研究者が輩出し 包有物をめぐる議論が賑やかに巻き起こされた。なかでもトロント大学の SMITH, SCOTT らによって始められたデクレピテーション法は大いに学界の議論をよび その議論の結果はともかく 多くの研究者の関心を包有物に集めることとなった。

現在の COFFI の指導者たち すなわち 委員長 ERMAKOV (ソ連) 副委員長 ROEDDER (アメリカ) 書記 DEICHA (フランス) など 包有物のスペシャリストが彼らの研究を開始したのも 1940 年から 1950 年にかけてであり この時期から現在にかけて 包有物研究は 岩石・鉱物・鉱床学などから地球化学にわたる領域に一研究分野を確立したといえよう。そしてこの間の多彩な研究



写真① 左から フアラデー ハックスレー ホイートストーン ブルー
スター チンダル (ダンネマン: 大自然科学史 vol. 7)

内容の発展からみて 前述の例に従えば 1950年以降を包有物研究の発展期とよぶことができよう。

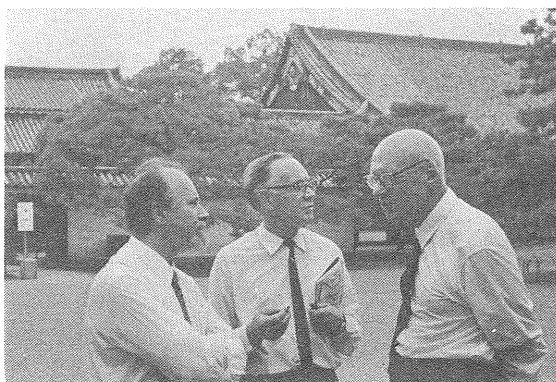
それでは 包有物研究が このように多くの人の関心を集めてきた要因は何だろうか。

包有物は それを含む鉱物が生成するときに その鉱物を沈殿させた母液やメルトが 鉱物内部にとりこまれて現在にまで残存しているものである。母液の大部分は揮発性成分として地表に逸散してしまったのであろうが その貴重なひとしずくが ここに保存されているのである。このことが 岩石・鉱物・鉱床の成因を追求している人々に これまでの知識にない新たな資料を得られる重要な手がかりとして 関心を引きおこしたのだといえよう。

研究者の増えてきたもう一つの背景には 包有物が非常に普遍的に存在するという事実がある。すなわち地質時代や成因を問わず また天然・合成であると問わず 量や大きさに多少はあれ 包有物を含まない鉱物はまずほとんどない といっていよい。

これらの事実を支えられて研究の発展があったわけであるが このことの鉱物学的な説明が十分についているわけではない。つまり 鉱物が生成する際に このような内部構造の欠陥が普遍的に存在すること 周囲の媒質がこの構造欠陥にとりこまれるメカニズムなどについて 鉱物学的な知識はまだ十分なものではない。写真3に示す石英は 石灰質団球内部の割目に自生していた結晶である。各面とも平均して成長し 表面は条線も認められないほど平滑で 外形的には理想結晶にも近いものである。しかし その内部には 異常ともいえる構造欠陥をもち 写真の如く体積で数%におよぶと推定される空隙があり これを メタンを主とするガスが満しているものである。

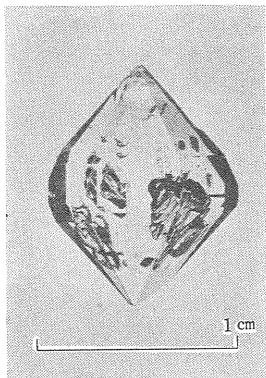
また鉱物中に2次包有物が多産することは これが研



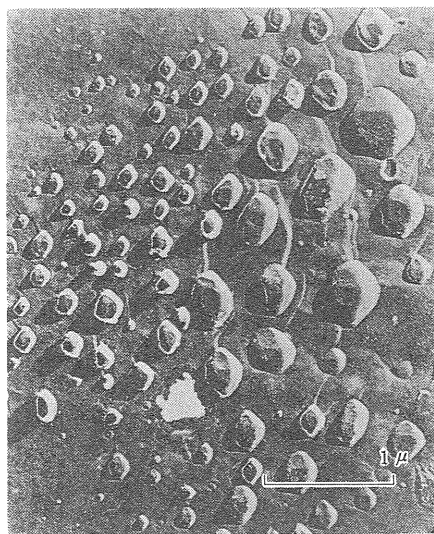
写真② 京都二条城でホルジンスキーと歓談するエルマコフ(中)とデイシャ(左)

究の障害となることが多いだけに 包有物研究者にはよく知られた事実である(写真4参照)。しかし 鉱物が形成された後に 鉱物自身の内的要因や また外的な要因によって 多くの割れ目を生じ これが再び癒着するというような現象についても 鉱物学的な知識はまだ乏しいといわねばならない。

こうして 包有物研究は その基礎的な問題において まだ理論的な不十分さを抱えているのが現状である。しかし 岩石・鉱物が 地質現象のあらゆる過程に伴って産出するものである以上 包有物研究は あらゆる地質現象と関連をもつ幅広い研究課題に 必然的に携わらざるを得ない。ここに 現在の包有物研究の課題の複雑さと困難さとがあり またそれ故に発展の展望もあるということになる。

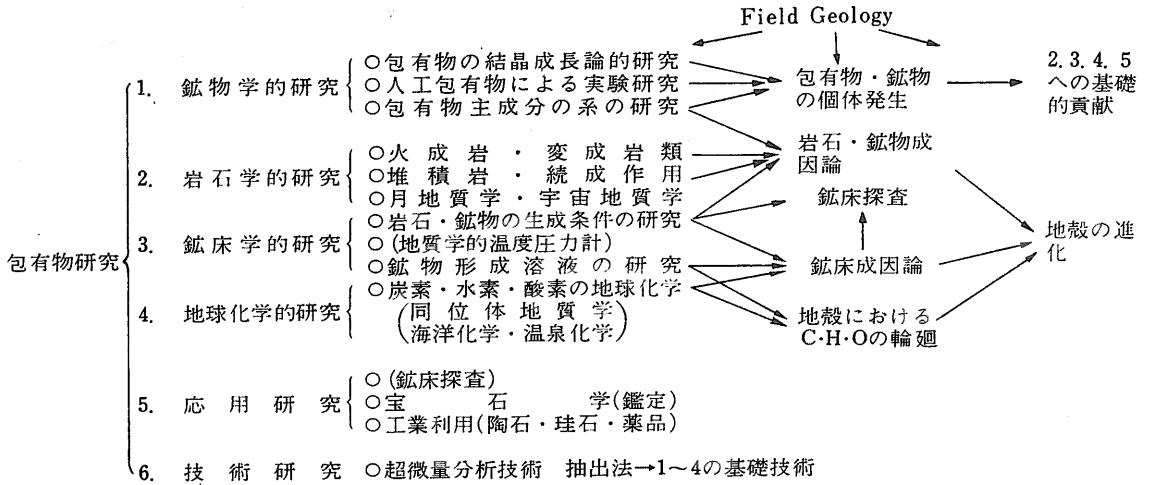


写真③ 石灰質団球中の割目に自生していた石英結晶 内部の黒い模様はすべてメタンを多量に含む気体包有物



写真④ 石英結晶の破面にみられる2次包有物の配列 電子顕微鏡写真 (SELLA ET DEICHA, 1963)

第1表 包有物研究の領域とその関連性



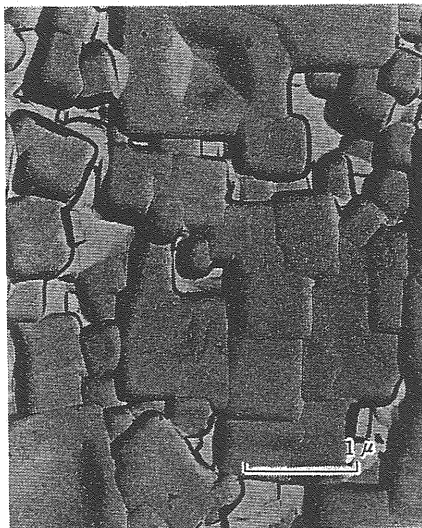
2. 包有物研究の関連領域

これまでの研究成果をもとに これに今後考えられる発展の展望も含めて 包有物研究のおもな関連領域について 次で紹介してみたい(第1表参照)。

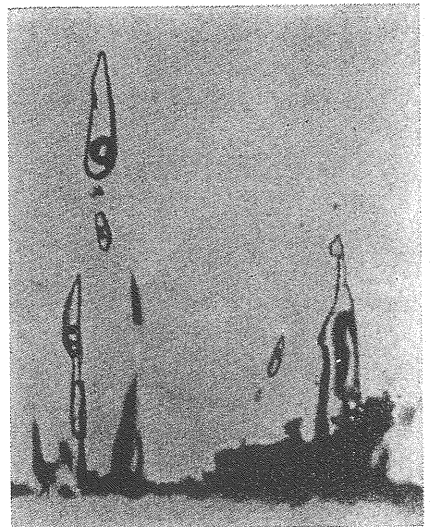
(1) 鉱物学的研究

前述のごとく 包有物研究において最も基礎的で重要な課題は その鉱物学的研究の側面である。すなわち 鉱物の結晶内部に構造欠陥がいかに発生し そこに当該結晶物質以外の物質がいかにしてとりこまれるのかま

た 包有物が鉱物体内に生成したのちに現在までに受ける変化にはどのようなものがあり その結果 初生的な包有物は現在どう変わっているのか これらの問題に正しい解答を与えることが 包有物研究に基礎的な理論を提供するものであることはいうまでもない。この意味での研究は むしろ 結晶物理学・結晶化学の分野における進展が大きく 純粋系におけるものから次第に不純物(母結晶物質以外のものという意味で包有物も含まれる)を伴う場合の結晶成長が議論されてきている。たとえば 渦巻成長の転移点に包有物の付着するメカニ



写真⑤
合成NaCl結晶の成長模様 電子顕微鏡写真
(SELLA ET DEICHA, 1963)



写真⑥
合成石英結晶の核のところから伸びている液体包有物 倍率不明
(YERMAKOV ET AL. 1965)

ズム 結晶成長の速度と拡散速度の差によって樹枝状成長が行なわれるときの包有物の生成機構など 具体的な議論が進んでいる。写真5は NaCl 結晶(合成)の成長模様であるが 立方結晶の成長に伴って包有物の形成される様子がよくうかがえる。

一方 結晶合成実験による包有物の研究も次第にさかんになってきた(写真6)。その目的には上記のごとく結晶成長の際の包有物の生成機構解明と 地質学的温度圧力計としての包有物の役割を裏付けるためのものと2つある。後者の場合は 充填温度法(または均質化法=液体包有物中の気泡の消失温度を測定する)や デクレピテーション法(加熱して包有物の破裂する温度を測定する)が どれだけ真の生成温度を反映しているか 実験的に確認するためのものである。

包有物が生成したのち現在までにこうむる変化 すなわち 母結晶内壁への鉱物沈殿 母結晶との元素の交換 母結晶を通じたイオンの移動 2次的な割目の生成と包有物の洩出による変化 等々の問題は未開の領域に残されている。

これらの他に 包有物研究にとっては 実験岩石学の分野との関連も重要である。H₂O, CO₂ などを含む系の研究や H₂O そのものの性質などについては早くから実験岩石学者によって研究がなされてきたが これらに包有物中の主要な成分を加えた系の実験研究は包有物の分析結果の解析に欠かせないものである。

これらの各研究課題は 何度も述べたごとく以下の各関連研究分野に基礎的な貢献をするものであるが 他方では 鉱物の個体発生という問題に対して重要な資料を提供していくことにもなる。

(2) 岩石学的研究

SORBY の興味がおもに液体包有物に集中していたのに ひきかえ ZIRKEL, ROSENBUSCH らの関心は 岩石学者として当然 火成岩・変成岩 類の造岩鉱物中の包有物にむけられ 従って 彼らの記載には 結晶またはガラスなどからなる固体包有物が多かった。ZIRKELはガラス包有物の観察から これが母結晶生成時の周囲のメルトをとりこんだもの との考えを持っていたし また変成岩類に多くみられる液体二酸化炭素を含む包有物について これが変成作用に伴って生じたものである との判断を示している。彼の残した美しい包有物のスケッチは 今日でもなお岩石学の教科書に引用されている。

包有物の研究にもとづく岩石学的な議論には 最近では ROEDDERによるカンラン石団塊の成因を論じたものおよび 液体二酸化炭素を含む花崗質メルトを論じた

ものがある。

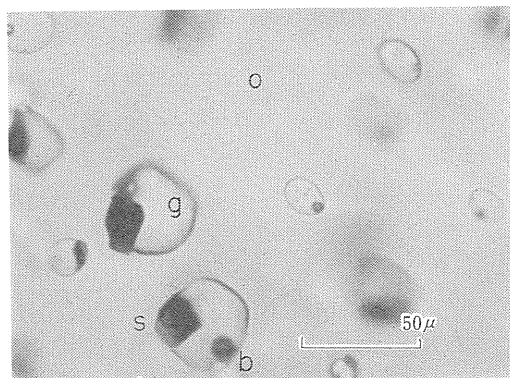
固体包有物については これを取出すことが困難なため あまりつっこんだ検討がされずにきたが 最近では X線マイクロアナライザーやレーザーアナライザーを用いた主成分や微量成分の分析が行なわれるようになったり また 高温加熱顕微鏡による均質化実験もなされ マグマメルトの組成とその変化や火成岩類の生成条件について かなり具体的な資料が得られるようになった。しかし それもごく最近のことであり固体包有物に関する資料は未だ非常に少ないのが実情である。

変成岩類についても 液体・気体包有物から CO₂, CH₄ などがかなり一般的に見出されてきているが まだその方面の研究は少ない。

続成作用・堆積作用の過程で生成した鉱物についても包有物を取りあげた研究が始められており 興味あるデータが提供されつつある。

これらの包有物にもとづく新しいデータによる議論とは別に これまでの岩石学的議論の中で 包有物研究の結果によって再検討すべきと思われる問題もある。例えば 古典的分析による H₂O の量と包有物中の H₂O の量の問題 岩石全体の微量元素・同位元素と包有物中のそれとの関係などがあるが 火成岩類においても包有物は無視できぬ量で含まれている以上 これらを区別した議論も必要になる。

その他 岩石学的な関連ある課題を列挙すれば…… 2次包有物の配列から花崗岩・片麻岩地域のテクトニクの解析がなされた例もあり この面では 構造地質学とのかかわりがあるし 火成岩類の2次包有物の分析は岩石が2次的にこうむった 熱水変質作用の解析に意味をもってこよう。また 包有物の存在は当然 岩石物性にも影響を与えるであろうから 岩石力学や地球物理学などにおいても 包有物の検討を必要とする時がくるかもしれない。アポロが持帰った月の岩



写真① カンラン石中のガラス質包有物 o:カンラン石 g:ガラス s:スピネル b:気泡

石は 包有物研究者にも渡され包有物の分析が行なわれている。写真8にカンラン石中の包有物の例を示す。月地質学 宇宙地質学的なものとして ほかに テクタイトや隕石中の包有物に関する研究もある。

これらの諸研究が発展していくことによって 岩石・鉱物成因論や鉱床成因論に新たな頁が加えられていくであろうし 地殻の進化に関するわれわれのイメージもより鮮明なものになっていくだろう。

(3) 鉱床学的研究

包有物研究者の多くは 鉱床学関係者であり そのことは IAGOD の包有物委員会が 正式には 鉱床生成流動体包有物委員会となっていることにも表われている。したがって 包有物研究のおもな目的は 鉱床を生成した流動体の姿や また生成条件などを明らかにすることおよび それによってたつ新たな鉱床成因論によって深部鉱床・潜頭鉱床の探査を目指すこと に向けられている。既存の個々の鉱床については包有物の成分分析や生成温度の測定値もデータが多くなり 鉱化母液の性質や生成条件については かなり具体的な様子が分かってきている。

鉱液の性質については 現在 sulphide complexが主役であるという説と chloride complexを主にする考え方に分かれており 前者は主として硫化物の合成と相平衡の研究結果から また 後者はおもに包有物の分析結果を基礎に唱えられているものである。この議論は簡単に落着くとは思われないが 包有物中の水溶液の分析結果によれば それは主としてアルカリ塩の水溶液からなり そこに鉱床形成に必要な金属類も含み 全S濃度が低くH₂Sもまれにしか存在しない というのが一般的な事実である。

分析結果が増えたとはいえ 包有物の分析にはまだまだ

だ困難が大きい。原子吸光法も普及し 放射化分析という超微量元素分析も可能になってはきたが 包有物の抽出 分離にも問題があり 包有物中の水溶液については 日常的で簡便かつ精確な分析法はまだ確立していないというのが実状である。少なくとも1個1個の液体包有物をとりだして分析する という技術はまだない。ソ連では 鏡下で破碎しながら行なう分析も試みられているが 定性の域を出ていないようである。

その意味では 冷却顕微鏡(写真9)を用いて包有物中の水溶液を凍らせ その氷点降下から塩濃度を測定する方法は NaCl 換算濃度しか出せないという問題はあるにしても 個々の包有物について鏡下で測定できるというすぐれた特長があり 大いに活用されるべき方法であろう。微量化学分析の技術とこの冷却法とがうまく組合わされていけば 包有物の詳細な分析値を得られる新たな道が開かれよう。

生成温度に関していえば 測定例は非常に多くなり 浅～中熱水性鉱床については ほぼその温度領域がはっきりしてきた。そしてこの結果は 硫化物の鉱物共生などから推定される温度ともよく一致をみている。また鉱脈全体にわたる等温曲線から 鉱液の流動方向を推定する試みもなされている。等温曲線 流動方向と富鉱部との関係が理論化されていけば この試みは 今後鉱床探査に新しい一つの方向を示す可能性をもっているだろう。

デクレピテーション法が生成温度の研究にあまり有効

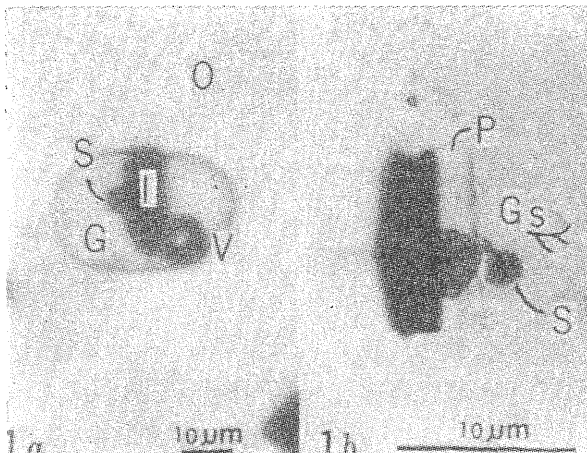


写真8 月のカンラン石中の固体包有物 (ROEDDER, 1970)

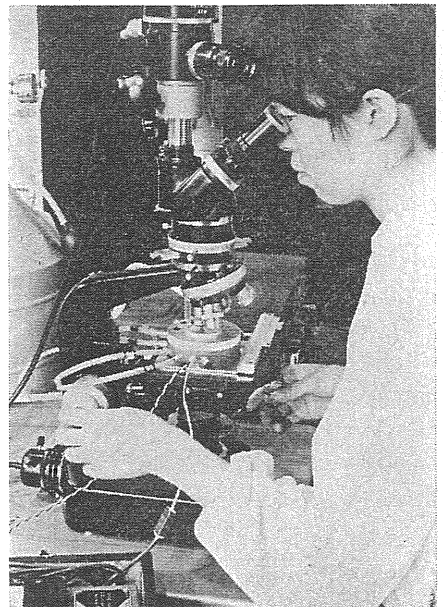


写真9 液体窒素を利用した冷却顕微鏡装置

でないことは多くの研究者の認めるところとなってきたが、そのために現在この方法については生成温度そのものの探求よりも相対的な温度差を知るためにこれを利用し、野外で潜頭鉱床の探査などに役立てる方向が追求されており、ソ連やわが国において一定の成果もみられている。

包有物の組成分析なども含め、これら各種の包有物による探鉱方法を組合わせていくことにより、潜頭鉱床探査の新しい方向がうちたてられる日も遠くはないだろう。

また近年、非常に盛んになってきた酸素、水素、炭素などの同位体に関する地球化学的な研究は、包有物にも適用され、鉱床の成因論に寄与している。たとえば包有物中のO、Hの同位元素の分析により、鉱液の発生段階における初生水の存在と、鉱物の沈殿に至る過程での母岩との相互作用へとつづいていく鉱液の進化が論じられている。

こうして今後、単一の鉱床における変質作用から鉱物の累帯配列に至る鉱液の進化から、さらには一鉱床区における鉱液進化の特徴的性格を明らかにしていくことが可能であろうし、将来さらにこれらの結果があらゆるタイプの鉱床について検討、総括されていくことにより、岩漿水の分化の一断面を浮彫りにしていくことができよう。

(4) 地球化学的研究

鉱化母液に関する研究は、鉱床学的にももちろん重要な問題ではあるが、これはそのまま地球化学的研究でもあり、地殻における水および易揮発性物質の研究の一環でもある。地殻の歴史において、水は岩漿水として成立し、そこにさまざまな元素を溶融してそれを運搬、沈殿させたり、地表付近で天水と混和してその質を変えたり、ついには温泉や火山ガスとして気圏、水圏に参加するに至る長い複雑な過程をたどる。これらの各段階で生成される鉱物は、その生成に関与して水を包有物として保存している訳であるから、この水の性質を明らかにすることは、水の地球化学に貴重な資料をもたらすのである。

水の地球化学に関しては、現在同位体地質学からの発言が精力的に行なわれており、興味ある研究が次々に発表されている。それはO、Hなどの元素とその同位体比などから地殻の歴史における水の変遷の姿を探りつつあるが、包有物もそこに一部の役割をになっている。海水の起源とその変遷、紅海底における濃厚塩水の存在や温泉、火山ガスなどの問題にも包有物研究は欠かせない側面として発展していくであろう。その意

味で、海洋化学、海洋地質学、温泉化学などの分野も包有物を介して関連領域を形成していく日はそう遠くないだろう。また包有物中にしばしば高濃度で含まれる無水炭酸や、いくつかの報告のある CH_4 や有機物の存在からみて、炭素の地球化学についても同じような事情が予想される。

包有物研究がこのような地球化学的立場から総括され、地殻—生物圏—水圏—気圏における炭素、水素、酸素の輪廻の中に位置づけられていくとき、包有物研究の展望はさらに一段と広いものになるだろう。

(5) 応用研究

包有物研究の応用的側面で最も重要なものは、(潜頭)鉱床探査すなわち資源開発に資することであろうが、これについては(3)で述べたので省略する。

この鉱床探査という大目的をのぞけば、鉱物をわれわれの実際生活に利用していく上で包有物の果たす役割にはマイナスの面が眼につきやすい。

その典型的な例は、いうまでもなく宝石であり、莫大な価値が関与する以上、宝石商や宝石鑑定人の包有物に対する関心には、なみなみならぬものがある。古今の鉱物書を開いてみても、包有物の記載はほんのわずかなものであるのにひきかえ、宝石誌の類には古くから必ず包有物の記載が重要事項の一つとして行なわれている。とくにダイヤモンド、エメラルド、ルビー、サファイアといったような貴石類には、さまざまな結晶質固体包有物や、高密度の液体無水炭酸を含むものが多く、いかなる包有物研究者といえども、宝石商ほどに数多くの美しい包有物を観察している者はいないだろうと思われる。包有物の美しさと液体無水炭酸の示す不思議な変態（膨脹率が水の約50倍で、かつ臨界温度が 31°C であるため、わずかな温度変化で、気体⇄液体の変態をはげしく起こす）に魅せられ、長年の労苦と費用をかけて撮影、編集し、1巻の記録映画をつくった宝石商がフランスにおり、筆者はたまたまこの映画がフランス宝石協会の会合で上映されるのを見たことがあるが、映画そのものの出来もさることながら、エメラルド中のU字管のような空隙の中で液体無水炭酸の起こす特異な変態には目をみはったものである。宝石中の包有物は、一般には内部的な「きず」として忌嫌われるが、他方天然—合成—模造の判定には一つの重要な決め手となる。またまれには、内部空隙の負結晶面の反射光が珍重されることもある。

工業利用の面でも包有物はマイナスの役割をになっていることが多い。



写真⑩
平安神宮における
ROEDDER 夫妻と
DEICHA 教授

陶石 珪石 ガラス工業においては包有物の存在は全くの障害になる。結晶内部の構造欠陥が多く容易にデグレピテートするカオリンは良質な原料として採用されない。ペグマタイト石英が珪石原料として用いられる場合にも同様の事情がある。

化学薬品工業においても 製品中の不純物が包有物中に含まれることが多いため その除去のため 包有物のない結晶をつくることが追求されている。また 凝固に際しては必ず空隙をとまう石灰 セメント 石膏などについても 構造力学的な目的のために 空隙のないものをつくること さらに 空隙を利用した新たな特性の開発などのために多くの人が心を砕いている。

実験結晶学 と結びついたこれらの問題のもつ実用性は 今後 ますます大きくなるだろう。

(6) 技術研究

包有物研究の以上のようなさまざまな分野の発展も近年における分析技術の進歩に負うところが大きい。質量分析器 X線マイクロアナライザー 原子吸光分析装置 レーザーマイクロアナライザー 放射化分析などの発達と普及は 直ちに包有物分析にも及び 次々に新たな成果が生みだされてきた。

これまでのところでは 固体包有物に関しては X線マイクロアナライザーやレーザーアナライザーを用い個々の包有物について 主成分～微量成分の分析方法がほぼ確立された。また 包有物の気相や易揮発性物質については ガスクロマトグラフや質量分析器によって少量の試料で分析が可能となった。

しかし 水溶液中の塩類や金属イオン陰イオンなどの分析については まだ routine な方法が開発されていない。原子吸光法のような精度の高い分析技術がありながら 試料の抽出 分離になお困難がある。また超微

量元素分析技術としての放射化分析も わが国においては まだ一般的な分析手段とはなっていない。

そのため 包有物に適用できる超微量分析技術を 日常的なものとして確立することは なお焦眉の課題である。これは前述の各分野の研究を下から支えるものではあるが この課題そのものを一つの目的として独自に追求しなければ その達成は容易でないだろう。

3. おわりに

包有物は いかにも小さく また捉えがたいことから長い間 多くの研究者の眼をくぐりぬけてきた。しかし ひとたびその眼に捉えられたとき そのひとしずくの水のもつ魅力が研究者をひきつけて離さなくなった。包有物研究は その対象の小ささにもかかわらず 関係する領域は広範なものであることを 以上にみてきた。問題は このような多分野にわたる研究を総合的にすすめていくことのできる研究体制であろう。鉱物学的 岩石学的 鉱床学的……と分けた大分野の各々に その関連領域の研究をまとめて指導できる人を おき そのもとに各テーマ毎に研究者を擁するような研究体制は望むべくもないのだろうか。

400人以上ものスペシャリストのいるソ連では そのような体制ができていのかもしれない。しかし彼らの主要な関心は 鉱床探査にむけられている。DEICHAには そのような組織的体制はないが 常にこれらの各分野に まんべんなく研究がすすめられるよう 弟子を育て また境界領域との共同研究にも心を砕いている。ROEDDERは1人でこれらの各分野にのり出し精力的な活動をしている。わが国でも 包有物に対する関心は とみに高まり 先年まで続いた 液体包有物研究委員会(日本鉱業会)は その後も 連絡組織として存続し COFFI の第2副委員長である今井秀喜教授を長として COFFI の日本支部となっている。

これからの研究体制としては こうした各国における活動が COFFI に統括され そこで総合化が行なわれていく というのが その方向かもしれない。

これら多くの課題の中で 当面の中心課題になっていくのは やはり潜頭鉱床の探査であろう。そのために包有物研究の資料を一層蓄積していくとともに それを総括し そこから新たな探査理論を樹立していくことが最も切実に求められていよう。

しかし これらの各分野は 相互に関連するものであり 総合的にすすめられてこそ 鉱床探査理論にとっても確実な進歩が期待されるものであることを 繰り返して強調したい。