流体包有物 ——その基礎と最近の研究動向——

Fluid inclusions —— Basics and recent studies ——

佐脇 貴幸 (Takayuki SAWAKI)*

Crustal fluids are sometimes trapped in minerals during crystal growth or healing of micro-cracks. The fluids trapped and completely sealed in minerals are called “fluid inclusions”. A fluid inclusion is considered to be a small closed system after trapping, and the conditions of temperature, pressure and chemistry at fluid-trapping can be reproduced in fluid inclusions by various analytical systems. Microthermometry, chemical analyses and observation on occurrence of fluid inclusions are available for exploration of ore deposits, geothermal and petroleum resources, for studies on thermal histories of sedimentary rocks, for elucidation of origins, formation conditions and processes of igneous and metamorphic rocks, for analyses of paleo-stresses and paleo-climates, and consideration on astronomical events.

Keywords: Fluid inclusion, Mineral exploration, Geothermal exploration, Petroleum exploration, Sedimentary rock, Igneous rock, Metamorphic rock, Paleo-stress, Paleo-climate, Meteorite

I. はじめに

流体包有物 (fluid inclusion) とは、鉱物中に捕獲された流体である。いわゆる「水入り水晶」とよばれるものは、この流体包有物の中でも肉眼で認められるくらい大きなものを指し (武内, 1975a), 極めて稀には 10 cm 大のものも存在することがある (秋月, 1993, p. 122)。しかし、通常は数 100 ~ 数 μm 以下の大きさであり、顕微鏡を用いなければ見ることはできない。鉱物中にこのような流体包有物が多数含まれていると、肉眼ではその密集した部分が白っぽく濁った感じに見える (Fig. 1)。ちなみに、Kinnunen (1989) はフィンランド産の石英に含まれている流体包有物の体積比を調べており、熱水性石英で 1.070~1.661 vol.%, 変成岩・火成岩中の石英で 0.03~0.917 vol.% 含まれていると報告している。流体包有物は、ここで例に挙げた石英以外にも長石、カンラン石、輝石、方解石、ザクロ石、硬石膏、燐灰石、ワイラケ沸石、緑柱石、コランダム、ダイヤモンドといった

様々な鉱物に含まれている。特に、緑柱石 (エメラルド)、コランダム (ルビー、サファイア)、ダイヤモンドといった宝石鉱物の場合には、流体包有物が人工物か天然物かという鑑定を行う際のキーポイントとなる (武内, 1975a)。また、赤外線顕微鏡を使い、黄鉄鉱、鉄マンガン重石、砒四面銅鉱、四面銅鉱といった不透明な鉱石鉱物中にも流体包有物が存在することが確認されている (Campbell *et al.*, 1984; Richards and Kerrich, 1993)。

さて、地球科学の分野では、1800 年代初頭に流体包有物の存在が初めて報告されて以来、鉱物・鉱床の形成過程を探るためや、宝石の鑑定のために流体包有物の研究が行なわれてきた (武内, 1975a)。このような流体包有物が持つ情報の有用性が他の研究分野でも認識されるようになり、1970 年代以降、地熱資源調査、石油資源探査、変成岩・火成岩の研究、古応力場解析、古環境解析等の研究にも利用されるようになってきた。

地下に存在する流体は、岩石との反応や沸騰・希釈など

(平成 14 年 8 月 19 日受付, 平成 15 年 1 月 25 日受理)

*産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1, 産総研つくば中央第 7 事業所

*Institute of Geo-Resources and Environment, Geological Survey of Japan, AIST, 1-1, Higashi-1, AIST Tsukuba Central-7, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan E-mail: t-sawaki@aist.go.jp

さまざまな過程を経てきていると考えられるが、その過程を直接的に観測することは困難である。この点で流体包有物は、鉱物に一旦取り込まれた後の宿主鉱物との反応が無視できるものと考えれば、流体が取り込まれたときの状態を保った小さな閉鎖系と見なすことができる。従って、他の手段では直接的に窺い知ることが困難な、地下深部における流体の温度・化学組成、ひいては流体の起源・履歴を推定できる。このように、流体包有物は小さいながらも流体に関する情報を詰め込んだものであり、武内 (1975a) は中谷宇吉郎の言葉になぞらえ、流体包有物を「地殻から送られた電報」と呼んだ。しかしながら、我が国の岩石学研究においては、鉱物の共生関係・化学組成・化学反応といった点に関して詳細な検討が行われてきているが、それらと深い関わりがあると思われる流体包有物に関しては余り重要視されてこなかったように感じられる。小論においては、岩石学をはじめとする様々な地質学の分野の研究者の方が流体包有物に関心を持っていただけるよう、流体包有物を研究する上での基礎的な事柄と最近の研究例について解説したいと思う。なお、武内 (1975a; 1975b; 1975c; 1975d; 1976), Roedder (1984), Shepherd *et al.* (1985), Bodnar *et al.* (1985), 笹田 (1988; 1989a), Goldstein and Reynolds (1994) 等の論文・単行本, De Vivo and Frezzotti, eds. (1994), “Lithos” (vol. 55, Issues 1-4, 2001) 等の総括的な論文集にも流体包有物の研究手法及び研究例がまとめられているので、より理解を深めたい場合にはそれらも併せて参照して頂きたい。

II. 流体包有物の分類

1. 成因による分類

流体包有物の成因に基づいた分類としては、初成包有物 (primary inclusion), 二次包有物 (secondary inclusion), 擬二次包有物 (pseudosecondary inclusion), 離溶包有物 (exsolution inclusion) 等がある (武内, 1975a; Roedder, 1984; 笹田, 1988)。

初成包有物は、鉱物が成長している最中にその成長面上に存在していた流体が捕獲されて形成されたものである。例えば、単結晶中の中心部に大きな流体包有物が一つだけ見つかった場合や、結晶の成長面に沿って規則正しく並ぶ流体包有物が見つかった場合には、この初成包有物であると考えられる (Fig. 2)。鉱床学の分野では、鉱石に含まれている初成包有物、あるいは後述する擬二次包有物は鉱液そのものであることから、鉱床の成因と関係付けられて重要な意味を持っている。

二次包有物は、成長し終えた鉱物に、外力や急冷による歪み応力等によって割れ目 (クラック) が入り、そこに流体が侵入した後、クラックが閉塞して (ヒールされて) 形成される (Fig. 2)。例えば、流体包有物の一群が、結晶面とは無関係な、あるいは斜交する一面上に載っているように分布している場合には、上記のようなクラック面がヒールされて形成された二次包有物であると判断できる。Figure 1 の石英結晶の中央部には、結晶を横切るような白濁した構造が見えているが、これがまさに二次包有物の並びを肉眼レベルで見たものである。この形成過程については Roedder (1962) にわかりやすく図示されており、また、Smith and Evans (1984), Brantley *et al.* (1990), 秋月 (1993, p. 114) 等によっても考察されている。特に Smith and Evans (1984) は、人工流体包有物合成実験を通して石英中の二次包有物の形成メカニズムを詳しく考察している。彼らは、クラックの入った石英を 400°C・600°C, 200 MPa の条件下に置き、クラックヒーリングの実験を行った。クラック中に間隙流体の無いドライな状態の場合、数時間～数日程度ではヒーリングはほとんど起きないが、間隙流体が存在する場合は、温度・流体の性状の違いにより程度は異なるものの、ヒーリングが進行するという結果を得ている。この結果に基づいて、彼らはヒーリングの進行に伴うクラックの形態変化を不規則形から円筒形・球形への変化に単純化し、ヒーリング面上で流体が全て球形の流体包有物として隔離された時にヒーリングが完了するというモデルを提出している。このクラックヒーリングモデルでは、ヒーリングの進行はクラックの表面に沿った、あるいは間隙流体中のシリカの拡散で説明され、その進行の程度は温度のほかに流体中のシリカの初期濃度、クラックの大きさに依存するとされている。

擬二次包有物は、結晶成長のある時期に鉱物にクラックが形成され、そのクラックに流体が浸入して捕獲されたものである。この場合には、流体包有物の形成後も結晶成長が続くため、前述の二次包有物とは異なり、クラックのヒール面は鉱物結晶の外側まで連続せず、その端の部分は結晶内で閉じていることになる。このように擬二次包有物は、形態的には二次包有物に似てはいるが、捕獲されている流体はむしろ初成的な流体ということになる。

以上の流体包有物は、鉱物粒間の流体が鉱物内に捕獲されたものであるのに対し、離溶包有物は鉱物中に含まれている水が離溶して形成されたものである。一例としては、カルセドニーやアモルファスシリカが結晶化して石英になる際に放出された流体の一部が結晶中に捕獲されたものが

Fig. 3. Photomicrographs of representative fluid inclusions in quartz.

- a, Two-phase liquid-rich inclusions in the Hiroshima granite, Hiroshima Prefecture.
- b, Secondary vapor-rich inclusions in the Uchiyama granite, Tsushima, Nagasaki Prefecture.
- c, Polyphase inclusions containing halite, existing with vapor-rich inclusions in the Uchiyama granite, Tsushima, Nagasaki Prefecture.
- d, Liquid CO₂-bearing inclusions in the Ishikawa granite, Fukushima Prefecture.

Fig. 1. Quartz containing fluid inclusions. Fluid inclusions are in the milky part crossing the crystal and around its bottom. The crossing plane is a healed crack, and secondary fluid inclusions are on the plane.

挙げられる。Sander and Black (1988) は、これを「擬初成包有物 (pseudoprimaries)」と呼んでいる。この場合には、流体包有物の示す情報 (温度・化学組成) は鉱物粒間の流体を反映しないことになるので、解析に際しては十分な注意が必要となる。

このように、流体包有物はさまざまな成因によって形成されるので、研究を進める上での基礎的事項として、研究

Fig. 2. Schematic occurrences of primary and secondary inclusions in a crystal.

対象としている流体包有物がどのような成因を持つものかを正確に把握しておく必要がある。流体包有物の産状に基づいた分類の指針は Roedder (1984), 笹田 (1988), Van den Kerkhof and Hein (2001) 等に経験的判定基準表としてまとめられている。しかしながら、現実には、結晶中に無数にしかもランダムに流体包有物が含まれている場合のように、分類することが難しい産状を示すことも多く、鑑定にはある程度の熟練を必要とする。

2. 構成相による分類

常温下における流体包有物の構成相に基づいた分類としては、液単相からなる単相包有物 (monophase liquid inclusion), 気液二相からなる液相 (液体) 包有物 (liquid-rich inclusion; Fig. 3a) 及び気相 (気体) 包有物 (vapor-rich inclusion あるいは gaseous inclusion; Fig. 3b, c), 気液二相と固相を含む多相包有物 (polyphase inclusion あるいは multiphase inclusion; Fig. 3c), 含 CO_2 包有物 (CO_2 -bearing inclusion; Fig. 3d), 炭化水素 (石油) を含む流体包有物 (petroleum-bearing inclusion) 等がある (武内, 1975a; Roedder, 1984; 笹田, 1988)。

液相と流体包有物全体との容積比を充填度 (filling degree) と呼ぶ。気相包有物は充填度が 0.1~0.2 程度の蒸気を含む流体包有物のことであり、曲面上の気液境界面で光が全反射するため、透過光での観察では黒く見える場合が多い (Fig. 3b, c)。液相包有物は液体中に気泡が見られるような流体包有物であり、充填度が高いものを指す。一般に、低温で形成されたものほど充填度が高くなり、充填度 1 になったものが単相包有物ということになる。

多相包有物は、気液二相のほかにハライト (NaCl), シルバイト (KCl) 等の塩類や、時には赤鉄鉱、硬石膏、螢石、方解石などの結晶 (固相) が含まれているものである。Van den Kerkhof and Hein (2001) は、公表されている論文から固相として報告されたことのある結晶についての一覧表を示している。なお、固相の成因には二通りあり、もともと結晶を含んでいない高塩濃度流体が流体包有物に捕獲された後、温度低下に伴って溶存成分が晶出した場合と、流体中に浮遊していた固相が偶然流体包有物に捕獲された場合である。前者の場合はもとの流体の溶存成分濃度を示す固相であり、流体包有物中の流体から生成したため娘鉱物 (daughter mineral) と呼ばれる (武内, 1975a)。一方、後者の場合は捕獲鉱物 (accidental mineral) と呼ばれる (笹田, 1988)。

含 CO_2 包有物は、流体包有物中に CO_2 相の存在が確認できる程度に CO_2 に富んだものである。Fig. 3d に示した流体包有物は液体 CO_2 、液相 (水溶液)、気相から成っており、フィルム状に気相を取り巻いているのが液体 CO_2 である。ただし、 CO_2 の臨界点は 31.1°C , 73.0 気圧であるため、夏季のように室温が高い状態では既に CO_2 の臨界点を越えていることになる (Fig. 4)。この状態の流体包有物は超臨界状態の CO_2 相と液相から成る二相包有物、あるいは CO_2 の単相包有物となり、通常の液相包有物と区別がつか

Fig. 4. Phase relations of the system CO_2 - H_2O reproduced from Sasada (1988). The basic data are from Takenouchi and Kennedy (1965) and Bozzo *et al.* (1975).

なくなる (武内, 1975a; 1975c)。そのような場合には、何らかの方法で試料を冷却すれば超臨界状態の CO_2 相が気相と液相とに分離する。手軽な方法としては、アセトンやエタノールなどの有機溶媒を試料にかけると気化熱によって試料が冷やされ、顕微鏡下で観察していると、それまで一相だった CO_2 相が気相と液相とに分離するのが見られる。

なお、マグマの一部を捕獲したものはメルト (ガラス) 包有物 (melt inclusion あるいは glass inclusion) と呼ばれ、常温では気泡とガラスもしくは少量の鉱物から成る。このガラスと気泡は、マグマとその中の揮発性成分そのものを捕らえたものであり、鉱物の晶出時のマグマの性状を探るために研究されてきている (例えば Lowenstern, 1994)。しばしば火山岩中の石英、斜長石、カンラン石等の斑晶鉱物やマントルゼノリス中の鉱物等に含まれているが、まれにペグマタイト石英にも含まれることがある (例えば Thomas *et al.*, 2000)。顕微鏡下では通常の流体包有物とよく似た形態を持っているが、メルト包有物の場合は、例えば気泡が固体 (ガラス) によって押されるためにその形態が丸ではなく歪みが見られる、一つの包有物に複数個の気泡が含まれている、ガラス部に微細な鉱物が含まれている、石英の斑晶中では高温型石英の負結晶の形態を持つ等の産状を示す。火山岩中の流体包有物を研究する際には以上のような点に特に注意し、両者を識別して取り扱う必要がある。広い意味では、メルト包有物も流体包有物の一種と見なすことができるが、本論では通常の流体包有物に絞って記述する。

3. 産出例

流体包有物に関する論文は毎年多数報告されているが、中でも石英中の流体包有物に関するものが圧倒的に多い。これは、石英には、自然界での普遍的な産出、透明でかつ比較的堅いといった取り扱い易さ、流体包有物の多さといった利点があるためだと思われる。また、Van den Kerkhof and Hein (2001) は、石英には劈開がなく、かつ

再結晶し易いといった特性があるために流体を保持しやすいという特長がある、と述べている。とはいえ、冒頭に記したように、流体包有物は石英以外にも長石、カンラン石、輝石、方解石、ザクロ石、硬石膏、燐灰石、ワイラケ沸石、緑柱石など様々な鉱物に含まれている。逆に言えば、そのような鉱物の集合体である天然の岩石には、どのような岩石であってもまず間違いなく流体包有物が含まれているといつてよく、対象とする岩石によっては、石英以外の流体包有物が中心に扱われることもある。

一般的な岩石、例えば花崗岩・変成岩・堆積岩や地熱地帯の熱水性鉱物脈等に最も普遍的に見出されるのは、気液二相からなる液相包有物である。このような液相包有物では、液相部分は溶存成分が希薄な水溶液から、また気相部分はほとんど水蒸気からなる。一方、高塩濃度の多相包有物は、岩塩ドームや蒸発岩といった塩化物や硫酸塩が流体包有物のホスト鉱物となっている岩石、浅所貫入岩体（例えば滝谷花崗岩：関根・土屋，2000）、それに伴う熱水系（例えば葛根田地熱系の深部貯留層：佐々木ら，1995；小松ら，1998）、斑岩銅鉱床（例えば Bodnar，1995）などに見いだされる。含 CO_2 包有物あるいは CH_4 、 N_2 、 H_2S といったガス成分に富む流体包有物は、上部角閃岩相～グラニュライト相程度の高度変成岩（例えば Santosh，1992）、深所貫入岩体（例えば Konnerup-Madsen，1979）、一部の金鉱床（例えば Prokof'yev *et al.*，1991）、シュードタキライト（例えば Boullier *et al.*，2001）、マントル由来のゼノリス（例えば Andersen and Neumann，2001）、ダイアモンド（例えば Bratus' *et al.*，1992）等から報告されている。また、Roedder and Coombs (1967) は、アセンション (Ascension) 島の花崗岩ブロックの石英中に気相-液相-ガラスからなる初成包有物を見いだしているが、これはマグマ-鉱物-流体が共存している状態下で三者が鉱物中に捕獲された珍しい例である。炭化水素を含む流体包有物は、熱水中に油滴が運ばれてきたものが包有されたものであり、特に油田地帯の堆積岩類やそれを切る熱水性鉱物脈中にしばしば認められる (Munz，2001)。

さて、ある温度・圧力下で非沸騰状態の均質な流体から流体包有物が形成された場合には、流体包有物自体の大小の差はあっても充填度はどれもほぼ等しいものになる。ただし、流体包有物の形状が複雑で容積に対する表面積（ホスト鉱物との境界面の面積）が大きい場合には表面エネルギーが大きくなるため、それを減少させるように形態が変化することがある。例えば、管上の細長い流体包有物が、より小さく球形に近い形態の複数の流体包有物へと分裂していくような場合である。これをネッキングダウン (necking down) という。流体包有物の形成温度・圧力と異なる条件下でネッキングダウンが起きた場合には、本来均質であったはずの流体包有物が密度・組成の異なる複数個の流体包有物に分割されることになる (笹田，1988)。

一方、気液二相からなる沸騰流体から流体包有物が形成される場合には、それらの気液比は気相 100%～液相 100%

のものまで変化に富むはずである。従って、液相包有物と気相包有物とがある一群内に共存している場合、あるいは非常に気液比（充填度）の変化に富んだ流体包有物の一群が認められた場合には沸騰流体を捕獲したものと見なすことができる。また、前述の浅所貫入岩体・斑岩銅鉱床に見られる高塩濃度流体包有物は、マグマから分離した、初成的に塩濃度が高い流体が沸騰を起こした例であろう。ただし、前述のように、非沸騰流体を捕獲した液相包有物がネッキングダウンを起こした場合にも同様の産状を示すことがあるので、沸騰の認定には充分注意しなければならない (笹田，1988)。

なお、Loucks (2000) は、新しい考え方として、沸騰流体を捕獲して流体包有物が形成される場合、その捕獲する鉱物の種類によって流体包有物の均質化温度パターンに差が生ずることを述べている。例えば石英の晶出は発熱反応であるが、このために流体包有物が形成される際には本来なかった気泡が石英表面で生じ、結果として気液比の異なる一群の流体包有物ができる。一方、方解石や硬石膏の場合には吸熱反応であるためにそのようなことは起こらないとする考えであり、Sasada *et al.* (1986) の均質化温度パターンがこの考えで説明できるとしている。沸騰の認定にはこのことも考慮に入れる必要があろう。

III. 流体包有物の温度測定・組成分析手法

流体包有物の温度測定・組成分析手法と関係する機器の概要は、武内・一国 (1982)、Roedder (1984)、笹田 (1988; 1989a)、Boiron and Dubessy (1994)、佐脇 (1994)、山田 (1999) 等にまとめられているが、本論では代表的なものについて簡潔に紹介する。

1. 温度の測定 (マイクロサーモメトリー)

流体包有物の温度測定手法のことをマイクロサーモメトリー (microthermometry)、温度を測定する機器を加熱冷却台 (heating/freezing stage) と呼ぶ。代表的な加熱冷却台には USGS 型ガスフロー式加熱冷却台、リンクアム加熱冷却台 (<http://www.linkam.co.uk/>)、Chaixmeca 加熱冷却台や、メルト包有物の温度測定に使用される Leitz 1350 という高温用加熱台等がある。これらの装置の仕様は Roedder (1984)、笹田 (1988) 等に図解されている。また、Heinrich *et al.* (1994) は、USGS 型、Linkam THM600、Linkam THMSG600、Chaixmeca 加熱冷却台の性能比較を行なっているので、導入を検討する場合は有用である。

温度測定には両面研磨を施した試料片を使用するが、その厚さは流体包有物の大きさよりも充分大きい必要がある。筆者の場合は、通常 0.1～0.3 mm 程度の厚さのものを作成しているが、流体包有物の大きさ・見やすさに応じて、厚さは適宜変える必要がある。壊れやすい試料についての試料作成方法については、McNeil and Morris (1992) が参考となろう。

以下には、最も簡単な気液二相の液相包有物を扱った場合を中心にして温度測定法を略記する。

Fig. 5. Phase relations of the system NaCl-H₂O reproduced from Crawford (1981) based on Linke (1965) and Potter *et al.* (1978). The eutectic composition and temperature are after Bodnar and Vityk (1994).

(1) 氷点測定

気液二相の液相包有物を含む試料を冷却用装置にセットし、液体窒素等の冷媒で急冷する。これにより流体包有物の液相部分を凍結させる。次いで、顕微鏡で観察しながら試料をゆっくりと加熱すると徐々に氷が融解していき、

ついにはある温度で氷が消滅する。この温度が氷点 (final melting point of ice: T_m) である。もし、流体包有物が純粋な水からなっていれば 0°C (正確には、水の三重点である 0.01°C) で氷が消滅する。しかし、現実の流体包有物には NaCl, KCl 等の塩類, CO₂, H₂S, CH₄, N₂ 等の気体が溶存しているために凝固点降下が起き、氷点は 0°C 以下になる (Hedenquist and Henley, 1985; 笹田, 1989a)。ただし、地熱流体や温泉水といった地殻最上部の流体では、多くの場合 NaCl が流体の溶存成分の主成分となっており、流体包有物でもそれが同様であるとすれば、測定した氷点から NaCl に換算した塩濃度を求めることができる (Bodnar and Vityk, 1994; Fig. 5, Table 1)。正確な溶存成分分析には、イオンクロマトグラフ装置や ICP-質量分析計等の装置を用いる必要があるが、時間的・設備的な制約がある場合には、このような換算塩濃度で代用することが多い。

一方、NaCl の固相を含む多相包有物の場合、その組成が共融点 (23.2wt.%) から包晶点 (26.3wt.%) の間であれば同様の手法で塩濃度が求められるはずである (Fig. 5) が、実際にはハイドロハライト (NaCl·2H₂O) の融解速度が氷の場合に比べて非常に遅く、また 0.1°C 以上でも準安定的に存在してしまうため測定が非常に難しい (Roedder, 1984)。26.3wt.% 以上の塩濃度を持つ多相包有物については、次節で述べる加熱実験 (均質化温度測定) から塩濃度を求める

Table 1. Salinities (wt.% NaCl) estimated from freezing point depressions for fluid inclusions in the presence of vapor bubbles (Bodnar and Vityk, 1994)

Freezing point depression	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0.	0.00	0.18	0.35	0.53	0.71	0.88	1.05	1.23	1.40	1.57
1.	1.74	1.91	2.07	2.24	2.41	2.57	2.74	2.90	3.06	3.23
2.	3.39	3.55	3.71	3.87	4.03	4.18	4.34	4.49	4.65	4.80
3.	4.96	5.11	5.26	5.41	5.56	5.71	5.86	6.01	6.16	6.30
4.	6.45	6.59	6.74	6.88	7.02	7.17	7.31	7.45	7.59	7.73
5.	7.86	8.00	8.14	8.28	8.41	8.55	8.68	8.81	8.95	9.08
6.	9.21	9.34	9.47	9.60	9.73	9.86	9.98	10.11	10.24	10.36
7.	10.49	10.61	10.73	10.86	10.98	11.10	11.22	11.34	11.46	11.58
8.	11.70	11.81	11.93	12.05	12.16	12.28	12.39	12.51	12.62	12.73
9.	12.85	12.96	13.07	13.18	13.29	13.40	13.51	13.62	13.72	13.83
10.	13.94	14.04	14.15	14.25	14.36	14.46	14.57	14.67	14.77	14.87
11.	14.97	15.07	15.17	15.27	15.37	15.47	15.57	15.67	15.76	15.86
12.	15.96	16.05	16.15	16.24	16.34	16.43	16.53	16.62	16.71	16.80
13.	16.89	16.99	17.08	17.17	17.26	17.34	17.43	17.52	17.61	17.70
14.	17.79	17.87	17.96	18.04	18.13	18.22	18.30	18.38	18.47	18.55
15.	18.63	18.72	18.80	18.88	18.96	19.05	19.13	19.21	19.29	19.37
16.	19.45	19.53	19.60	19.68	19.76	19.84	19.92	19.99	20.07	20.15
17.	20.22	20.30	20.37	20.45	20.52	20.60	20.67	20.75	20.82	20.89
18.	20.97	21.04	21.11	21.19	21.26	21.33	21.40	21.47	21.54	21.61
19.	21.68	21.75	21.82	21.89	21.96	22.03	22.10	22.17	22.24	22.31
20.	22.38	22.44	22.51	22.58	22.65	22.71	22.78	22.85	22.91	22.98
21.	23.05	23.11	23.18

Fig. 6. Schematic phase diagram for a two-phase liquid-rich fluid inclusion. A bubble of the inclusion shrinks (a → b) by heating along a boiling point curve (BPC), and disappears at T_h (c), that is, a homogenization temperature. By overheating the inclusion over T_h , its internal pressures increase along an isochore (c → d → e). If a formation pressure (P_f) and the isochore for the inclusion are known, its formation temperature (T_f) is also determined (e).

ことになる。

(2) 均質化温度

試料を加熱装置にセットし、顕微鏡で液相包有物の相変化を観察すると、温度を上げてゆくと徐々に液相が膨張し、一方気相（気泡）が収縮して（Fig. 6の a → b）最終的には液相一相になる（Fig. 6の c）。気相包有物を加熱した場合には、液相部が徐々に蒸発して最終的には気相一相になる。このように液相一相もしくは気相一相になるときの温度を均質化温度（homogenization temperature: T_h ）という。ハライトやシルバイト等の塩類（固相）を含む多相包有物の場合には、温度が上がるにつれて塩類が溶解していき、気相、液相、固相全てが一相となった温度が均質化温度となる。なお、気相と液相が共存している状態で固相が消滅した温度から、多相包有物の塩（例えば NaCl や KCl）濃度を求めることができる（Stern *et al.*, 1988）。また、NaCl-CaCl₂-H₂O系（William-Jones and Samson, 1990）、NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O系（Zhang and Frantz, 1987）、NaCl-MgCl₂-H₂O系（Dubois and Marignac, 1997）、NaCl-CO₂-H₂O系（Schmidt and Bodnar, 2000）、NaCl-CH₄-H₂O系（Lamb *et al.*, 1996）、CO₂-H₂O系（Diamond, 2001）、CO₂-CH₄-H₂O系（Zhang and Frantz, 1992）等の相関係に関する論文が公表されているので、マイクロサーモメトリーの結果をこれらのデータと比較することで、流体の組成・性状を推定することができる。なお、これらの温度解析を行うソフトウェア（FLINCOR, MacFlinCor）がウィスコンシン大学の Brown 博士によって提供されている（Brown, 1989; Brown and Hagemann, 1994）。また、澁江（1997）は H₂O-NaCl 系の流体を扱うためのプログラムを開発している。

流体包有物が非沸騰流体を捕獲して形成された場合には、流体の組成に応じた圧力補正を均質化温度に加えることで流体包有物の形成温度が決定できる。すなわち、Fig. 6 に示されているように、ある温度・圧力条件下（ T_f , P_f ）で形成された流体包有物を実験室で観察している場合、その流体包有物はアイソコア（isochore）及び沸騰曲線（BPC）に沿って e → c → a という過程を経てきているはずである。したがって、この過程を加熱実験によって遡ることで、その流体包有物の形成温度を決定できる。ただし、沸騰曲線やアイソコアは流体の組成によって異なるため、正確に流体包有物の形成温度を決定する場合には、何らかの方法で流体の組成と形成時の圧力（ P_f ）とを決定しておく必要がある。近年、変成岩中の流体包有物に関する研究が盛んになってきているが、これらの研究では、流体包有物のアイソコアと変成鉱物の組み合わせから決定される温度・圧力条件等とを比較検討することで変成作用の温度・圧力履歴を明らかにしている（Touret, 2001）。なお、比較的ガス・溶存成分濃度の低い流体包有物であれば、純水もしくは氷点から見積もった NaCl 換算濃度を使って圧力補正を行うことがよく行われている。さらに、非常に活発な地熱地帯である場合においてはこの圧力補正は必ずしも必要ではなく、均質化温度をそのままその深度における地温と見なすこともできる（田口, 1982; 林ら, 1983）。実際に、地熱開発現場においては、しばしば均質化温度が坑井の温度検層データの一つとして用いられてきている。

一方、沸騰流体を捕獲した流体包有物の場合には、それが沸騰流体の気相側のみあるいは液相側のみを捕獲した流体包有物であれば均質化温度がそのまま流体包有物の形成温度を表わすことになる。しかしながら、一番よく測定に

Table 2. Representative analytical methods for fluid inclusions

	Gas analysis	Solution analysis
Destructive	1. Crushing stage 2. Gas Chromatography (GC) 3. Mass Spectrometry (MS) 4. GC-MS	1. Electron Probe Microanalyzer (EPMA) 2. Ion Chromatography 3. Laser Ablation (LA) method 3.1 LA-ICP-Atomic Emission Spectroscopy (LA-ICP-AES) 3.2 LA-ICP-MS 3.3 Laser Microprobe Noble Gas MS (LMNGMS) 4. Secondary Ion MS (SIMS)
Non-destructive	1. Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Micro-FT-IR) 2. Laser Raman Microspectroscopy (LRM) 3. Ultra-violet (UV) -visible electronic spectroscopy 3.1 Fluorescence Emission Microscopy 3.2 Fluorescence Emission Spectroscopy 3.3 UV-Visible Excitation Fluorescence Spectroscopy	1. EPMA 2. Proton/Particle Induced X-ray Emission (PIXE) 3. Synchrotron X-ray Fluorescence (SXRF) 4. Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

用いられている石英ではそのような流体包有物を見極めることは困難であり、むしろ、沸騰流体から同時期に形成された一群の流体包有物を多数測定して、その最低均質化温度をもって流体包有物の形成温度とすることが実用的である (笹田, 1989a)。

均質化温度の測定を行う場合に注意しておかねばならない点はいくつかあるが、その一つにストレッチング (stretching) の問題がある。Figure 6 で示されているように、流体包有物が均質化した後も温度を上げ続ける (過熱する) と、内圧がアイソコアに沿って急上昇する (c → d → e)。この結果、内圧がホスト鉱物の耐圧を超えた場合には熱破碎 (デクレピテーション: decrepitation) が起きるが、破碎に至らなくても、流体包有物の容積増加を伴う塑性変形を起こす場合がある。これがストレッチングである。一旦ストレッチングが起きてしまうと、加熱実験の前後では均質化温度が異なってしまうことになるため、データの取り扱いに注意しないと誤った結論を導きかねない。この問題については Bodnar and Bethke (1984), Wilkins (1986), Ulrich and Bodnar (1988), 高木ら (2001) などによって研究されてきているが、特に高木ら (2001) は、方解石、硬石膏、石英を用いた実験の結果から、それぞれの鉱物がどの程度の過熱でストレッチングを始めるかについて検証し、ストレッチングの問題の回避方法を述べている。

2. 組成分析法

流体包有物は、通常数 100 μm ～ 数 10 μm 程度の大きさしかなく、極めて小さいものである。従って、このような希薄かつ少量のガス成分・溶存成分を分析する手段としては、感度の高い分析機器が必要となる。武内・一国 (1982), Roedder (1984), Boiron and Dubessy (1994) 等では、流体

包有物の有効な測定手法・装置として、陽子 (粒子) 励起 X 線分光法、レーザーマイクロプローブ、イオンクロマトグラフ、シンクロトロン放射光分光、ラマン分光などを挙げているが、これらの手法は現在、定量分析が実用化されている、あるいはされつつある。また Table 2 には、Boiron and Dubessy (1994), 山田 (1999) を参考にして、代表的な分析手法を挙げておいた。

(1) ガス成分分析法

ガス分析法として最も簡単なものは破碎台である。破碎台は、蝶番式に金属板をつなぎあわせた器具で、上下二枚の金属板の中央部に、顕微鏡観察用の穴が開いている。この中に、浸液に浸しスライドガラスに挟んだ試料を入れ、その一端を締めつけることによって試料を破碎するものである (Roedder, 1984)。この手法により、半定量的ではあるが、流体包有物に含まれているガス、特に CO_2 濃度の下限が求められる (Sasada, 1985)。また、 CO_2 はアルカリ性溶液 (例えば BaCl_2) によく吸収されるので、このような溶液中で試料を破碎した時の挙動から、流体包有物の気泡の主成分が CO_2 かどうかを判断することができる (Roedder, 1984)。

ガス成分の定量分析装置として比較的普及しているのは、ガスクロマトグラフ装置や質量分析計であろう。これらでは、ボールミルのような粉碎装置を用いて流体包有物を破壊したり、流体包有物を含む試料を加熱し、流体包有物自体を熱破碎させたりして流体包有物からガス成分を抽出して分析する。ガスクロマトグラフ装置による分析例としては Thomas and Spooner (1994) が、また質量分析計による分析例としては, Sasada *et al.* (1992), Williams (1996) 等がある。

非破壊分析法である分光分析装置も流体包有物のガス分析装置として利用されるようになってきた。ラマン分光法によるガス分析は、1980年代後半以降、顕微ラマン分光器が普及したためか、数多くの研究成果が発表されるようになった。その具体的な測定手法についてはBurke (2001)にまとめられている。ガス分析だけではなく、ラマンスペクトルのシフトから流体包有物の塩濃度を測定しようという試みもなされている(例えばMernagh and Wilde, 1989)。一方、炭化水素を多く含む流体包有物のガス分析を行う場合には赤外線分光法が有効である(山田, 1999)。赤外線分光法で最近の主流となっているのは顕微フーリエ変換赤外線分光法であり、分析例としてはWopenka *et al.* (1990)がある。また、ラマン分光法と同様に塩濃度の測定を行おうとする試みもなされている(例えば鍵ら, 2000)。

(2) 溶存成分分析法

溶存分析法としては、イオンクロマトグラフ装置のように流体包有物のバルク組成を測定する手法(例えばDeR Channer and Spooner, 1992)のほかに、X線(電子線)マイクロプローブ(EPMA)、レーザーアブレイション法、二次イオン質量分析計(SIMS)、陽子(粒子)励起X線分光法(PIXE)等の、個々の流体包有物を分析する手法が開発されてきている。

EPMAは広く鉱物の分析に使われてきているが、流体包有物に対して使用した例としては、比較的試料表面に近い部分にある流体包有物だけを選択的に分析する方法(根建ら, 1990)、流体包有物を凍結させ、その凍結面を表面に露出させて分析する方法(Ayora and Fontarnau, 1990)、流体包有物を熱破碎もしくは破断し、液相を蒸発させて晶出してきた溶存成分を分析する方法(佐々木ら, 1995)等がある。レーザーアブレイション法とは、レーザー光を試料に照射し、その一部を蒸発させて質量分析計等の装置に導入して分析を行なうものであり、測定例としてはHeinrich *et al.* (1999)がある。SIMSは、細く絞ったイオンビーム(一次イオン)を試料表面に照射し、そのスパッタ作用に伴って発生する二次イオンを測定して組成分析を行なうものである。この測定例としてはDiamond *et al.* (1990)がある。PIXEは、高エネルギーの陽子や α 粒子を固体に照射した時に放出される特性X線を測定して組成分析を行うものである。例としては石山ら(1997)がある。

IV. 流体包有物の研究例

1. 鉱床探査

鉱床探査の分野においては、鉱石鉱物がどのような温度・化学組成の溶液から形成されたかを決定するために従来から流体包有物が研究されてきており、ある鉱床に関する記載を行う際には、流体包有物の記載が必須と言っても過言ではない。また、Roedder (1977; 1984)は、ミシシッピヴァレー型鉱床、黒鉱鉱床、浅熱水性鉱床、斑岩銅鉱床、スカルン鉱床といった様々なタイプの鉱床に産する流体包有物の産状や鉱床探査への応用例を取りまとめ、流体

包有物が探査指針の一つであることを明示した。Wilkinson (2001)は、さまざまな熱水性鉱床の研究事例を整理し、鉱床探査の手段として流体包有物を効果的に利用するための指針を、(a)ある特定の種類の流体包有物の産状・産出頻度に着目し、注意深く観察すること、(b)マイクロサームメトリーの結果から系統的な変化を見つけだすこと、(c)それ以外の流体包有物の性状、例えばデクレピテーションの仕方や化学組成の系統的な変化を見つけだすこと、の三点に集約している。

(a)の流体包有物の産状が指針となった例を挙げると、Rankin and Alderton (1983)がある。彼らは、イングランドでの鉱床地域の研究から、花崗岩の石英中の流体包有物の存在量と鉱化帯の分布に相関性がある、すなわち鉱化作用が見られるところには流体包有物も多いことを明確にしている。また、斑岩銅鉱床の探査では、高塩濃度の多相包有物と気相包有物の産出を見出すことが探査の指針となっている(例えばRoedder, 1977)。Wilkinson and Johnston (1996)は、アイルランドの金鉱床の石英脈の研究から、金の富鉱部と流体包有物のCO₂の含有量に相関性があることを発見している。その成因に関しては、地震によってフラクチャーが形成されたことにより流体圧が低下して流体の相分離が起き、これに伴って流体に溶解していた金が晶出して富鉱部を形成したと推定している。次に、(b)のマイクロサームメトリーに関しては、従来から均質化温度と鉱床の関連性があることがよく知られており、鉱床の水平方向及び鉛直方向での均質化温度の変化を検討することが、鉱床の中心部及び鉱化作用の及んだ範囲を見つけだすための重要な指針となっていた(Roedder, 1977)。典型的な例としてはHedenquist *et al.* (1998)がある。彼らはフィリピンの斑岩銅鉱床に伴う石英・硫砒銅鉱中の流体包有物のマイクロサームメトリーの結果から、鉱床周縁部の浅熱水性鉱床では均質化温度が200°C以下であるが、中心部に向けて均質化温度が上がっていき、斑岩銅鉱床中心部では300°C以上の温度を示すことを見出している。(c)の例としては、Alderton *et al.* (1992)やHaynes and Kesler (1987)が挙げられている。Alderton *et al.* (1992)は、花崗岩周辺に分布する河川堆積物の石英中の流体包有物をICP法で分析し、鉱化作用を被った地域と被っていない地域では、そのNa, K, Ca, S, Ba, Sr, Rb含有量に相違が見られることを見出している。Haynes and Kesler (1987)は、ミシシッピヴァレー型鉱床の鉱化作用に関する研究を行っている。彼らはドロマイト中に産する流体包有物を熱破碎し、その溶存成分をEPMAを用いて分析した。その結果、そのCa/Na比が鉱化作用が認められる地域のものほど高いことを示している。様々な鉱床ごとに地質環境に支配された特性はあるであろうが、これらの実例が示すように、前記の三指針に沿って流体包有物の解析を行うことは、効率の良い鉱床探査を行うために必要不可欠だと考えられる。

2. 地熱資源探査

地熱資源探査での流体包有物の利用手段としては、坑井

から回収したカッティングスやコアに含まれている鉱物中の流体包有物についての均質化温度測定を行ない、掘削によって冷却される前の地層温度を求めるといった例が挙げられる。流体包有物の均質化温度とは独立して坑井の温度検層データが得られている場合には、両者の温度データを比較することにより、その坑井付近の過去の温度履歴、あるいは今後の温度変化を推定することができることもある。このような指針・方法論については田口 (1982), Hedenquist *et al.* (1992), 村松 (1993) 等にまとめられている。例えば田口 (1982) は、熱水性鉱物脈中の初成包有物及び擬二次包有物はそのホスト鉱物の形成時期の流体の性状を考察するため有用であり、一方二次包有物は熱水性鉱物脈形成後の地熱流体の変遷を明らかにするために有用である、と述べている。

実際の研究例を挙げると、田口ら (1984) では霧島地熱地域産の、佐脇・笹田 (1997) では鬼首地熱地域産の石英・硬石膏・方解石・沸石等に含まれる流体包有物のマイクロサーモメトリーを行っている。その結果から、それぞれの地熱地域内での地温の低下・上昇といった地温の変遷を明らかにしている。Sasada (1989) では、アメリカ合衆国ヴァイエス (Valles) カルデラの坑井から得られた石英・方解石試料を用いて同地域の地熱活動の変遷を明らかにした。Sawaki *et al.* (1997) は、霧島地熱地域の坑井から得られた熱水性鉱物脈の石英・硬石膏中の流体包有物についてのガス分析結果と現在の噴出流体の組成・変質鉱物とを比較し、流体包有物が現在の地熱流体に比べて希釈過程や沸騰過程の影響が少ない、より初源的な組成を持っていることを明らかにしている。また、地熱地帯産の流体包有物はガス濃度が比較的低いため、ラマン分光法によるガスの検出及び濃度の定量は難しいと思われていたが、例えば Maeda *et al.* (2000) では日本の代表的な地熱地域の流体包有物に適用し、そのガス濃度を定量するとともに、沸騰の様子、帽岩下に形成されたガス溜まりの存在等を明らかにしている。さらに、これらの研究を基礎とし、高温の坑井内の温度検層及び流体採取を行なうことを目的とした、坑井内人工流体包有物合成システムの研究も行われた (例えば佐脇ら, 2000)。

3. 石油資源探査

石油資源探査における流体包有物研究の有用性は、例えば小鷹 (1994), 大久保 (1998), 大久保ら (1999) 等の研究例に示されている。この分野では、貯留岩の続成鉱物の鉱物学的研究とその中の流体包有物の分析とを組み合わせ、解析することにより、貯留岩内への油・ガスの移動の有無、集積のタイミング、古地温、古地層水の塩分濃度等を推定するために役立てられている (小鷹, 1994)。山田 (1999) は、前述のように流体包有物の様々な測定法を紹介しているが、特に石油資源探査の面を強調している。また Munz (2001) は、石油資源探査における流体包有物の研究手法を総括し、流体包有物から引き出すべきデータの種類として、組織、化学組成、圧力-体積-温度の関係、流体捕獲時

の圧力-温度条件の四点を挙げ、これらを明らかにするための分析手法について概説している。

実際の研究例を挙げると、大久保 (1998), 大久保ら (1999) は、新潟県に掘削された坑井から回収した試料について研究している。大久保 (1998) では、石英試料中に炭化水素を含む流体包有物を見出し、そのマイクロサーモメトリーの結果から、それらが起源または熟成度の異なる二種類に分類されること、炭化水素の移動経路は開口したフラクチャーであり、また移動が少なくとも二回あったことを示している。大久保ら (1999) では、流体包有物のマイクロサーモメトリー及び蛍光スペクトル分析を行い、これらの手法が流体包有物に含まれる原油比重、有機物の熟成度等の解明に有用であることを示している。

4. 堆積岩の熱履歴

堆積岩の研究分野での流体包有物研究は Goldstein and Reynolds (1994), Goldstein (2001) に総括されている。また笹田 (1989b) は、流体包有物による堆積岩の熱履歴を検討する場合に注意すべき点を挙げている。すなわち、埋没過程上の低温期に流体包有物が形成された場合、その後温度上昇を経験することになるためにストレッチングが起きる可能性がある。したがって、その流体包有物の均質化温度は形成温度ではなく、それが経験した最高温度を反映するものとなる可能性がある、と述べている。

実際の研究例を挙げると、Guilhaumou (1993) は、続成作用によって形成された石英、方解石、ドロマイト等に含まれる流体包有物を分析して、パリ盆地の温度履歴を考察している。それによれば、チョーク層の堆積が一種の保温効果 (blanketing effect) をもたらし、地殻熱流量に変化はなかったものの、過去には現在よりも地温が高くなった時期があったことが示されている。坂口 (1997), Sakaguchi (1999) は、四国四万十帯のメランジュ中に産する石英脈・方解石脈に注目し、その中に産する流体包有物を分析している。その結果、石英脈中には CH_4 に富む流体包有物が、また方解石中にはガス濃度の低い希薄溶液からなる (H_2O に富む) 流体包有物が産することを見だし、それぞれの組成をマイクロサーモメトリーから推定して形成時の温度圧力を算定している。その結果、この岩石中には付加初期には CH_4 に富む流体が存在し、その後の最高被熱時には H_2O に富む流体が循環していたこと、それぞれの時点での地殻熱流量は 53 mW/m^2 , 110 mW/m^2 であり、特に最高被熱時には 200 mW/m^2 に達した部分もあったこと等を明らかにしている。Barker and Goldstein (1990) は、ヴィトリナイト反射率と流体包有物の均質化温度との間に正の相関があることを見だし、堆積岩の辿った熱履歴を明らかにするための手段を提示した。鮎沢・相原 (1993) は北西九州の夾炭堆積岩類についてのヴィトリナイト反射率と流体包有物との関連性を研究し、比較的低温領域でのヴィトリナイト反射率地質温度計を改良している。

5. 火成岩の研究

マグマが貫入、冷却、固結していくのに伴い、マグマが

ら揮発性成分 (流体) が放出される。その流体が、岩石との反応を起こしながら地殻内を循環する過程で特定の成分が濃集すると、火成岩に関連した鉱床が形成されることになる。したがって、Sn, W, Mo 等の鉱床に密接に関連した花崗岩や、斑岩銅鉱床を形成した酸性貫入岩体の流体包有物は、鉱床探査やその成因を探る上で重要視され、詳しく研究されてきた (例えば Takenouchi and Imai, 1975; Bodnar, 1995)。また、葛根田地熱系のような活地熱系では、その地下に固結しつつあるマグマもしくは高温の貫入岩体があり、それらが地熱系の熱源となり、熱水対流系を形作る原動力となっている (例えば小松ら, 1998)。それらの研究をふまえ、マグマの貫入、固結、冷却、それに伴う接触変成作用、熱水系の変遷、流体-岩石反応を考察するために、花崗岩類中の流体包有物について様々な研究が進められてきた。以下には、そのような火成岩 (主として花崗岩) 中の流体包有物の研究例を挙げる。

太古代 (~2665 Ma) に形成されたカナダのタンコ (Tanco) のペグマタイトは Li, Be, Rb, Cs, Sn, Ta 等の元素に富むものである (London, 1986) が、Spooners 博士を中心とするトロント大学のグループは、ガスクロマトグラフ装置、レーザーラマン分光装置、イオンクロマトグラフ装置等の様々な分析手法を開発するとともに、このペグマタイトの流体包有物を詳細に分析している。例えば Thomas and Spooner (1992) は、石英及び緑柱石に含まれている流体包有物についてのガスクロマトグラフ装置によるガス分析の結果から、流体包有物を形成したのは H_2O (95.6mol%), CO_2 (4.3 mol%) を主成分とし、 N_2 , Ar, CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , COS, CH_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_8 などを少量伴うマグマ性流体であると述べている。DeR Channer and Spooner (1994) はガスクロマトグラフ装置とイオンクロマトグラフ装置を直結したシステムを開発し、ガス成分の他に溶存成分 (Cl, Br, Li 等) を含めたバルク分析を行っている。その結果、 CO_2/CH_4 比・ CO_2/N_2 比のデータから、タンコペグマタイトでは流体内での不混和が起きていたと推定している。また、 Br^-/Cl^- 比が地球上の平均的な存在比や火山岩・火山ガスでの存在比に比べ著しく高いが、これも不混和の影響によるものではないかと推定している。London (1996) は、様々な地域のペグマタイトの流体包有物の分析値を整理して、タンコペグマタイトのような Li, Cs, Ta に富むペグマタイトの流体包有物は、基本的には少量の CO_2 , CH_4 とアルカリ金属、アルカリ土類金属の塩化物、ホウ化物、リン化物を含む低塩濃度流体から成るものであり、一方 Nb, Y, F に富むペグマタイトでは、娘鉱物を含むような高塩濃度の流体包有物が認められるという一般則を導き出している。

日本でも花崗岩に関連した鉱床の成因や流体の性状を明らかにすることを目的として流体包有物の研究が進められてきた。例えば Takenouchi and Imai (1975) は、日本各地の鉱床に関連した火成岩中の流体包有物・メルト包有物の特徴をまとめている。このうち流体包有物については、

高塩濃度の多相包有物、液相包有物、気相包有物、 CO_2 に富む流体包有物の四種類が認められること、高塩濃度流体包有物は斑岩や小さな花崗岩体に認められること、流紋岩には高塩濃度流体包有物が認められないこと、高塩濃度流体包有物はしばしば気相包有物と共存すること、といった産状の特徴を挙げている。正路ほか (1979) は、鉱床探査の指針を得ることを目的とし、岡山県成羽川地域の酸性火成岩 (半深成岩・深成岩) を研究している。それらの石英・長石等に含まれる流体包有物の分布と鉱床の位置とを比較することで、多相包有物の存在する火成岩の近くには鉱床が見られるが、気液二相の液相包有物しか存在しない、あるいは流体包有物が欠けている火成岩近くには鉱床が認められないという傾向を見いだしている。Nakashima and Imaoka (1993) は、山陰地方のコールドロンを成す古第三紀の花崗岩類、及び東北地方 (山形県・秋田県) のグリーンタフ地域に分布する新第三紀の花崗岩類の石英中の流体包有物を研究し、いくつかの興味深い事実を明らかにしている。例えば、山形県の日正岩体の周辺では流体が激しく沸騰して多相包有物や気相包有物が形成されたが、標高が上がるにつれ気相包有物が増え、多相包有物が減少する傾向があることを見出している。これは、当時の熱水系が鉛直方向に階層構造を成していたことを示唆している。溶存成分のデータからは、山陰地方の岩体では天水、東北地方の岩体では海水が熱水活動に関与していたこと、東北地方の岩体の流体包有物は相対的に NaCl に富み、一方山陰地方の岩体は NaCl に乏しいものの赤鉄鉱をしばしば含んでいることから、鉄に富んでいる流体が存在していたこと等を明らかにしている。Nambu *et al.* (1997) は、新潟県金丸ペグマタイト鉱山の石英から CO_2 に富む流体包有物を見出し、そのような流体がカリ長石の Al-Si 秩序化に関連していた可能性があるとして述べている。

笹田 (1995)、佐脇ら (1998) は、新期花崗岩体に関連した深部地熱系や花崗岩類に関連した鉱床における流体の性質・挙動を考慮するための基礎データを得ることを目的として、様々な日本産の花崗岩類 (ペグマタイト) 及びそれらに伴う捕獲岩・変成岩等から得られた石英試料の流体包有物の特徴・ガス組成についてまとめている。笹田 (1995) は、沸騰流体を捕獲した流体包有物 (気相包有物-液相包有物あるいは多相包有物の共存) は主に第四紀~新第三紀花崗岩体に認められ、一方 CO_2 に富む流体包有物は白亜紀花崗岩や変成岩類に認められることを見出している。流体包有物の組成を H_2O -NaCl 系で近似して考えると、相図上では低圧側から高圧側に向かって気相 (蒸気)-ハライトの二相共存領域、液相 (塩水)-気相 (蒸気) の二相共存領域、液相 (塩水) 一相のみの領域に分けられる (Fig. 7; Bodnar, 1995)。これを室温下での流体包有物の産状と対比すると、気相包有物-多相包有物の組み合わせは、液相-気相の二相共存領域の流体、すなわち浅所・低圧下で捕獲された沸騰流体に対応し (Fig. 7 の V+L)、一方、 CO_2 に富む流体包有物は、液相-一相の流体、すなわち深所・高圧下で捕獲され

Fig. 7. Estimation for depths of emplacement of granitic rocks by fluid inclusions, modified after Piwinski (1968) and Bodnar (1995). Fluid inclusions trapping boiling fluid (coexistence of liquid and vapor) are formed under the hatched P-T conditions. The maximum pressure is about 120 MPa, and granitic rocks containing such fluid inclusions should be emplaced at shallower depths than about 5 km after Fournier (1987). L, liquid; V, vapor; H, halite; Pg, pegmatite; Gr, granite; Gd, granodiorite; Tn, tonalite.

た非沸騰流体に対応する (Fig. 7 の L)。このことより、流体包有物の産状は一種の地質圧力指標となっていると考えられ、Fournier (1987) の流体圧-深度の関係と合わせて考えると、沸騰流体を持つ花崗岩体の定置深度は約 5 km 以浅であったと推定される。また、花崗岩の形成時期によって産状に差があるのは削剝時間・深度の差に対応しており、古第三紀～白亜紀以前の岩体では削剝が進んで深部まで露出しているのに対し、新第三紀以降の岩体ではまだ岩体上部までしか削剝されていないことによると考えられる。佐脇ら (1998) による流体包有物のガス分析の結果からは、(a) 磁鉄鉱系列とチタン鉄鉱系列の花崗岩試料同士を比較すると、磁鉄鉱系列の試料の方が CH_4/CO_2 比が低くなる傾向があること、(b) 日高帯の花崗岩及び西南日本外帯の S タイプ花崗岩の流体包有物は比較的 N_2 , CH_4 に富むこと等を明らかにしている。(a) に関しては、 $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ という反応を考慮すれば、流体包有物形成時の酸素分圧の差を反映していると考えられる。これは、磁鉄鉱系列の花崗岩がチタン鉄鉱系列の花崗岩より酸素分圧の高い環境下で形成されたと考えられていることと調和的であり、流体包有物にも酸素分圧の影響が反映されていることを示す。(b) に関しては、北部シホテアリン (Sikhote-Alin) 地域の S タイプ花崗岩からも CH_4 に富む流体包有物が報告されている (Berdnikov and Karsakov, 1999) が、これらの花崗岩類が周囲の堆積岩を取り込んだり反応したりしたために堆積岩に含まれていた有機物の分解が起き、

それに伴って N_2 , CH_4 が生成されたのかもしれない (佐脇ら, 準備中)。

なお、地殻上部の火成岩ではないが、マントルゼノリス (Andersen and Neumann, 2001), やダイヤモンド (Navon, 1991; Bratus' *et al.*, 1992) 等の中の流体包有物の研究は、他の方法では確認することがさらに難しい、地殻以深の流体の性状を直接的に明らかにできるものとして重要視されてきている。

6. 変成岩の研究

変成岩中の流体包有物は、他の岩石中の流体包有物とやや異なった特徴を有している。すなわち、一口に変成岩といってもそれらは低温低圧条件から高温高圧条件にわたって非常に広い温度・圧力条件下で形成されるものであり、当然ながらその中に形成される流体包有物も、火成岩や堆積岩中のものよりも幅広い温度・圧力条件下で形成されることになる。また多くの場合、最初に捕獲された時点以降も温度・圧力の変化に応じて様々な変動を経験することになる (Touret, 2001)。一例としては、低温下で形成された流体包有物が変成作用の進行によって高温下におかれた場合がある。この場合、流体包有物の内圧は温度上昇に伴ってアイソコアに沿って上昇することになるため、流体包有物は新たな温度圧力条件に適合するように、ストレッチングやデクレピテーションを起こして生成当時の形態から変形する可能性がある。このように、外部の温度圧力の変化に適合するように流体包有物が変形していく過程を「流体包有物の再平衡 (re-equilibration) 過程」と呼ぶ。この再平衡過程の問題については、例えば Gratier and Jenatton (1984), Bodnar *et al.* (1989), Vityk and Bodnar (1995) 等によって研究されてきているが、特に変成岩中の流体包有物から得られたデータを取り扱う場合には、この点に注意する必要がある。

Touret (2001) は、変成岩の研究を進める上での流体包有物の位置付けを総括し、研究上の指針を述べている。流体包有物から得られるデータは、それと共に産する鉱物から見積もられる温度圧力条件と比較して論じられることになるわけであるが、特に、鉱物と流体包有物との形成時期の時間的關係、すなわち平衡共存していたか、違う形成ステージのものを観察しているのか、といった点が問題となる。そのような問題点を解決するには、基本的なことではあるが、(a) 試料の観察、(b) マイクロサーモメトリーと非破壊測定を組み合わせて、(c) アイソコアと変成鉱物の形成条件の比較に基づいた解釈というステップを確実に辿っていくことが必要不可欠である。Touret (2001) には、上記の指針によって研究が進められた典型例として、Fonarev *et al.* (1998) のコラ (Kola) 半島のグラニュライトの温度-圧力履歴の研究が引用されている。それによれば、変成鉱物の産状から、この地域には M1 ($T=670^\circ\text{C}$, $P=5.1$ kbar), M2 ($T=565^\circ\text{C}$, $P=4.0$ kbar), M3 ($T=500^\circ\text{C}$, $P=3.2$ kbar) という三つの変成作用のステージがあった。この地域に確認された CO_2 -rich, N_2 -rich, CH_4 -rich, CaCl_2 -dominated,

NaCl- dominated, 低塩濃度という六種類の流体包有物のうち、低塩濃度のものは地表付近で形成され変成作用とは直接関係せず、 N_2 -rich, CH_4 -rich, $CaCl_2$ -dominated の三種類は変成作用前に形成されていたものの残存物であり、 CO_2 -rich, NaCl-dominated の二種類だけが変成作用に直接関わった流体である。さらに、この地域に最も普遍的に産する CO_2 -rich 包有物について詳しく解析すると、その形成時期は M1 時及び M2 時であった、といったことを明らかにしている。

この例に代表されるように、角閃岩相、グラニュライト相、エクロジャイト相等の高度変成岩に産する CO_2 , CH_4 , N_2 等の成分に富む流体包有物を取り上げ、そのマイクロサームメトリー、化学分析を通して、温度-圧力-時間的変遷（構造発達史）、変成流体の変化とそれに応じた変成鉱物の生成に関して考察している論文が最近数多く公表されている。例えば、Larsen *et al.* (1998) は、ノルウェーの微小ダイヤモンドを含むグラニュライト中のザクロ石、藍晶石、石英中の流体包有物を研究している。それによれば、微小ダイヤモンドが形成されていたような超高压-高压変成作用時には N_2 - CO_2 からなる流体が変成岩中に存在していた。後退変成作用時には H_2O と N_2 が外部からもたらされ、酸素分圧が変成岩中の石墨に支配されている条件下で H_2O と CO_2 が反応して CH_4 が生成した。これにより、変成岩中の流体は次第に N_2 - CH_4 , N_2 - CH_4 - H_2O からなる流体へと変化していった、と推定している。Newton (1992) や Santosh (1991; 1992) 等は、 CO_2 に富む流体包有物の産出や他の鉱物学的証拠から、チャーノッカイトの成因には CO_2 に富む流体の存在が重要であると考えている。例えば Newton (1992) は、 CO_2 の起源について、変成岩内に残存していた間隙流体、地殻内での CO_2 の対流系、下部地殻での脱 CO_2 反応、石墨と含水鉱物の反応、下部地殻のグラニュライト中の流体包有物、マグマからの放出、マントルなどの可能性を挙げている。一方で、Tojo *et al.* (1994) は H_2O に富む流体包有物の分析を通して、地殻の上昇に伴う断裂系の発達により流体圧が減少したことが、また、Mohan *et al.* (1996) は急激な上昇による等温的な圧力低下がチャーノッカイトの形成につながった可能性を指摘している。さて、これらの高度変成岩に見られる流体包有物は、前述のように CO_2 に富むものが多いが、近年になって塩濃度の高い流体包有物の存在も報告されるようになってきた（例えば Smit and Van Reenen, 1997）。この事実から、Newton *et al.* (1998) は、地殻深部のグラニュライト相条件下で存在する流体は 700-850°C という高温状態で CO_2 とは不混和になっている高塩濃度流体であったと述べ、流体の起源は揮発性成分に富むアルカリ玄武岩マグマではないかと推測している。

低圧変成作用の代表例である接触変成作用についても花崗岩体からの流体の放出、変成作用時に形成された変成流体の性状、花崗岩に関連した鉱床（例えばスカルン）の成因等を明らかにすることを目的とした研究が進められて

いる。例えば Olsen *et al.* (1992) は、チャートノジュール起源の接触変成岩を研究しているが、その中の石英結晶は、中心部にのみ流体包有物を含有するという特異な産状を示す。これは、接触変成作用によって堆積時の石英に含まれていた有機物が熱分解し、再結晶の際に流体包有物として石英に取り込まれた。さらに再結晶が進んで石英が成長し粗粒化すると、粗粒化した石英の成長中心には流体包有物が残存するが、粗粒化のために消費された側の石英からは流体包有物は消去されてしまい、それが流体包有物を含まないリム（成長帯）に当たる部分となっている。なお、流体は結晶粒間を通して系外に排出されていった、という過程を推定している。Wilkinson (1991) は、接触変成作用による泥質岩中の有機物やアンモニウムを含む雲母の分解で H_2O - CO_2 - N_2 (- CH_4) 系の流体が形成されたと述べている。

日本での変成岩中の流体包有物の研究例はあまり多くないが、渡辺・松枝 (1990) は、日高帯のトーナル岩、グラニュライトの石英の流体包有物について記載しており、 CH_4 に富む流体包有物が含まれているのではないかと推測している。一方、 CO_2 に富む流体包有物が日高帯のグラニュライトに認められないことも記載しているが、その原因としては、変成帯の上昇に伴う圧力降下によって CO_2 に富む流体が還元されて CH_4 となった、あるいは S タイプ花崗岩を形成するような酸素分圧下では CH_4 が安定であった、といった可能性を挙げている。森清 (1992) は領家変成岩中の、森清・蟹 (2001) は石墨-電気石花崗岩中の流体包有物を分析し、 H_2O 以外に CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S 等のガスを見いだしている。特に後者では、そのような特異な岩相は、 $CO_2 + CH_4 \rightarrow 2C + 2H_2O$ という反応により石墨が析出して形成されたと推測している。石山ら (1998) は、宮古岩体周辺のスカルンを研究し、変成鉱物、流体包有物、方解石-ドロマイト地質温度計、炭素・酸素同位体比等のデータから、スカルン鉱物形成時の温度・圧力は 500-550°C, 0.7-1 kbar 程度であったこと、流体の組成は相対的に CO_2 に富むものとその後の H_2O に富むものとがあったことなどを推定している。Sawaki *et al.* (2001) は、葛根田地熱系の接触変成岩中にコランダムを見だし、その産状と中に含まれている流体包有物のデータを元に、葛根田花崗岩直上部（最高変成度）での変成条件は 100 MPa, 600-700°C で、変成流体は CO_2 , H_2S , N_2 が含まれている低密度なものであったと推測している。小松ら (1998) 等のデータを考慮すると、葛根田地熱系の接触変成帯内では、接触変成作用のピーク時には CO_2 , H_2S , N_2 を含む比較的低密度の流体が存在しており、その後花崗岩が冷却してくるにつれ高塩濃度のマグマ性流体が流動し、次いで天水が地下まで浸透してくるようになった、という変遷があったと考えられる。

7. 構造地質学

二次包有物で示されるヒールしたクラック面は結晶に加わった外力の向きに応じてできる。すなわち、このク

ラックの方向を詳細に検討することにより、地下に加わった応力の方向（応力場）を解析できることになる。1980年代後半以降、このような二次包有物の並び方から見たマイクロフラクチャーの方向性の測定から過去の応力場を解析しようとする試みがなされてきており、Boullier (1999), Lespinasse (1999) 等には、構造地質学における流体包有物の研究が総括されている。また、このような研究を進める上で手軽に二次包有物の配列を観察するためのスピンドルステージが Anderson and Bodnar (1993) によって考案されている。

実際の研究例を挙げると、竹下・田上 (1997) は日本各地の付加帯砂岩中の石英の変形構造に基づく古応力場を行っているが、キンクバンド・変形ラメラとともにヒールドマイクロクラック、すなわち二次包有物の配列を一つの指針として用いている。よく知られているように、基本的にはこのようなクラックは岩石に対して引っ張りが働いて形成されるものであり、 σ_3 軸に垂直に形成されるのが普通である。従って、定方位薄片を作成して二次包有物の配列を解析することにより過去の応力場が再現できることになるわけである。ただし、竹下ら (1996), 竹下・田上 (1997) は σ_1 軸、 σ_2 軸に垂直な方向にも形成されるとも述べており、これは岩石に応力が加わっている際の温度条件が関与していると推定している。また、笹田 (1991), 工藤・佐野 (1993) は、花崗岩の採石の際に重要な役割を果たしている「石目」がヒールドマイクロクラックに関連していることを指摘している。

8. 古環境解析

流体包有物は、地下深くの流体を捕獲して形成されることが多いが、地表付近であっても、蒸発岩や鍾乳石などのような非珪酸塩からなる岩石・鉱物中に形成されることがある。この場合は、流体包有物には古海水、古河川水、古大気などが含まれることになる。そういう意味では、例えば南極の氷床に含まれる古大気の気泡も一種の流体包有物と見なすこともできるが、そのような観点から古環境を研究した例を挙げる。

山本・Schwarcz (1981) は、氷河時代の気候変動に関する情報を得ることを目的として、鍾乳洞の鍾乳石（スペレオセム）中の流体包有物に捕獲されている古大気の酸素同位体を分析する方法を開発している。Lowenstein *et al.* (1998) は、カリフォルニア州デス・ヴァレーの蒸発岩（岩塩）中の流体包有物を測定し、過去 100,000 年間にわたる温度変化を追跡している。Seal and Rye (1993) は、天水起源の流体が支配的であった米国・アイダホ州の浅熱水性鉱床の蛍石に着目し、その中の流体包有物の酸素・水素同位体組成を測定することで始新世の北米大陸内部の気候を推測しており、その気候は現在と大差なかったと述べている。Zimmermann (2000) は、世界各地の第三紀の蒸発岩に産する初成包有物の分析から当時の海水の化学組成を推定している。de Ronde *et al.* (1997) は、Barberton 緑色岩帯に産する、海底熱水系で形成された太古代 (3.2 Ga) の岩石からその

当時の海水の組成を推定している。

9. インパクトクレーター

Gonzalez-Partida *et al.* (2000) は、メキシコ・ユカタン半島の Chicxulub クレーターに掘削された坑井の試料を用い、硬石膏に含まれている流体包有物のマイクロサーモメトリーを行っている。なお Chicxulub クレーターは、白亜紀-第三紀境界の大絶滅を引き起こしたと言われている天体衝突によって形成されたものである。この試料には気相包有物、液相包有物、娘鉱物を含む多相包有物が確認されている。彼らは、これらの流体包有物のマイクロサーモメトリーの結果やその他の地質学的状況から、クレーター付近では衝突に伴って約 500°C にまで熱せられた角礫岩が飛び散り、海水が急激に沸騰して流体-岩石反応が起き、硬石膏が沈殿した、という過程があったと推測している。

10. 隕石

Warner *et al.* (1983), Zolensky *et al.* (1999) 等によって、地球上だけではなく、隕石中にも流体包有物が存在していることが報告されている。Warner *et al.* (1983) は、石質隕石中のカンラン石や輝石に気液二相の液相包有物とガラスを含む多相包有物が含まれているを報告している。ただしこれらの流体包有物の成因は不明である。Zolensky *et al.* (1999) はコンドライト中のハライトとシルバイト中に液相包有物を見いだしている。それらは NaCl, KCl のほかに Fe, Mg, Ca 等を含んでいる。その成因としては、隕石となる以前の、元の小惑星内を循環していた流体を捕獲したか、彗星のような H₂O を含む天体の衝突により、小惑星表面から内へと流体が供給されて形成された、といったことが可能性として考えられている。これらの研究の最も重要な点は、おそらく太陽系形成初期に存在していたであろう流体が発見されたことである。隕石の研究においては、従来このような流体の存在はあまり重要視されてこなかったと思われるが、流体包有物の研究は、従来の隕石に関する研究をさらに深めるために有用であると考えられる。

V. おわりに

以上、流体包有物の研究がもたらす豊富な地球科学的情報についての概要をまとめたが、今後も新たに様々な微量分析用の機器が開発されてくるのに応じて、流体包有物についての分析手法がさらに革新・改良されていき、より多様な研究が行われることは確実である。ここに紹介した内容が、今後の読者の方々の参考となりまた役立つことを願っている。

謝辞 本論をまとめるに当たり、産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター 笹田政克博士には粗稿を読んで頂き、貴重な御意見を頂いた。また、匿名の査読者の方からも非常に有益な御助言を頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表す。

引用文献

- 鮎沢 潤, 相原安津夫 (1993): 有機変成温度の流体包有物による検証: 有機・無機変成の対応. 九大理研報 (地球惑星), **18**, 65-71.
- 秋月瑞彦 (1993): 山の結晶—水晶の鉱物学—. pp. 162, 裳華房.
- Alderton, D.H.M., Rankin, A.H. and Thompson, M. (1992): Fluid inclusion chemistry as a guide to tin mineralization in the Dartmoor granite, south-west England. *J. Geochem. Explor.*, **46**, 163-185.
- Andersen, T. and Neumann, E.-R. (2001): Fluid inclusions in mantle xenoliths. *Lithos*, **55**, 301-320.
- Anderson, A.J. and Bodnar, R.J. (1993): An adaptation of the spindle stage for geometric analysis of fluid inclusions. *Amer. Mineral.*, **78**, 657-664.
- Ayora, C. and Fontarnau, R. (1990): X-ray micro-analysis of frozen fluid inclusions. *Chem. Geol.*, **89**, 135-148.
- Barker, C.E. and Goldstein, R.H. (1990): Fluid-inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer. *Geology*, **18**, 1003-1006.
- Berdnikov, N.V. and Karsakov, L.P. (1999): Methane-bearing fluid inclusions as evidence of the collisional nature of high-alumina granites, northern Sikhote-Alin, Russian Far East. *Inter. Geol. Review*, **14**, 587-592.
- Bodnar, R.J. (1995): Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: *Magmas, Fluids, and Ore Deposits* (Thompson, J.F.H. Ed.). Mineral. Assoc. Canada, Short Course Series, vol. 23, Chapter 7, 139-152.
- Bodnar, R.J. and Bethke, P.M. (1984): Systematics of stretching of fluid inclusions I: fluorite and sphalerite at 1 atmosphere confining pressure. *Econ. Geol.*, **79**, 141-181.
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994): Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications* (De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. Eds.). Short Course of the Working Group on "Inclusions in Minerals", IMA, 117-130.
- Bodnar, R.J., Binns, P.R. and Hall, D.L. (1989): Synthetic fluid inclusions-VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behaviour of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *J. Metamorphic Geol.*, **7**, 229-242.
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A. (1985): Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. In: *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems* (Berger, B. R. and Bethke, P.M. Eds.). Reviews in Economic Geology, vol. 2, Chapter 5, 73-97, Society of Economic Geologists.
- Boiron, M.-C. and Dubessy, J. (1994): Determination of fluid inclusion compositions: Microanalytical techniques. In: *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications* (De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. Eds.). Short Course of the Working Group on "Inclusions in Minerals", IMA, 45-71.
- Boullier, A.-M. (1999): Fluid inclusions: tectonic indicators. *J. Struct. Geol.*, **21**, 1229-1235.
- Boullier, A.-M., Ohtani, T., Fujimoto, K., Ito, H. and Dubois, M. (2001): Fluid inclusions in pseudotachylytes from the Nojima fault, Japan. *J. Geophys. Res.*, **B**, **106**, 21965-21977.
- Bozzo, A.T., Chen, H.-S., Kass, J.R. and Barduhn, A.J. (1975): The properties of the hydrates of chlorine and carbon dioxide. *Desalination*, **16**, 303-320.
- Brantley, S.L., Evans, B., Hickman, S.H. and Crerar, D.A. (1990): Healing of microcracks in quartz: Implications for fluid flow. *Geology*, **18**, 136-139.
- Bratus', M.D., Svoren', Y.M., Zinchuk, N.N. and Argunov, K.P. (1992): Gas components of inclusions in Yakutia diamonds. *Geochem. Inter.*, **29**, No. 6, 69-78.
- Brown, P.E. (1989): FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *Amer. Mineral.*, **74**, 1390-1393.
- Brown, P.E. and Hagemann, S.G. (1994): MacFlinCor: A computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation. In: *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications* (De Vivo, B. and Frezzotti, M. L. Eds.). Short Course of the Working Group on "Inclusions in Minerals", IMA, 231-250.
- Burke E.A.J. (2001): Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, **55**, 139-158.
- Campbell, A.R., Hackbarth, C.J., Plumlee, G.S. and Petersen, U. (1984): Internal features of ore minerals seen with infrared microscope. *Econ. Geol.*, **79**, 1387-1392.
- Crawford, M.L. (1981): Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. In: *Short Course in Fluid Inclusions: Applications to Petrology* (Hollister L.S. and Crawford, M.L. Eds.). Mineralogical Association of Canada, Chapter 4, 75-100.
- de Ronde, C.E.J., DeR Channer, D.M., Faure, K., Bray, C.J. and Spooner, E.T.C. (1997): Fluid chemistry of Archean seafloor hydrothermal vents: Implications for the composition of circa 3.2 Ga seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 4025-4042.
- DeR Channer, D.M. and Spooner, E.T.C. (1992): Analysis of fluid inclusion leachates from quartz by ion chromatography. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 249-259.
- DeR Channer, D.M. and Spooner, E.T.C. (1994): Combined gas and ion chromatographic analysis of fluid inclusions: Applications to Archean granite pegmatite and gold-quartz vein fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 1101-1118.
- De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. Eds. (1994): *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*, Short Course of the Working Group on "Inclusions in Minerals". pp. 376, IMA.
- Diamond, L.W. (2001): Review of the systematics of CO₂-H₂O fluid inclusions. *Lithos*, **55**, 69-99.
- Diamond, L.W., Marshall, D.D., Kackman, J.A. and Skippen, G.B. (1990): Elemental analysis of individual fluid inclusions in minerals by Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS): Application to cation ratios of fluid inclusions in an Archean mesothermal gold-quartz vein. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 545-552.
- Dubois, M. and Marignac, C. (1997): The H₂O-NaCl-MgCl₂ ternary phase diagram with special application to fluid inclusion studies. *Econ. Geol.*, **92**, 114-119.
- Fonarev, V.I., Touret, J.L.R. and Kotelnikova, Z.A. (1998): Fluid inclusions in rocks from the Central Kola granulite area (Baltic Shield). *Eur. J. Mineral.*, **10**, 1181-1200.
- Fournier, R.O. (1987): Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems. *U.S.G.S Prof.*

- Paper, No. 1350, Chapter 55, 1487-1505.
- Goldstein, R.H. (2001): Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos*, **55**, 159-193.
- Goldstein, R.H. and Reynolds, T.J. (1994): Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. pp. 199, SEPM Short Course 31.
- Gonzalez-Partida, E., Carillo-Chavez, A. and Martinez-Ibarra, R. (2000): Fluid inclusions from anhydrite related to the Chicxulub crater impact breccias, Yucatan, Mexico: Preliminary report. *Inter. Geol. Review*, **42**, 279-288.
- Gratier, J.P. and Jenatton, L. (1984): Deformation by solution-deposition, and re-equilibration of fluid inclusions in crystals depending on temperature, internal pressure and stress. *J. Struct. Geol.*, **6**, 189-200.
- Guilhaumou, N. (1993): Paleotemperatures inferred from fluid inclusions in diagenetic cements: implications for the thermal history of the Paris Basin. *Eur. J. Mineral.*, **5**, 1217-1226.
- 林 正雄, 田口幸洋, 渡辺公一郎 (1983): 地熱帯における流体包有物温度計の圧力補正. 地熱, **20**, 22-25.
- Haynes, F.M. and Kesler, S.E. (1987): Fluid inclusion chemistry in the exploration for Mississippi Valley-type deposits: an example from East Tennessee, U.S.A. *Appl. Geochem.*, **2**, 321-327.
- Hedenquist, J.W. and Henley, R.W. (1985): The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Econ. Geol.*, **80**, 1379-1406.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. Jr. and Reynolds, T.J. (1998): Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Econ. Geol.*, **93**, 373-404.
- Hedenquist, J.W., Reyes, A.G., Simmons, S.T. and Taguchi, S. (1992): The thermal and geochemical structure of geothermal and epithermal systems: A framework for interpreting fluid inclusion data. *Eur. J. Mineral.*, **4**, 989-1015.
- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R. (1999): Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determination by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, **27**, 755-758.
- Heinrich, W., Franz, L., Hein, U. and Herms, P. (1994): Microthermometry of synthetic fluid inclusions: an inter-laboratory comparison using different heating/freezing stages. *Neues Jahr. Mineral. Mh.*, H. 7, 295-313.
- 石山大三, 野見山邦洋, 水田敏夫, 松葉谷治, 佐藤 大 (1998): 岩手県宮古花崗岩体接触変成帯の上根市ドロマイトスカレンでのマグマ-炭酸塩岩の相互反応に伴う流体の特徴. 資源地質, **48**, 61-76.
- 石山大三, 佐藤比奈子, 水田敏夫, 世良耕一郎, ニツ川章二 (1997): PIXE 法による流体包有物中の微量流体の主要成分及び微量成分の化学分析. 秋田大鉱山学部研究報告, **18**, 1-8.
- 鍵 裕之, 佐脇貴幸, 喜安明子, 赤木 右, 奈良雅之, 森 俊哉, 野津憲治 (2000): 水分子の結合音に着目した近赤外分光法による流体包有物の塩濃度測定法の開発と天然ダイヤモンド中のマントル流体の存在状態. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), 2000, Ma-004.
- Kinnunen, K.A. (1989): Determination of total contents of fluid inclusions in quartz using modal analysis: Examples from Proterozoic rocks and ore deposits in Finland. *Bull. Geol. Soc. Finland*, **61**, 197-208.
- 小松 亮, 池内 研, 土井宣夫, 佐々木宗建, 内田利弘, 笹田政克 (1998): 深部地熱井 (掘削深度 3,729 m) の流体包有物から見た葛根田花崗岩の特徴と葛根田地熱系. 日本地熱学会誌, **20**, 209-224.
- Konnerup-Madsen, J. (1979): Fluid inclusions in quartz from deep-seated granitic intrusions, south Norway, *Lithos*, **12**, 13-23.
- 小鷹 長 (1994): 流体包有物分析の石油探鉱への応用. 石油技術協会誌, **59**, 304-308.
- 工藤洋三, 佐野 修 (1993): 石目と花崗岩の力学的性質. 地質ニュース, No. 470, 36-45.
- Lamb, W.M., Popp, R.K. and Boockoff, L.A. (1996): The determination of phase relations in the CH₄-H₂O-NaCl system at 1 kbar, 400 to 600°C using synthetic fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1885-1879.
- Larsen, R.B., Eide, E.A. and Burke, E.A.J. (1998): Evolution of metamorphic volatiles during exhumation of microdiamond-bearing granulites in the Western Gneiss Region, Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **133**, 106-121.
- Lespinasse, M. (1999): Are fluid inclusion planes useful in structural geology? *J. Struct. Geol.*, **21**, 1237-1243.
- Linke, W.F. (1965): Solubilities of Inorganic and Metal-organic Compounds. Volume 2 (K-Z), 4th edition. pp. 1914, American Chemical Society, Washington, D. C.
- London, D. (1986): Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-elements pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase-equilibrium experiments. *Amer. Mineral.*, **71**, 376-395.
- London, D. (1996): Granitic pegmatites. *Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **87**, 305-319.
- Loucks, R.R. (2000): Precise geothermometry on fluid inclusion populations that trapped mixtures of immiscible fluid. *Amer. J. Sci.*, **300**, 23-59.
- Lowenstern, J.B. (1994): Chlorine, fluid immiscibility, and degassing in peralkaline magmas from Pantelleria, Italy. *Amer. Mineral.*, **79**, 353-369.
- Lowenstein, T.K., Li, J. and Brown, C.B. (1998): Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA. *Chem. Geol.*, **150**, 223-245.
- Maeda, S., Takagi, H., Fujino, T., Taguchi, S., Sawaki, T., Hayashi, M., Horikoshi, T. and Okubo, Y. (2000): Application of NEDO's core-analysis system to the Wasabizawa geothermal development field in northeast Japan. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, 1383-1388.
- McNeil, B. and Morris, E. (1992): The preparation of double-polished fluid inclusion wafers from friable, water-sensitive material. *Mineral. Mag.*, **56**, 120-122.
- Mernagh, T.P. and Wilde, A.R. (1989): The use of the laser Raman microprobe for the determination of salinity in fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 765-771.
- Mohan, A., Prakash, D. and Sachan, H.K. (1996): Fluid inclusions in charnockites from Kodaikanal massif (South India): P-T record and implications for crustal uplift history. *Mineral. Petrol.*, **57**, 167-184.
- 森清寿郎 (1992): 長野県, 奈良井-駒ヶ根地方の領家変成岩中に含まれる流体包有物. 月刊地球, **14**, 675-680.
- 森清寿郎, 蟹 功 (2001): 京都府, 笠置地域の領家帯に産する石墨-電気石花崗岩中の流体包有物の顕微ラマン

- 分光法による分析: $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{N}_2-\text{H}_2\text{S}$ 流体包有物の検出. 信州大学理学部紀要, **26**, 29-37.
- 村松容一 (1993): 地熱井評価への流体包有物温度計適用上の留意点. 地熱エネルギー, **18**, 90-103.
- 村松容一, 宮崎真一, 佐藤 浩 (1989): 新しい探索手法の応用による葛根田地熱貯留層の延長の確認. 鉱山地質, **39**, 239-251.
- Munz, I.A. (2001): Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications. *Lithos*, **55**, 195-212.
- Nakashima, K. and Imaoka, T. (1993): Fluid inclusion studies on some mineralized and barren Tertiary granitoids in Japan. *Resource Geol. Special Issue*, No. 15, 211-224.
- Nanbu, A., Hamano, K., Tanaka, R. and Ishihara, S. (1997): Chemical and mineralogical characteristics of the Kanamaru pegmatite deposit, Niigata Prefecture, Japan. *Resource Geol.*, **47**, 1-10.
- Navon, O. (1991): High internal pressures in diamond fluid inclusions determined by infrared absorption. *Nature*, **353**, 746-748.
- 根建心具, 新山 透, 上野宏共 (1990): EPMA による Ok Tedi 鉱床産石英中の流体包有物の分析. 鹿児島大理科報告, **39**, 41-46.
- Newton, R.C. (1992): Charnockitic alteration: evidence for CO_2 infiltration in granulite facies metamorphism. *J. Metamorphic Geol.*, **10**, 383-400.
- Newton, R.C., Aranovich, L.Ya., Hansen, E.C. and Vandenheuvell, B.A. (1998): Hypersaline fluids in Precambrian deep-crustal metamorphism. *Precam. Res.*, **91**, 41-63.
- 大久保進 (1998): 基礎試錐「三島」において発見された炭化水素包有物の産状及び及びマイクロサームメトリーの検討. 石油技術協会誌, **63**, 205-215.
- 大久保進, 続木直英, 武田信従 (1999): 新潟県上越〜中越地域の坑井から得られた炭化水素包有物の蛍光スペクトルおよびマイクロサームメトリーによる検討. 石油技術協会誌, **64**, 330-339.
- Olsen, S.N., Baumgartner, L.P. and Brown, P.E. (1992): Possible prograde fluid inclusions in recrystallized chert nodules in a contact aureole, Christmas Mountains, Texas. *Amer. Mineral.*, **77**, 1031-1037.
- Piwocki, A.J. (1968): Experimental studies of igneous rock series Central Sierra Nevada batholith, California. *J. Geol.*, **76**, 548-570.
- Potter, II, R.W., Clyne, M., A. and Brown, D.L. (1978): Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.*, **73**, 284-285.
- Prokofyev, V. Yu., Naumov, V.B., Mironova, O.F. and Sokolova, N.T. (1991): Fluid inclusions containing high-density H_2S . *Geochem. Inter.*, **28**, No. 2, 32-37.
- Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M. (1983): Fluid inclusion petrography of SW England granites and its potential in mineral exploration. *Mineral. Deposita*, **18**, 335-347.
- Richards, J.P. and Kerrich, R. (1993): Observation of zoning and fluid inclusions in pyrite using a transmitted infrared light microscope ($\lambda \leq 1.9 \mu\text{m}$). *Econ. Geol.*, **88**, 716-723.
- Roedder, E. (1962): Ancient fluids in crystals. *Sci. Am.*, **207**, No. 4, 38-47.
- Roedder, E. (1977): Fluid inclusions as tools in mineral exploration. *Econ. Geol.*, **72**, 503-525.
- Roedder, E. (1984): *Fluid Inclusions*, Reviews in Mineralogy, vol. 12, Mineralogical Society of America, Washington D. C., U.S.A., pp. 646.
- Roedder, E. and Coombs, D.S. (1967): Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension Island. *J. Petrol.*, **8**, 417-451.
- 坂口有人 (1997): 四万十帯横浪メランジュの P-T path. 月刊地球, **19**, 155-159.
- Sakaguchi, A. (1999): Thermal structure and paleo-heat flow in the Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Island Arc*, **8**, 359-372.
- Sander, M.V. and Black, J.E. (1988): Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems - Implications for fluid inclusion studies. *Econ. Geol.*, **83**, 1052-1060.
- Santosh, M. (1991): Role of CO_2 in granulite petrogenesis: Evidence from fluid inclusions. *J. Geosci. Osaka City Univ.*, **34**, 1-53.
- Santosh, M. (1992): Carbonic fluids in granulites: Cause or consequence? *J. Geol. Soc. India*, **39**, 375-399.
- Sasada, M. (1985): CO_2 -bearing fluid inclusions from geothermal fields. *Geothermal Res. Council Trans.*, **9**, 351-356.
- 笹田政克 (1988): 流体包有物マイクロサームメトリーの基礎. 地熱篇-(1)-. 地熱エネルギー, **13**, 295-311.
- 笹田政克 (1989a): 流体包有物マイクロサームメトリーの基礎. 地熱篇-(2)-. 地熱エネルギー, **14**, 27-42.
- 笹田政克 (1989b): 流体包有物による堆積岩の熱履歴の解析. 月刊地球, **11**, 657-660.
- Sasada, M. (1989): Fluid inclusion evidence for recent temperature increases at Fenton Hill Hot Dry Rock test site west of the Valles caldera, New Mexico, U.S.A. *J. Volc. Geothermal Res.*, **36**, 257-266.
- 笹田政克 (1991): 稲田みかげ. 地質ニュース, No. 441, 34-40.
- 笹田政克 (1995): 流体包有物を用いた花崗岩の貫入深度推定法. 日本地質学会第 102 年年会講演要旨集, No. 344, 261.
- 笹田政克, 佐脇貴幸 (1995): 人工流体包有物検層 -350°C を越える坑内温度の測定と深部流体の採取を目指して-. 地熱, **32**, 1-13.
- Sasada, M., Roedder, E. and Belkin, H.E. (1986): Fluid inclusions from drill hole DW-5, Hoho geothermal area, Japan: evidence of boiling and procedure for estimating CO_2 content. *J. Volc. Geothermal Res.*, **30**, 231-251.
- Sasada, M., Sawaki, T. and Takeno, N. (1992): Analysis of fluid inclusion gases from geothermal systems, using a rapid-scanning quadrupole mass spectrometer. *Eur. J. Mineral.*, **4**, 895-906.
- 佐々木宗建, 笹田政克, 藤本光一郎, 村松容一, 小松 亮, 佐脇貴幸 (1995): 流体包有物に記録された若い花崗岩貫入後の熱水活動 - 葛根田地熱地域と乳頭地熱地域を例に -. 資源地質, **45**, 303-312.
- 佐脇貴幸 (1994): 流体包有物の測定手法について - 地熱調査への応用 -. 地熱, **31**, 343-356.
- 佐脇貴幸, 笹田政克 (1997): 流体包有物のマイクロサームメトリーから見た鬼首地熱系の温度履歴. 日本地熱学会誌, **19**, 165-183.
- 佐脇貴幸, 笹田政克, 佐々木宗建 (1998): 本邦産花崗岩及びペグマタイト中の流体包有物の地化学的研究 (その 3). 日本地質学会第 105 年学術大会講演要旨集, No. 361, 182.
- Sawaki, T., Sasada, M., Sasaki, M. and Goko, K. (1997): Fluid inclusion study on the Kirishima geothermal system, Japan. *Geothermics*, **26**, 305-327.
- 佐脇貴幸, 笹田政克, 佐々木宗建, 月村勝宏 (2000): 人工流体包有物による地熱坑井の検層法. 地調報告, No. 284, 81-104.

- Sawaki, T., Sasaki, M., Fujimoto, K., Takeno, N., Tsukamoto, H., Sanada, K. and Maeda, S. (2001): Corundum and zircon spinel from the Kakkonda geothermal system, Iwate Prefecture, northeastern Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **96**, 137-147.
- Schmidt, C. and Bodnar R. J. (2000): Synthetic fluid inclusions: XVI. PVTX properties in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ at elevated temperatures, pressures, and salinities. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 3853-3869.
- Seal, II, R.R. and Rye, R.O. (1993): Stable isotope study of fluid inclusions in fluorite from Idaho: Implications for continental climates during the Eocene. *Geology*, **21**, 219-222.
- 関根孝太郎, 土屋範芳 (2000): 滝谷岩体における流体包有物とマイクロクラックの特徴. 日本地熱学会平成 12 年学術講演会講演要旨集, A29.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M. (1985): *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. pp. 235, Blackie, New York.
- 澁江靖弘 (1997): 高温・高圧条件における H_2O と $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ 系熱水の密度式. 資源地質, **47**, 145-154.
- 正路徹也, 高橋敏夫, 武内寿久彌 (1979): 火成岩中の流体包有物と鉍化作用 —特に成羽川地域の酸性火成岩類について. 日本鉱業会誌, **95**, 1-5.
- Smit, C.A. and Van Reenen, D.D. (1997): Deep crustal shear zones, high-grade tectonites, and associated metasomatic alteration in the Limpopo Belt, South Africa: Implications for deep crustal processes. *J. Geol.*, **105**, 37-57.
- Smith, D.L. and Evans, B. (1984): Diffusional crack healing in quartz. *J. Geophys. Res.*, **B**, **89**, 4125-4135.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J. (1988): Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ under vapor-saturated conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 989-1005.
- 田口幸洋 (1982): 流体包有物の均質化温度分布から見た地熱帯の地下熱構造. 日本地熱学会誌, **3**, 165-177.
- 田口幸洋, 林 正雄, 三村利光, 木下保美, 御幸和則, 阿部 勲 (1984): 霧島地熱地域の熱水性鉍物の流体包有物均質化温度. 地熱, **21**, 119-129.
- 高木 博, 前田俊一, 藤野敏雄, 真田和之, 林 正雄, 田口幸洋, 堀越孝昌, 村岡洋文 (2001): 流体包有物均質化温度のオーバーヒーティングに関する実験的研究. 日本地熱学会誌, **23**, 263-272.
- 武内寿久彌 (1975a): 鉍物中の流体包有物研究の基礎 1 流体包有物の研究史, 分類と生成. 宝石学会誌, **2**, 25-33.
- 武内寿久彌 (1975b): 鉍物中の流体包有物研究の基礎 2 流体包有物地質温度計. 宝石学会誌, **2**, 66-73.
- 武内寿久彌 (1975c): 鉍物中の流体包有物研究の基礎 3 流体包有物の塩濃度, 熱水溶液の性質. 宝石学会誌, **2**, 110-121.
- 武内寿久彌 (1975d): 鉍物中の流体包有物研究の基礎 4 流体包有物の分析. 宝石学会誌, **2**, 165-172.
- 武内寿久彌 (1976): 鉍物中の流体包有物研究の基礎 5 ペグマタイト鉍物中の流体包有物. 宝石学会誌, **3**, 25-31.
- 武内寿久彌, 一国雅巳 (1982): 流体包有物の分析的研究. 岩鉍特別号, No. 3, 331-340.
- Takenouchi, S. and Imai, H. (1975): Glass and fluid inclusions in acidic igneous rocks from some mining areas in Japan. *Econ. Geol.*, **70**, 750-769.
- Takenouchi, S. and Kennedy, G.C. (1965): Dissolution pressures of the phase $\text{CO}_2 \cdot 5\frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$. *J. Geol.*, **73**, 383-390.
- 竹下 徹, 田上雅彦 (1997): 石英の変形微細構造を用いた付加体砂岩中の古応力場解析. 月刊地球, **19**, 168-172.
- 竹下 徹, 鳥越祐司, 橋本修一, 江藤淳宏, 坂上麻子, 大友淳一, 田上雅彦, 西川 治, 円藤洋之 (1996): 石英の変形微細構造に基づく南部北上帯ジュラ系砂岩起源断層破碎岩内の古応力場解析. テクトニクスと変成作用 (原郁夫先生退官記念論文集), 261-279.
- Thomas, A.V. and Spooner, E.T.C. (1992): The volatile geochemistry of magmatic $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ fluid inclusions from the Tanco zoned granitic pegmatite, southeastern Manitoba, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 49-65.
- Thomas, R., Webster, J.D. and Heinrich, W. (2000): Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**, 394-401.
- Tojo, S., Miyano, T. and Tsunogae, T. (1994): H_2O -rich fluid inclusions in quartz from charnockite near the Manjirenji-dam in the Limpopo Northern Marginal Zone, Zimbabwe. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, **20**, 77-81.
- Touret, J.L.R. (2001): Fluids in metamorphic rocks. *Lithos*, **55**, 1-25.
- Ulrich, M.R. and Bodnar, R.J. (1988): Systematics of stretching of fluid inclusions II: barite at 1 atm confining pressure. *Econ. Geol.*, **83**, 1037-1046.
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F. (2001): Fluid inclusion petrography. *Lithos*, **55**, 22-47.
- Vityk, M.O. and Bodnar, R.J. (1995): Textural evolution of synthetic fluid inclusions in quartz during reequilibration, with applications to tectonic reconstruction. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **121**, 309-323.
- Warner, J.L., Ashwal, L.D., Bergman, S.C., Gibson, E.K., Jr., Henry, D.J., Lee-Berman, R., Roedder, E. and Belkin, H.E. (1983): Fluid inclusions in stony meteorites. *Proc. 13th Lunar and Planetary Science Conference, Part 2, J. Geophys. Res.*, **B**, **88**, Supplement, A731-735.
- 渡辺暉夫, 松枝大治 (1990): 変成岩の流動と流体包有物. 月刊地球, **12**, 597-601.
- Wilkins, R.W.T. (1986): The mechanisms of stretching and leaking of fluid inclusions in fluorite. *Econ. Geol.*, **81**, 1003-1008.
- Wilkinson, J.J. (1991): Volatile production during contact metamorphism: the role of organic matter in pelites. *J. Geol. Soc. London*, **148**, 731-736.
- Wilkinson, J.J. (2001): Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-273.
- Wilkinson, J.J. and Johnston, J.D. (1996): Pressure fluctuations, phase separation, and gold precipitation during seismic fracture propagation. *Geology*, **24**, 395-398.
- Williams, A.E. (1996): Mass spectrometric analysis of volatiles in fluid inclusions: aliquot calibration valve to simulate inclusion rupture. *Chem. Geol.*, **131**, 155-165.
- Williams-Jones, A.E. and Samson, I.M. (1990): Theoretical estimation of halite solubility in the system $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$: application to fluid inclusions. *Can. Mineral.*, **28**, 299-304.
- Wopenka, B., Pasteris, J.D. and Freeman, J.J. (1990): Analysis of individual fluid inclusions by Fourier transform infrared and Raman microspectroscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 519-533.
- 山田泰生 (1999): 流体包有物の分析測定法 (総説). 石油資源開発 (株) 技術研究所研究報告, **14**, 57-80.
- 山本雅弘, Schwarcz, H.P. (1981): スペレオセム流体包有物の酸素同位体比の分析. 質量分析, **29**, 75-79.

- Zhang, Y.-G. and Frantz, J.D. (1987): Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluid in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.*, **64**, 335-350.
- Zhang, Y.-G. and Frantz, J.D. (1992): Hydrothermal reactions involving equilibrium between minerals and mixed volatiles 2. Investigations of fluid properties in the CO₂-CH₄-H₂O system using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.*, **100**, 51-72.
- Zimmermann, H. (2000): Tertiary seawater chemistry - Implications from primary fluid inclusions in marine halite. *Amer. J. Sci.*, **300**, 723-767.
- Zolensky, M.E., Bodnar, R.J., Gibson, E.K., Jr., Nyquist, L.E., Reese, Y., Shih, C.-Y. and Wiesmann, H. (1999): Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite, Monahans (1998). *Science*, **285**, 1377-1379.

付記 流体包有物に関する国際的な研究集会として、ヨーロッパを中心とした ECROFI (European Current Research on Fluid Inclusions), 及びアメリカ大陸を中心とした PACROFI (Pan American Conference on Research on Fluid Inclusions) があり、それぞれ隔年で開催されている。これらに加えて、アジア太平洋地域を中心とした流体包有物に関する研究集会 (APIFIS: Asia and Pacific International Fluid Inclusion Society) も企画されたが、こちらの方はうまく機

能していないようである。ちなみに、第8回 PACROFI は、2002年7月にカナダのハリファックスにて開催されている (<http://www.gov.ns.ca/natr/meb/pacrofi8/index.htm>)。一方、次回の第17回 ECROFI は2003年6月にハンガリーのブタペストにて開催される予定である (<http://ecrofi17.geology.elte.hu/>)。これらの研究発表の内容は“Mineralogical Magazine”, “European Journal of Mineralogy”, “Chemical Geology”, “Geochimica et Cosmochimica Acta”等の国際誌に掲載されている。また、これらの雑誌や“Economic Geology”をはじめとする他の鉱床学、地球化学分野の雑誌にも毎号の様に論文が掲載されている。流体包有物に関する最新の分析技術を知るには、これらの雑誌に掲載されている論文を参照するのが最も良い方法であろう。なお、Roedder, Belkin 両博士が中心となって、“Fluid Inclusion Research”という流体包有物研究の抄録が出版されていた(筆者の手元の最新号は1998年の31巻)が、Roedder 博士の私信によれば、休刊となった(発行する資金の問題のため?)模様である。その点は残念であるが、その代わりにインターネット上のさまざまな地質学文献データベース、検索エンジン、オンライン・ジャーナル等を最大限利用し、個々の研究者が独自に最新の情報を手にしていく必要がある。また、Brown 博士のウェブページ (<http://www.geology.wisc.edu/pbrown/fi.html>) にも流体包有物研究・学会に関する情報がしばしば載せられているので、これも活用するとよいであろう。