

沈み込み帯における地殻内流体

藤本 光一郎¹⁾

1. はじめに

水溶液やガスなどの流体相は、流体相中の化学反応速度が早い、粘性が低く地殻内の移動が容易でかつ物理化学的性質や物理的特性の圧力温度依存性が高いなどの性質を持つ。日本列島のような沈み込み帯においては、プレートの沈み込みに伴って流体が地下深部まで移動し、今述べた流体の特徴により活発な物質や熱の移動が起こる。その過程での様々な流体/岩石間の化学的反応(変成反応, 熱水変質や続成作用など)によって流体組成が多様に進化するため、流体が沈み込み、さらに上昇して地表や海底面上に出た時にはすっかりその組成を変えていることが予想される。

また、流体、とりわけ水の存在下では、岩石の強度が低下したり、塑性的に変形しやすくなったりする(例えば藤本, 1994)。これらはプレート運動やマグマの上昇、様々な断層や褶曲活動などの地質現象に密接に関わり、沈み込み帯における流体の挙動は第一級の問題であると言える(例えば嶋本, 1994)。

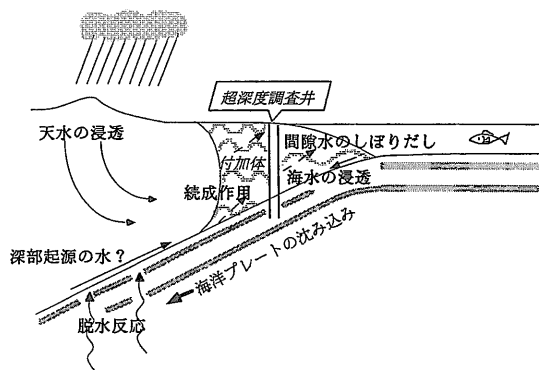
それにもかかわらず、地殻内流体の実態には不明な点が多い。その原因として、地下深部の流体の直接採取が困難であり、鉱物に取り込まれた流体包有物などの分析や、共存する鉱物相からの熱力学的な推定に頼らざるを得ないことが挙げられる。その鉱物相ですら、我々が地表で露頭として観察するまでに後退変成や風化など幾つかの過程を経ているので、深部の情報が覆い隠されているされることがしばしばである。

わからない、データが無いと言うだけでは話が前へ進まないで、問題を単純化してみよう。第1図に沈み込み帯における様々な水の移動の概念図を

示す。日本の超深度掘削計画(JUDGE 計画)においてターゲットとされている付加体深部についてみると、地殻内流体の起源としてはマグマ活動ないしはマンツルの脱ガスに伴って地下深部から供給されるもの、沈み込みによって供給される層間海水や生物起源の揮発性成分、及び循環地表水などが考えられる。これらが端成分となって、混合したり、岩石との反応、溶液自体の2相分離などの過程を経て様々な組成を持つようになることが考えられる。

本小論においては、地殻内流体として比較的研究の進んでいる海洋底の付加体の流体や変成流体を中心に手短かにレビューし、本分野について超深度掘削に期待される役割を述べたい。地殻内の流体全般に関しては、Fyfe 他(1978)による極めて包括的な教科書があり、沈み込み帯の流体に関しては Tarney 他編(1991)による最近の論文集に詳しい。

なお、地殻内流体として地熱流体についても研究



第1図 沈み込み帯における様々な水の移動の概念図。付加体には、間隙水や続成作用に伴う脱水など内部起源の水と、天水や海水、深部起源の水などの外部起源の水が存在する。超深度掘削により、それらの水の移動機構や進化が明らかにされることが期待されている。

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード：地殻内流体, 沈み込み帯, 超深度掘削, 付加体, 変成作用, グローバル物質循環, 流体進化

が活発に行なわれている。特に近年地熱開発が地下2000~3000 mと深くなるにつれて、地熱系深部の情報も次第に明らかになりつつある。これについては地質ニュースの昨年の特集号(477号, 1994年5月号)や茂野(1992)などを参照されたい。

2. 海洋底の付加体の流体

沈み込み帯における流体の性質についてはKastner 他(1991)及び芦(1993)によるまとめがあるので、主としてそれらに従って述べる。今まで海洋底付加体の浅部で詳細な調査が行なわれたのはバルバドスリッジ、南海トラフ、ペルー沖などであるが、現在得られているそこでの流体の情報は、掘削深度の関係で海面下数百メートルまでに限定されている。いずれのところも、海水よりも塩素濃度の低い間隙水が存在し、それが海底から湧出しているのが最大の特徴である。例えばバルバドスリッジではデコルマ面や活断層面に沿って塩濃度が海水より10~30%程度低い水が存在し、それらが年間 10^6 m^3 、最大 $17 \text{ m} \text{ 年}^{-1}$ の速度で湧出していると推定されている。このような水は付加体内部起源の水と外部起源の水に分けられる。内部起源の水としてはおよそ多い順に(1)埋没や沈み込みに伴う孔隙率の減少による間隙水のしぼり出し、(2)続成作用や変成作用に伴う脱水反応、(3)雲母や角閃石などの含水鉱物の分解などが考えられている。このような内部起源の水の供給量は、大きく見積っても活動的な沈み込み帯1 m 当たり年間 $7 \text{ m}^3 \text{ 年}^{-1} \text{ m}^{-1}$ であり、それは南海トラフやバルバドスリッジなどで観測された数十ないし $100 \text{ m}^3 \text{ 年}^{-1} \text{ m}^{-1}$ という湧出量に比べて非常に小さい。従って実際の湧出水のかなりは、外部起源の水が混入したものと推定される。地表水が浸透する場合もあるだろうし、アンダープレッシングした大陸地殻の影響も考えられる。しかし、天然でどのような起源の水が、どの程度の深さまで混入しているのか、まだ決着が着いていない。これまでの研究により、流体は、付加体中を多孔質中の流体移動のように一様に浸透するのではなく、断層、透水性のよい堆積物層、不整合面といった面的な広がりをもつ通路か、泥火山の基部に想定されるような線的な通路に集中して流れていると考えられる。

流体の組成は一つの地域や一本のコアの中ですら大きく変化し、流体の経路やその変化過程の複雑さを反映している。組成を変化させる主要なプロセスとしては、(1)続成や変質作用、(2)粘土鉱物による吸着やフィルター効果、(3)循環地表水、ガスハイドレートや含水鉱物起源の塩濃度の小さい水などによる希釈などがある。続成作用としては、(1)有機物のバクテリア及び熱による分解、(2)ガスハイドレートの生成分解、(3)種々の鉱物の脱水・変質・沈殿などが挙げられている。これらは相互に関連しつつ不可逆的に進行しており、そのプロセスの解明は今後の大きな課題として残されている。

3. 変成流体

付加帯がさらに深部に沈み込むと、脱水が卓越するステージから変成作用が卓越するステージに移行する。三波川帯の変成岩など高圧低温型の変成岩は、付加帯がそのように変成作用を受け、さらに上昇して地表に露出したものと考えられている。変成作用の過程においては、それまでと異なった流体を放出することが予想され、沈み込み帯における変成流体の挙動は研究者の関心を呼んできた。

変成流体については主として流体包有物の研究と変成鉱物の相平衡解析の二つの手法からその組成が推定されている。流体包有物についてはRoedder (1984)及びCrawford and Hollister (1986)、相平衡解析からの推定についてはFerry and Burt (1982)によるレビューがあるのでここではそれらをもとに概説する。なお、研究例も多くないので、特に付加体起源の変成岩に限定しないで述べる。

低~中変成度における流体包有物の研究によると、流体成分は多い順に H_2O 、 CO_2 、 CH_4 から構成され、稀に N_2 や H_2S も存在する。石灰質の岩石が関与する場合は純粋な CO_2 に近いような流体も存在するが、ほとんどは H_2O が90%以上を占めるような流体である。炭化水素は有機物の分解によって生じるが、変成度の上昇と共に、炭素数の大きな炭化水素が減少して CH_4 成分が増加するようになり、さらに CO_2 に富むものへと変化する。これは H_2O - CO_2 - CH_4 系の相平衡が温度依存性を持ち、高温ほど CH_4 に比べて CO_2 が卓越するためと考えられている。溶存塩類については NaCl が主成分であり、

時に CaCl_2 に富むものも観察される。陽イオン組成は共存する鉱物種によって規制されている。塩濃度は泥質岩の時は2~6%であるのに対し、石灰質の岩石では20~25%に達することもある。

流体包有物自体非常に小さいので、直接的な化学分析はなかなか難しい。通常はデクレピテーション(加熱して破碎)させて流体成分を取りだし、質量分析法やクロマトグラフィーなどによって分析するが、実際には一つの鉱物内には生成ステージの異なる流体包有物が共存している場合が多く、バルク分析には限界がある。個別に分析する方法として、凍結させて鉱物と同様に電子線マイクロプローブ(EP-MA)で分析する方法、二次イオン質量分析法(SIMS)や粒子励起X線分析法(PIXE)などの方法を用いたり、あるいは顕微赤外や顕微ラマンなどの分光学的測定などがあるが、条件の整った包有物でないと適用できないのが現状であり、今後の発展が期待される。さらに、流体包有物についてはそれがどの程度変成時の流体を保存しているかについての吟味が必要である。例えば H_2O は石英の結晶構造中の転位を介して CO_2 に比べてかなり動きうることが指摘されており(Bakker and Jansen, 1990)、温度変化の緩やかな変成流体の場合影響があることも予想される。流体包有物の分析法については佐脇(1994)のレビューがある。

相平衡解析からは、基本的に温度、及び H_2O , O_2 , H_2 , CO_2 , S_2 などの分圧(活動度)の推定が可能となる。Ferry 達の一連の研究(例えば Ferry, 1986)などにより、変成作用時に体積にして岩石の1倍から5倍前後の量の流体が関与していることが推定されてきた。彼らの手法は、変成岩中の炭酸塩鉱物や硫化物から CO_2 や硫黄の量を見積り、熱力学的計算から求められる変成流体中のそれらの成分の濃度と比較して、関与した流体量を推定するものである。このような方法で見積り可能なのは、珪酸塩主体の堆積岩に挟まれる炭酸塩岩や、硫化物・グラファイトが大量に存在する場合など、流体と岩石の組成コントラストがかなりはっきりしている場合だけである。

流体通路については、記載的な研究は多く行なわれているものの、変成作用時の情報を分離しにくいこともあって不明の点も多い。揮発成分が抜ける反応による体積の減少によって鉱物粒界に生じた小さ

な孔隙を流れる浸透流と、割れ目系を通過するチャンネル流の両者が存在するものと考えられている(Ferry, 1994)。

付加体の場合は、流体の性質や流路について直接的な情報を得ることができた。しかし変成流体についてはどのようなものであろうか。変成作用がまさに進行しつつある領域は当然ながら地表にはなく、超深度掘削によってのみ到達しうる。JUDGE 計画では坑底温度を 400°C と見積っており、変成流体の直接採取やその通路、変成作用の過程などの詳しい情報が期待される。

4. 地殻内流体の進化とグローバルな物質循環との関わり

前に述べたように沈み込み帯の地殻内流体の起源としてはマグマ活動ないしはマンツルの脱ガスに伴って地下深部から供給されるもの、沈み込みによって供給される層間海水や生物起源の揮発性成分、及び循環地表水などが考えられる。地殻内流体の進化という観点からは、その出発点となる起源流体の性質をよく理解することがまず重要になる。

マグマ活動などに伴って深部から供給される流体を探るには火山ガスが大きな情報を与えてくれる。火山は地下深部の情報を得るための窓であり、例えば火山ガス中の反応性の低い窒素や希ガスの組成や同位体比の研究は沈み込みに伴ってスラブに持ち込まれた堆積物の島弧の火山ガスへの寄与を明らかにするなど、流体進化のみならず沈み込みの実態解明へ大きな制約条件を与える(例えば Kita et al., 1993)。火山性の流体については本特集号の北による論文を参照されたい。

また、沈み込みによって地下深部へ供給される流体は、海洋底付加体の浅部流体を考えればよいだろう。それは、低温でなかつ堆積物との反応時間も比較的短く、基本的には岩石との化学平衡が成り立っていないキネティクスの支配する世界の産物である。これについては先に概略を述べたが、将来日本で海洋掘削船が建造されれば、その解明がさらに進むと期待される。

地表水主体の水については、ここでは触れないが、河川水や地下水などについて、化学的性質やその変動、組成を支配する要因など膨大な研究が行な

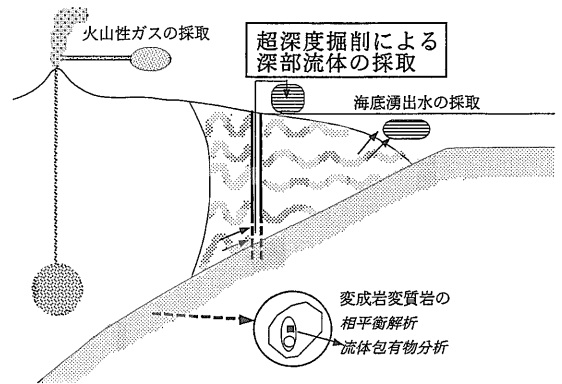
われてきている(例えば Stumm and Morgan, 1970, Holland, 1978).

一方で, 変成流体は, それらの起源の流体が, 混合や岩石と反応といった様々な進化過程を経た産物とも言える. しかしながら変成作用は温度も高く岩石との反応時間も長いことから基本的に化学平衡が支配する領域であり, さらに地表に現われるまでの後退変成作用も加わることで, 現在我々が得られる変成流体については, それがどのような起源を持ち, どのような進化過程を経たかという情報は消されてしまっている場合が多い. 流体の進化過程を解明するためには, 先に述べたような火山性流体や海洋底付加体の流体などの中に相当する状態を把握することは是非とも必要である. 超深度掘削による流体の研究は, 地殻内流体の進化過程を明らかにするためのミッシングリンクを埋めることが期待される.

流体の進化過程は, 裏を返せば, それと反応する岩石の変化の過程でもあり, 地殻の進化形成過程やグローバルな物質循環を考える上でも重要となる. 例えば, 海洋底堆積物中の間隙水の進化過程は, 堆積物が続成作用や変成作用を受けて地殻を構成する岩石となるプロセスでもある.

近年グローバルな物質循環の研究が進み, 揮発性成分の循環についてはかなり解明されてきた(例えば北野, 1984). 多くの揮発性成分の循環の研究では大気と水圏及び生物圏を結合されたシステムとして扱い, 地殻との相互作用は考えていない. それは大規模噴火などを除けば地殻との相互作用の変動の時定数が長いために, 数万年以下程度の時間スケールにおいては定常と考えて物質収支の考慮からはずすことができるからである. さらに, 地殻との相互作用についての基本的なデータが足りないことも大きく影響している.

地殻と大気水圏との相互作用の最も強いところは, 大規模な物質の垂直方向の動きのある海嶺やホットスポット, 島弧海溝系などである. 海嶺やホットスポットは深部から一方的に物質の供給を考えればよいので比較的単純に考えられるが, 海溝においては基本的に多くの物質が沈み込み一方で, 軽い流体成分は上昇したり, 活発な火山活動も起こる. つまり, 物質の動きが双方向にあるためにその収支は非常に複雑になっている. Kastner 他(1991)は沈み込み



第2図 深部流体を解明するための幾つかの手段. 超深度掘削による深部流体の直接採取は, 比較的良好にわかっている付加体浅部の流体と, 火山性ガスとの間の未知の領域を埋め, 地殻内流体の進化の解明に貢献することが期待される.

帯の水の湧出のうち内部起源の水についてはグローバルな地球化学サイクルへ与える影響はそれほど大きくはないと見積っているが確固たる証拠があるわけではない. さらに量的に多い外部起源の水については見積りすらしていない. JUDGE 計画により, 付加体深部の流体の性状や流路, そこでの流体/岩石反応が明らかになることで, 沈み込み帯における物質循環の解明が飛躍的に進むことが期待される.

5. おわりに

地殻内流体の多様性やその移動機構の解明は, 地殻内の様々な地質現象や地殻の進化を考える上で非常に重要である. 超深度掘削による流体の研究は, 比較的解明の進んでいる火山性流体や海洋底付加体の流体などの間をつなぐミッシングリンクを埋めることが期待される. 第2図に深部流体を解明する幾つかの手段を示した. 地表に露出した地域での研究や実験的理論的研究はもちろん重要であるが, 超深度掘削によって直接得られる情報は測り知れぬ価値があることを強調したい.

なお, 地質調査所の浦辺徹郎博士には原稿を読んでいただき, 貴重な指摘をいただいた. また, 東京大学理学部の芦寿一郎博士からは沈み込み帯の流体についてご教示を受けた. 合わせて感謝する.

文 献

- 芦寿一郎(1993): 沈み込み帯における流体の起源とその役割. 月刊地球, 15, 636-640.
- Bakker, R. J. and Jansen, J. B. (1990): Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, 345, 58-60.
- Crawford, M. L. and Hollister, L. S. (1986): Metamorphic fluids: The evidence from fluid inclusions. in: Walther, J. V. and Wood, B. J. (eds) *Fluid-rock interactions during metamorphism*, Springer-Verlag, New York, 1-35.
- Ferry, J. M. (1986): Reaction progress: A monitor of fluid-rock interaction during metamorphic and hydrothermal events. in: Walther, J. V. and Wood, B. J. (eds) *Fluid-rock interactions during metamorphism*, Springer-Verlag, New York, 60-88.
- Ferry, J. M. (1994): A historical review of metamorphic fluid flow. *J. Geophys. Res.*, 99, 15487-15498.
- Ferry, J. M. and Burt, D. M. (1982): Characterization of metamorphic fluid composition through mineral equilibria. in: Ferry, J. M. (ed.) *Characterization of metamorphism through mineral equilibria*, *Reviews in Mineralogy*, 10, Mineral. Soc. Amer., Washington, DC, 207-262.
- 藤本光一郎(1994): マグマ周辺の壁岩/熱水相互作用—力学的・化学的相互作用のカップリング—. *地質学論集*, 43, 109-119.
- Fyfe, W. S., Price, N. J., and Thompson, A. B. (1978): *Fluids in the earth's crust*. Elsevier, Amsterdam, 383p.
- Holland, H. D. (1978): *The chemistry of atmosphere and oceans*. John Wiley and Sons, Inc., New York (山県登訳(1979): 大気・河川・海洋の化学, 産業図書).
- Kastner, M., Elderfield, H., and Martin, J. B. (1991): Fluids in convergent margins: what do we know about their composition, origin, role in diagenesis and importance for oceanic chemical fluxes? *Philosophical Trans. Royal Soc. London A*, 335, 261-273.
- Kita, I., Nitta, K., Taguchi, S., and Koga, A. (1993): Difference in N_2/Ar ratio of magmatic gases from northeast and southwest Japan: New evidence for different states of plate subduction. *Geology*, 21, 391-394.
- 北野 康(1984): 地球環境の化学. 裳華房, 237p.
- Roedder, E. (1984): Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, Mineral. Soc. Amer., Washington, DC, 643p.
- 佐脇貴幸(1994): 流体包有物の測定手法について. *地熱*, 31, 343-356.
- 茂野 博(1992): 熱水系の深部環境を地球化学データから予測する. *地質ニュース*, 457, 16-33.
- 嶋本利彦(1994): 断層の深部を探る. 島崎邦彦・松田時彦編, *地震と断層*, 東大出版会, 125-148.
- Stumm, W and Morgan, J. J. (1970): *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc. (安部喜也・半谷高久訳(1974): 一般水質化学(上・下)共立出版).
- Tarney, J., Pickering, K. T., Knipe, R. J., and Dewey, J. D. (eds) (1991): The behaviour and influence of fluids in subduction zones. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, 335, 227-418.
-
- FUJIMOTO Koichiro (1995): Crustal fluids in subduction zones.
-

〈受付: 1994年11月18日〉