

大西洋 TAG 及び Rainbow 海底熱水系の熱水の化学組成：

MODE'98 Leg.2 の結果

千葉 仁*¹ 益田 晴恵*¹ 李 受映*³

藤岡換太郎*⁴ MODE'98 Leg.2 航海乗船研究者

MODE'98 Leg.2では大西洋中央海嶺の2つの海底熱水系 (TAG 熱水系及び Rainbow 熱水系) で熱水の採取を行った。TAG 熱水系では、ブラックスモーカー熱水の化学組成が過去12年間にわたって大きな変動がなかったこととマウンド上なら場所を問わず同じ化学組成のブラックスモーカー熱水が噴出していることが明らかになった。これは、過去12年間にわたって、岩石と熱水の反応条件に大きな変化がないことと反応帯から組成に変化を受けることなく熱水がマウンド全体に供給されていることを意味している。TAG マウンドのクリアースモーカー熱水は、その化学組成から、マウンド内でブラックスモーカー熱水と海水が混合した後に、硬石膏と硫化鉄を沈殿させ、その後海底上に噴出していることが明らかになった。Rainbow 海底熱水系の熱水は、他の熱水系の熱水と比べて、Cl, Ca, Fe と非凝縮性ガスを高濃度に含み、低い溶存シリカ濃度の熱水である。この化学組成は超塩基性岩と海水の反応によってもたらされたものと考えられる。

キーワード：大西洋中央海嶺, TAG, Rainbow, 熱水系, 熱水, 化学組成

Fluid Chemistry of TAG and Rainbow Seafloor Hydrothermal Systems at the Mid-Atlantic Ridge : Results from MODE'98 Leg.2 Cruise.

Hitoshi CHIBA *⁵ Harue MASUDA *⁶ Suyoung LEE *⁷

Kantaro FUJIOKA *⁸ Shipboard Scientific Party of MODE'98 Leg.2

Hydrothermal fluid samples from two seafloor hydrothermal systems, TAG and Rainbow hydrothermal systems at MAR, were collected during MODE'98 Leg.2. At the TAG hydrothermal system, chemical composition of the black smoker fluid is constant since 1986 independent on the place of the mound. This means that reaction condition between rock and hydrothermal fluid has been constant for 12 years and that hydrothermal fluid is discharged to the whole mound without modification of its chemical composition during ascent. Chemical composition of the TAG clear smoker fluid indicates that it is formed by mixing of seawater and the black smoker endmember followed by precipitation of anhydrite and iron sulfide in the mound. Black smoker fluid at the Rainbow site is enriched in Cl, Ca, Fe and non-condensable gas and depleted in dissolved SiO₂ compared to the other hydrothermal fluids in the Atlantic Ocean. It results from the reaction of the ultramafic rock and seawater.

Key words : Mid-Atlantic Ridge, TAG, hydrothermal system, hydrothermal fluid, chemical composition

* 1 岡山大学固体地球研究センター

* 2 大阪市立大学理学部地球学科

* 3 広島大学理学部地球惑星システム学科

* 4 海洋科学技術センター-深海環境フロンティア

* 5 Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

* 6 Department of Geosciences, Osaka City University

* 7 Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

* 8 Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

拡大速度の速い大西洋中央海嶺においても、1985年の26°08'NでのTAG海底熱水系における高温の熱水活動の発見 (Rona et al., 1986) 以来、Lucky Strike (37°17.6'N), Menez Gwen (37°50'N), Rainbow (36°15'N), Broken Spur (29°10.2'N), Snake Pit (23°22.1'N) などの活動している海底熱水系が次々に発見されている。MODE'98 Leg.2では、これらの海底熱水系のうち、MODE'94 Leg.2で「しんかい6500」により調査されたTAG熱水系を再訪し、さらに、1997年に発見されたRainbow熱水系の調査を行った。

TAG熱水系は、現在も熱水を噴出している active mound、活動を停止している Mir zone と Alvin zone からなる5 x 5kmの広がりを持つ熱水系である (Rona and Von Herzen, 1996)。このうち active moundは、直径約200m、高さ約50mの硫化物マウンドで、マウンドの北西部にある Black Smoker Complex (CBC) から360℃の熱水を噴出して活動している。1985年の発見以来、この激しい熱水活動が継続していることは、何回もの深海潜水艇等による調査で明らかにされている。しかし、熱水活動の強度は、この期間に於いて必ずしも一定ではない。また、熱水活動が盛んになっている時期は、CBC以

外でもマウンド上で様々な熱水活動 (ブラックスモーカー、ホワイトスモーカー、クリアースモーカー) が観測されている。MODE'94 Leg.2で「しんかい6500」により調査がなされた後、同年秋にはODP Leg.158によってマウンド上とその周辺で計17もの掘削孔が掘削された (Humphris et al., 1995)。MODE'98 Leg.2では、熱水活動の長期観測の継続、掘削の影響の評価、マウンド上の熱水活動の多様性を検討するために熱水試料の採取を行った。

Rainbow熱水系は、ブルームの調査からその存在が予知され (German et al., 1996)、1997年に深海潜水艇 Nautilieによって発見された熱水系である (Fouquet et al., 1997)。噴出している熱水の温度は、360℃と報告されている。この熱水系のユニークな点は、それが超塩基性岩が露出している海底に存在しているということと、熱水が非常に気体成分に富んでいることである。まだ、発見されて間もない熱水系であるので、熱水の詳細な化学組成は不明な点が多い。そこでこの特殊なテクトニック・セッティングに存在する熱水の詳細な化学組成を知り、それを通常の玄武岩中に反応帯を持つ熱水系と比較するために、Rainbow熱水系でも熱水試料の採取を行った。

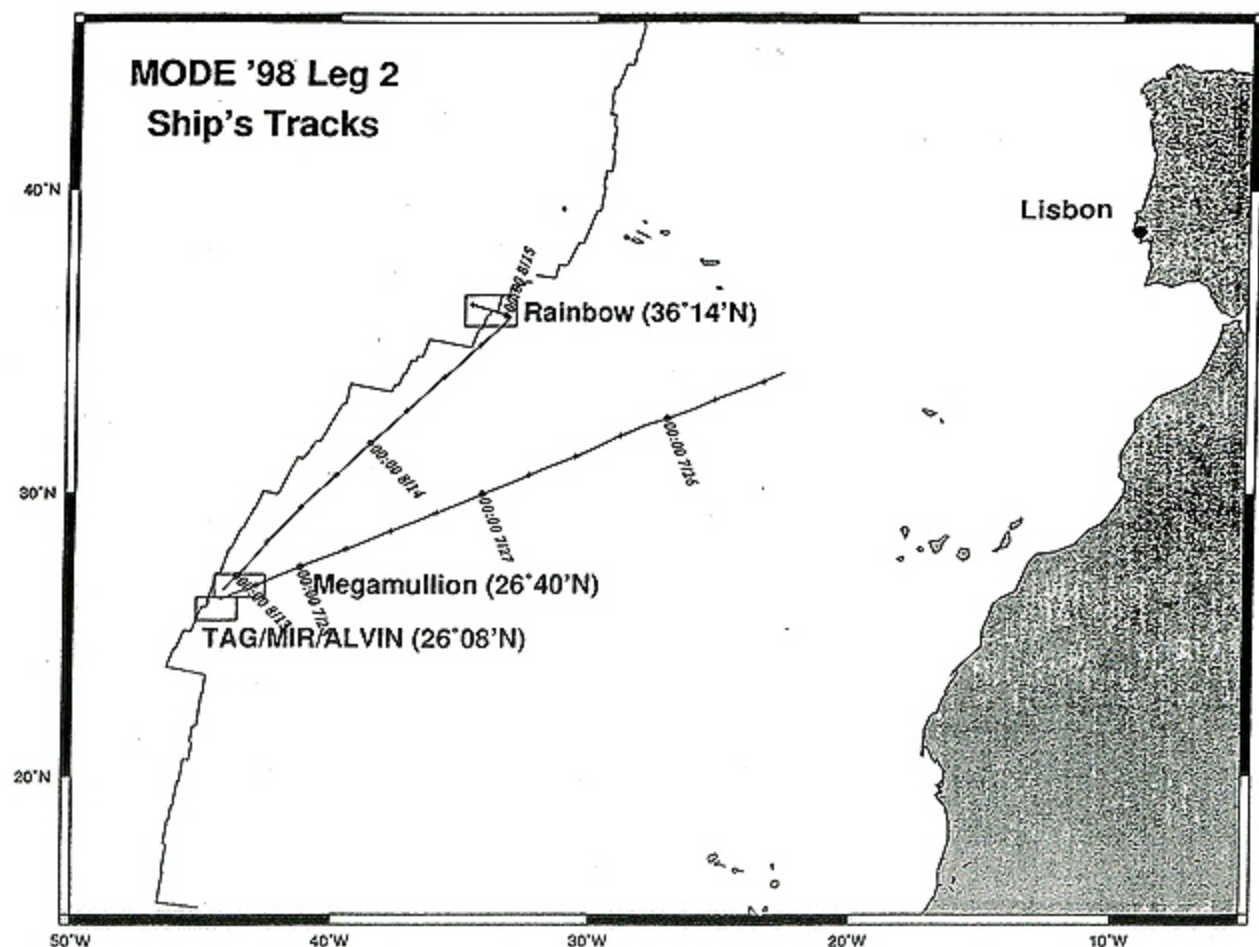


Fig. 1 The location of the TAG and Rainbow hydrothermal systems.
図1 TAGとRainbow熱水系の位置図

本論文では、主要成分の分析結果にもとづいて、TAG熱水系における熱水組成の長期間の安定性、マウンド上の熱水の多様性、Rainbow熱水系の熱水の化学的特徴について述べる。

2. 試料採取及び分析方法

TAG及びRainbow海底熱水系の位置を図1に示す。試料は、東京大学海洋研型ポンプ式採水器 (Tsunogai et al., 1994) により採取した。それぞれの成分の保存に適した試料の分配と処理は、採水後直ちに船上実験室で行った。pH、アルカリ度、溶存SiO₂濃度は試料が採取された日に船上実験室で分析した。それ以外の項目は、航海終了後、陸上の実験室で分析を行った。分析方法を表1に示す。

Table 1 Analytical Methods

表1 分析方法

Component	Method
pH	Potentiometry
Alkalinity	Potentiometry
Si(OH) ₄	Colorimetry
H ₂ S	Gravimetry
Cl	Mohr titration
Br	Ion Chromatography
SO ₄	Ion Chromatography
Li	AAS
Na	Charge Balance
K	AAS
Rb	AAS
B	ICP-AES
Ca	EDTA titration
Mg	EDTA titration
Sr	ICP-AES
Mn	ICP-AES
Fe	ICP-AES

3. TAG熱水系

TAG active mound上では、3種類の熱水を採取した。試料の採取位置を図2に示す。ブラックスモーカー熱水は、CBCから直接採水することが困難なため、マウンド東側で1994年のMODE'94 Leg.2以降に活動が活発化したブラックスモーカー (JAMSTECマーカー#72) から採水した。採水時に記録された最高温度は347℃であった (水深3,650m)。マウンド東部での熱水活動が活発になったこととともに、1994年には熱水の噴出が見られなかった下部テラスのKremlin地域でも熱水の噴出が観察された。Kremlin地域で噴出する256℃のクリアースモーカー (熱水の噴出は目視で確認できるが、硫化物の沈殿が生じていない透明な熱水の噴出口) の熱水を採取した (水深3650m)。上部テラスでもブラックスモーカーの活動以外に透明な熱水の噴出しが、上部テラス東側を

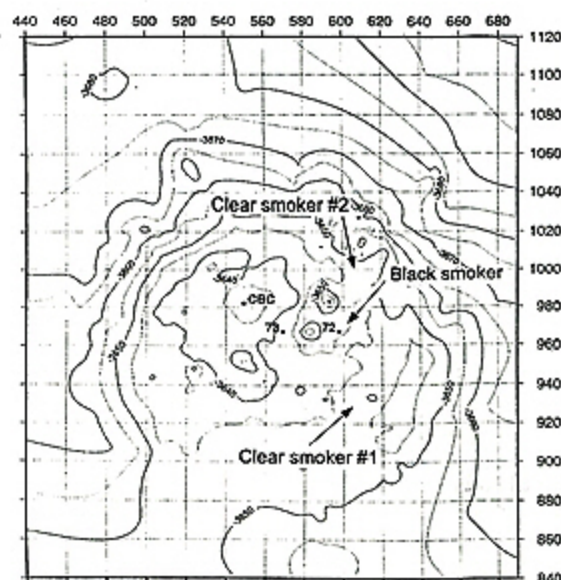


Fig.2 Sampling points of hydrothermal fluid at the TAG active mound, MAR 26°N.

図2 大西洋中央海嶺北緯 26° TAG active mound における熱水採取地点

中心に数多く見られ、これらの内から MODE'94 Leg.2で現場観測ステーション Manatee が置かれていた地点で219℃のクリアースモーカーの熱水を採取した (水深3,640m)。以下にブラックスモーカー熱水とクリアースモーカー熱水とをわけて結果を論じる。

3.1 ブラックスモーカー

ブラックスモーカーの熱水は、同一の熱水噴出口から3本採取した。いくつかの元素の濃度を縦軸にMg濃度を横軸にとった図を図3に示す。図に示す直線は、海水の組成を通るようにして引いた最小二乗法による直線である。最も良質な熱水試料のMg濃度は、4.8mM/kgであり、熱水端成分のMg濃度がゼロに近いことを示唆している。そこで従来から行われているのと同様に最小二乗法によって得られた直線をMg濃度ゼロまで外挿してブラックスモーカー熱水端成分の濃度を推定すると表2の最後の欄に示すようになる。表2には、1986年以降のブラックスモーカー熱水の分析結果も示した。Cl, Na, Si, Ca, K, Fe, Mnの濃度の時間変動を図4に示す。主要成分であるNaとClの濃度は、試料採取の方法や分析機関が異なることを考えると大きな変化があるようには見られない。Si, Ca, Kについても1986年のCa濃度のデータが若干低いのを除けば大きな変動は見られない。同様にFeとMnのデータを見ても、1986年のFeの濃度が低いものの、全体として大きな変動があるようには見受けられない。1986年の試料は、CBCから取られたものであるが、熱水活動が非常に活発であったために熱水の本流から採取ができずにチムニーから染み出しているもの

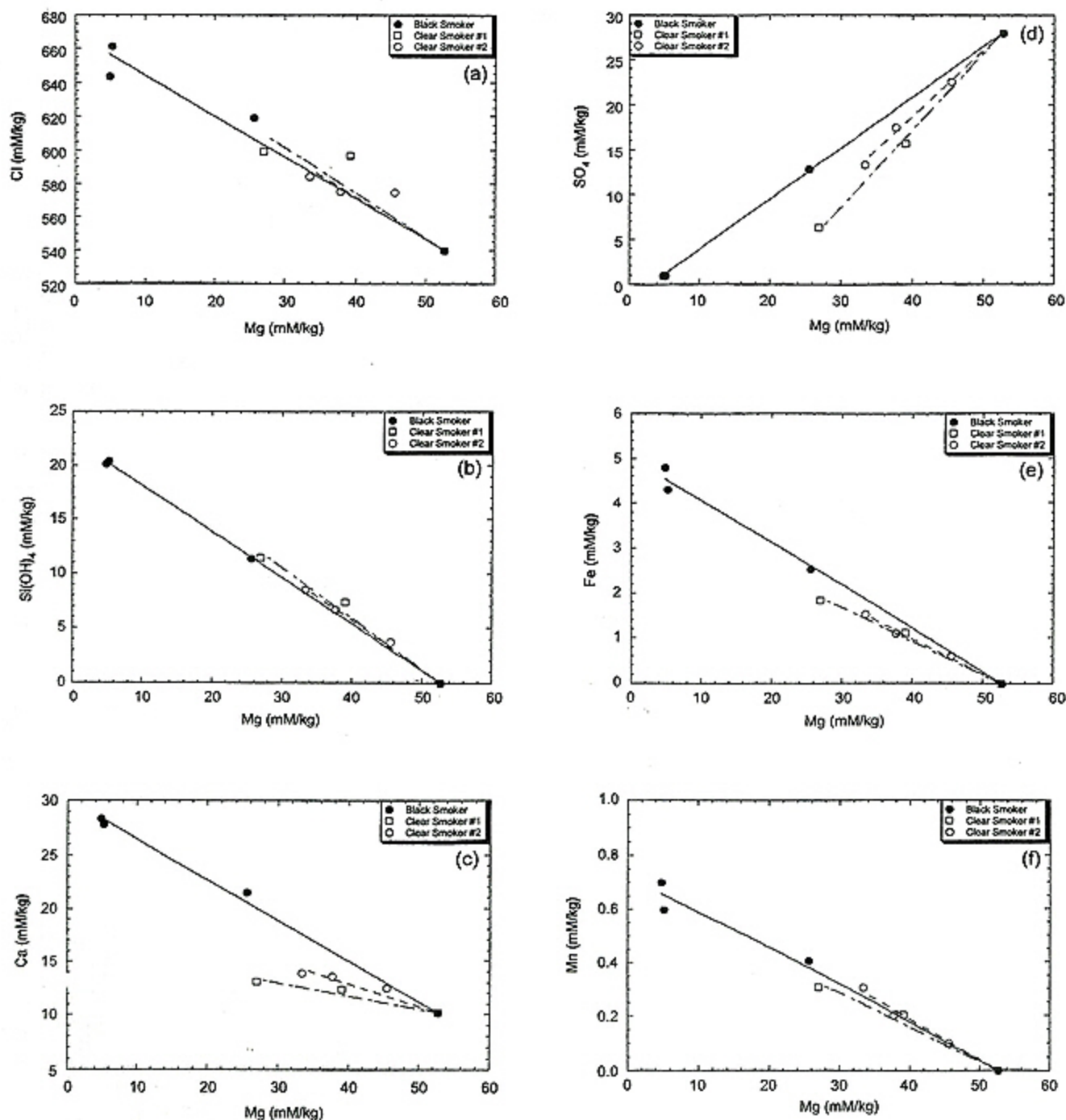


Fig. 3 Relationships between Mg and Cl, Si(OH)₄, Ca, SO₄, Fe, and Mn for hydrothermal fluids collected at the TAG active mound during MODE'98 Leg. 2

図3 MODE'98 Leg.2でTAG active moundで採取した熱水試料のMg濃度に対するCl, Si(OH)₄, Ca, SO₄, Fe, Mn濃度の関係

を採取したものである (Edmond et al., 1995)。このため海水との混合により鉄の硫化物や水酸化物と硬石膏 (CaSO₄) の沈殿を生じて、低いFeやCa濃度を与えている可能性がある。

こうした例外を除くと主成分の濃度は、1986年以降12年間に渡ってほとんど一定の値を示している。しかも、1994年の試料、1995年の1試料、1998年の試料はいずれも最も熱水の流量の大きなCBCではない上部テ

ラス上のチムニーから採取されたものである。このことは、TAG active mound全体にわたって供給されている高温の熱水の化学組成が12年間ほとんど変化していないことを示している。この原因として考えられるのは、(1) 海底下深部の岩石と海水起源の熱水の反応が起きている場所での反応条件 (温度、圧力、反応する岩石の組成など) に大きな変動がないこと、(2) 反応帯からactive moundまで熱水が上昇してくる過程で熱水の組成に変化

Table 2 Chemical Composition of TAG Black Smoker Fluid
表2 TAG ブラックスモーカー熱水の化学組成

components	1986BC ¹	1990BC ²	1993BC ²	1994 ⁴	1995BC ²	1995ODP ³	1998 ⁴
Temp.(°C)	290-320	360-366	363-364	320	369	369	347
pH		3.35		-3	3.8	3	3.4
Alkalinity (mM)		-0.45		-2.7			-0.8
Si(OH) ₄ (mM)	22	20.75		21.4	21	21	22.4
H ₂ S (mM)		2.5-3.5		>4	3	3	>6
Cl (mM)	659	636	633.5	675	645	643	669
Br (μM)				1066			
SO ₄ (mM)				-0.9			
Li (mM)	0.41		0.368	0.36	0.37	0.367	0.381
Na (mM)	584	557	543	549	553	549	577
K (mM)	17	12.1	18	18.5	20	20	16.4
Rb (μM)							9.2
B (μM)		356		416			297
Ca (mM)	26	30.3	30	30.7	31	30	30.3
Sr (μM)	99	103	99	100	99	100	95
Mn (mM)	1	0.68	0.689	0.67	0.677	0.666	0.72
Fe (mM)	1.64	5.59	5.18	4.23	5.04	5.45	5.00
Cu (μM)		120-150		>3	>83	>91	
Zn (μM)		46		<1	>36	>36	

¹ Edmond et al. (1995)
² Edmonds et al. (1996)
³ Gamo et al. (1996)
⁴ This study

を与える過程がないこと（反応帯から狭い流路を通して海水との混合などを経ずに熱水が active mound に供給されていること）、の2つである。ODP leg.158による掘削によってマウンド下部の熱水の feeder zone が狭い範囲にしか存在しないことが明らかにされている（Humphris et al., 1995）。このことは、上記（2）の点を支持するものと考えることができる。

ODP Leg.158では、17もの掘削孔が active mound とその周辺で掘削された。そのうちで最深のものは、深度125mであった（Humphris et al., 1995）。多くの掘削孔が掘削されたが、その深度が浅かったため、TAG active mound の本源的な熱水（ブラックスモーカー熱水）には掘削の影響が及ばなかったことが明らかである。

3.2 クリアスモーカー

クリアスモーカー熱水の化学組成も図3に示した。クリアスモーカー熱水の端成分がMg濃度ゼロであるとは考えられないが、比較のために従来の慣行に従ってMg濃度ゼロに外挿することによって得られる熱水の化学組成を表3に示した。

図3から明らかなように、クリアスモーカー熱水のCl、溶存SiO₂、Mn濃度は、ブラックスモーカー熱水とほぼ同じ直線上に並ぶ。このことは、クリアスモーカー熱水の起源となっている熱水がブラックスモーカー熱水と同じような温度と塩濃度、さらには、微量元素組成を持っていたことを示唆する。このことは、上述のブラックスモーカー熱水の組成が場所に依存しないことから支持される。しかし、Ca、SO₄、Fe濃度を見てみると、クリアスモーカー熱水はブラックスモーカー熱水が作る直線とは明らかに異なる勾配を持った直線上に並んでいる。これは、クリアスモーカー熱水がもともとブラックスモーカー熱水であったとしても、クリアスモーカーとして噴出にいたる過程において、何らかの過程によってこれらの成分に変化が生じたためと考えられる。さらに詳しく見ると、CaとSO₄の濃度では、2つのクリアスモーカー熱水がそれぞれ独立の直線上に並

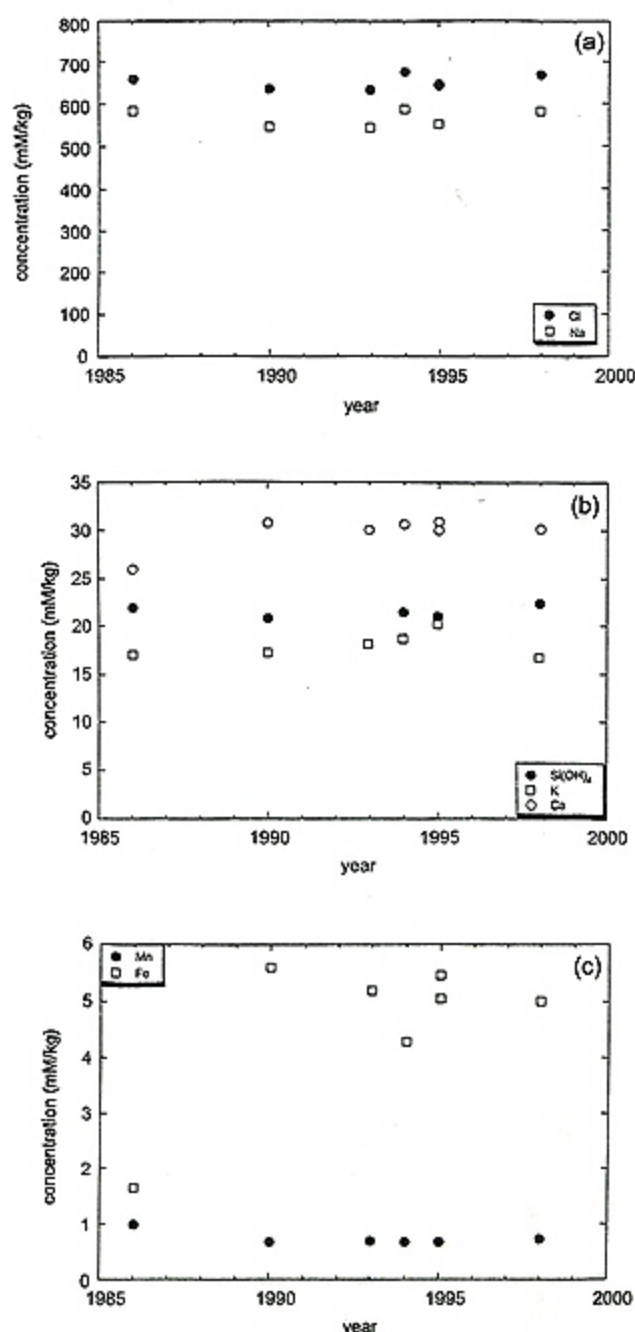


Fig.4 Change in chemistry of TAG black smoker fluid since 1986.
図4 大西洋TAG active mound ブラックスモーカー熱水組成の1986年以後の経年変化

ぶことが明らかである。同じMg濃度で比較するとき、クリアスモーカー#1のほうがクリアスモーカー#2よりも低いCaとSO₄濃度を持っている。クリアスモーカー#1の熱水が作る直線とブラックスモーカー熱水が作る直線の間の開きの差は、CaとSO₄で同じである。言い換えると、ブラックスモーカー熱水が作る直線からクリアスモーカー熱水が作る直線を作り出すためには、CaとSO₄を1:1で沈殿させれば良いことを示している。クリアスモーカー#2でも、やはり、ブラックスモーカー熱水が作る直線からクリアスモーカー#2の直線

Table 3 Chemical Composition of TAG White and Clear Smoker Fluids

表3 TAG クリアスモーカー熱水とホワイトスモーカー熱水の化学組成

components	1990WS ¹	1994WS ²	1998CS1 ³	1998CS2 ³
Temp.(°C)	273-301	270	256	219
pH	3	~2.5	3.1	4.6
Alkalinity (mM)	-1.1	-3.4	-3.5	-3.3
Si(OH) ₄ (mM)	19.1	19.4	22.1	22.4
H ₂ S (mM)	0.5	>4	0.5	0.5
Cl (mM)	659	660	634	640
Br (μM)		1035		
SO ₄ (mM)		-3.5		
Li (mM)		0.36	0.35	0.39
Na (mM)	579	552	573	571
K (mM)	17.1	17.9	21.2	18.5
Rb (μM)			8.65	8.27
B (μM)	388	400	322	336
Ca (mM)	27	27.9	15.5	20.2
Sr (μM)	91	102		
Mn (mM)	0.75	0.71	0.63	0.75
Fe (mM)	3.83	3.11	3.71	3.93

¹ Edmond et al. (1995)² Gamo et al. (1996)³ This study

を作るためには、CaとSO₄をほぼ同量、ただしクリアスモーカー#1の場合より少量沈殿させることが必要である。

以上の事から、クリアスモーカーの成因として、次のようなモデルが考えられる。クリアスモーカー熱水の起源がブラックスモーカー熱水であると仮定した場合、クリアスモーカー熱水を作り出す第1段階目の過程は、ブラックスモーカー熱水とマウンド内部に侵入した海水の混合である。単純に混合が起きただけで、その後には反応が起きなければ、クリアスモーカー熱水の化学組成は、図3のような図の上では、ブラックスモーカー端成分と海水を結ぶ直線上に混合比にしたがってプロットされるはずである。しかし、現実のクリアスモーカー熱水の組成は、Ca、SO₄、Feの濃度が図3でブラックスモーカー端成分と海水を結ぶ直線から低濃度側に外れている。CaとSO₄の濃度のずれは、硬石膏(CaSO₄)の沈殿が生じたとすると説明が可能である。また、Feの濃度の低下もブラックスモーカー熱水端成分と海水の混合の後に、Feが硫化鉄として沈殿したと考えることができる。つまり、クリアスモーカーを生じるために必要な第2の過程は、混合した熱水が過飽和になった鉱物を沈殿させる過程である。この過程によって、Ca、SO₄、Fe、H₂Sの濃度が低下する。そして、これ以外の成分の濃度を混合後変化させることなく海底上に噴出させているものが、クリアスモーカーであろう。

ブラックスモーカー熱水と海水との混合で生じると考えられているものにホワイトスモーカーがあり、その化学組成はブラックスモーカー熱水と比べて、pH、溶存SiO₂、Ca、及びFe濃度が低く、Zn濃度が高い(Edmond et al., 1995; Gamo et al., 1996)。このホワイトスモーカーの化学組成は、ブラックスモーカー熱水と海水の混合後、硬石膏、硫化鉄、オパールまたは石英の沈殿によ

て形成されると解釈されている(Edmond et al., 1995)。それでは、クリアスモーカーとホワイトスモーカーのどこが違うのであろうか。クリアスモーカーの溶存SiO₂濃度は、表3から明らかなようにブラックスモーカー端成分と海水との混合後、ほとんど変化していない。しかし、ホワイトスモーカーでは溶存SiO₂濃度が減少している。つまり、溶存SiO₂の重合や沈殿が起きているかどうかクリアスモーカーとホワイトスモーカーの違いである。この相違を作り出す原因の一つとして、2つの熱水の海底下での滞留時間の違いが考えられる。クリアスモーカー熱水では、海水との混合後瞬時に沈殿可能な硬石膏や硫化鉄を沈殿させた後、沈殿形成に時間のかかる溶存SiO₂の生成が起これない程度の滞留時間で海底に噴出しているであろう。これに対して、ホワイトスモーカーでは、海底下での滞留時間が長く、硬石膏や硫化物の沈殿のほかに、沈殿生成に時間のかかるSiO₂までが沈殿している。つまり、ホワイトスモーカー熱水のほうが、海底下における滞留時間が長い可能性がある。

以上の議論から明らかなように、クリアスモーカーやホワイトスモーカーは、海水とブラックスモーカー端成分の混合の後に反応を経て海底上に噴出しているものである。反応という第2の過程が存在するために、クリアスモーカーやホワイトスモーカー熱水の端成分を図3のような図から推定することは不可能である。したがって、表3に示したホワイトスモーカーやクリアスモーカー熱水の端成分組成は、そのような組成の熱水が存在することを意味していない。端成分組成の推定は、ブラックスモーカー端成分と海水の混合後の変化の化学的モデリングと現実の熱水の組成との比較検討からなされるべきであり、今後の課題である。

最後に、上述のクリアスモーカー熱水生成の考察から、クリアスモーカーやホワイトスモーカー熱水の生成に伴って、硬石膏や硫化鉄の沈殿がマウンド内部で生じていることが明らかとなった。硬石膏は、TAG active mound内部に多量に存在する鉱物である(Humphris et al., 1996)が、マウンド内部における硬石膏の生成について十分な考察がなされていない。クリアスモーカーやホワイトスモーカーの生成に伴って、マウンド内で硬石膏の生成が定常的に起きていることが明らかになったことは、TAG active moundのような巨大な硫化物マウンドの生成過程を考察する上で重要な鍵を与えることになるであろう。

4. Rainbow熱水系

Rainbow熱水系では、3つの熱水噴出孔から試料を採取した。熱水の採取位置を図5に示す。採取した熱水試料は、いずれもブラックスモーカーの熱水試料である。採取したときの最高温度は、362°C、316°C、358°Cである(水深はそれぞれ2,325m、2,310m、2,250m)。

熱水の端成分を推定するために横軸にMg濃度をとって縦軸にいくつかの成分を取った図を図6に示す。約200mにわたる分布域に存在する3つの熱水噴出孔から

熱水を採取したが、熱水相互の化学組成は非常に似ており、図6の上では3つの熱水噴出孔からの試料が1本の直線上に分布する。分析値を海水の値を通る直線で最小二乗回帰し、その直線をMg濃度ゼロへと外挿して求めた熱水端成分の組成を表4に示す。表4には、参考のために、大西洋の他の海底熱水系の熱水端成分組成と海水の化学組成をのせてある。Rainbow熱水系の熱水が大西洋の他の熱水系の熱水から異なるのは次のような点である。

- (1) 溶存SiO₂濃度が低い(温度が同じくらいの他の熱水の1/2以下)。
- (2) Ca濃度が高い(他の熱水系の2倍以上)。
- (3) Feの濃度が非常に高い(他の熱水系の4倍以上)。
- (4) 非凝縮性ガス(H₂, CH₄)の濃度が高い(> 6mM/kg)。
- (5) Cl濃度がこれまで知られている大西洋の海底熱水系では一番高い。

こうしたRainbow熱水の特異な化学的性質は、熱水を噴出している母岩が結晶質な超塩基性岩であることに起因していると思われる。(1) 溶存SiO₂濃度は、熱水の温度で石英の溶解度の半分以下の濃度しかない。結晶質な岩石は熱水との反応性が低く溶存SiO₂濃度が上昇しにくいことが実験的研究から明らかになっており(例えば、Mottl, 1983)、さらに超塩基性岩の場合、それが顕著である(Janecky and Seyfried, 1986)。(2) 超塩基性岩と

海水との反応では、海水中から取り去られるMgの代わりに熱水中へ溶け出してくる陽イオンの候補として、超塩基性岩の化学組成から考えて、Caが1番の候補である。実験的にも、実験時間が不十分ながら、熱水のCa濃度が上昇することが予測されている(Janecky and Seyfried, 1986)。(3) 超塩基性岩は鉄に富むため、反応した熱水は鉄に富むものとなる(Janecky and Seyfried, 1986)。他の熱水系に比べて4倍以上の鉄を含む熱水は大西洋で最も光の透過度の低いブルーム(German et

Table 4 Chemical Composition of Rainbow Black Smoker Fluid
表4 Rainbow ブラックスモーカー熱水の化学組成

components	Rainbow ¹	TAG ² 1990BC	TAG ³ 1998BS	MARK ² (Snakepit)	Lucky ⁴ Strike	Seawater
Temp.(°C)	316-362	360-366	347	335-350	197-328	4
pH	3.2	3.35	3.4	3.7-3.9	3.8-4.9	7.9
Alkalinity (mM)	-0.8	-0.45	-0.8	-0.24	-0.6-0.3	2.28
Si(OH) ₄ (mM)	8.0	20.75	22.2	18.2	12.8-17.5	0.013
H ₂ S (mM)	>1.2	2.5-3.5	>6	5.9	1.4-4.6	0
Cl (mM)	774	636	666	559	436-546	548
Br (μM)	1159			847		
SO ₄ (mM)	-1.5				-2.01-1.90	29.2
Li (mM)	0.32		0.381	0.845	0.29-0.42	26.5
Na (mM)	557	557	576	510	339-433	470
K (mM)	21.7	17.1	19.4	23.6	20.4-28.8	10.2
Rb (μM)	31.1		9.29	11		
B (μM)	232	356	297	520		
Ca (mM)	71.6	30.8	30.2	10	29.8-42.1	10.3
Sr (μM)	172	103		50	72-118	85
Mn (mM)	1.94	0.63	0.724	0.49	0.07-0.39	0.0
Fe (mM)	23.98	5.59	5.00	2.18	0.06-0.77	0.0

1 This study
2 Edmond et al. (1995)
3 Gamo et al. (1996)
4 Von Damm et al. (1998)

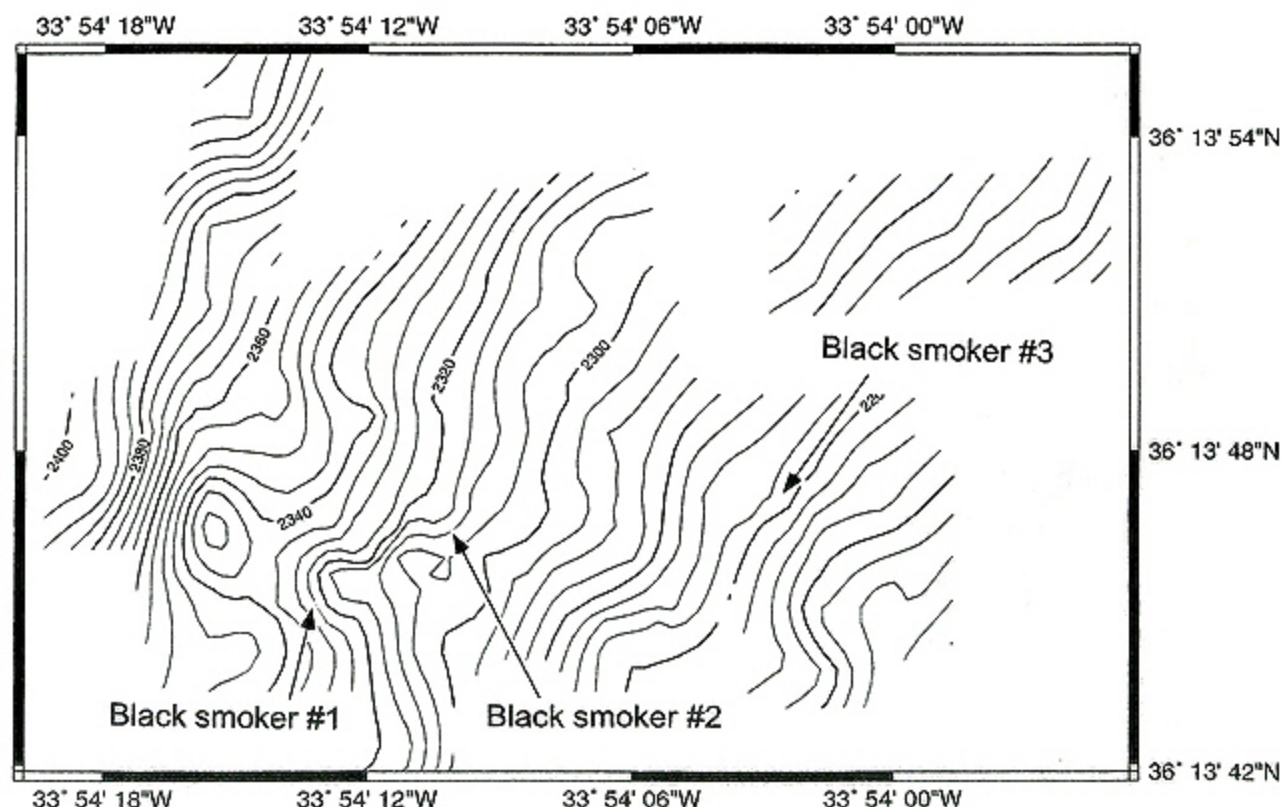


Fig. 5 Sampling points of hydrothermal fluid at the Rainbow hydrothermal system, MAR 36°N.
図5 大西洋中央海嶺北緯36° Rainbow 海底熱水系における熱水採取地点

al., 1996) を作るもととなっている。(4) 超塩基性岩に含まれている 2 価鉄は、熱水を非常に還元的にすることができる。超塩基性岩中に多量に存在するカンラン石と人工海水を用いた実験的研究でも、 H_2 と CH_4 の発生が確かめられている (Berndt et al., 1996)。(5) Rainbow 熱水系では、超塩基性岩が蛇紋岩化作用を受けている。蛇紋岩化作用は超塩基性岩への加水反応であり、それによって塩濃度が上昇している可能性がある。

微量元素濃度から、Rainbow 熱水系の熱水が海底下での気液分離の影響を被っているという指摘がある (Douville et al., 1997)。しかし、大西洋で発見された海底熱水系の中で最も塩濃度が高いということは、気液分離した蒸気相が熱水の形成に関係しているという考えと調和的ではない。既に述べたように Rainbow 熱水系の特異な性質は、海底下での気液分離を考えるよりは、超塩基性岩の蛇紋岩化作用によって、その主要部分が形成されたものと考えれば塩濃度が高く、かつ、非凝縮性ガスに富むという Rainbow 熱水の性質を統一的理解することが可能である。蛇紋岩化作用は、発熱反応であるので、マグマの存在なしに、それだけで熱水系を駆動することができるという指摘がある (Douville et al., 1997)。Rainbow 熱水系は、熱水系を駆動する熱源から熱水の化学的性質までそのすべてを超塩基性岩の蛇紋岩化作用に依存している熱水系と言うことができるであろう。

Rainbow 海底熱水系は、海嶺の拡大速度が遅いためにマントルを構成する超塩基性岩が海底に露出するという特殊なテクトニック・セッティングにあって成立しているこれまでに発見の例を見ない熱水系である。大西洋やインド洋などの低速拡大軸にあっては、Rainbow 熱水系と同様な環境が成り立ち得る。今後、低速拡大軸の調査が進めば、Rainbow 熱水系と同様な性質を持つ熱水の発見の可能性があるのである。

5. 結 論

MODE'98 Leg.2 では、大西洋中央海嶺 TAG 熱水系と Rainbow 熱水系から試料を採取した。その分析結果から以下のことが明らかになった。

- (1) TAG active mound では、1986 年より 12 年間にわたって、ブラックスモーカーの活動が継続しており、その間、熱水の化学組成に大きな変化は見られない。マウンド上の異なるブラックスモーカーの熱水にも化学組成上の違いは見られない。以上の事は、熱水の化学組成が決定される海底下の反応帯における熱水と岩石の反応条件にこの 12 年間大きな変化がないことと、反応帯から熱水が狭い流路を通して化学組成を変化させることなくマウンド全体に供給されていることを意味する。
- (2) クリアースモーカー熱水の化学組成は、それがマウンド内部でブラックスモーカー熱水と海水との混合で形成された後、マウンド上に噴出する前にマウンド内で硬石膏と硫化鉄を沈殿させていることを示している。クリアースモーカーとホワイトスモーカー

の活動は、マウンド内で硬石膏を定常的に生成させており、巨大な硫化物マウンドの生成史を考えるにあたって無視できないポイントである。

- (3) Rainbow 海底熱水系の熱水は、Cl, Ca, Fe, 非凝縮性ガス濃度が他の海底熱水系熱水と比べて高く、溶存 SiO_2 濃度が低いという化学的特徴を持っている。熱水系の周囲では、海底に超塩基性岩が露出している。熱水の特異な化学的性質は、熱水が超塩基性岩の蛇紋岩化作用に伴って形成されたものとして統一的理解することができる。

謝 辞

潜航調査に際しては、「しんかい 6500」潜航チームの皆様及び「よこすか」の乗組員の皆様には、多大なご協力を頂きました。また、試料の採取に際しては、MODE'98 Leg.2 の乗船研究者の皆様のご協力は不可欠なものでした。記して深く感謝いたします。

引用文献

- Berndt, M.E., D.E. Allen and W.E. Seyfried, Jr. (1996) Reduction of CO_2 during serpentinization of olivine at 300°C and 500 bars. *Geology*, 24, 351-354.
- Douville E., J.L. Charlou, I.P. Donval, I. Knoery, Y. Fouquet, P. Bienvu, P. Appriou and the FLORES Cruise Scientific Party (1997) Trace elements in fluids from the new Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR): a comparison with other Mid-Atlantic Ridge fluids, *EOS*, 78, F832.
- Edmond, J.M., A.C. Campbell, M.R. Palmer, G.P. Klinkhammer, C.R. German, H.N. Edmonds, H. Elderfield, G. Thompson, and P.A. Rona (1995) Time series studies of vent fluids from the TAG and MARK sites (1986, 1990) Mid-Atlantic Ridge: a new solution chemistry model and a mechanism for Cu/Zn zonation in massive sulphide orebodies. In *Hydrothermal Vents and Processes*, edited by L.M. Parson, C.L. Walkerm, and D.R. Dixon, *Geol. Soc. Spec. Publ. No.87*, 77-86.
- Edmonds, H.N., C.R. German, D.R.H. Green, Y. Huh, T. Gamo and J.M. Edmond (1996) Continuation of the hydrothermal fluid chemistry time series at TAG, and the effects of ODP drilling. *Geophys. Res. Lett.* 23, 3487-3489.
- Fouquet, Y., J.L. Charlou, H. Ondreas, J. Radford-Knoery, J.P. Donval, E. Douville, R. Appriou, P. Cambon, H. Pell, J.Y. Landur, A. Normand, E. Poncevera, C. German, L. Parson, F. Barriga, I. Costa, J. Relvas, A. Robeiro (1997) Discovery and first submersible investigations on the Rainbow hydrothermal field on the MAR (36°14'N), *EOS*, 78, F832.
- Gamo, T., H. Chiba, H. Masuda, H.N. Edmonds, K. Fujioka, Y. Kodama, H. Nanba and Y. Sano (1996) Chemical characteristics of hydrothermal fluids from the TAG mound

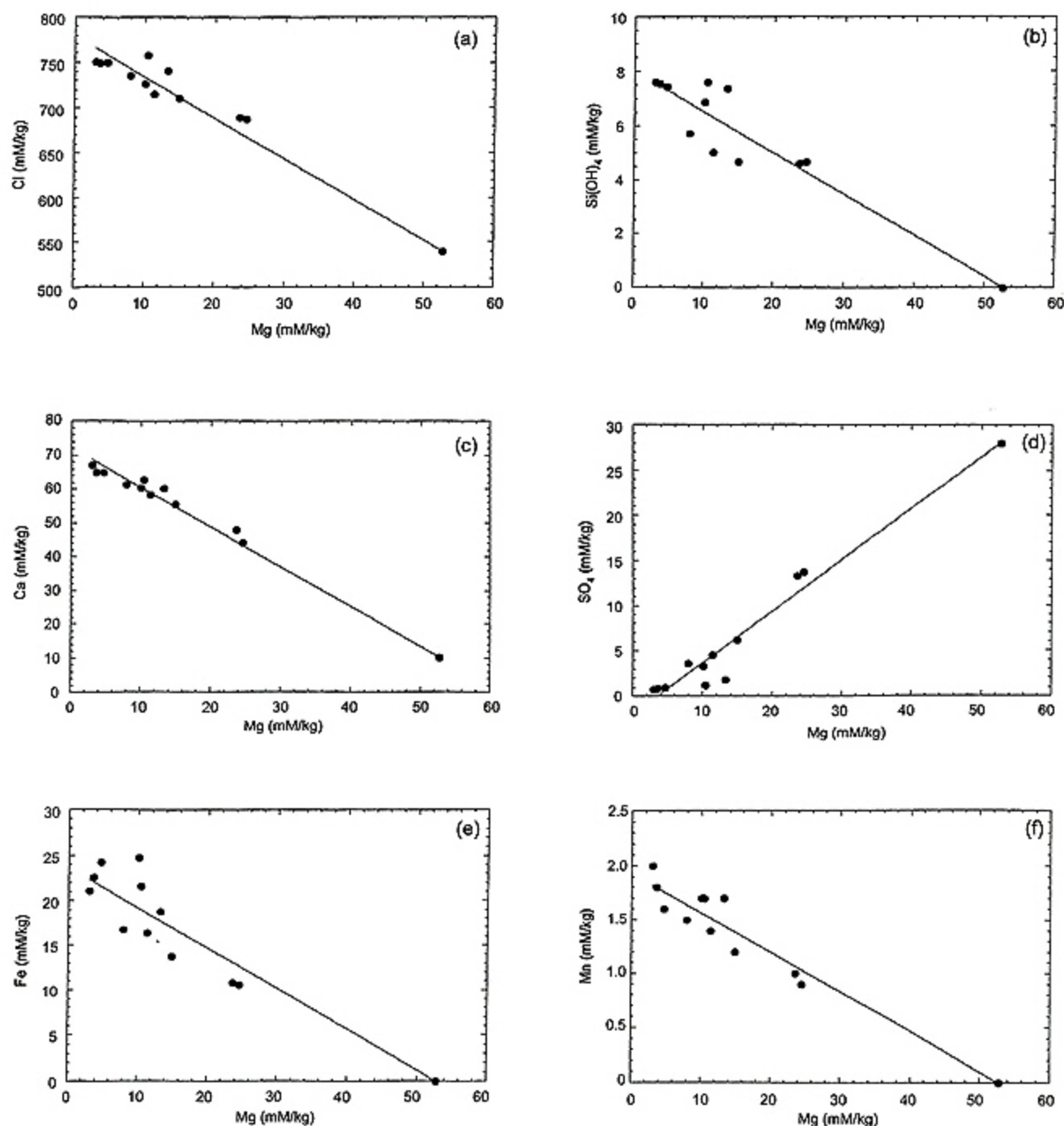


Fig. 6 Relationships between Mg and Cl, Si(OH)₄, Ca, SO₄, Fe, and Mn for hydrothermal fluids collected at the Rainbow hydrothermal system during MODE'98 Leg.2

図6 MODE'98 Leg.2でRainbow熱水系で採取した熱水試料のMg濃度に対するCl, Si(OH)₄, Ca, SO₄, Fe, Mn濃度の関係

of the mid-Atlantic Ridge in August 1994: implications of spatial and temporal variability of hydrothermal activity. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3483-3486.

German, C., G.P. Klinkhammer and M.D. Rudnicki (1996): The Rainbow hydrothermal plume, 36°15'N, MAR. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2979-2982.

Janecky, D.R. and W.E. Seyfried, Jr. (1986) Hydrothermal serpentinization of peridotite within the oceanic crust:

Experimental investigation of mineralogy and major element chemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1357-1378.

Humphris, S.E., P.M. Herzig, D.J. Miller, J.C. Alt, K. Becker, D. Brown, G. Brügmann, H. Chiba, Y. Fouquet, J.B. Gemmell, G. Guerlain, M.D. Hannington, N.G. Holm, J.J. Honnorez, G.J. Iturrino, R. Knott, R. Ludwig, K. Nakamura, S. Petersen, A.-L. Reysenbach, P.A. Rona,

- S. Smith, A.A. Sturz, M.K. Tivey, and X. Zhao (1995) The internal structure of an active sea-floor hydrothermal deposit, *Nature*, **377**, 713-716.
- Mottl, J.M. (1983) Hydrothermal processes at seafloor spreading centers: application of basalt-seawater experimental results, In *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers*, edited by P.A. Rona et al., Plenum Press, New York, 199-224.
- Rona, P.A., G. Klinkhammer, T.A. Nelson, J.H. Trefry, and H. Elderfield (1986) Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, **321**, 33-37.
- Rona, P.A. and R. P. Von Herzen (1996) Introduction to special section on measurements and monitoring at the TAG hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge 26°N, 45°W, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3427-3430.
- Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, T. Gamo, K. Watanabe, T. Kajimura, S. Kanayama and H. Sakai (1994): Peculiar feature of Suiyo Seamount hydrothermal fluids, Izu-Bonin Arc: Differences from subaerial volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **126**, 289-301.
- Von Damm, K.L., A.M. Bray, L.G. Buttermore and S.E. Oosting (1998) The geochemical controls on vent fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 521-536.

(原稿受理 : 1999 年 8 月 18 日)