WMARK地域のトランスフォーム断層帯に産出する海洋下部地殻及び上部マントル物質

石塚 英男[*1] 藤本 博巳[*2] ウィルフレッド・ブライアン[*3] 富士原敏也[*2]
古田 俊夫[*4] ピーター・ケレメン[*3] 木下 肇[*5] 小林 和男[*6]
松本 剛[*7] 竹内 章[*8] モーリス・タイビー[*3]

JAMSTEC-WHOIの共同研究である「よこすかーしんかい6500」の船上ー潜航調査は，1994年の6月から7月にかけて，大西洋中央海嶺（Mid-Atlantic Ridge: MAR）において最大級の規模を持つケイン・トランスフォーム断層（Kane transform fault）の西部地域（WMARK地域）で行われた。期間中に遂行された15回の潜航調査の結果，この地域には海洋地殻（深海性堆積物・玄武岩・ハンレイ岩）及び上部マントル（カンラン岩）を構成するすべての岩相が海底面に分布することが明らかになった。特に，断層帯は基本的にはダイアピル的に上昇してきた蛇紋岩で充填されており，その中に多種多様の海洋下部地殻（各種ハンレイ岩）及び上部マントル（各種カンラン岩）物質がブロックとして捕獲されていることが明らかになった。ハンレイ岩の多くは角閃岩相程度の延性変形をともなった海洋底変成作用を受けており，さらに，一部試料では後の断層運動に関連した緑色片岩相程度の脆性変形をともなった変成作用を受けている。また，カンラン岩の一部にはマイロナイト様の構造を呈するものがある。これらのことは，この地域の海洋下部地殻及び上部マントル物質は岩石学的には大西洋中央海嶺の他海域のものと基本的には同様であるが，上部マントルの構造度や下部地殻の変形・変成作用の点で少し異なるということを示している。

キーワード：WMARK，トランスフォーム断層，蛇紋岩，下部地殻，上部マントル

＊1 高知大学理学部
＊2 東京大学海洋研究所
＊3 ウッズホール海洋研究所
＊4 川崎地質株式会社
＊5 東京大学地震研究所
＊6 海洋科学技術センター
＊7 海洋科学技術センター深海研究部
＊8 富山大学理学部
＊9 Department of Geology, Kochi University
＊10 Ocean Research Institute, University of Tokyo
＊11 Woods Hole Oceanographic Institution
＊12 Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
＊13 Earthquake Research Institute, University of Tokyo
＊14 Japan Marine Science and Technology Center
＊15 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center
＊16 Department of Earth Science, Toyama University

Oceanic Lower Crust and Upper Mantle Materials in Transform Fault Zone of WMARK

Hideo ISHIZUKA*9 Hiromi FUJIMOTO*10 Wilfred BRYAN*11
Toshiya FUJIWARA*10 Toshio FURUTA*12 Peter KELEMEN*11
Hajimu KINOSHITA*13 Kazuo KOBAYASHI*14
Takeshi MATSUMOTO*15 Akira TAKEUCHI*16
Maurice TIVEY*11

The joint-research of JAMSTEC and WHOI by using "Yokosuka-Shinkai 6500" has been done at the WMARK (Western Mid-Atlantic Ridge of Kane transform fault) area in June to July of 1994; this area represents one of the huge transform fault zones along MAR. Fifteen dives were operated perfectly during the cruise, and many rock samples derived from oceanic crust (pelagic sediments, basalts and gabbros) and upper mantle (peridotites) were collected. Most importantly, it is revealed that the transform fault zone is entirely occupied by serpentinites in which gabbros and peridotites are included as blocks. The serpentinites may have intruded as diapir into the transform fault zone. The gabbros suffered the ocean-floor metamorphism of the amphibolite facies closely associated with the ductile deformation, of which some further underwent the greenschist facies metamorphism as well as the brittle deformation probably related with the fault movement. The peridotites are locally mylonitic in texture, suggesting the high-temperature deformation in the upper mantle. The petrographical descriptions show that the oceanic lower crust and upper mantle of the WMARK area are essentially similar to those of other areas in MAR, but in a strict sense there are slight differences in (1) degree of depletion of mantle peridotites and (2) nature and style of metamorphism and deformation in gabbros.

Key words: WMARK, Transform fault, Serpentinite, Lower crust, Upper mantle

1. はじめに

今日，海洋下部地殻及び上部マントルの構成物質については，オフィオライトや深海掘削の研究から，それぞれハンレイ岩及びカンラン岩から成るというモデルが一般に受け入れられている。しかし，このモデルがどこの海洋地域でも成り立つか否かについては問題がある。最近の研究でも，拡大速度の遅い大西洋中央海嶺系の大規模な横ずれ断層帯であるトランスフォーム断層近傍（例えば，ケイン・トランスフォーム断層（Kane transform fault）の東部地域；Cannat et al., 1995）において，海洋地殻は直接蛇紋岩から構成されており，オフィオライトに見られるような層序は存在しないということが報告されている。このことは，海洋地殻におけるHessモデル（Hess, 1962）の再来を意味するものであり，トランスフォーム断層帯近傍は通常の海洋地殻とは異なるらしいという話題を提供するきっかけにもなっている（Snow, 1995）。さらに，このことは，以前から海洋下部地殻や上部マントル物質がトランスフォーム断層帯からしばしばドレッジされていた（例えば，Hebert et al., 1983; Honmorez et al., 1984; Auzende et al., 1989）こととも関係があるらしい。いずれにしても，今日，トランスフォーム断層帯の精査は急を要する研究テーマになっている。

このようなことを背景に，海洋科学技術センター（JAMSTEC）と米国ウッズホール海洋研究所（WHOI）の共同研究である『よこすか－しんかい6500』の船上－潜航調査の第1節（Leg-1）の航海が1994年6～7月に行われた。調査海域は大西洋中央海嶺（Mid-Atlantic

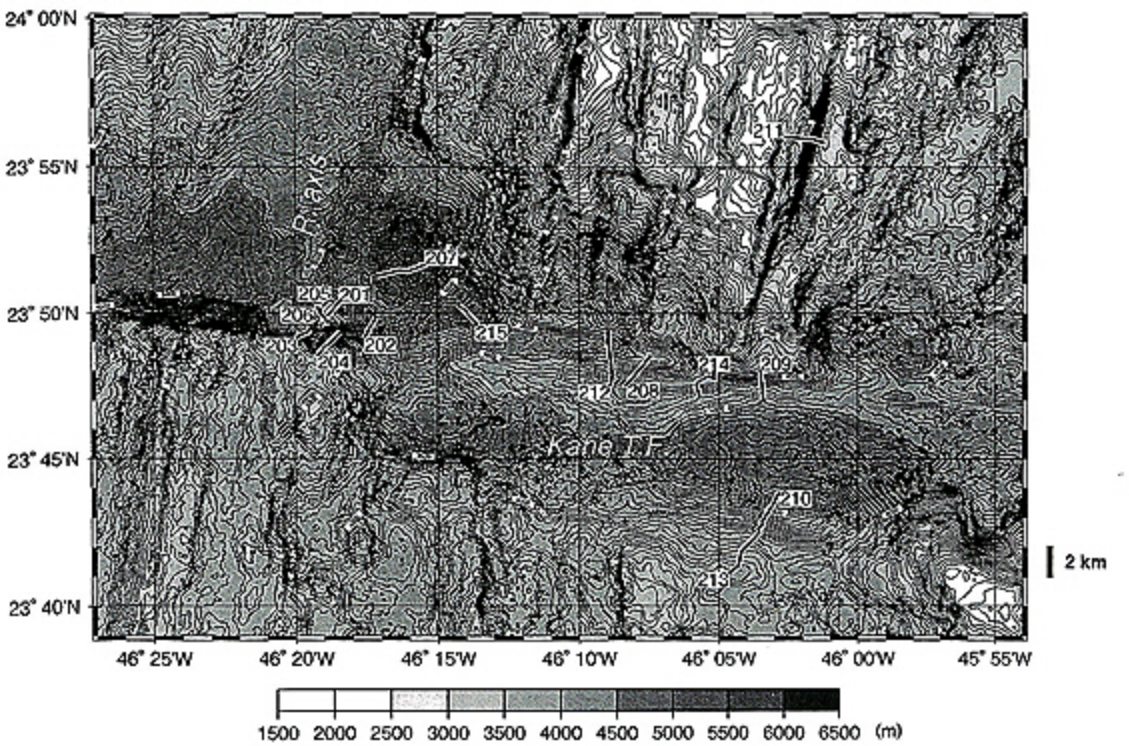

図1　WMARKの海底地形図と各潜航における「しんかい6500」の航跡
Fig. 1　Submarine topography and "Shinkai 6500" dive tracks in WMARK.

Ridge: MAR）において最大級の規模を持つケイン・トランスフォーム断層の西部地域（WMARK地域）を中心とした海域である。MARK地域，特にその東部地域近傍は従来から潜水調査船を使用した詳しい調査がなされており（例えば，アルビン号：Karson et al., 1987；ノチール号：Mevel et al., 1991），海洋下部地殻や上部マントル物質が多く採取されているところでもある。

2．地形と岩相分布

今航海において，潜航調査はWMARK地域をサイト－1と－2に分けて，計15潜航（#201～#215）行われた（図1）。サイト－1は，北側の大西洋中央海嶺の南方延長部である新期火山帯（Neo-Volcanic Zone）が少し東方に屈曲し，トランスフォーム断層で切られている場所の周辺域である。新期火山帯の東西には水深6,000m級の深み（Nodal Deep）が発達している。トランスフォーム断層は急峻な断層崖の繰り返しで特徴づけられ，断層崖と断層崖は東西走向の割れ目で境されている。断層崖全体の落差は1,000m以上であり，その頂部は堆積物に覆われた平坦面が発達している。サイト－2は，サイト－1の少し東側で，北側に内角高地（Inside Corner High）と呼ばれる高まりが存在し，その南側はトランスフォーム断層の幅が広くなり，断層帯とでも呼べる地形になっている場所の周辺域である。内角高地は北側ほど浅くなっている。また，断層帯の中には尾根状の高まりとトラフ状のくぼ地が東西走向で発達している。内角高地と断層帯の境界部には蛇紋岩起源の断層粘土（fault gouge）が観察・採取され，活動的トランスフォーム断層の存在が確認された。これら両サイトからは次のような特徴を持つ多量の岩石試料が採取された。

サイト－1：このサイトの北側に存在する新期火山帯は枕状溶岩とそれを貫く小量の輝緑岩で構成されており，両岩相とも非常に新鮮である。特に，枕状溶岩地域では様々な枕状構造が認められる。しかし，枕状溶岩地域にステップ状に発達しているテラス部には枕状玄武岩が角レキ化した岩相が分布する。また，玄武岩の一部には非常に大きな（長径5mm前後）斜長石斑晶に富んだものがある。トランスフォーム断層の崖は新期火山帯と同様に枕状玄武岩と輝緑岩で構成されているが，変質の程度ははるかに高く，しばしば厚いマンガン酸化物の被膜

を伴う。また，断層崖を構成する岩相には稀に断層運動で形成された条線や溝が発達する鏡肌（slickenside）が認められ，断層運動を解析する重要なデータを提供している。一方，海洋下部地殻を構成していたと思われる試料は#202と#215の潜航で小量得られた。これらの試料は断層崖の手前に位置する小丘の頂部及びテラス部から得られたもので，岩相としてはいずれもハンレイ岩である。

サイトー2：このサイトの北側に位置する内角高地の岩相は枕状溶岩を主体とするものであるが，所々に発達するテラス部では枕状玄武岩が角レキ化した岩相が卓越する。また，浅部域では枕状溶岩を覆うように多種の有孔虫を含む石灰質堆積物が多量に分布する。玄武岩の岩相はサイトー1の新期火山帯と基本的に同様であるが，変質の程度ははるかに高く，マンガン酸化物の被膜の発達も認められる。南側に位置するトランスフォーム断層帯は基本的には蛇紋岩より構成されている。この蛇紋岩は非常に脆く，しばしば風化・変質により砂質～泥質物になっている。この蛇紋岩中にはハンレイ岩及びカンラン岩が大小様々なブロックとして取り込まれて産出しており（写真1），特に，くぼ地ではブロックの集積場とでも呼べるような状況である（写真2）。本航海では#208, #209, #210, #212, #213, #214の各潜航でこのようなブロックの試料を多数採取した。これらのブロックは海洋下部地殻および上部マントル物質を構成していたと思われる岩相で，蛇紋岩中に取り込まれたある種の捕獲岩（xenolith）であろう。なお，蛇紋岩中には玄部岩のブロックも存在するが，それらは内角高地から落下・供給されたものである。

3．岩相記載

WMARK地域では上述したように多種類の岩相が分布しているが，それらの中で本報告に関連する岩相（表1）については以下にさらに詳しく記載する。また，これら岩相の代表的な顕微鏡写真を末尾にまとめて掲載した（写真11－15）。

3．1　ハンレイ岩

採取されたハンレイ岩の多くは単体のブロックであるが，#202潜航で採取されたハンレイ岩は蛇紋石基質中に径数cmの礫として含まれていたものである（写真3）。岩質としては，中粒～粗粒の新鮮な塊状岩（写真4）で，試料の規模（数十cmオーダー）では層状構造等は認められない。鉱物組み合わせとしては次の3種類が認められた。

（G1）カンラン石＋斜長石＋単斜輝石

（G2）カンラン石＋斜長石＋単斜輝石＋斜方輝石

（G3）斜長石＋単斜輝石＋斜方輝石

これらの鉱物の中で，カンラン石と斜長石は自形結晶として産出し，単斜輝石は他形結晶として産出することが多い。斜方輝石はカンラン石を含む（G2）の組み合わせでは，カンラン石の周りで反応縁を形成したり，単斜輝石中でラメラを形成したりして産出する。カンラン石のない（G3）の組み合わせの場合は，斜方輝石は他形結晶として産出する。これらのことから，ハンレイ岩の鉱物の晶出順序は，カンラン石＋斜長石→単斜輝石→斜方輝石であったことが推定され，カンラン石と斜方輝石は反応関係にあったと思われる。

ところで，ハンレイ岩試料は程度の差こそあれ変成作用を受けており，角閃石，変成斜長石（火成斜長石よりNa成分に富んでいる），変成単斜輝石（火成単斜輝石よりCa成分に富んでいる）などの変成鉱物が広く認められる（写真5）。これらのなかで，角閃石は火成単斜輝石の一部あるいは全部を置き換えて産することが多く，変成斜長石は火成斜長石を一部あるいは全部を置き換えて産することが多い。変成単斜輝石は火成単斜輝石の周縁部を角閃石とともに置き換えて産出する。これら変成鉱物はハンレイ岩の火成組織を完全に改変するほどには再結晶していないが，一部試料では局所的に片麻状組織が発達していることもある。一方，一部試料では熱水が通ったと思われる脈や割れ目が発達している（写真6）。この脈や割れ目は特に再結晶作用が進んでおり，角閃石や緑泥石やまれにブドウ石の粗粒結晶が形成されている。これらのことから，ハンレイ岩試料は角閃岩相あるいは緑色片岩相程度の変形・変成作用を受けていることが推定される。なお，多くの試料においてその表面部が変色して粘土鉱物等を形成している場合があるが（写真4），これは上述の海洋底変成作用というよりはもっと低温での海底風化作用のためであろう。

3．2　カンラン岩

採取されたカンラン岩は多かれ少なかれ蛇紋岩化作用を受けており（写真7），なかには蛇紋岩を核にしてマンガン酸化物が発達している試料も見られる（写真8）。しかし，初生鉱物が残存している試料もいくつか含まれており，それらの鏡下観察より次の2種類の鉱物組み合わせが認められた。

（P1）カンラン石＋斜方輝石＋スピネル

（P2）カンラン石＋斜方輝石＋単斜輝石＋スピネル

これら鉱物の相互の関係や組織は蛇紋岩化作用の影響で正確に判別するには至っていないが，鉱物組み合わせ

表1　WMARKから「しんかい6500」により採集された海洋下部地殻及び上部マントル物質の採集位置，深度及び岩相
Table 1　Localities, depths and rock-types of oceanic lower crust and upper mantle materials collected from WMARK by using "Shinkai 6500"

No.	Latitude	Longitude	Depth	Remarkes
202-2-2	23°49.30'N	46°17.47'W	4728	gabbro clasts included in serpentinite
208-2-1	23°48.29'N	46°07.68'W	4499	serpentinized peridotite (tectonite)
-3-1	23°48.24'N	46°07.72'W	4463	gabbro
-3-2	"	"	"	serpentinized peridotite (tectonite)
-3-3	"	"	"	serpentinized peridotite
-3-4	"	"	"	serpentinized peridotite
-4-1	23°48.01'N	46°07.93'W	4305	serpentinized peridotite (tectonite)
-4-2	"	"	"	serpentinized peridotite (tectonite)
-5-1	23°47.95'N	46°07.97'W	4243	serpentinized peridotite (tectonite)
-6-1	23°47.59'N	46°08.30'W	4029	serpentinized peridotite
209-1-2	23°47.37'N	46°03.46'W	4354	sedimentary serpentinite
210-1-1	23°43.75'N	46°02.90'W	4771	coarse-grained serpentinized peridotite
-2-1	23°43.47'N	46°03.05'W	4232	altered schistose serpentinite
-3-1	23°42.82'N	46°03.48'W	4205	serpentinized peridotite/pelagic sediments
-4-1	23°42.79'N	46°03.51'W	4159	serpentinized peridotite/MnO overgrowth
-4-2	"	"	"	serpentinized peridotite/MnO overgrowth
212-1-1	23°47.76'N	46°08.99'W	4288	metamorphosed gabbro
-2-1	23°47.53'N	46°08.99'W	4262	gabbro
-3-1	23°47.40'N	46°09.08'W	4177	metamorphosed gabbro
-3-2	"	"	"	brecciated metamorphosed gabbro
-3-3	"	"	"	fragments of metagabbro
213-1-1	23°42.61'N	46°03.59'W	4047	serpentinized harzburgite
-2-1	23°42.51'N	46°03.55'W	4008	schistose serpentinite
-3-1	23°42.35'N	46°03.70'W	3852	serpentinized harzburgite
214-1-1	23°47.18'N	46°05.71'W	4272	harzburgite or lherzolite (tectonite)
-3-1	23°47.43'N	46°05.80'W	4071	mylonitic peridotite
-4-1	23°47.55'N	46°05.78'W	3974	serpentinite fragments from fault gouge
-6-1	23°47.84'N	46°05.37'W	4071	serpentinized peridotite
-7-1	23°47.77'N	46°05.18'W	4054	mylonitic metagabbro
215-4-1	23°49.67'N	46°13.63'W	5016	gabbro

から判断すると，採取試料はハルツバージャイト～レルゾライト相のカンラン岩となる。なお，蛇紋岩化作用はカンラン石と斜方輝石で顕著に認められ，それぞれ蛇紋石によるメッシュ組織とバスタイト組織を呈することが多い。

一方，カンラン岩試料の中には著しい変形作用を受けたと思われるものが存在する(写真9)。これら変形カンラン岩はマイロナイト様組織を呈し，特に，鏡下では斜方輝石が伸ばされ曲げられた組織が顕著に観察される。このような変形は延性変形として分類されるもので，岩石が高温条件下で破壊されることなく変形（延性変形）したときにできるもので，この岩石が恐らく上部マントル内での高温変形を経験してきていることを示唆するものである。なお，微細な外来岩片（ハンレイ岩やカンラ

表2　WMARKのハンレイ岩を構成する鉱物の代表的な化学分析値
Table 2　Representative mineral analyses of gabbros in WMARK.

No.	202-2-2A (gabbro)				202-2-2B (gabbro)			
Mineral	Plag	Cpx	Opx	Amp	Plag	Cpx	Opx	Amp
SiO2	53.50	52.16	55.12	53.44	53.74	51.21	53.72	50.10
TiO2	0.05	0.66	0.31	0.13	0.03	1.15	0.39	0.11
Al2O3	29.20	2.44	1.25	3.39	29.12	2.84	1.34	6.37
Fe2O3*	0.43	—	—	—	0.44	—	—	—
Cr2O3	0.04	0.16	0.01	0.01	0.00	0.06	0.04	0.01
FeO*	—	6.54	14.25	12.22	—	6.84	14.51	13.84
MnO	0.00	0.20	0.32	0.53	0.00	0.25	0.35	0.34
MgO	0.04	15.78	28.12	16.48	0.08	15.62	27.72	14.52
NiO	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.02	0.08
CaO	12.27	21.73	1.53	11.36	12.02	21.16	1.66	12.40
Na2O	4.46	0.36	0.01	0.41	4.84	0.35	0.01	0.70
K2O	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
P2O5	0.00	0.06	0.03	0.08	0.03	0.06	0.04	0.06
Total	100.04	100.09	100.98	98.06	100.35	99.56	99.80	98.53

No.	208-3-1A (gabbro)					215-4-1 (gabbro)			
Mineral	Cpx	Opx	Amp-1	Amp-2	M-Cpx	Ol	Plag	Cpx	Opx
SiO2	52.13	53.82	56.51	42.91	53.01	37.85	51.03	51.78	54.24
TiO2	0.45	0.43	0.19	3.80	0.00	0.03	0.04	0.87	0.39
Al2O3	2.11	1.24	1.51	11.74	0.28	0.00	30.37	2.71	1.47
Fe2O3*	—	—	—	—	—	—	0.41	—	—
Cr2O3	0.05	0.02	0.08	0.19	0.04	0.03	0.00	0.10	0.07
FeO*	8.04	15.53	7.12	11.53	8.92	23.47	—	6.77	14.60
MnO	0.20	0.34	0.17	0.11	0.11	0.38	0.02	0.12	0.29
MgO	15.22	26.85	21.44	13.52	12.60	38.54	0.06	16.15	28.56
NiO	0.00	0.00	0.02	0.04	0.09	0.21	0.00	0.02	0.06
CaO	21.84	1.24	11.01	11.60	24.53	0.07	14.02	21.16	1.08
Na2O	0.35	0.02	0.21	2.63	0.38	0.03	3.78	0.38	0.01
K2O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
P2O5	0.00	0.07	0.03	0.18	0.05	0.00	0.10	0.01	0.10
Total	100.39	99.56	98.29	98.28	100.01	100.61	99.90	100.07	100.87

Plag: plagioclase（斜長石），Cpx: clinopyroxene（単斜輝石），Opx: orthopyroxene（斜方輝石），Amp: amphibole（角閃石），M-Cpx: metamorphic clinopyroxene（変成単斜輝石），Ol: olivine(カンラン石）.

Fe2O3* and FeO* mean total iron as Fe2O3 and FeO, respectively.

ン岩）や外来結晶（単斜輝石や斜長石）を多数含んだ蛇紋岩も採取されたが(#209)、これらは堆積性蛇紋岩とでも呼べるような岩相である（写真10)。

4．構成鉱物の化学組成

採集試料の構成鉱物は高知大学のEPMA（JEOL. JXA-8600S/M）を使用してその化学組成の分析を行った。以下に、構成鉱物の化学組成の特徴について、ハンレイ岩とカンラン岩に分けて述べる。

4．1　ハンレイ岩

ハンレイ岩は5試料について分析を行った（表2と表3の一部)。その中の1試料は変成作用による再結晶の程

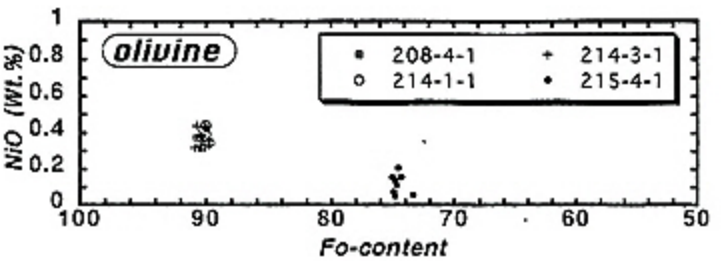

図2　NiO－Fo値の図で示したカンラン石の化学組成
Fig. 2　Olivine compositions plotted in NiO－Fo-content diagram.

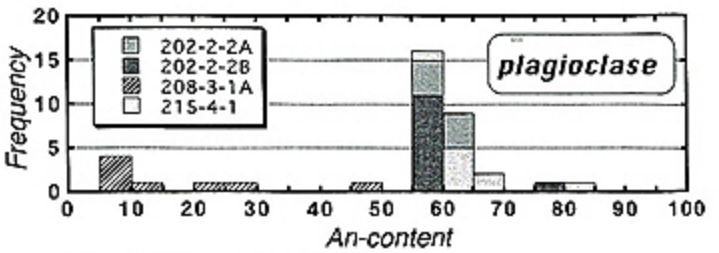

図3　斜長石のAn値の頻度分布図
Fig. 3　Frequency diagram of An-content of plagioclases.

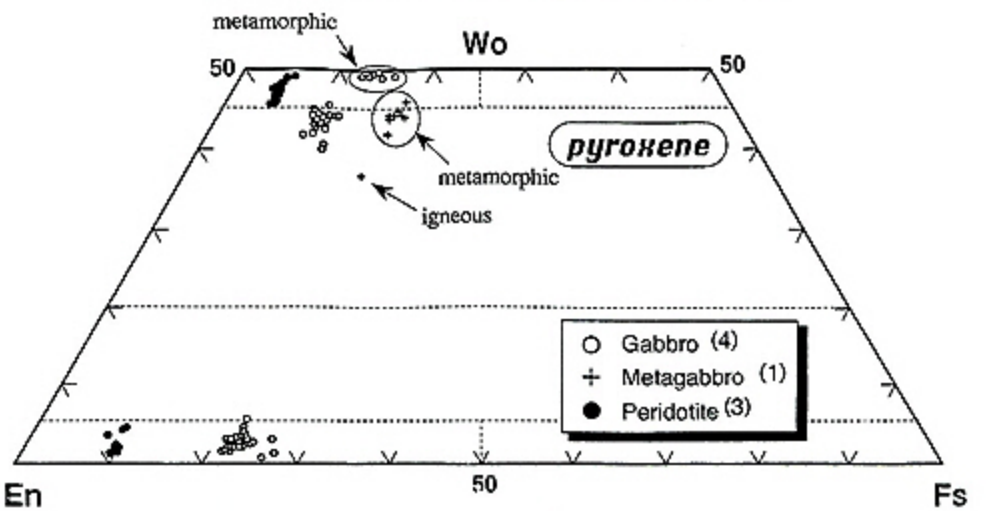

図4　Wo-En-Fs図で示した輝石の化学組成
Fig. 4　Pyroxene compositions plotted in Wo-En-Fs diagram.

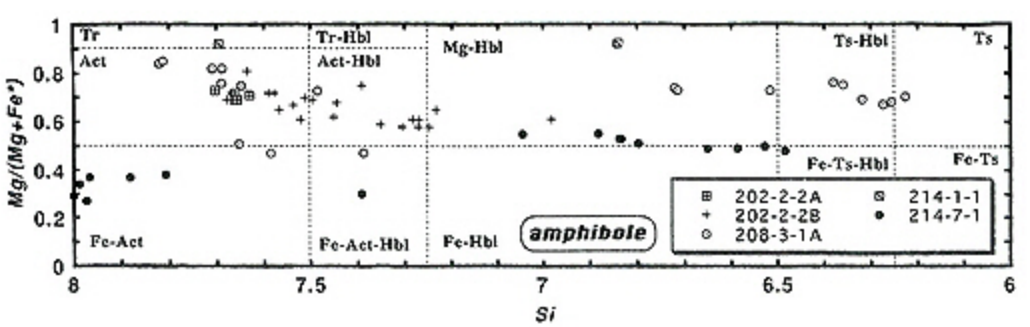

図5　Mg/(Mg＋Fe*)-Si図で示した角閃石の化学組成
Fig. 5　Amphibole compositions plotted in Mg/(Mg＋Fe*)-Si diagram.

表3　WMARKの変成ハンレイ岩とカンラン岩を構成する鉱物の代表的な化学分析値
Table 3　Representative mineral analyses of metagabbro and peridotites in WMARK.

No.	214-7-1 (metagabbro)					208-4-1 (peridotite)			
Mineral	Amp-1	Amp-2	M-Cpx	Preh	Chl	Ol	Cpx	Opx	Spl
SiO_2	52.75	44.08	52.37	44.00	28.01	40.59	49.76	54.54	0.01
TiO_2	0.02	1.93	0.29	0.04	0.00	0.01	0.57	0.23	0.90
Al_2O_3	0.67	9.76	1.19	24.09	16.35	0.00	6.56	3.98	25.47
Fe_2O_3*	—	—	—	—	—	—	—	—	5.27
Cr_2O_3	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	1.06	0.85	37.73
FeO*	23.98	19.12	11.85	0.36	30.83	8.99	2.68	6.21	17.54
MnO	0.95	0.19	0.42	0.04	0.15	0.16	0.09	0.17	0.33
MgO	7.77	10.24	12.45	0.00	12.51	49.47	15.67	32.12	12.20
NiO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.43	0.11	0.00	0.18
CaO	11.90	10.82	21.20	27.05	0.16	0.02	22.20	2.21	0.02
Na_2O	0.09	2.52	0.40	0.04	0.07	0.01	0.54	0.04	0.00
K_2O	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P_2O_5	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.08
Total	98.28	98.89	100.19	95.62	88.09	99.72	99.29	100.35	99.73

No.	214-1-1 (peridotite)				214-3-1 (peridotite)				
Mineral	Ol	Cpx	Opx	Spl	Amp	Ol	Cpx	Opx	Spl
SiO_2	40.89	52.01	54.59	0.00	48.74	41.11	51.76	54.88	0.01
TiO_2	0.02	0.72	0.20	0.74	1.55	0.00	0.56	0.18	0.53
Al_2O_3	0.01	3.12	3.85	28.86	8.56	0.00	4.19	4.53	40.27
Fe_2O_3*	—	—	—	10.43	—	—	—	—	5.88
Cr_2O_3	0.00	0.95	0.76	29.04	0.72	0.04	0.89	0.64	23.11
FeO*	9.64	2.59	6.30	19.79	3.10	9.35	2.80	6.49	12.11
MnO	0.21	0.12	0.16	0.30	0.00	0.14	0.13	0.08	0.21
MgO	49.72	16.66	32.84	11.00	20.03	49.90	16.45	32.89	16.99
NiO	0.39	0.04	0.04	0.26	0.09	0.39	0.02	0.03	0.16
CaO	0.02	23.18	1.28	0.02	12.68	0.05	22.18	1.07	0.11
Na_2O	0.00	0.49	0.05	0.02	1.94	0.00	0.57	0.05	0.00
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P_2O_5	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.09	0.08	0.09
Total	100.94	99.88	100.07	100.46	97.47	100.98	99.64	100.92	99.47

Ol: olivine（カンラン石），Cpx: clinopyroxene（単斜輝石），Opx: orthopyroxene（斜方輝石），Amp: amphibole（角閃石），M-Cpx: metamorphic clinopyroxene（変成単斜輝石），Preh: prehnite（プドウ石），Chl: chlorite（緑泥石），Spl: spinel（スピネル），
Fe2O3* and FeO* mean total iron as Fe2O3 and FeO, respectively, but those of spinel mean Fe2O3 and FeO, respectively, as calculated by spinel formula.

度が非常に強く、変成ハンレイ岩とでも呼べるような試料である。

カンラン石(図2)：分析値は1試料からしか得られていないが、Fo値＝100×Mg/(Mg＋Fe*)は73から75であり、NiOは最大で0.2wt.%である。その他、0.3-0.5 wt.%のMnOを含む。

斜長石(図3)：分析値は4試料から得られた。An値＝100×Ca/(Ca＋Na)は火成斜長石で50-85、変成斜長石で

5-30であった。Fe_2O_3は火成斜長石で0.2-0.7wt.%，変成斜長石で0.1-0.3wt.%である。K_2Oは火成・変成斜長石ともに少なく0.07wt.%以下である。

単斜輝石(図4)：分析値は5試料から得られたが，その内の1試料は変成ハンレイ岩である。火成単斜輝石はWo=100×Ca/(Ca+Mg+Fe*) は40-46，En=100×Mg/(Ca+Mg+Fe*) は42-49，Fs=100×Fe*/(Ca+Mg+Fe*) は10-13の組成範囲であり，TiO_2を0.58-1.24wt.%，Al_2O_3を1.91-4.12wt.%，Na_2Oを0.24-0.78wt.%含む。変成単斜輝石はWo=44-50，En=35-43，Fs=11-19の組成範囲で，火成単斜輝石に比較するとWoとFs成分に富み，En成分に乏しくなっている。他の元素含有量は火成単斜輝石に比較するといずれも低く，TiO_2で0.34wt.%以下，Al_2O_3で1.86wt.%以下，Na_2Oで0.51wt.%以下である。

斜方輝石(図4)：分析値は4試料から得られたが，その内の1試料はカンラン石の周縁部あるいは単斜輝石中のラメラとしてのみ産出しているものである。このように産状に違いはあるが，化学組成的にはきわだった違いは認められず，Wo=1-6, En=70-78, Fs=21-28の組成範囲であり，TiO_2を0.20-0.47wt.%，Al_2O_3を1.08-1.52wt.%含む。

角閃石(図5)：分析は4試料について行ったが，いずれも変成起源である。分析値は大きな変動を見せており，アクチノ閃石－鉄アクチノ閃石からホルンブレンド－チェルマック質ホルンブレンドまでの広い組成範囲を占める。これらの内，アクチノ閃石類は脈や割れ目を充填して産し，ホルンブレンド類は火成単斜輝石を置き換えて産する。

4．2　カンラン岩

カンラン岩は3試料について分析を行った(表3)。その中の1試料は変形作用によるマイロナイト様の構造が顕著に発達している。

カンラン石(図2)：分析値は3試料から得られた。試料間における組成の変動幅は極めて小さく，Fo値は89.5-90.5, NiOは0.3-0.5wt.%の範囲である。これらの特徴はマントルと平衡に共存するカンラン石で推定されているものとよく一致する(Sato, 1977)。その他，MnOを0.12-0.23wt.%含む。

単斜輝石(図4)：分析値は3試料から得られたが，組成範囲は比較的せまく，Wo=46-49，En=46-50，Fs=3-5である。その他，TiO_2は0.13-0.89wt.%，Al_2O_3は1.73-7.72wt.%，Na_2Oは0.20-0.59wt.%で，Al_2O_3の変動幅が特に大きい。

斜方輝石(図4)：分析値は3試料から得られた。試料間における組成の変動幅は小さく，Wo=1-5，En=86-90，Fs=7-10の範囲である。その他，TiO_2を0.19-0.36wt.%，Al_2O_3を2.82-4.53wt.%含む。

スピネル(図6)：分析値は3試料から得られた。試料間における組成の変動は大きく，試料ごとでは，それぞれ100×Mg/(Mg+Fe^{2+})=55-66，38-50，63-71，100×Cr/(Cr+Al)=43-50，35-50，27-35の範囲である。Fe_2O_3量は比較的低く，4.4-10.4wt.%の範囲である。

角閃石(図5)：分析は1試料でしか行っていないが，それらは変成起源の角閃石である。最大の特徴はMgOに非常に富んでいる(トレモラ閃石～Mgホルンブレンド)ということで，このことは超塩基性岩という原岩の化学組成の反映である。

5．考　　察

本航海によって，大西洋中央海嶺で最大級の規模を持つケイン・トランスフォーム断層の西部地域(WMARK地域)には，海洋地殻(深海性堆積物・玄武岩・ハンレイ岩)及び上部マントル(カンラン岩)を構成するすべての岩相が海底面に分布することが明らかになった。断層は東側でその幅が広くなっており，断層帯とでも呼べる地形になっている。断層帯は基本的には蛇紋岩で充填されており，この中にハンレイ岩とカンラン岩がさまざま

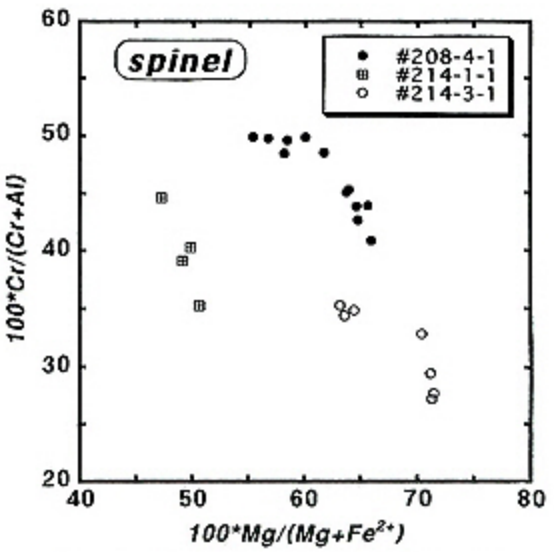

図6　100*Cr/(Cr+Al)-100*Mg/(Mg+Fe^{2+}) 図で示したスピネルの化学組成

Fig. 6　Spinel compositions plotted in 100*Cr/(Cr + Al)-100*Mg /(Mg + Fe^{2+}) diagram.

な大きさのブロックとして産出している。ただし，断層帯が狭くなっているところでは蛇紋岩は出現しておらず，枕状玄武岩と緑緑岩岩脈が分布している。

これらのことから，断層帯の深さは確実に上部マントル内まで達していることが推定される。さらに，蛇紋岩が様々なブロックを捕獲するマトリックス（block-in-matrix）として産出することから，蛇紋岩は上部マントル物質そのものが固体貫入したのではなく，構造的な弱線（断層）に沿って断層運動による剪断破壊を受けつつ上昇して，幅広い断層帯を形成したものと推定される。これは蛇紋岩のある種のダイヤピル的上昇である。

このような特徴をもつ断層帯は1回の断層の活動で出来たのであろうか。蛇紋岩中のブロックの表面に認められるマンガン酸化物の被膜は，断層帯の中心部で一番よく発達しており，端に向かってその発達が悪くなる傾向がある。このことは，断層帯を構成する蛇紋岩は同じ時期に上昇したのではなく，ステージを異にして，つまり断層帯の中心部ほどより古くに上昇し，より長く海底面に存在していたことを示している。特に，北部の内角高地との境界からは活断層を特徴づける断層粘土が#214の潜航で採取されており，この部分では恐らく最も新しい蛇紋岩ダイヤピルの活動が横ずれ運動に関連して生じているのであろう。その結果，断層帯の幅は時代とともに少しづつ広くなっているのであろう。断層帯内に認められる東西走向のトラフ状のくぼ地は，より古い時代の活断層のなごりであろう。

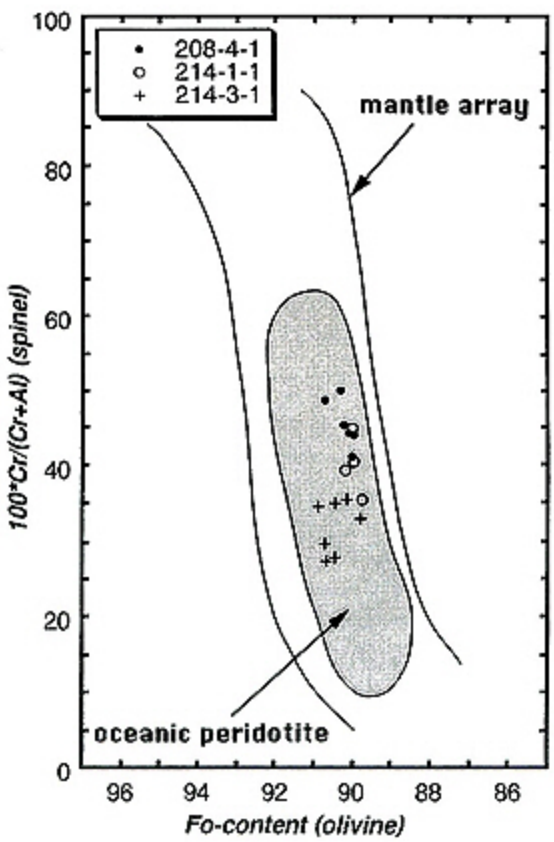

図7　カンラン岩中に共存するスピネルの100*Cr/(Cr+Al)比とカンラン石のFo値の関係

Fig. 7　Relationship between 100*Cr/(Cr+Al) of spinel and Fo-content of olivine in peridotites.

ところで，一般に，トランスフォーム断層と中央海嶺の接合部は海嶺セグメントの端に位置しており，火成活動は不活発であると思われている場所である（例えば，Whitehead Jr et al., 1984; Schouten et al., 1985; Dick, 1989）。しかし，本調査地域であるWMARK地域では，トランスフォーム断層と北方から伸びてきている大西洋中央海嶺との接合部には，非常に新鮮な（若い？）枕状玄武岩より構成される新期火山帯が南東に曲がるように分布している（曲がりの原因については，右横ずれ成分をもった断層の活動に起因していると思われるが，詳細は本誌の竹内ほかの報告を参照されたい）。つまり，WMARK地域では，海嶺セグメントの端であるにもかかわらず，火成活動はむしろ活発であるということになる。このことは，カンラン岩の鉱物組成からもうかがい知ることができる。

カンラン岩中に共存するスピネルーカンラン石の組成の特徴から，カンラン岩の枯渇度（degree of depletion）が推定できる（Arai, 1994）。本研究で扱ったカンラン岩中に共存するスピネルーカンラン石の組成から（図7），これらカンラン岩の大部分は通常の大西洋中央海嶺カンラン岩よりスピネルのCr/(Cr+Al) 比が高く，より枯渇していることがわかる。つまり，WMARK地域のカンラン岩が他地域のものより多くの玄武岩マグマを生産したことが推定される。このことは，この地域の火成活動が他地域より活発であったということと矛盾しない。しかし，どうしてこの地域の火成活動がとりわけ活発なのかについてはわからない。さらなるデータの蓄積と考察が必要である。

一方，本航海で得られた試料，特にハンレイ岩試料には少なくとも2ステージの変形・変成作用が認められる。最初のステージは火成斜長石や火成単斜輝石を部分的に置き換えて産出するホルンブレンド類＋変成斜長石±変成単斜輝石（角閃岩相程度）の鉱物組み合わせで特徴づけられるもので，後のステージは脈や割れ目を充填して

産出するアクチノ閃石類＋緑泥石±ブドウ石（緑色片岩相程度）の鉱物組み合わせで特徴づけられるものである。変形という点では，前者は一部試料で等粒のホルンブレンド類が片麻状組織を呈することもあるので延性変形（ductile deformation）が主であり，後者は網目状の割れ目の発達が顕著であることなどから脆性変形（brittle deformation）が主であったと考えられる。マイロナイト様の変形構造を呈するカンラン岩は前述したようにマントル内での高温変形作用の存在を示すもので，前者の延性変形作用に関連したものであろう。

これら2種類の変形・変成作用は他の大西洋中央海嶺系で報告されているもの（例えば，石塚，1991）と基本的にはよく似ているが，その程度はより強い。これらの変形・変成作用はどのようにして生じたのであろうか。最初の高温で延性的なステージは，トランスフォーム断層の運動とは関係がなく，むしろ下部地殻及び上部マントル内での高温流動によるものであろう。後の低温で脆性的なステージは恐らくトランスフォーム断層の運動と密接に関連したものであろう。しかし，これらの運動像の詳細はまだまだ不明である。変成条件あるいは変形過程のさらなる解析が必要である。

6．ま と め

JAMSTEC-WHOIの共同研究によって，大西洋中央海嶺系で最大級の規模を持つケイン・トランスフォーム断層帯は基本的には蛇紋岩ダイヤピルの活動域であることが明らかになった。さらに，断層帯を構成する蛇紋岩中には多種多様の海洋下部地殻及び上部マントル物質がブロックとして捕獲されており，これらの物質の岩石学的特徴から，この地域の火成活動は他の大西洋中央海嶺地域より活発であり，また，変形・変成作用の影響もより強いことが明らかになった。これらのことから，トランスフォーム断層近傍は大西洋中央海嶺系のなかで極めて活動度の高い場であることが推定される。このことは，近年，同じく新しく発見された沈み込み帯近傍の蛇紋岩ダイヤピル（藤岡ほか，1994）の活動と好対照である。海洋地殻及び上部マントルを含めたいわゆる海洋リソスフェアーはその誕生と消滅の場で同じテクトニズムに支配されているのであろうか。

謝　辞

「よこすか」及び「しんかい6500」の船長・司令をはじめ乗組員・チームの方々には昼夜にわたり大変お世話になった。ここに，心より謝意を表したい。

引用文献

Arai, S. (1994): Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. Chem. Geol., 113, 191-204.

Auzende, J. M., D. Bideau, E. Bonatti, M. Cannat, J. Honnorez, Y. Lagabrielle, J. Malavieille, V. Mammaloukas-Frangoulis and C. Mevel (1989): Direct observation of a section through slow spreading oceanic crust. Nature, 337, 726-729.

Cannat, M., C. Mevel, M. Maia, C. Deplus, C. Durand, P. Gente, P. Agrinier, A. Belatouchi, G. Dubuisson, E. Humler and J. Reynolds (1995): Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°-24°N). Geology, 23, 49-52.

Dick, H. J. B. (1989): "Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism." p71-105. In: Magmatism in the Ocean Basins. Edited by A. D. Saunders and M. J. Norry, Geological Society Special Publication No. 42, Blackwell Scientific Publications, London, 398 pp.

藤岡換太郎・和田秀樹・沖野郷子・S. DeBari・徳山英一・長沼毅・小川勇二郎・P. Fryer・青池寛・加藤久佳・西村はるみ (1994)：伊豆・小笠原孤横断潜航－海洋地殻断面，蛇紋岩海山，マンガン舗装－，JAMSTEC深海研究，10，1-35.

Hebert, R., D. Bideau and R. Hekinian (1983): Ultramafic and mafic rocks from the Garret Transform Fault near 13°30'S on the East Pacific Rise: igneous petrology. Earth Planet. Sci. Lett., 65, 107-125.

Hess, H. H. (1962): "History of ocean basins." p599-620. In: Petrologic studies. Edited by A. E. J. Engel, H. L. James and B. F. Leonard, Geol. Soc. Amer., Buddington Volume.

Honnorez, J., C. Mevel and R. Montigny (1984): Geotectonic significance of gneissic amphibolites from the Vema fracture zone, equatorial Mid-Atlantic Ridge. Jour. Geophys. Res., 89, 11379-11400.

石塚英男 (1991): 海洋底変成作用の性格と成因，科学，61，760-767.

Karson, J. A., G. Thompson, S. E. Humphris, J. M. Edmond, W. B. Bryan, J. R. Brown, A. T. Winters, R. A. Pockalny, J. F. Casey, A. C. Campbell, C. Klinkhammer, M. R. Palmer, R. J. Kinzler and M. M. Sulanowska (1987): Along axis variations in seafloor spreading in the MARK area. Nature, **328**, 681-685.

Mevel, C., M. Cannat, P. Gente, E. Marion, J. M. Auzende and J. A. Karson (1991): Emplacement of deep crustal and mantle rocks on the west median valley wall of the MARK area (MAR, 23° N). Tectonophys., **190**, 31-53.

Sato, H. (1977): Nickel content of basaltic magmas: Identification of primary magmas and a measure of the degree of olivine fractionation. Lithos, **10**, 113-120.

Schouten, H., K. D. Klitgord and J. A.Whitehead Jr (1985): Segmentation of mid-ocean ridges. Nature, **317**, 225-229.

Snow, J. E. (1995): Of Hess crust and layer cake. Nature, **374**, 413-414.

Whitehead Jr, J. A., H. J. B. Dick and H. Schouten (1984): A mechanism for magmatic accretion under spreading centers. Nature, **312**, 146-148.

(原稿受理：1995年6月21日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

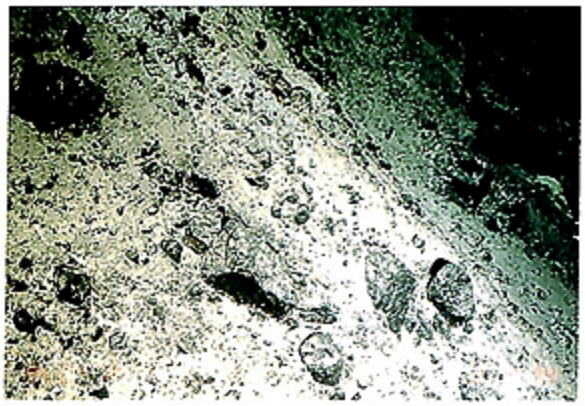

写真1　蛇紋岩中のブロックとして産出するハンレイ岩とカンラン岩（#210潜航）

Photo 1　Gabbros and peridotites occurring as blocks embedded within serpentinites (dive #210).

写真2　蛇紋岩地帯のくぼ地に集積したハンレイ岩とカンラン岩（#214潜航）

Photo 2　Gabbros and peridotites accumulated in hollow in the area composed of serpentinites (dive #214).

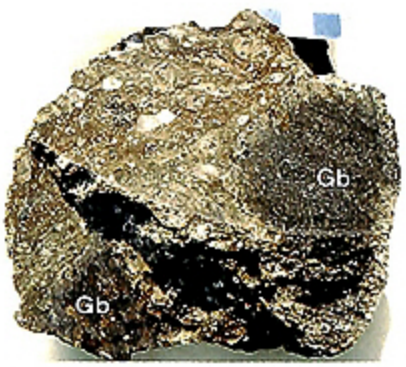

写真3　蛇紋岩中にれきとして産出するハンレイ岩（Gb）（#202-2-2試料）

Photo 3　Gabbros (Gb) occurring as pebbles enclosed in serpentinites (Sample #202-2-2).

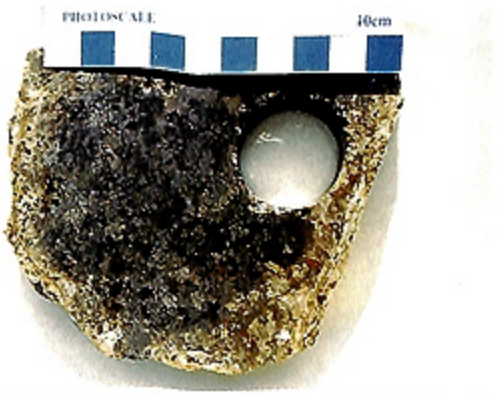

写真4　周縁部に変質部を有するが内部は新鮮な粗粒ハンレイ岩（#212-2-1試料）

Photo 4　Fresh and coarse-grained gabbros, but having alteration rim (Sample #212-2-1).

写真5　変成作用の影響が顕著なハンレイ岩（#212-1-1試料）

Photo 5　Gabbro with strong metamorphic effect(Sample #212-1-1).

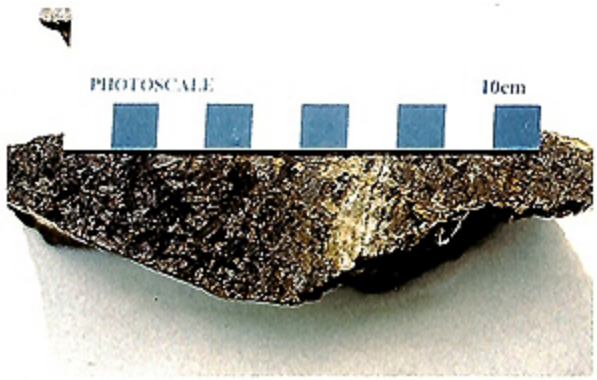

写真6　熱水脈（中央部の白色～黄緑色の部分）をともなう粗粒ハンレイ岩（#208-3-1試料）

Photo 6　Coarse-grained gabbro with hydrothermal vein (white to yellowish-green in color) (Sample #208-3-1).

写真7　蛇紋岩化作用が特に進んだカンラン岩（#214-6-1試料）

Photo 7　Strongly serpentinized peridotite (Sample #214-6-1).

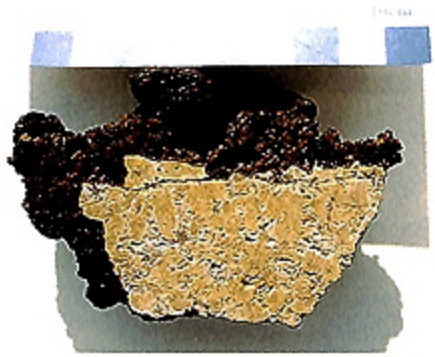

写真8　マンガン酸化物が周縁部に発達した蛇紋岩（#210-4-1試料）

Photo 8　Serpentinite with well-developed Mn-oxides (Mn-coating) (Sample #210-4-1).

写真9　マイロナイト様の変形組織を呈するカンラン岩（#214-3-1試料）。大きな灰白色の結晶粒は変形し，引き伸ばされた斜方輝石

Photo 9　Peridotite with mylonitic texture (Sample #214-3-1). Large and white-colored crystals represent deformed and streched orthopyroxenes.

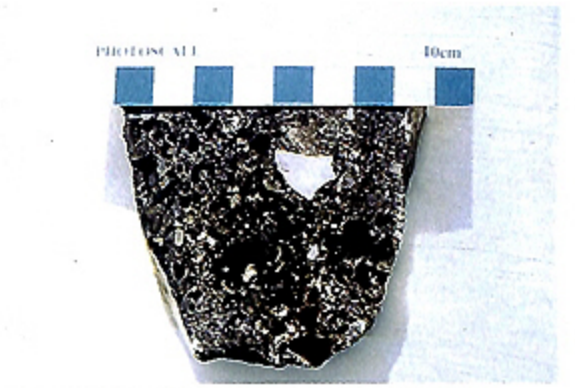

写真10　多量の外来岩片・結晶を含んだ堆積性蛇紋岩（#209-1-2試料）

Photo 10　Sedimentary serpentinite with many detrital rock-fragments and crystals (Sample #209-1-2).

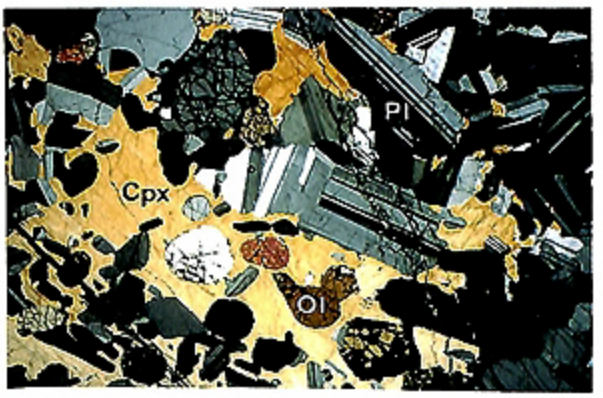

写真11　カンラン石（Ol）＋斜長石（Pl）＋単斜輝石（Cpx）の組み合わせを持つハンレイ岩（#212-3-1試料）の顕微鏡写真（横幅＝6.5mm）

Photo 11　Photomicrograph of gabbro (Sample #212-3-1) with mineral assemblage of olivine (Ol)+plagioclase (Pl)+clinopyroxene (Cpx) (the width=6.5mm).

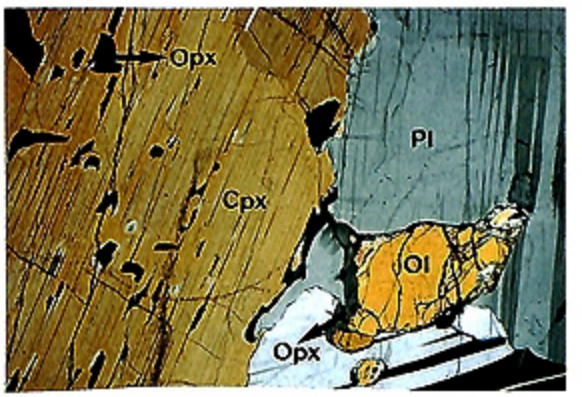

写真12　カンラン石（Ol）＋斜長石（Pl）＋単斜輝石（Cpx）＋斜方輝石（Opx）の組み合わせを持つハンレイ岩（#215-4-1試料）の顕微鏡写真（横幅＝2.0mm）

Photo 12　Photomicrograph of gabbro (Sample #215-4-1) with mineral assemblage of olivine (Ol)+plagioclase (Pl)+clinopyroxene (Cpx)+orthopyroxene (Opx) (the width=2.0mm).

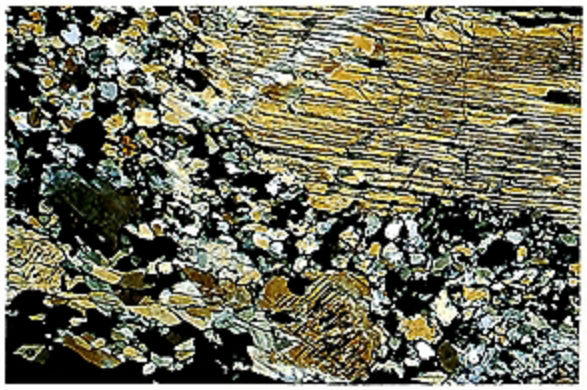

写真13　初生単斜輝石（へキ開が明瞭な結晶）の一部を置き換えて細粒の角閃石＋変成単斜輝石が形成されている変成ハンレイ岩（#214-7-1試料）の顕微鏡写真（横幅＝1.3mm）

Photo 13　Photomicrograph of metagabbro (Sample #214-7-1) with mineral assemblage of fine-grained amphibole+metamorphic clinopyroxene, both occurring as partially replacing igneous clinopyroxene with clear cleavages (the width=1.3mm).

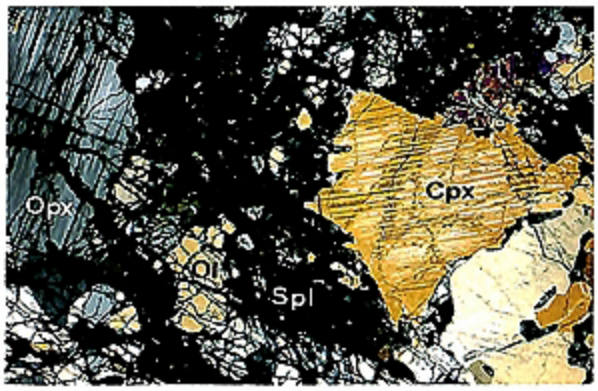

写真14　カンラン石（Ol）＋単斜輝石（Cpx）＋斜方輝石（Opx）＋スピネル（Spl）の組み合わせを持つカンラン岩（#208-4-1試料）の顕微鏡写真（横幅＝3.3 mm）

Photo 14　Photomicrograph of peridotite (Sample #208-4-1) with a mineral assemblage of olivine (Ol) +clinopyroxene (Cpx)+orthopyroxene (Opx) +spinel (Spl) (the width=3.3mm).

写真15　マイロナイト様の変形組織を呈するカンラン岩（#214-3-1試料）の顕微鏡写真（横幅＝6.6mm）。中央部のへキ開の発達した鉱物が斜方輝石で，その周りは同鉱物が蛇紋石化した部分。へき開が示すように，斜方輝石は伸ばされ曲げられている

Photo 15　Photomicrograph of peridotite (Sample #214-3-1) with mylonitic texture (the width=6.6 mm). Orthopyroxene with well-developed cleavages is partially serpentinized around margin, and is stretched and bended as defined by cleavages.