

1. 研究概要

「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」

(H12年度～H14年度、第1期)

平成14年度予算額 3.2億円

研究代表者：浦辺徹郎（東京大学）他13機関

研究の概要・目標	諸外国の現状等	研究進展・成果がもたらす利点
<p>1. 何を目指しているのか 伊豆小笠原海域の水曜海山カルデラや東太平洋域のファンデフーカ海嶺等において海底コアリングによって海底熱水系地下生物圏の3次元的拡がりやマグマ活動と微生物活動の関連性を把握する。また始原的生物の探索や生態機能の解析を通じて微生物活動の岩石圏や海洋の物質循環に与える影響の解明を目指す。</p> <p>3年後の目標： ・地温200度以上の海底での生物試料採取のためのコアリング ・熱水系地下生物圏の長期（1年以上）環境変動の観測技術 ・熱水系地下生物圏微生物の多様性や生体機能の解明</p> <p>5年後の目標： ・100m以下の分解能で海洋地殻構造を解析 ・熱水循環系の消長が地下生物圏に与える影響把握 ・海底熱水地下生物圏が岩石圏・水圏に与える影響の解明 ・始原的生物の探索</p>	<p>1. 現状 アメリカ科学財団(NSF)では全分野横断の大型プログラム LEXEN(極限環境生命)を開始し、地球生命誕生の研究を推進しているが、地下生物圏はその中心的課題。EUでは陸域の地下生物圏微生物を活用したバイオテクノロジーに関する研究開発計画を検討中。</p> <p>2. 我が国の水準 海洋での極限環境微生物の探索や生物多様性解析、そしてその応用に関しては欧米が進んでいる。海底熱水系地下生物圏での研究は、技術的制約から未踏領域である。しかし、我が国のみが、海底熱水系地下生物圏の生物試料採取に最も適した<u>海底設置型コアリング装置</u>および深海底長期観測システムを実用化しており、地下生物圏への最短距離にいる。</p> <p><u>海底熱水系地下生物圏</u>：海底熱水噴出域直下に、マグマ起源ガスをエネルギー源とする始原的な微生物を主体とした大規模な生物圏が推定されている。陸域に比べ海底下は地球上で最も原始的な環境をとどめている。</p> <p><u>始原的生物</u>：生物の系統樹の中で最も根本に近い微生物のことで、現在超好熱菌の仲間が最も有力な候補となっている。化学進化と生物進化のリンクエージやその後の生物進化過程を解明する上で、その探索は重要な意味をもつ。</p> <p><u>海底設置型コアリング装置</u>：船上からの操作により、地下生物圏ピンポイントコアリングが可能で、地下生物圏の3次元的拡がりを把握することが可能。</p>	<p>1. 世界との水準の関係 ・従来の岩石採取用コアリング装置で地下生物圏微生物を採取する場合、地下生物圏以外の微生物の混入を防ぐことができなかつたが、本研究の技術開発により、混入の少ない微生物資料の取得が可能となる。</p> <p>・未知の始原的生物を獲得でき、生命の起源と初期進化を明らかにできる。</p> <p>・海底熱水環境における化学センサーを用いた現場計測技術を開発することができる。</p> <p>・これまでの海底熱水研究では岩石圏・水圏・生物圏を個々に研究してきたが、本研究では異分野の研究者の密接な共同研究が実施される。</p> <p>2. 波及効果 ・極限環境で生育する微生物資源や遺伝情報のデータベースが世界に先駆け構築され、バイオテクノロジー研究に応用可能となる。</p> <p>・水槽から重金属を除去する生物・生体機能を解明することで、地下水や土壤の重金属汚染を除去する技術開発につながる。</p> <p>・放射性核廃棄物の深層隔離時に有益な各種極限環境モニタリング装置の開発を促進できる。</p>
<p>2. 何を研究するか ・海底コアリングによる雑菌混入のない微生物の試料採取 ・微生物の遺伝子、細胞、群集レベルでの解析 ・現場計測機器を用いた環境変動の長期観測 ・海洋に放出されるバイオマスや化学成分の測定</p> <p>3. 何が新しいか 海底熱水系地下生物圏への直接アプローチには誰も成功していない。また地下生物圏の生物多様性やそれが地球環境に与える影響についても全く未解明。</p>		

「海底熱水系における生物・地質相互作用に関する国際共同研究」アーキアンパーク計画

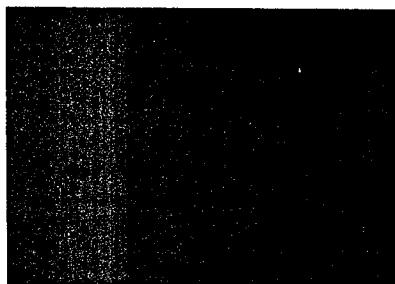
水深～キロメートルにある熱水噴出口の地下にはマグマから熱と化学物質が供給され、高温で還元的な環境が海底面直下に出現している。そこには地下からのメタン・硫化水素・二酸化炭素などを使って有機物を化学合成する微生物が熱水系地下生物圏を作っている。本研究では世界で初めて熱水系地下生物圏に直接アプローチし、微生物活動とそれを取りまく地質環境との相互作用を学際的に調査する。



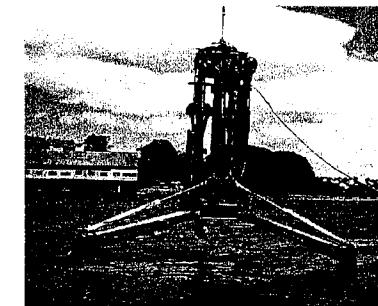
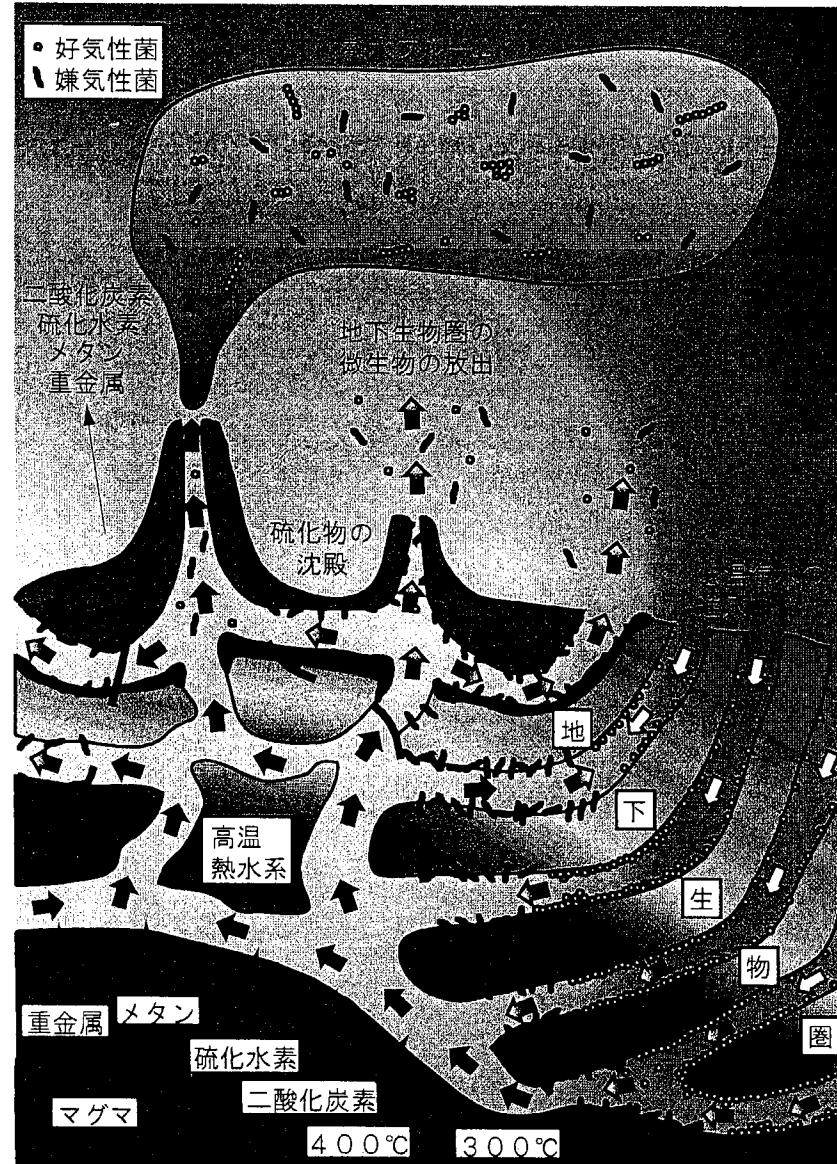
低温熱水噴出口に群がる魚



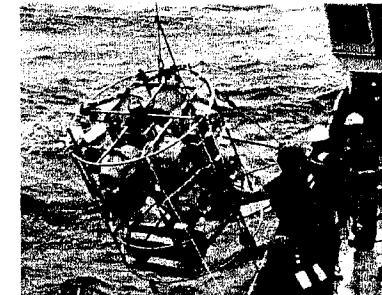
新鮮な溶岩の穴から煙のように湧き出る微生物の“毛玉”



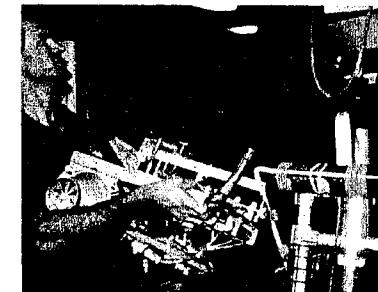
低温熱水から得られたイオウ酸化細菌の蛍光顕微鏡写真



海底熱水系に直接アプローチするための海底コアリング装置



海底の物理・化学環境の変動を観測するための装置

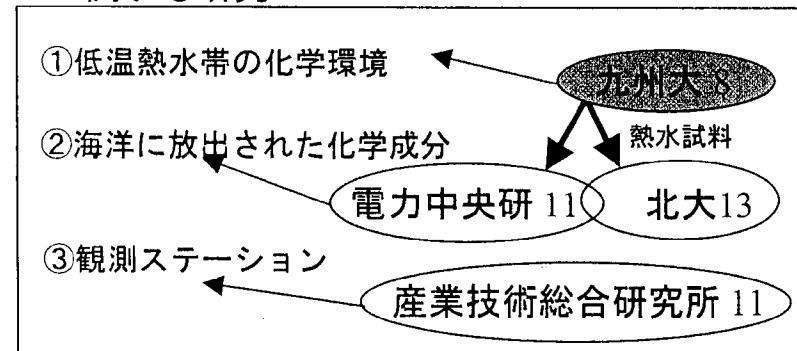


海底現場培養装置を深海潜水艇に取り付ける

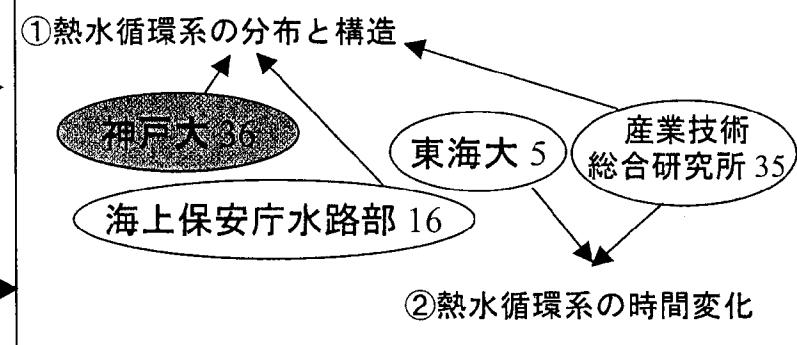
「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」の研究体制

(平成14年度3.2億円)

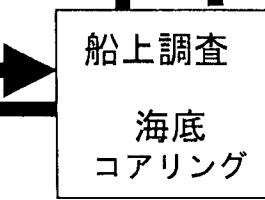
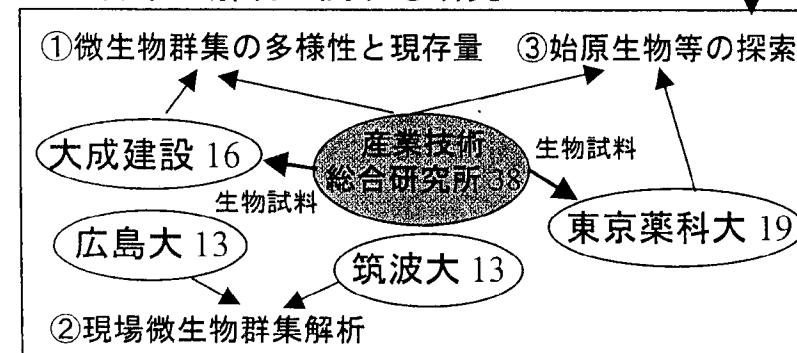
(2) 热水系地下生物圏の化学環境の把握に関する研究



(1) 热水循環系の物理的プロセスに関する研究



(3) 热水系地下生物圏の微生物群集の解明に関する研究



海底熱水系地下生物圏群集の多様性と生体機能の解析を通じて、微生物活動と地質プロセスとの相互作用を解明する

地球科学技術推進機構 26

2. 所要経費一覧

「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」

番号	研究項目	研究担当機関	研究担当者	所用経費(千円)		
				H12	H13	H14
1	熱水循環系の物理的プロセスに関する研究					
(1)	熱水循環系の分布と構造に関する研究					
①	熱水域下の散乱体分布の推定に関する研究	国土交通省海上保安庁海洋情報部	西澤あずさ	19,530	15,696	8,552
②	熱水循環系の電磁気法による温度構造の研究	独立行政法人産業技術総合研究所	西村清和	3,657	26,607	3,823
③	熱水循環系の電磁気法による温度構造の研究	神戸大学内海城機能教育研究センター	島 伸和	26,283	35,549	10,434
(2)	熱水循環系の物理環境の時間的変動に関する研究					
①	熱流量観測による熱水域の時間変動の研究	東海大学海洋学部	長尾年恭	28,189	4,586	3,871
②	コア採取孔上の物理量の長期変動の研究	独立行政法人産業技術総合研究所	田中明子	11,668	9,169	4,971
2	熱水系地下生物圏の化学環境の把握に関する研究					
(1)	低温熱水噴出帯における化学環境の空間分布の研究	九州大学大学院理学研究科	石橋純一郎	14,105	7,802	9,642
(2)	熱水系地下生物圏から海洋に放出された化学成分の研究					
①	熱水ブルーム試料および熱水試料中に含まれる微量元素についての研究	(財)電力中央研究所	下島公紀	17,522	10,783	5,177
②	熱水ブルーム試料および熱水試料中に含まれる溶存揮発性化学成分の研究	北海道大学大学院理学研究科	猪生俊敬	9,116	13,199	9,361
(3)	海底化学観測ステーションによる熱水化学変動の研究	独立行政法人産業技術総合研究所	中村光一	9,267	11,432	7,482
3	熱水地下生物圏の微生物群集の解明に関する研究					
(1)	微生物群集の多様性と時空間変動に関する研究					
①	熱水系生物圏の微生物多様性に関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	丸山明彦	20,489	19,014	17,102
②	熱水噴出現場での微生物の生細胞数と分布に関する研究	大成建設(株)技術センター	帆秋利洋	13,778	15,923	11,265
(2)	現場培養・計測手法による微生物群集解析に関する研究					
①	熱水系地下生物圏の微生物群集構造の現場型手法による研究	広島大学生物生産学部	長沼 肇	17,807	13,262	6,711
②	海底熱水系の微生物の培養法の確立と微生物群集の解析に関する研究	筑波大学生物科学系	桑原朋彦	15,551	12,613	6,281
(3)	始原生物等の探索と生物・遺伝子資源の獲得に関する研究					
①	模擬熱水循環装置による始原生物探索の研究	東京薬科大学生命科学部	山岸明彦	22,538	18,638	12,961
②	熱水地下生物圏の遺伝子手法による始原的な生物の検出に関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	花田 智	19,850	18,693	15,611
4	微生物活動と地質プロセスとの相互作用に関する研究					
(1)	微生物活動の痕跡の解説に関する研究					
①	海底熱水系の変遷と微生物活動による有機物生産量の対比についての研究	独立行政法人産業技術総合研究所	丸茂克美	30,634	83,332	78,814
②	岩石・堆積物試料の安定同位体分析とバイオマーカー分析の研究	東北大学大学院理学研究科	掛川 武	8,717	4,538	3,717
(2)	微生物が岩石や堆積物に与える影響に関する研究					
①	海底熱水系の岩石・堆積物の化学組成2次元元素マッピングに関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	丸茂克美	12,494	15,045	13,946
②	微生物-鉱物反応による元素の移動メカニズムに関する研究	東京大学大学院理学系研究科	浦辺徹郎	4,092	60,694	61,010
(3)	岩石・熱水反応における有機物の生成・安定性に関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	川幡穂高	4,702	2,936	2,362
5	熱水循環系モデル化に関する総合的研究	(財)地球科学技術総合推進機構	野村泰一	24,733	25,781	26,684
			合計	322,722	425,242	319,777

3. 研究成果の概要

研究目標の概要・成果の概要<課題全体>

課題名（研究代表者）：海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究（浦辺徹郎）

【研究目標の概要】

伊豆小笠原海域の水曜海山において海底コアリングを行い、海底熱水系地下生物圏の3次元的拡がりや、マグマ活動と微生物活動の関連性を把握する。また、始原的生物の探索や生態機能の解析を通じて、微生物活動の岩石圏や海洋の物質循環に与える影響の解明を目指す。

【研究成果の概要】

1. 島弧型 vs. 中央海嶺型 海底熱水活動

中央海嶺型の熱水系が海洋地殻の冷却に伴うものと考えられているのに対し、島弧型のものは揮発性成分に富む島弧マグマからの発散物が、熱水に溶存している可能性が指摘されていた。今回の研究で、黄鉄鉱と共生するコア中の硬石膏が、海水の値より4パーミル程度低いイオウ同位比を持つことから、水曜海山では熱水系にマグマ起源の酸化イオウ種の供給があることが推定された。比較的酸化的なマグマからの発散物は H_2S ではなく SO_2 であり、それが熱水に加わることから、熱水は中央海嶺のそれに比較して高い酸素分圧をもつことが予想される。また熱水中に溶存する CO_2/CH_4 比が高く、 CO_2 と CH_4 の炭素同位体比は高い温度での同位体平衡を示しており、どちらの化学種も $700^{\circ}C$ 以上の同じ場所からきた、すなわちマグマ起源であるとの証拠となっている。さらに、予備的な熱水中の水素含有量の分析結果によると、この熱水は中央海嶺のそれより低い。

つまり島弧型においては、有機物に富む堆積物が無いかぎり、強嫌気の条件が発達していない可能性が高い。実際、好熱性水素利用菌の系統群に属するアーキアは見いだされているものの、分布は限られているのはそのせいかも知れない。また、深部ほど微生物量が少なくなるというこの特徴の一部は、マグマの性質によって規制されている可能性がある。

2. 水曜海山の熱水の起源

水曜海山ではカルデラ底の中央に熱水域が見られるように、マグマ溜まり直上に発達した点源熱水系である。実際、低温熱水の分析値は基本的に高温で熱水岩石反応をした熱水と海水との混合曲線上に乗る。一方中央海嶺型は、割れ目により形成された高い透水率の部分を循環海水が通過するために、高温／低温熱水の成因は様々である。水曜海山の低温熱水の起源として、

他の熱水の寄与が少ないことは、マグマが浅く熱水貯留層が極めて浅いために、低温熱水が熱成（低温での岩石反応や冷却に伴う組成変化）をする余地がないことによるのであろう。このことは中央海嶺に比して、島弧型熱水活動における熱や物質のフラックスのモデル化が容易であることを示している。この熱フラックスは高温／低温熱水の化学のデータと合わせることによって、化学フラックス、およびその先にある生物フラックスの推定という計画全体の最終目標のベースになるものである。

3. 水曜海山の海底熱水系の構造

カルデラ底における未固結堆積物の厚さは 1-3m で、東南方向では直接ディサイト質の溶岩が露出している。高温の熱水域では堆積物とディサイトが強い熱水変質を受け、硬石膏、セリサイト、クロライト、黄鉄鉱の組み合わせに変質しており、不透水性の“帽岩” cap-rock を形成している。この cap-rock の上面は海底面付近から深さ 10m 程度まで波打っており、その下に 300°C を越える高温の熱水溜まりが海水との混合を抑えられる形で広がっている。この cap-rock は堆積物中を浸透してきた海水による低温で好気的な環境と、熱水による高温で嫌気的な環境の境界をなしている。熱水の化学組成は場所によらず、また 10 年間にわたり均一である。このような構造が明らかになったのは世界で初めてのことである。

このことが逆に地下生物圏の棲息範囲を狭めることに寄与している。200°C を越える熱水中にも多数の微生物細胞が確認されており、その実態の解明が進んでいるが、300°C を越える高温の熱水溜まりは、生物にとって極端に hostile な環境である。

4. 水曜海山の海底熱水系の深部構造

BMS（海底設置型掘削装置）では平均 6m 程度の深度までしか到達できないが、音波探査の結果カルデラ底下 100m に深部熱水溜まりか強変質帯と思われる反射が見られている。また深度約 1km の、水平方向約 0.5km の拡がりをもつ振幅の比較的大きい反射は、マグマ溜まりである可能性があるが、さらに検討が必要である。さらにカルデラの西側深部には熱水変質によるものと思われる磁化の弱い部分が見られる。しかし、カルデラ西部の海底表面はきわめて熱流量が低く、少なくとも浅部熱水溜まりはカルデラ東部にのみ存在していると考えられる。これらの熱水循環は潮汐により強く規制されており、半日周期のシグナルがほとんどの長期観測の機器において観測された。今後、この影響の定量的な解析が必要である。

5. 水曜海山の熱水系地下生物圏のバイオマス

カルデラ底の堆積物中には陸源の有機物が見られず、有機物は大部分が微生物起源である。よってこここの地下生物圏のエネルギー・栄養のほとんどが無機起源であり、研究対象として単純系であるという特徴を持つ。

熱水中に溶存している成分で、これまでに微生物活動の寄与の可能性が検出できたのは一酸

化炭素の同位体比異常だけである。熱水中の溶存濃度が極めて低い一酸化炭素にだけ同位体比異常が検出され、同じ還元性物質であるメタンに異常が検出されないことは、低温热水地帯の海底下での化学フラックスの生物フラックスへの変換量が量的に少ないことを意味している。

通常の海底热水系では、このフラックスへの寄与で主役を占めているのはイオウ酸化化学合成系微生物である。水曜海山の場合でも、予察的な系統解析からそれを支持する結果が得られているほか、一部の低温热水域において、硫化水素濃度が高温热水希釈のラインより明らかに低くなっていることが検出されており、地下生物圏のバイオマスを考えるうえで検討が進んでいる。

6. 热水系地下生物圏

水曜海山の地下生物圏は、上記のような「住居」や「エネルギー供給」を反映している。局部的には好熱性アーキアの「アーキアン・パーク」が広がっているが、数的には浅部の堆積物中の微好気中-高熱性バクテリアが多い。興味深い点は、熱水中から新たならん藻や光合成細菌のクローン、遺伝子伝達能を有するウイルス様粒子、200°Cを越える熱水中からの微生物細胞の発見などであり、いずれも生命の起源を考えるうえで重要な発見と云えるだろう。

7. 水曜海山カルデラ内の特異な微生物群集

水曜海山カルデラ内の水塊中には2種のバクテリアがあわせて9割以上を占めているというきわめて特異な微生物生態を持つことが明らかとなった。これは外輪山における下向き深層流カーテンにより热水プルームがカルデラ外に出ず、カルデラ内に一部リサイクルが起こっているというハイドロキャスト（船からの採水）からの結果と整合的である。さらに、热水地帯における現場観測機器などによる時系列観測の結果から、低温热水地帯直上の海底では、周期的に出現する強い底層流によって热水の浮力による上昇が妨げられ、温度や热水成分濃度が高い状態が数時間にわたって継続することが判明した。この滞留により热水成分濃度が高い状態が保持されるので、微生物活動が促進される可能性が期待される。これらのこととは、カルデラ地形という島弧火山に特有な地形のために、地下生物圏のかわりとも言える発達した海上生物圏が有ることを示す、重要な成果である。

8. 科学を支えた技術開発

これらの成果を支えたのは、グループが共同で技術開発した新たな海洋調査機器や手法である。海底設置型掘削装置による無菌的な海底掘削、化学・微生物学共用の採水器、ろ過濃縮システム、現場培養装置、長期観測機器、物理探査機器など、その数は20を越え、世界的に見ても最強のチームであると自負している。

4. 研究成果公表等の状況

課題名（研究代表者）：海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究（浦辺 徹郎）

1. 研究発表等

(1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合 計
国内	9(3) 件	48 件	169 件	226(3) 件
国外	82(13) 件	22 件	35(4) 件	139(17) 件
合計	91(16) 件	70 件	204(4) 件	365(20) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

【特許出願等】 5 件 (国内 5 件、国外 0 件)

【受賞等】 2 件 (国内 2 件、国外 0 件)

【主要雑誌への研究成果発表】

Journal	Impact Factor	サフ'テ ーマ 1	サフ'テ ーマ 2	サフ'テ ーマ 3	サフ'テ ーマ 4	合計
Appl. Geochem.	1.09		1			1.09
Mar. Chem,	1.79		1			1.79
Geochim. Cosmochim. Acta	2.53		1			2.53
Earth Planet. Sci. Lett.,	2.88	1	1			5.76
J. Geophys. Res.	2.68	1	1			5.36
Mar. Geol.	1.90		1			1.90
Plant Cell Physiol	2.311			1		2.311
Marine Biotechnology	1.068			1		1.068
Systematic and Applied Microbiology	2.060-			1		2.060
Applied and Environm. Microbiology	3.389			3		10.167
Marine Ecology	1.928			1		1.928
Electrophoresis-	3.385			1		3.385
Biotechnology Progress	1.897			1		1.897
Int J Syst Evol Microbiol	2.675			3		8.025
Arch Microbiol	2.056			1		2.056
Geomicrobiology Journal	1.936			1		1.936
FEMS Microbiology Ecology	2.439			1		2.439
Structure	6.681			1		6.681
J Mol Biol	5.388			1		5.388
Biochem.Biophys.Res.CommunJ	3.055			1		3.055
Bacteriol	3.506			1		3.506
FEBS Lett	3.440			1		3.440
Acta Crystallogr D Biol Crystallogr	3.067			1		3.067
FEMS Microbiol Lett	1.615			1		1.615
J Biol Chem	7.368			1		7.368
Extremophiles	2.688			1		2.688
Geochemical Journal	0.908				4	3.632
Geology	2.154				1	4.308
Chemical Geology	1.824	1			1	3.648

Org. Geochemistry	1.39				1	1.39
Geophys. J. Int.	1.544	2				3.088
主要雑誌小計		5	6	24	7	108.576
発表論文合計		5	16	52	15	