



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

Exp 327

ファン・デ・フーカ海嶺 東翼部の上部海洋性地殻 における地殻スケールの 水理特性

辻 健

**Crustal-scale hydrological properties of
upper oceanic crust in the eastern flank of
Juan de Fuca ridge (IODP Exp 327)**

Takeshi Tsuji

つじ たけし：九州大学カーボンニュートラル・エネルギー
国際研究所

ファン・デ・フーカ海嶺東翼部において、大規模な孔井間水理試験ネットワーク（孔井間モニタリング装置）を構築し、海嶺翼部の広大な地殻内部の水理特性を調査した。また地震探査や検層データを解析し、地殻内流体の循環経路を調べた。本論では、これまでの航海で明らかになってきた海洋性地殻内部の水理特性を紹介する。

1. はじめに

海洋プレートが形成される中央海嶺では、マグマの熱によって海洋地殻内部を流体が循環し、ブラックスモーカーといった熱水噴出孔が存在することが知られている。しかし、その海嶺部よりも、広い幅を持つ海嶺の裾野（翼部）のほうが放出する熱量が3倍程度大きく、さらに物質の流量は10倍程度も多いことが知られている。また、海洋性地殻内部の流体フラックスは、陸上の河川にも匹敵する（同じオーダーである）とも考えられている（Johnson and Pruis, 2003 ; Mottl, 2003）。つまり海洋と固体地球間の物質循環とエネルギー収支を考える際には、海嶺翼部に広がる広大な地殻の流体循環が重要となる。このような地殻内部の流体移動は、地下微生物生態系などにも関係していると考えられ、広い研究分野から注目されている（例えば、Cowen *et al.* 2003）。

ファン・デ・フーカ海嶺翼部では、ODP Leg. 168以降、多くの研究航海が実施されて、その水理学的特性などが徐々に明らかになってきた（Davis *et al.*, 1997 ; Elderfield *et al.*, 1999 ; Fisher *et al.*, 2005 ; Hutnak *et al.*, 2006 ; Tujii and Iturrino, 2008）。この海域では、海洋性地殻が低浸透率の堆積物で覆われているにも関わらず、地殻内の流体は比較的新しいことが分かっている。これは、海底に露出している地殻が、海水の地殻内部への流入または流出に重要な役割を担っていることを示唆している（Fisher *et al.* 2003）。しかし、その流路の性質や空間的分布は、良く分かっていない。例えば、地殻内部の流体が連続的に存在する高浸透率層（Porous な岩相）に沿って流れているのか、それとも断層に伴って発達するフラクチャー帯に沿って

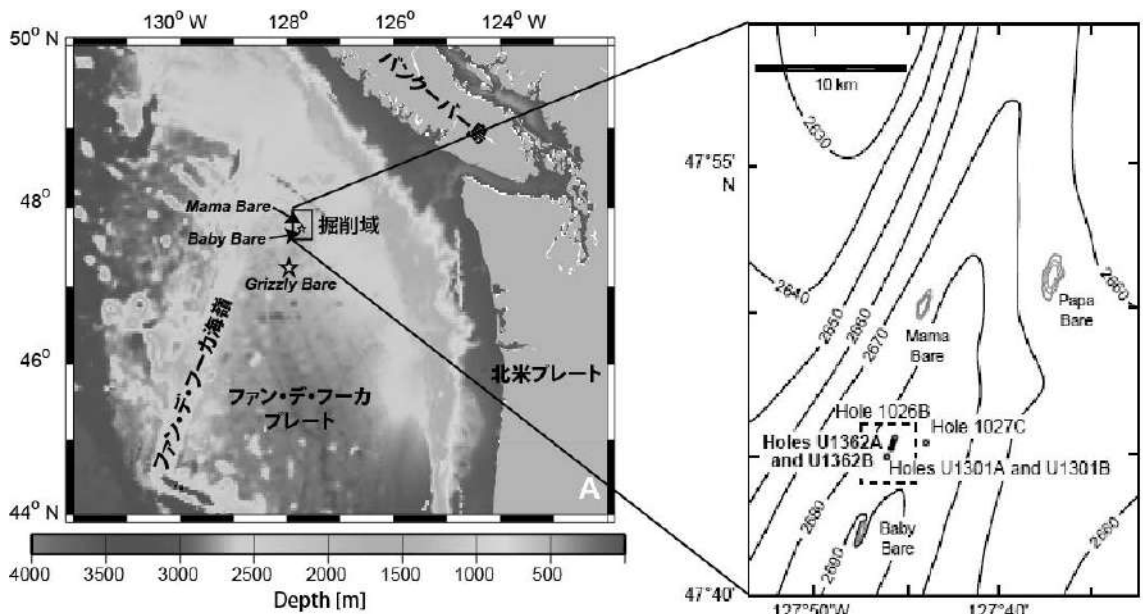


図1 本研究航海の掘削地点。

流れているのか、良く分かっていない。

IODP Expedition 327では、この海嶺翼部の地殻内の水理特性を明らかにするために、バンクーバー島の沖合い約200 kmに位置するファン・デ・フーカ海嶺東翼部で掘削を行った(図1; Fisher *et al.*, 2011)。この海域の海洋性地殻は、3.5~3.6 Maで、海嶺軸から100 kmほど離れている。ここでは大陸から供給される堆積物が、海嶺軸に平行に発達するリッジ地形(Abyssal hill)によってトラップされるため堆積速度が速く、海洋性地殻は厚い堆積物に覆われている。掘削を実施した地点(Second Ridge)では、約250 m~600 mの堆積物によって、海洋性地殻が覆われている(図2)。しかし、リッジ地形(玄武岩)の先端が海底面に顔を出している地点(例えば図1のBaby Bare)がところどころにある。

Exp. 327掘削航海では、コア試料を観察・計測するだけでなく、長期モニタリング装置を数kmの範囲に数点設置することで、海洋性地殻内の水理特性の推定を試みた。具体的には、(1)地殻内で

は、どれくらいの量の流体が、どれくらいの速度で流れているのか、(2)地殻内の流体が流れやすい方向はどちらなのか、(3)地殻内の流体は、岩石の变成や地殻内微生物と、どのように関係しているのか、といった問題の解明を目指した。本論では、主に海洋性地殻内部の流体移動の方向と、それをコントロールしている地質構造について述べる。またExp 327の結果だけでなく、これまでの同海域で実施されたODPとIODP航海の結果を含めて議論する。

2. 掘削の概要

Exp 327は、2010年7月5日~9月5日に、JOIDES Resolutionによって実施された。本航海ではSecond Ridgeと呼ばれている堆積物に埋まっているリッジ地形(海嶺軸に平行に発達するAbyssal hill)の頂部に、2本の孔井(Site U1362A, U1362B)を掘削した(図1, 2, 3)。掘削では、堆積物を掘り飛ばし、海洋性地殻のコア試料を取得した。玄武岩コア試料の回収率は、約30%であった。またSite

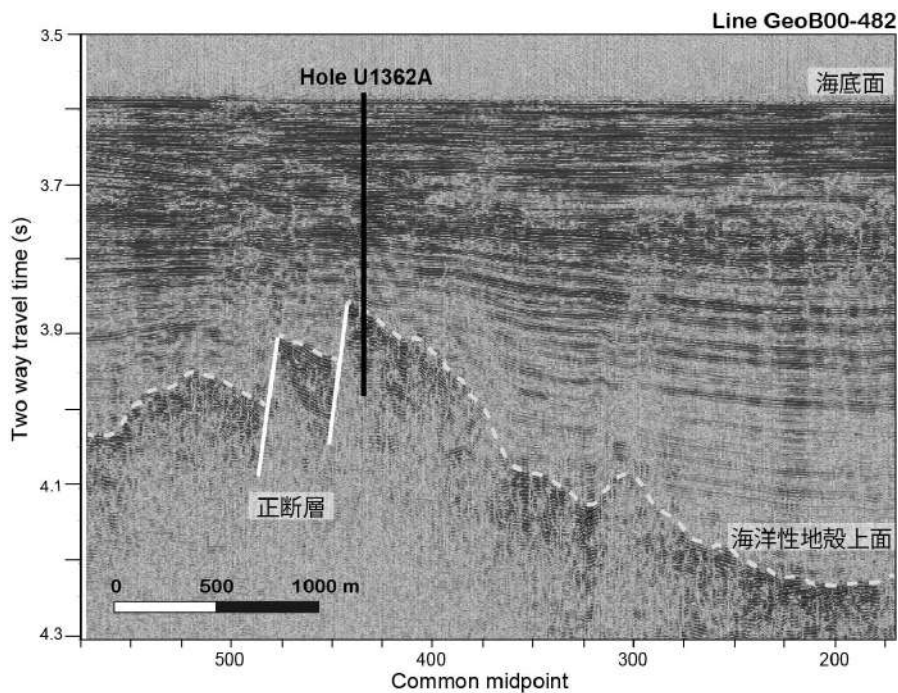


図2 掘削地点を東西に横切る反射断面図 (Zühlsdorff *et al.*, 2005). 破線は海洋性地殻上面, 白線は正断層, 黒線は掘削孔 (Site 1362A) の位置を示す. 縦軸は往復走時であり, P波速度が 2000 m/s の場合には, 0.1 秒が 100m に相当する.

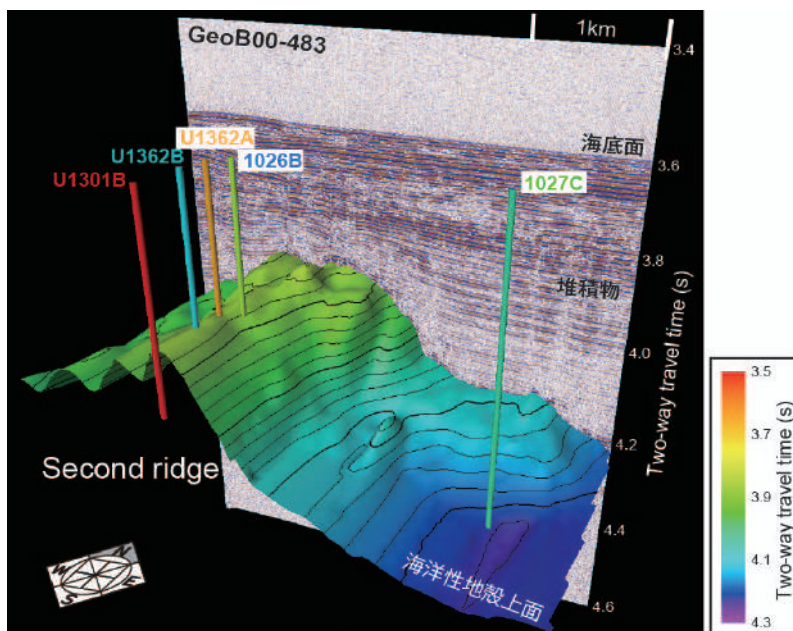


図3 堆積物を剥ぎ取った海洋性地殻上面の形状と, 掘削孔の関係. Sites 1026B, U1301B, U1362A, U1362Bは同じリッジ (Second Ridge) の上に配列しているが, Site 1027はリッジから離れた場所に位置する. このリッジの南側延長にBaby Bareがあり, 北側延長にMama Bareがある.

U1362A では、検層データも取得し、深度方向への岩相の変化を連続的に調べることに成功した。Exp327 では、Grizzly Bare とよばれる地点で堆積物を対象とした掘削も行ったが、ここでは Second Ridge だけに注目する。

掘削した孔井には、CORK (Circulation Obviation Retrofit Kits) と呼ばれる長期孔内観測装置を設置した (Fisher *et al.* 2011 ; 図4)。孔壁の状態が悪く、CORK の設置には時間を要したが、最終的に Site U1362A と U1362B の2孔に CORK を設置することに成功した。CORK を用いることで、掘削やケーシングなどの作業に伴う孔内の擾乱がおさまってから、地殻内の水圧や温度、地化学的な組成、微生物などを調べることができる。つまり、孔内が定常の状態に戻ってからの測定が可能となり、信頼できるデータを取得することができる。

この海域では以前から ODP (Leg. 168 ; Davis *et al.*, 1997) と IODP (Exp.301 ; Fisher *et al.*, 2005) による掘削が行われており、これらの孔井に設置されている観測装置を交換または利用することで、多数の孔井間での水理試験が可能となった (図2)。研究海域周辺には、リッジ地形の頂部に沿って孔井が4本、リッジから2キロほど離れた場所に孔井が1本 (Site 1027) あり、合計5本の孔井に CORK を設置することに成功した (図3)。このような大規模な孔井間モニタリング・ネットワークを構築し、海洋性地殻内部の流体挙動を調べることは、海洋掘削では初めての試みである。Exp327 では、トレーサー試験も実施し、そのモニタリングは現在も継続している。

水理試験以外にも、掘削コア試料や検層データからは、フラクチャーの配列方向や熱水に伴う岩石の変質など、地殻内の流体移動に関する情報が得られた (Fisher *et al.*, 2011)。

3. 上部海洋性地殻の水理特性

1) 流体の供給経路とリッジに沿った流体移動

本研究で注目している海域 (Second Ridge) は、何ヶ所かだけ海洋性地殻 (玄武岩) の高まりが、海面に露出している場所がある (図1)。その高ま

りは、南から Grizzly Bare, Baby Bare, Mama Bare とよばれており、反射法地震探査データの解析から、これらの高まりは同じリッジに並んでいることが分かってきた。これらの場所で熱流量を測定した結果、Grizzly Bare で海水を吸い込み (熱流量が低く)、Baby Bare で海水を吐き出している (熱流量が高い) ことが分かった (Fisher *et al.*, 2003)。これは海嶺翼部では海底に露出している地殻 (玄武岩層) を使って、地殻内部の流体が循環していることを示している。さらに地殻内の間隙水の分析から、リッジに沿って北へ行くほど間隙水が古くなっていることが分かった (Wheat *et al.* 2000)。これは堆積物の下に埋まっている海洋性地殻のリッジ (Abysal hill) に沿って、地殻内流体が南から北へ流れていることを示唆している。ここで反射断面図から抽出した海洋性地殻上面の形状を見てみると、中央海嶺に沿った方向 (NNE-SSW) に、正断層とリッジ地形が連続的に発達していることが分かる (図2, 3 ; 辻ほか, 2012)。つまり、このリッジ地形や正断層、それらに伴うフラクチャー帯が、地殻内流体の経路をコントロールしている可能性が考えられる。

2) 水理試験で得られた浸透率と、その異方性

バッカー (孔内に隔離区間を設ける装置 ; 図4) を用いた水理試験の結果から、Second Ridge 頂部の地殻表面より 180 m ~ 200 m 深部にあるフラクチャー卓越帯の浸透率 (Single hole 浸透率) を、 $\sim 10^{-11}$ (m²) と推定することができた (Becker and Fisher, 2008 ; Becker *et al.*, 2013)。一方、リッジ頂部に位置する Site U1301B での掘削作業に伴う水圧の変化が、その場所から 2.4 km 北東にある Site 1027 の水圧モニタリングデータによって、13か月後に捉えられた (図3)。その Site 1027 の水圧変動の記録から、Site U1301B と Site 1027 間 (Cross-hole) の浸透率は $\sim 10^{-12}$ m² と求めた (Fisher *et al.*, 2008)。この Cross-hole の浸透率はリッジ頂部で測定された Single-hole の浸透率 ($\sim 10^{-11}$ m²) よりも低いことになる。

浸透率はスケールに依存することが知られている。一般的に浸透率は測定スケールが大きいほう

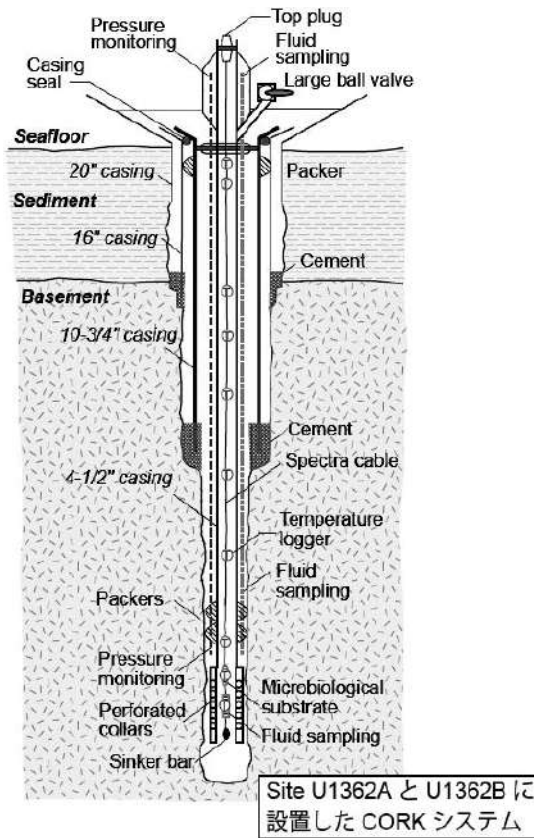


図4 CORKの模式図 (Fisher *et al.*, 2012).

(Cross-hole 試験で得られた浸透率) が、スケールが小さい場合 (Single-hole 試験で得られた浸透率) に比べて、高くなる傾向がある (Fisher, 1998 ; Becker and Davis, 2003). しかし今回の結果は、その傾向とは逆であった。この浸透率の逆転は、浸透率の異方性によって説明できる。Site U1301B と Site1027 を結ぶ方向 (NEN-WSW) は、リッジ地形に対して斜交している (図1)。もし、リッジに沿った方向 (NNE-SSW) にフラクチャーが配列していれば、その方向に浸透率が高く、リッジに直交または斜交する方向には浸透率が低いことになる。つまり Site U1301B と Site 1027 を結ぶ方向 (リッジに斜交する方向) にフラクチャーなどの高浸透率層が連続していないため、Cross-hole の試験では低い浸透率が求めたと解釈できる。実

際、検層データの一種である孔壁画像 (UBI) データからフラクチャーの走向・傾斜を抽出した結果、フラクチャーはリッジの方向に配列していることが分かっている (辻ほか, 2012)。

3) 浸透率の深度方向への変化

パッカーを用いた Single-hole 水理試験によって、浸透率の深度方向への変化を調べた結果、浸透率が大きく変化していることが分かってきた (Becker and Fisher, 2008 ; Becker *et al.*, 2013). 具体的には、海洋性地殻の最浅部 (堆積物の直下) では浸透率が低く、海洋性地殻上面から 180 m ~ 200 m の区間 (フラクチャー卓越帯) で浸透率が高くなる ($\sim 10^{-11} \text{ m}^2$) ことがわかった。この浸透率の深度方向への変化は、825 m 離れた 2 本の掘削孔 (Site U1301B と Site U1362A) 両方で確認された (Becker *et al.*, 2013). また Site U1301B では、さらに深部でも浸透率を測定しているが、その浸透率は低い値であった。つまり我々の調査海域では、地殻内の流体経路となっているのは、地殻上面から深度 180 m ~ 200 m 周辺にある限られた高浸透率層である可能性が高い。さらに 825 m 離れた 2 本の掘削孔 (Site U1301B と U1362A) の孔径 (Caliper Log) と掘削速度を比較すると明らかな相関があり、浸透率の高い層が水平方向に連続していることが推測される (図5 ; Becker *et al.*, 2013). つまり、高浸透率層やリッジ地形の岩相 (層構造) は、ある程度の連続性を持っており、その層構造に沿って流体が流れている可能性がある。

4) 地質構造に規制された流体移動

リッジ地形に沿って、南側から北側へ地殻内流体が移動する (Wheat *et al.*, 2000) のは、北側の地殻の温度が高いことが理由の一つに考えられる。浸透率が等方的であれば、調査海域の西側にある (高温の) 中央海嶺に向かって、地殻内流体は移動すると考えられる。しかし、断層やフラクチャーに伴う浸透率異方性の影響が強いため、流体が南北方向へ (リッジに沿って) 移動していると解釈できる。つまり、海嶺翼部での地殻内の流体循環は、地質構造の影響を強く受けていることが分かる。

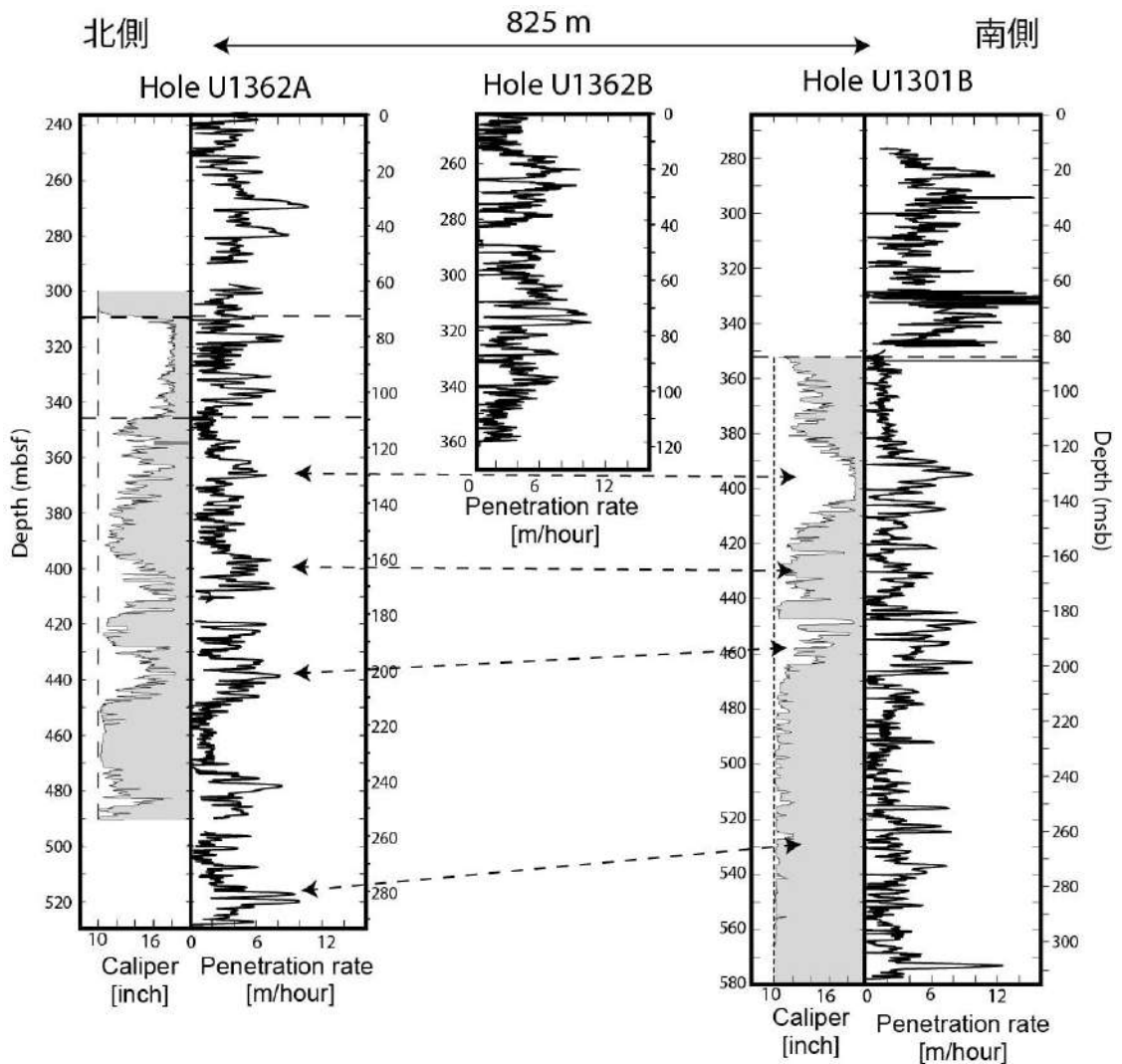


図5 Caliper (孔径) と掘削速度から推定した高浸透率層 (Becker *et al.* 2013). 孔径が広い部分 (掘削速度の速い部分) は, Porousで高浸透率層であると考えられる. 825m離れた2つの孔井で同様の傾向がみられる.

4. おわりに

これまでの掘削研究によって, (1) 海嶺翼部では海底に露出している地殻の高まりで海水を吸い込み, 別の高まりで海水を吐き出していること, (2) リッジに沿った断層やフラクチャーに伴う浸透率の異方性が卓越していること, (3) 海洋性地

殻表面から180m~200mに浸透率の高い層があり, それがりッジに沿った方向に連続していること, (4) 海嶺翼部では流体挙動が地質構造によって規制されていること, などが分かってきた.

さらにIODP Exp 327によって, ファン・デ・ワール海嶺東翼部における大規模な孔井間水理モニタリング・ネットワークが完成した. 今後はトレー

サー試験の結果から、地殻内の水理特性を、より定量的に評価できると考えられる。さらに本研究航海の最大の目的である“定常状態”での地殻内流体の温度、圧力、化学組成、微生物活動に関する情報は、近い将来に CORK からデータを吸い出すことによって、取得されると期待されている。

参考文献

- [1] Becker, K., and Davis, E. E. (2003) : New evidence for age variation and scale effects of permeabilities of young oceanic crust from borehole thermal and pressure measurements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 210, 499-508.
- [2] Becker K., Fisher, A. T., and Tsuji, T. (2013) : New packer experiments and borehole logs in upper oceanic crust : Evidence for ridge-parallel consistency in crustal hydrogeological properties, *Geochem. Geophys. Geosyst.* In press, doi:10.1002/ggge.20201.
- [3] Cowen, J. P., Giovannoni, S. J., Kenigm, F., Johnson, H. P., Butterfield, D., Rappé, M.S., Hutnak, M., and Lam, P., (2003) : Fluids from aging ocean crust that support microbial life. *Science*, 299, 120-123.
- [4] Davis, E. E., Mottl, M. J., Fisher, A. T., and Firth, J. (1997) : Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, vol. 168, 470 pp., Ocean Drill. Program, College Station, Tex.
- [5] Elderfield, H., Wheat, C. G., Mottl, M.J., Monnin, C., and Spiro, B. (1999) : Fluid and geochemical transport through oceanic crust : A transect across the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 172, 151-165.
- [6] Fisher, A. T. (1998) : Permeability within basaltic oceanic crust, *Rev. Geophys.*, 36 (2), 143-182.
- [7] Fisher, A. T., *et al.* (2003) : Hydrothermal recharge and discharge across 50 km guided by seamounts on a young ridge flank, *Nature*, 421, 618-621.
- [8] Fisher, A. T., Urabe, T., and Klaus, A., (2005) : Proc. IODP, 301 : Washington, DC (Integrated Ocean Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.2301.2005
- [9] Fisher, A. T., Davis, E. E., and Becker, K. (2008) : Borehole-to-borehole hydrologic response across 2.4 km in the upper oceanic crust : implications for crustal-scale properties. *J. Geophys. Res.*, 113, B07106. doi:10.1029/2007JB005447
- [10] Fisher, A. T., Tsuji, T., and Petronotis, K. (2011) : Proc. IODP, 327 : Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.327.2011
- [11] Fisher, A. T., Tsuji, T., Petronotis, K., Wheat, C. G., Becker, K., Clark, J. F., Cowen, J., Edwards, K., Jannasch, H., and the IODP Expedition 327 and Atlantis Expedition AT18-07 Shipboard Parties, (2012) : IODP Expedition 327 and Atlantis Expedition AT 18-07 : observatories and experiments on the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge. *Sci. Drill.*, 13, 4-11.
- [12] Hutnak, M., Fisher, A. T., Zühlsdorff, L., Spiess, V., Stauffer, P., and Gable, C. W. (2006) : Hydrothermal recharge and discharge guided by basement outcrops on 0.7-3.6 Ma seafloor east of the Juan de Fuca Ridge : Observations and numerical models. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 7, Q07O02. doi:10.1029/2006GC001242
- [13] Johnson, H. P., and Pruis, M. J. (2003) : Fluxes of fluid and heat from the oceanic crustal reservoir. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 216, 565-574.
- [14] Mottl, M. (2003) : Partitioning of energy and mass fluxes between mid ocean ridge axes and flanks at high and low temperature. In Halbach, P., Tunncliffe, V., and Hein, J. (Eds.), *Energy and Mass Transfer in Submarine Hydrothermal Systems*: Berlin (Dahlem University Press), 271-286.
- [15] 辻 健, Fisher, A., Spiess, V., and Villinger, H. (2012) : Geological structures controlling hydrothermal circulation system in the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, Japan Geoscience Union Meeting 2012, MIS27-P27.
- [16] Tsuji, T., Iturrino, G. (2008) : Velocity-porosity relationships of oceanic basalt from eastern flank of the Juan de Fuca ridge : The effect of crack closure on seismic velocity. *Exploration Geophysics*, 39, 41-51.
- [17] Wheat, C. G., Elderfield, H., Mottl, M. J., and Monnin, C. (2000) : Chemical composition of basement fluids within an oceanic ridge flank: implications for along-strike and across-strike hydrothermal circulation. *J. Geophys. Res.*, 105 (B6), 13437-13447.
- [18] Zühlsdorff, L., Hutnak, M., Fisher, A. T., Spiess, V., Davis, E. E., Nedimovic, M., Carbotte, S., Villinger, H., and Becker, K. (2005) : Site surveys related to IODP Expedition 301 : ImageFlux (SO149) and RetroFlux (TN116) expeditions and earlier studies. In Fisher, A. T., Urabe, T., Klaus, A., and the Expedition 301 Scientists, Proc. IODP, 301 : College Station, TX doi:10.2204/iodp.proc.301.102.2005

