



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

低速拡大海嶺のリソス フェアの成長と進化

— 大西洋アトランティスマシフに おける IODP 304/305 掘削 —

小原 泰彦

**Lithospheric accretion and evolution of a
slow-spreading ridge : IODP Expedition
304/305 at Atlantis Massif, Mid-Atlantic
Ridge**

Yasuhiko Ohara

おはら やすひこ : 海上保安庁海洋情報部 /
海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

IODP Expedition 304 と 305 において、世界で最初に記載された海洋コアコンプレックスの一つである Atlantis Massif が掘削された。事前の予想に反して、Atlantis Massif ははんれい岩類から成ることが明らかになった。この結果に基づき、海洋コアコンプレックスでは、かんらん岩は蛇紋岩として、はんれい岩類から成る主岩体の周囲を鞘のように取り囲んでいる、というモデルが提出された。

1. はじめに

海洋コアコンプレックスは、低速拡大海嶺を中心とした海底拡大系においてデタッチメント断層 (低角の正断層) が発達し、その断層運動に伴って海底面に下部地殻やマントル物質が露出しているドーム状の地形的高まりの構造である。その表面 (すなわち断層面) には海底の拡大方向に平行な畝構造 (コルゲーション) を伴い、かんらん岩やはんれい岩類が露出していることが一般的な特徴である (Cann *et al.*, 1997 ; Tucholke *et al.*, 1998 など)。コルゲーションを伴う、という特徴を強調して、本構造を「メガムリオン」と呼ぶ場合もある (Tucholke *et al.*, 1998)。「ムリオン」とは、本来、建築学の用語であり窓の格子のことを指す。

海洋コアコンプレックスは、海洋リソスフェア研究の「テクトニック・ウィンドウ」として、海洋リソスフェアの成長と進化に関する情報を提供する優れた場である。2004 年 11 月 17 日から、2005 年 3 月 2 日にかけて、大西洋中央海嶺の北緯 30 度に位置する海洋コアコンプレックスである Atlantis Massif において Expedition 304 と 305 の 2 つのレグで掘削が実施された (図 1)。

Atlantis Massif は、1990 年代後半になって、世界で最初に記載された海洋コアコンプレックスの一つであり (Cann *et al.*, 1997, Blackman *et al.*, 1998)、大西洋中央海嶺の北緯 30 度にある Atlantis Fracture Zone と大西洋中央海嶺との会合点に位置する。地磁気異常データから、Atlantis Massif は 0.5 – 2 Ma に形成された。過去 5 Ma の平均両側拡大速度は約 2.4 cm/y である (Pariso *et al.*, 1996)。Atlantis

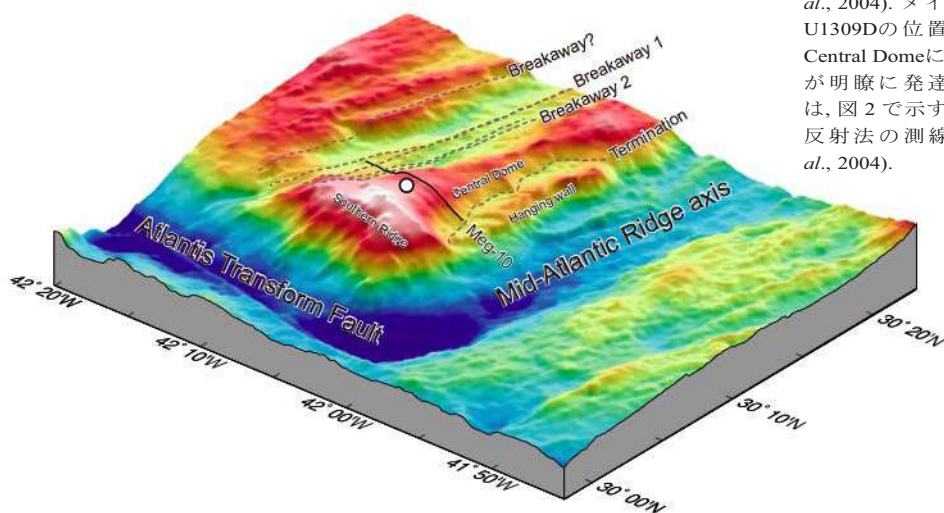


図1 3D bathymetry of Atlantis Massif (modified after Canales *et al.*, 2004). メインの掘削孔であるU1309Dの位置を白丸で示した。Central Domeには、コルゲーションが明瞭に発達している。Meg-10は、図2で示すマルチチャンネル反射法の測線である (Canales *et al.*, 2004).

Massif は、コルゲーションの発達した Central Dome と、その南側を境する Southern Ridge から構成されている (図1)。Southern Ridge の頂上付近には、蛇紋岩生態系として注目を集めた Lost City hydrothermal field が存在している (図1; Kelley *et al.*, 2001)。

2. IODP Expedition 304/305 の科学目的

Atlantis Massif は、次の根拠に基づき、大部分かんらん岩で構成されていると予想されていた。

- Southern Ridge は、Central Dome の断面が露出していると考えられていた。Southern Ridge でのサンプリングでは、70% がかんらん岩、残りの30% がはんれい岩及び玄武岩であった (Blackman *et al.*, 2002; Karson *et al.*, 2006, Boschi *et al.*, 2006)。

- 地震波トモグラフィーの結果から、P波速度 7.5 km/s の層が 600 mbsf にあるというモデルが当時のデータを説明し得たことから、Atlantis Massif では海底下浅所にモホが存在しているとされた (Collins *et al.*, 2003)。また、Central Dome から Southern Ridge に掛けて、海底下 0.2 から 0.5 秒 (往復走時) に連続した強い反射面 (D-reflector) が存在すること (図2; Canales *et al.*, 2004) が、この

予想に対する大きな根拠とされた。

- 重力モデリングから、Atlantis Massif は隣接する高まりに比べ、 $200 - 400 \text{ kg/m}^3$ 高い密度を持つとされた。新鮮なかんらん岩、及び変質したかんらん岩とはんれい岩の混成物 (密度 3300 kg/m^3) と平均的な海洋地殻 (密度 2850 kg/m^3) の組み合わせがこの密度差を説明できるとされた (Blackman *et al.*, 1998; Nooner *et al.*, 2003)。

これらの事前予想に基づく Expedition 304/305 の科学目的は、海洋コアコンプレックスの形成を支配する諸プロセスを明らかにすることであり、Atlantis Massif の表層の数メートルに存在するであろう、デタッチメント断層に伴う断層岩を採取することであった。この科学目的を達成するための検証すべき作業仮説として7つの点が挙げられた (表1)。

しかし、当時の海洋リソスフェア研究コミュニティが、暗黙のうちに共有していた最大の科学目的は、掘削点下数百メートルに存在すると信じられていた (Collins *et al.*, 2003; Canales *et al.*, 2004)、新鮮なかんらん岩の回収であった。それがゆえに、乗船研究者の大半がかんらん岩研究者で占められることとなった (表2)。

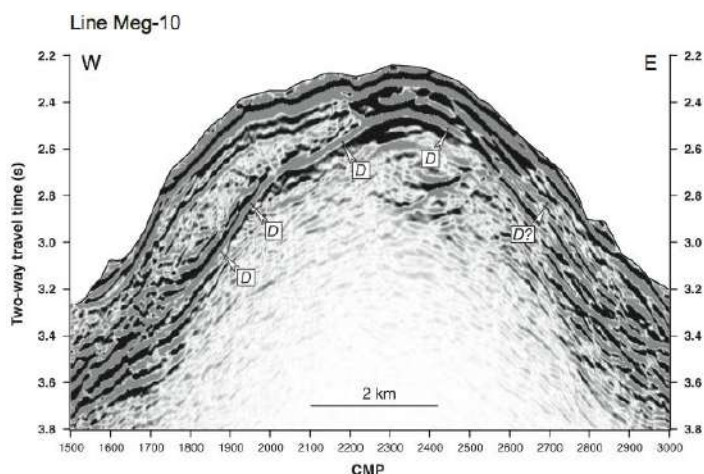


図 2 Multi-channel seismic profile across Atlantis Massif (modified after Canales *et al.*, 2004). Central Domeを横切る Meg-10 の記録. 海底下 0.2 から 0.5 秒 (往復走時) に連続した強い反射面 (D-reflector) が存在している.

表 1 Hypotheses to be tested by IODP Expedition 304/305.

Number	Hypothesis
1	A major detachment fault system controlled the evolution of Atlantis Massif.
2	Plate flexure (rolling hinge model) was the dominant mechanism of footwall uplift.
3	Significant unroofing occurred during formation of this oceanic core complex.
4	The nature of melting and/or magma supply contributed to episodes of long-lived lithospheric faulting.
5	Expansion associated with serpentinization contributed significantly to uplift of the domal core.
6	The Moho at Atlantis Massif is a hydration front.
7	Positive gravity anomalies at Atlantis Massif indicate relatively fresh peridotite.

表 2 List of onboard participants for IODP Expedition 304/305.

Name	Affiliation	Role	Expertise in petrology
Expedition 304 (航海期間: 2004/11/17–2005/1/8)			
Donna Blackman	Scripps Institution of Oceanography	Co-chief scientist	-
Barbara E. John	University of Wyoming	Co-chief scientist	-
D. Jay Miller	Texas A&M University	Staff scientist	-
前田仁一郎	北海道大学理学部	Igneous Petrologist	Gabbroic petrology
廣瀬文洋	京都大学理学部	Structural Geologist	-
Eric Suello Andal	金沢大学理学部	Igneous Petrologist	Ultramafic petrology
中川達功	東北大学理学部	Microbiologist	-
淡路俊作	東京大学工学部	Geochemist	-
Expedition 305 (航海期間: 2005/1/8–2005/3/2)			
Benoit Ildefonse	Université Montpellier II	Co-chief scientist	Ultramafic structural petrology
小原泰彦	海上保安庁海洋情報部	Co-chief scientist	Ultramafic petrology
D. Jay Miller	Texas A&M University	Staff scientist	-
阿部なつ江	海洋研究開発機構	Igneous Petrologist	Ultramafic petrology
田村明弘	金沢大学理学部	Igneous Petrologist	Ultramafic petrology
石丸聡子	金沢大学理学部	Igneous Petrologist	Ultramafic petrology
道林克禎	静岡大学理学部	Structural Geologist	Ultramafic structural petrology
野坂俊夫	岡山大学理学部	Metamorphic Petrologist	Ultramafic petrology
富永雅子	Texas A&M University	Paleomagnetist	-
山崎徹	北海道大学理学部	Geochemist	Gabbroic petrology

(注 1) 乗船研究者については、J-DESC 関係者のみを記した。

(注 2) 所属機関は当時のものである。

3. IODP Expedition 304/305 の掘削結果概要

Atlantis Massif Central Dome はドーム構造の全体が均一な特徴（組成・変形構造・変質）を持つと信じられ、Expedition 304/305 の掘削点の選定に当たっては、掘削の障害となる礫岩を避けることが優先され、これまでの地震波探査測線の直上に掘削点を選定されなかった。

Expedition 304/305 を通して、計 12 孔が掘削された (U1309A, U1309B, U1309C, U1309D, U1309E, U1309F, U1309G, U1309H, U1310A, U1310B, U1311A, U1311B)。このうち、U1309 が下盤、U1310 と U1311 が上盤の掘削を目的としたが、上盤サイトは脆い玄武岩のため、不成功に終わった。

一方、下盤サイトでは、U1309D は 1415.5 mbsf まで掘進し、連続した海洋地殻セクションの回収に成功した。平均コア回収率は 75 % という高い率であった。得られた岩石種は、約 3 % のダイアベースと 0.3 % の蛇紋岩、また極少量の leucocratic または felsic vein 以外はほぼ全てはんれい岩類であり、事前に予想された新鮮なマントルかんらん岩は掘進した範囲内では存在しなかった (図 3)。従って、Expedition 304/305 では「モホ面が変質フロントであるか」という仮説の解決には寄与することはできなかった。

はんれい岩類は、かんらん石に富む olivine-rich troctolite から、olivine gabbro, gabbro, gabbronorite, olivine gabbronorite, そして Fe-Ti oxide に富む oxide gabbro まで、多様な変化を示し、変質の程度もほぼ 0 % から 100 % まで変化に富む。コアの解析結果の主な結果を示すと次の通りにまとめられる (図 3 ; Blackman *et al.*, 2011) :

- U1309 のはんれい岩類は、基本的には、MORB タイプメルトが複数回に渡って貫入することによって形成された集積岩である (Godard *et al.*, 2009)。

- ジルコンの U-Pb 年代によれば、Atlantis Massif を形成したデタッチメント断層の過去 20 万年の露出速度は、 28.7 ± 6.7 mm/y であると決定された

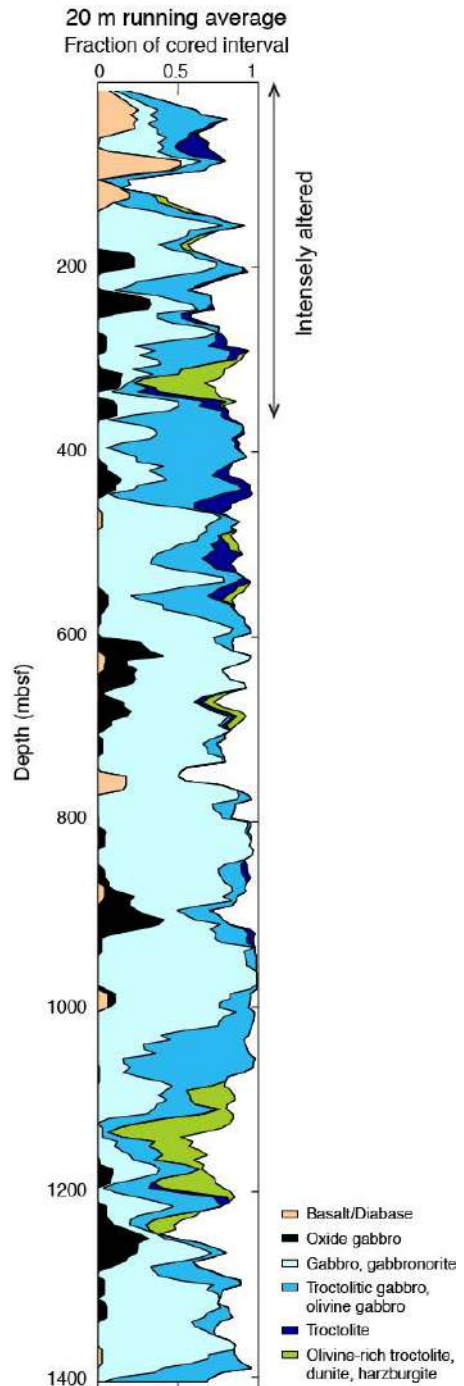


図 3 Lithological variation of U1309D (modified after Blackman *et al.*, 2006). メインの掘削孔である U1309D の岩相分布. 380 mbsf までが変質度が高い。

(Grimes *et al.*, 2008). この速度は, Atlantis Fracture Zone 付近の大西洋中央海嶺の両側拡大速度 (Pariso *et al.*, 1996) とほぼ等しい.

- U1309 で掘削されたわずかな量のかんらん岩は, メルトと反応しているが, 残留岩であることが示された (Tamura *et al.*, 2008 ; Godard *et al.*, 2009).

- Olivine-rich troctolite は, かんらん石に富む原岩 (マントルかんらん岩, あるいは, 超マフィック集積岩) とメルトが大規模に反応して形成されたものであり, 単純な集積岩ではないことが示された (Suhr *et al.*, 2008 ; Drouin *et al.*, 2009, 2010).

- U1309D のコアの変質度から, 海水が広く浸透するのは上方の 380 mbsf までであり, 800 mbsf 以深になると, 変質はフラクチャーの近傍等などに限られ, 大部分は極めて新鮮であることが判明した (Blackman *et al.*, 2006 ; Nozaka and Fryer, 2011).

- 地磁気データから, 海洋コアコンプレックスの下盤が最低でも 45 度の反時計回りの回転 (海嶺拡大軸に平行な軸に対して) を生じたことが判明した (Morris *et al.*, 2009).

Expedition 305 の掘削完了後, U1309D においてロギングが 800 mbsf まで実施され, 各種検層データとチェックショットによる地震波データが得られた. 天候の悪化で, 800 mbsf 以深のチェックショットは実施できなかったが, 2012 年 2 月に Expedition 340T として U1309D のロギングとチェックショットが実施され, 1400 mbsf まで各種検層データと地震波データが得られた. 750 mbsf と 1100 mbsf に存在する断層の近傍で, 温度異常が認められ, これは海水の循環がこれらの断層沿いに生じていると解釈された (Blackman *et al.*, 2013). U1309D のコアと新たな検層データの対比では, 310 – 350 mbsf と 1080 – 1220 mbsf に存在する olivine-rich troctolite レイヤーのうち, フラクチャー周辺の高変質部において, 地震波速度, 非抵抗, 帯磁率の明瞭な変化点となっていることが確認された (Blackman *et al.*, 2013).

4. 議論とまとめ

南西インド洋海嶺の Atlantis Bank や大西洋中央

海嶺の 15 度 45 分地域の海洋コアコンプレックスの ODP による掘削や事前調査では,

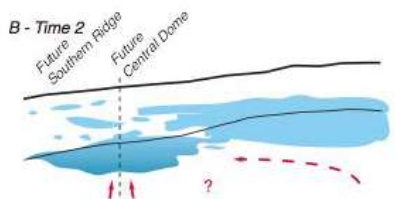
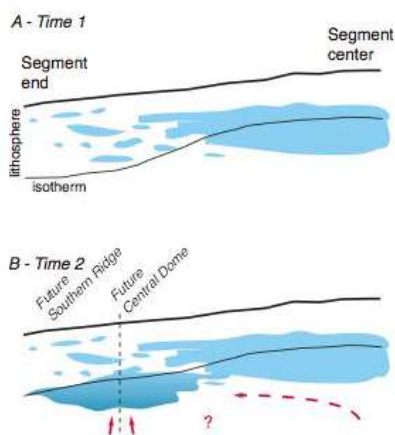
- 掘削では, かんらん岩ではなく, はんれい岩類が大量に掘削されている

- 事前調査では, ドレッジで大量のかんらん岩が採取されている

という Atlantis Massif と類似した結果となっている. これらの事実は, 「マグマ供給が少ない条件下における海底拡大によって海洋コアコンプレックスが形成される」というこれまでのモデルに疑問を投げかけるものであり, 逆に「マグマが存在する条件下における海底拡大によって海洋コアコンプレックスが形成される」という新しいモデルを示唆するものである. そこで「海洋コアコンプレックスの核はマントルかんらん岩ではなく, はんれい岩類であり, かんらん岩は蛇紋岩として, はんれい岩類から成る主岩体の周囲を鞘 (さや) のように取り囲んでいる」という新たなモデルが提案された (図 4 ; Ildefonse *et al.*, 2007 ; Blackman *et al.*, 2011). このモデルを裏付けるように, 最近の地震波構造解析では, 海洋コアコンプレックスのターミネーションの近傍にガプロが定置することが示されている (Canales *et al.*, 2008 ; Xu *et al.*, 2009 ; Henig *et al.*, 2012). Tucholke *et al.* (2008) は, Buck *et al.* (2005) による数値計算モデルと, 世界各地の海洋コアコンプレックスの観測結果を合わせて考察し, プレートの拡大に対して 30 – 50 % という「中程度のマグマ供給」が拡大軸の片側の海底で発生した際に, もう一方の海底においてデータタッチメント断層が最も発達する, と提案した.

Expedition 304/305 によって, Atlantis Massif では海底下浅所にモホが存在している, という事前の予想が覆ってしまった. 期待通りにかんらん岩が採取できなかったことは, 「地球物理的解析の結論は, ユニークな解を与えるものである」と思い込んでしまった, 乗船研究者のみならず, 海洋リソスフェア研究コミュニティに大きな驚きと落胆を与えた. Expedition 304/305 の結果を受けて, Expedition 304/305 の実現の原動力となった Collins *et al.* (2003) の「P 波速度 7.5 km/s の層が

Along-axis view



Across-axis view

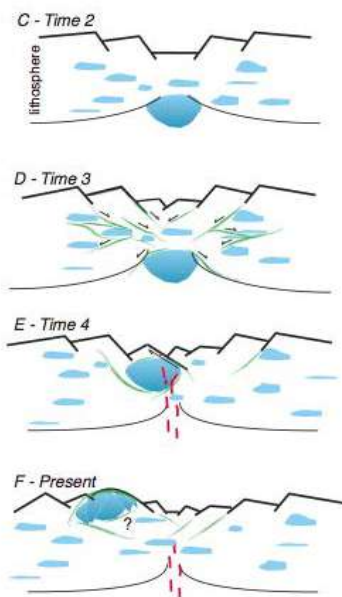


図4 Revised evolutionary model (modified after Ildefonse *et al.*, 2007). 青色がはんれい岩を、白色がかんらん岩を、緑色が蛇紋岩を示す。低速拡大海嶺のセグメント端では、間欠的なマグマ活動により、海洋コアコンプレックスの核が形成される (Time 2)。その後、プレートの拡大により正断層系が発達し、断層の隙間を蛇紋岩が潤滑油のように侵入し、海洋コアコンプレックスが定置する。

600 mbsfにある」というモデルの再検証が当事者らによって行われている。その結果、浅所におけるマンツルの存在は必ずしも必要ではなく、特に、海底下数百 m の速度は 6.5 km/s 以下であり、典型的なマフィック岩であるとされた (Collins *et al.*, 2009)。また、Canales *et al.* (2004) で示された D-reflector の成因について、可能性の一つとして、380 mbsf の変質度の境界が挙げられたが、断定はできなかった (Blackman *et al.*, 2011)。海洋リソスフェア研究コミュニティは、Expedition 304/305 の結果を通じて、「地球物理的解析の結論は、幾つかの可能性を示唆する」ものに過ぎない、という教訓を得た (Blackman *et al.*, 2011) と共に、逆説的に「海洋コアコンプレックスの核ははんれ

い岩類である」という新しいモデル (図4 ; Ildefonse *et al.*, 2007 ; Blackman *et al.*, 2011) を得たと言えるだろう。

参考文献

- [1] Blackman, D. K., *et al.* (1998) Origin of extensional core complexes: Evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone, *J. Geophys. Res.*, 103, 21315-21333, doi:10.1029/98JB01756.
- [2] Blackman, D. K., *et al.* (2002) Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30°N) : Implications for the evolution of an ultramafic oceanic core complex, *Mar. Geophys. Res.*, 23(5-6), 443-469.
- [3] Blackman, D. K., *et al.* (2006) Proc. IODP, 304/305, Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.), doi:10.2204/iodp.proc.304305.2006.

- [4] Blackman, D. K., *et al.* (2011) Drilling constraints on lithospheric accretion and evolution at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30°N, *J. Geophys. Res.*, 116, B07103. doi: 10.1029/2010JB007931.
- [5] Blackman *et al.* (2013) IODP Expedition 340T : Borehole logging at Atlantis Massif Oceanic Core Complex, *Sci. Drilling*, 15, 31-35, doi:10.2204/iodp.sd.15.04.2013.
- [6] Boschi, C., *et al.* (2006) Mass transfer and fluid flow during detachment faulting and development of an oceanic core complex, Atlantis Massif (MAR 30°N), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7 (1), Q01004. doi:10.1029/2005GC 00 1074.
- [7] Buck, W. R., *et al.* (2005) Modes of faulting at mid-ocean ridges, *Nature*, 434, 719-723, doi:10.1038/nature 03358.
- [8] Canales, J. P., *et al.* (2004) Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault : Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10' N), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222 (2), 543-560, doi:10.1016/j.epsl.2004.02.023.
- [9] Canales, J. P., *et al.* (2008) Seismic evidence for large-scale compositional heterogeneity of oceanic core complexes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9 (8):Q08002, doi:10.1029/2008GC002009.
- [10] Cann, J. R., *et al.* (1997) Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 385, 329-332.
- [11] Collins, J., *et al.* (2003), Seismic velocity structure of Mid-Atlantic Ridge core complexes, *Geophys. Res. Abstr.*, 5, EAE03-A-10390.
- [12] Collins, J. A., *et al.* (2009) Seismic and drilling constraints on velocity structure and reflectivity near IODP Hole U1309D on the central dome of Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30°N, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10 (1), Q01010, doi:10.1029/2008GC002121.
- [13] Drouin, M., *et al.* (2009) In situ geochemistry of olivine-rich troctolites (IODP Hole U1309D, Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N) : A record of magmatic impregnation in the lower oceanic crust, *Chem. Geol.*, 264, 71-88, doi:10.1016/j.chemgeo.2009.02.013.
- [14] Drouin, M., *et al.* (2010) A microstructural imprint of melt impregnation in slow spreading lithosphere : Olivine-rich troctolites from the Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N, IODP Hole U1309D, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q06003, doi:10.1029/2009GC002995.
- [15] Godard, M., *et al.* (2009) Geochemistry of long in-situ section of intrusive slow spread oceanic lithosphere : Results from IODP Site 1309, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279, 110-122, doi:10.1016/j.epsl.2008.12.034.
- [16] Grimes, C. B., *et al.* (2008) Protracted construction of gabbroic crust at a slow spreading ridge : Constraints from 206Pb/238U zircon ages from Atlantis Massif and IODP Hole U1309D (30°N, MAR), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9 (8), Q08012, doi:10.1029/ 2008GC002063.
- [17] Henig, A. S., *et al.* (2012) Downward continued multi-channel seismic refraction analysis of Atlantis Massif oceanic core complex, 30°N Mid-Atlantic Ridge, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13 (5), Q0AG07, doi:10.1029/2012GC 004059.
- [18] Ildefonse, B., *et al.* (2007) Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges, *Geology*, 35, 623-626, doi: 10.1130/G23531A.1.
- [19] Karson, J. A., *et al.* (2006) Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30°N, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7 (6), Q06016, doi: 10.1029/2005GC001109.
- [20] Kelley, D. S., *et al.* (2001), An off-axis hydrothermal vent field discovered near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N, *Nature*, 412, 145-149, doi:10.1038/ 35084000.
- [21] Morris, A., *et al.* (2009) Footwall rotation in an oceanic core complex quantified using reoriented Integrated Ocean Drilling Program core samples, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287 (1-2), 217-228, doi:10.1016/j.epsl.2009.08.007.
- [22] Nozaka, T., and P. Fryer (2011) Alteration of the oceanic lower crust at a slow-spreading axis: Insight from vein-related zoned halos in olivine gabbro from Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, *J. Petrol.*, 52, 643-664, doi:10.1093/petrology/egq098.
- [23] Nooner, S. L., *et al.* (2003) Constraints on crustal structure at the Mid-Atlantic Ridge from seafloor gravity measurements made at the Atlantis Massif, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (8), 1446, doi:10.1029/2003GL017126.
- [24] Pariso, J. E., *et al.* (1996) Three-dimensional inversion of marine magnetic anomalies: Implications for crustal accretion along the Mid-Atlantic Ridge (28°-31°30'N), *Mar. Geophys. Res.*, 18, 85-101, doi:10.1007/ BF00286204.
- [25] Suhr, G., *et al.* (2008) Stacked gabbro units and intervening mantle: A detailed look at a section of IODP Leg 305, Hole 1309D, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q10007, doi:10.1029/2008GC002012.
- [26] Tamura, A., *et al.* (2008) Petrology and geochemistry of peridotites from IODP Site U1309 at Atlantis Massif, MAR 30°N: Micro- and macro-scale melt penetrations into peridotites, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 155, 491-509, doi:10.1007/s00410-007-0254-0.
- [27] Tucholke, B. E., *et al.* (2008) Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions, *Geology*, 36, 455-458, doi:10.1130/G24639A.1.
- [28] Tucholke, B. E., *et al.* (1998), Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic ridge, *J. Geophys. Res.*, 103, 9857-9866, doi:10.1029/98JB00167.
- [29] Xu, M., *et al.* (2009) Heterogeneous seismic velocity structure of the upper lithosphere at Kane oceanic core complex, Mid-Atlantic Ridge, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q10001, doi:10.1029/2009GC002586.

