

総 説

海洋底熱年代学への展望：
深海掘削孔およびオフィオライトのウラン含有鉱物・年代・地温勾配
安間 了*・IODP Expedition 309 & 312 乗船研究者

Prospects for the ocean-floor geothermochronology:
U-bearing minerals, ages and geothermal gradients of Deep Sea
Drilling Holes and ophiolites
Ryo Anma* and the IODP Expedition 309 & 312 Shipboard Scientific Parties

* 筑波大学生命環境科学研究科, Graduate School of Life and Environmental Sciences,
University of Tsukuba

Abstract

Since the initiation of the Ocean Drilling Program, ocean-floor gabbros have been recovered from deep drilling holes in the Pacific (ODP Hole 504B), Atlantic (IODP Hole U1309D) and Indian (ODP Hole 735B) oceans. Recently, ODP-IODP Hole 1256D in the East Pacific, opened during ODP Leg 206 and deepened through IODP Exp. 309 and Exp. 312, successfully penetrated into gabbros and provided a complete and intact section of the upper oceanic crust (Wilson et al., 2006). The chance of having plutonic rock specimens from the ocean-floor in our hand will increase rapidly in the next decades by the operation of "Chikyu".

In this paper, we briefly review the mode of occurrence of U-bearing minerals, ages and geothermal gradients estimated from deep-sea drilling holes and ophiolites. Dikes recovered from the 15 Ma Hole 1256D crust exhibit an interesting feature; titanite (sphene) concentration in hydrothermal veins and glassy fillings in the matrix of dike-margin breccias. Complex cross cutting relationships of hydrothermal veins and ubiquitous occurrence of dike-margin breccias imply that they were formed just after the dike intrusions. Recently, zircon crystals were separated from the Indian ocean gabbros (Schwartz et al., 2005) and dikes and gabbros of the 6 Ma Taitao ophiolite (Anma et al., 2006), which contains ~40 to 80 ppm Zr. U-Pb ages of such minerals must represent the age of magma crystallization, whereas fission track ages present cooling ages (below ~250°C).

The U-Pb ages for the Indian ocean gabbros (Schwartz et al., 2005) show striking consistency with age estimated from the paleomagnetic records. The U-Pb and fission track ages of the Taitao ophiolite that formed nearby the Chile ridge show good agreement within error range (0.4 Ma to 0.1 Ma depending on U contents), implying rapid crystallization and cooling (Anma et al., 2006). Thus, both dating methods yield reliable and consistent ages with reasonable accuracy even for young basic rocks.

Difference between temperatures estimated using oxygen isotopes of hydrothermal minerals and current geothermal gradients measured along the 6 Ma Hole 504B (~100°C/km; Alt, 1999)

indicates that the sheeted dikes in 504B cooled down below the closing temperature of zircon fission track after the hydrothermal alteration. In contrast, geothermal gradient measured along the 15 Ma Hole 1256D was $\sim 60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Expedition 312 Scientists, 2006), much lower than the 6 Ma crust. This implies a possibility to measure cooling rate of ocean floor in low temperature range by comparing U–Pb and fission track ages of igneous zircons and hydrothermal titanites. Such basic data will be useful to deduce the locale of ophiolite genesis; an interesting research target for the Japanese Fission–Track community.

Key words: Ocean–floor geothermochronology, Ophiolites, Deep sea drilling, U-bearing minerals

1. はじめに

2004年に統合国際深海掘削計画 (IODP) が開始されて以来、2005年12月までに大西洋中央海嶺 (Expedition 305 Scientists, 2005) と太平洋ココス・プレート (Expedition 312 Scientists, 2006) の海洋底から深成岩類が採取された。ODP時代に行われたインド洋での掘削成果 (Dick et al., 1999 など) をあわせると、三

大洋のガブロが深海掘削により採取されたことになる。とくに赤道域東太平洋の ODP-IODP 第1256D 孔を継続掘削した IODP 第312次航海では、堆積物・溶岩層から掘削した孔井では初めてガブロ層まで到達した (Wilson et al., 2006)。日本主導のライザー掘削船「ちきゅう」の運行を間近に控え、われわれが海洋底火成岩の連続試料を手にする機会は、今後ますます増えていくであろう。

フィッション・トラック法やU–Pb年代測定法は、ジルコン、アパタイト、スフェーンなど、ウランウム (U) を含む鉱物に適用される。Uは液相濃集元素であり、ホスト鉱物も結晶分化作用の末期に晶出するので、苦鉄質岩を中心とする海洋地殻 (あるいはオフィオライト) のU含有鉱物を対象とした年代学研究は少ない。最近、鉱物分離技術や分析技術の向上により、U含有鉱物がまれにしか含まれないガブロやドレライトについても、年代測定が適用され詳しい議論が行われるようになってきた (Schwartz et al., 2005; Anma et al., 2006)。ここでは、ODP-IODP 第1256D 孔とチリ沖三重重点近傍に露出するタイタオ・オフィオライトの苦鉄質岩類に含まれるジルコンやスフェーンなどの年代測定ターゲット鉱物の産状を報告する。また、海洋地殻およびオフィオライトに適用された年代測定例を紹介しながら、海洋底熱年代学の可能性を探る。

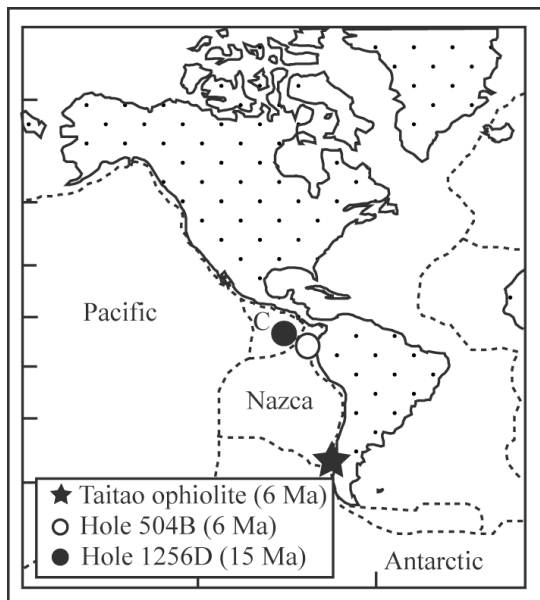


図1 ODP-IODP 第1256D 孔・ODP 第504B 孔およびタイタオ・オフィオライトの位置図

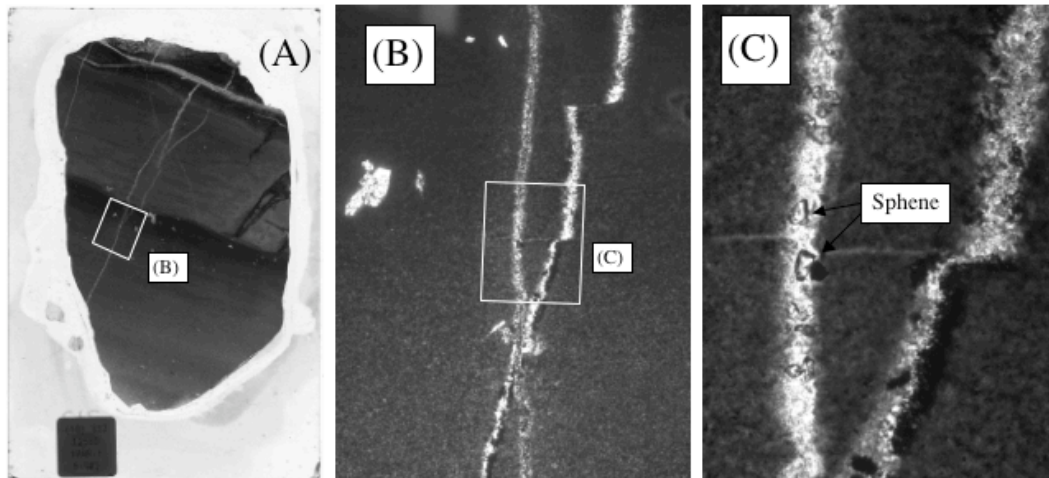


図2 ODP-IODP 第 1256D 孔のシート状岩脈に含まれるスフェーンの産状 (Expedition 312 Scientists, 2006 より引用)

ODP-IODP 第 1256D 孔の岩石と U 含有鉱物

赤道域東太平洋ココス・プレート上に位置する ODP-IODP 第 1256D 孔 (図 1) 付近の海洋地殻は 1,500 万年ほど前に 220 mm/y の超高速で拡大していた東太平洋海膨で形成された

(Wilson et al., 2003) . IODP 第 312 次航海では, ODP 第 206 節および IODP 第 309 航海を引き継いで, シート状岩脈類から掘削を開始し, 1,407 m の深度でガプロ層に到達した(Wilson et al., 2006).

シート状岩脈群は放射状に成長した単斜輝石と斜長石の集合結晶を持つ玄武岩様組織から斜方輝石含有等粒状組織に至るまで, ガプロ境界に向かって鉱物組み合わせと組織を変化させる. 斜方輝石をふくむ等粒状組織は, ガプロ境界で急激に発達しており, 接触変成を受けた再結晶組織と考えられる. シート状岩脈には急冷縁を伴う急傾斜の岩脈境界がおおく認められた (図 2) . 急冷縁は, 形成後に貫入したガラスによって充填される母材の角礫 (dike-margin breccias) や, 複雑な貫入-被貫入関係を持つ熱水変質脈を普遍的に伴う. 熱水変質脈はシート状岩脈群の上位では準垂直で

あるが, 下位の等粒状岩脈群に向かって次第に浅く傾斜するようになる. これらの角礫充填ガラスや熱水変質脈は, U 含有鉱物であるスフェーンをしばしば伴う. 急冷縁を横切る 2 本の熱水変質脈 (図 2A) のうち, 急冷縁に平行な微小断層による変位を受けていないもの (図 2B) の中に含まれるスフェーンの産状を示す (図 2C) . スフェーンを含む石英-プレーナイト脈は, 図 2C の中央下でスフェーンを含まないアクチノ閃石脈を切るものの, 上方では同じアクチノ閃石脈に収束する. いっぽう, 図 2A 上側の古い急冷縁に平行に発達する, 黒色変質ハロを伴うアクチノ閃石-葡萄石脈から派生する脈は, 中央右側で若い急冷縁によって切られており, 岩脈の貫入・冷却・熱水変質脈の貫入はごく短い期間で生じたことを示している. このような岩石から分離されたスフェーンの年代は, 岩脈貫入に伴われて生じた一連のプロセスの中の, 年代測定誤差に比べて非常に短い期間を代表するに違いない.

ガプロは等粒状岩脈群のスクリーンを挟んで, 上位のガプロ 1 と下位のガプロ 2 に分けられる. ガプロは主に斜長石と単斜輝石からなるが, 多くは酸化物に富んでおり, 斜方輝石やかんらん石を

	Unit	Sample	Rock type	Comments	Separated zircons (grains/kg)
Sheeted dike complexes	Estero Cono dike complex	TPD217	dolerite	Pl, CPx, Hb	8 (16 grains/kg)
		TPD225	dolerite	Pl, CPx, Hb	8 (8 grains/kg)
	Mitford-Rees dike complex	TPG262	dacite	Phenocryst: Hb & Pl Groundmass: Pl, K-fel, Qz, Hb & opq Myrmekite	40 (120 grains/kg)
Plutonic complex	Gabbros with doleritic dikes	TPG385	dolerite	Pl, CPx, Hb	2 (6 grains/kg)
		TPG244	gabbro M-grained	Pl: 55 %, CPx: 40 % + opq CPx ----> Hb & Ac rims apatite grains	~200 (400 grains/kg)
	Gabbro with serpentinite	TPB268	gabbro C/M-grained	Pl: 70 %, CPx: 20 % + opq CPx ----> Hb 2 zircons recognized under microscope	over 500 grains fr. 500 g specimen

図3 タイタオ・オフィオライトの苦鉄質岩から分離されたジルコンの量

含む。岩脈群/ガブロ境界およびガブロ中の流理構造は45度程度傾斜しており、シート状の貫入であると推定される。ガブロ1では優白質メルトパッチが上位に向かって濃集し、その上位ではトロニエイト質岩脈が観察された。軽いメルトの分結過程をあらわすと考えられる。ガブロには火成組織が卓越しており、塑性変形を示す試料はほとんど見いだされなかった。また顕著な傾動の証拠も見られなかった。これらの観察は、超高速拡大軸で生成した海洋地殻でも、海嶺での伸張歪は傾動ではなくマグマの貫入によって補償され、海嶺環境下で形成された海洋地殻構造をそのまま保存している可能性を示唆する。薄片ではジルコンなどのU含有鉱物はほとんど見いだせなかったが、船上での全岩組成分析によると20 ppm程度のジルコニウムは含まれている (Expedition 312 Scientists, 2006)。このような試料から分離されたジルコンは、海洋地殻の形成・冷却年代を忠実に記録していることが期待される。

タイタオ・オフィオライトのジルコン含有量と年代

タイタオ・オフィオライトは、南極プレートとナスカ・プレートの境界をなすチリ海嶺が南米プレートに向かって沈み込む、チリ沖三重点の近傍に位置する。このオフィオライトは枕状溶岩・堆積物層、シート状岩脈類、ガブロ、超苦鉄質岩と海洋リソスフェアに期待されるすべての構成要素

から成り立つ。ガブロと超苦鉄質岩類は複雑な褶曲を受けており、形成時の層厚を推定することは困難である。シート状岩脈は褶曲していないが、断層によって切られ、厚み方向の延長は植生に覆われていて正確な厚さは見積もられていない。古地磁気学的研究から、チリ海嶺衝突時にブロック回転をおこしながら南米プレート前弧域に付加されたものと推定されている (Veloso et al., 2005)。

オフィオライトの生成・定置時代を正確に見積もるため、(株)京都フィッシュン・トラックに依頼していくつかのガブロ、シート状岩脈からジルコンの分離を試みた。図3に岩石試料の特徴と、分離されたジルコンの量をまとめた。単斜輝石の一部が普通角閃石に置き換わったガブロ試料 (TPB268 および TPG244) では、400 粒子/kg 以上のジルコンが含まれていた。検鏡下でジルコンが2粒子認められた TPB268 試料では、1,000 粒子/kg ものジルコン鉱物を含んでいた。また、検鏡下でジルコンの存在が確認されなかったにもかかわらず、ドレライトからは10粒子/kg程度の、デイサイトからは100粒子/kg程度のジルコンが回収された。我々の予察的な全岩分析では、ガブロ類はおよそ40 ppm程度、シート状岩脈類は80 ppm程度のジルコニウムを含有している。粗粒ガブロは、ジルコニウム含有量が少ないにもかかわらず、比較的多量のジルコン鉱物を含んでいた。ガブロにはフィッシュン・トラック年

代測定を行うのに充分（30 粒子以上）な、またドレライトでも U-Pb 年代を決定するには十分な量（10 粒子程度）のジルコン鉱物が 1 kg の岩石試料に含まれ得る。

Anma et al. (2006) は、分離したジルコンを用いて、フィッション・トラック年代測定と SHRIMP U-Pb 年代測定を試みた。この結果、ガプロからは 5.9 ± 0.4 Ma と 5.8 ± 0.2 Ma のフィッション・トラック年代が、また、 5.65 ± 0.3 Ma と 5.61 ± 0.09 Ma の U-Pb 年代が得られた。また、シート状岩脈からは 5.22 ± 0.2 Ma の U-Pb 年代が得られた。年代測定の誤差

は U 濃度に大きく左右されるが、濃度の高いものについては後期中新世のジルコンでも ± 0.2 Ma 程度（年代値の 5% 以下）の誤差範囲で議論することが可能である。この誤差範囲は、たとえばおよそ 7 cm/y の中速拡大速度を持つチリ海嶺では、わずか 7 km の片側プレート移動距離に相当するにすぎない（ただし海嶺自体の移動速度を勘案すると、南米大陸に対して 18 km の相対移動距離に相当する）。この結果、タイタオ・オフィオライトはおよそ 600 万年前に推定されるチリ海嶺衝突事件に密接に関わり合っていること、誤差範囲で一致するフィッション・トラック年代と U-Pb 年代を持つことからおよそ 600 万年前にチリ海嶺でオフィオライトが生成した期間あるいはその直後に定置・急速な冷却を受けたこと、シート状岩脈との年代差から 0.4 Ma 程度の火成作用継続期間があったことを推定した。

年代測定の適用例と海洋底熱年代学への展望

Schwartz et al. (2005) は、ドレッジや JAMSTEC による調査航海によってインド洋アトランティス堆から採取されたガプロからジルコンを分離し、U-Pb 測定を試みた。アトランティス堆は 50 mm/y 以下の低速拡大によって形成された海洋地殻であるが、酸化ガプロのように分化の進んだ岩石は一般的にジルコンを含んでいる (Schwartz et al., 2005)。Schwartz らが得た U-Pb 年代（10 Ma ~ 12 Ma）は、古地磁気から推定される年代値と驚くべき一致を示しているが、期待値より 2.5 Ma を超えない程度で古い年代を持つジルコン粒子やジルコン核部も見つかった。数値計算から (Maclennan et al., 2005) あるいはかんらん石-単斜輝石のカルシウムの拡散から見積もられた (Coogan et al., 2002) 下部海洋地殻の冷却速度は、モホ面直上でそれぞれ $104^\circ\text{C}/\text{My}$ と $100 \sim 104^\circ\text{C}/\text{My}$ 程度であるが、上部地殻に向かって速くなる。したがって、Schwartz et al. (2005) は、これらの古い年代を持つジルコンは、同じマグマからは晶出し得ず、

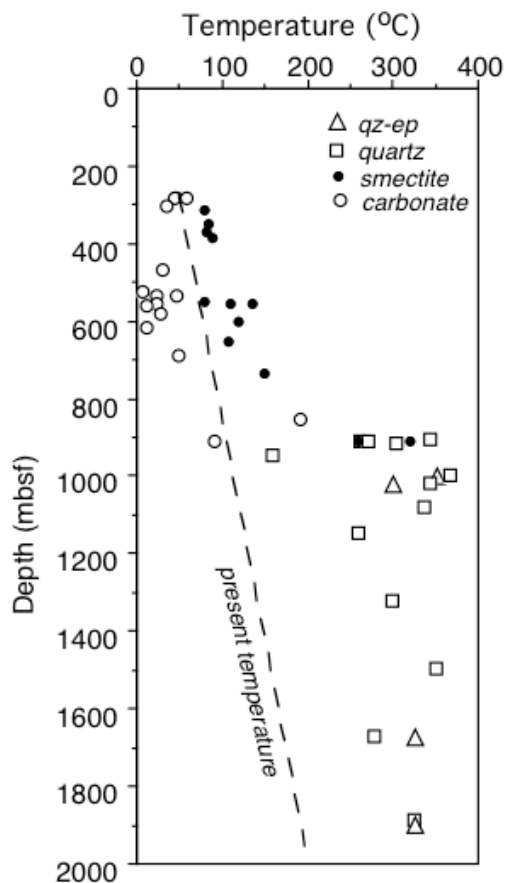


図4 ODP 第 504B 孔における地温勾配と熱水鉱物の酸素同位体比から見積もった生成温度 (Alt (1999) より引用)

低速拡大軸直下のマントル部（およそ 18 km の深さ）で形成された小規模なガブロ質メルトパッチからもたらされたと考えた。低速拡大軸における下部地殻の冷却速度が見積もられているように速いのであれば、U-Pb 年代は岩石形成年代を忠実に表しているものと考えられる。

いっぽう、第 1256D 孔で計測された 1,500 万年前の海洋地殻の地温勾配は、掘削直後でおおよそ 50°C/km、掘削 3 日後の測定ではおおよそ 60°C/km であった (Expedition 312 Scientists, 2006)。これに対し、600 万年前にココス・リッジで生成した第 504B 孔の海洋地殻は 2,100 m の深度までシート状岩脈からなっていたが、現在おおよそ 100°C/km の地温勾配をもつ (Alt et al., 1993; Alt, 1999)。ODP-IODP 第 1256D 孔でガブロの出現深度が 1,407 m と浅かったことは、地震学的に予測された拡大速度と低速度域深度の負の相関を支持した (Wilson et al., 2006)。ガブロ質マグマ溜まりの深度が、海嶺直下の地温勾配に大きな影響を及ぼしていたことは容易に想像できる。高速拡大環境下でガブロの出現深度の浅くなった第 1256D 孔では、初期の地温勾配はより大きかったに違いない。それにもかかわらず、現在の上部海洋地殻の地温勾配は時間を追って冷却しており、低温側での冷却速度は数値計算から見積もられたように速くはなく、海洋地殻が完全に冷却されるにはある程度の時間を要していることは明らかである。

図 4 に第 504B 孔における熱水鉱物の酸素同位体比から見積もられた温度と、現在の地温勾配を示す (Alt, 1999)。シート状岩脈-火山岩遷移帯 (600 m~700 m) で同位体比温度は急激に下がり、現在の地温勾配に近づくが、シート状岩脈の中では熱水変質の生じたおおよそ 300°C から、ジルコンやスフェーンのフィッション・トラック閉鎖温度をまたいで、現在の地温勾配まで冷却している。したがって、より浅くに貫入し、熱の移流や伝導によって低温側でゆっくりと冷却したシート状岩脈により低い閉鎖温度をもつフィッション・トラック法を適用し、岩石形成年代を精度よ

く決定する U-Pb 年代と比較検討すれば、海洋地殻の生成年代と平均冷却速度が、試料採取深度や海嶺からの距離の関数としてあらわせるのではないかと期待される。

海洋地殻は大陸地殻に比べて圧倒的に若く、地質体の連続性が良い。このことは海洋底熱年代学の研究に非常に有利に働く。前述のように、現在の年代測定技術により、後期中新世の試料についても年代値の 5%以内の誤差の中で議論が可能になった。これは、若い試料では絶対的年度誤差がより小さくなり (10 Ma の試料でも、 ± 0.4 Ma 程度)、より精度の良い議論ができることを意味する。いっぽう、古いオフィオライトは、絶対的年度誤差は大きくなり、構成岩での有意な年度差はより出にくくなる。拡大速度の違いによる初期の地温勾配の較差を勘案しながら、若い海洋底の標準冷却速度を実測に基づいて見積もることは、オフィオライトの年代学的研究を行うときに要求される測定誤差の大きさを理解するためにも必要であろう。

陸上に露出した海洋地殻の断片と考えられるオフィオライトには、海嶺あるいは海洋島弧環境下での生成・横方向への移動・オブダクション・島弧化といった一連のプロセスが凝縮されている。このため、あるオフィオライトの成因として、海嶺説と島弧環境説・沿海説にわかれた場合、決着のつかない議論に陥ることも考えられる。オフィオライトが海嶺で生成してからどの程度の時間を経て移動・冷却したのか？いつ付加・定置し、島弧的な改変を受けたのか？海洋地殻やオフィオライトのフィッション・トラック年代と U-Pb 年代とを比較検討することによって、このような根本的な問題に明快な回答が与えられるのではないかと期待する。

結論

「ちきゅう」の運航開始により、苦鉄質岩を主とする海洋底火成岩類の連続柱状試料を手中にする機会はますます増えるであろう。海嶺で生成したガブロやシート状岩脈からもジルコンやスフェ

ーンなどの年代測定ターゲット鉱物は産出する。陸上地質と異なり圧倒的に連続性がよい海洋底部地質を対象にして熱年代学を適用すれば、海嶺からの距離や海嶺拡大速度と平均冷却速度の相関も詳細に議論することができよう。オフィオライトの成因論にも貢献しうる重要な研究テーマであると考ええる。

謝辞

金沢大学の荒井章二教授には論文を査読して頂き、有益なコメントを頂いたことを感謝致します。また、編集の労を執って頂いた金沢大学の長谷部徳子博士に感謝致します。

文献

Alt, J., Kinoshita, H. and S. S. Party, 1993,

Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, vol. 148, Ocean Drilling Program, College Station, Texas.

Alt, J., 1999, Very low grade hydrothermal metamorphism of basic igneous rocks. In Frey, M., and Robinson, D. (Eds.), *Low Grade Metamorphism*, Blackwell, Cambridge, 169–201.

Anma, R., Armstrong, R., Danhara, T., Orihashi, Y. & Iwano, H., 2006, Zircon sensitive high mass-resolution ion microprobe U-Pb and fission-track ages for gabbros and sheeted dykes of the Taitao ophiolite, Southern Chile, and their tectonic implications. *Island Arc*, 15, 130–142.

Coogan, L. A., Jenkin, G. R. T. and Wilson, R. N., 2002, Constraining the cooling rate of the lower oceanic crust: a new approach applied to the Oman ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 199, 127–146.

Dick, H. J. B., Natland, J. H., Miller, D. J. and S. S. Party, 1999, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Leg. 176. Ocean Drilling Program, College Station, Texas.

Expedition 305 Scientists, 2005, Oceanic core complex formation, Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge: drilling into the footwall and hanging wall of a tectonic exposure of deep, young oceanic lithosphere to study deformation, alteration, and melt generation. IODP Preliminary Report, 305, doi:10.2204/iodp.pr.305. 2005.

Expedition 312 Scientists, 2006, Superfast spreading rate crust 3: a complete in situ section of upper oceanic crust formed at a superfast spreading rate. IODP Preliminary Report, 312, doi:10.2204/iodp.pr.312.2006.

Maclennan, J., Hulme, T. and Singh, S. C., 2005, Cooling of the lower oceanic crust. *Geology*, 33, 357–360.

Schwartz, J. J., John, B. E., Cheadle, M. J., Miranda, E. A., Grims, C. B., Wooden, J. L. and Dick, H. J. B., 2005, Dating the growth of oceanic crust at a slow-spreading ridge. *Science*, 310, 654–657.

Veloso E. A. E., Anma, R. & Yamazaki, T., 2005, Tectonic rotations during the Chile ridge collision and obduction of the Taitao ophiolite (Southern Chile). *The Island Arc*, 14, 599–615.

Wilson, D. S., Teagle, D. A. H., Acton, G. D. and S. S. Party, 2003, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Leg. 206, Ocean Drilling Program, College Station, Texas, 117 p.

Wilson, D. S., Teagle, T. A. H., Alt, F. C., Banerjee, N. R., Umino, S., Miyashita, S., Acton, G. D., Anma, R., Barr, S. R., Belghoul, A., Carlut, J., Christie, D. M., Coggon, R. M., Cooper, K. M., Cordier, C., Crispini, L., Durand, S. R., Einaudi, F., Galli, L., Gao, Y., Geldmacher, J., Gilbert, L. A., Hayman, N. W., Herrero-Bervera, E., Hirano, N., Holter, S., Ingle, S., Jiang, S., Kalberkamp, U., Kerneklian, M., Koepke, J., Laverne, C., Lledo

Vasquez, H. L., MacLennan, J., Morgan, S., Neo, N., Nichols, H. J., Park, S. H., Reichow, M., Sakuyama, T., Sano, T., Sandwell, R., Scheibner, B., Smith-Duque, C. E., Swift, S. A., Tartarotti, P., Tikku, A. A., Tominaga, M.,

Veloso, E. A., Yamasaki, T., Yamazaki, S, and Ziegler, C., 2006, Drilling to gabbro in intact ocean crust. Science, DOI: 10.1126/science.1126090