

南海トラフ地震発生帯掘削計画概要

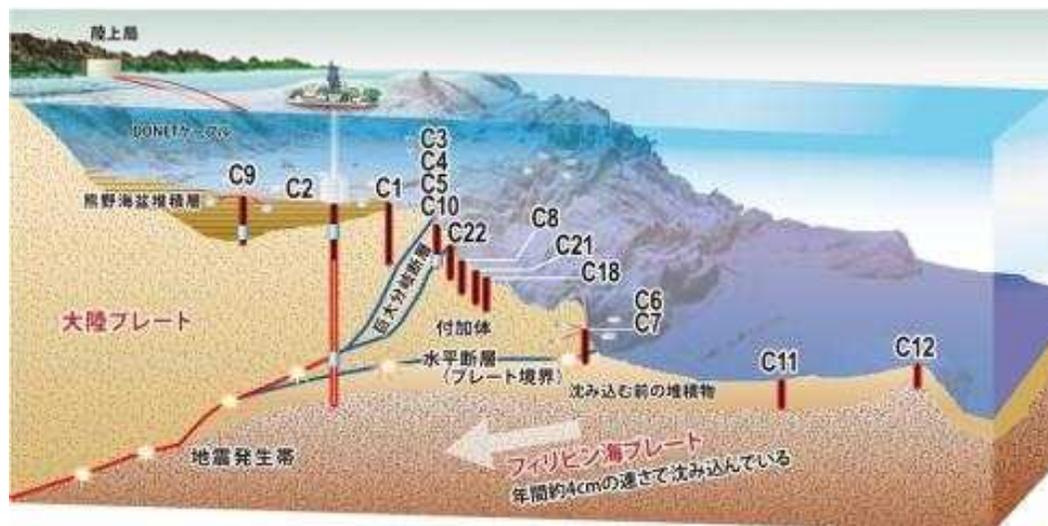
CDEX/JAMSTEC



南海掘削実施計画（全体概要）



ステージ	実施時期	掘削地点	実施概要
1	平成 19 年度	C1、C2、C3、 C4、C5、C6、 C7、C8	巨大分岐断層浅部やプレート境界断層浅部(海溝軸付近)を掘削し、地質学的特徴や過去の変動の歴史、現在の応力状態等を把握する。
2	平成 21 ~22 年度	C2、C9、C10、 C11、C12	巨大地震を繰り返し起こしていると考えられる断層(巨大地震発生帯)の直上浅部の地層を掘削し、その地質学的特徴を把握するとともに、掘削孔内に観測装置を設置して巨大地震発生に起因する地殻変動等を観測する。また、プレート沈み込みにより将来巨大地震発生帯に持ち込まれる海底堆積物を掘削し、その地質学的特徴を把握する。
3	平成 22・24 ~26 年度 +	C2	超深度掘削(水深 1,939m、海底下 5,200m 付近の巨大分岐断層及び海底下 6,000~7,000m 付近のプレート境界断層)を行い、巨大地震発生帯の地質学的特徴を把握する。
4	平成 26~ 27 年度	C2, C10, C6	超深度掘削孔に地震断層やその周辺の地層の微小な変動を捉える長期観測装置を設置する。将来的に地震・津波観測監視システム(DONET)と接続し、地震発生現場からリアルタイムでデータを取得する観測網の構築を行う。



南海掘削計画の歴史

Exp.#	Exp. Name	Duration	Days
314	NanTroSEIZE Project Stage 1 - LWD Transect	2007.9.1-2007.11.15	56
315	NanTroSEIZE Project Stage 1 Mega-Splay Riser Pilot	2007.11.16-2007.12.18	33
316	NanTroSEIZE Project Stage 1 - Thrust Faults	2007.12.19-2008.2.5	49
319	NanTroSEIZE Stage 2: Riser/Riserless Observatory 1	2009.5.10-2009.8.31	114
322	NanTroSEIZE Stage 2: Subduction inputs	2009.9.1-2009.10.10	40
326	NanTroSEIZE Stage 3: Plate Boundary Deep Riser 1	2010.7.19-2010.8.20	32
332	NanTroSEIZE Stage 2: Riserless Observatory	2010.10.25-2010.12.11	48
333	NanTroSEIZE Stage 2: Subduction Inputs 2 and Heat Flow	2010.12.12-2011.1.10	30
338	NanTroSEIZE Stage 3: Plate Boundary Deep Riser 2	2012.10.1-2013.1.13	105
348	NanTroSEIZE Stage 3: Plate Boundary Deep Riser 3	2013.9.13-2014.1.29	139

計 10研究航海、646日



【「ちきゅう」の運用実績】

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
H17年度					試験航海							
H18年度	整備工事 (操作訓練等含む)				国内試験掘削 (下北八戸沖)			海外資源掘削 (ケニア沖)				
H19年度	海外資源掘削 (豪州沖)				年次 検査	科学掘削 (南海トラフ)						中間 検査
H20年度		スラストギア製作、 アウトリーチ活動					スラストギア 交換工事				試験 航海	
H21年度		科学掘削 (南海トラフ)					試験 航海	機器保守整備、 操作訓練				
H22年度	定期検査	試験 航海	科学掘削 (南海トラフ)	科学掘削 (沖縄)	科学掘削 (南海トラフ)	JOGMEC 受託事業	被災、 回航					
H23年度	船底修復工事			海外資源掘削 (スリランカ沖)						JOGMEC 受託事業		
H24年度	科学掘削 (東北沖)	スラスト修復工 事、試験航海		科学掘削 (下北八戸沖)	科学掘削 (南海トラフ)					JOGMEC 受託事業		
H25年度	JX 受託事業			中間 検査	科学掘削 (南海トラフ)						整備作業 試験航海含む	



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ 1

LWD横断掘削

Expedition 314

2007年9月21日～2007年11月15日（56日間）

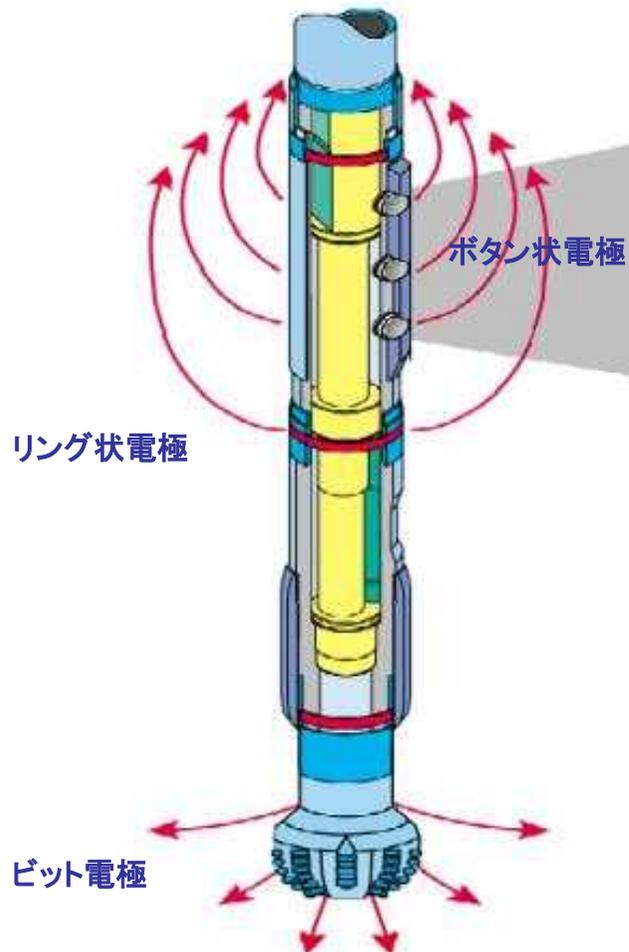
概要：

合計6地点（C0001からC0006）、12箇所（パイロット孔、土質試験孔及び掘削同時検層（LWD）孔の合計）での掘削を行い、うち5地点で掘削同時検層（LWD）を実施し、海底下400mから1400mまでの掘削孔内の各種物理データを連続的に取得することに成功。

掘削海域の付加体堆積物はプレートの沈み込みにより歪が蓄積されるため強い圧縮応力が働いており、さらに4ノットを超える黒潮の潮流下という、従来の科学掘削では経験したことがない厳しい環境下での掘削だった。

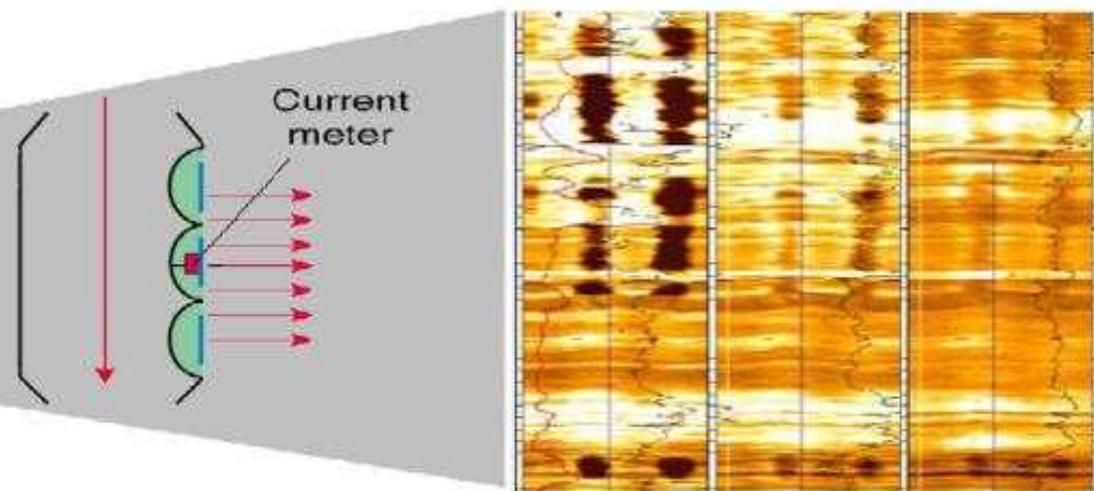


掘削同時計測(LWD) について

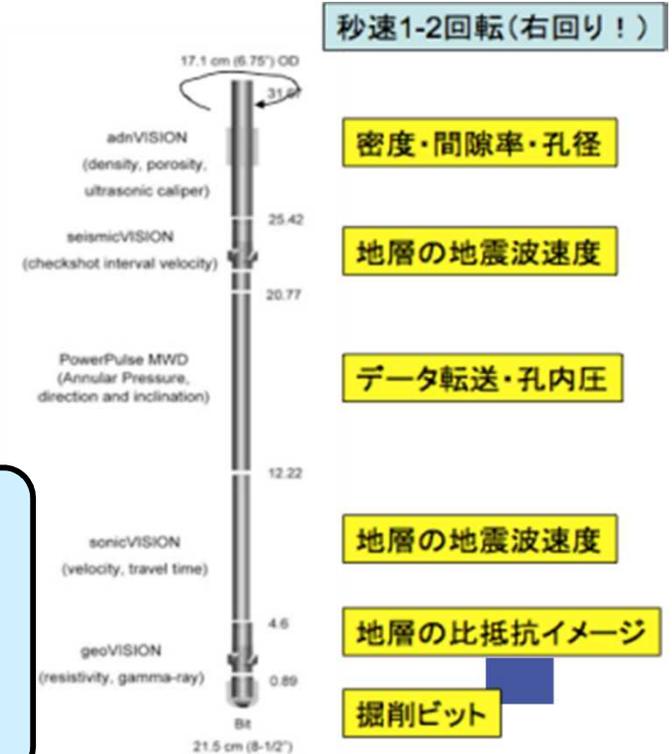


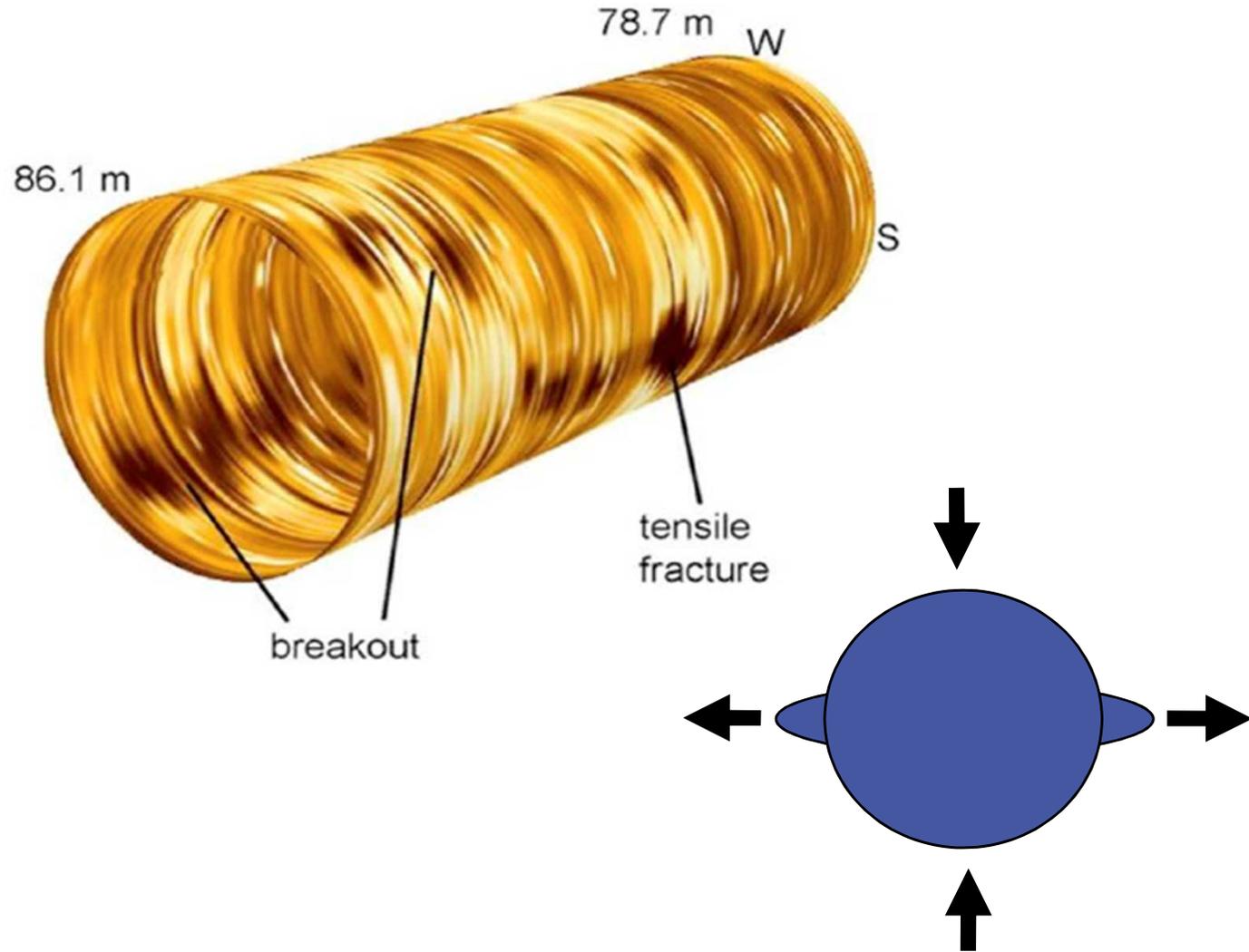
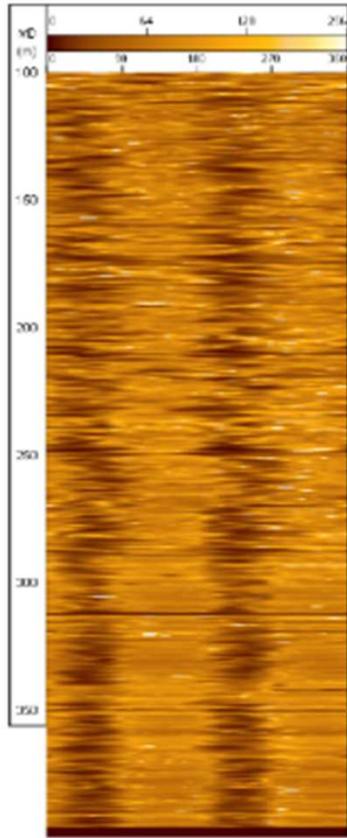
(シュルンベルジェ社資料を基に作成)

掘削と同時にリアルタイムで次のようなことができる
 掘削箇所の地層状況を“現場”連続測定
 掘削孔の安全監視及びリスク回避
 南海トラフのような地層状況の複雑な箇所でも威力を発揮する。



地質比抵抗等のリアルタイムデータ

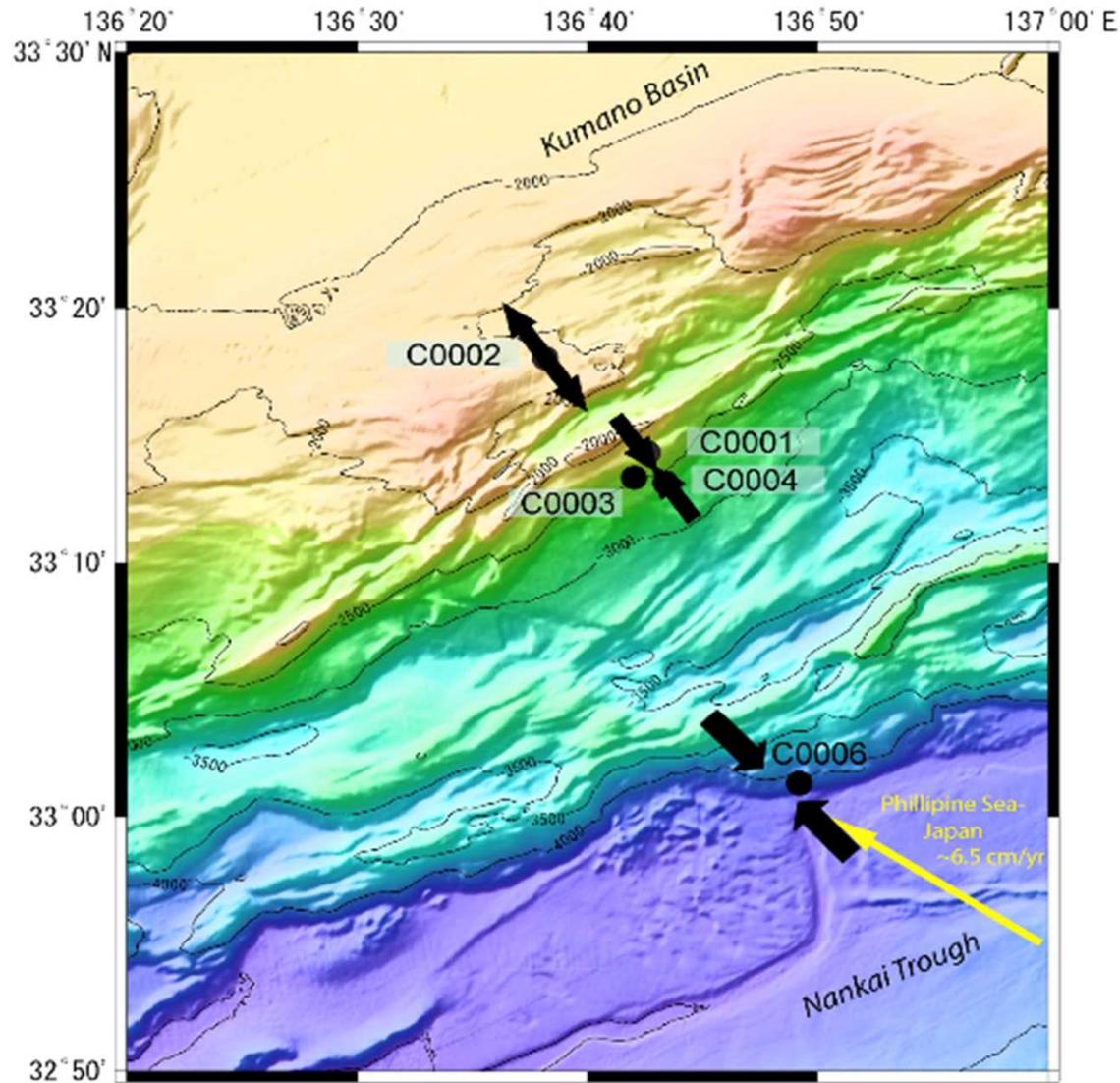




ボアホールブレイクアウトの例（黒い筋）

圧縮により破壊した割れ目が黒い筋（比抵抗が小さい）として観察される。
黒い筋に対して直交する方向が圧縮軸の方向を示す

ボアホールブレイクアウトから求められた 広域応力場の方向



ほぼプレートの沈み込む方向（黄色矢印）に平行に圧縮であるが、熊野海盆の所（C0002）では伸張である

トラブル：ドリルパイプ下部の脱落

- 1.トラブル発生日時：平成19年10月21日（日）14時15分頃
- 2.場 所：紀伊半島沖熊野灘掘削サイトNT2-01
（北緯33度13.4分、136度42.1分、水深2,453m）掘削深度：海底下約530m
- 3.状況：孔内の地質が不安定で崩れやすく、脱落したパイプがすぐに埋設されてしまう状況で、これまで8日間にわたり（内、1日は台風20号による避航を含む）、ドリルパイプとの接続を試みたが、完全な接続をすることができず、回収は不可能と判断し、掘削孔をコンクリートで塞ぐこととした。掘削同時検層（LWD）装置には放射性同位元素が組み込まれているが、耐圧容器に二重に密封されており、またコンクリートで封じ込める為、環境への影響はない。
- 4.原 因：パイプの先端部が強い封圧を持った断層帯に到達した際に、掘削孔壁が崩れ、ドリルパイプの先端部が土砂により締め付けられたことによる回転トルクの上昇が発生。それによって逆回転トルクが脱落部のパイプ接続地点で発生し、ねじれ戻しが起こったためと推定される。
- 5.対 応：今回のドリルパイプ脱落の原因、及び再発防止策について検討し必要な措置を講じた上で研究掘削を再開する。なお、放射性同位元素による測定につきましては、予備機器の準備ができないため、本研究航海では実施しないこととする。

南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ1 巨大分岐断層ライザー掘削パイロット

Expedition 315

2007年11月16日～12月18日（33日間）

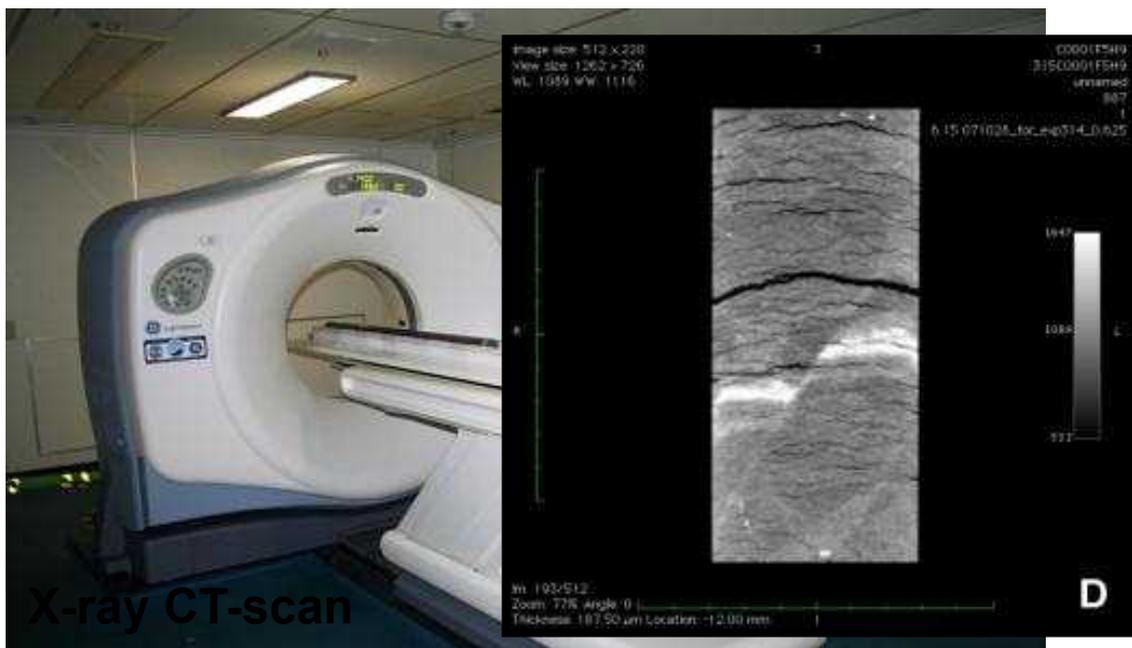
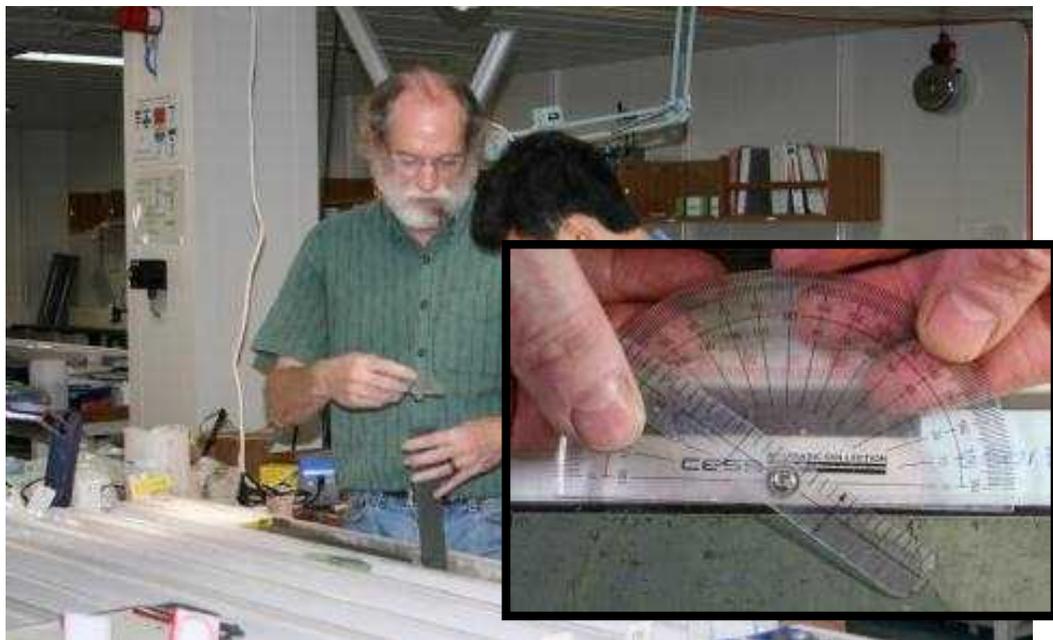
概要：

プレート境界断層の上盤側の特性を明らかにすることを目的として、南海トラフ地震発生帯浅部において掘削による柱状地質試料（コア）の採取を実施。なお、実施予定だった巨大分岐断層へのライザー掘削に向けた上部孔井設置作業については、黒潮の強い潮流下での作業実施は困難と判断し、設置作業を延期した。

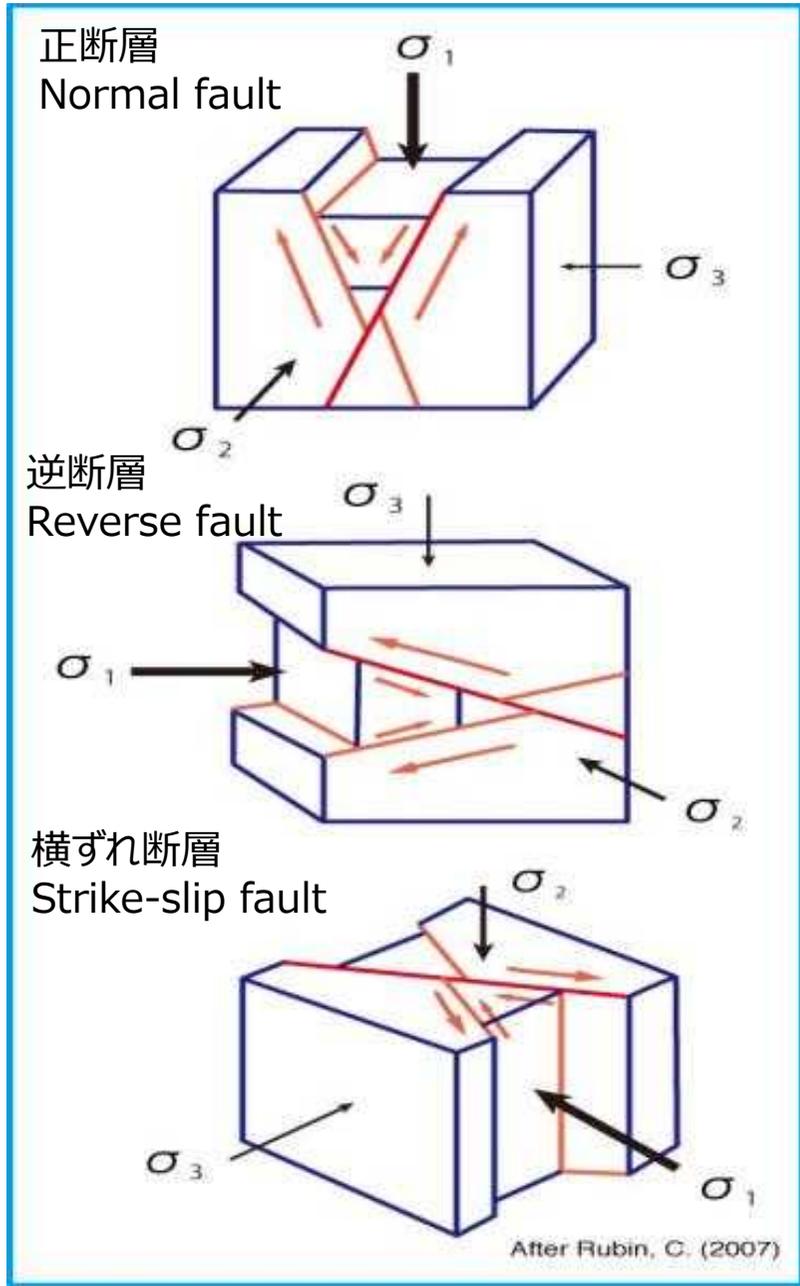


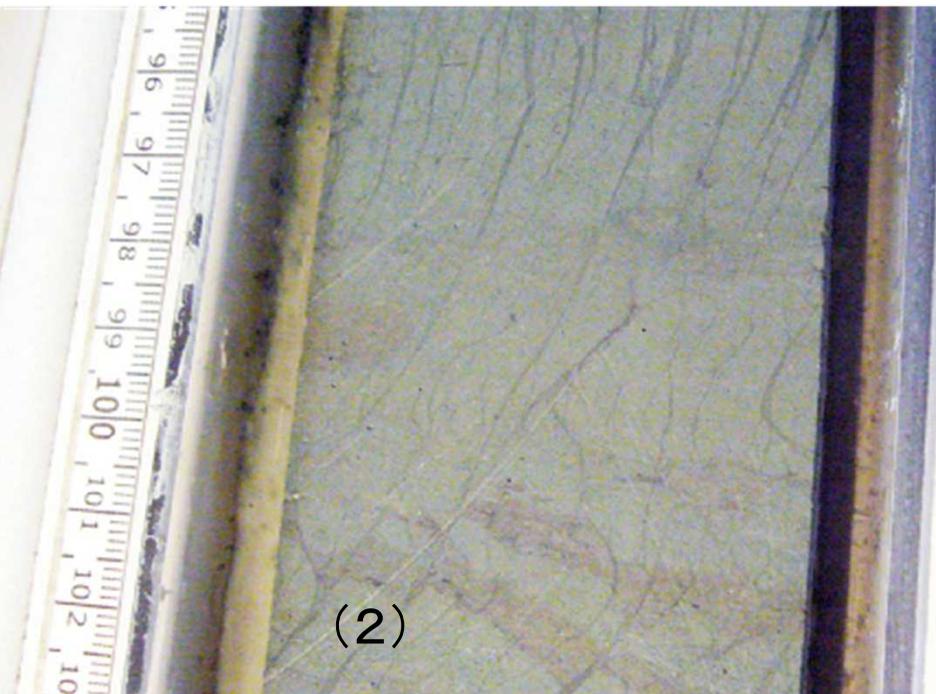
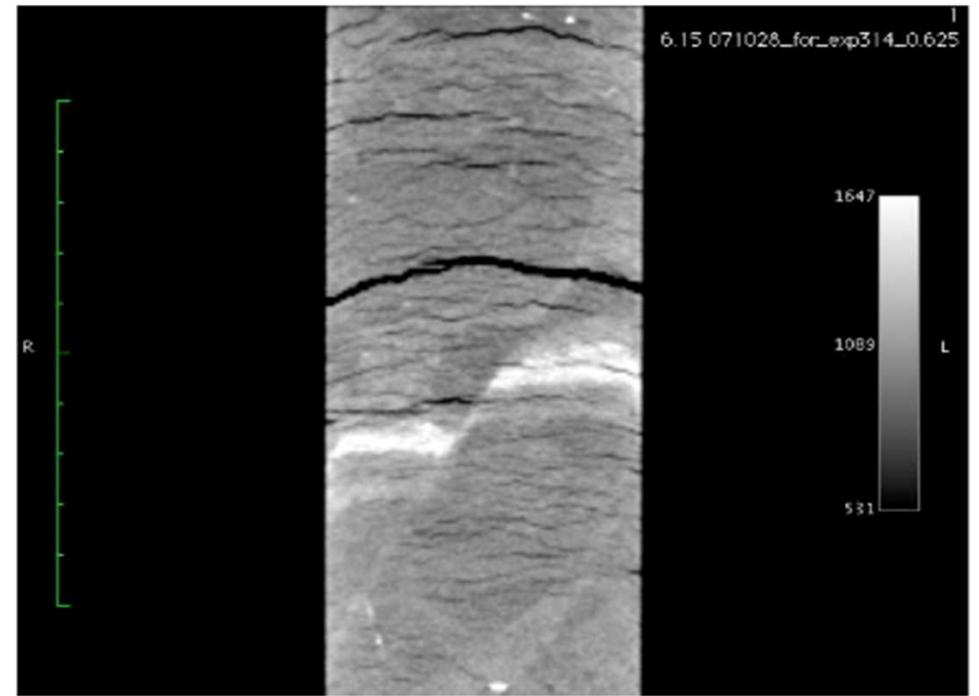
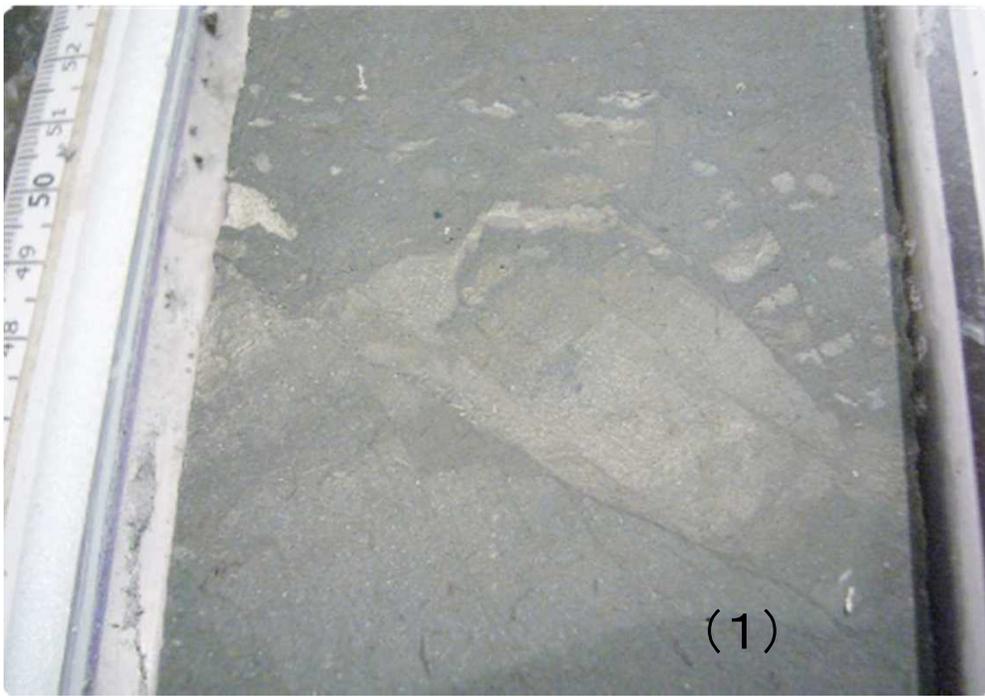
断層解析

地層に記録された応力場の履歴



X-ray CT-scan





- (1) 断層コアの例
- (2) 脈状構造の例
(地震の化石)
- (3) X線CTスキャナーの断層画像例

南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ1 巨大分岐断層浅部・前縁断層掘削

Expedition 316

2007年12月19日～2008年2月5日（49日間）

概要：

南海トラフの付加体中央に位置する巨大分岐断層の浅部（掘削地点C0004とC0008）と、付加体先端に位置するプレート境界断層前縁部（掘削地点C0006とC0007）の4地点において、計13カ所で掘削を行い、断層帯のコアを直接採取することに成功しました。



巨大分岐断層浅部の試料

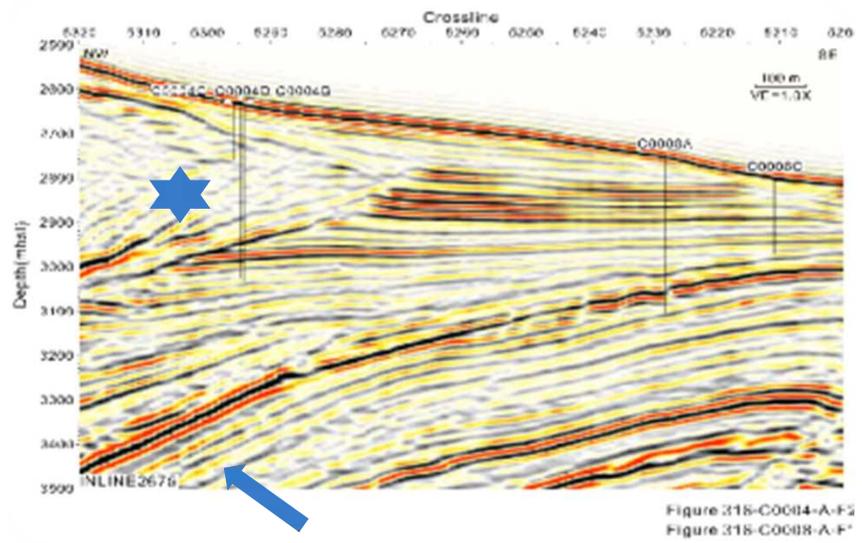
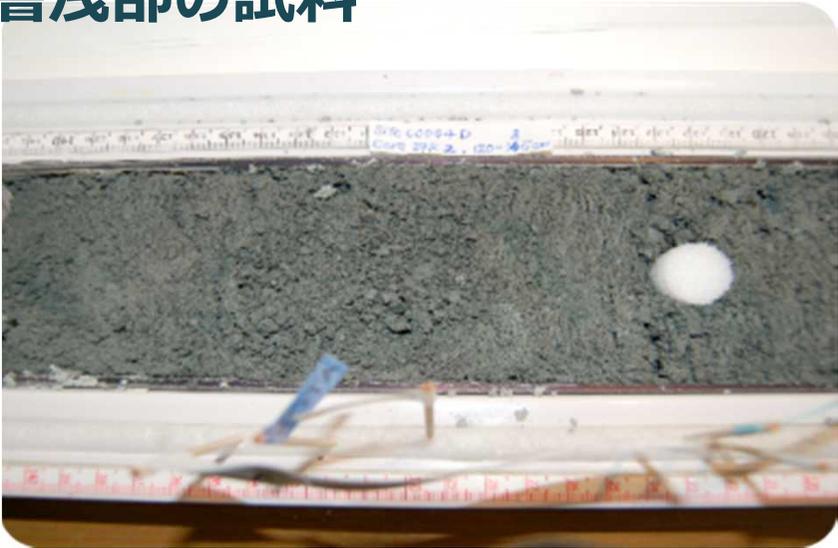


Figure 318-C0014-A-F3
Figure 318-C0018-A-F*

プレート境界断層の試料

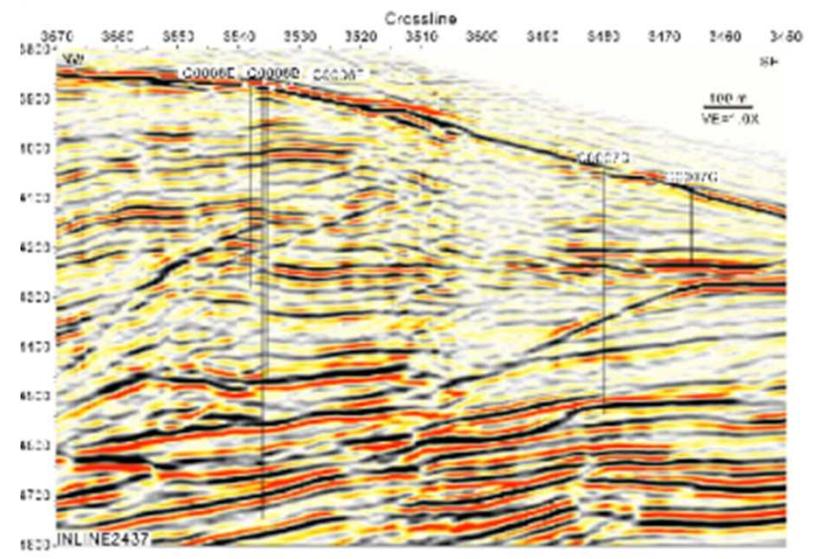
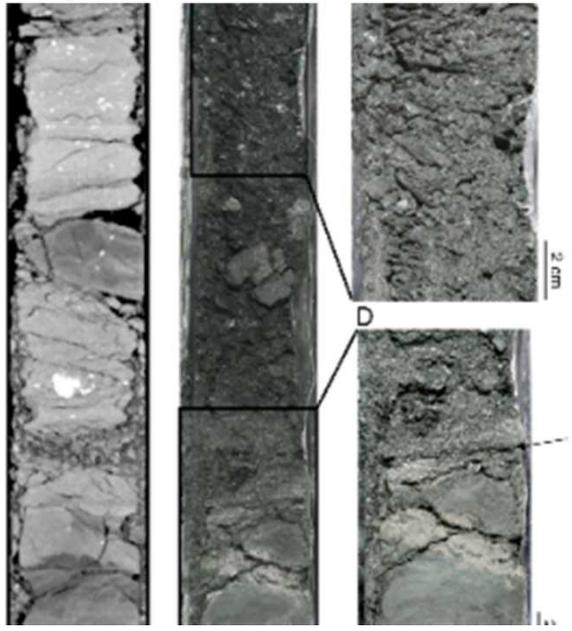


Figure 316-C0007-A-F2

伸 張 領 域

圧 縮 領 域

砂層中にメタンハイドレート存在

BSR

(メタンハイドレートの下限反射面)

C0002

C0001

C0004

C0006

前部デコルマ面

プレート沈み込み

巨大分岐断層

巨大地震発生/津波発生



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2 ライザー／ライザーレス掘削長期孔内計測－1 Expedition 319

2009年5月10日～2009年8月31日（114日間）

概要：

南海トラフの巨大地震発生帯直上域（掘削地点C0009）と地震発生帯から延びる巨大分岐断層浅部（掘削地点C0010）、沈み込む前のトラフ底堆積層（掘削地点C0011）の3地点で掘削を実施し、掘削地点C0009において海底下1,510-1,593.9mの区間で、57.87mの柱状地質試料（コア）の採取に成功。また、他の2地点において掘削同時検層による孔内物性データの取得にも成功した。



◆科学掘削史上初のライザー掘削に成功

◆巨大地震発生帯直上での試料採取（コア、カッティングス）、現場観測（検層）の実施

◆深部付加体構造発達史の解明

◆地質年代の解明、付加体内詳細地質構造の把握

◆孔内応力測定に成功

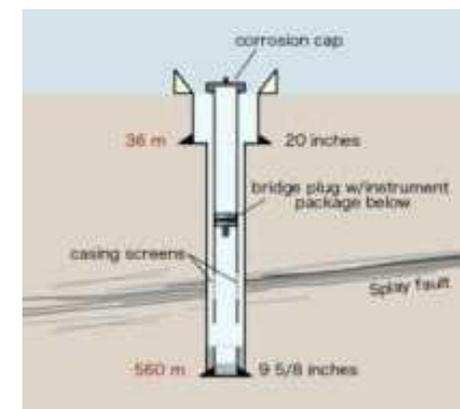
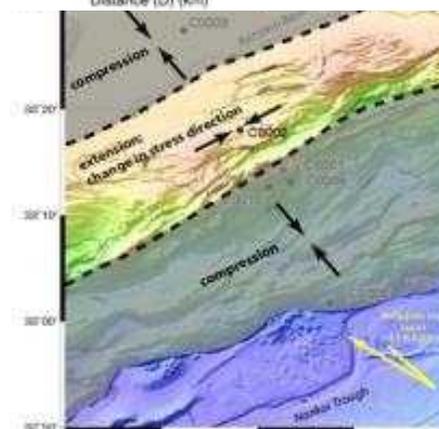
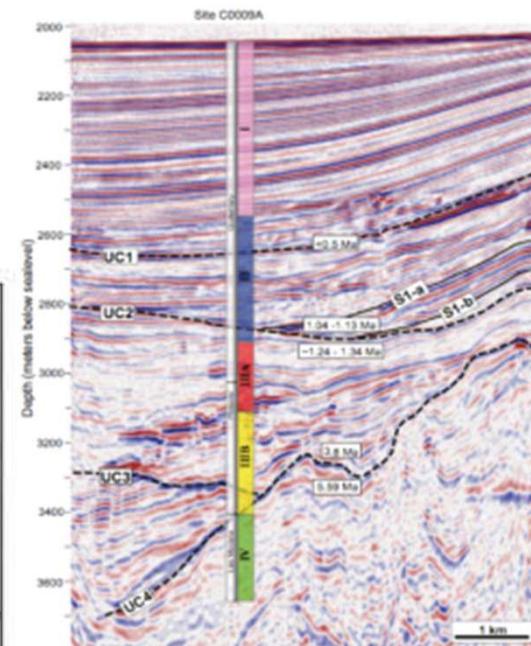
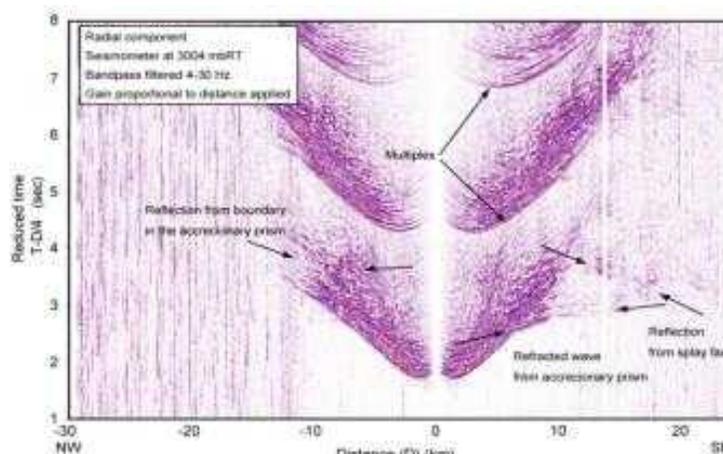
◆1 2 回の現場測定の実施

◆2 船式地下構造探査に成功

◆深部地下構造と物性の把握

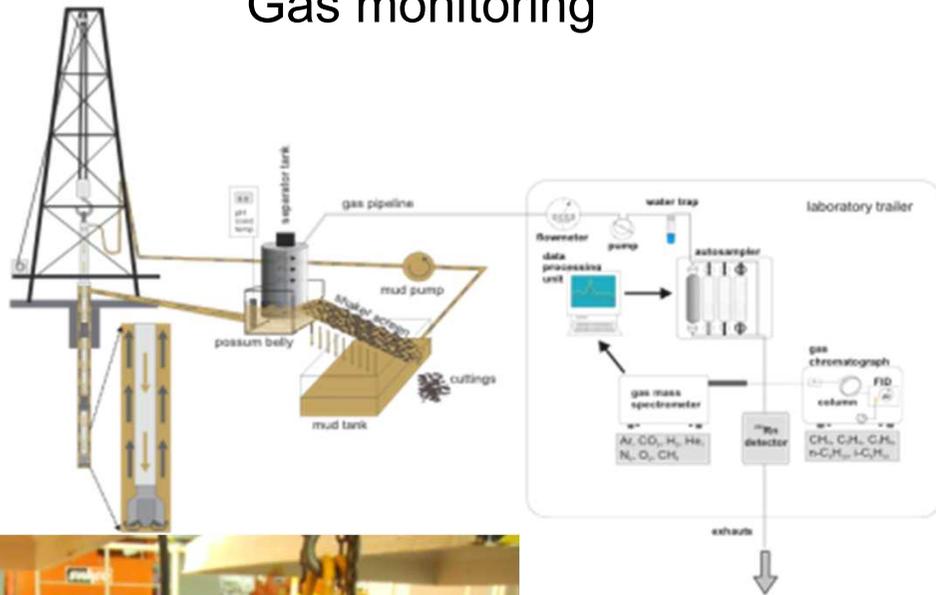
◆長期孔内計測井の掘削成功

◆将来の重要な観測孔となる



新たな測定 (泥水検層・カッティングス)

Gas monitoring

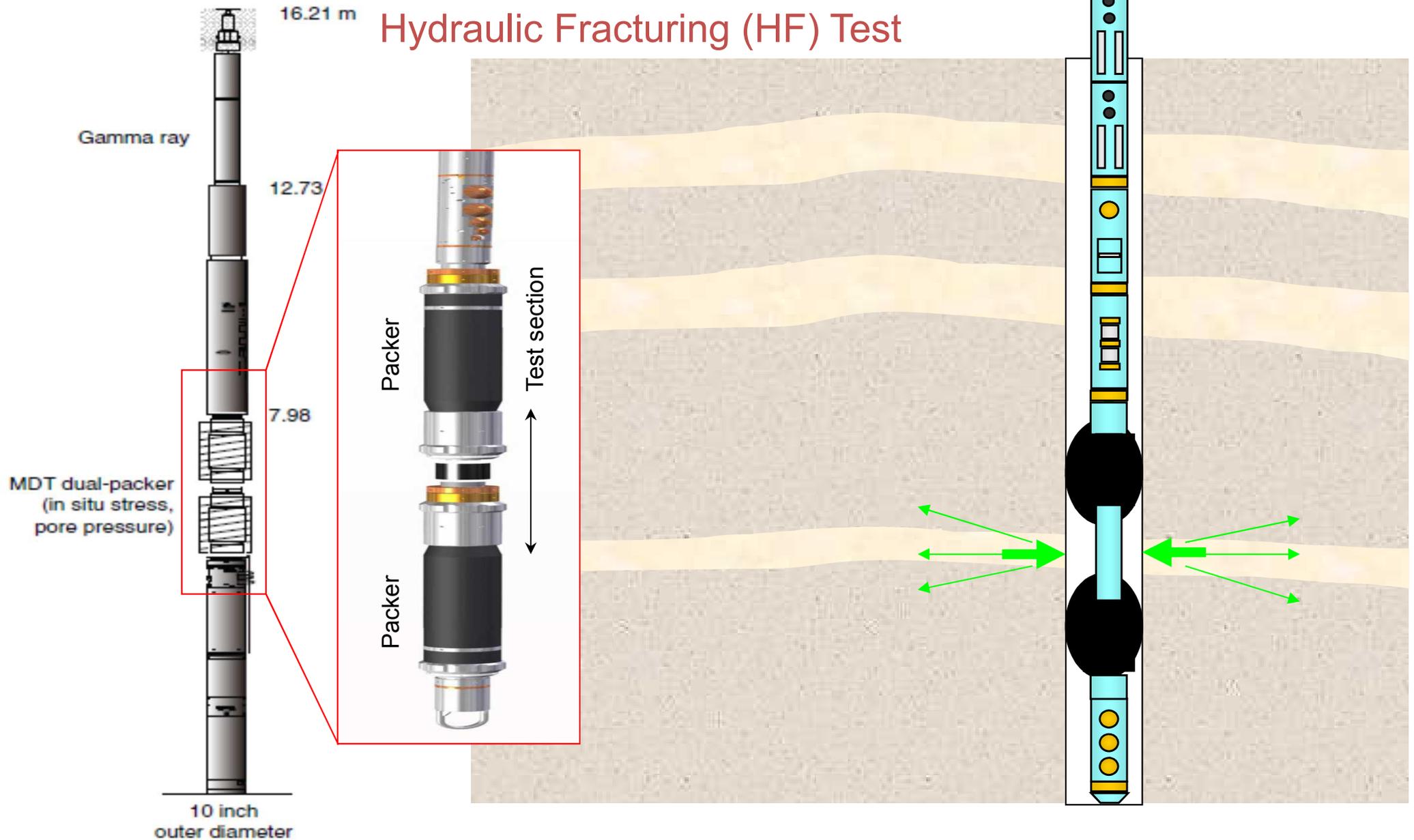


Cuttings



新たな測定 (MDT)

Hydraulic Fracturing (HF) Test



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2 沈み込みインプット

Expedition 322

2009年9月1日～10月10日（40日間）

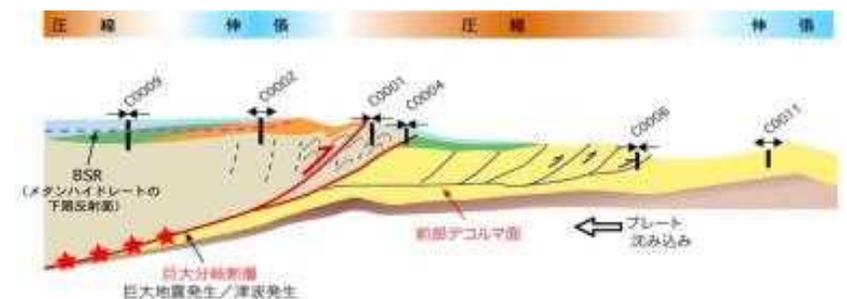
概要：

巨大地震発生帯に運び込まれる物質の初期状態の解明を目的として、フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフよりも沖合の四国海盆の2地点（掘削地点C0011 およびC0012）においてライザーレス掘削を実施。

掘削地点C0011では、海底下340m以深において柱状地質試料（コア）採取を開始したが、著しい掘進速度の低下により、地質状況が変化したと考えられたため、海底下881mで掘削を中止しました。掘削地点を移動したのち、続く掘削地点C0012では、海底下60mから576 m までの区間でコア採取を行い、基盤岩試料採取に成功した。



- ◆ 巨大地震発生帯に運び込まれる初期物質の採取に成功
 - ◆ フィリピン海プレートの沈み込みによって、巨大地震発生帯まで持ち込まれると考えられる物質（岩石、流体）の採取に成功した
- ◆ 基盤岩（玄武岩；1600万年～2300万年前）の試料採取に成功
 - ◆ 将来の巨大地震発生断層面になる可能性が考えられているフィリピン海プレートの海洋性地殻層序I（堆積物）と、海洋性地殻層序II（枕状玄武岩溶岩）の境界を含む試料の採取に成功
- ◆ 1600万年前以降の周辺の火成活動の変遷を解明
 - ◆ 西南日本側からの火成活動（1100万年～1600万年前）による堆積物と、伊豆一小笠原弧側からの火成活動（500万年～1100万年前）による堆積物が四国海盆に供給されてきた歴史を解明
- ◆ 海底下を流れる2種類の地下水を発見
 - ◆ 組成の異なる流体を、砂岩層と基盤岩直上の堆積岩から発見
- ◆ 孔内検層により応力情報を取得
 - ◆ 掘削同時検層（LWD）の結果、掘削地点周辺の応力状態や地層の物理特性についての情報を取得



海底下を流れる2種類の地下水の発見

地下水から分かったこと

- 変成作用によって排出された流体では、メタン、エタンが高濃度
- 特に地震発生帯における水の流れと流体の特性を理解する上で今後の研究に期待

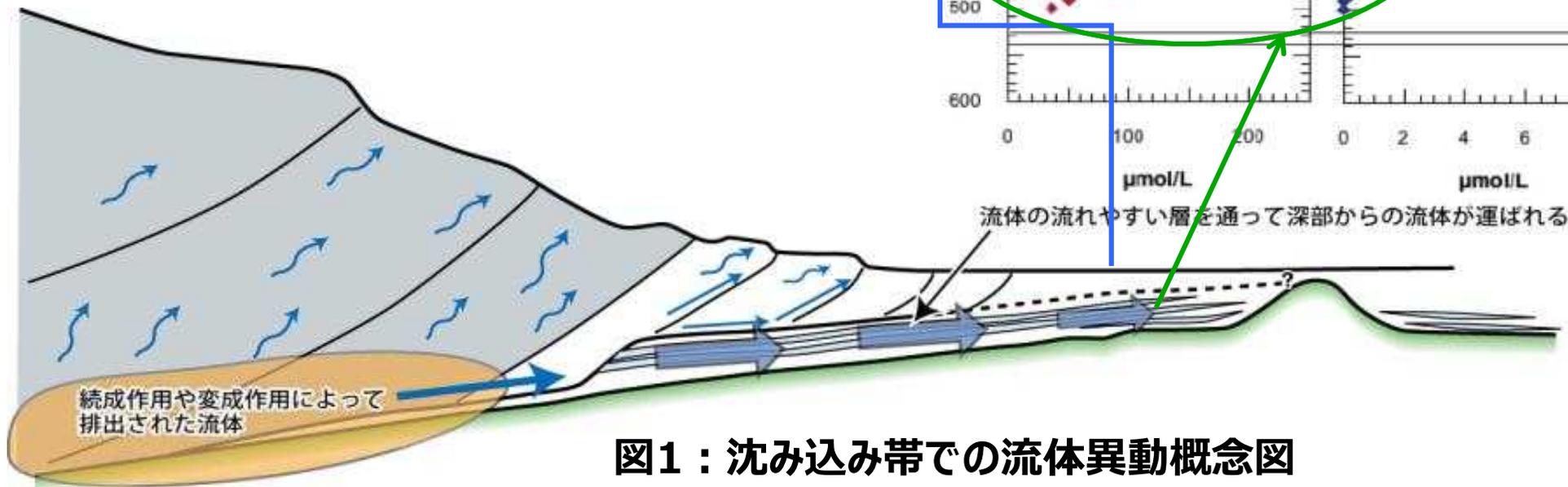
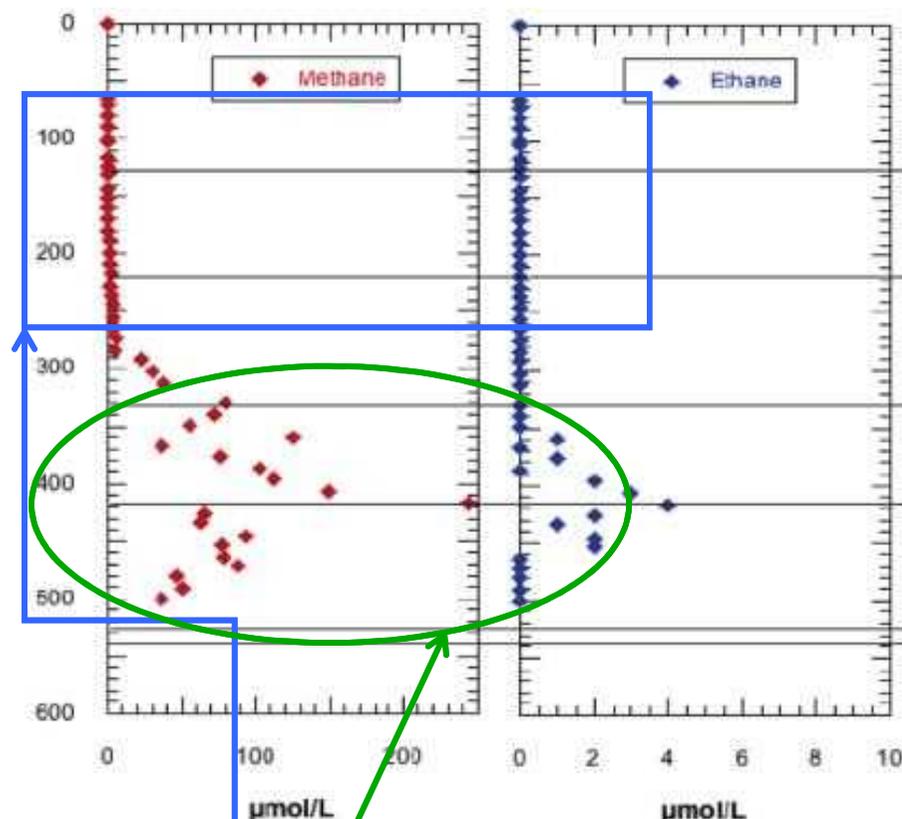


図2：C0012のコアに含まれるメタン/エタン濃度



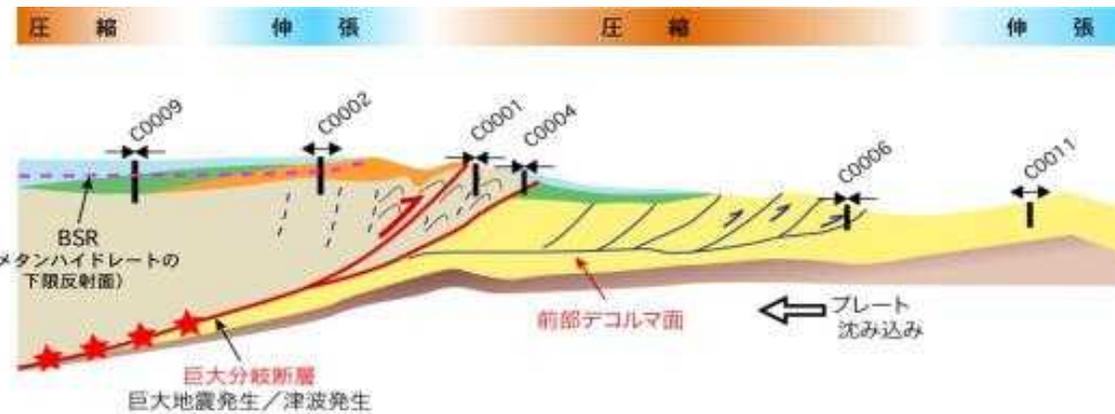
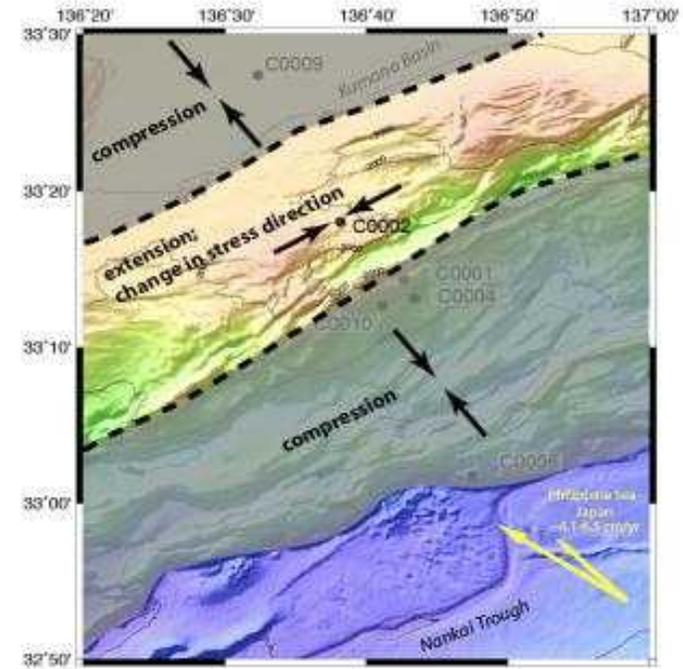
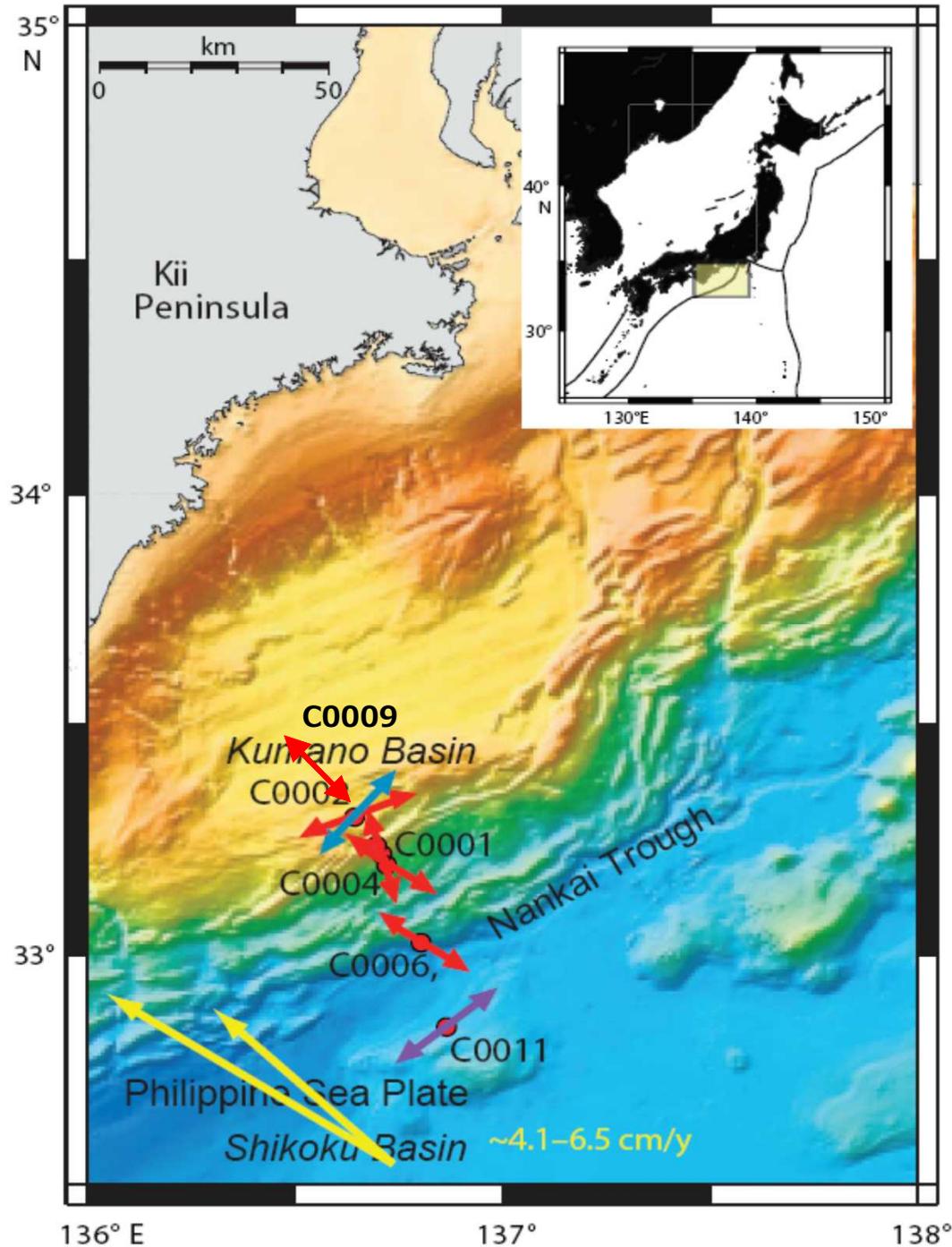
流体の流れやすい層を通して深部からの流体が運ばれる

孔内応力の解析結果

圧縮応力の方向:

C0002, C0011: 北東 - 南西

C0001, C0004, C0006, C0009: 北西 - 南東



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2

Plate Boundary Deep Riser 1 Expedition 326

2010年7月19日～2010年8月20日（32日間）

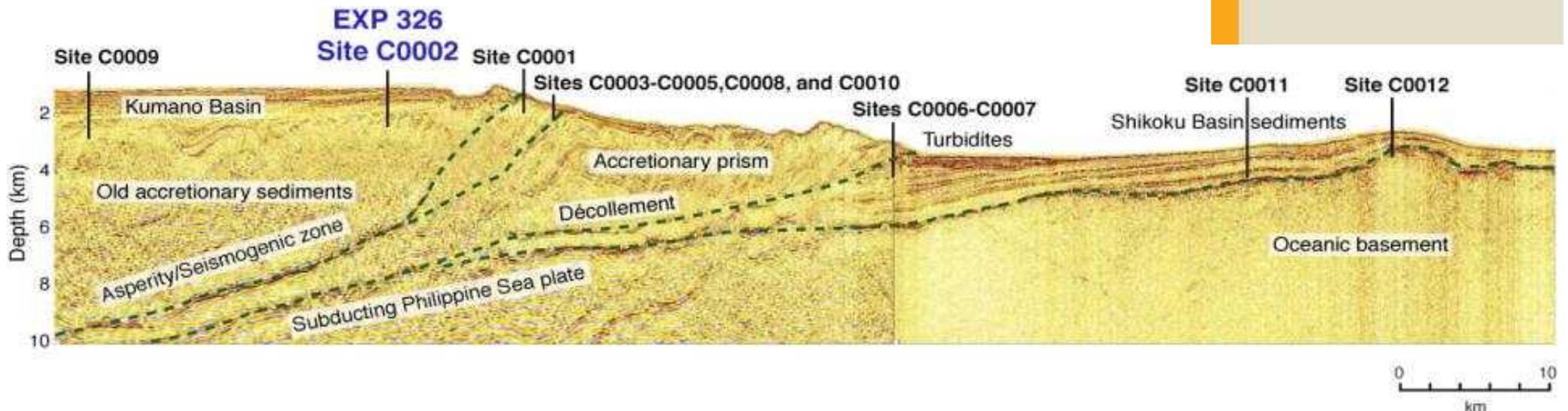
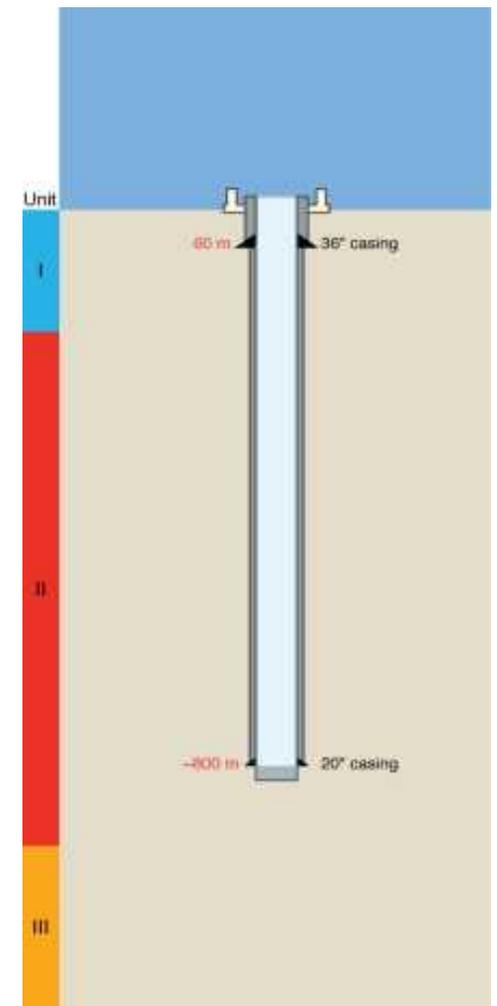
概要：

巨大地震発生メカニズム解明のため、超深度ライザー掘削により、海底下6,000～7,000mと予想されている海洋地殻が沈み込むプレート境界面を掘りぬき、海底下の非常に深い場所に存在する巨大地震発生帯を目指すため、超深度ライザー掘削孔の基礎部分を開孔し、上部孔井設置作業を行った。



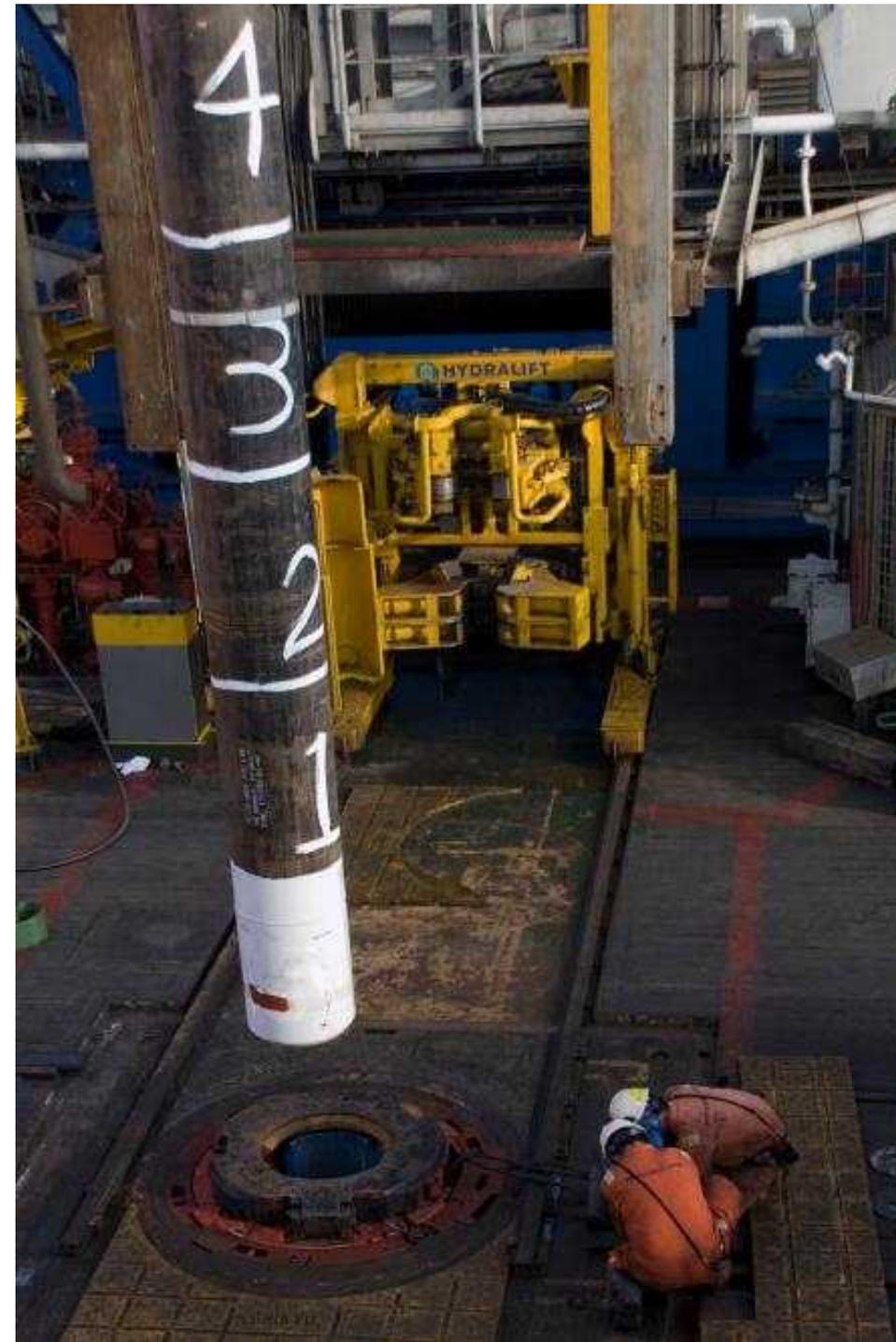
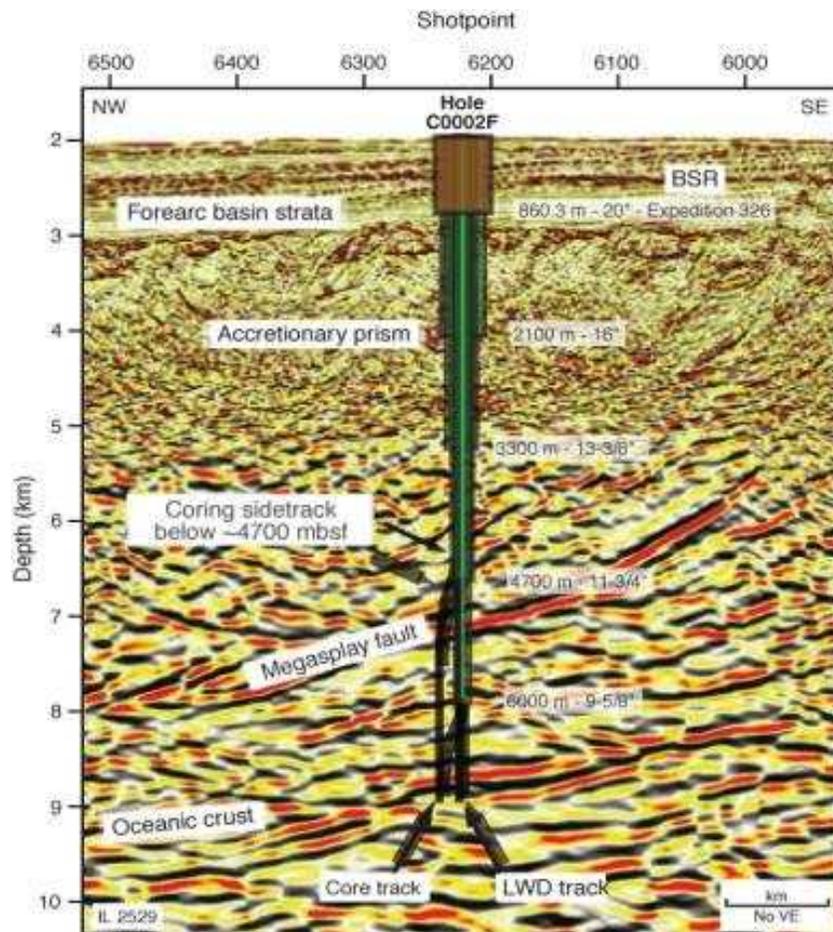
最終的にプレート境界断層を目指す超深度ライザー掘削の最初のステージ

計画：26インチビットで深度800mまで掘削し その後20インチケーシングをセットする



最終的にC0002Fサイトにおいて海底下深度
860mに20インチケーシングを設置

強い海流によって引き起こされる Vortex
Induced Vibrations (VIV)をドリルパイプにロー
プをつける事によって軽減し ケーシング設置に成功
した



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2 Riserless Observatory 2 Expedition 332

2010年10月25日～2010年12月11日（48日間）

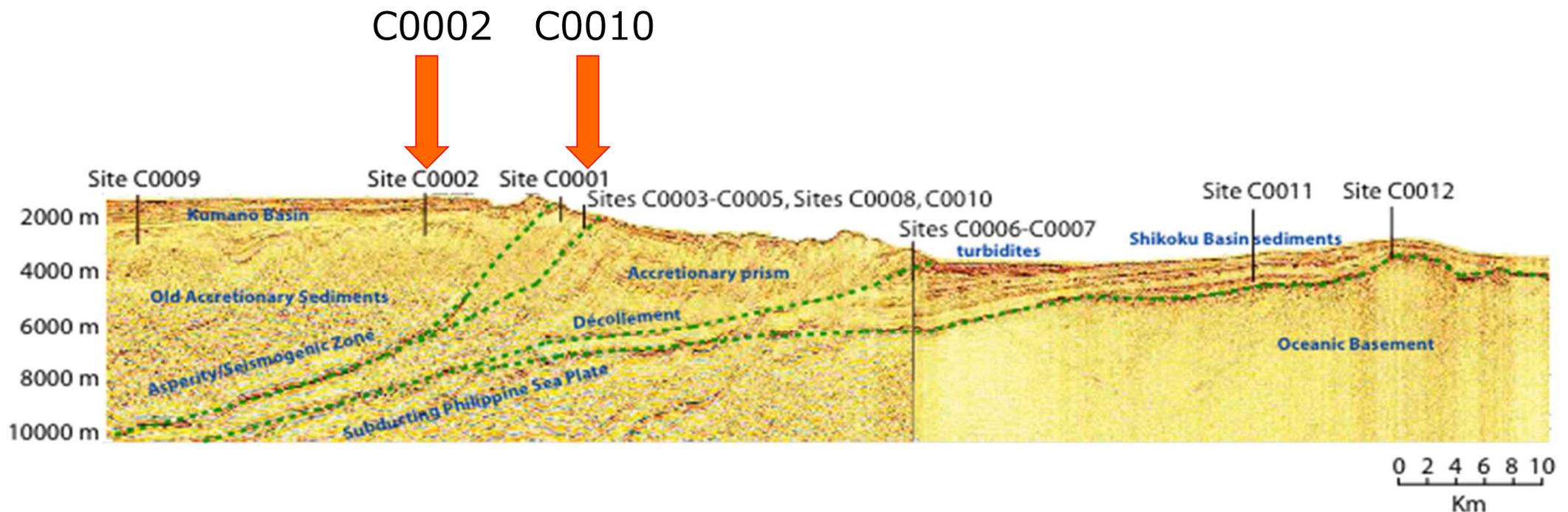
概要：

南海掘削における最初の長期孔内観測装置の設置に成功。この長期孔内観測装置は、熊野海盆の海底下約1kmに到達する掘削孔内の約750-940mの深度に地震・地殻変動などを観測する複数のセンサー（歪計、傾斜計、温度計、間隙水圧計、広帯域地震計、短周期地震計、強震計）を設置固定し、ケーブル等によって接続したものです。

C0002地点は、100年～150年の間隔でマグニチュード8クラスの地震を引き起こす東南海地震震源域の海溝側の端に位置している。設置に成功した長期孔内観測装置は、孔内の安定した地層内にセメントで固定しており、これまでのような軟らかい堆積層の上で行う観測と比べ、地震断層やその周辺の地殻の微小な変動をより高感度かつ高精度に観測・監視することができる。

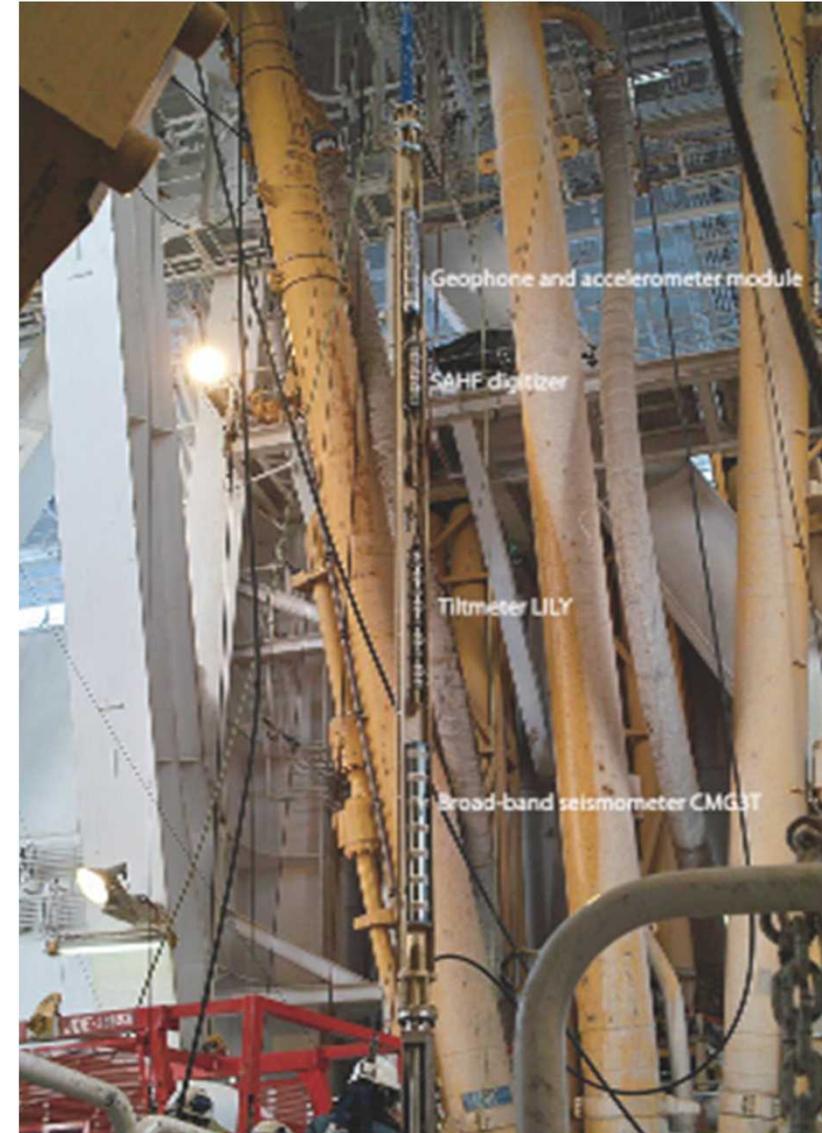


- ◆ C0010サイトにおいて Exp. 319で設置した簡易型孔内計測機器（温度・圧力）を最新型（温度・圧力・地層内流体採取・培養）に交換
- ◆ 回収した孔内計測機器は過去18ヶ月の温度・圧力変化を記録していた（M8.8 チリ沖地震のデータを含む）
- ◆ C0002サイトにおいて 初めての長期孔内計測機器の設置

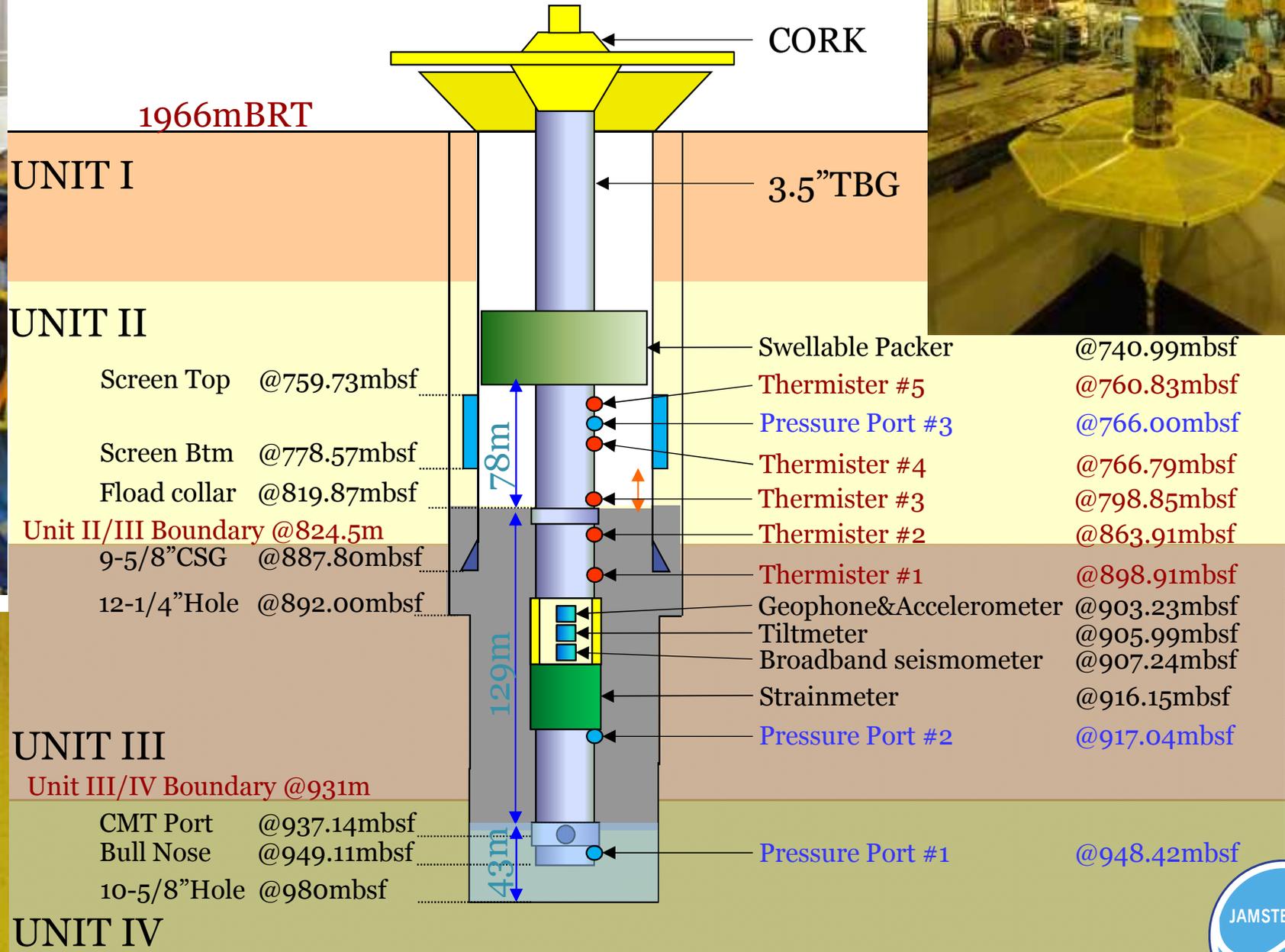


ライザーレス長期孔内計測機器

- ◆構成: 圧力ポート (3), 広帯域地震計, ジオフォン, 傾斜計, 歪み計 圧力・温度センサー
- ◆設置に成功し、各センサーの稼働確認完了
- ◆今後ケーブルネットワーク (DONET) に接続し リアルタイムデータの取得が可能となった



ライザーレス長期孔内計測機器模式図



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2

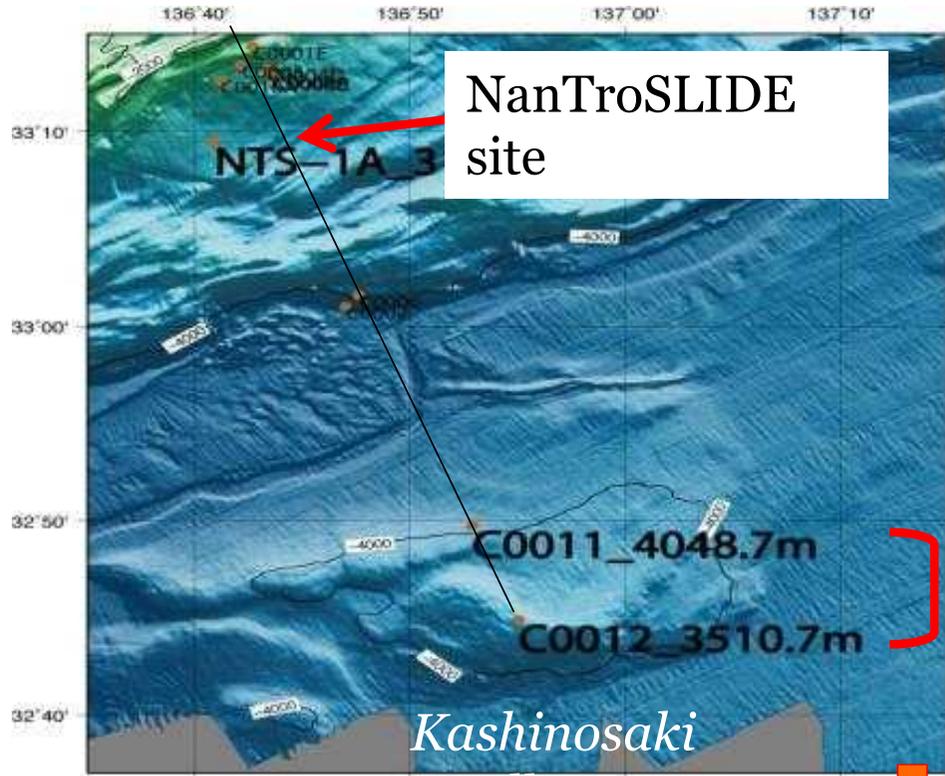
Inputs Coring 2 and Heat Flow Expedition 333

2010年12月12日～2011年1月10日（30日間）

概要：

巨大地震発生メカニズムの解明を目的として、フィリピン海プレート（海洋プレート）がユーラシアプレート（大陸プレート）に沈み込む直前の地点で表層堆積物の採取を行うとともに、熱流量の測定を実施。まず、海底地滑りに伴って運び込まれる表層堆積物の実態を解明するため、地震に起因する海底地すべり堆積物を海底下314.2mまで掘削し、この地層の柱状地質試料（コア）の採取、分析を行った。さらに、巨大地震発生帯を構成する物質の初期状態を知るために、平成21年9月から10月にかけて実施した第322次航海に引き続き、フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフよりも沖合にある四国海盆のC0011地点（水深4050.50m）およびC0012地点（水深3510.50m）の2地点において、表層堆積物およびその下の玄武岩をそれぞれ海底下380mおよび630.5mまでライザーレス掘削し、コアを採取しました。同時に掘削孔内において高密度で地層温度の計測を実施し、物質変化に大きな影響を与える熱流量の見積もりを行った。

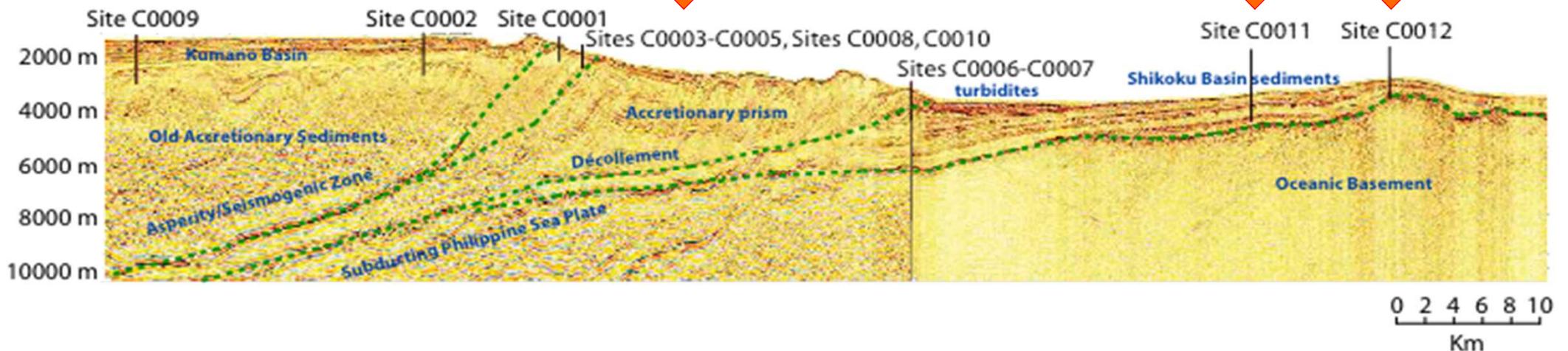


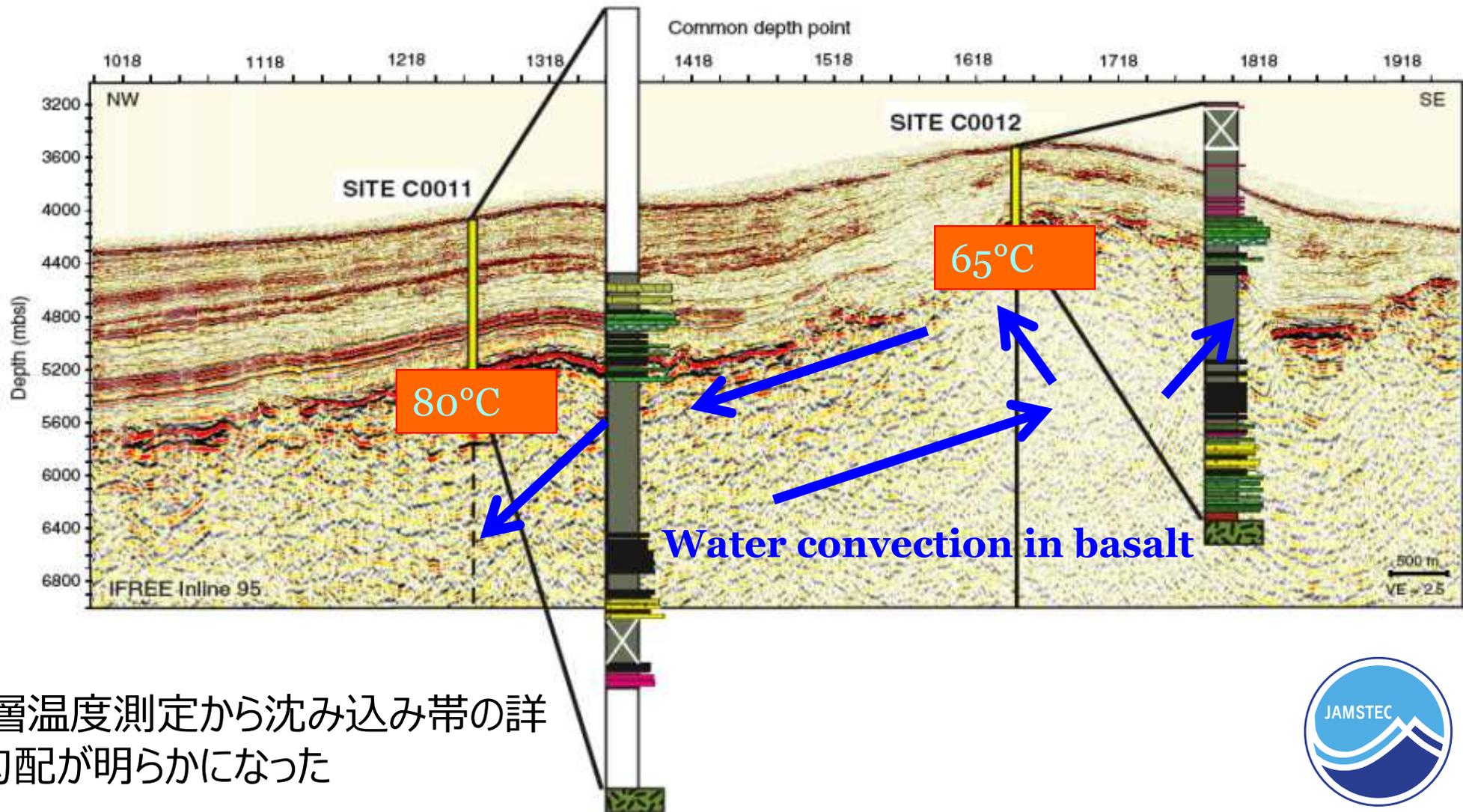
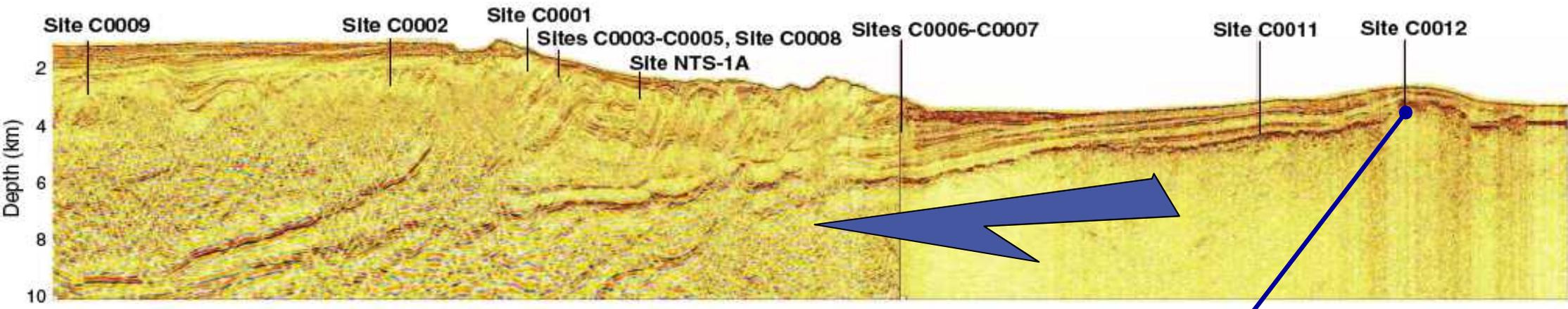


◆C0018 : 南海トラフ斜面中程地滑りに寄るMass Transport Depositの解明

◆C0011&12 : Exp. 322で採取したコアサンプルを補填する沈み込む前のフィリピン海プレート上の堆積物および将来の地震発生帯を形成する基盤岩と堆積物の境界面のサンプリング

NanTroSEIZE
Input site





詳細な地層温度測定から沈み込み帯の詳細な温度勾配が明らかになった



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ2

Plate Boundary Deep Riser 2

Expedition 338

2012年10月1日～2013年1月13日（105日間）

概要：

2010年の第326次研究航海で掘削を行った掘削孔（C0002F孔、掘削深度：海底下872.5m、水深：1,939m）において、巨大分岐断層（海底下約5,200m）に向けて、海底下約3,600mまでのライザー掘削を行い、地質試料の採取及び掘削同時検層（LWD：Logging While Drilling）を行う予定でしたが、海底下約2,000mまで掘進したところで、海象の急変により機器の一部に損傷が生じたため、掘削孔を保護しました。また、実施を予定していた南海掘削計画の他地点における掘削を実施して地質試料の採取及び検層等を行いました。



トラブル

■ Intermediate Flex Jointの損傷

ライザー掘削を中断。予定深度までに至らなかった。

■ 抑留

コア中 (C0002I) 、パイプ抑留。

最終的に火薬により切断。コア編成を孔内に遺留。



■ Gas Hydrate生成

ライザー掘削中、孔口装置20"x36"間隙からガス湧出。ハイドレートの生成。

ROVによるGlycol インジェクション・注入量を増加



■ BOP Conduit Line Gooseneck 破損

BOP回収中に、Conduit Line Gooseneck部分切断を発見仮補修を行いBOPを再接続、孔井サスペンド作業実施。現在、新規Gooseneck作成中。



- ◆前弧海盆堆積物、ガスハイドレイト層、および熊野海盆-付加体境界における岩層/年代層序の決定、変成史や構造史、力学的環境等の解析を行うこと(C0002)
- ◆四国海盆沈み込み帯における流体の挙動を解明すること(C0012)
- ◆海底斜面のMegaspaly 断層におけるMass-transport depositの応力や堆積過程/構造を解析すること(C0018C0021)
- ◆発達中の分岐断層についての変成史、堆積/再堆積構造に対する仮説を検証すること(C0022))

上記の目的のためにライザレス掘削を実施し、
LWDデータ取得およびコア試料採取に成功した



2013年度以降の巨大分岐断層掘削の準備段階として、 浅部にケーシングをセットする事を目的とした。

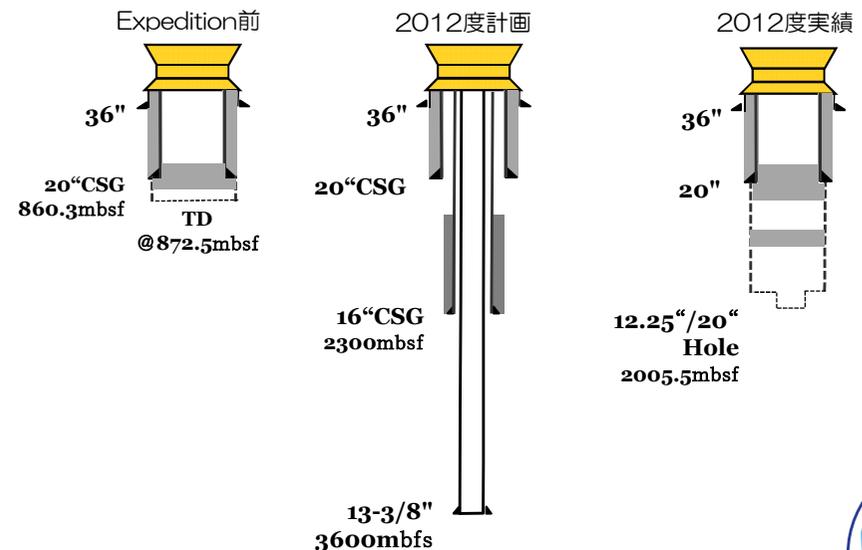
ライザー孔概要

孔井名	水深 mMSL (mBRT)	掘削長 (mbsf)	作業 日数	作業概要
C O O O 2 F	1939 (1967.5)	1133	63.4	2010年に掘削したC0002F孔にBOPを再接続し、3973mBRTまで掘り増したが、荒天大気中に強風と風向きの変動のため、位置保持ができなくなり緊急離脱を行った。離脱作業は問題なく行われたが、離脱直後に船体のヘッディングの制御が安定せず、潮流に流されてライザー上部にあるIntermediate Flex Joint (IFJ)が船底と接触し、IFJを損傷した。 今航海中にIFJの修理及び代替品の入は不可能なことから、ライザーオペレーションを中断し、コンティンジェンシー孔のライザーレス掘削を行うこととした。

IFJ



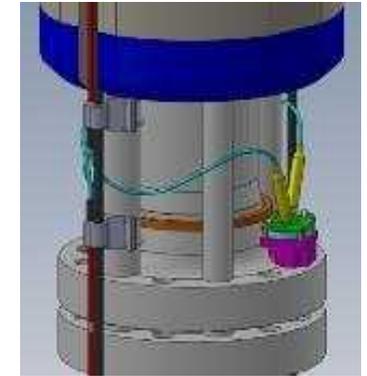
IFJ損傷時の画像



◆ 高潮流下（最大5.3ノット）でのライザー掘削

◆ ライザー渦励振モニタリングシステム構築

- ライザーの疲労の度合いが明らかになった



◆ 高潮流下（最大5.3ノット）でのライザー掘削

◆ ライザー渦励振モニタリングシステム構築

- ライザーの疲労の度合いが明らかになった



南海トラフ地震発生帯掘削計画 ステージ3 Plate Boundary Deep Riser 3 Expedition 348

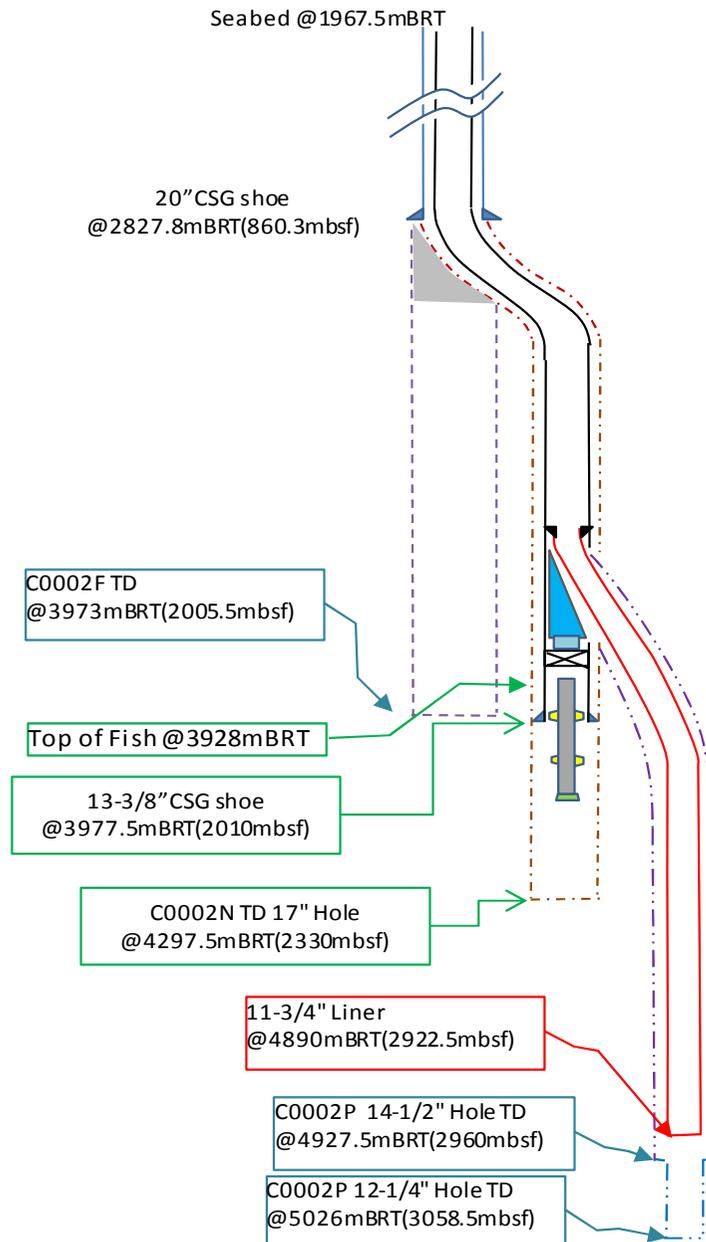
2013年9月13日～2014年1月29日（139日間）

概要：

2012年の航海で掘削を中断した掘削孔（C0002孔、掘削深度：海底下2,005m、水深1,939m）において、ライザー掘削による海底下約3,600mまでの地質試料の採取および掘削同時検層を目指し、また、掘削孔壁を保護するためのケーシングパイプの設置を行った。



ライナー孔概要



作業概要

2012年に掘削したC0002F孔にBOPを再接続。
20"ケーシング直下から17"孔の枝掘り(C0002N)。
2010mbsfまで掘削、13-3/8"ケーシングをセット。

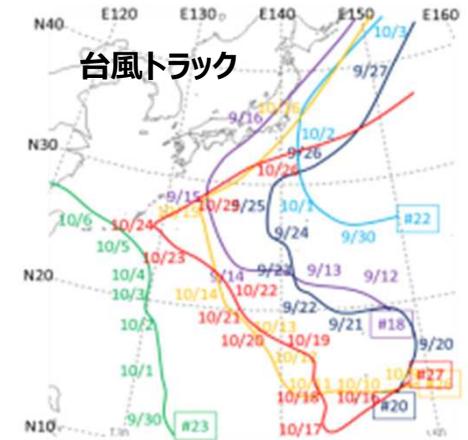
ケーシング直下のセメント掘削中に抑留。
掘削編成を切断、遺留物直上からケーシング切削。
12-1/4"孔で枝掘り(3058.5m bsf)。
*2163m-2218.5mbsfの区間でコアを採取。
孔内状況悪化により、追降不可。(パックオフ/高トルク)

14-1/2" 拡掘編成に切り替え。
掘進を試みるも2960mbsf以深拡掘困難。
11-3/4" ライナーを2922.5mbsfにセット。
サスペンド作業。
Exp348終了。

トラブル(1)

■ 天候待機

- 台風待機 (#18, 20, 22, 23, 26, 27)
9/13~10/26、BOP切り離し/ハングオフスタンバイ(1回)
待機中作業：Telescopic Joint 修理、SD-RCBテスト
- 寒冷前線通過(4回、計5日間)

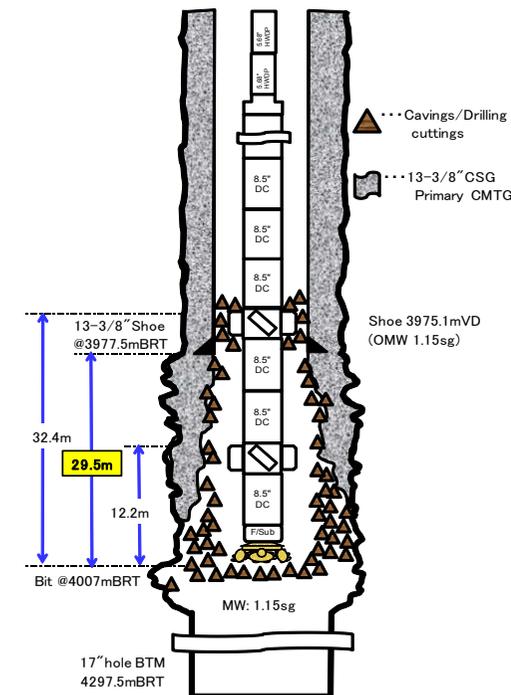


■ 逸泥

- 17"孔掘進中、2036.5mbsfと2117.5mbsfで逸泥(ダイナミックロス15~27m³/hr)
- 逸泥防止剤スポットで対応(掘削継続)

■ セメント浚い編成の抑留

- ねじ戻し後、採揚編成を降下、最大300tで強引
- 採揚できず、編成切断。
- 遺留編成直上にWhipstockをセットし、サイドトラック実施。



トラブル(2)

■ 不安定な地層

- 13-3/8"ケーシングの抑留（離脱後、予定深度までの降下断念、裸孔部280m残）
- 12-1/4"孔掘削および14-1/2"孔拡張中、パックオフ/異常トルク発生
- 多量の崩壊ザク

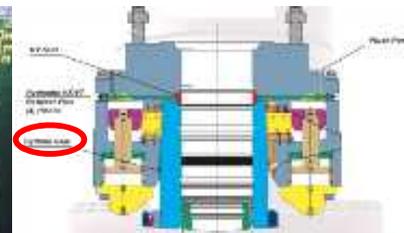


■ ガスハイドレート

- 昨年同様ハイドレートが孔口装置に生成。
- BOPコネクターハイドレートシールリーク、ハイドレートの浸入
- メタノール注入によりコネクター内ハイドレート溶解

■ ROV 光ファイバーケーブルの破断(6本中5本)

- Multiplexerを使用(ケージ/ROVを1本で操作)



■ BOP/ライザー損傷

- Blue Pod、Annular BOP作動不良
- Conduit Line損傷



■ 11-3/4" ライナーパッカーセット

- ライナーハンガーセット直後にパッカーセット
- 循環不能により、通常セメンチング不可
- シュー周りにセメントを圧入

南海掘削計画完遂に向けて

科学の突破

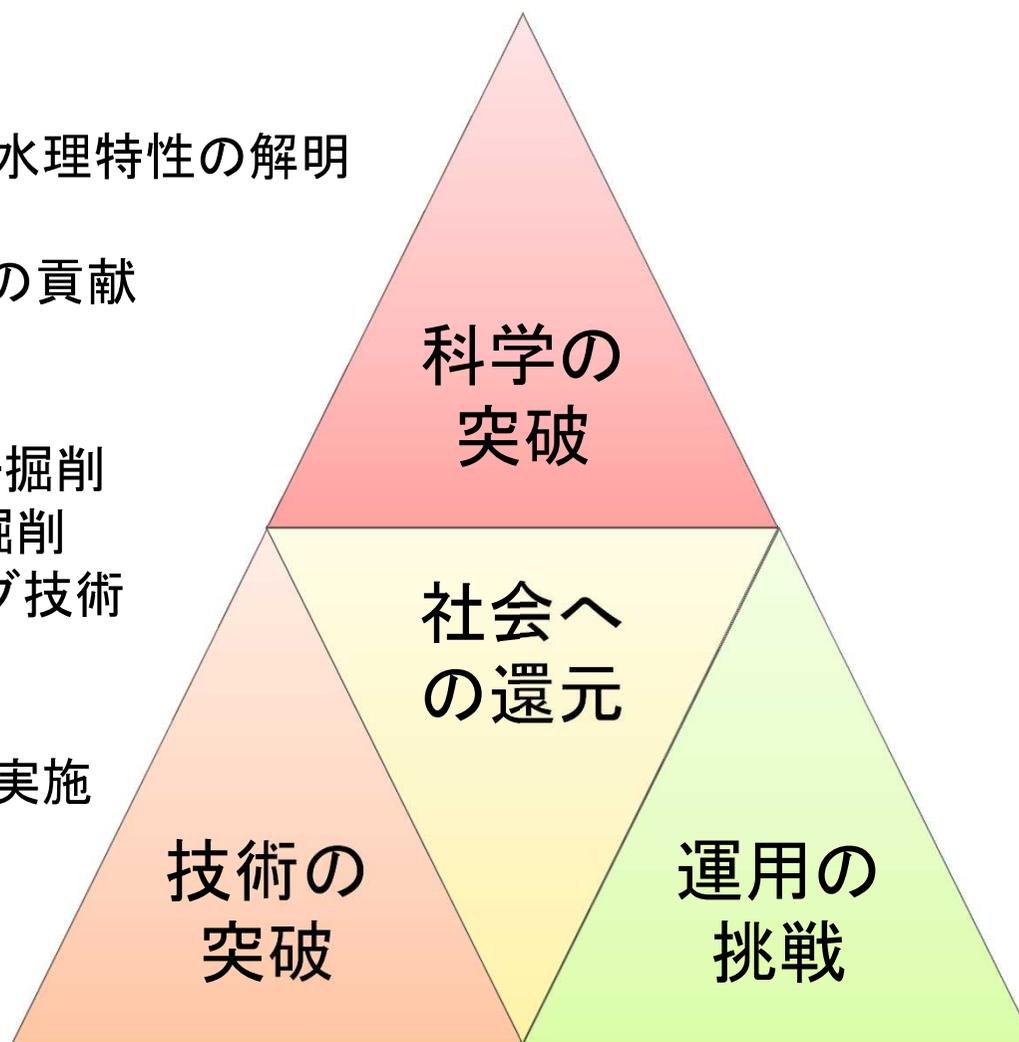
地震断層の物理・化学・水理特性の解明
非地震領域の再考
巨大地震発生モデルへの貢献

技術の突破

大水深、大深度ライザー掘削
高潮流下でのライザー掘削
大深度検層・モニタリング技術

運用の挑戦

大規模国際科学計画の実施
若手研究者育成
国産組織体制の構築



2007年から10航海に渡って実施して来た南海掘削も、深部プレート境界断層へあと約2000mへと近づいて来た。前人未到の新たな科学の扉を開くときが近づいている。大深度掘削は困難を極めているが、本計画の科学的意義、社会的なインパクトを再認識し、最終目標へ到達すべく英知を注ぐ。