

4. 沈み込み帯のダイナミクス・物質循環と地球システム変動： 「海溝型地震発生帯」掘削計画

1. はじめに

プレート沈み込み帯において、数 10km 程度までの深さのプレート境界で頻発する、いわゆる「海溝型地震」は、地球上で発生する地震モーメントの約 90%を解放する。

「海溝型地震」に伴って発生する津波と地震動は、地球上では最大級の自然災害を引き起こす。まさに海溝型の地震は、「自然界の最終大量破壊・殺りく兵器」ともいうべきものである。しかも地震は、多くの自然災害の中で唯一、短期的予測が確率的にも成功していない現象である。

ライザー装置を装着した、地球深部探査船「ちきゅう」を用いて海溝型地震発生帯に直接穴をあけ、「遠隔観測による地震学」から「地震発生断層の直接観察観測を結合した新しい地震学」へと科学を飛躍させ、もって地球のダイナミクスの深い理解と、短期的地震発生予測の礎を築くことは、J-ISP にも述べられているように、日本における IODP 研究の中心的課題の 1 つである。

総延長約 4 万 km に及ぶ現在の地球上の海溝（図 4.1）の中で、「海溝型巨大地震発生メカニズムの解明」という、IIODP 初期科学計画でも取り上げられた、人類にとって緊急かつ重要な科学目標を達成するためには、どの地域において深海掘削研究を実施するのが、最も効果的であろうか？ この問題に関して、これまでに延べ数百人に及ぶ国内外の研究者が参加して、検討を行ってきた。その結果、熊野灘沖南海トラフが掘削候補地点として浮かび上がってきた。この検討結果を受けて、現在、熊野灘沖における掘削を IODP 最初のライザー掘削の対象とすべく、掘削提案がなされているところである（図 4.2, 4.3）。詳細な提案内容は、南海掘削国際提案チームの作成した全体計画（<http://ees.nmt.edu/tobin>）を参照していただくとして、ここでは、この南海トラフ地震発生帯掘削計画（NanTroSEIZE）を達成する上での J-DESC として推進すべき課題、および「海溝型地震発生帯」掘削計画の世界的展開として J-DESC が検討すべき科学戦略について記すことにする。

2. 「海溝型地震発生帯」の掘削による仮説の検証

これまでの海溝型地震に関わる多くの仮説は、地震、地殻変動、静的構造に関する遠隔観測、岩石破壊摩擦実験による構成則の構築、シミュレーションによる再現・パラメータ推定という観測・実験・理論の組み合わせにより提案されて来た。

それら仮説群の中で、南海トラフを対象とした掘削と掘削孔長期観測（図 4.4）によって検証可能な課題は以下の5つである：

- ① 沈み込み帯浅部から深部にいたる、物質と状態の系統的変化が、地震発生帯の成立を支配している。
- ② 沈み込み帯の巨大断層は、相対的にも絶対的にも「弱い断層」である。
- ③ 沈み込み地震発生帯では、プレート相対運動は主に地震時の摩擦すべりによって解消されている。
- ④ 断層帯の物性・化学組成・状態は、地震発生サイクルを通じて時間的に変化する。
- ⑤ 巨大分岐逆断層は個々の地震活動時にすべりを生じ、津波を発生する。

これらを以下の方法により検証する。

（掘削孔研究と岩石流体試料研究）

- ◆ 岩石、流体資料の物理的・化学的分析。断層組成、組織、状態の観察、観測
- ◆ 孔内物理検層、孔壁イメージによる現地物性、応力状態の決定

（実験およびモデル研究）

- ◆ 現地断層資料の実験による剪断強度、摩擦特性、透水性などの力学的、水理学的特性の決定
- ◆ パラメータ決定によるモデル研究

（海底観測）

- ◆ 熱流量、2D、3D MCS、OBS array、海底測地、断層崖・湧水等の潜水艇による直接観察

（長期観測）

- ◆ 熱的信号、流体圧、傾斜および体積歪、微小地震、四次元地震学的構造の長期観測、およびケーブルによるリアルタイム観測
- ◆ 間隙流体の採集により、断層帯深部活動の探知

3. 掘削実現のための必要な準備と事前研究

南海トラフ地震発生帯掘削以前に達成しておくべき事前研究，技術開発として，以下の項目は必須である。

- ◆掘削断層ターゲットの精密な設定と，その状態と物性の正確な推定のための 3D 地震探査
- ◆長期観測装置の設計と開発．とくにリアルタイム観測の開発
- ◆海底観測による地下状態構造の推定
- ◆断層帯の岩石流体，状態，物性，力学特性等の正確な推定のためのアナログ研究（特に台湾掘削との比較研究，四万十帯地震発生帯断層岩研究）

提案されている掘削総延長は10数 km におよぶ．および仮説検証に必要なデータセットは上記のごとく多岐にわたる．事前研究をはじめとして，掘削時および掘削後の研究において必要な研究者総数は，百名を大きく超えるであろう．J-DESC に参加する研究者の総力を挙げた協力が必須である．

4. 包括的な「海溝型地震発生帯」掘削研究

さて，南海トラフと対照的な海溝，すなわち，巨大地震は起こらないが，海溝型地震は頻発する海溝が，地球上ではより普遍的である．そのような海溝は海溝総延長の4分の3程度におよぶ．地質学的な時間スケールでは，そのような海溝では，南海トラフで進行する付加作用とは反対の造構性侵食作用が進行すると見られている．その代表例の日本海溝では，地震が群れをなす領域と，逆に空白域のあることが明らかとなってきている．また，地震発生時に変位が大きく，短周期の地震波を放出する，アスペリティーと呼ばれる断層面上の領域で，地震は繰り返し起こることが最近明らかとなって来ており，中短期的な地震発生予測へつながる可能性がある．

包括的に海溝型地震発生メカニズムを理解するためには，付加型の海溝と共に，浸食性海溝で進行するテクトニックな現象を理解することが重要である．日本海溝は，いうまでもなく世界で最も観測データの集積した海溝ではあるが，水深および震源深度の問題から，現状の掘削技術を用いて，地震発生帯の直接観察観測と遠地観測を結合することは不可能である．日本海溝と類似した海溝で，かつ「ちきゅう」によって掘削可能な代表例はコスタリカ沖中米海溝である．これまで，独米のリードでこの海溝の研究は進められ，掘削提案がなされているが，J-DESC としても積極的に事前研究への参加を推

進し、リードする必要がある。

さらに、日本海溝の近年の観測に対応した、掘削による近地観測計画の具体化も計るべきである。日本海溝での ODP Leg 186 掘削の結果を見つつ、議論をすすめる必要がある。

進行中の台湾車籠埔断層掘削、サンアンドレアス断層掘削 (SAFOD)、提案されている南海トラフ、コスタリカ沖中米海溝と連続するプレート境界の地震発生断層の掘削によって、10年以内に人類の海溝型地震発生帯と地震に対する理解は飛躍的に発展するであろう。それらの研究の進展を J-DESC は積極的にリードしつつ、次なる科学目標とそのための戦略的地域への掘削提案を準備すべきである。

5. 沈み込み帯物質循環の解明、極限環境微生物解明とのリンケージ

2002年に発表された J-ISP では、沈み込み帯のダイナミクス・物質循環と地球システム変動の課題として、物質循環の解明、極限環境微生物の解明を取り上げている。

先に述べたように、海溝型地震発生帯の掘削は、沈み込み帯の前弧域で実施される。この掘削研究において、南海トラフやコスタリカでは、ライザーおよびノンライザー掘削を用いた、array 掘削を予定している。これはプレート境界としてのデコルマもしくは断層帯の深度方向への変化をとらえ、それを時空間変化へと理解し、地震発生帯の成立や挙動を明らかにしようという研究戦略である。これらの掘削のターゲットとなっている前弧域、すなわち沈み込み帯浅部は、サブダクションファクトリーの中でも最も劇的に流体の付加と排出、そして循環が進行する場でもある。90年代の沈み込み帯掘削の主要な科学目標はそのことを理解する事に置かれていた。バルバドス、カスケード、コスタリカ、そして南海トラフ等の沈み込み先端部への集中的掘削によって、水を主体とする流体が、活発に移動する様子が明らかになった。また、流体フラックスの定量、流体移動経路とその水理学的特性、変形・デコルマの形成と流体移動特性、深部での流体固体相互作用の推定などについて、定量的に理解されるようになった。

ただし、有機物起源の物質を含む流体は、堆積物と共に島弧地殻に付加された後、単に沈み込み帯の温度圧力構造に支配された物理化学的な過程で分解されて、付加体内を循環するのではない。90年代中頃以降に急速にクローズアップされてきたように、地下圏に存在する微生物が、有機物の分解や合成に大きく関与しているのである。すなわち第2章でもふれたように、これらの微生物活動が、付加体における有機物質循環において重要な役割を果たしている可能性がある。付加体深部まで到達することを目指す地震発生帯掘削は「地震発生と岩石流体相互作用」をその研究の重要な柱とすることは当然

であるが、上記のように沈み込み帯における物質循環とエネルギー生産という視点から見た時、これまで得られている付加体の物質循環が生起する時空間スケールを一挙に拡大する。すなわち水平方向で海溝先端部から50 km を超え、垂直方向で数 km を超える範囲まで広がるからである。プレートの運動はこれが100 万年を超えるスケールを見ることであることを示している。すなわち、長期観測において、物質移動と状態変化の観測を施すわけであるから、我々の沈み込み帯の物質のフラックスに関わる認識が日変化や年変化のスケールから一挙に百万年の時間スケールにわたる定量的把握が実現することとなる。これは変動の時空間スケールを超えた統一的理解、あるいは物質エネルギー循環の時空間スケールを超えた統一的理解という現代地球科学の抱える最大の問題にブレークスルーをもたらし、従来の地球諸科学の分野の垣根を最終的に取り払うことになると期待されるのである。その結果が地球システムの飛躍的理解を生み出すであろうことはすでに、J-ISP に述べられている。

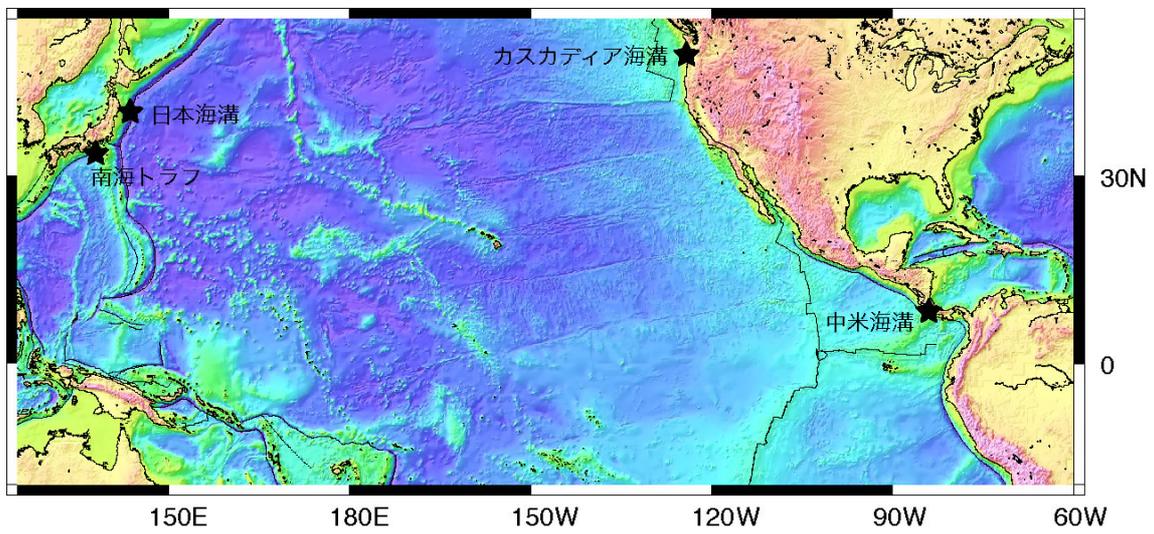


図 4.1. 北太平洋の主な地震発生帯。南海トラフと中米海溝において掘削提案が提出されている。

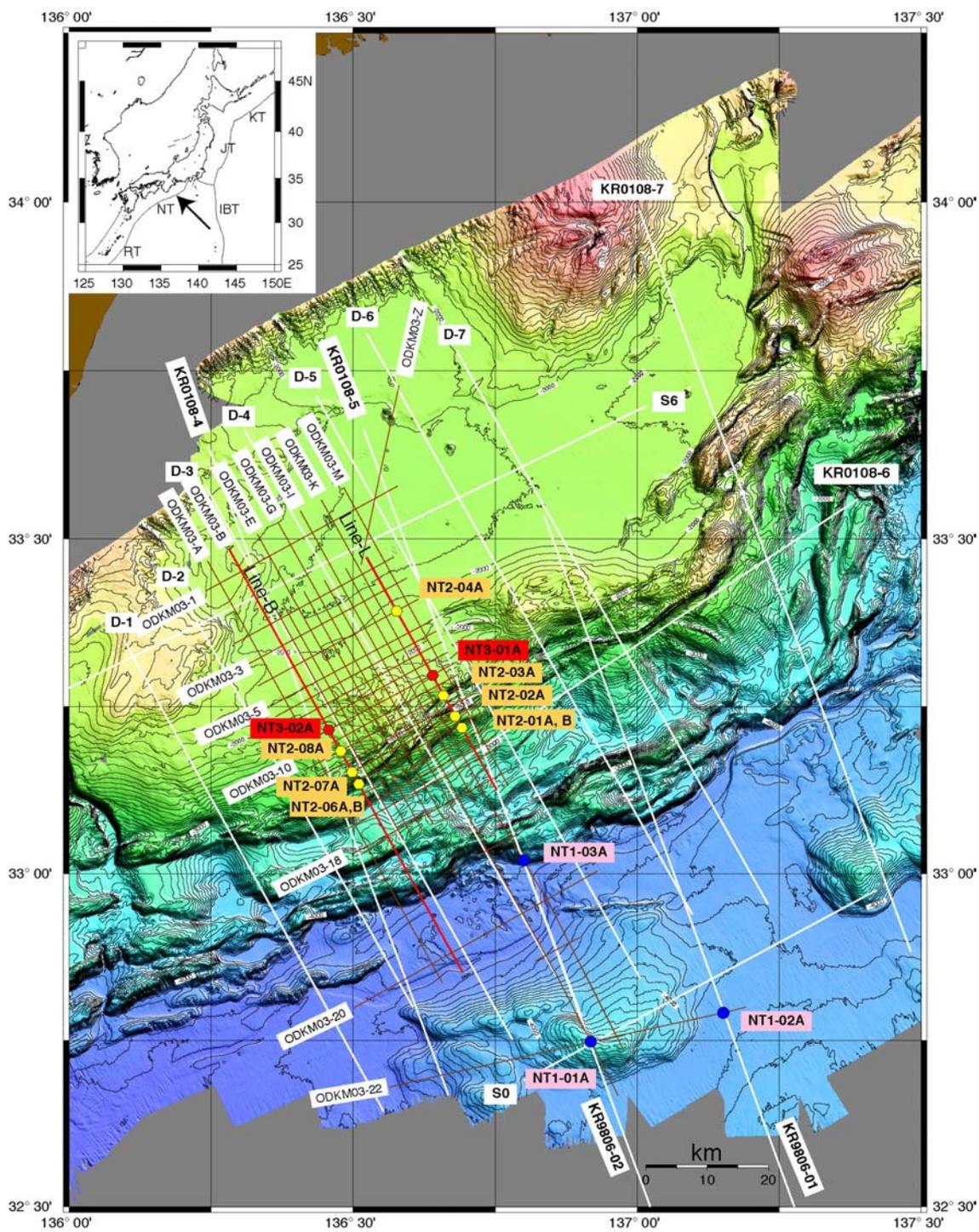


図 4.2 南海トラフ地震発生帯の掘削地点および周辺地形図。

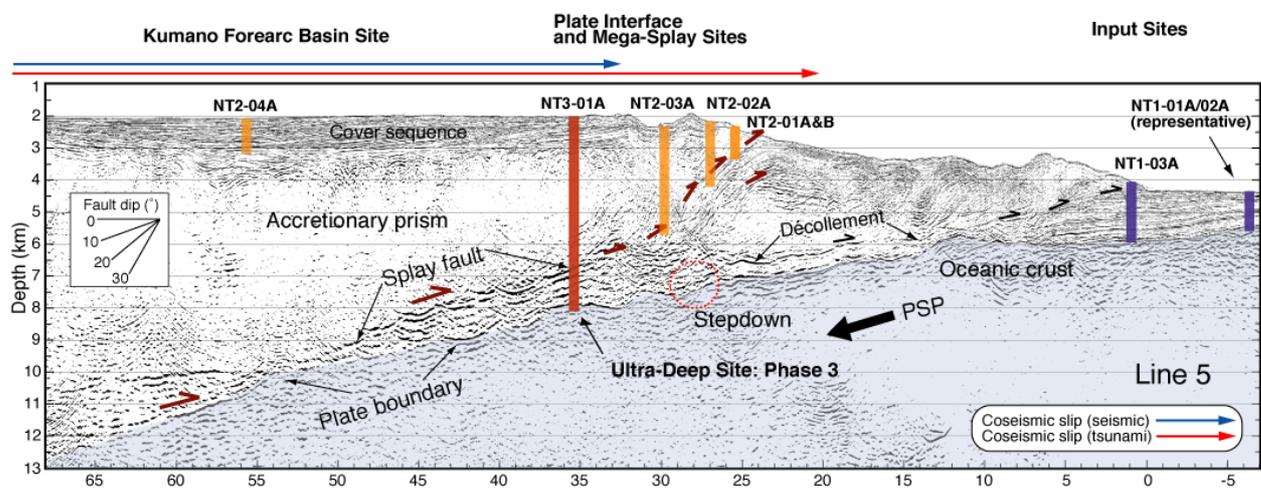


図 4.3. 南海トラフ地震発生帯の掘削予定断面図。

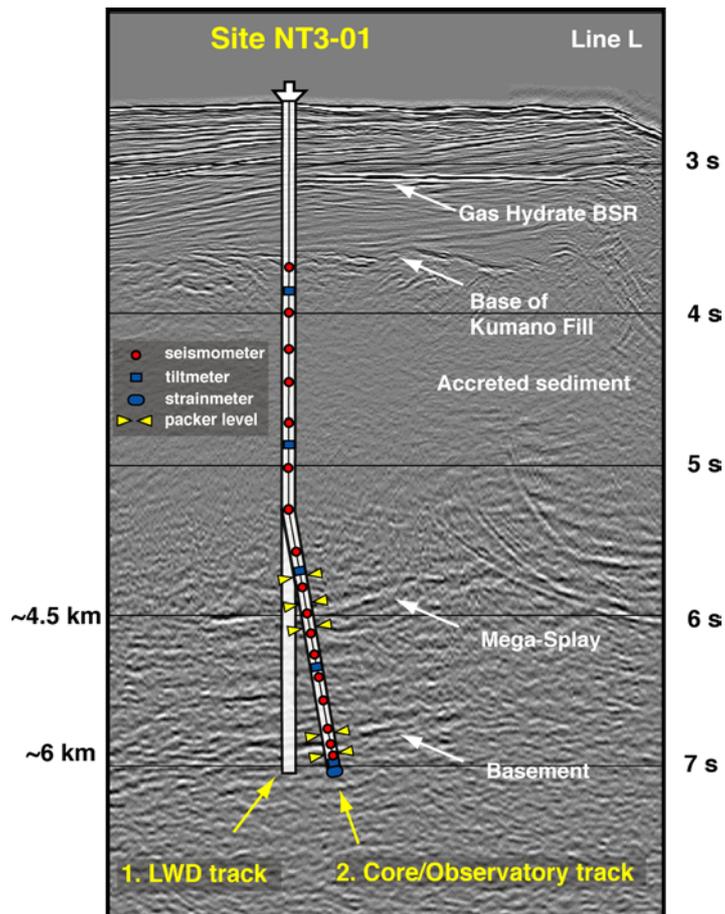


图 4.4 孔内長期観測概念図。

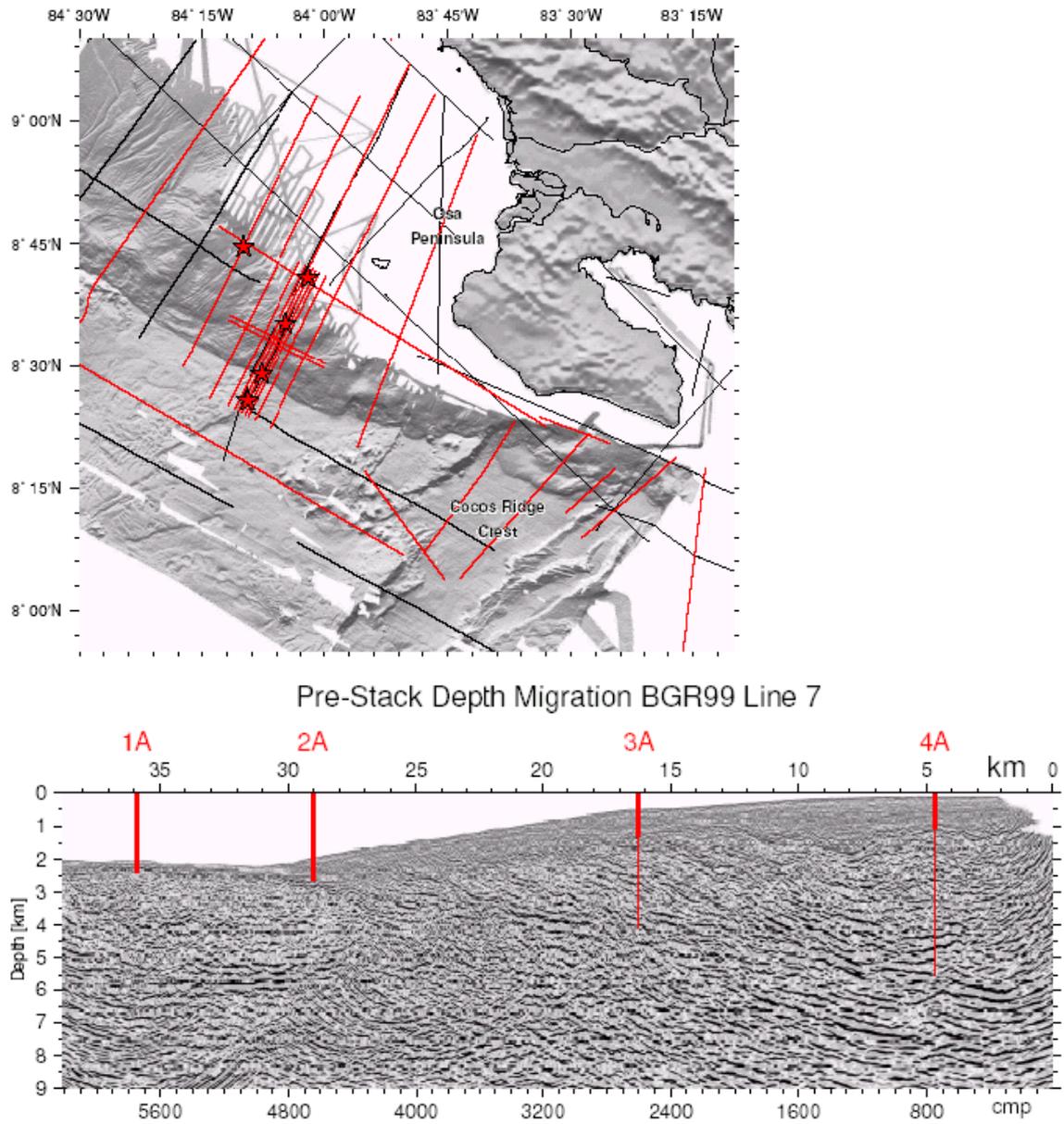


図 4.5 コスタリカ沖中米海溝における IODP 提案に記載の掘削地点 (星印)。