台湾南西沖，海底マウンド分布域の流体循環

— 大陸棚斜面上のリッジにおける高精度地震探査について —

森 田 澄 人* Char-Shine LIU** Chia-Yen KU***
町 山 栄 章**** Saulwood LIN** 徐 垣****
清 水 賢*****

Fluid Circulation in a Region of Submarine Mounds off Southwest Taiwan: High-resolution Seismic Records from the Continental Slope Ridge

Sumito MORITA*, Char-Shine LIU**, Chia-Yen KU***,
Hideaki MACHIYAMA****, Saulwood LIN**, Wonn SOH****
and Satoshi SHIMIZU*****

Abstract

A high-resolution seismic reflection survey was conducted over submarine mounds on continental slope ridges in passive margin offshore southwestern Taiwan during the NT07-05 cruise in March 2007. The continental slope ridges were formed by an erosion system in which submarine canyons incise the continental slope and control ridge formations. The seismic survey revealed the geologic structure of continental slope ridges where there are target locations, site F and site G, of submarine mounds. Site F corresponds to the southern peak of the Formosa Ridge, where sedimentary strata are generally flat lying. On the Formosa Ridge, methane hydrate BSR (bottom simulating reflector) was widely observed, but it is chopped off just below site F. There is also a vertical narrow reflection blanking between the cut of the BSR and site F on the seafloor. SeaBat multibeam echo sounder detected a gas plume rising from the mound of site F. ROV Hyper-Dolphin discovered very large and dense chemosynthetic communities at the top of the mound. Site G is also a small submarine mound in another continental slope ridge. The mound is thought to be a mud volcano. There is no clear BSR, but there are high-amplitude beds below the mound. The high-amplitude beds peak just below site G, and there is also a vertical, high amplitude zone between the peak and the submarine mound of site G. Thus, the geologic structures in sites F and G have morphologically similar characteristics. It can be considered that the BSR in the Formosa Ridge should act as a good cap for trapping gassy fluid, and the narrow blanking just below site F is a fluid conduit where strata have been disturbed. On the

* 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

** 台湾大学海洋研究所

*** 国立中央大学地球物理研究所

**** 海洋研究開発機構高知コア研究所

***** 日本海洋事業

* Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** Institute of Oceanography, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

*** Institute of Geophysics, National Central University, Chung-Li, Taiwan

**** Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, Kochi, Japan

***** Nippon Marine Enterprises, Ltd.

other hand, in site G, the high-amplitude beds acts in the same way as BSR in site F, and the vertical high-amplitude zone just below site G is considered also to be the mark of a conduit from the peak of the high-amplitude beds to the submarine mound, where remnant gas components in the conduit may have emphasized partial acoustic impedance, although the Hyper-Dolphin could not find any present activity on the mound. We found the cold seep site at the top of site F in the Formosa Ridge. By integrating bathymetric characters and seismic reflection data, we can have a better understanding of the fluid circulation system in the cold seep site. In site F, the BSR that forms a trap as a gas reservoir is shallower than the canyon floors on either side of the ridge. We suggest that this reservoir configuration may enable a thermal pump system in the ridge and the surrounding cold seawater to enter the fluid system, and form a notable fluid circulation and unusual chemosynthetic communities.

Key words : Offshore southwest Taiwan, continental slope, passive margin, methane hydrate, BSR, submarine mound, seismic reflection survey

キーワード : 台湾南西沖, 大陸棚斜面, パッシブマージン, メタンハイドレート, BSR, 海底マウンド, 反射法地震探査

I. はじめに

海底で見られる地学現象には表層付近の流体循環に関わるものが多い。これは海底下を移動する間隙水やガスが海底に漏出することで冷湧水として現れ, さらに碎屑物の流れが関連する場合は泥火山の形成にいたる。泥火山は高い堆積速度場で過剰圧に達した地下堆積層の碎屑物が流動化し, 貫入や噴出を起こして地上や海底に現れるものと考えられ, 世界中の大陸縁辺部の陸域から海域にわたり広く分布している (Milkov, 2000; Dimitrov, 2002; Kopf, 2002; Judd and Hovland, 2007)。また, 泥火山は石油や天然ガスとの関わりが強く, 噴出過程においてメタンハイドレートと関係していることはめずらしくない (Milkov, 2000; Schmidt *et al.*, 2005; Hovland and Svensen, 2006)。さらに, 泥火山の形成に重要な要素としてテクトニックな側方応力が挙げられる (Deville *et al.*, 2003; Talukder *et al.*, 2003; Yassir, 2003; Judd and Hovland, 2007)。

台湾南西沖は東西でテクトニクスが異なっており, 東側が付加体を形成するプレート収束帯のアクティブマージンであるのに対し, 西側はプレート間運動に関連のない中国大陸縁辺部のパッシブ

マージンに相当する (図 1)。台湾の陸上南西部には泥火山が広く分布しており, メタンを主としたガスを伴っている (Yang *et al.*, 2004)。海域はその延長であり, 東西の異なったテクトニクスに関わらず泥火山や冷湧水の存在が各所で確認されており (Chiu *et al.*, 2006), またメタンハイドレート BSR が広く分布している (Liu *et al.*, 2006)。側方からの有効応力が期待されないパッシブマージンの大陸縁辺部において泥火山が分布することは, 圧縮応力場でなくとも地層内に過剰圧が形成される機構が整っている可能性も考えられる。

本研究は, 2007 年 3 月, 海洋研究開発機構の支援母船なつしまによる NT07-05 航海の調査に基づく。日本と台湾における初めての共同海洋調査研究として実施された本航海では, 台湾南西沖, 大陸棚斜面の冷湧水域において高精度反射法地震探査と地形調査, および ROV ハイパードルフィンによる潜航調査を実施した。本論では, 特にパッシブマージンの泥火山と考えられる海底マウンドでの調査に重点を置きながら, 主に反射法地震探査による予察的結果を中心に述べ, 地形や地質構造などが特異な流体循環システムを構築している可能性を示す。

図 1 台湾南西沖の広域海底地形図。東側はアクティブマージンの付加体であり、西側のパッシブマージンの中国大陸棚斜面である。両者はマニラ海溝から伸びる変形フロントで分けられる。FおよびGは本研究の探査サイトを示し、黒点はその他の冷湧水や泥火山ポイントを示す（例えば、Chiu *et al.*, 2006 など参照）。

Fig. 1 Bathymetric map of the area off Southwest Taiwan. East side corresponds to an accretionary complex in the active margin and west side is the Chinese continental slope in the passive margin. These areas are divided by a deformation front along the Manila Trench. F and G indicate sites on which this study focuses and dots are other cold seeps and/or mud volcanoes (e.g., Chiu *et al.*, 2006).

II. 背景

台湾南西沖海域はルソン沈み込み帯の北部に位置し、西側のパッシブマージンである中国大陸縁辺部に向かって、東側の台湾島を含む付加システムが西進しながら迫っているセッティングにある（図 1）。このようにアクティブマージンとパッシブマージンが隣接する当海域は、マニラ海溝から北北西に伸びる変形フロントで東西に区分され、東側がスラストと褶曲で特徴づけられる付加体であるのに対し、変形フロントよりも西側では大陸縁辺の正断層系を除くと変形は顕著でなく、大陸棚斜面が南東に傾いて広がっている。

広域の反射法地震探査によると、海底谷系を形成するチャンネルシステムや泥ダイアピルなどの複合した地質構造がテクトニクスの異なる両側に共通して認められる（Liu *et al.*, 1997）。また、メタンハイドレートの指標となる BSR（Bottom Simulating Reflector：海底擬似反射面）が、水

深 700 m から 3,500 m の範囲で一般的に観察され、アクティブまたはパッシブマージンに関わらず、付加体側から大陸棚斜面まで広くメタンハイドレートが分布していることが予想される（Liu *et al.*, 2006）。

当海域では泥火山や冷湧水、またガスに過飽和な堆積層など、さまざまな地質現象や反射波の異常により活発な流体移動が起こっていると考えられ、表層堆積物の間隙水に匹敵するほど異常に高濃度の溶存メタンを示す底層水が、台湾南西沖のいくつかの地点から採取されている（Chuang *et al.*, 2006）。また、メタンフラックスの指標となる SMI（Sulfate Methane Interface：硫酸塩 / メタン境界）が非常に浅い深度（30–300 cm）を示す事例が認められている（Lin *et al.*, 2006a）。さらに、南シナ海の大陸棚斜面に分布する冷湧水や泥火山は、メタンハイドレートの分解が主要因と解釈されている（Chiu *et al.*, 2006）。

III. 調査地点の概要

南シナ海の大陸棚斜面は、中国側から供給された鮮新世-更新世の堆積物で構成される。陸棚斜面の地形は傾斜方向に沿ったリッジによって特徴づけられる。これらは陸棚斜面を削る海底谷によって形成されたもので、ほとんどの海底谷が斜面上部の陸棚縁辺部で発達している。このように、大陸棚を構成するほぼ水平の地層が侵食によりリッジとなって露出しているため、地質構造と地形は不調和である。

1) F サイト

F サイトは大陸棚斜面に形成されたリッジの一つ、Formosa Ridge に位置する。SeaBat8160 のマルチナロービームシステムによって得られた地形を図 2 に示す。地形調査では、Formosa Ridge は北北西-南南東方向の伸びを示し、東西の両側は海底谷により切り込まれている。また、北側も海底谷によって切られているため陸棚斜面の上方へは連続しない。Formosa Ridge は南北の 2 つの頂上を持ち、北側ピークは水深が 1,100 m よりも浅く、南側ピークはおよそ 1,125 m である。F サイトはこの南側ピークの頂上付近に位置し、その地形はリッジ上でさらに突き出した高まりを形成している。F サイトでは過去の調査によりガスブルームが認められ、化学合成生物群集のコロニーが観察されていた (Lin *et al.*, 2006b)。

2) G サイト

G サイトは F サイトと同じく大陸棚斜面に形成されたリッジの頂上付近に位置する (図 3)。リッジはほぼ北西-南東方向の伸びを示し、これまでの調査によりリッジの頂上に泥火山と考えられる海底マウンドの存在が知られていた (Chiu *et al.*, 2006)。

IV. 反射法地震探査

反射法地震探査は航海中、夜間を中心に実施された。シングルチャンネルで、震源に 40 立方インチ × 2 基のクラスターエアガン (2,000 psi) を使用、サンプリングレートを 1 ms とした。データ処理プロセスを図 4 に示す。

1) F サイト

F サイトを含む Formosa Ridge では合計 14 測線の探査が行われた。図 5 は Formosa Ridge における尾根沿いの地震探査断面を示す (F24-25)。南側ピーク (SP) と北側ピーク (NP) がとらえられており、周囲の地形よりもさらに突き出した海底マウンドを示す南側ピークが F サイトにあたる。ここでは、地層が概してほぼ水平に連続しているが、おそらく崩壊によると考えられる変形が各所で観察される。またメタンハイドレート BSR が海底下 500 ms 付近で地形に沿うように発達しており、F サイトの直下と北側ピークの下付近で途切れる。ほぼ同様の測線で実施されたマルチチャンネル地震探査断面では、非常に強い BSR が連続的に認められているが (Liu *et al.*, 2006), これは探査による周波数帯域の違いのためと考えられる。F サイト (南ピーク) の直下では、BSR だけでなく地層の反射も途切れ気味でブランクになっている様子がうかがえる (図 5)。

測線 F24-25 よりも若干西偏した方向の測線 F11-12 では、F サイト付近のより詳細な構造を明らかにした。ほぼ水平な堆積構造がチャンネル構造、または正断層によってオフセットを示している (図 6)。非常にクリアな BSR が海底下 500 ms 付近に認められるが、ピーク付近で途切れる。BSR の下位は、その上位よりも振幅が強く層理が明瞭に認められるため、おそらく BSR 直上にメタンハイドレートが集積するか、または下位に流体の集積があることを示していると考えられる。注目すべき点として、F サイトのほぼ直下には鉛直方向に伸びるブランクが認められる。探査断面ではこのブランクに沿った地層のオフセットは認められず、また地形においても F サイトを通る顕著な線構造は認められない。よって、これは断層には直接関係のない構造と考えられる。またブランクの輪郭には凹凸があり、シャープな振幅のコントラストを示すものではないことから地形の影響によるシャドーとも考えられない。したがって、F サイト直下のブランクは流体の移動によって地層が擾乱を受けた跡と考えられ、ガスが集積した堆積層から海底の冷湧水ボー

図 2 (Fig. 2)

図 3 (Fig. 3)

図 2 SeaBat8160 マルチナロービームシステムによる Formosa Ridge 付近の詳細海底地形図。NP および SP は Formosa Ridge 上にある南北 2 つの頂上を示し、F サイトは SP の突出した地形を指す。赤線は代表的な探査測線を示す。

Fig. 2 Detailed bathymetry around the Formosa Ridge revealed by SeaBat8160 multi-narrow beam system. NP and SP indicate two peaks along the Formosa Ridge where Site F corresponds to the SP. Red lines indicate seismic lines.

図 3 SeaBat8160 マルチナロービームシステムによる G サイト付近の詳細海底地形図。G サイトはリッジの頂上に位置する海底マウンドを指す。赤線は代表的な探査測線を示す。

Fig. 3 Detailed bathymetry around Site G obtained by SeaBat8160 multi-narrow beam system. Site G is a mud mound at the peak of a ridge. Red lines indicate seismic lines.

図 4 高精度反射法地震探査のデータ処理フロー.

Fig. 4 Flow chart of data processing for the high-resolution reflection seismic survey.

ントへつながる流体の経路であることを強く示唆する。

測線 F22-23 は F サイト付近で Formosa Ridge を東西方向に横断する断面を示す (図 7)。この方向においても地層はほぼ水平に広がっており、東西の連続性は海底谷の発達により切られていることがわかる。また、明瞭な BSR が地形に沿って東西方向に対称的に認められる。やはり頂上部のほぼ直下において、鉛直方向に伸びる反射プランクが海底と BSR との間に認められ、同様に上方への流体移動の経路を示していると考えられる。また、BSR 直下の地層は周囲の水平な地層と非調和で、ガス集積によるブルダウン効果を示しているように見える。これは F サイトの直下である BSR の最高部だけでなく、その周辺のある程度の範囲で BSR の下にガスが存在していることを示唆する。

2) G サイト

G サイトでは合計 8 測線で探査を実施した。図 8 は G サイトのリッジ方向に沿った地震探査断面を示す (G1-2)。海底に突き出した小丘が泥火山と考えられている G サイトである (Chiu *et al.*, 2006)。地層はほぼ水平であるが、浅層部は地形に沿って褶曲している。G サイト付近には海底下 100-200 ms 辺りに強振幅の地層が観察され、その地層が最も浅くなる G サイトの下位では

図 5 Formosa Ridge に沿った測線 F24-25 の反射法地震探査断面.

Fig. 5 Seismic profile of line F24-25 along the axis of the Formosa Ridge.

地層に乱れが見られ、海底との間に振幅の強い部分が認められる。ただし F サイトの下位のようなブランクは認められない。水深が十分に浅いためメタンハイドレート安定領域の下限はこの強振幅の地層よりも浅い位置にあると考えられ、G サイト付近では BSR は認められない。一方、その

図 6 F サイト付近の Formosa Ridge に沿った測線 F11-12 の反射法地震探査断面。

Fig. 6 Seismic profile of line F11-12 running along the southern portion of the Formosa Ridge.

北側の海底谷では海底下 200 ms 付近に BSR が観察できる。

測線 G5-6 は G サイト付近でリッジを東西方向に横断する断面を示す (図 9)。ここでも G サイトの下位に強振幅を示す地層が認められ、さらに G サイトの海底マウンドとその強振幅帯の間は、柱状の強振幅の反射でつながっている。おそらくシール性が高いと思われる特定のレイヤーからその下位に強振幅帯が広がっていると考えられ、さらに頂上の G サイトの直下では、海底につながる流体の経路が存在したと推測される。いずれも地層内にガスを含んでいることにより部分的な音響インピーダンスのコントラストが強調されたものと示唆される。すなわち、海底下 100-200 ms 付近の地層に溜まったガスが、G サイトの直下で集中して流体を供給した可能性が示唆される。

V. 考 察

上述のとおり、地震探査断面で見られる特徴は F サイトと G サイトの間で非常に似かよっていることがわかった。いずれも海底マウンドの下位にガスを含んだ流体の集積が BSR またはシール性の高い地層の下に存在すると考えられ、その中で最も浅い部分と、マウンドの存在する海底との

図 7 Formosa Ridge を横断して F サイトを通る測線 F22-23 の反射法地震探査断面。

Fig. 7 Seismic profile of line F22-23 across the Formosa Ridge through site F of the south peak.

図 8 G サイト付近のリッジに沿った測線 G1-2 の反射法地震探査断面。

Fig. 8 Seismic profile of line G1-2 along the slope ridge including site G.

図 9 リッジを横断して G サイトを通る測線 G5-6 の反射法地震探査断面。

Fig. 9 Seismic profile of line G5-6 running perpendicular to line G1-2. The profile G5-6 provides a cross-section across the ridge, just passing site G at the peak of the ridge.

間に流体経路と考えられる鉛直方向の反射ブランクや強振幅帯が認められた。

反射断面の特徴から考察すると、F サイトでは BSR の最高部から漏出した流体により、地層が擾乱を受けて流体経路が特徴的な反射を持たないブランクになったと考えられる。一方 G サイトでは、海底へつながる経路において地層の擾乱はあまり広がらず、地層内に残留するガスの存在が

部分的に音響インピーダンスのコントラストを強調したことにより振幅の強い鉛直構造をつくったと推定できる。

F サイトでは、SeaBat のエコー探査 (50 kHz) により海底から立ち昇るガスブルームと推定される反射像が認められた (図 10)。また、ROV ハイパードルフィンによる潜航調査では、著しい数の化学合成生物群集が F サイトの海底を覆っていることが確認された (図 11)。生物群集は主にゴエモンコシオリエビ (*Shinkaia crosnieri*) とヘイトウシンカイヒバリガイ (*Bathymodiolus platifrons*) で構成されるため、海底下からは高濃度のメタンと硫化水素が供給されているものと推定される (Fujikura *et al.*, 2007)。

このように F サイトでは海底下から相当量の流体が現在も供給されていることは明らかである。一方、G サイトの海底マウンドでは活動的な湧水域や化学合成生物群集は潜航調査で発見されなかった。ほぼ水平に伸びるリッジの頂上に孤立して突出した地形や、地震探査断面の特徴から判断すると、G サイトは現在活動を休止しているかもしれないが泥火山である可能性が非常に高い。またこれより先に、Chiu *et al.*, (2006) は独自に採取した地震探査記録での同様の特徵から、G サイトのマウンドが泥火山であると解釈している。

図 10 (Fig. 10)

図 11 (Fig. 11)

図 10 SeaBat8160 のエコー探査 (50 kHz) でとらえられた、F サイトから立ち昇るガスプルームの反射像。

Fig. 10 Acoustic echo image taken by SeaBat8160 (50 kHz) showing a gas plume rising from Site F.

図 11 ROV ハイパードルフィンにより Formosa Ridge 上の F サイトで発見された化学合成生物群集。主にゴエモンコシオリエビとヘイトウシンカイヒバリガイで構成され、ほぼ海底を覆いつくす。

Fig. 11 Large numbers of chemosynthetic creatures discovered by ROV Hyper-Dolphin at the Site F on the Formosa Ridge. They are mainly composed of *Shinkaia crosnieri* and *Bathymodiolus platifrons*, which totally cover the seafloor.

潜航調査により採取された底質サンプルは F サイトおよび G サイトともに炭酸塩岩や塊状の泥岩であり、泥ダイアピル内での破碎を示唆するような角礫岩は採取されなかった。また、いずれの地震探査断面においても海底マウンドの下位に泥火山の起源となる泥ダイアピルらしい特徴は認められない。このような特徴から考えると、両サイトでは海底下深部における大規模な地層の破壊は起こっておらず、必ずしも泥ダイアピルを形成するほどの顕著な過剰圧が働いているとは言えない。むしろ、以下に述べるような著しい流体循環に伴い、擾乱を受けた浅層部の地層が碎屑物の海底噴出に寄与している可能性が考えられる。

F サイトおよび G サイトの両サイトにおける特徴は、いずれもドーム状になった BSR やシール性の高い地層の最高部で流体の漏出が起きていることで共通する。ガスを含んだ上方指向の流体がキャップ構造にトラップされることは、石油

地質学の基本的な移動・集積過程の概念としてとらえられる。しかし F サイトのように、地層がほぼ水平でありながら、周囲を海底谷によって削られて形成されたリッジにおいて BSR の漏斗効果によって地形の頂上に集中して流体が放出されることは、従来報告されたことのない新しい流体循環システムでありたいへん興味深い。リッジは大陸棚斜面の侵食によって形成されている。海底谷は大陸棚斜面上部を削り、リッジの形成をコントロールしている。このような流体循環のシステムは、尾根地形にはほぼ平行に発現するリッジタイプ BSR (Baba and Yamada, 2004) の形態に原因しており、特にパッシブマージンの侵食性大陸棚斜面に特徴的な現象であるかもしれない。

特にトラップ内のガス集積部においては、上位の地層のキャピラリー圧と集積したガスの浮力がせめぎ合いをしている。例えば海水準が低下して封圧が低くなれば、ガス集積部におけるガスの浮

図 12 Formosa Ridge 上, F サイトにおける流体循環の概念図.

Fig. 12 Schematic diagram of fluid circulation around site F in the Formosa.

力は相対的に大きくなるため、流体の漏出とそれに伴う冷湧水活動はより促進される方向に働くだろう。また同時に、メタンハイドレート安定領域の下限付近で分解ガスが発生するため、さらにトラップの最高部にガスが集積しやすくなり海底の頂上で湧水が活発化することも考えられる。とりわけ F サイトにおける BSR の最高部は、Formosa Ridge をはさむ両側の海底谷よりも浅部に位置する。このような地形と BSR の特徴は、比較的浸透しやすい周囲の冷たい海水をリッジ内のキャップ構造に取り込みやすくしており、浮力による集積ガスの漏出と合わせた熱ポンプ作用によって、海底に著しい冷湧水活動を起こす特異な流体循環を促している可能性が考えられる (図 12)。

VI. まとめ

2007 年、日台合同海洋調査として支援母船なつしまによる NT07-05 航海が実施され、パッシブマージンである台湾南西沖、中国大陆棚斜面の、海底谷によって削り出されたリッジにおいて高精度反射法地震探査と ROV ハイパードルフィンによる潜航調査を行った。その結果、海底マウンドの存在するリッジの海底地質構造を明らかにするとともに、特異な流体循環に関わる考察を行った。

Formosa Ridge の F サイトでは、海底を埋めつくすほどの化学合成生物群集が確認され、エ

コー探査ではガスプルームがとらえられるなど、相当量の冷湧水の存在が予想される。その海底下構造は反射法地震探査によって、リッジ地形に平行なメタンハイドレート BSR と、BSR が最も浅くなった最高部と海底の頂上を結ぶ反射ブランクで特徴づけられる。ここではリッジ内のガスを含んだ流体が BSR でトラップされ、BSR の最高部から漏出して顕著な冷湧水を海底に形成していると考えられる。BSR の最高部よりもリッジの両側を削る海底谷の方が低いため、ここではリッジ内の熱ポンプが周囲の冷たい海水を取り込みながら著しい湧水を促している可能性が示唆される。

同様のリッジの頂上部に泥火山を形成する G サイトの地震探査断面は、シール性の高いドーム状の地層と、その最高部から海底の頂上を結ぶ間で強い振幅の特徴が見られた。ここではリッジ内の流体が同シール層にトラップされ、その最高部から海底に流体の漏出が起こっていると考えられる。現在泥火山は活動を休止しているようだが、地震探査断面の特徴から、シール層と海底への流体経路は、現在もガスが存在しているようである。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、NT07-05 航海では日本および台湾双方の乗船研究者の間で非常に活発な議論が行われた。また、地震探査および潜航調査は支援母

船「なつしま」の乗組員，および ROV「ハイパードルフィン」運航チームの支援により実施された。さらに観測支援員には地震探査において昼夜を問わずご尽力を賜った。また，宮田雄一郎氏と匿名の査読者には貴重なご助言を賜った。以上の方々に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- Baba, K. and Yamada, Y. (2004): BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan. *Resource Geology*, **54**, 11–24.
- Chiu, J.-K., Tseng, W.-H. and Liu, C.-S. (2006): Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **17**, 703–722.
- Chuang, P.-C., Yang, T.F., Lin, S., Lee, H.-F., Lan, T.F., Hong, W.-L., Liu, C.-S., Chen, J.-C. and Wang, Y. (2006): Extremely high methane concentration in bottom water and cored samples from offshore southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **17**, 903–920.
- Derville, E., Battani, A., Griboulard, R., Guerlais, S., Herbin, J.P., Houzay, J.P., Muller, C. and Prinzhofer, A. (2003): The origin and processes of mud volcanism: New insights from Trinidad. in *Subsurface Sediment Mobilization* edited by Van Rensbergen, P., Hillis, R.R., Maltman, A.J. and Morley, C.K., *Geological Society Special Publication*, **216**, 475–490.
- Dimitrov, L.I. (2002): Mud volcanoes—The most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth Science Reviews*, **59**, 49–76.
- Fujikura, K., Tsuchida, S., Nunoura, T., Soh, W., Machiyama, H., Huang, C. and Lin, S. (2007): Vent-type chemosynthetic community associated with methane seep at the Formosa Ridge, off southwest Taiwan. *Proceedings of the International Conference on Gas Hydrate: Energy, Climate and Environment, Taipei*.
- Hovland, M. and Svensen, H. (2006): Submarine pingoes: Indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea. *Marine Geology*, **228**, 12–23.
- Judd, A. and Hovland, M. (2007): *Seabed Fluid Flow*. Cambridge University Press.
- Kopf, A.J. (2002): Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, **40**, 1–52.
- Lin, S., Hsieh, W.-C., Lim, Y.C., Yang, T.F., Liu, C.-S. and Wang, Y. (2006a): Methane, migration and its influence on sulfate reduction in the Good Weather Ridge region, South China Sea continental margin sediments. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **17**, 883–902.
- Lin, S., Lim, Y., Hsieh, W., Yang, T. and Wang, Y. (2006b): Gas hydrate and spatial venting variations in the continental margin offshore Southwestern Taiwan. *Eos Transactions, AGU*, **87**(52), Abstract OS12C-05.
- Liu, C.-S., Huang, I.L. and Teng, L.S. (1997): Structural features off southwestern Taiwan. *Marine Geology*, **137**, 305–319.
- Liu, C.-S., Schnurle, P., Wang, Y., Chung, S.-H., Chen, S.-C. and Hsuan, T.-H. (2006): Distribution and characters of gas hydrate offshore southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **17**, 615–644.
- Milkov, A.V. (2000): Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, **167**, 29–42.
- Schmidt, M., Hensen, C., Mörz, T., Müller, C., Greve-meyer, K.I., Wallmann, K., Mau, S. and Kaul, N. (2005): Methane hydrate accumulation in “Mound 11” mud volcano, Costa Rica forearc. *Marine Geology*, **216**, 83–100.
- Talukder, A.R., Comas, M.C. and Soto, J.I. (2003): Pliocene to recent mud diapirism and related mud volcanoes in the Alboran Sea (Western Mediterranean). in *Subsurface Sediment Mobilization* edited by Van Rensbergen, P., Hillis, R.R., Maltman, A.J. and Morley, C.K., *Geological Society Special Publication*, **216**, 443–460.
- Yang, T.F., Yeh, G.-H., Fu, C.-C., Wang, C.-C., Lan, T.-F., Lee, H.-F., Chen, C.-H., Walia, V. and Sung, Q.-C. (2004): Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan. *Environmental Geology*, **46**, 1003–1011.
- Yassir, N. (2003): The role of shear stress in mobilizing deep-seated mud volcanoes: Geological and geomechanical evidence from Trinidad and Taiwan. in *Subsurface Sediment Mobilization* edited by Van Rensbergen, P., Hillis, R.R., Maltman, A.J. and Morley, C.K., *Geological Society Special Publication*, **216**, 461–474.

(2008 年 11 月 6 日受付，2009 年 4 月 15 日受理)