

南海沈み込み帯におけるメタンハイドレート BSR の分布と浅部温度構造

2015年3月 地球海洋環境学分野 47136606 大出晃弘

准教授 芦寿一郎

キーワード：南海沈み込み帯、メタンハイドレート BSR、浅部温度構造

1. はじめに

南海トラフはマグニチュード 8 クラスの巨大地震が繰り返し発生するプレート収束境界である。沈み込み帯の温度構造は、堆積物の圧密・脱水・セメンテーションなどの続成作用や間隙水圧に影響を与え、断層面のすべり特性を支配するとされる。また、温度構造によって大きく左右される流体の存在は、海底地すべりなどのジオハザードの観点からも重要である (Dugan and Sheahan, 2012 など)。メタンハイドレートはメタンと水からなる包接化合物で、海洋資源として近年注目されるとともに、その低温高压で安定な特徴を用いて海底下の温度構造の推定に用いることができる。

本研究ではまず、南海トラフの東海沖から日向沖にかけての詳細な海底疑似反射面 (BSR) 分布図を作成する。BSR は構造探査プロファイル上において、海底下のメタンハイドレートの存在を示唆する反射面である。次に、海底下浅部の熱流量は海底地形により影響されるため、その地形効果を考慮に入れることにより、BSR 深度までの正確な二次元温度構造を求める。これにより得られる温度構造は、プレート境界断層の破壊を想定した剪断実験や沈み込み帯の地震のシミュレーションにおいて不可欠な情報となる。

2. データと手法

使用したデータは、東海沖から日向沖にかけての二次元マルチチャンネル反射法地震探査データである。BSR の認定については反射断面図上において強振幅で、海底面の反射とは逆位相かつ、海底面とほぼ平行に周辺の堆積層と関係なく発達する音響反射面を BSR と認定した。

BSR 深度からの地温勾配推定は、まず反射断面図の往復走時を深度(m)に変換するために、間隙率と弾性波伝播速度の関係式 (Hyndman et al., 1993) から、弾性波伝播速度を推定し BSR 深度、海底面深度を求める。次に間隙圧を静水圧と仮定することにより、BSR 深度での圧力が算出できる (Zwart et al., 1996)。そしてその圧力からメタンハイドレート相境界曲線を用いて、BSR 深度での温度が求められる。最後に観測データから得た海底の水温を用いることによって地温勾配が推定できる。

海底地形が起伏に富んでいる場所では、滑らかな海底地形の場所と比べて地温勾配が大きく異なる場合がある。この地形による影響を取り除くために、海底下の温度構造を単純な二次元計算 (Blackwell et al., 1980) により推定し、地形による冷却効果が BSR 深度にどの程度影響を与えるのかを検討する。また、温度構造推定の際のデータを用いて、地形効果を考慮したメタンハイドレート安定領域下限 (BGHS) 深度を計算する。

3. 結果および議論

BSR の存在は従来の研究と同様に前弧海盆から付加体斜面にかけての広い範囲に分布することを確認した。また、付加体先端部での BSR の発達を初めて確認した。これは、東海沖の測線のみ認められる。付加体先端は、これまでメタンハイドレートは回収されているものの、BSR は欠落

していると報告されてきた (Ashi et al., 2002 など)。付加体先端部の海底面はほぼ平坦であるが、堆積層は陸側に傾き、その傾斜した地層が流体の移動経路になり、堆積物中に形成されたハイドレート下にガスが集積し BSR が発達したと考えられる。今回 BSR が見つかった東海沖の付加体先端は、銭洲海嶺が沈み込みつつあり、また古銭洲海嶺の沈み込みの影響を受けた部分である (Taira et al., 1989)。単純な剥ぎ取り変形ではなく、かつて形成されていた付加体が古銭洲海嶺の沈み込みで破壊されたことが原因で、メタンハイドレート下へのメタンガスの集積につながった可能性がある。

BSR 深度から推定した地温勾配の値は、温度プローブを海底に突き刺して測定された Hamamoto et al. (2011)と同様に陸側からトラフ底に向かうにつれて高くなる傾向が確認できた。紀伊半島沖の測線で最大値 115°C/km、四国沖の測線で最小値 22°C/km を得た。プレートの年代によって地温勾配の値は推定が可能だが、これらはプレートの年代、地形効果、堆積作用や侵食作用を考慮することによって、プレートの年代による推定値にほぼ収まることが明らかになった。

トラフ底から陸側への BSR 深度の変化については、既往研究 (Yamano et al., 1982 など)と同じく徐々に深くなっているのが観察された。メタンハイドレートは低温高压で安定であるので、熱流量が一定であればトラフ底で最も BSR が深くなるはずであるが逆の傾向を示す。すなわち、観察された BSR 深度はトラフ底から陸側へ熱流量が低下していることを示唆する。

上記の BSR 深度は、深部からの熱フラックスに規制され、基本的にトラフ底から陸側へ向けて徐々に変化している。しかし、本研究では、背斜部で周囲より深くなる、向斜部・斜面部で周囲より浅くなる異常が認められた。理論的には、上に凸の地形は海水の冷却効果を受けやすく、上に凹の地形はその効果が小さくなるため、計算によりこれらの地形効果で BSR の凹凸が説明できるかどうか検証した。その結果、背斜部・斜面部で BSR 深度が変化するのは地形効果のみで説明できることが明らかになった。すなわち、BSR 深度から求めた温度構造は、背斜部や斜面部でも周囲と変わらないことが分かった。

4. 結論

本研究では、BSR の発達を付加体先端部で初めて確認した。BSR は海底地すべりのすべり面になり得ることから、詳細な BSR 分布図は防災面において貢献することができる。南海トラフ海域では地温勾配の値に大きなばらつきが存在したが、その値は沈み込むプレートの年代、海底の起伏による地形効果、堆積・侵食効果を考慮することによって説明することができる。また、BSR までの海底下深度は水深 (圧力) が同じ場合でも異なることが確認されていたが、海底の起伏による冷却効果を考慮した計算により説明できることを明らかにした。そして、その地形効果を考慮に入れた BSR までの正確な温度構造を求めた。理論的な BSR 深度である BGHS 深度と観測 BSR 深度がよく一致することから、BSR 深度までの温度構造を正しく推定できたものとする。正確な BSR 深度が分かることにより、メタンハイドレートの資源量を以前より正確に見積もることが可能となる。さらに、プレート境界断層の破壊を想定した剪断実験や、沈み込み帯の地震のシミュレーションにおいて不可欠な温度情報を本研究の結果から提供できるものとする。

引用文献

Ashi, J., et al., *Mar. Geol.* **187**, 177 (2002); Blackwell, D. D., et al., *J. Geophys. Res.* **85**, 4757 (1980); Dugan, B. and Sheahan, T. C., *Rev. Geophys.* **50**, RG3001 (2012); Hamamoto, H., et al., *Geochem. Geophys. Geosyst.* **12**, Q0AD20 (2011); Hyndman, R. D., et al., *Proc. ODP*, **131**, 211 (1993); Taira, A., et al., Oxford Univ. Press, 100 pp (1989); Yamano, M., et al., *Geol.* **10**, 339 (1982); Zwart, G., et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **139**, 485 (1996).

Distribution of methane hydrate BSRs and shallow thermal structure in the Nankai subduction zone

Mar. 2015 Global Marine Environment 47136606 Akihiro Ohde
Associate Professor, Juichiro Ashi

Keyword : Nankai subduction zone, methane hydrate BSRs, shallow thermal structure

1. Introduction

The Nankai Trough is a plate convergent boundary where earthquakes with a magnitude of 8 take place repeatedly. Thermal structure in subduction zones influences pore pressure and diagenesis such as consolidation, dewatering, cementation, and constrains physical properties of fault-slip plane. In addition, existence of fluid affected by thermal structure is important from a viewpoint of geo-hazards such as submarine landslides (Dugan and Sheahan, 2012). Methane hydrate is a clathrate that consists of water and methane. Recently, it attracts attentions not only for marine resources but also for estimates of thermal information below the seafloor using the characteristics of its stabilization under low-temperature and high-pressure conditions.

First, in this study, I make a distribution map of the detailed Bottom Simulating Reflectors (BSRs) in the Nankai Trough including from offshore Tokai to Hyuga. The BSRs are acoustic reflectors that imply existence of methane hydrate below the seafloor. Second, precise two-dimensional thermal structure ranging from the seafloor to BSR depths is calculated taking topographic effect into account, because subsurface heat flow is affected by bathymetry features. The thermal structure gained here provides essential data for seismic simulations in subduction zones and for laboratory experiments as analogues to seismic ruptures in plate boundary faults.

2. Data and Method

I use two-dimensional multi-channel seismic reflection data obtained from offshore Tokai to Hyuga. The BSRs investigated in this study are recognized as the acoustic reflectors that parallel the seafloor on seismic reflection images with high-amplitude and reversed-polarity waveforms.

In order to estimate geothermal gradients based on BSR depths, BSR depths below seafloor and water depths on seismic images are firstly calculated based on the relation between porosity and p-wave velocity (Hyndman et al., 1993). Second, pressure at BSR depths is calculated assuming pore pressure to be hydrostatic (Zwart et al., 1996). Third, temperatures at BSR depths are calculated from the pressure at the depths. Finally, geothermal gradients are estimated using these values and observational bottom water temperatures.

Geothermal gradients in rougher topography tend to be widely different from that in flat seabeds. To remove this effect, I evaluated the effect by conducting the simple two-dimensional thermal calculation of Blackwell et al. (1980). In addition, I calculate the Base of Gas Hydrate Stability zone (BGHS) taking into account the thermal structure coupled with the topographic effect.

3. Result and Discussion

Existence of BSRs is widely confirmed ranging from forearc basin to slope basin as is known in previous

studies. Interestingly, however, a BSR at the toe of accretionary prism is confirmed, which has not been reported so far. This BSR is identified only in the Tokai area. It was known that sediments including methane hydrate were sampled by deepsea drillings whereas BSR is absent at the prism toe (Ashi et al., 2002). Seafloor is almost flat there, but sedimentary layers dip landward and the sedimentary sequences play roles in migration paths of the fluids. The BSR here is likely to be developed below the hydrate formed within sedimentary layers due to gas accumulation. The prism toe offshore Tokai where the BSR is discovered currently suffers from the beginning of the subduction of the Zenisu ridge. Additionally, the Paleo-Zenusu ridge has been subducted, so the seafloor was very rough (Taira et al., 1989). These phenomena motivate accumulation of methane gases below the methane hydrate. The geothermal gradient value estimated from BSR depths tends to increase landward of trough floor, which is similar to the observed values by heat probes (Hamamoto et al., 2011). The value ranges from 22°C/km of offshore Shikoku to 115°C/km of offshore Kii peninsula. These values were revealed to fit within reasonable values by considering plate age, topographic effect, and sedimentary or erosional effect.

A deepening trend of BSR depths landward of trough floor is confirmed as suggested in previous studies (Yamano et al., 1982). This observation yields countertrend because the BSR depth should be deepest in the trough floor as methane hydrate is stable under low-temperature and high-pressure conditions. Thus, observed BSR depths suggest that heat flow actually decreases landward of the trough floor.

The investigated BSR depths are constrained from deep heat flux, and vary basically landward of the trough floor. But, in this study, BSR depths are deeper around anticline parts and shallower around syncline and slope parts. Theoretically, the convex-upward seabed is subject to cooling owing to cold bottom seawater, while the convex-downward one is less subject to the cooling. Evaluations of this kind of topographic effect suggest that syncline and slope area can be explained by only the topographic effect. Thus, thermal regime calculated from BSR depths does not change in syncline or slope areas.

4. Conclusion

In this study, the BSR was confirmed for the first time at the prism toe. The detailed BSR distribution map can contribute to disaster prevention because BSRs have potential to being fault-slip planes. In the Nankai area, geothermal gradient values scatter, but the values can be explained by considering subducting plate age, topographic effect, and sedimentation or erosion. In addition, while distances from seafloor to BSR depths are different even under the same water pressure, the calculation taking topographic effect into account revealed to be able to explain these depth changes. Moreover, the calculated thermal structure over BSR depths considering topographic effect seems to be accurate, because estimated BGHS depths and BSR depths fit well together. Understanding precise BSR depths enables to precisely estimate deposited amount of methane hydrate. This study provides thermal information essential for seismic simulations in subduction zones and for laboratory experiments as analogues to seismic ruptures in plate boundary faults.

Reference

Ashi, J., et al., *Mar. Geol.* **187**, 177 (2002); Blackwell, D. D., et al., *J. Geophys. Res.* **85**, 4757 (1980); Dugan, B. and Sheahan, T. C., *Rev. Geophys.* **50**, RG3001 (2012); Hamamoto, H., et al., *Geochem. Geophys. Geosyst.* **12**, Q0AD20 (2011); Hyndman, R. D., et al., *Proc. ODP*, **131**, 211 (1993); Taira, A., et al., Oxford Univ. Press, 100 pp (1989); Yamano, M., et al., *Geol.* **10**, 339 (1982); Zwart, G., et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **139**, 485 (1996).