

もう1つの海底面 — BSR —

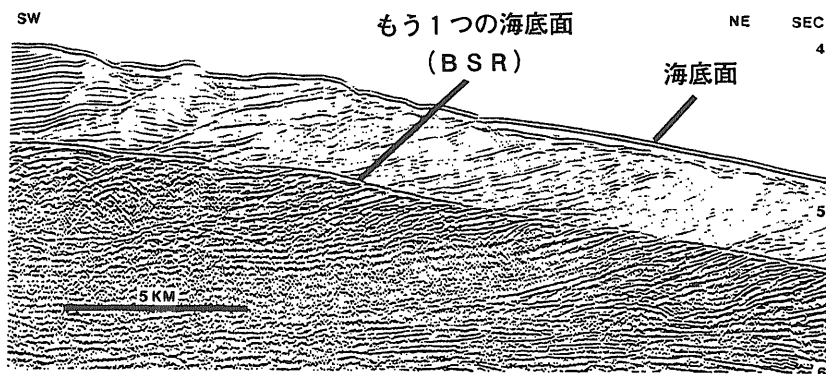
倉本真一¹⁾

1. はじめに

まず第1図の音波探査記録断面を見ていただきたい。これはShipley et al. (1979)によって示された北米フロリダ半島沖のブレイクアウターリッジ (Blake Outer Ridge) での記録断面である。北東方向に傾斜する海底面とほぼ並行にもう一つの海底面(?)が海底下に見える。それはかつての海底面であるとか、あるいはこの記録が得られたブレイクアウターリッジが“謎のパミュードトライアングル”の近くだと聞くと、もっとSF小説みたいなことを想像される読者もいるかもしれない。実はこれは海底面疑似反射面と呼ばれるもので、海底下からの沢山の情報を与えてくれる信号である。「海底面疑似反射面」という言葉より、現在ではBSRと言った方が良く耳にする言葉であるかもしれない。

BSRとはBottom Simulating Reflectorの略で、ピ

ー・エス・アールと読む。このBSRを中心にした研究が最近盛んに行われてきており、毎月のように研究論文が発表されている。その理由は近未来の有望なエネルギー資源として脚光を浴びつつあるメタンハイドレートと非常に密接な関係があるからである。メタンハイドレートとは、水分子とメタンガス分子とから成る氷状の結晶、包接化合物(クラスレート)である。「燃える雪玉」或いは「燃える氷」として一般的には紹介されている。石油よりもクリーンな天然ガス資源として、また地球規模の環境変動をおこす一因として注目され現在研究が進められている。天然のメタンハイドレートは極域の永久凍土地帯と大陸縁辺部の海底下にその存在が知られているが、本小論では莫大な賦存量が期待されている海域におけるメタンハイドレートの音響的特徴のうち、特にメタンハイドレートに起因したBSRについて解説し、そのBSRが何を物語っているかについて考察する。



第1図 Shipley et al. (1979)によって示された2重海底面。北東方向に傾斜して見える海底面と、メタンハイドレート層の基底を示しているとされる擬似的な海底面(図中に「もう1つの海底面(BSR)」と表示)が明確に示されている。Shipley et al. (1979)に加筆。

1) 地質調査所 海洋地質部

キーワード:メタンハイドレート, 海底面疑似反射面, BSR, フリーガス, 反射法音波探査

2. BSRとは

まずBSRとは反射法音波探査記録断面上に現れる海底面にほぼ並行で、比較的振幅の大きな反射面として特徴付けられる特異な反射面の総称である。その成因としては、1)メタンハイドレートの安定領域下限における音響インピーダンスの急変に因るもの、2)珪質堆積物中でのオパール-A/CT続成境界における音響インピーダンスの急変に因るもの、3)比較的厚い火山灰の堆積などによる音響インピーダンスの急変などが考えられる。この音響インピーダンスとは音波探査にとって重要な概念で、音波の反射がどのような物理条件で起こっているかを表すのに用いている。つまり反射法音波探査では人工音源と hidroフォンストリーマーケーブルを用いて地層中を反射してくる波を記録しているが、音波が反射する原理は音響インピーダンス(P波速度(V)×密度(ρ))の差が大きい境界で反射することにある。今ある物性境界(いわゆる地層の境界とは限らない)をばさんで上位層の速度と密度をそれぞれV1, $\rho 1$ とし、下位層のそれをV2, $\rho 2$ とすると、反射係数Rは垂直入射波に対して、

$$R = (\rho 2V2 - \rho 1V1) / (\rho 2V2 + \rho 1V1)$$

と表せる。従って音波探査記録上に反射面として現れているということは、その上下で音響インピーダンスの差が大きい、つまりP波速度か密度の、或いは両方のコントラストが大きいことを意味しており、記録上の反射面はそういった物性の変化を示していると考えられる。上記の各成因のBSRいずれもP波速度(V)或いは密度(ρ)の変化が原因であるが、その原因を生み出している地質学的背景は異なる。本小論ではメタンハイドレートBSRだけに絞り、他のBSRについては別の機会に紹介する。

3. メタンハイドレートBSRの成因

メタンハイドレートに起因するBSRはMarkl et al. (1970)によって北米フロリダ半島沖のブレイクアウトリッジで「反射面Y」として初めて記載され、その成因として過去の浸食面を示すか、或いは続成過程での何らかの影響に因るとし、はっきりした成因については不明であった。しかしその後、国際深海掘削計画(DSDP) Leg11によるブレイクアウトリッジ

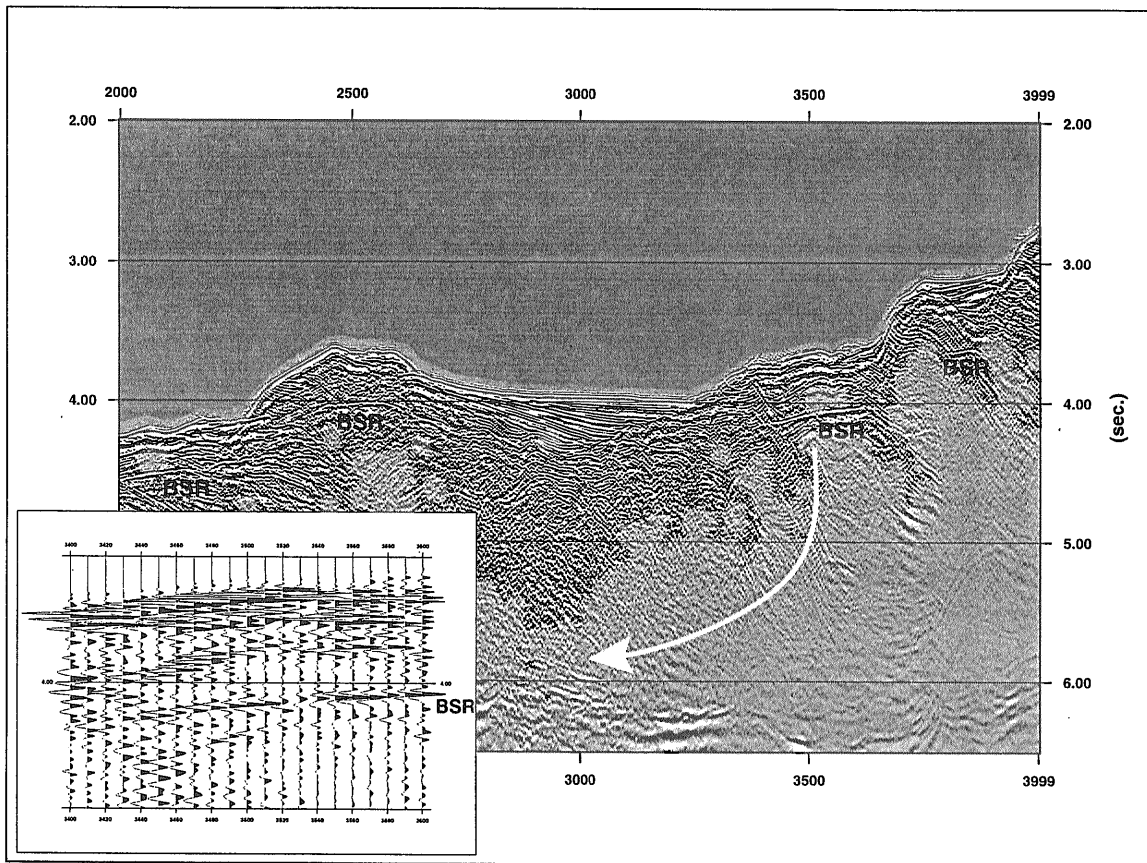
における掘削(Ewing & Hollister, 1972)と、室内実験(Stoll et al., 1971)の結果から「反射面Y」の成因としてガスハイドレートの存在がクローズアップされた。この時点で注意しなければならないことは、音響インピーダンスの変化の原因はハイドレート化することによって堆積物のP波速度が著しく大きくなるのが原因であるとされてきた点である。

その後ハイドレート層自身の物性変化というよりも、ハイドレート層が形成されることによってそれが不透水層の役割をして、それより下方から移動してくるフリーガスをトラップしているために大きな速度コントラストを生じ、音響インピーダンスの急変をもたらしていると考えられるようになった(White, 1979)。これは堆積物の間隙中にフリーガスが数%含まれると、その堆積物のP波速度は急激に低下することが室内実験で確かめられたことによる(Domenico, 1976)。つまりメタンハイドレート安定領域下部の地層の間隙に、気体としてのガスが数%含まれることにより大きな負のP波速度コントラストを生じ、振幅の大きな且つ波の位相が反転した反射波を生み出すのである。このことはメタンハイドレートに起因したBSRが以前はハイドレート層上面を示しているか或いは下面を示しているかとの議論に対して、水深が深くなるに従って海底からのBSRの深度も深くなる(Tucholke et al., 1977)ことと併せて、BSRはハイドレート層下面を示しているとする根拠になっている。従ってメタンハイドレートBSRは海底面にほぼ並行で、比較的振幅が大きく、位相が反転している反射面として特徴付けられる。第2図に南海トラフ付加体におけるBSRの一例を示す。

4. BSRが意味するもの

(1) メタンハイドレートの胚胎状況

ではメタンハイドレートに起因するBSRはどのような情報を含んでおり、それはどんな科学的意味があるのだろうか。海底直下の堆積物中にメタンハイドレートが形成されると一般的にP波速度は上がり、密度は下がる。その変化の程度(相対的に)にもよるが、掘削コアの物性値を使って計算した合成地震波記録によると、ハイドレート層の形成だけでは明瞭なBSRを認識できないとされた(Miller et al., 1991)。しかしHyndman and Spence(1992)はバン



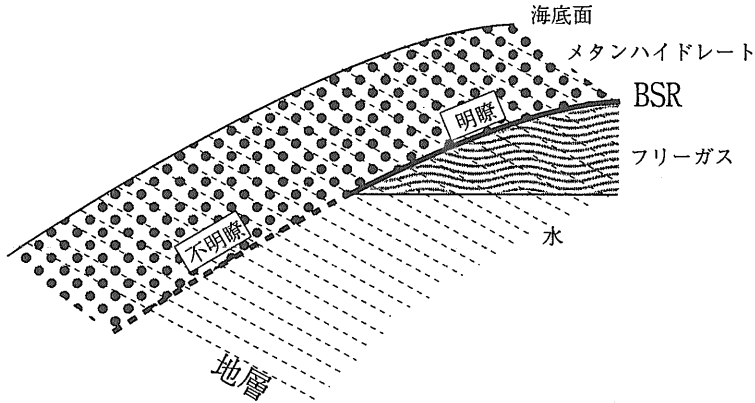
第2図 南海トラフ付加体に形成しているメタンハイドレートBSRの一例。海底面にほぼ並行で且つ振幅の大きな反射面として認識できる(図中にBSRと表示してあるところ)。図の左下にBSRの一部を拡大した。位相の反転は区別しにくいですが、振幅の大きな反射面であることが分かる。

クーバー島沖のカスカディア (Cascadia) 付加体で AVO (Amplitude Versus Offset) 解析, および詳しいマルチチャンネル音波探査データの解析を行い, BSR直下にフリーガスを伴わなくても間隙率の約30%がハイドレート化した堆積層が10-15mの層厚で存在すればBSRを形成できるとした。しかしながらこのアイデアは後の掘削結果 (ODP Leg 146, 例えばMacKay et al., 1994) によってフリーガスの存在が明らかにされ否定された。従ってハイドレート層下の地層中にフリーガスが数%含まれるとP波速度は急激に減少することが室内実験から明らかになっていることから (Domenico, 1976), ハイドレート層の下にフリーガスが存在することが音響インピーダンスのコントラストを生じさせる主な原因として必要不可欠と考えられる。ハイドレート層の下にフリーガスが存在することがBSRをBSRとして認知させる必要条

件と考えられる (第3図)。

ハイドレート層の直下におけるフリーガス層の存在については, 他の地域でも報告されている。Miller et al. (1991) はペルー沖での合成地震波記録と実際の音波探査記録との比較によって5.5-17m程度の厚さのフリーガス層が存在すると見積もった。またブレークアウトリッジでもBSR直下にフリーガス層が存在するとされ, その層のP波速度が変化することによってBSRの振幅が変化していると類推されている (Dillon et al., 1993)。この他にマクラン (Makran) 付加体 (Minshull and White, 1989) やベーリング海海盆 (Scholl and Hart, 1993), チリ三重会合点 (Brown et al., 1996) でもBSRの直下にフリーガス層の存在が指摘されている。

BSRを形成するにはフリーガス層の存在が必要であるが, BSRの振幅の変化はどのように説明され



第3図

メタンハイドレート層の下にフリーガスがある場合と無い場合ではBSRの見え方に違いが出る。この原因はフリーガス層では極端にP波速度が減少することと、メタンハイドレート層内でのハイドレートの胚胎の仕方によって変化すると考えられる(倉本, 1996)。

るのであろうか。この振幅の大小によって音波探査記録上での見え方が違ってくるわけで、Dillon et al. (1993)はBSRの下の地層(フリーガス層)のP波速度の変化とした。しかしDomenico (1976)の室内実験によると、フリーガスが数%含まれただけで急激にP波速度は小さくなるが、それ以上フリーガスの含有量が増えても急激には変化しない。ガス量とP波速度の間には直線的関係はないのである。従ってメタンハイドレート層の下にフリーガスが間隙率の数%存在することがBSRとして認識するためには必要な現象であるが、それ以上に積極的にフリーガスを集積するメカニズムは必要ない。むしろフリーガスを拡散させないために、メタンハイドレート層の低浸透率がガス供給量に対して充分シールとして機能するメカニズムが必要であると考えられる。一般的音波探査の垂直分解能は10m前後であるので、音波探査記録上にBSRとして認識されるためにはそれ以上の厚さを持つメタンハイドレート胚胎層およびフリーガス層が存在し、メタンハイドレート胚胎層がフリーガスをシールする構造であることが最低限必要な条件であろう。

Miller et al. (1991)はBSRの振幅が側方に変化することを明らかにした。このようなことはBSR直下の物性(密度と速度)が大きく変化しないとすれば、説明することは可能であろうか。BSRの振幅の大きさの違いは、メタンハイドレート層自体の物性の変化によると仮定し、下位のフリーガス層のP波速度と密度を固定して考察すると、上位のハイドレート層のP波速度が大きいほど、密度が大きいほど観測されるBSRの振幅は負に大きくなるのが簡単に想像される(倉本, 1996)。さらにハイドレートが堆積物の間隙

に形成し始めてから塊状のハイドレートができるまでを定性的に考察すると堆積物の間隙がすべてハイドレート化してしまった時が最も反射係数が負に大きくなり、BSRの振幅が大きく観測される(倉本 1996)。また塊状にハイドレートが成長したとすると、ハイドレートが堆積物の間隙を埋めるように形成した場合に比べて反射係数は小さくなり、BSRの振幅も小さくなる(倉本, 1996)。堆積物の間隙を埋めるハイドレートの割合とP波速度と密度の関係は実験的データが乏しく、現在定量的な議論ができない。Lee et al. (1993)はプレークアウトリッジでのマルチチャンネル音波探査記録の速度解析と振幅解析から堆積物の間隙の約8%がハイドレート化していると類推しているが、速度解析と振幅解析の誤差については議論していないので、約8%という値がどれだけ意味あるものかは不明である。しかしながら詳細な速度構造の決定と振幅解析、おそらく周波数情報も併せて解析していくことによって、堆積物中のハイドレートの胚胎の仕方について新しい情報が得られるであろう。また室内実験等によって堆積物中のハイドレートの物性が明らかにされていくことが今後のメタンハイドレート研究に必要であろう。

(2) 地温勾配

BSRの研究は副産物としてこの他にも様々な地球科学的情報を与えてくれる。これまでの深海掘削の結果からBSRの深度はメタンハイドレートの安定領域の下限によく一致することが知られている。室内合成実験の成果によりメタンハイドレートの安定条件が詳しく決定されているので、BSRの地層中での深度を音波探査記録から読み取ることによって、BSR

の存在するところの温度を推定することが可能である (Yamano et al., 1982; Hyndman et al., 1992; Ashi and Taira, 1993; Zwart et al., 1996). この方法は音波探査記録上でBSR記録のあるところではどこでも応用することが可能であるため、温度構造推定には有効な方法である。誤差としてはBSRの深度読み取り誤差であるが、これは地層中のP波速度をいかに正確に見積もるかによっている。従って大規模なマルチチャンネルデータ或いは屈折法により求めた速度や掘削コアなどから求めた速度構造を利用することが必要である。

(3) 地質災害

またBSRを境に大きく物性が異なっていることは力学的振る舞いも異なることを意味している。大陸斜面域などの重力的に不安定なところに形成されているメタンハイドレート層は海底地すべりのすべり面になる可能性があり、その成因としてガスハイドレートが注目されている (例えば Dillon et al., 1993). 最近では海上に巨大な人口建造物を作る計画を耳にすることがあるが、そういった物の海底下に不安定なメタンハイドレート層などがある場合、もしそのハイドレート層がガスとして海上に放出されるようなことがあると大きな災害になることは容易に想像できる。そういった防災の観点からの研究も今後必要であろう。またメタンが充分供給され、且つ温度-圧力条件を満たすところでは常にメタンハイドレートが形成されているはずであることから、逆に温度-圧力条件が変わるような現象、例えば海水準変動 (Paull et al., 1991)、地殻変動 (断層、褶曲運動、岩塩ドームの貫入など)、堆積-浸食作用などがメタンハイドレート層が胚胎した層或いはBSRが存在した層に地質学的記録として残っている可能性があり、それらを明らかにしていくことも地質学的には重要な課題である。

5. まとめ

音波探査は海上物理探査手法のなかでは比較的短時間に広域の探査が可能である。メタンハイドレート探査という観点からは、BSRがメタンハイドレートおよびフリーガス層の存在指標として非常に役に立つことが分かってきた。しかもその存在指標だけ

でなく、胚胎する割合までも音波探査データから導き出す研究が現在進んでいる。また資源的観点だけではなく地殻熱流量の推定、グローバルな環境問題、地質災害や海水準変動、地殻変動などにも研究が進められている。そのような問題にもBSRのもたらす情報は大きく貢献すると思われ、今後更に定量的な議論がなされると思われる。このような議論を行うにあたって音波探査記録の品質管理が重要になってくるが、高分解能で高品質のデータを取得し、定量的な議論をいかに進めていくかが今後の課題であり、我々人類にとって達成すべき課題である。

参考文献

- Ashi, J. and Taira, A. (1993): Thermal structure of the Nankai accretionary prism as inferred from the distribution of gas hydrate BSRs, In Underwood, M.B., ed., Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan: An example of ridge-trench interaction, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 273, 137-149.
- Brown, K.M., Bangs, N.L., Froelich, P.N. and Kvenvolden, K.A. (1996): The nature, distribution, and origin of gas hydrate in the Chile Triple Junction region. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 139, 471-483.
- Dillon, W.P., Lee, M.W., Fehlhaber, K. and Coleman, D.F. (1993): Gas hydrates on the Atlantic continental margin of the United States - controls on concentration. *U.S.G.S. Professional Pap.*, 1570, 313-330.
- Domenico, S.N. (1976): Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir. *Geophys.*, 41, 882-894.
- Ewing, J.I. and Hollister, C.H. (1972): Regional aspects of deep sea drilling in the western north Atlantic. In *Init. Repts. DSDP*, 11, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C.
- Hyndman, R.D., Foucher, J.P., Yamano, M., Fisher, A. and Scientific Team of Ocean Drilling Program Leg 131 (1992): Deep sea bottom-simulating-reflectors: calibration of the base of the hydrate stability field as used for heat flow estimates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 109, 289-301.
- Hyndman, R.D., and Spence, G.D. (1992): A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors. *Jour. Geophys. Res.*, 97, 6683-6698.
- 倉本真一 (1996): メタンハイドレート探査とBSRの持つ意味. *地質学雑誌*, 102, 951-958.
- Lee, M.W., Hutchinson, D.R., Dillon, W.P., Miller, J.J., Agena, W.F. and Swift, B.A. (1993): Use of seismic data in estimating the amount of in-situ gas hydrates in deep marine sediment. *U.S.G.S. Professional Pap.*, 1570, 563-581.
- MacKay, M.E., Jarrard, R.D., Westbrook, G.K., Hyndman, R.D. and Shipboard Scientific Party of Ocean Drilling Program Leg 146 (1994): Origin of bottom-simulating reflectors: geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism. *Geology*, 22, 459-462.
- Markl, R.G., Bryan, G.M. and Ewing, J.I. (1970): Structure of the Blake-Bahama Outer Ridge. *Jour. Geophys. Res.*, 75, 4539-4555.

- Miller, J.J., Lee, M.W. and von Huene, R. (1991) : An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru. *Am. Assoc. Petro. Geol. Bull.*, 75, 910-924.
- Minshull, T. and White, R. (1989) : Sediment compaction and fluid miration in the Makran Accretionary prism. *Jour. Geophys. Res.*, 94, 7387-7402.
- Paull, C.K., Ussler, W.III, Dillon, W. (1991) : Is the extent of glaciation limited by marine gas-hydrates?, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 432-434.
- Scholl, D.W. and Hart, P.E. (1993) : Velocity and amplitude structures on seismic-reflection profiles - Possible massive gas-hydrate deposits and underlying gas accumulations in the Bering Sea Basin. *U.S.G.S. Professional Pap.*, 1570, 331-351.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffer, R.T., Shaub, F.J., Mcmillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L. (1979) : Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slope and rises. *Am. Assoc. Petro. Geol. Bull.*, 63., 2204-2213.
- Stoll, R.D., Ewing, J. and Bryan, G.M. (1971) : Anomalous wave velocities in sediments containing gas hydrates. *Jour. Geophys. Res.*, 76, 2090-2094.
- Tucholke, B.E., Bryan, G.M. and Ewing, J.I. (1977) : Gas-hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the western North Atlantic. *Am. Assoc. Petro. Geol. Bull.*, 61., 698-707.
- White, R.S. (1979) : Gas hydrate layers trapping free gas in the Gulf of Oman. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 42, 114-120.
- Yamano, M., Uyeda, S., Aoki, Y. and Shipley, T.H. (1982) : Estimates of heat flow derived from gas hydrates, *Geology*, 10, 339-343.
- Zwart, G., Moore, J.C. and Cochran, G.R. (1996) : Variations in temperature gradients identify active faults in the Oregon accretionary prism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 139, 485-495.
-
- KURAMOTO Shin'ichi (1997) : Pseudo-sea floor, BSR.
 <受付: 1996年12月11日>

メタンガスの発生源

地球温暖化ガスとして近年注目を浴びるようになったメタンガスはどこから発生しているのでしょうか？メタンガスは二酸化炭素ガスに比べて分子あたりで20倍以上の温室効果があり、また年々の増加率が二酸化炭素に比べて有為に大きくなっています。そのため量的には二酸化炭素に比べて少ないものの、メタンガスは地球温暖化の大変重要な要因として考えられています。これまでに分かっているメタンガスの大まかな発生源として発生量の多い順から

挙げると、湿地（永久凍土，沼地，低湿地など； 115×10^6 トン），水田（ 110×10^6 トン），動物の腸内発酵（ 80×10^6 トン），天然ガスの漏出（ 45×10^6 トン）などが代表的な項目として挙げられます。驚くべきことに反芻動物の腸内発酵によるメタンガスの発生は天然ガスの漏出の2倍近くにもなります。牛がげっぷする度に地球は暖まる?? (図中の数字は年間の発生量(百万トン単位)を表す)

(倉本真一)

