

Hitoshi Koide (2003) Carbon recycling by subsurface microbial methanogenesis, IGA

Letters, No.4, p.26-34 [小出 仁 (2003)地中メタン生成古細菌によるカーボン・リサイクルの提案、地圏長期評価研究協会会報、第4号,p26-34]

地中メタン生成古細菌による

カーボン・リサイクルの提案

Carbon recycling by subsurface microbial methanogenesis

早稲田大学 / (財) 地球環境産業技術研究機構 小出 仁

Waseda University / Research Institute of Innovative Technology for the Earth

Hitoshi Koide

ABSTRACT:

There is an enormous amount of methane in subsurface formations in the world. Most of the natural gas resources, however, is hardly economically recoverable as the methane is adsorbed in coal seams, trapped in hydrate clathrate or dissolved in saline groundwater. Shallow accumulation of methane is even a hidden threat of explosive global warming. Enhanced gas recovery by subsurface CO₂ injection (CO₂-EGR) is a practicable solution for the greenhouse gas control with efficient use of potential energy resources.

Extremely light isotopic compositions of carbon in methane suggest that methanogens formed many subsurface accumulations of methane-rich natural gas in the world. Chemolithotrophic methanogens, that belong to Archaea, form methane from CO₂ and gain energy without sunlight in anoxic circumstances. Methanogens are often blamed for greenhouse gas emission as they produce methane in bowels of cows and termites and in rice paddy. However, reapplication of CO₂-EGR for subsurface biogenic methane that is converted from disposed CO₂ makes the carbon recycling possible.

Subsurface ecosystem is somewhat similar to archaic ecosystem that is

adapted to anoxic CO₂-rich atmosphere under high pressure and temperature. Bionic methanogenesis is active even in deep basaltic aquifers. Subsurface biogeochemical carbon recycling may realize greenhouse gas control with restoration of energy resources.

1. はじめに

将来、20世紀は「石油バブルの世紀」として記憶されることになるであろう。20世紀初頭に石油を燃料として実現した航空機や自動車の発達による交通革命が世界を小さくし、さらに石油化学の発達など産業技術の爆発的発展を石油が支えた。しかし、その一方で便利な石油資源の浪費と環境問題という負の遺産を残したことの方が後世の人類への影響が大きい。20世紀に続く21世紀は、石油資源の枯渇と地球環境問題により「バブル崩壊の世紀」になる恐れがある。破局を避けるために、省エネルギーや代替エネルギー開発など数多くの努力が進められている。しかし、石油は日本のエネルギー消費の55%、世界の39%を占めている中心のエネルギー源(1996年)¹⁾であるだけに、抜本的な改善は難しい。

様々な廃棄物問題が深刻になっていることから、リサイクルによってゴミの量を減らす努力がいろいろな分野でなされている。化石燃料の燃焼によって排出されるCO₂もリサイクルすることが出来れば、温室効果ガス排出削減の決め手になると期待される。しかし、炭化水素からなる化石燃料をカーボン・リサイクルすれば、化石燃料の内蔵するエネルギーのうち炭素の担っている分のエネルギーは理論的には利用出来ないことになる。ほとんど炭素からなる石炭の場合は、リサイクルすればエネルギー源としては利用していないことになる。したがって、カーボン・リサイクルを実現するには、化石燃料以外のエネルギー源を利用する必要がある。例えば、太陽電池や水力発電により得た電気で水を電解して水素を製造し、水素によってCO₂もを化学的に還元して、メタンやメタノールを再生産する²⁾。あるいは、微細藻類等による光合成で有機物や水素を生産する生物的固定・有効利用する方法が研究されている³⁾。これらのカーボン・リサイクルの多くは、根本的には太陽エネルギーを利用しているため、広い面積の地表あるいは水面を必要とし、他の土地利用や水面利用と競合しやすい。

そこで太陽光を必要としない、地中嫌気性化学合成独立栄養微生物生態系を活用した、地表面や水面を用いない新しい生物的カーボン・リサイクルの方法を提案する。

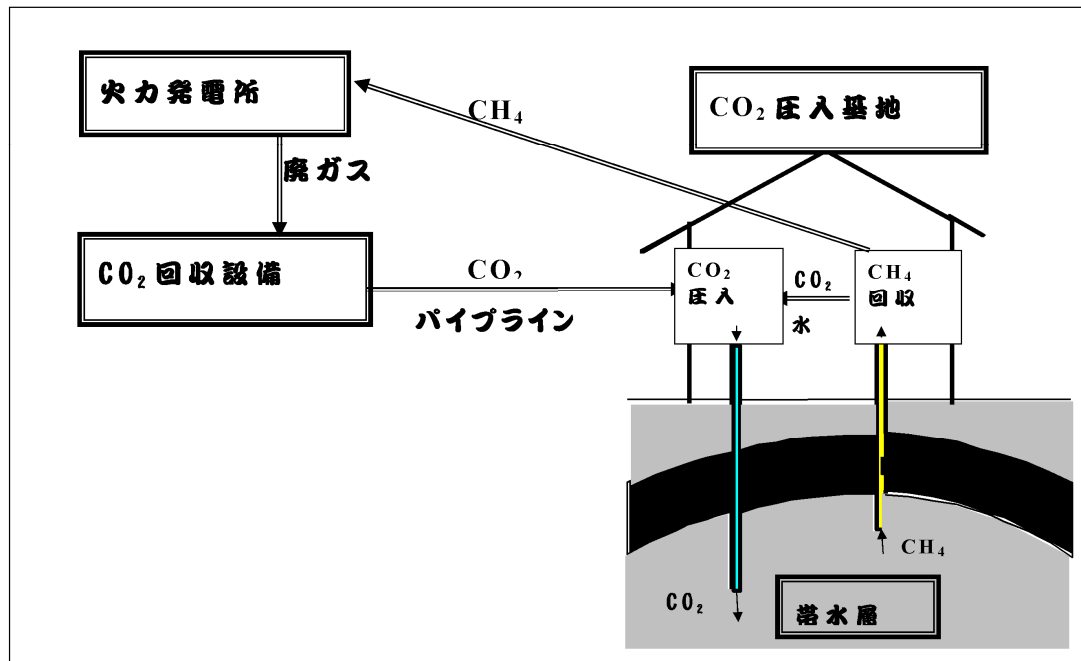


図1.火力発電所などの廃ガスからCO₂を回収し、地下の帯水層（微細な空隙が多く、多量の地下水を含む岩層）中に圧入し、代わりに地下のメタン資源を回収する。

2. CO₂地中圧入と未利用天然ガス回収

1996年からノルウェーでCO₂地中貯留の実操業が開始された⁴⁾。また、米国などの産油国では原油増進回収のためにCO₂を地中に大規模に圧入している。CO₂地中貯留は既に実用技術になっていると言える。しかし、新しい技術であるだけに、地中におけるCO₂の挙動がよく判っていないなど、重要な研究開発課題が多く残されている。安全性を高め、効率を高め、コストを低下させ、さらに貯留だけではないCO₂地中圧入による積極的な利益を高めようとする研究が開始されている。

Koideら⁵⁾は、CO₂を地中圧入して、地盤沈下を防止しつつ水溶性天然ガスを回収する方法を提案した（図1）。また、凍土層・メタンハイドレート層の下の帯水層にCO₂を圧入して、凍土層・メタンハイドレート層の直下の岩層中に溜まっているフリーガスを回収する。凍土層・メタンハイドレート層の下には圧入したCO₂が溜まるため、メタンハイドレート中のメタンを一部置換しつつ、メタンハイドレートの下にCO₂ハイドレート層を形成する。CO₂ハイドレート層は、地下300m程度より深部では

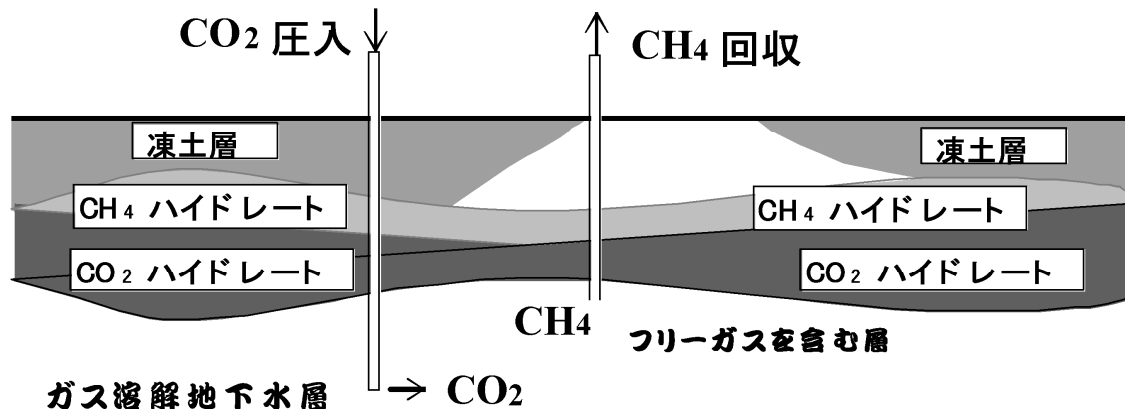


図 2. 凍土層・メタンハイドレート層下への CO₂ 圧入によるメタン回収とハイドレート層安定化

水やメタンハイドレートより高温でも安定なため、地球温暖化によっても解けないので、封じ込められたメタンや CO₂ を大気中に放出しない（図 2）。このため凍土層・メタンハイドレート層の CO₂ ハイドレート化補強によって、懸念されている地球温暖化の爆発的進行を防ぐことができる。

米国のニューメキシコ州 San Juan Basin で世界最初の CO₂ 地中圧入によるコールマインガス増進回収法(CO₂-ECGR、図 3)のパイロットテストが実施され、3 年間で 75-100%生産を増加させることに成功した⁷⁾。1996 年以来 12 万トンの CO₂ を圧入したが、炭層に吸着されて CO₂ 漏出はほとんどなかった。San Juan Basin では、3700 億立方メートルのメタンを CO₂-ECGR により新たに回収でき、千立方フィートあたり 0.5 ドルの CO₂ 供給代を払っても利益が上がるとしている。

日本の炭層は、構造が複雑であるが、コールマインガス（メタン）の量は比較的に多いことが知られている。経済的に採掘の対象にならない深部の炭層や採掘跡の旧鉱でも、コールマインガスを採取できる可能性は大きい。コールマインガス増進回収技術（CO₂-ECGR）は、地球温暖化防止と未利用の非在来型天然ガス資源の開発が出来る一石二鳥の技術である。

3. 地中メタン生成細菌によるメタン再生

水溶性天然ガス、コールマインガス、メタンハイドレート等の膨大な量のメタン

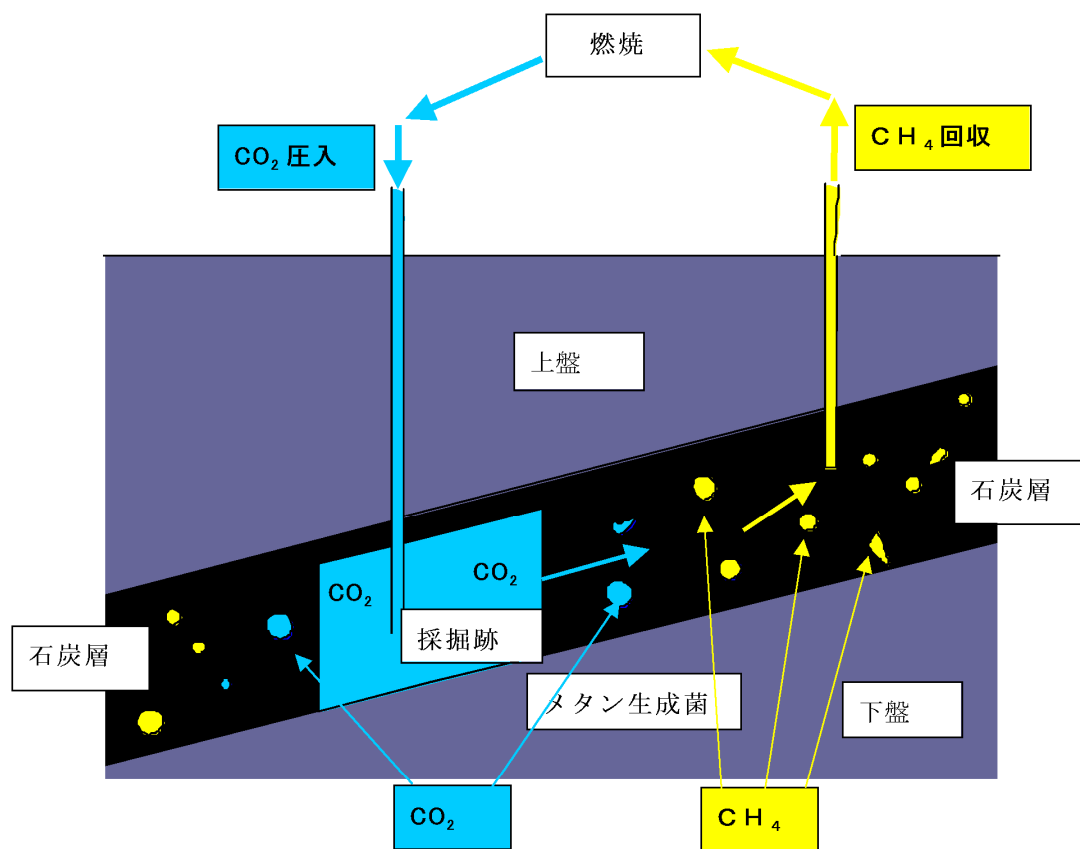


図3. CO₂ 圧入によるコールマインガス捕獲回収

資源が世界的に存在する。これらの地下の比較的浅所に存在するメタンを主成分とする天然ガスの多くが、メタン生成細菌によって生成されたことが、炭素同位体比の研究などから明らかにされている⁸⁾。最近、1000m以上の地下深部の玄武岩層からメタン生成細菌の活動が報告されている⁹⁾。メタン生成細菌は古細菌の一種で、酸素があると活動できない偏性嫌気性微生物で、CO₂と水素からメタンを合成することによりエネルギーを得る。太陽光なしで、CO₂を有機物に固定化する化学合成独立栄養微生物である。深部の玄武岩層中では、熱水と玄武岩の反応で生成された水素とやはり地下深部に由来するCO₂という無機起源の材料から、メタン生成細菌はメタンを合成してエネルギーを得て、生きていると考えられる。すなわち、地熱をエネルギー源としてCO₂からメタンを生成する(表1)。

玄武岩層は海洋底下に広範に広がっているので、メタン生成細菌の活動の場は膨

表 1. CO₂ 固定をする生物

(1) 光をエネルギー源とし、CO₂を炭素源として利用する生物

: 光合成独立栄養生物 (Photosynthetic autotroph)

好気性真核生物

- ・ 植物 (plants)
- ・ (藍藻類・原核緑藻類以外の) 藻類 (algae): 緑藻類、紅藻類等

好気性真正細菌

- ・ シアノバクテリア (藍藻類)

嫌気性真正細菌

- ・ 緑色硫黄細菌、・ 紅色硫黄細菌

(2) 無機化合物の酸化をエネルギー源とし、CO₂を炭素源として利用する生物: 化学合成独立栄養生物 (Chemoautotroph)

好気性真正細菌

- ・ 一酸化炭素酸化菌、・ 硫黄酸化細菌、・ 硝化細菌・水素酸化細菌
- ・ 鉄細菌、・ アンモニア酸化菌、・ マンガン酸化菌

好気性古細菌

- ・ 高度好塩古細菌、・ 好熱好酸硫黄酸化古細菌

嫌気性真正細菌

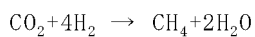
(枠内は地下で CO₂ 固定可能)

- ・ 酢酸生成菌

嫌気性古細菌

- ・ (硫黄依存) 超好熱性古細菌

(3) CO₂呼吸をエネルギー源及び炭素源とする生物



- ・ メタン生成古細菌 methanogen
- ・ 硫酸還元好熱性古細菌 *Archaeoglobus*

大に存在する。生命が誕生して間もない頃の、高温高压で CO_2 に富み酸素に乏しい原始地球大気下にメタン生成古細菌は適応していたと考えられる。地下深部の塩水帯水層に CO_2 を圧入すると、原始地球の海洋に近い条件が成立し、メタン生成細菌が活動しやすい環境になり、 CO_2 からメタンが再生され、カーボン・リサイクルが実現する可能性がある。

堆積岩中には、砂や泥と共に多量の有機物が一緒に堆積している。したがって、堆積岩の帯水層中では有機物の嫌気性微生物による発酵によっても水素と CO_2 が供給される。水田土壤中でメタン生成細菌が活動して、大気中にメタンを放出することが、地球温暖化の要因の一つとされている。半地下式のメタン発酵槽は、メタン生成細菌

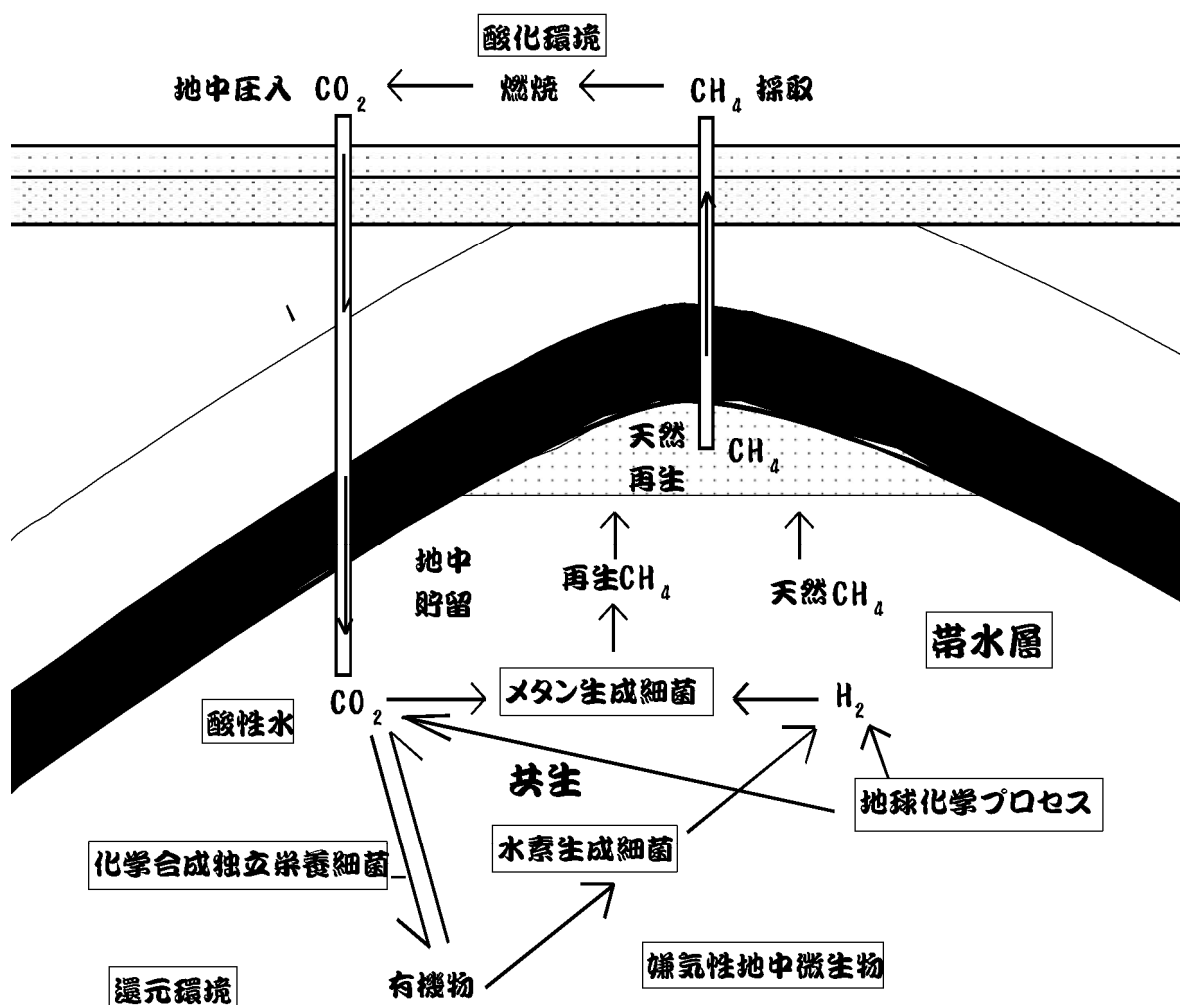


図4. 帯水層中のメタン生成細菌によるカーボン・リサイクル

と有機物を分解する嫌気性微生物の共生により有機廃棄物から効率的にメタンを発生、利用できる仕組みとして用いられている。堆積盆地の地下深部では、天然に有機物のメタン発酵が起こり、水溶性天然ガスや炭層ガスやメタンハイドレートのメタンを生成したと考えられる。

メタン生成細菌によって形成された天然ガスを回収した後の帯水層に CO_2 を貯留しておく、残存するメタン生成細菌の活動により、 CO_2 がメタンに変換されうる。トラップ構造を伴う帯水層であれば、再生されたメタンは帯水層中に集積され、大気中に逃げない。このメタンを回収すれば、カーボン・リサイクルが実現する(図4)。

地下深部の酸素に欠乏し、太陽光の入らない環境下で CO_2 を有機物に固定する嫌気性の化学栄養独立合成微生物は多数の種類が存在する。日本の油田から、 CO_2 から石油成分になる炭化水素を合成する嫌気性細菌が採取されたことは特に注目される^{10,11)}。 CO_2 を地中に圧入して、石油を再生することも夢ではないかもしれない。最近では、メタン生成細菌と、それに水素を供給する通性嫌気性細菌の共生により真核生物が生じたとする説が有力になっている¹²⁾。地中微生物は嫌気性好熱性の古細菌および真性細菌であり、原始生命に近く、生化学的に極めて多様である^{13,14)}。未知の機能を持った微生物がなお地中に潜んでいる可能性は大きい。地下深部の石炭、低品位の炭質物、採取困難な深部の重質油、タールサンドやオイルシェールなども CO_2 と地中微生物の利用により回収可能になるかもしれない。 CO_2 の固定に生命創成期の原始環境を利用できる可能性は大きく、今後の研究進展が期待される。

地中微生物により天然ガス鉱床が再生されれば、真のカーボン・リサイクルや栽培鉱業が実現し、資源問題と地球温暖化問題を一挙に解決できる可能性がある。しかし、地中の微生物探査は、多くの労力と費用を要するフロンティア探検に匹敵する事業であろう。地中微生物によるカーボン・リサイクルは、植林事業に匹敵する長期的視野による取り組みが必要と思われる。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁；21世紀、地球環境時代のエネルギー戦略,(1998),178,通商産業調査会.
- 2) 斉藤昌弘； CO_2 の化学的有効利用,環境管理,34-8(1998),760-765.

- 3) 浅田泰男 ; CO₂ の生物的固定・有効利用,環境管理,**34**-8(1998),760-765.
- 4) R. Korbøl and A. Kaddour; Sleipner Vest CO₂ disposal- Injection of removed CO₂ into the Utsira formation, Energy Convers. Mgmt, **36**-6/9, (1995), 509-512.
- 5) H. Koide et al; Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and depleted natural gas reservoirs, Energy Convers. Mgmt, **33**-5/8 (1992), 619-626.
- 6) H. Koide et al; Hydrate formation in sediments in the sub-seabed disposal of CO₂, Energy-The Intern. J., **22**-2/3 (1997),279-283.
- 7) S.H.Stevens et al.; CO₂ Sequestration in Deep Coal Seams: Pilot Results and Worldwide Potential, Greenhouse Gas Control Technologies,Elsevier, (1999),175-180.
- 8) D.D.Rice; Biogenic gas: Controls, habitats, and resource potential, USGS Prof. Paper **1570** (1993), 583-606.
- 9) T.O. Stevens and J.P. McKinley ; Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers, Science, **270**(1995), 450-454.
- 10) 今中忠行・森川正章;石油を作る細菌、燃料及び燃焼、**62**-5(1995)、323-330.
- 11) 森川正章・金 沙・金谷茂則、今中忠行;炭酸ガスからの石油生成、日本農芸化学会誌、**72**-4(1998)、p.532-534.
- 12) W.Martin and M.Müller; The hydrogen hypothesis for the first eukaryote, Nature,**392**(1998),37-41.
- 13) 上木勝司、永井史郎 ; 嫌気微生物学、養賢堂(1993),323.
- 14) 古賀洋介、亀倉正博 ; 古細菌の生物学、東大出版会(1998),301.