

## エネルギーと資源減耗による人類生存への影響 Impacts of Energy and Resource Depletion on Human Life

安藤 満

ANDO Mitsuru

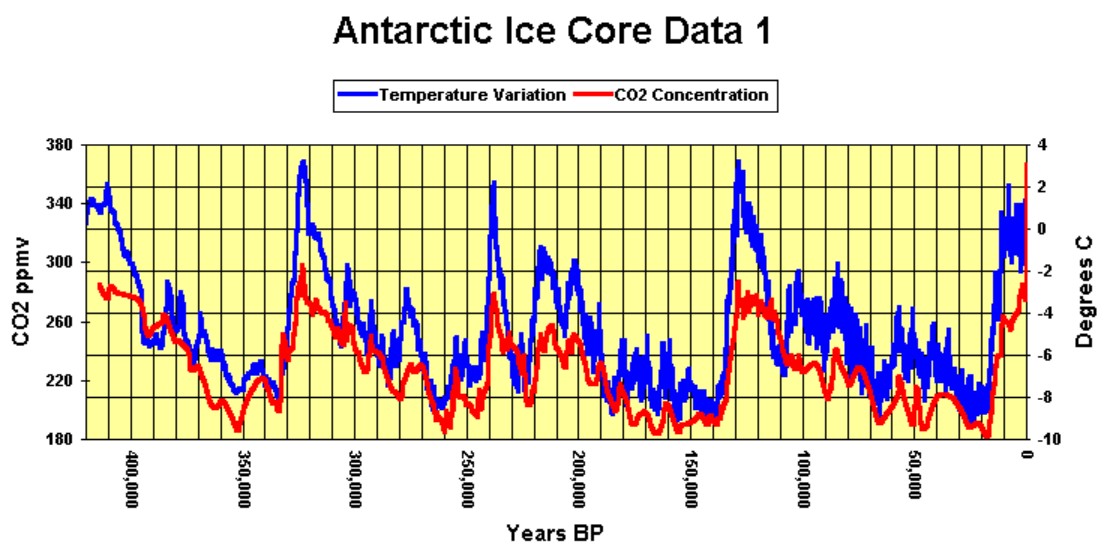
### はじめに

#### 温暖化の原因と温室効果ガス

太陽系において惑星の地表温度は、主に太陽放射による太陽定数と大気層に含まれる温室効果ガス濃度により決定される。90 気圧 ( $5.3 \times 10^{23} \text{g}$ ) の大気の 96% を占める二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の厚い雲に覆われている金星の地表は、地球の 1.91 倍の強い太陽放射と相俟って温室効果により絶対温度  $735^\circ \text{K}$  ( $462^\circ \text{C}$ ) という灼熱下にある。一方 0.006 気圧 ( $2.4 \times 10^{19} \text{g}$ )、地球大気の 1/220 という希薄な大気の火星においては、大気の 95% を占めるとされる二酸化炭素の放射強制力は小さく、地球の 0.43 倍の弱い太陽放射と相俟って全球凍結した世界となっている。

地球においては、太陽活動・地球軌道のミランコビッチサイクルに規定される太陽放射と、対流圏・成層圏に常在する水蒸気、二酸化炭素、メタン、オゾン等の温室効果ガスの放射強制力によって、地表温度が決定されている。地表温度は標準大気で平均約  $15^\circ \text{C}$  に保たれており、温室効果ガスの無い太陽放射のみの場合の予想平均気温  $-18^\circ \text{C}$  に比べ約  $33^\circ \text{C}$  高い。言い換えると  $+33^\circ \text{C}$  の温暖化が起こり、地表気温を生命の適応できる温度域に保っている。温室効果ガス濃度は地表気温を決める上で太陽放射と共に重要で、図 1 の南極氷床中のガス分析の結果が示すように、第四紀の氷河期一問氷期の気温を決定してきた。

図 1 南極ポストーク基地で採取された氷床中の氷のガス分析に基づく地表気温（上部曲線）と二酸化炭素濃度（下部曲線）の現在（右端）から過去 42 万年間（左端）の推移



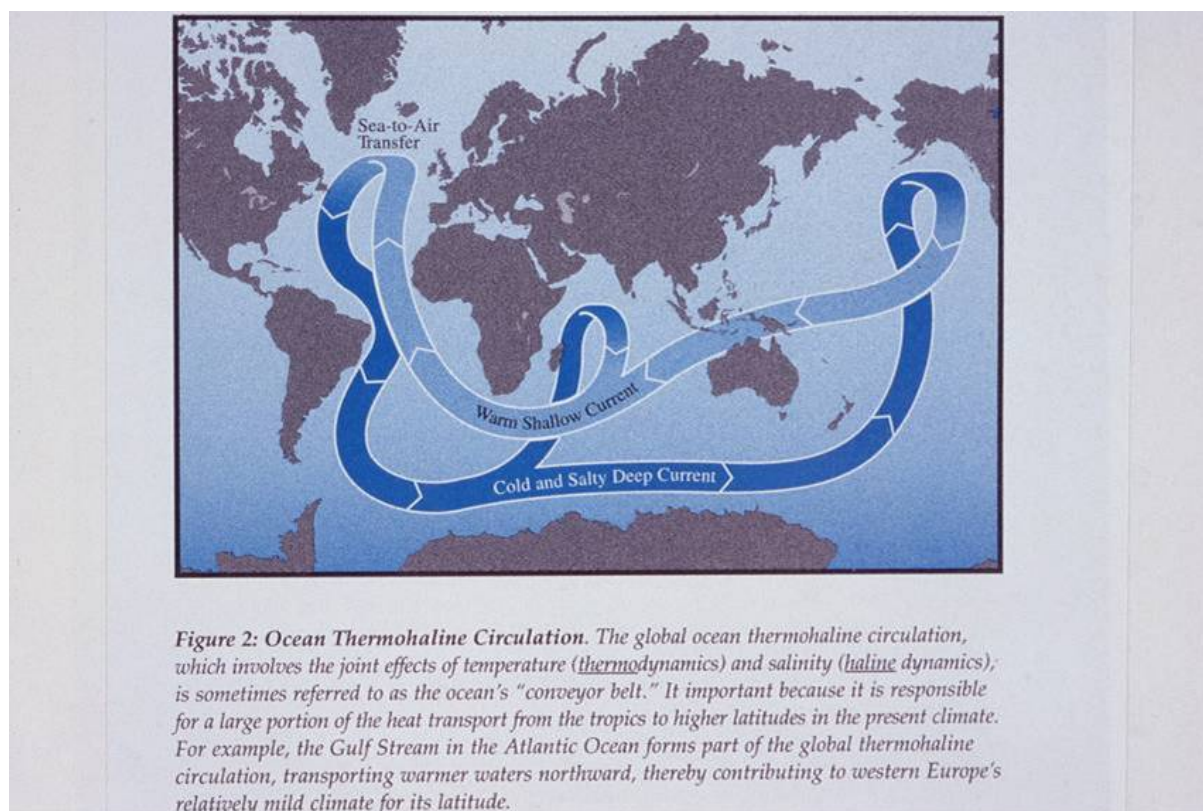
産業革命初期の 1850 年以降、地球表面温度は変動しながらも徐々に増加し、2000 年までに単位面積当たり 2.5 ワット ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) の温暖化ポテンシャルの上昇をもたらしている。このポテンシ

ャル増加の60%は二酸化炭素の上昇に起因すると予想され、今世紀始め体積比280ppmvであったCO<sub>2</sub>濃度は、図1右端の現時点で直線的に上昇し2007年現在383ppmvまで達している。

20世紀後半からの急激な温暖化の進行(100年間で+0.74℃上昇)は、温室効果ガスの人為的増加、中でもCO<sub>2</sub>の増加に由来するのではないかと数多くのモデルに基づく予想は、IPCCとWMOの評価過程の中で強固な支持を得て世界各国にCO<sub>2</sub>の排出抑制を強く求める状況になっている。

図2に示す深層海流の大循環「熱塩コンベアベルト」は、氷河期・間氷期への急激な気候変化をもたらす要因として注目されている。熱塩コンベアベルトの発見者のコロンビア大学のラモン・ドハティー地質観測所のブルッカー(Wallace S. Broecker)は、温暖化によるコンベアベルトへの影響を危惧している。

図2 巨大深層海流 - 熱塩コンベアベルト - 北大西洋で沈み込み、北太平洋で上昇



巨大深層海流 - 熱塩コンベアベルト - は北太平洋で上昇後、太平洋、インド洋を経て大西洋に達する。この間蒸発による海水の塩分濃縮が起これ、グリーンランド沖の北太平洋で冷却され密度勾配により沈み込むとされている。約2,000年の周期を持つ巨大循環であるが、氷河期 - 間氷期のサイクルの形成に大きな役割を果たすと予想されている。

図3に示すように、熱塩コンベアベルトの沈み込み速度は毎秒約2,000万トンであり、非常に巨大な沈み込みである。温暖化により北太平洋や北極海の氷河・海水が溶解し海水の密度が低くなると、熱塩コンベアベルトの沈み込み速度が低下すると予想される。このモデルによると温暖化により沈み込み速度が低下し、CO<sub>2</sub>倍加の時点では約1/3程度にまで低下することを予想してい

る。熱塩コンベアベルトは地球の気候緩和に働く一方、地表気温を深海へ伝達し地表気温の急激な変化を抑制すると考えられている。特に北太平洋域では表層海流がメキシコ湾流と考えられており、熱塩コンベアベルトの沈み込みの低下はヨーロッパにおいて重大な寒冷化を招来すると指摘されている。このため熱塩コンベアベルトの沈み込みの低下が起こらない程度に、温暖化を抑制することを目指す必要がある。

図3 温暖化 (CO<sub>2</sub>増加) による熱塩コンベアベルトの北太平洋での沈み込み低下の予測

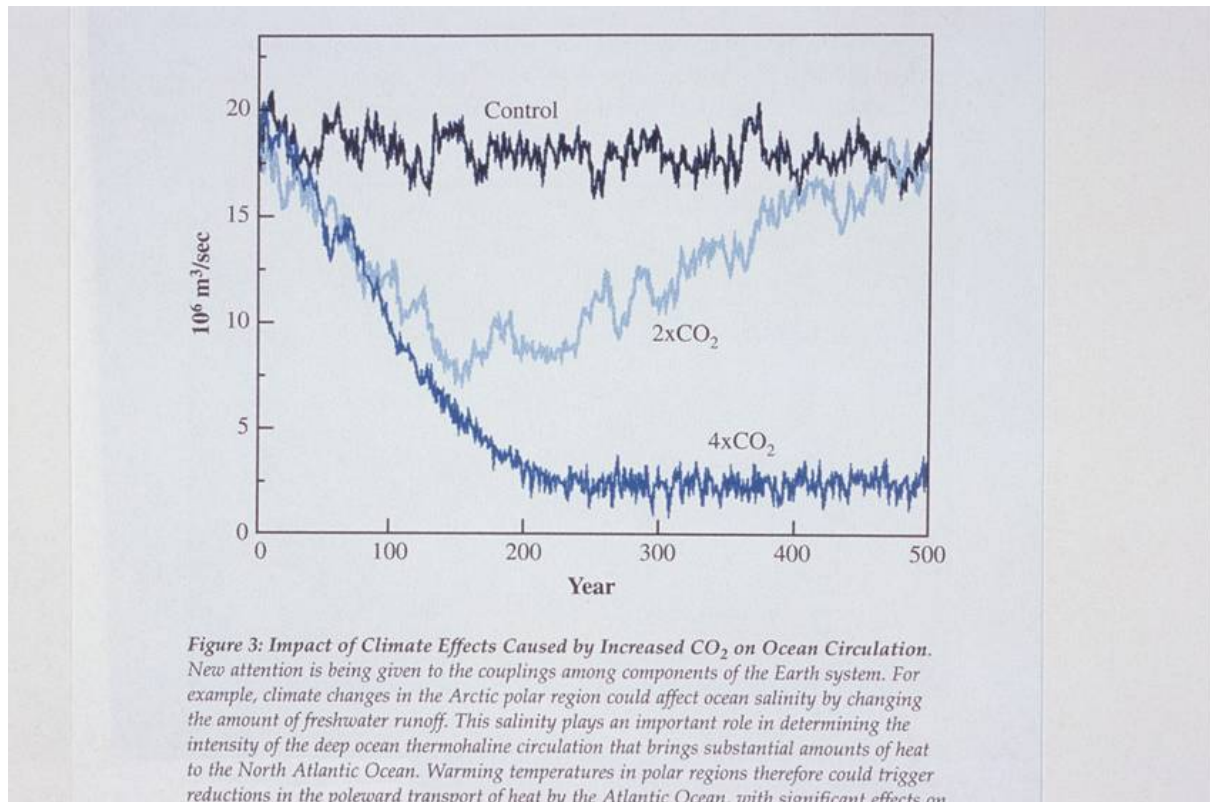


図4に示すように温室効果化ガスの放射強制力を詳細に検討すると、21世紀初頭までの温暖化の約40%は、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、クロロフルオロカーボン(CFCs)など他の温室効果ガスの寄与によると考えられている。

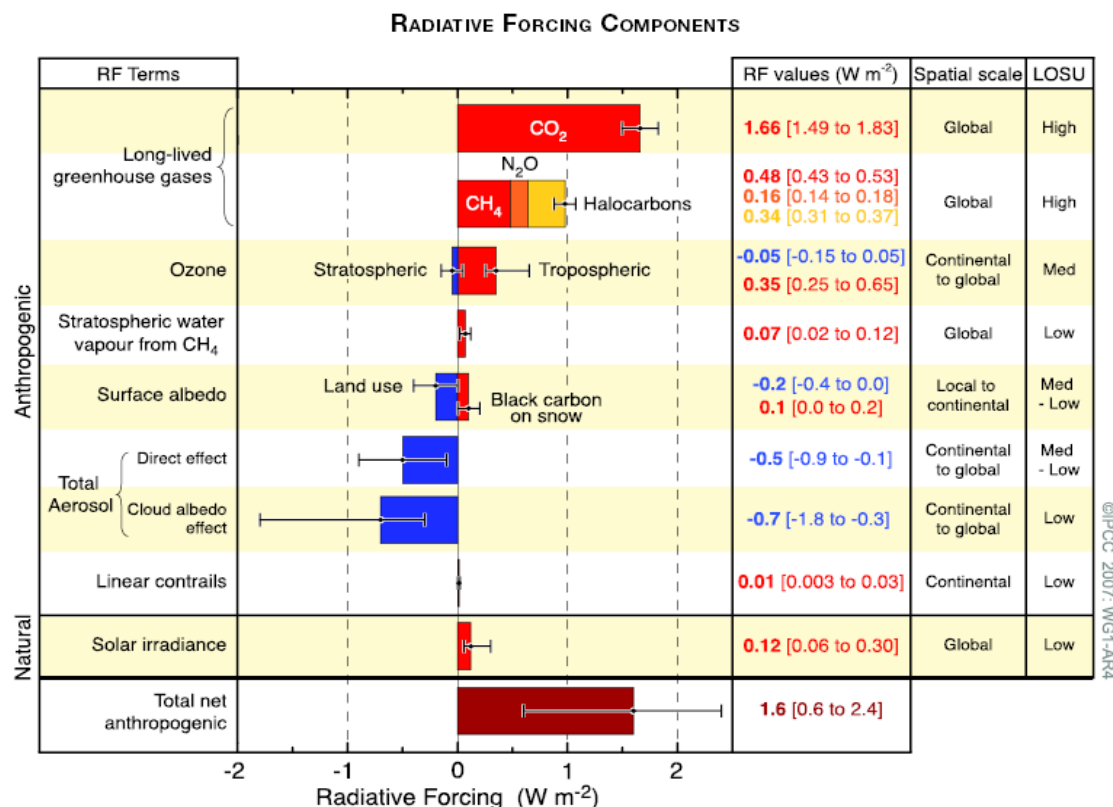
工業化以前700ppbvであったCH<sub>4</sub>は、牧畜の隆盛、水田の増加、有機廃棄物の急増により、2007年現在約2.5倍(1,789ppbv)まで増加している。この増加は温暖化の約25%に寄与していると予想されている。一方CFCsはオゾン層保護の観点から削減が進んでいるものの、CFCsとその代替化合物を含むハロカーボン類(HCs)の寄与も決して小さくはない。

世界人口の急増により、稲作の作付けが増え水田面積が増加しつつある。稲は嫌氣的条件下の水田で、メタン菌により生成するメタンを効率良く大気中へ放出する機構を備えているため、稲作の拡大につれメタン濃度が増加し続けることとなる。

牛はその胃(ルーメン)内に多種の微生物とメタン菌を共生させており、セルロース等の繊維成分を効果的に分解している。肉牛や乳牛の飼育頭数の増加につれ、牛の胃や排泄物から放出さ

れるメタン濃度も増加し続けている。湖沼や湿地からのメタン生成もあるが、幸いにもメタン酸化細菌の作用により顕著なメタン放出は観測されていない。しかしながら食糧生産と直結するメタンについては削減の困難さもあり、世界的に有効な削減策への取り組みが弱い。

図4 太陽放射、各種温室効果ガスの放射強制力、エアロゾルのマイナスの放射強制力



温暖化の寄与が二酸化炭素に次いで大きいと予想されているメタンの発生源について詳細な検討を加えてみる。メタン発生源は、嫌気的条件下で生存するメタン生成菌の活性に依存する。メタン菌は古細菌 (Archea) に属し、太古から地球上でメタン生成に関与してきたと考えられている。偏性嫌気性の微生物であり、酸素存在下では生育できず死滅するため、21%の酸素を含む現大気下では特殊な場所に生息している。

Woese, C.R.ら(1977; 1978; 1990)によるリボソーム小サブユニットのRNAに基づく分類 (原核生物: 16SrRNA、真核生物: 18SrRNA) により全生物界の分子系統樹が確立されてきた。Woeseらは全生物界を「真正細菌(Bacteria)、古細菌(Archae)、真核生物(Eucarya)に分けるべきである」と主張した。1980年代以降新しい生物界に属する古細菌研究が発展し、古細菌に属するメタン菌についての研究も急発展し、現在に到っている。

メタン菌は有機物が絶対嫌気性条件下で存在する環境を好むため、生物体、ツンドラ土壌、湖沼、水田、海洋等非常に広範な環境中に見出される。牛の胃腸中ではなくてはならない微生物であり、牧畜の拡大につれメタン放出が増加してきている。また水田土壌は長く嫌気状況にあるため、メタン菌の活性が高く、世界人口の増加に伴う水田耕作の拡大につれ、メタン濃度の上昇が続いて

いる。天然の湿地帯もメタン発生源として重要である。さらに最近の有機廃棄物汚染の増加は、嫌気条件下ではメタンの発生源として非常に重要である。メタンは温暖化ポテンシャルが二酸化炭素の 21 倍あるため、過去に急激な温暖化を招いたことが知られている重要な温室効果ガスである。地上での発生源の多様性に加え、深海底にはメタンハイドレートとして膨大な量存在している。メタンハイドレートは密度と経済性からエネルギー源としての資源的価値が無いが、急激な温暖化を招く要因として常に考慮していく必要がある。

図5 現在（右端）から過去2万年間（左端）のメタン濃度（ppb）と放射強制力の推移

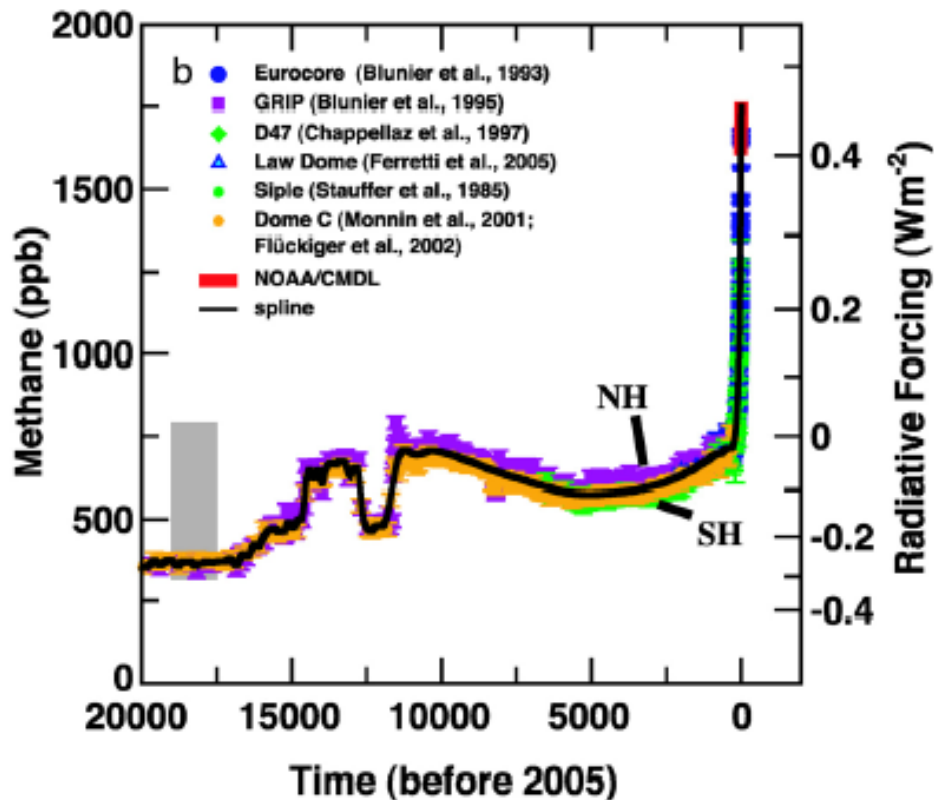


表1に示すように1998年現在、5目10科25属74種に及ぶメタン菌が発見されているが、以下に代表的なメタン菌分類と変化に富む生育温度等について記載する。

表1 メタン菌の分類と最適生育温度

Methanobacteriales 目

Methanobacteriaceae 科

Methanobacterium 属

Methanobacterium thermoautotrophicum 種 最適温度 55-70℃ 好熱性菌

Methanothermaceae 属

Methanothermus fevidus, M. sociabilis 種 最適温度 77-88°C 超好熱菌

Methanococcales 目

Methanococcaceae 科

Methanococcus 属

Methanococcus vanniellii, M. voltaei, M. maripaludis 種 最適温度 37°C 中温菌

Methanothermococcus 属

Methanothermococcus thermolithotrophicus 種 最適温度 65°C 好熱菌

Methanocaldococcaceae 科

Methanocaldococcus 属

Methanocaldococcus jannaschii 種 最適温度 88°C 超好熱菌

Methanoignis 属

Methanoignis igneus 種 最適温度 88°C 超好熱菌

Methanomicrobiales 目

Methanomicrobiaceae 科

Methanogenium 属

Methanogenium frigidum 種 最適温度 15°C 低温菌

Methanosarcinales 目

Methanosaetaceae 科

Methanolobus 属

Methanolobus tindarius 種 最適 NaCl 0.7M 以下 低度好塩菌

Methanohalophilus 属

Methanohalophilus mahii 種 最適 NaCl 0.5-2.5M 中度好塩菌

Methanohalobium 属

Methanohalobium evestigatum 種 最適 NaCl 2M 以上 高度好塩菌

Methanopyrales 目

Methanopyraceae 科

Methanopyrus 属 (2,000m 深海 熱水湧出孔)

Methanopyrus kandleri 種 最適温度 98°C (110°Cで増殖可能) 超好熱菌

---

このように温暖化を促進するリスクを持つ一方、地上のメタンはバイオマス資源としての重要な可能性を兼ね備えている。エネルギー資源が脆弱化する中、有効な利用法を検討していくと重要な資源となりうる可能性を秘めている。そのバイオマス資源としての重要性について検討を進めてみたい。

### メタン発酵によるエネルギー利用の可能性

地球温暖化は炭酸ガスの放出抑制が鍵となっており、先進国については先の京都会議(COP3)において温暖化防止のため炭酸ガスの放出を抑制していくことが合意され、京都議定書を離脱した米国を除く多くの先進国において、2008年から2012年の間の約束期間中の実現が図られている。その一方、世界人口の78%を占める途上国においては、今後さらに急増する人口圧力と経済の発展のため、化石燃料に依存した急速な成長を進めざるを得ない状況にある。このため途上国においては、化石燃料消費に伴う大気汚染と環境汚染が進行しており、地球温暖化防止と途上国環境保全のため、先進国の積極的貢献が求められている。

世界人口の約20%にあたる12億7千万の人口を抱える中国は、生活水準の向上と急速な発展を支えるため、エネルギーの80%を石炭燃焼に依存しながら経済成長を進めている。このため都市の大気汚染も著しいが、成長に取り残された貧しい農村部においては、屋内における石炭燃焼による大気汚染が近年特に著しいものとなっている。地質にフッ素含量の多い地域では、多数の小規模炭坑で産出する石炭中に高濃度のフッ素を含有しており、屋内における石炭燃焼によって高濃度フッ素汚染が進行している。フッ素による大気汚染がもたらすフッ素中毒者数は、学童期の児童を中心に1800万人を超えており、環境保全のための森林保護による木炭から石炭への燃料切り替えにより悪化しつつある地域も存在する。地球温暖化を抑制し屋内汚染を防止していくためには、石炭から豊富に存在する未利用のバイオマスによるエネルギーへ転換する必要がある。国際共同の自然エネルギー利用社会の早期形成の研究が必要とされている。

他方、日本においても化石燃料由来の炭酸ガスの放出は、2007年時点で1990年レベルに対して既に2%超過しており、「2010年に1990年レベルの6%削減」の目標達成のためには、今後バイオマスエネルギーを含む自然エネルギーによる代替エネルギーの研究が必要とされている。また日本を始め世界的に、ゴミ焼却により深刻な大気汚染やダイオキシン汚染が引き起こされているが、焼却ゴミの約50%を占める生ゴミの生分解によるエネルギー利用は、燃焼によるダイオキシン生成を相対的に減少させる側面があり、この観点からも緊急に研究していく必要がある。現状では利用価値の少ない有機廃棄物(生ゴミ、農産廃棄物、産業有機廃棄物)ではあるが、化石燃料を使用する焼却処分や好気性分解ではなく、嫌気性バイオリクターによる生分解過程を利用した処理法を用いることにより、環境汚染を防ぎ副成するメタンによる自然エネルギー利用が可能と考えられる。

### メタン発酵の原理

メタン発酵は大型のシステムの方が管理的に安定しており、一般的には大型の装置を用いた発酵が行われている。日本における嫌気性分解は、下水や畜産排水の活性汚泥処理後の消化槽等に用いられ、副成するガスの中から硫化水素、メルカプタン、アンモニア等の有害・悪臭ガスを除去し、メタンガスを取り出し利用することが行われてきている。このような大型のシステムによる活性汚泥処理の場合、供給される有機廃棄物が臭気と病原性を示すため、メタン発酵前後の臭気と排水処理のため浄化設備を必要とする。この浄化設備の利用は採算性を考慮した場合、有機廃棄物のエネルギー利用システムへの大規模拡大にはかなりの困難を伴うものと考えられる。

下水や畜産廃棄物と異なり、農作物や家庭生ゴミの有機廃棄物は、大腸菌や人畜共通病原微生物の混入がなく成分組成が安定しているため、最新の技術を用いたメタン発酵系の適用により、有機廃棄物のエネルギー生成システムの利用が可能と考えられる。しかしながらこれまで度々行われてきた小規模のメタン発酵槽は、日本ではコスト面と冬期低温での発酵低下のため普及しなかった。小規模のメタン発酵槽の普及が進む中国の農村においても、発酵槽によって発生したメタンを家庭用燃料として利用する技術は、便利で安価な石炭の大量利用に急速に置き換えられている。インド農村においても小型の発酵層の利用が図られているが、急拡大には到っていない。その一方写真1に示すように、宗教的理由から牛の飼育頭数の多いインドの農村においては、多量に出るサトウキビの廃液を、牛の胃に存在するメタン菌を用いて発酵している。発酵には独自に設計したメタン発酵システムで処理し、環境汚染を防止する傍ら生成したメタンを写真のガスタンクに貯留し、家庭用ガスとして集落に配管しエネルギー源として利用し、農村住民の生活向上に役立っている。

写真1 インドにおけるサトウキビ廃液のメタン発酵（中央奥のタンク）によるメタンガス生産



通常メタン発酵システムによって発生するガスはメタン60～70%、二酸化炭素30～40%および硫化水素と少量の水素を含んでいる。このガスから硫化水素を除去すると、1立方メートル当たり約2万キロジュール、さらに二酸化炭素を除くと約4万ジュールの高カロリーガスが得られる。我が国の家畜排泄物と産業有機廃棄物がメタン発酵に利用されメタン混合ガスに転換したとすると、約66億立方メートルになるといわれている。メタン混合ガス1立方メートル



は、熱量として石油1リットルに相当するので、約660万キロリットルの石油に相当するエネルギーを得たことになり、1990年の全一次エネルギー消費の約2%に相当する。さらに家庭生ゴミ、事業所生ゴミ、農産廃棄物、水産廃棄物を含めると、有力な再生可能バイオマスエネルギーとなる。

EU や米国を始め、外国ではその国独自の産業に応じた有機廃棄物のメタン発酵処理技術や、メタン生成技術の研究開発が行われている。特にデンマークにおいては畜産業の盛んなこともあり、メタン発酵によるエネルギー利用と畜産廃棄物処理を効果的に実現している。

最近エネルギーの有効利用と農地の土壌保全の意味から、日本を含む先進国において、家庭生ゴミを中心にコンポスト処理が再び普及しつつある。家庭生ゴミの処理に対する住民意識の向上とコンポスト化の技術革新がこれを支えている。コンポスト化の普及は、良質の生ゴミを必要とするメタン発酵の素地を創っていると考えられる。一般家庭の生ゴミはゴミ重量の半分近くを占めており、焼却処分することなくメタン発酵処理することにより、焼却に必要な石油エネルギーも不要で、ダイオキシンや大気汚染質のような環境汚染物質の二次発生もない上に、生成するメタンをエネルギー源として利用可能なため、優れた科学技術展開の素地を備えている。

既存のメタン発酵について検討すると、メタン菌の生育は極めて遅く、そのために一般的には大規模な装置にならざるを得ない。従って、日本の農村や中国等の途上国の小規模な農村共同体において、豊富に存在する農作物や家庭から出される有機廃棄物からメタン発酵処理を行うのには、高性能かつ超小型化システムを開発する必要がある。日本を含む先進国における家庭生ゴミの処理に関しても、嫌気性発酵に伴う悪臭ガス等の発生防止策に関し、最新の研究の成果に基づいた開発が必須である。

今後身近に存在する未利用資源である農作物や家庭生ゴミを原材料としてメタン発酵処理し、生成したメタンをエネルギー源として利用する方法を開発する必要がある。そのためにはメタン発酵システムを小型化・自動化し、同時にメタン発酵を高能率化し、発酵の全工程において臭気汚染と環境汚染物質の発生をいかに防ぐかの重要課題がある。

この目的達成のために必要とされる課題は、

- (1) メタン発酵の超効率化のため、発酵システムに利用するバイオリアクター（発酵槽）における微生物群組成の最適化、固定化法の研究とメタン菌の活性化
- (2) 全自動制御バイオリアクター装置（UASB リアクター）の利用による小型モデルプラント
- (3) 選択透過性膜による発生メタンガスの濃縮システム
- (4) メタン発酵に伴う有害副生物（硫化水素、カダベリン等）や悪臭（メルカプタン類）の無公害化システム

等の諸課題の解決が必要である。以下に問題点について詳細に検討してみた。

### メタン発酵システム

一般のプラントの場合メタン発酵槽が最も重要であり、活性の高いメタン菌を反応槽の中で維持培養する技術が最大の課題である。このため反応に用いる有機廃棄物の組成が安定していることが必要であり、発酵を妨げる要因については厳格な管理を必要としている。この管理のため様々な技術的工夫を凝らしているが、経費増大の要因となっている。

また臭気や排気ガスに関しても、その対策のための高価な技術の適用を必要としている。発酵残渣については、高度な排水処理技術の適用により環境基準を満たしていく必要があり、このためにも維持経費が必要とされる。このような管理と浄化のための維持経費は、生成するガスの販売費用に比べ高価となるため、一般的には採算が合わず赤字経営となる場合が多い。赤字経営では普及するはずもないため、環境技術としては利用価値の高いものではあるが、日本においては広がりを見せていない。

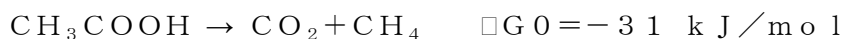
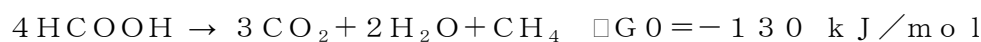
以上の点を踏まえ、これからメタン発酵のメタン発酵システムの小型化、高効率化のためのモデル発酵システムは、3つの発酵槽→前発酵槽、メタン発酵槽および浄化槽→から構成される必要がある。いずれの発酵槽にも反応制御用各種センサー（pH、温度、DO、BOD、アンモニア）を取りつけ全自動化する必要がある。3つの発酵槽の仕切りは分子篩を付けて低分子化合物だけが次の発酵槽へ移行できるよう配慮する必要がある。また、各発酵槽とも投入口から奥の方へと底部は傾斜し移動にエネルギーを使わない工夫が必要である。

エネルギー消費を最小限に抑えながら、発酵槽の厳密な嫌気性を失わないように工夫した攪拌システムとして、上向流嫌気性汚泥床（UASB: Up flow Anaerobic Sludge Blanket）を発酵槽内部に取り入る。UASBリアクターは直径数ミリの微生物塊（グラニュール）の充填が必要であるが、グラニュールの作成には独自の技術的工夫が必要である。

原材料は物理的過程により細かく自動粉砕後、連続的に発酵槽へ投入される。前発酵槽では、通性嫌気性微生物（乳酸菌・酵母菌・放線菌・糸状菌など）の作用により、有機物質の分解を迅速にかつ徐々に嫌気性を強める条件下で行われるようにする。分解効率を上げるために高菌体濃度培養を行う。この過程で糖やタンパク質および脂質は上記の微生物群によって分解され、下記のように乳酸・酢酸・蟻酸のような有機酸やエタノールなどのさまざまな有機物質が生成する。

糖 → (解糖系) → ピルビン酸 → 有機酸・その他 → アルコール  
 脂肪 → (リパーゼ) → グリセリン → 有機酸・その他  
 → 脂肪酸 → (β-酸化) → 有機酸・その他  
 タンパク質 → アミノ酸 → (脱アミノ) → 有機酸・その他

また、二酸化炭素などのガスおよびメタン菌の基質として利用される低分子有機物質はフィルターを通して、2番目のメタン発酵槽（UASBリアクター）へ導入され、高度の嫌気性菌、メタン菌の作用を受ける。



メタン生成に関与する微生物は偏性嫌気性で古細菌（Archaea）に属する。メタン生成は酸化還元電位（ $-200\text{ mV}$ 以下）やpHによって影響を受けるので、発酵槽内の条件を常にメタン発酵が行われるように整えなければならない。また、高効率化をはかるために、固定化増殖微生物

物法による高菌体濃度培養を行う。そのために多孔質の粒状ポリマー（グラニューール）に高密度に固定化して生産性を向上させる必要がある。さらに好熱メタン菌を利用して、比較的高い温度でのメタン発酵を行い、発酵時間を短縮する必要がある。

一般に培養細胞は細胞間で情報交換を行い、ある細胞密度以上になると、細胞増殖が低下する。特に嫌気性微生物の場合は、対数増殖期においても細胞増殖を行わない細胞が出現する。次の段階では、このような細胞間の情報交換・増殖制御作用を取り除き、生産効率を高める必要がある。

3番目の浄化槽においては、有害ガスや環境汚染物質を光合成細菌を用いて浄化する。近年、光合成細菌を環境浄化や農業・漁業に有効利用する試みがなされてきている。この槽では紅色硫黄細菌および緑色硫黄細菌によって硫化水素や硫黄化合物を電子供与体として、光エネルギーにより二酸化炭素を糖へと固定・還元させる。

浄化槽の利用により、地球温暖化の要因となる二酸化炭素や有毒な硫化水素や悪臭の原因となるメルカプタンやアミン類による環境汚染を除くことが可能となる。また、光合成細菌は動物性プランクトンの餌として利用可能であるので、養魚業にとっても有効利用が可能である。さらに前発酵槽とメタン発酵槽の微生物群は、凝集沈殿後コンポストとして利用する。

このような生化学的知見とバイオテクノロジーを利用したメタン発酵・濃縮法の研究による小型高性能メタン発酵システムの開発と家庭や地域内への普及は、化石燃料の家庭内燃焼による屋内大気汚染と健康被害に悩む途上国のみでなく、廃棄物の焼却処分によるダイオキシン汚染の抑制の急がれる先進国にも展開する画期的新技術として、環境ビジネスの創製へと結びつくものと期待される。

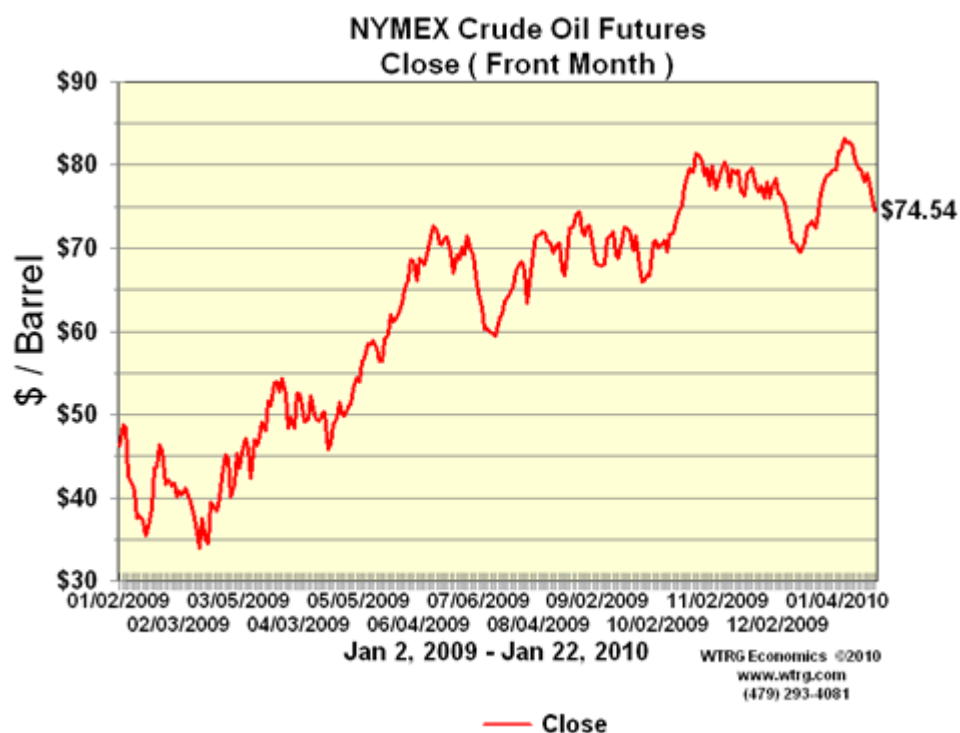
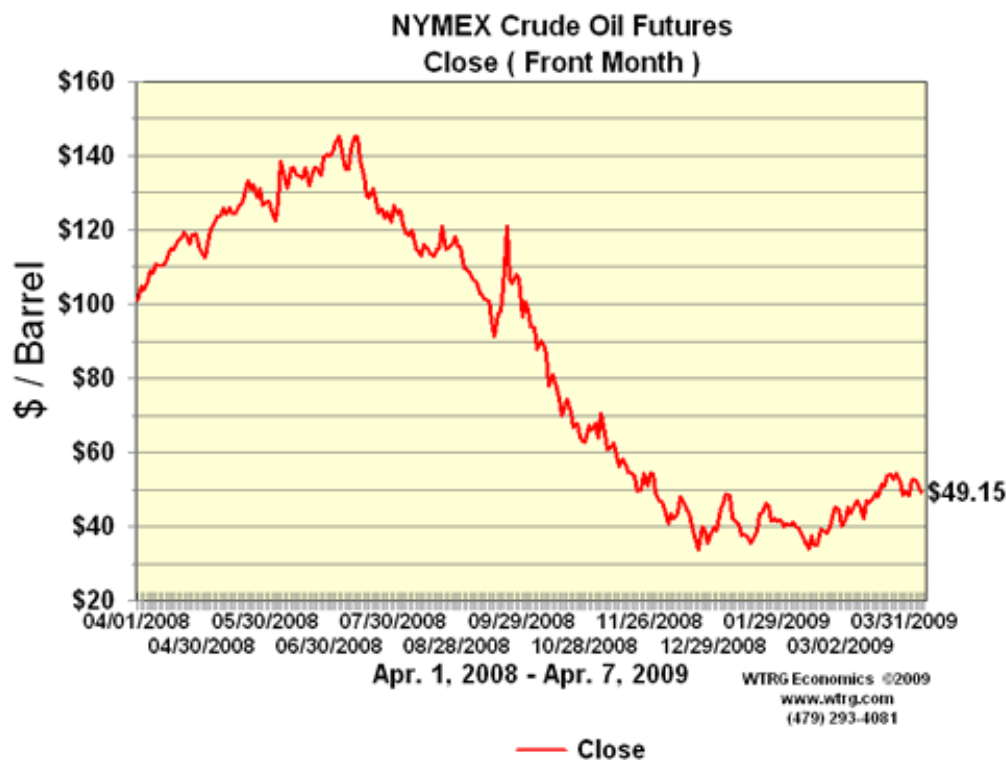
### エネルギー資源の現状と生活

化石燃料コペンハーゲンにおける COP13 のサミットにおいて、ポスト京都議定書の合意は先送りされた。COP13 に先立つロンドンサミットにおいては、グローバル経済回復への取り組みが合意されたものの世界経済の混乱は経済成長の著しかった途上国を巻き込み、日本を含め世界各国の経済成長を鈍化ないし減退させている。好況・不況の波は原油価格と連動しており、好況下の2008年7月初旬時点一時147ドル台高騰していた原油価格は、米国の景気後退、特にサブプライムローン破綻によるリーマン・ブラザーズの倒産に引き続く米国の金融不安、世界経済同時不況の進行により急落が続いており、図1に示すように2009年4月7日現在、ニューヨーク・マーカンタイル取引所の5月先物市場価格は、1バーレル51.05ドルと40ドルから50ドル水準で推移した。その後中国・インド等を始めとした世界経済の安定もあり、徐々に回復し2010年1月時点は70ドル台で推移している（因みに2010年1月22日は74.54ドル）。

米国を中心に現在も続く投機的取引は、政府資金により救済された多くの金融資本を再活性化させ、潤沢かつ逃げ足の速い投機資本や闇の銀行資本により再び資源高騰と金融不安を引き起こし兼ねない状況になりつつある。オバマ大統領も最近の演説の中で、一部金融機関に対して金融恐慌を引き起こした責任を指摘し米国政府の損害を賠償することを求めている。

原油価格の変動が著しい理由は、キャンベル C. J. Campbell やシモンズ M. Simmons ら石油関係の専門家による予測—「石油の生産ピークは2005年」「2010年過ぎには石油生産が減退し始め、2015

図6 ニューヨークマーカンタイル取引所の原油先物相場（米国産標準油種-WTI-推移）  
2008年－2009年（上図）と2009年－2010年（下図）翌月渡し(WTRG Economics)



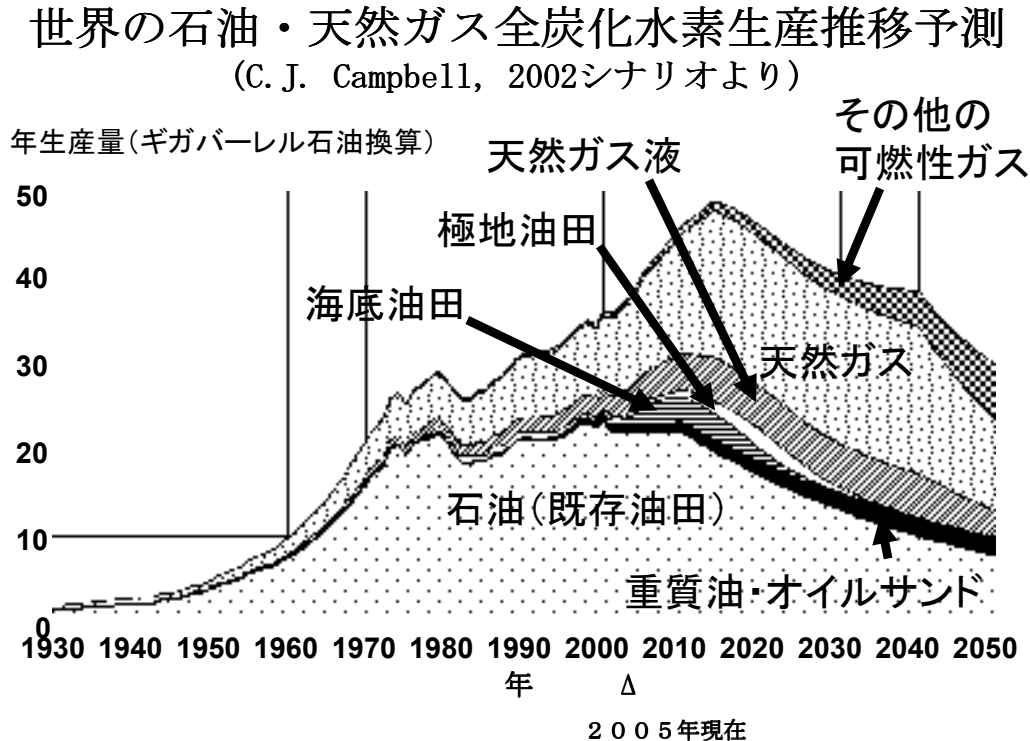
年頃には石油や天然ガスを含むエネルギー源の全炭化水素生産が減少に転じる」（図2参照）が背景にある。欧米の経済界には既にこの予測が浸透し、世界経済の発展に際して原油価格の高騰

を招いたと考えられている。さらに複雑な事態は石油埋蔵量の約 62%が、地政学的に不安定な中東に局在していることである。現在世界各国の働きかけにもかかわらず、イスラエルとパレスチナ自治区ガザを実効支配するハマスとの間では、停戦を恒久化するための合意形成はみられず、巨大な産油国の集中する中東においてもイラクとイランを軸に緊張が継続している。石油ショック時のような突然の石油危機の事態は起こっていないが、出口の見えない不況下の世界経済にエネルギー高騰が止めを指す恐れもある深刻な事態である。さらにロシアとウクライナなど周辺国との対立で、ロシアから欧州への天然ガス供給も滞っており、世界的にエネルギー供給に対する不安が高まっている。

### 石油ピーク後のエネルギー

原油生産の将来予測は既に報告したように、ヒュバート K.Hubbert が 1956 年に発表した“米国（当時 48 州）の原油生産は 1971 年にピークを迎える”との予測である。1971 年に予測通り米国の原油生産はピークを迎えたが、その後ヒュバートは世界の原油生産について 1974 年予測を発表し、“このままの石油消費が続けば 1995 年頃に世界の原油生産のピークを迎える”と予測した。図 7 に示すように、1973 年の中東戦争、1978 年のイラン革命、1990 年の湾岸戦争による原油生産の減退により 2005 年 5 月の石油ピークまで 10 年間延命した。

図 7 石油ピークと天然ガスピーク



既に一年半前の急速な石油価格の高騰を忘れかけているが、原油高騰は生活を直撃しガソリン・軽油・灯油・石油素材の高騰による生活費増大や経営の圧迫などの影響を引き起こした。米国金融恐慌に端を発した世界同時不況は、日本においても自動車、IT 関連の製造業を中心に派

遣労働者のリストラを誘発し、多数の人々の生存と生活設計を困難にしている。

エネルギー高騰や生活費の増加は社会不安を増大させ国家の存立基盤を成すセーフティネットを脅かす一方、リストラや失業は個人に対する極度のストレスと精神的不安の醸成へと結びつく。現在セーフティネットの欠陥による自殺の多さが問題となっているが、2003年時点での日本における自殺率は人口10万人当たり23.3人で、ロシア39.8人、ハンガリー29.2人について世界第三位を占めている。因みに米国は10.5人と日本の半分以下である。将来労働人口の減少が起こると指摘されながらも日本では非正規雇用が急増し、企業経営上の見通しの甘さと失敗を従業員に押し付ける安易なリストラが横行し、正規・非正規を問わず突然解雇させられ激しいストレス下に置かれる人々が増加しているのが原因と考えられる。

### 温暖化抑制と自然エネルギーの重要性

温暖化抑制について取り決めた京都議定書は2005年2月16日発効に漕ぎ着けたものの、当時世界第一位の放出国であった米国が離脱する一方、2008年時点世界一の放出国となった中国を始め途上国に削減義務が課せられていないため、温室効果ガス放出抑制は限定的であり温暖化抑制は困難と考えられる。イラン・イラク情勢が象徴するように石油資源の主要な産出国が集中する中東は依然として不安定なままであり、前途は楽観できる状況にはないが、温暖化影響が深刻化かつ広域化しつつあり、温暖化を極端に加速させる事態は避ける必要がある。石油減耗と温暖化の二重のリスクを避け次世代の生存環境を守ることは現世代の義務であり、自然エネルギーの急拡大と省エネルギーの徹底は最善の手法と考えられる。

自然エネルギー開発は世界各国において急速に進んでおり、北欧諸国、ドイツ、オランダ、スペインなど欧州および現在の米国において、化石燃料から自然エネルギーへのエネルギーシフトを図るため、税制上の大幅な優遇処置が講じられている。日本においても特に地方は自然エネルギーの豊富な環境に恵まれており、石油消費抑制と京都議定書遵守のため自然エネルギーの積極的利用とエネルギー消費抑制が緊急に必要とされている。

自然エネルギーは大部分太陽の放射エネルギーに由来するため、化石燃料（石油、天然ガス、石炭）やウラン等の化石的資源の生産が限界に達する中、今後更に重要性が増していくものと考えられる。最も普遍的に存在し世界的に利用の急拡大が図れる自然エネルギーは、太陽光発電、太陽熱、風力と考えられる。資源の偏在性の解決が課題であるが、水力、地熱、バイオマスは、賦存量の多い地方にとっては地域活性化に結びつく重要なエネルギー源となると考えられる。しかし石油程の高エネルギー密度を持つものはないため、自然エネルギーの利用を図る際には、エネルギー利益率または純エネルギー[EPR、EROEI=(利用するエネルギー)÷(取り出すのに必要とされるエネルギー)]に配慮する必要がある。

図8に示す風力発電は偏西風の卓越した地域では非常に優れた自然エネルギーである。日本においても詳細な風況調査に基づき、風力が安定して得られ低周波騒音やバードアタック等の環境影響のない地域（一般に海浜や島嶼地域）を見極め活用する必要がある。世界的には風力発電の技術的進歩は急速で、10年前主流であった1000kw級の風車が現在は1500kwから2500kwさらには3000kwから5000kw級へと大型化し急成長している。

最近の環境保護の機運と無駄な公共工事の批判から、水力発電についてはダム式発電が広

域の環境破壊を伴うとして進まなかった経緯がある。しかし世界的にはダム建設を必要としない小水力やマイクロ水力についての技術開発が著しく、日本においても水力の豊富な山間部においては今後有望な自然エネルギー資源となると考えられる。特に農村地域における農業用水の活用により地域のエネルギー生産と地域経済の活性化が可能と考えられる。

図9に示す太陽光発電は都市、農村を問わず広く利用できる上に、2009年11月固定価格買取制度の改善（24円/kWhから48円/kWhへと改善）がなされ、設置した各家庭の所得を増加させる可能性を持つ自然エネルギー資源である。他の自然エネルギーに比べ比較的設備投資にかかる費用も少なく、国や自治体の補助金を利用した設置が可能である。革新的技術に裏打ちされた発電効率の高い太陽光発電は、日本において今後最優先で取り組む必要がある。

先に述べたメタン発酵等のバイオマスは、資源の豊富な農村での利用を促進する必要がある。また日本に豊富な地熱等の自然エネルギーについても環境との調和を図りながら利用拡大が必要と考えられる。同時に企業・農業活動、輸送、家庭生活等生存環境全般において、エネルギー消費の徹底した抑制も必要とされている。自然エネルギーは石油減耗と温暖化が同時進行する中、将来の社会を変えるほどの大きな可能性を秘めていると予想される。

図8 北九州市エコタウン地区の響灘に面した1,500kW 10基(15,000kW)風力発電施設



石油生産のピークは各国においてエネルギー資源として天然ガスや石炭への急速なシフトを促している。図10に示すように、資源的に豊富な石炭へのシフトは二酸化炭素の放出を急増させると予想されるため、地球環境にとっては憂慮すべき事態になるであろう。石油ピークを迎え石油需要に供給が追いつかない需給バランスのずれは、近い将来再度の石油高騰を招き経済を疲弊させ、人類社会の適応能力を弱める可能性が強く、温暖化対策はより制限されたものにならざるを

得ない。石油ピークと温暖化はこれまで人類が経験したことのない解決の困難な事態を招くと予想し、エネルギー消費の抑制と自然エネルギー利用拡大に果敢に挑戦していく必要がある。

図9 新たな固定価格買取制度 (FIT:48 円/kW) により飛躍的發展が予想される太陽光発電  
2020年に3000万kW、2030年に6000万kWの設備容量目標



### 温暖化と人の健康への影響

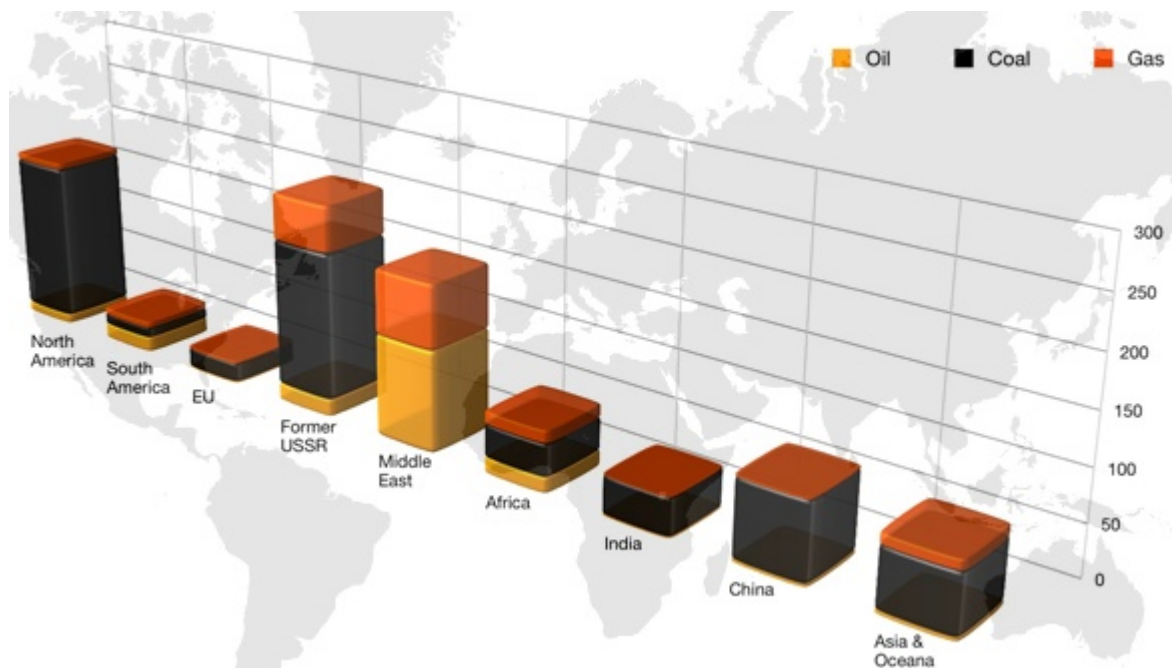
温暖化は特別な現象ではなく、地球史の中で普通に起こってきた現象である。水蒸気、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガスは、火山活動由来のガスとして太古の昔より常在していたガスであり、これらのガスによる温暖化も地球の常態であったといえる。原始地球においては大気中には高濃度の二酸化炭素や水蒸気が存在し、極端な温暖化が起こっていたと考えられている。現在の金星が高濃度の二酸化炭素により灼熱地獄となっているのと良く似た現象である。

現在太陽活動の極小期を迎え 2008 年以降世界気温の上昇は緩やかになっているが、既に 1906 年から 2005 年の 100 年の間に  $0.74^{\circ}\text{C}$  の気温上昇が起こっており、大陸氷河の融解や海面上昇を引き起こし、自然や社会に対する様々な温暖化影響がみられている。温暖化の影響は気温上昇のみならず、気候の不安定化に因る台風・サイクロン・ハリケーン等の暴風雨被害（ハリケーンカトリーナによる米国の大災害：死者 1,836 名、行方不明 705 名）、夏季の高温、多湿、乾燥、豪



雨のような極端な気象による気象災害として顕在化しつつあるため、各国が率先して影響緩和に取り組む必要がある。

図10 世界の化石資源賦存量（下より石油、石炭、天然ガス）中東以外は石炭の豊富



「気候変動に関する政府間協議」(IPCC, 2007)の第4次報告書の温暖化予測によると、温暖化による気温上昇は経済発展の程度により左右され、環境保全と経済発展を調和させた環境保全型経済(B1)の下では、21世紀末の気温は1980～1999年に比べ $1.8^{\circ}\text{C}$ ( $1.1^{\circ}\text{C}$ ～ $2.9^{\circ}\text{C}$ )の上昇に収まるとされている。一方現状の経済成長を化石エネルギー源重視のまま持続した場合(A1F1)、気温上昇は $4.0^{\circ}\text{C}$ ( $2.4^{\circ}\text{C}$ ～ $6.4^{\circ}\text{C}$ )にまで達するとされている。この経済優先の状況が続けば、化石エネルギー資源の早期枯渇をもたらすため、到達する以前に人間社会が崩壊すると考えられる。

温暖化は海洋よりも陸域で促進されるため、温暖化の程度が著しいのは北半球高緯度地域であり、温暖化の程度が少ないのは海洋と南半球である。既にシベリアからアラスカにかけての北極海の海水が予想を超えて減少し(NASA, 2006)、このまま進行すると今後10年程で北極海の海水が消滅する恐れがあると指摘されている。このためホッキョクグマに代表される海水に依存した生物種の絶滅や陸域の永久凍土帯の自然生態系破壊が進むことが危惧されている。

既にヒートアイランド現象が加速している都市部においては、温暖化により夏季の最高気温が上昇すると、夏季に猛暑が襲来し易くなり、温度への適応能が低下している高齢者や疾病に苦しむ人々にとって大きな負荷となる。石油による大規模輸送の利用は都市居住人口の急増をもたらし、都市のエネルギー消費の巨大化とヒートアイランド現象の加速を促進し、温暖化に加え都市気温を上昇させている。

ヒトは中性温度域を境として低温側では生育温度域が広いが、高温側では生育温度域が狭く体温調節機構と気温とのバランスを保ち難い。特に熱波のような異常気象により高い気温が継続するようになると、深部体温の上昇が起こり易く住民にとって大きなリスクとなる。また温暖化に

よる気温の上昇や降水量の変化は農業生産に直接影響すると予想され、過去の熱波の際は農業や林業に壊滅的打撃を与えている。また農業の病害虫は生育上温暖な気候を好むため、温暖化は病害虫の分布の拡大をもたらす可能性が強い。特に冬季の低温のため越冬できなかった病害虫が温暖化により越冬が可能となると、農作物被害の爆発的増加をもたらす可能性があり警戒が必要である。

人においても動物媒介性感染症の流行は、熱帯病のマラリアやデング熱が特に警戒されているが、流行爆発は多様な動物媒介性感染症について起こる恐れがある。最近の流行爆発事例では、2007年には121名の死亡を含む3,598名の感染者を出している米国におけるウエストナイルウイルス脳炎(West Nile Virus)や、アフリカのフランス領レユニオン島におけるチクングンア熱(Chikungunya cases)の感染爆発が知られている。温暖化は常時各国における人・農作物・家畜への感染爆発への警戒が必要とされている。

### 温暖化・石油ピークと自然エネルギー

将来に渡り供給が不安定化する化石燃料から自然エネルギーへの大転換を促進する必要がある。石油減耗と温暖化のリスクを軽減し次世代の生存環境を守るため、自然エネルギーの急拡大とエネルギー消費の抑制は、現世代のなし得る最善の対策と考えられる。先に述べたように自然エネルギーにはエネルギーとしての価値の少ないものもあり、エネルギー転換を図る際にはエネルギー利益率(EPR, EROEI)を考慮する必要がある。EPRは“利用するエネルギー”を“取り出すのに必要とされるエネルギー”で割ったもので、1.0を下回るエネルギーは“利用価値のないエネルギー”とされる。穀物やトウモロコシ、大豆を原料としたバイオエタノール生産はまさに“利用価値のないもしくは利用価値の少ないエネルギー”に相当する。

農業は農業機械、肥料、農薬、ビニールハウスまで完全に石油に依存しているため石油高騰が迫る中深刻な影響を受けると予想され、農業と食糧生産をどのように支えるのか大きな課題である。食糧の60%程度を輸入している日本は輸送コストと石油製品の価格が高騰した時食糧価格の高騰に見舞われる可能性があり、地産地消により地域自給率を緊急に急拡大する必要がある。

温暖化のモデルの中で、飲料水と農業用水にとって最も重要な降雨量についての予測は非常に困難で、予測は未だ不確実である。モデルの結果は、気温が1℃上昇する毎に世界の平均降水量は約2%増加することを示しているが、同時に蒸発量が増加するため地域によっては日照り、乾期、干ばつが長く続く恐れが強い。その一方地域によっては集中豪雨の可能性も高くなり、豪雨や融雪による洪水、土壌の浸食が起きる可能性も示唆されている。また気候変化は異常な気温上昇や降水量増加、台風等の激しい暴風雨の襲来等、異常気象の発生頻度の増加を伴うとされているが、その正確な予測は困難である。現在ほとんどのシミュレーション結果は、猛暑の頻度の増加を示しており、熱波現象による作物被害に十分警戒し対処する備えが必要とされる。

### 京都議定書による温暖化抑制

地球温暖化の対策として国際合意に基づいた有効な緩和策の実行が急がれるが、温室効果ガス(二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、フロン、代替フロン、六フッ化硫黄)の発生源把握と温室効果ガスの吸収源の拡大を行い、その排出抑制に取り組む必要がある。中心的役割を担う国連気

候変動枠組条約（UNFCCC）は、現在 187 ヶ国によって批准されているが、各条約加盟国は「大気中の温室効果ガスの濃度を、気候系に人為的な危険な干渉が起きないレベルにまで」安定化させようとしている。先に述べたように、危険な干渉の一つとして「地球規模の海洋大循環の停滞」が考えられるが、もし「海洋大循環の停滞」へと突き進んだ場合、取り返しのつかない気候変化へ突き進む恐れがあると指摘されている。

枠組み条約の具体的成果が京都議定書で、1997 年京都で開催された温暖化防止京都会議（COP-3）において合意されたものである。米国が離脱しその成立が危ぶまれてきたが、2004 年 11 月のロシアの批准により、2005 年 2 月 16 日成立した。現在批准した先進国、市場経済移行国を中心に、いまだ温度差は大きいものの途上国においても温暖化緩和策が取り組まれつつある。

### 温暖化への人類の適応

人はホメオスタシスの機構が発達しているため気候へ適応する能力が高く、世界中に広く生存域を広げている。しかしながら高温への適応は生理学的に困難な面を持ち、人の健康は夏季の高温・多湿や乾燥のような極端な気象現象によって強く影響される。温暖化とヒートアイランドによる気温上昇が夏季の高温に加算されると、暑熱による身体への負荷は著しくなるため、温暖化の直接影響としては、このような夏季の熱ストレスが重要である。熱ストレス下での熱中症の発生増加や熱波の増加による死亡率の増加を予測すると、疾病や死亡は閾値温度（我々の調査では、日本東京では 30℃、中国武漢では 35℃）を超えた際に急増することが知られている。

猛暑の典型的事例としての熱波は、既にヨーロッパ、米国、中国、インド等大陸性気候下において頻発している。2003 年 8 月前半の 2 週間、ヨーロッパ各地においては猛暑が甚だしく、熱ストレスによる健康被害と高温下の乾燥による山火事の高発が報告された。特に記録的猛暑に襲われたフランスにおいては、熱ストレスにより高齢者の死亡が相次ぎ、8 月中の死亡者数は 14,802 名に上ったと報告されている（ヨーロッパ全体では約 37,000 人の死亡報告）。

日本における熱中症の発生について述べると、熱中症の発生場所は年令により大きく異なり、17 歳以下の学童を含む若齢者では、運動場での熱中症の発生が著しく多いことが判明している。このことは、夏季の高温下での運動負荷がリスクの増加に繋がっていることを示している。また熱ストレスに対して最もリスクの高い高齢者の場合、道路上での熱中症発生が多く、高い気温下での屋外行動がリスクとなっていることを示している。さらに居室での発生もこれに次いでおり、夏季の高温下では適切な屋内空調の完備によるリスクの低減化とともに、高齢者の健康を地域で守っていく取り組みが必要と考えられる。

熱ストレスの影響は全年齢層に渡るリスクとなる恐れが強いため、今後地域毎にきめ細かな教育・情報の普及、屋外環境の整備、屋内空調施設の完備と高齢者家庭のフォローアップによるリスクの低減化が必要と考えられる。また高齢化社会の進展に伴い暑熱による健康被害の防止対策については、地域保健活動の一環として取り組む必要がある。フランスやシカゴで被害が広がった理由は、猛暑下の屋内で倒れた孤独な高齢者の発見が遅れたのも主な原因の一つとされている。災害時の都市における孤独な死亡を減らし、地域社会においてフォローアップと人の交流を基礎とした保健活動を築き上げることが課題となっている。

温暖化による気候の不安定化と熱ストレスの増強が避けられない今日、人の健康面についての

温暖化の影響を予測し生理的および社会的適応を図っていく必要がある。同時に熱ストレスに対する教育と保健衛生活動、救急医療体制の充実等は、地域社会のリスクの低減化と予防上からも今後必要な課題と考えられる。温暖化と石油ピークを踏まえた人類の将来像について述べる。

“生物学的・社会的進化の結果である人類社会の崩壊を止めるために、地球の有限性を認めた生き方に切り替える必要性が出てくる。ただ現人類が有限性を認識し経済行動を抑制できるほど賢い動物かどうかは残念ではあるが今のところ全く確信が持てない。金融資本を先頭に国内外に市場経済万能の考えが蔓延り、国家・地域経済の崩壊、貧困や飢えに対しても全く考慮しないためである。温暖化により北極圏の海水の融解が加速している事態を迎えた現在でも、環境保全の必要性が認識されるのではなく、環境破壊を伴う北極圏の天然ガスや石油開発が北欧、ロシア、米国、カナダの国家・資本により強力に進められつつある。環境の危機を招き資源の制約を無視した巨大資本による市場経済万能の考えは、人類の未来と厳しく対峙している”

P・Li・Ti・U等の地下資源や化石燃料の発見は工業や農業への資源・エネルギー利用を促進し、生産性を飛躍的に伸ばすことにより人口の爆発的増加を支えてきた。一方工業、農業、金融を寡占する巨大資本は、日本における農業や近代化の遅れた脆弱な国の産業の息の根を止め市場を拡大する方策を模索しながら進んでいる。現人類は資源・エネルギーへの過度な依存の中で成立しているが、資源・エネルギーの依存を拡大し経済成長を行う過去の成功体験から離れ、地球上に多様性のある豊かな生命と多数の民族が共存する道を模索しなければならない時期に来ている。

#### 参考文献

- 1) Mitsuru Ando: Risk assessment of global warming on human health. *Global Environ. Res.* 2, 69-78 (1998)
- 2) 古賀洋介、亀倉正博（編）古細菌の生物学 東京大学出版会 (1998)
- 3) Richard Heinberg: *The Party's Over-Oil, War and the Fate of Industrial Society.* New Society Publishers, Canada (2003)
- 4) 安藤 満 京都議定書発効とエネルギーシフト 富山国際大学地域学部紀要 5, 31-41 (2005)
- 5) C. J. Campbell: *Oil Crisis.* Multi-Science Publishing Co. Ltd (2005)
- 6) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2007-The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* (2007)
- 7) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2007- Impacts, Adaptations and Vulnerability. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* (2007)
- 8) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2007-Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* (2007)
- 9) Shinji Asanuma, Chaoke Liang, Mitsuru Ando: *Impact Assessment of Heat Stress on Population Health in Japan and China.* *Global Environ. Res.* 11, 39-44 (2007)