

第 6 章 炭素循環及びその他の生物地球化学的循環

概要

本章は、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)の生物地球化学的循環について取り上げる。これらの 3 つの温室効果ガス(GHGs)は工業化以前の時代以降ずっと大気中で増加しており、この増加が気候変動の主要な駆動要因となっている(第 10 章)。二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素を合わせると、全てがよく混合された温室効果ガス^[訳注 1]からの放射強制力の合計(第 8 章)の 80%を占める。二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の増加は、エネルギー源としての化石燃料の使用や、特に農業をはじめとする土地利用及び土地利用の変化による人為起源の排出が原因となっている。二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の大気中濃度において観測されている変化は、人為起源の排出と、自然の過程がわずかに変化してそれらのガスの一部を大気から除去すること、動的なバランスの結果として生じる。自然過程は物理的条件、化学反応、生物学的変換に関係しており、これらの条件等もそれ自身大気組成や気候変動の変化に応答する。したがって、物理的な気候システムと二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の生物地球化学的循環は結びついている。本章では、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の生物地球化学的循環に関して、現在の人為起源の変化、気候変動と結びついた過去の変動、将来シナリオに基づき今世紀中に予測される変化について述べる。

工業化時代における人為起源の変化

二酸化炭素濃度は 1750 年頃の 278 ppm から 40% 増加して 2011 年には 390.5 ppm に達した。同じ期間中に、メタンは 150%増加して 722 ppb から 1803 ppb に、一酸化二窒素は 20%増加して 271 ppb から 2011 年には 324.2 ppb となっている。二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の現在の大気中濃度が、少なくとも、氷床コアによって調査されている期間である過去 80 万年について測定されたいかなる水準をも上回っていることは、明白である。さらに、最近 100 年にわたって観測されたこれら 3 種類のガスの平均増加率は、それ以前の 2 万年間に観測されたいかなる変化率も上回っている。{2.2、5.2、6.1、6.2}

1750 年から 2011 年にかけての大気への人為起源二酸化炭素排出量は、555 ± 85 PgC (1 PgC = 10¹⁵ gC^[訳注 2]) だった。このうち 375 ± 30 PgC が化石燃料の燃焼とセメント生産、180 ± 80 PgC が土地利用の変化

(森林伐採、新規植林、再植林を含む)によるものだった。{6.3.1、表 6.1}

化石燃料の燃焼及び土地利用の変化により生じる二酸化炭素排出量の増加は、観測されている大気中の二酸化炭素濃度増加の最も有力な原因であることの**確信度は非常に高い**¹。1750 年以降の排出量のおよそ半分が大気中に残留した(240 ± 10 PgC)。残りは吸収源によって大気から取り除かれ、自然の炭素循環の貯蔵庫に蓄積された。海洋には 155 ± 30 PgC が蓄えられた。土地利用の変化による影響を受けていない植生バイオマスと土壌には、160 ± 90 PgC が蓄えられた。{6.1、6.3、6.3.2.3、表 6.1、図 6.8}

2000~2011 年の期間における化石燃料の燃焼とセメント生産による炭素排出量は、1990~1999 年の期間よりも急速に増加した。2011 年の排出量は 1 年当たり 9.5 ± 0.8 PgC で、1990 年の水準を 54%上回っていた。土地利用の変化による人為起源の正味二酸化炭素排出量は、過去 10 年間を通じて 1 年当たり 0.9 ± 0.8 PgC で、全ての人為起源二酸化炭素排出量の約 10%を占めていた。**どちらかと言えば**²、2000~2011 年における土地利用の変化由来の正味二酸化炭素排出量は、1990~1999 年に比べて減少した。{6.3、表 6.1、表 6.2、図 6.8}

大気中の二酸化炭素濃度は 2002~2011 年の期間に平均で 1 年当たり 2.0 ± 0.1 ppm 増加した。この十年間における増加率は、1958 年に大気中濃度の直接測定が開始されて以降のどの 10 年間の数値よりも高い。世界全体として、陸域と海洋を合わせた自然の二酸化炭素吸収源の大きさは、大気中濃度の増加率にほぼ従っており、1958~2011 年の平均で毎年全ての人為起源排出量の 55%を除去していた。{6.3、表 6.1}

大気を測定した結果、メタン濃度は 1990 年代後半以降**ほぼ 10 年間安定していた後、2007 年以降新たな増加を見せている。**何がこの新たな増加をもたらしたかについては、なお議論がなされている。2000~2009 年の 10 年間に対するメタン収支(ボトムアップ推定)は、自然の湿地からの放出が 1 年当たり 177~284 Tg(CH₄)^[訳注 3]、農業及び廃棄物(稲作、動物、廃棄物)からは 1 年当たり 187~224 Tg(CH₄)、化石燃料関連の排出量は 1 年当たり 85~105 Tg(CH₄)、その他の自然放出(地質、シロアリ、淡水からの放出ほかを含む)は 1 年当たり 61~200 Tg(CH₄)、バイオマス及びバイオ燃料の燃焼からは

¹ 本報告書では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の 5 段階の表現を用い、「確信度が中程度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している(詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)。

² 本報告書では、成果あるいは結果の可能性の評価を示すために、次の用語が用いられる。「ほぼ確実」: 発生確率が 99~100%、「可能性が非常に高い」: 発生確率が 90~100%、「可能性が高い」: 発生確率が 66~100%、「どちらも同程度」: 発生確率が 33~66%、「可能性が低い」: 発生確率が 0~33%、「可能性が非常に低い」: 発生確率が 0~10%、「ほぼあり得ない」: 発生確率が 0~1%。適切な場合には追加で以下の用語を用いることがある。「可能性が極めて高い」: 発生確率が 95~100%、「どちらかと言えば」: 発生確率が >50~100%、「可能性が極めて低い」: 発生確率が 0~5%。可能性の評価結果は、「可能性が非常に高い」のように斜体字で記述する(詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)。

1年当たり32~39 Tg(CH₄)である(数値の範囲は、文献で報告された数値の範囲を表す)。人為起源の排出は、総排出量の50~65%を占める。以前の収支には算入されていなかった自然の地質学的起源のメタン放出を含めることで、現在では総メタン排出量に占める化石部分(すなわち、化石燃料産業における漏出に関連した人為起源の排出と、自然の地質学的漏出)は約30%になると推定されている(中程度の確信度)。メタン排出量の世界的な年々変動の主要な駆動要因は、自然の湿地からのメタン排出量における気候由来の変動で(高い確信度)、それよりは小さいものの、火災の多い年にはバイオマス燃焼による排出の変動の寄与もある。{6.3.3、図6.2、表6.8}

一酸化二窒素濃度は過去30年間に1年当たり0.73 ± 0.03 ppb の割合で増加した。大気中への一酸化二窒素放出の大部分は、土壌中及び海洋中の反応性窒素の硝化反応と脱窒反応によって生じる。人為起源の一酸化二窒素排出量は過去20年間にわたって着実に増加し、2006年には1年当たり6.9 [2.7~11.1] TgN(N₂O) ^[訳注 4)]だった。人為起源の一酸化二窒素排出量は、農業での窒素肥料の使用によるものが1年当たり1.7~4.8 TgN(N₂O)、化石燃料の使用と工業プロセスが1年当たり0.2~1.8 TgN(N₂O)、バイオマスの燃焼(バイオ燃料を含む)が1年当たり0.2~1.0 TgN(N₂O)、大気からの窒素の沈着に起因する地上排出によるものが1年当たり0.4~1.3 TgN(N₂O)となっている(数値の範囲は、文献で報告された数値の範囲を表す)。土壌、海洋、小規模の大気中放出源から生じる自然の一酸化二窒素排出量は、合わせて1年当たり5.4~19.6 TgN(N₂O)である。{6.3、6.3.4、図6.4c、図6.19、表6.9}

2010年における人為起源による反応性窒素の生成量は、自然起源の陸域での生成量より少なくとも2倍大きかった。人為起源の反応性窒素の生成は、肥料及び工業用のアンモニア生産によるものが大半であり、またマメ類の栽培や化石燃料の燃焼による寄与も重要である。いったん形成された反応性窒素は、水中や大気中に運ばれる。一酸化二窒素に加えて、大気中に排出される重要な2種類の窒素化合物がアンモニアと窒素酸化物であり、どちらも大気化学過程を通じて対流圏オゾンとエアロゾルに影響を与える。これらの効果は全て放射強制力に寄与する。陸域での反応性窒素の沈着が自然の二酸化炭素吸収源(特に森林)を現在増やしている可能性も高いが、この効果の大きさは地域によって異なる。{6.1.3、6.3、6.3.2.6.5、6.3.4、6.4.6、図6.4a、図6.4b、表6.9、第7章}

人為起源の変化以前

工業化以前の時代以降の人為起源による二酸化炭素増加とは対照的に、氷床コアに含まれた大気中二酸化炭素からは、1750年より前の7千年間には260 ppmから280 ppmへときわめてゆっくりとした変化(増加)だけであったことが示されている。早期の人為的な土地利用から生じた二酸化炭素排出の寄与で、1750年以前の二酸化炭素の増加を十分説明できる可能性は低い。

氷床コアから得た大気中メタンは、5千年前から1750年頃までの間に約100 ppb増加した。この増加の原因を、家畜、人為的な火災、稲作などを含む、早期の人間活動に求められるか否かの可能性はどちらも同程度である。{6.2、図6.6、図6.7}

さらに時代を遡ると、1750年より前の過去80万年においては、大気中の二酸化炭素は氷(寒冷)期の180 ppmから、間氷(温暖)期の300 ppmまで変化していた。このことは、複数の氷床コア測定によって確かめられている。氷期から間氷期にかけての大気中の二酸化炭素の変動は、海洋の炭素貯蔵量の減少(500~1200 PgC)によって生じ、その一部は陸域の炭素貯蔵量の増加(300~1000 PgC)によって相殺されていた。{6.2.1、図6.5}

将来予測

非常に高い確信度で、人為起源の二酸化炭素排出に対する海洋の炭素吸収は、4つのRCPシナリオ全てにおいて2100年まで継続し、高濃度となる経路ほど吸収量も多くなる。陸域の炭素吸収が将来どう変化するかは、海洋よりはるかに不確実であり、大多数のモデルは全てのRCPシナリオにおいて正味の炭素吸収が継続することを予測しているが、一部のモデルは気候変動と土地利用の変化の複合効果のために、陸域の炭素が正味で減少することを計算している。各モデルによる結果の大きな開きと、過程の表現の不完全さを考慮すると、モデルで計算された将来の陸域での炭素の量の変化の大きさに関する確信度は低い。{6.4.3、図6.24}

大気中の二酸化炭素の増加によって生じる世界の陸域及び海洋の炭素吸収源の増加を、気候変動が部分的に相殺することの確信度は高い。もっとも、第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の地球システムモデルでは、気候に対する海洋及び陸域の二酸化炭素フラックスの応答には地域差がある。熱帯生態系では気候が温暖なほど炭素の貯蔵が少なくなることについて各モデル間の見解の一致度は高い。高緯度では温暖化によって陸域の炭素貯蔵が増すことについて、モデル間の見解の一致度は中程度だが、陸域炭素貯蔵の増加を相殺するかもしれない永久凍土での炭素の分解を含んだモデルはない。海洋の温暖化と循環の変化は南大洋 ^[訳注 5)]と北大西洋における炭素の吸収率を低下させるが、それにもかかわらず両海域では炭素の取り込みが持続することについて、CMIP5の地球システムモデルにおける見解の一致度は高い。{6.4.2、図6.21、図6.22}

新しい実験結果{6.4.6.3}とモデリングに基づく、4つのRCPシナリオにおいて、大気中の二酸化炭素の増加が将来の陸域炭素吸収源を増す効果は、養分の不足によって抑制される可能性が非常に高い。窒素の利用可能性が低いことが、人為的な窒素沈着を考慮したとしても、陸域での炭素貯蔵を制限するだろうことの確信度は高い。リンが(陸域の炭素貯蔵を)制限する役割はさらに不確かである。窒素による制限と、二酸化炭素の上昇及び気温・降水量の変化とを組み合わせたモデルでは、所

与の化石燃料の排出経路に対して、予測される将来の大気中の二酸化炭素の増加が系統的に大きくなる。{6.4.6、6.4.6.3、6.4.8.2、図 6.35}

気候-炭素循環フィードバックを考慮に入ると、RCP シナリオに対応する化石燃料による排出量を定量化できる。2012 年から 2100 年の期間について、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 の各シナリオに対応する累積化石燃料排出量は、それぞれ 270 [140~410] PgC、780 [595~1005] PgC、1060 [840~1250] PgC、1685 [1415~1910] PgC となることが示唆されている(数値は最も近い 5 PgC 単位で見積もり、範囲は CMIP5 のモデル結果から得たもの)。RCP2.6 の場合、2050 年までに 1990 年水準から平均 50% (幅は 14~96%) の排出削減が必要になる。また、モデルの約半数は 21 世紀末までに排出量はゼロをわずかに上回る程度になることを示唆し、あとの半数は大気中から二酸化炭素が正味で除去されることを示唆する。{6.4.3、表 6.12、図 6.25}

温暖化による永久凍土面積の減少が原因となって、現在凍結固定されている炭素の融解が生じることの確信度は高い。もっとも、炭素減少の大きさについての確信度は低く、二酸化炭素とメタンの大気中への放出による減少は、RCP8.5 シナリオの下では 2000 年から 2100 年の期間に 50~250 PgC の範囲となる。CMIP5 の地球システムモデルには、凍結で閉じ込められた炭素のフィードバックは含まれていない。{6.4.3.4、第 12 章}

高い二酸化炭素濃度とより温暖な気候のもとでは、湿地からのメタン放出量が増加する可能性が高いことについて中程度の確信度がある。しかし、こうした変化の定量的予測についての確信度は低い。海底の温暖化にตอบสนองして海洋ガスハイドレートから将来メタンが放出される可能性については、あまり理解されていない。21 世紀末までに海底のハイドレートからメタンがかなり放出された場合には、海底から海面までの間でメタンが酸化されるために、大気中には二酸化炭素の形で排出される可能性が高い。{6.4.7、図 6.37}

飼料/食料需要の増大と農業の窒素肥料への依存により、土壌からの一酸化二窒素排出量が増加する可能性は高い。気候の温暖化は、農業及び自然の陸面の一酸化二窒素放出源を強める可能性が高いが、これらの変化の定量的予測における確信度は低い。{6.4.6、図 6.32}

海洋による炭素貯蔵の増大が将来酸性化を強め、過去数十年間観測されている変化傾向を継続することはほぼ確実である。海面付近での海洋酸性化は大気中の二酸化炭素濃度に追従するが、二酸化炭素が深層まで広がり続けるのに伴い深海でも酸性化が進む。CMIP5 モデルは、全ての RCP シナリオにおいて、2100 年にかけて全世界で海洋酸性化が進行していくことを一貫して予測している。これに対応して 21 世紀末までに生じる海面付近の pH の低下は、RCP2.6 シナリオで 0.065 [0.06~0.07]、RCP4.5 シナリオで 0.145 [0.14~0.15]、RCP6.0

シナリオで 0.203 [0.20~0.21]、RCP8.5 シナリオで 0.31 [0.30~0.32]となっている(範囲は CMIP5 モデルの広がり幅)。ほとんどのシナリオにおいて、北極海の一部といくつかの沿岸湧昇システムでは 10 年以内に、南大洋の一部では 10~30 年以内に、海面付近の海水が季節的にアラゴナイト^[訳注 6]を溶解するようになる。これらの海域の広い範囲で、大気中の二酸化炭素濃度が 500~600 ppm になるとアラゴナイトが未飽和状態になる。{6.4.4、図 6.28、図 6.29}

21 世紀中に海洋の溶存酸素量が数パーセント減少する可能性は非常に高い。CMIP5 モデルによると、この溶存酸素の減少は主に中緯度の海洋表層で起こり、その原因は成層の強化、ベンチレーション^[訳注 7]の弱化、温度上昇であることが示唆されている。もっとも、外洋における低酸素及び亜酸素^[訳注 8]水域の量が将来どう増大するのかについては、潜在的な生物地球化学的影響と熱帯海洋力学の変化における不確実性が大きいため、合意は得られていない。{6.4.5、図 6.30}

人為起源の排出がもたらす不可逆的な長期的影響

海洋及び陸域における物理的・生物地球化学的炭素循環が、21 世紀中に生じる気候変動と大気中二酸化炭素濃度の上昇にตอบสนองし続けることの確信度は非常に高い。海洋が大気中二酸化炭素を取り込む限り、海洋酸性化が将来も続く可能性は非常に高い。陸域生態系の炭素循環の不可避の変化は、21 世紀末を超えても現れるだろう。加えて、広い面積の永久凍土が数世紀にわたり融解することはほぼ確実である。しかしながら、凍結固定された炭素の大気中への放出の大きさと、二酸化炭素及びメタンの排出の相対的寄与についての確信度は低い。{6.4.4、6.4.9、第 12 章}

気候の変動性と二酸化炭素増加に対する自然の炭素貯蔵庫の応答の大きさと符号は、時間スケールによって大きく異なる。二酸化炭素増加への応答は、時間スケールに関係なく、陸域及び海洋の累積吸収量を増やすことである。気候変動への応答は、時間スケールによって内在する物理的・生物学的メカニズムの応答が異なるため、対象とする地域によってばらつきがある。{6.4、表 6.10、図 6.14、図 6.17}

人間が排出した二酸化炭素を自然過程によって大気中から除去するには、数十万年かかる(高い確信度)。どの RCP を検討するかによって違いはあるものの、排出された二酸化炭素の約 15~40%は、1000 年以上大気中に残るだろう。吸収源が人為起源の二酸化炭素を除去するにはこのように非常に長い時間を必要とするため、高い二酸化炭素濃度が原因となって生じた気候変動は人間の時間の尺度では不可逆である。{Box 6.1}

ジオエンジニアリングの手法と炭素循環

これまでにないやり方で大気中から二酸化炭素を大規模に除去する方法は、二酸化炭素除去(CDR)手法と呼ばれている。CDR は理論上は大気中の二酸化炭素濃

度を減少するために利用できる」とされているが、その潜在的利用可能性については、生物地球化学的及び技術的な限界がある。不確実性のため、人間の時間の尺度でどれだけの二酸化炭素排出量を CDR によって相殺できるのかを定量化することは難しいが、大気中の二酸化炭素を大幅に削減するには少なくとも1世紀の間は CDR を大規模に展開しなければならない**可能性が高い**。さらに、CDR による二酸化炭素除去は、海洋及び陸域生態系からの二酸化炭素放出によって部分的に相殺されることは**ほぼ確実**である。{6.5、図 6.39、図 6.40、表 6.15、Box 6.1、FAQ 7.3}

CDR 手法が炭素及びその他の生物地球化学的循環に及ぼす副作用についての確信度は低い。CDR 手法が気候及び環境に及ぼす影響の一部は、地表面アルベドの変化(造林のため)や、脱酸素、一酸化二窒素排出量の増加(人為的な海洋肥沃化のため)と関連している。太陽放射管理(SRM)手法(第7章)は、海洋酸性化のような、増加した二酸化炭素の炭素循環への影響に直接干渉することはないが、気候への効果を通じて炭素や他の生物地球化学的循環に影響を与えるだろう。{6.5.3、6.5.4、7.7、表 6.14、表 6.15}

【訳注 1】 本体報告書の表 2.1 に示された温室効果ガスで、京都議定書の削減対象である二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類及びオゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類、ハイドロクロロフルオロカーボン類等を指す。「長寿命の温室効果ガス」とほぼ同義である。

【訳注 2】 1 PgC = 1 GtC(炭素換算で1ギガトン=10億トン=1000兆グラム)。二酸化炭素換算では36億6700万トンに相当する。

【訳注 3】 1 Tg(CH₄)はメタン換算の質量で1テラグラム=1兆グラム=100万トン。

【訳注 4】 1 TgN(N₂O)は一酸化二窒素の窒素換算の質量で1テラグラム(=1兆グラム=100万トン)。

【訳注 5】 原文では“the Southern Ocean”。南極海(“the Antarctic Ocean”)とも呼ばれる。

【訳注 6】 アラゴナイト: あられ石。炭酸カルシウムの結晶形の一つ。様々な海洋生物がこれにより骨格や殻を形成している。

【訳注 7】 ベンチレーション: 海面付近の海水が海洋内部へ運ばれる過程のひとつ。

【訳注 8】 ほぼ無酸素。