

第7章 気候系変化と生物地球化学過程の結合

概要

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の排出及び、エアロゾル粒子や対流圏オゾンを含む二次的汚染物質の形成をもたらす、二酸化硫黄、窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素等の反応性ガスの排出は、人間活動に応じてかなり増加してきた。その結果として、生物地球化学サイクルは重大な擾乱を受けてきた。気候システムと生物地球化学システムの非線形相互作用は、人間活動によって生み出された擾乱を、強める（正のフィードバック）ことも弱める（負のフィードバック）こともあり得る。

地表面と気候

- ・ 人間活動に起因する地表面（植生、土壌、水）の変化は、放射、雲量や地上気温の変化を通じて地域的な気候に影響を与え得る。
- ・ 植生被覆の変化は、亜寒帯から熱帯の森林において、地域的なスケールで地表面のエネルギーと水のバランスに影響を与える。モデルは、亜寒帯の森林の増加は積雪のアルベドの効果を減少させ、地域的な温暖化を引き起こすことを示している。熱帯森林についての観測結果もモデル実験も、地表面におけるエネルギーと水のバランスの変化の効果を示している。
- ・ エネルギーと水のバランスに対する土地利用変化の影響は、数十年以上にわたって、地域的なスケールで気候にとって非常に重要になるかもしれない。

炭素循環と気候

- ・ 大気中の二酸化炭素濃度は増加し続けており、現在は工業化時代以前の濃度をほとんど100ppm上回っている。2000～2005年の二酸化炭素の平均年増加率（年当たり $4.1 \pm 0.1 \text{GtC}$ ）は、1990年代（年当たり $3.2 \pm 0.1 \text{GtC}$ ）よりもかなり大きい。化石燃料燃焼とセメントの生成による、二酸化炭素の年間排出量は、1990年代の年当たり平均 $6.4 \pm 0.4 \text{GtC}$ から2000～2005年の年当たり平均 $7.2 \pm 0.3 \text{GtC}$ へと増加した¹。
- ・ 二酸化炭素は大気、海洋、陸上生物圏の間を循環している。それぞれ異なる時間スケールのさまざまな過程を通じて、二酸化炭素は大気中から除去される。二酸化炭

¹ ここや表7.1や7.2において示されている不確かさの幅は、現在利用可能な各研究に基づいて、著者らによって可能性が高い（66%）と推定される範囲の評価である。炭素循環のすべての主要な項目に対して、可能性が非常に高い（90%）という評価が可能になるほど十分な研究成果が集まっていない。

素の増加量のうち、約 50%は 30 年以内に大気から除かれ、さらなる 30%が数世紀のうちに除去されるであろう。残りの 20%は何千年にもわたって大気中にとどまるかもしれない。

- 海洋による二酸化炭素吸収の、改善された推定結果によると、1990 年代から 21 世紀の最初の 5 年間にかけて、海洋の炭素吸収量は年当たり $2.2\pm 0.5\text{GtC}$ でほとんど変わっていないことが示唆される。モデル実験によれば、もし大気中の二酸化炭素が増え続けるなら、化石燃料の燃焼とセメント生成により排出される二酸化炭素のうち海洋に吸収される部分は減少するであろう。
- 大気中の二酸化炭素の増加率にみられる年々～数十年規模の変動では、気候変動に対する陸上生物圏の応答が支配的要因である。正味の陸上生物圏の炭素吸収量は、1980 年代には年当たり $0.3\pm 0.9\text{GtC}$ 、1990 年代には年当たり $1.0\pm 0.6\text{GtC}$ 、2000～2005 年には年当たり $0.9\pm 0.6\text{GtC}$ と推定され、これは、この炭素吸収量に十年規模の変化が観測された証拠である。
- 幾つかの手法を組み合わせることにより、土地利用変化に起因する大気への二酸化炭素フラックスは、1990 年代には年当たり $1.6 (0.5\sim 2.7) \text{GtC}$ だったと推定される。第 3 次評価報告書からの変更点として、1980 年代に対する推定値が年当たり $1.4 (0.4\sim 2.3) \text{GtC}$ へと減少したことは、1980 年代と 1990 年代でほとんど変化がなかったことと、土地利用変化に起因する正味の二酸化炭素排出量が依然不確実であり続けていることを示唆している。
- 自然の原因と人間活動に起因する火災は、放射的、光化学的に活性な微量気体とエアロゾルを相当量大気中に排出する。もし、火災の頻度や規模が気候変化に伴って増加するとすれば、その期間中は、二酸化炭素排出量が正味で増加することが予想される。
- 1958 年の大気中二酸化炭素濃度の観測開始以来、大気中二酸化炭素濃度の増加率の中に、化石燃料の燃焼とセメントの生成による二酸化炭素排出が占める割合には、有意な変化傾向はない。この“大気中の割合”はこの期間ほとんど変化していない。
- 海洋による二酸化炭素の吸収は、海洋の平均 pH を、1750 年よりほぼ 0.1 下げている（酸性度の増加）。海洋生態系への波及効果として、有殻類の石灰化の減少と、より長期的には炭酸塩沈殿物の分解が起きるかもしれない。

- ・ 第一世代の気候・炭素循環結合モデルの結果によると、地球温暖化によって人為起源の二酸化炭素が大気に残留する割合が増加する。この気候・炭素循環の正のフィードバックにより、IPCC（2000）の排出シナリオに関する特別報告（SRES）A2 排出シナリオでのモデル予測結果において、大気中の二酸化炭素は、2100年までに20～224ppm 追加的に増加する。

反応性ガスと気候

- ・ 大気中のメタン濃度は、工業化時代以前の推定値と比べて増加したことが観測されており、これは、農業、エネルギー生産、廃棄物処理、バイオマス燃焼等の人間活動に直接関連している。メチルクロロホルムの観測結果から、過去数十年間にわたってヒドロキシルラジカル（OH）の濃度、すなわちメタンの除去率に有意な傾向はないことが示される（第2章参照）。1993年頃からの大気中メタン濃度の増加率減少は、全排出量がほぼ一定の間に、大気が平衡状態に近づいていることが原因である可能性が高い。しかしながら、より高温多湿の気候のもとでは、湿地からのメタン排出量は将来増加し、より高温乾燥の気候では減少する可能性が高い。
- ・ 対流圏のOH濃度には、窒素酸化物、一酸化炭素、有機物の排出の変化と、気候変化の効果が打ち消し合うため、今後数十年にわたって長期トレンドはないとみられる。OHの年々変動はメタンの変動に引き続き影響を与えるかもしれない。
- ・ モデルによる対流圏オゾンの世界的収支の新たな推定結果は、成層圏からのオゾンの流入（年当たり約500 Tg）は、第3次評価報告書の推定値（年当たり770 Tg）より小さくなったことを示している。一方、光化学的な生成率と破壊率（それぞれ年当たり約5000 Tgと約4500 Tg）は、第3次評価報告書の推定値（年当たりそれぞれ3400 Tgと3500 Tg）より大きくなっている。このことは、対流圏の化学過程や排出の変化に対して、オゾンがより敏感であることを意味している。
- ・ 工業化時代以前の推定値に比べて、窒素酸化物と一酸化窒素の排出量の観測された増加は、肥料使用の増加、農業の集約化と化石燃料燃焼を含む人間活動によりもたらされる窒素循環の‘加速’と直接関連している可能性が非常に高い。
- ・ 将来の気候変動により、水蒸気の増加と、成層圏からの流入増大の効果が競合し、バックグラウンドの対流圏オゾンは増加するかもしれないし、減少するかもしれない。気温の上昇と循環の弱まりにより、地域的なオゾン汚染の悪化が予想される。
- ・ 将来の気候変動により、汚染物質の拡散率の変化、オゾンとエアロゾルを生み出す

化学的環境の変化及び生物圏、火災、ダストの排出強度の変化によって、大気質に顕著な悪化が起きるかもしれない。これらの効果の符号と大きさは、かなり不確実でかつ地域によって異なるであろう。

- ・ 成層圏オゾンの将来の変化、すなわち、工業的に製造されたハロカーボン類による破壊からの回復は、二酸化炭素濃度増加による成層圏の寒冷化と大気循環の変化に影響されるだろう。極域の下部成層圏（より低温であることが、極成層圏雲の雲粒上で活性化された塩素によるオゾンの破壊に好都合である）をおそらく例外として、成層圏の寒冷化は、オゾン破壊を減少させ、オゾン全量を増加させるであろう。

エアロゾルと気候

- ・ 硫酸塩エアロゾルのために、世界平均気温は温室効果ガス濃度のみから期待される気温よりも低くなっている。
- ・ エアロゾルは、太陽放射を散乱・吸収することにより放射フラックスに影響を及ぼす（直接効果、第2章参照）。またエアロゾルは、雲凝結核や氷晶核として作用することから、雲や水循環と相互に影響しあう。ある与えられた雲水量に対して、多量の凝結核は雲のアルベドを増加させ（間接的な雲アルベド効果）、降水効率が減少する（間接的な雲の寿命効果）。これら二つの効果は、大気上端での地球全体の年平均の正味の放射を減少させる可能性が高い。しかしながら、これらの効果は、エアロゾルを吸収することによる雲粒の蒸発（準直接効果）と氷晶核の増加（氷結効果）の両方、またはいずれかにより、幾分相殺されるかもしれない。
- ・ 主に雲のパラメタリゼーションの改良により、推定された総エアロゾル効果の大きさは第3次評価報告書の値よりも小さくなった。しかし、なお大きな不確実性が残っている。
- ・ 第2章では、間接的雲アルベド効果による放射強制力は -0.7W/m^2 （90%信頼区間で $-0.3\sim-1.8\text{W/m}^2$ ）と推定されている。雲の寿命効果や準直接効果、エアロゾルの氷晶雲に対する効果によるフィードバックは、雲のアルベド効果を強める方向と弱める方向のどちらにも働き得る。気候モデルによれば、工業化時代以前からの大気上端での正味放射の変化へのエアロゾルによる全効果（間接効果と直接効果）の合計は、 -1.2W/m^2 （ $-0.2\sim-2.3\text{W/m}^2$ ）と推定される。一方、逆解析による推定では、間接的なエアロゾルの効果は $-0.1\sim-1.7\text{W/m}^2$ と推定されている（第9章参照）。
- ・ 降水に対するエアロゾルの効果の総量はさらに不確実で、モデルの結果は、降水量

はほとんど変わらないとするものから 1 日当たり 0.13mm 減少するというものまである。大気大循環モデルを、海面水温と蒸発量に変化し得る海洋混合層モデルと結合すると、降水量の減少はより大きくなる。

- ・ 不足栄養物質を含む土壌粒子の沈着は、海陸双方において、光合成による炭素固定を強化し得る。気候変化はダスト粒子の発生源に影響を及ぼす可能性が高い。
- ・ 第 3 次評価報告書以来、エアロゾル循環を介した、海洋生物圏と陸上生物圏の気候システムへの関連付けに進展がみられた。植物や海洋生物圏からのエアロゾル前駆物質の排出量は気候変化に応答すると思われる。

よくある質問と回答

FAQ7.1: 工業化時代の間の大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスの増加は、人間の活動に起因するものか?

そうである。工業化時代の間、大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスの増加は、人間の活動に起因するものである。実際には、観測された大気中の二酸化炭素濃度の増加量は、1959 年以降の人間活動によって排出された二酸化炭素量の 55% に過ぎないため、人間活動による排出を完全に反映しているものではない。残りは、地上の植物と海洋によって吸収された。いかなる場合でも、大気中の温室効果ガスの濃度とその増加は、発生源（人間活動と自然のシステムからのガスの排出）と吸収源（異なる化合物への転化による大気からのガスの除去）の間のバランスで決定される。化石燃料の燃焼（及びセメント製造からのより小さな寄与を加えて）は、人間による二酸化炭素排出量の 75% 以上を占めている。残りは、土地利用変化（主に森林破壊）である。もう一つの重要な温室効果ガスであるメタンについては、人間活動による排出は、過去 25 年にわたって自然起源の排出を上回った。一酸化二窒素については、人間活動による排出と自然起源の排出は等しい。ほとんどの寿命の長いハロゲン含有ガス（例えばクロロフルオロカーボン類）は大部分人間によって生産されたもので、工業化時代以前の大気には存在していなかった。平均すると、現在の対流圏オゾンは、工業化時代以前から 38% 増加した。この増加は、人間活動によって排出される寿命の短い汚染物質の大気中での反応の結果である。現在、二酸化炭素の濃度は 379ppm、メタンの濃度は 1774ppb 以上で、どちらも少なくとも過去 65 万年間（その間、二酸化炭素は 180~300ppm、メタンは 320~790ppb にとどまっていた）のどの時よりも非常に高い可能性が非常に高い。最近の変化率は劇的で、前例のないものである。二酸化炭素が 1000 年間当たり 30ppm を上回って増加することは一度もなかったが、現在、二酸化炭素はわずか過去 17 年で 30ppm 上昇した。

二酸化炭素

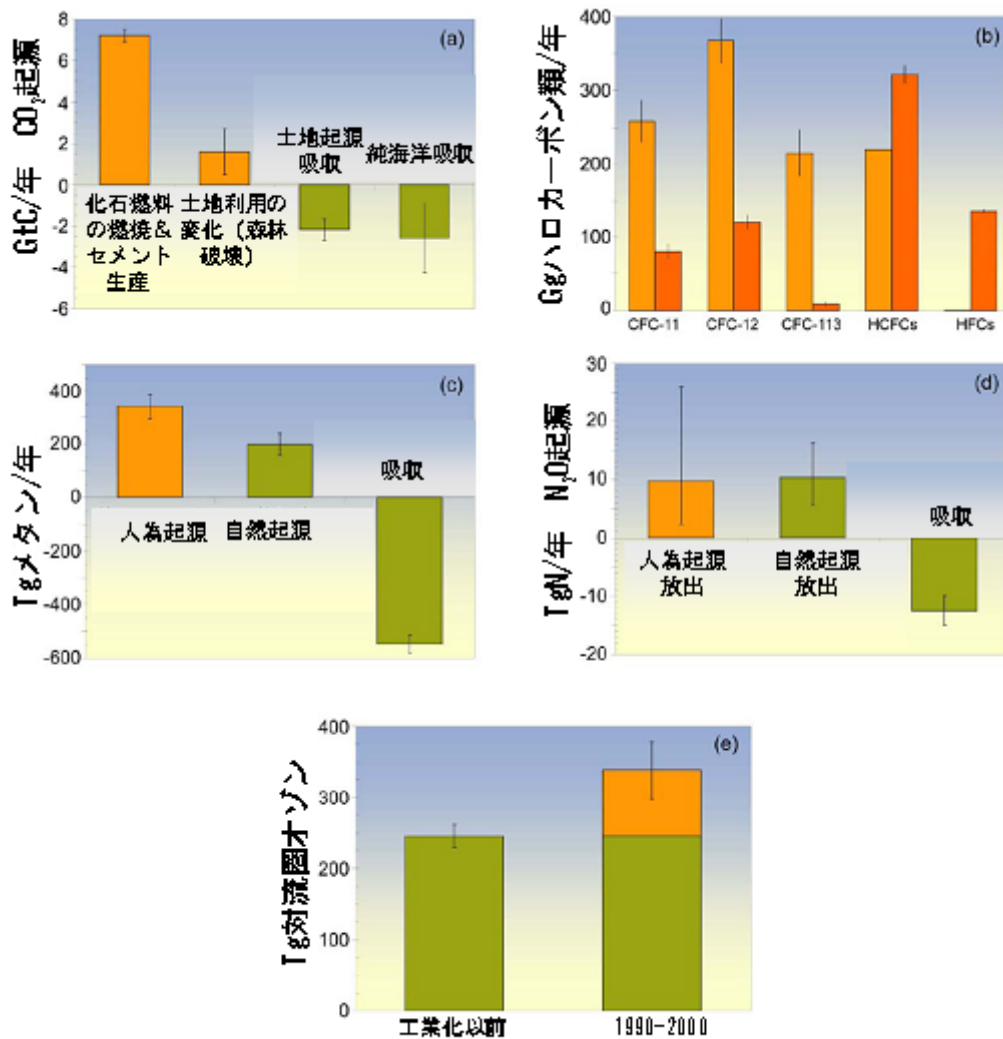
セメント製造からの寄与と化石燃料燃焼に起因する二酸化炭素排出 (FAQ7.1 図 1a) は、工業化時代以前からの大気中の二酸化炭素濃度の増加の 75%以上を占めている。残りの増加は、農法の変化による寄与を含めて、森林破壊を主とした土地利用変化 (と関連するバイオマス燃焼) によるものである。これらの増加はすべて人間の活動に起因する。自然の炭素循環では、大気中の二酸化炭素での過去 25 年間にわたる年当たり 3.2~4.1GtC (1GtC は、10 の 15 乗グラム (10 億トン) の炭素を表す) の観測された増加を説明することができない。

光合成、呼吸、腐敗、海面におけるガス交換などの自然過程は、陸と大気 (年当たり約 120GtC と推定)、海と大気 (年当たり約 90GtC と推定、本報告書図 7.3 参照) の間の二酸化炭素の大規模な交換、つまり排出と吸収を引き起こしている。炭素の自然の吸収源は、この 15 年にわたって、正味で年当たり約 3.3GtC の二酸化炭素を取り込み、人為起源の排出の一部を相殺している。過去 15 年にわたって人為的に生み出された二酸化炭素のほぼ半分を吸収してきた自然の吸収源がなかったら、大気中の二酸化炭素濃度はさらに劇的に上昇していただろう。

大気中の二酸化炭素の特徴、特に軽い炭素原子に対する重い炭素原子の比が変化してきており、これは化石燃料起源の炭素が加わったためであると説明できることから、大気中の二酸化炭素の増加が人間の活動に起因することが分かっている。さらに、化石燃料の燃焼に伴い酸素が減少することから予想されてきた通り、二酸化炭素の増加につれて、大気中の窒素に対する酸素の比率が減少した。C¹³ 同位体と呼ばれる重い炭素は、植物及び過去の植物から作られた化石燃料では少なく、海中の炭素、火山または地熱による排出には多く含まれている。大気中の C¹³ 同位体の相対的な量は減少してきており、これは炭素の増分が化石燃料と植物に由来することを示している。炭素にはまた、微量の放射性同位体 (C¹⁴) が存在し、それは大気中の二酸化炭素には存在するが、化石燃料には存在しない。大気中の核実験以前には、C¹⁴ の相対的な量が減少し、化石燃料起源の炭素が大気に加わっていたことが分かった。

ハロゲン含有ガス

大気中の寿命の長いハロゲン含有ガス濃度の大部分は人間の活動によるものである。工業化時代以前には、ほんの数種類の自然起源のハロゲン含有ガス (例えば臭化メチルと塩化メチル) しか存在しなかった。化学合成の新しい技術の発達により、20 世紀後半に、化学的に合成されたハロゲン含有ガスが急増した。主要な合成ハロゲン含有ガスの排出量を FAQ7.1 図 1b に示す。図中のクロロフルオロカーボン (CFCs) の大気中の寿命は 45~



FAQ7.1 図1 第4章と第7章で詳述される情報に基づく、大気中の温室効果ガス濃度の変化に対する寄与の内訳。

(a) ~ (d) では、人為的な排出源をオレンジで、自然の発生源と消失源を緑で示す。(e) では、人為起源の対流圏のオゾン量をオレンジで、自然のオゾン量を緑で示す。

(a) 二酸化炭素の排出源と吸収源 (GtC)。二酸化炭素は、化石燃料の燃焼や土地利用の変化等の人間活動により、毎年大気中に排出されている。人間活動に伴い排出された二酸化炭素のうち 57~60%のみが大気中にとどまる。海洋に溶解するものや、植物の生長につれて取り込まれるものもある。土地に関するフラックスは 1990 年代のもの。化石燃料、セメント、海洋による正味の吸収は 2000~2005 年のもの。数値と不確実性は表 7.1 による。

(b) CFC 及びその他のハロゲン含有物質の世界的排出量 (1990 年が明るいオレンジ、2002 年が暗いオレンジ)。これらの化学物質は全く人工物質である。この図で、'HCFCs' は、HCFC-22, -141b, -142b の総称。'HFCs' は HFC-23, 125, 134a, 152a の総称。1Gg は 10⁹g (1000 トン)。ほとんどのデータは第 2 章に引用さ

れた報告書からの引用。

(c) 1983～2004年の、メタンの排出量と吸収量。人間活動によるメタンの排出源は、エネルギー生産、埋め立てによるゴミ処理、反芻動物（牛や羊）、稲作及びバイオマス燃焼である。1Tgは 10^{12} g（100万トン）。数値と不確実性は表7.6で対応する数値の合計の平均値と標準偏差。

(d) 一酸化二窒素の排出量と吸収量。人間活動による一酸化二窒素の排出源は、肥料に含まれる窒素の一酸化二窒素への変化及びその農地からの排出、バイオマス燃焼、家畜、ナイロン生産等の工業過程である。排出量の数値と不確実性は、表7.7の中央値と幅。吸収量は第7.4章より。

(e) 19世紀から20世紀初頭にかけてと、1990～2000年の対流圏オゾン。対流圏オゾン生成の増加は人間活動（化石燃料やバイオ燃料の燃焼により排出される汚染物質の化学反応）に起因する。工業化以前の値と不確実性は、第3次評価報告書の表4.9により、再構成された観測結果から推定された。現在の合計及びその不確実性の幅は、本報告書表7.9のモデル結果（第3次評価報告書のものを除く）の平均と標準偏差。

100年、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFCs）は1～18年、ハイドロフルオロカーボン（HFCs）は1～270年である。パーフルオロカーボン（PFCs、図に示されていない）は、数千年間大気中にとどまる。

CFCsを含む幾つかの重要なハロゲン含有ガスの地表での濃度は、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」とその改正議定書の結果として、安定または減少している。生産が2030年までに段階的に廃止されることになっているHCFCの濃度、京都議定書の対象ガスであるHFCs、PFCsの濃度は現在も増加している。

メタン

大気中のメタン（ CH_4 ）の発生源は、人間の活動起源によるものが、自然起源によるものを上回っている（FAQ7.1 図1c）。1980年以降のメタン濃度増加率がほぼゼロであるにもかかわらず、1960～1999年間のメタン濃度は、1800年までの2000年間のどの40年間と比べても、平均で少なくとも6倍の速さで増加した。大気中メタンの主な自然発生源は湿地である。他の自然の発生源としては、シロアリ、海、植生、メタンハイドレートなどがある。メタンを発生させる人間活動には、石炭と天然ガスからのエネルギー生産、埋め立てによるゴミ処理、牛と羊などの反芻動物の飼育、稲作、バイオマス燃焼などがある。一度排出されると、主に対流圏での化学酸化によって除去されるまで、メタンはおおよそ8.4年間大気中にとどまる。メタンの副次的な消失源として、土壌による吸収と成層圏での破壊がある。

一酸化二窒素

大気中の一酸化二窒素 (N_2O) の発生源は、人間の活動起源によるものが、自然起源によるものとほぼ等しい (FAQ7.1 図 1d)。一酸化二窒素の濃度は、1960~1999 年の間に、1800 年より前の 2000 年間のどの 40 年間と比べても、少なくとも平均で 2 倍の速さで増加した。大気中の一酸化二窒素の主な自然の発生源は、海洋、大気中のアンモニアの酸化及び土壌である。大気中の一酸化二窒素の自然の発生源として熱帯の土壌は特に重要である。一酸化二窒素を排出する人間活動としては、窒素肥料の一酸化二窒素への転化とその農地土壌からの排出、バイオマス燃焼、牛の飼育及びナイロン製造などの工業活動がある。一度排出されると、主に成層圏での破壊によって除去されるまで、一酸化二窒素は約 114 年間大気中にとどまる。

対流圏オゾン

対流圏オゾンは、一酸化炭素、メタン、揮発性有機化合物、窒素酸化物のような大気中の前駆化学物質の光化学反応によって作られる。これらの化学物質は、自然の生物過程から排出されるとともに、土地利用の変化と燃料燃焼を含む人間活動から排出される。対流圏オゾンは、大気中では数日から数週間という比較的短い寿命のため、その分布は非常に変動しやすい上、前駆化学物質、水蒸気、日射量に大きく左右される。対流圏オゾン濃度は、都市大気中、都市の風下域、バイオマス燃焼地域で極めて高くなる。工業化以前から対流圏オゾンは 38% (20-50%) 増加した (FAQ7.1 図 1e) が、これは人為起源によるものである。

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素を合わせた放射強制力の増加は、1960~1999 年の間に、1800 年より前の 2000 年間のどの 40 年間と比べても、6 倍以上速かった可能性が非常に高い。