

地球上の人工物量ヒューマンメイド・マスが生物体量バイオマスを上回る

エミリー・エルハチャム, リアド・ベン・ウリ, ジョナサン・グロゾウスキー, イーノン・M・バー
=オン & ロン・ミロ

ネイチャー、2020年（12月5日）588(7838):442-444.

人類は、地球の顔を形成する支配的な勢力となっている¹⁻⁹。人間の活動によって生み出された物質の総量が、自然界のバイオマス全体と比べてどうなのか、という疑問が出てきている。ここでは、「人為起源物質質量アントロポジェニック・マス」と呼ばれる人間が作り出した物質質量を定量化し、現在約 1.1 テラトンに相当する地球上の排出物を除いた生物体量全体と比較する^{10,11}。その結果、地球がまさにクロスオーバーポイントにあること、つまり 2020 年(±6)には、約 20 年ごとに倍増してきた人為起源物質質量が、世界の総生物体量を上回ることがわかる。平均すると、地球上の一人当たり、その人の体重以上の人為起源の物質質量が毎週生み出されていることになる。このように人間の営みを定量化することで、人為的に誘発された「人新世アントロポシオン」という時代を、質量に基づいて定量的かつ象徴的に特徴づけることができる。

21世紀の地球の顔は、人間の活動や人工物量の生産・蓄積によって、かつてないほどの影響を受けている。地球の巨大さや自然界の無限さを前にした人間の認識の限界を考えると、生物と人工物の全体的なバランスを厳密かつ客観的に測定することが望まれる。しかし、先駆的な取り組み¹⁻⁸にもかかわらず、世界の構成を生物学的物質質量と人工的物質質量の両方の観点から定量化し、比較する全体像が欠落している。

その一例が、私たちの地球の生物体量バイオマスである。人類のマスは全世界のバイオマスの約 0.01%に過ぎないが、私たちの文明は、3,000年前にはすでにかかなりの多様な影響を及ぼしていた⁹。最初の農業革命以降、人類は植物のマスを約2テラトン(Tt、 10^{12} トンの単位、推定値は乾燥質量ベース)から、現在の約1Ttにまで半減させた¹⁰。現代の農業では、作物を栽培する土地の面積が増加しているが、栽培された作物の総質量(約0.01Tt)¹¹より、森林伐採や森林管理などの土地利用の変化によって失われた植物のマスの方がはるかに上回っている¹⁰。このような地球上のバイオマスの動向は、炭素循環や人間の健康に影響を与えている^{12,13}。また、畜産、狩猟、乱獲などの人間の行為は、他のさまざまな分類群タクサのマスにも大きな影響を与えている^{11,14,15}。地球上に残された排出物を除い

バイオマス¹¹の最近の調査によると、質量ベースでは植物が大部分(約90%)を占めており¹⁶、次いで細菌、菌類、古細菌、原生生物、動物となっている。

バイオマスだけでなく、人類の地球規模での影響が加速するにつれ、社会経済システムの物質の流れ(社会経済代謝とも呼ばれる)を定量的に評価し、監視することがますます必要になっている^{17,18}。この定量化は、産業エコロジーの分野で、物質収支会計に基づいた経済全体の物質フロー分析フレームワークの中核をなしている^{19,20}。この広範囲に開発されたフレームワークにより、研究者は社会の物質的基盤を、ローカルおよびグローバルなスケールで調査することができる。このフレームワークには、社会経済的な物質資源の物質質量と組成、およびインプットとアウトプットの物質フローが含まれる。最近の研究では、この枠組みを使用して拡張し、人間が作った物質質量の流れと現存量^{21,22}(建物、道路、機械など、人間が作ったもので、現在も使用されているもの)の世界的な値が定量化された。

このように、排出物を除いたバイオマス¹¹と人間が作った物質質量の両方を世界的に定量化できるようになったことで、この論文の主眼である両者の包括的な比較を行うことができるようになった。バイオマスと人工物量を比較するには、りんごとオレンジの比較ではなく、りんごと携帯電話の比較のように、属性の異なるものを一緒にする必要がある。しかし、人類を取り囲み、支えているのは生物であるバイオマスであり、人類が生み出した物質質量を定量的に把握するためには、論理的に自然な参照点であることがわかる。人類が作り出した物質質量とバイオマスを時系列で対比させることで、地球上で進化する人類の優位性を継続的に評価するための新たな側面を提示し、「人新世」を視覚的・象徴的に特徴づけることができる。

ここでは、1900年以降の全世界のバイオマスと人工物量を、水を除いた乾燥重量で^{10¹⁸}グラムに相当するテラトン単位で推定した。バイオマスは、地球全体におけるすべての生物分類群の物質質量を表している¹¹。人為起源的な物質質量とは、人間が作った無生物の固形物に含まれる物質質量と定義されている(解体や使用停止されていないものは「人為起源的な物質質量廃棄物」と定義している)。人間自身(およびその家畜)の物質質量は、当然ながら地球上のバイオマスの一部として計上される。いずれにしても、その物質質量の寄与はごくわずかである。図1は、調査期間中のバイオマスと人為起源的な物質質量の変化を示している。この2つは、明らかに異なる時間的な変化を示している。過去100年間、人為起源的な物質質量は急速に増加しており、ほぼ20年ごとにムーアの法則のような仕方で倍増している。一方、バイオマス総量はそれほど大きく変化していない(森林伐採、植林、CO₂肥沃化効果などが複雑に絡み合って影響している)。人為起源的な物質質量の蓄積は、過去5年間の平均で、現在、年間30Gtに達している。これは、地球上の一人一人が毎週、自分の体重以上の人為起源的な物質質量を生み出していることに相当する。その

結果、人為起源的な物質質量と全体のバイオマスとの差が急速に縮まっている。この2つの曲線が交差するのは、2020年±6年(1 s.d.)で、この時点で人為起源的な物質質量がバイオマスを上回ることになる。

人為起源的な物質質量は、人間が作ったものを構成するサブグループ²²(拡張データ表1)、すなわち、コンクリート、骨材、レンガ、アスファルト、金属、「その他」の成分(紙や工業に使われる木材、ガラス、プラスチック)に分けられる。図1に示すように、人為起源的な物質質量は、コンクリートと骨材(砂利など)が多くを占めている。交差する年の不確実性は、バイオマス全体の不確実性が±16%、人為起源的な物質質量が±6%であり、すべての不確実性は±1 標準偏差(s.d.)として報告されていることに起因する。図1の分析では、バイオマスを乾燥重量ベースで示している。図2は、補足的な観点から、バイオマスを湿潤重量ベースで示し、人為起源的な物質質量および蓄積された人為起源的な物質質量の廃棄物と比較している。廃棄物とは、解体されたり使用されなくなったりした人為起源的な物質質量を指す(時間積分された累積固形廃棄物の流れ、以下、単に「廃棄物」と呼ぶ)。採掘や景観の改変などによって掘り起こされた未利用の塊は含まない)。廃棄物を含めると、乾燥バイオマスは2013年(±5年)に超えている。湿潤重量ベースでは、現在のバイオマスは約2.2Ttで、廃棄物を含めた場合(2031年±9年)と、含めない場合(2037年±10年)では、2030年代に人為起源的な物質質量が上回ると予想されている。人為起源的な物質質量の定義が交差年に与える影響についての感度分析を拡張データ図1に示し、詳細は補足情報セクション1に記載した。

図3は、主だった人工物質量と生物学的存在との主要な関係を示している。私たちの分析では、建物とインフラ(コンクリート、骨材、レンガ、アスファルトで構成される)と樹木と低木(植物の大部分であり、したがって全体のバイオマスの大部分を占める)の2つの主要な物質質量カテゴリーがある。最近では、前者が後者を上回っていることがわかった。同様に、生産されたプラスチックの世界的な物質質量は、すべての陸生および海洋動物を合わせた総物質質量よりも大きいことを示している。

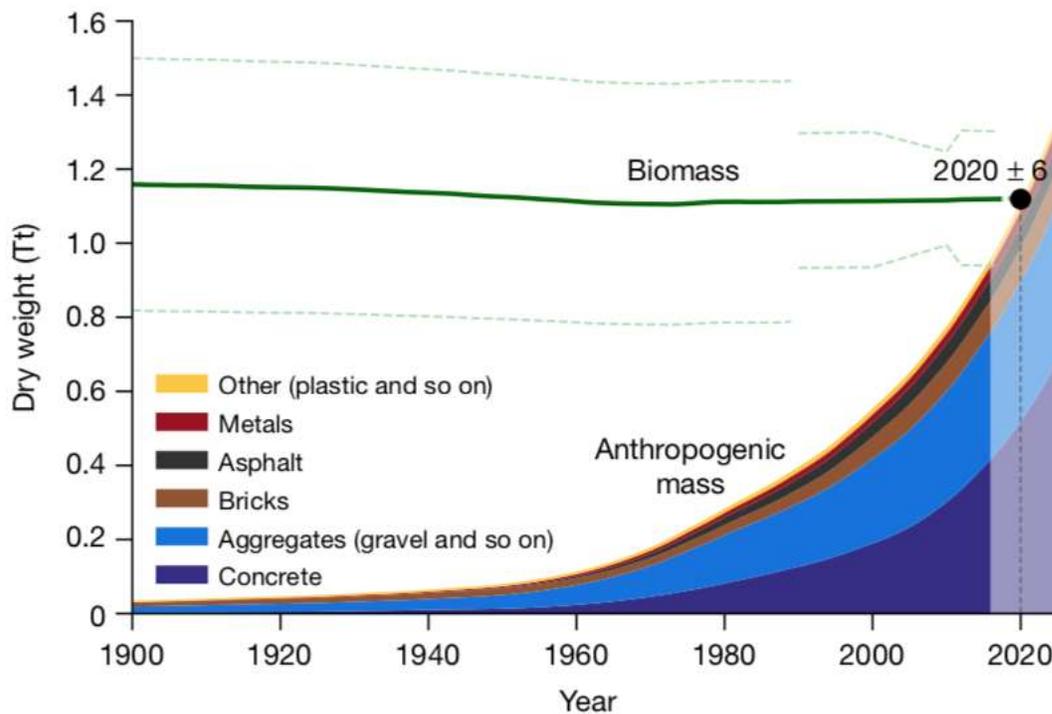


図1 20世紀初頭以降のバイオマスと人為起源的な物質量の推定値(乾燥質量ベース)。緑の線はバイオマス総重量を示す(緑の破線、 ± 1 s.d.)。人為起源的な物質量の重量は面積図としてプロットされており、色のついた領域の高さは、その年までに蓄積された対応するカテゴリーの物質量を表している。ここで紹介する人為起源的な物質量は、大きく6つのカテゴリーに分類される。2020 ± 6 年は、バイオマスが人為起源的な物質量を超える時期にあたる。1900年以降の人為起源的な物質量のデータは、文献²²から単年の分解能で取得した。現在のバイオマス値は文献¹¹に基づいており、植物については文献¹⁰の推定値に基づいている。交差点の年の不確実性は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、10,000回繰り返して算出した(「方法」を参照)。データは2015年から2025年の間に外挿された(薄い領域;「方法」を参照)。金属と「その他」のグループのストック累積の詳細については、拡張データ図4、5を参照。

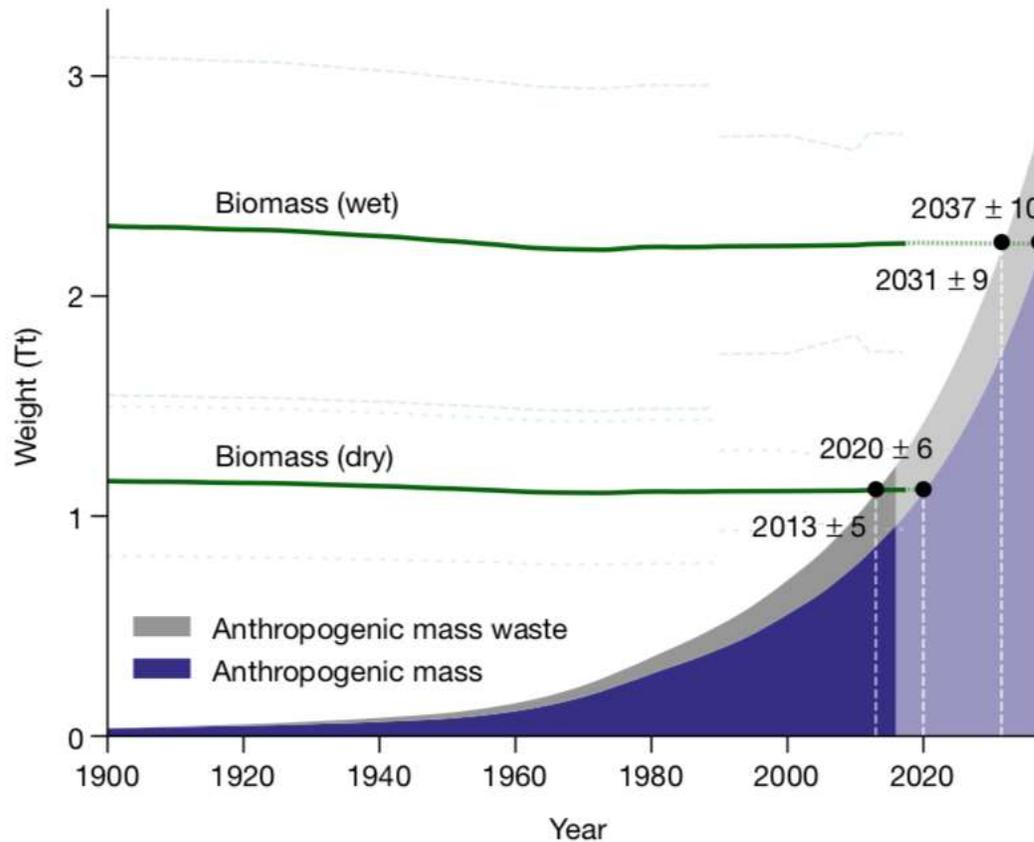


図2 20世紀初頭以降のバイオマス(乾燥・湿潤)、人為起源物質質量、人為起源物質質量の廃棄物の推定値。緑の線はバイオマスの総重量(±1 s.d.)を示す。人為起源物質質量の重量は面積図としてプロットされている。湿潤重量の推定値は、図1に示した結果と、主要成分のそれぞれの含水量に基づいている(「方法」を参照)。2013±5年は、乾燥バイオマスが廃棄物を含む人為起源物質質量を上回る時期である。2037±10年と2031±9年は、それぞれ人為起源物質質量および生成された人為起源物質質量の合計値が湿潤バイオマスを上回る時期である。交差する年の不確実性は、10,000回繰り返すモンテカルロ・シミュレーションを用いて算出した(「方法」を参照)。重量は2015年から2037年の間に外挿されている(薄い部分;方法を参照)。



図3 | 2020年の世界のバイオマスと人為起源物質量の主要構成要素の対比(乾燥重量ベース)。各ペアの円の面積の比率は、図示された2つの物質量の対応する質量比を表している。見やすくするため、2つのペアは異なる尺度を使用している。プラスチックの推定値には、現在使用されているプラスチックと、リサイクルを考慮したプラスチック廃棄物が含まれている。インフラストラクチャーには、道路などの建設された要素の物質量が含まれる。

考察

20世紀初頭、人為起源物質量は世界のバイオマスのわずか3%に過ぎず、乾燥重量ベースで約1.1Ttの大差があった。それが約120年後の2020年には、人為起源物質量が世界全体のバイオマス量を上回っている。このように、人為起源物質量が排出物を除いたバイオマスを上回る時期は、バイオマスや人為起源物質量の定義(湿潤重量ベースか乾燥重量ベースかなど)に左右される。しかし、さまざまな定義のもとで、過去10年または今後20年のうちに移行点があることがわかった(補足情報セクション1、拡張データ図1)。

調査期間中の人為起源物質組成の変化を分析したところ、特定の傾向が浮き彫りになった(拡張データ図 2)。例えば、レンガが主役の建築物からコンクリートへと徐々に移行し、1950年代半ばにはコンクリートが主役になったことや、1960年代から道路舗装の主要材料としてアスファルトが登場したことなどが明らかになっている。さらに、人為起源物質量の蓄積率を分析すると、拡張データ図 3に示すように、20世紀初頭からの人類の道のりを物質面から見るができる。人為起源物質量総量の変化は、世界大戦や大規模な経済危機などの世界的な出来事と関連している。特に、第二次世界大戦直後の時期には、ピーク時に年率 5%以上の人為起源物質量の増加が続いている。この時期は「大加速」と呼ばれ、消費の拡大と都市開発が特徴的である²³。現在の傾向が続けば、廃棄物を含めた人為起源物質量は、2040年までに 3兆トンを超え、地球上の乾燥バイオマスのほぼ 3倍になると予想されている。

これまでの研究では、純一次生産量の人間による利用を定量化するなど²⁴⁻²⁶、生物圏の生産性フローを人間が利用するために配分することに焦点を当ててきた。この研究で記録されている人為起源物質量は、バイオマスのストックから生じたものではなく、大部分が岩石と鉱物という桁違いのストックの変換から生じている。このようにして、人類は地表近くの地質堆積物を社会的に有用な形に変換しており、自然の生息地や生物多様性、さまざまな気候や生物地球化学的サイクルに大きな影響を与えている。

本研究は、人間の活動が地球に与える規模と影響を定量化し、評価しようとする最近の取り組みに加わるものである^{9,23,27,28}。これらの活動の影響は非常に急激かつ多大なものであり、現在の地質学的な時代を「アントロポシーン人新世」と改称することが提案されている²⁹⁻³²。我々の研究は、この提案を厳密かつ定量的に立証するものである。同時に、我々の時代への移行を象徴的かつ定量的に示すことで、この議論に新たな一面を加えている。

オンラインコンテンツ

すべての方法、追加の参考文献、Nature Research報告書の要約、ソースデータ、拡張データ、補足情報、謝辞、査読情報、著者の貢献と競合する利益の詳細、データとコードの利用可能性に関する声明は、以下で入手できる。

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.

出版社の注釈 Springer Nature社は、掲載された地図や所属機関の管轄権に関する主張については中立的な立場をとっている。

方法

人為起源物質量の定義

私たちが定義する人工物量ヒューマンメイド・マス（ここでは人為起源物質量と呼ぶ）とは、人間が作った（まだ取り壊されたり使われたりしていない）無生物の固形物に埋め込まれた物質量のことである。それは、自然環境から社会経済システムへの物質的な流れに由来し、人工資本とアーテファクトでも知られる人工物のストックに蓄積される²²。人為起源物質量は、物質的技術圏テクノスフィアと呼ばれるものの目に見える非生物学的な構成要素である^{6,7}。物質的技術圏の生物学的構成要素である農地（例えば、米、干し草、綿の畑で、社会経済システムへのフローを生み出す³³）や家畜（社会経済システムの一部）は、生きた自然の生き物であるため、人間の目的のためであっても、バイオマスに分類した。逆に、建築物に使用される工業用木材は、人間が作った人工物の中に組み込まれているため、人工物に分類した。人間が作った物を計上するための同様のアプローチは、参考文献⁵の第1章に示されている⁵。人為起源物質量の定義とその交点の年への影響に関する感度分析は、補足情報セクション1と拡張データ図1、および <https://anthropomass.org/analysis/> に掲載されている。

人為起源物質量は、コンクリート、骨材、レンガ、アスファルト、金属、さらに木材、ガラス、プラスチックからなるその他の成分の6つのサブグループに分けられた。骨材のグループには、道路や建物の敷石となる砂利や砂が含まれる。コンクリートやアスファルトに組み込まれた骨材の物質量は、コンクリートとアスファルトのカテゴリーに個別に計上されている^{21,22,34}。一部の物質のフローについてはデータがないか、推定されているが、全体としては、ここで紹介した人為起源物質量のカテゴリーは、材料の使用をほぼ完全にカバーしている（物質量にして98%以上²¹）。物質フロー分析の慣例として、現在推定されているフロー²²には、将来的な利用が指定されていない抽出された物質（例えば、「建設

中に掘削された土と岩、鉱山からの残土、林業における伐採の未使用部分³³⁾は含まれていない。浚渫^{しゅんせつ}による土砂の移動も同様に推定に含まれていない³⁵⁾。

人為起源物質量の廃棄物を評価するために、使用済みの廃棄物の物質質量フローを時系列で統合した。データの都合上、1900年以降の廃棄物のみを計上している。工業用の木材や紙に由来する人為的な大量の木質廃棄物²¹⁾は、木材が比較的急速に分解されるため、廃棄物の推定値には含まれていない。追加の廃棄物グループ(排出物、散逸的使用、選鉱くずなどの出力フローを表す)は、物理的で目に見える要素を表さないため、本計算には含まれておらず、人為起源物質量の定義にも含まれていない。参考文献²²⁾に従い、管理された埋立地も出力された廃棄物の流れの一部として扱った。この廃棄物量の推定値は、リサイクルプロセスを控除した後のものである。焼却(廃棄物の燃焼によるエネルギー生成)は含まれておらず、その結果、廃棄物の過大評価がわずかに(約2%)生じている。使用されなくなったインフラは、「冬眠ストック」とも呼ばれ(例:廃墟など)、廃棄物に分類された。

1900年以降の人為起源物質量データは、文献²²⁾から単年の分解能で入手した。この人為起源物質量は、マテリアルフロー分析²¹⁾で定義された基準に従い、水和水を除いて計上した。1900年の人為起源物質量の開始値は、約35Gtと推定された。この値は、1820年から1900年の間に得られたマテリアルフローの推定値(参考文献²¹⁾の補足情報に記載)に基づいて算出された。1820年以前の推定値は含まれていないことに留意し、その時点で人為起源物質量の値はゼロから始まると仮定した。これは明らかに単純化したものであるが、それまでに蓄積された人為起源物質量は比較的小さく、20世紀以降の全体的な数値にはほとんど寄与していないことになる。

バイオマスの大部分は自然環境系に存在し(人間や家畜のストックという社会経済的要素は無視できる)、食料や飼料は自然環境系から社会経済系へと流れていく。

1900年～2017年のバイオマスの変化

世界のバイオマスを定量化するためには、インベントリ評価^{12,36)}、リモートセンシング³⁷⁾、モデリング^{38,39)}など、さまざまな方法論が用いられてきた。今回の推定では、これらの異なる手法による推定値を統合することを試みた。まず、全世界のバイオマスの約90%を占める植物のバイオマスを推定した¹¹⁾。なお、土壌炭素は生きたバイオマスではないため、本研究では対象外とした。

1990年～2017年の植物バイオマスの推定値。2010年の植物バイオマスの値、約0.45Tt炭素は、参考文献¹¹に基づいている。それは参考文献¹⁰にあるインベントリーやリモートセンシングに基づく世界の植物バイオマスの7つのマップの平均値から構成されている推定値に依拠したものである。炭素量約0.45Ttという推定値は、ほとんどが高めであった過去の推定値を更新したものであり、現在のゴールドスタンダードであることがさまざまな推定値やアプローチを広範に調査し、統合している文献¹⁰で証明されている。

1990年から2017年までの植物の総バイオマス量を推定するために、2つのアプローチに頼った。1つ目は、15種類の動的全球植生モデルの アンサンブル 集合である。2つ目のアプローチは、インベントリー計測^{12,36,40}またはリモートセンシング³⁷を用いた3つの主要なデータソースに基づいている。植物の総バイオマス量の最適な推定値を算出するために、まず、同じアプローチ内のすべてのデータの平均値を取り、次に2つのアプローチのそれぞれで作成された最適な推定値の平均値を取ることで、各アプローチの最適な推定値を算出した。

1990年～2017年の間に、データの入手可能性に応じて選んだ5つの時点(1990年、2000年、2010年、2012年、2017年)での植物バイオマスの推定値を使用した(文献¹²では2007年の推定値を、文献³⁷では1993年の推定値を使用した)。まず、異なる情報源の推定値を2010年の推定値に対して正規化し、各情報源が含む植物バイオマスの構成要素(すべての植物、または森林の割合が一定であると仮定した森林のみ)に応じて、それぞれの推定値を算出した。次に、各時点において、異なる情報源の正規化されたバイオマス推定値の平均値を取り、各時点のバイオマス推定値を算出した(拡張データ図6)。

2つ目の推定値は、15種類の最新の動的全球植生モデル(DGVM: 下記参照)の正規化平均値に基づいている。選定した5つの時点ごとに、得られた推定値をインベントリーおよびリモートセンシングに基づく推定値と平均化し、本研究で使用した植物バイオマスの推定値を得た。

1900年～1990年の植物バイオマスの推定値 1900-1990年の推定値は、15個のDGVMsの アンサンブル 集合年平均値に依存しており、これは上述のように計算された1990年の推定値に基づいて正規化されたものである。

非植物性バイオマスの推定値 植物以外のバイオマスの推定値は、最近のグローバル・センサス¹¹に基づいて算出され、アーキア・キングダム バクテリアと古細菌界のバイオマスについては新たに更新された^{16,41}。この更新には、バクテリアと古細菌の全体的な物質量の減少が含まれており、炭素量は約0.08から約0.03Ttとなっている。より良い情報がないため、植物以外の推定値は調査期間中一定であると仮定した。非植物性バイオマスは植物性バイオマ

木に比べて桁違いに少ないため、非植物性バイオマスの一時的な変化があったとしても、我々の分析に与える量的な全般的効果はわずかであると考えられる。

全体的なバイオマスの推定 最後のステップとして、植物以外のバイオマスを植物バイオマスに加えた。この合計に炭素重量対乾燥重量係数(バイオマスC含有量の推定の項で説明)を乗じて、本研究で発表するバイオマスの推定値を算出した。

生データから最終結果までのすべてのステップは、以下で公開されているジュピター・ノートブックに記録されている。

https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/biomass_calculation/biomass_calculation.ipynb

動的全球植生モデル (DGVM)

DGVMの出力は、調査期間中、植物バイオマスの推定に使用された。1990年～2017年の間は、上述のようにモデル以外の推定値と統合した。シミュレーション出力はTRENDY v.8プロジェクトの一部であり^{38,39}、土地利用と環境(気候、CO₂)の両方の時間変動効果(TRENDYではS3と表記されている。詳細は文献³⁹および<https://>

sites.exeter.ac.uk/trendyを参照)を含み、同じプロトコルに従った。ここで使用した^{アンサンブル}集合は、以下の15モデルで構成されている。CABLE-POP⁴², CLASS-CTEM⁴³, CLM5.0⁴⁴, DLEM⁴⁵, ISAM⁴⁶, JSBACH⁴⁷, JULES-ES⁴⁸, LPJ⁴⁹, LPJ-GUESS⁵⁰, LPX-Bern⁵¹, OCN⁵², ORCHIDEE⁵³, ORCHIDEE-CNP⁵⁴, SDGVM⁵⁵, VISIT⁵⁶。

人為起源的な物質質量とバイオマスの外挿法

バイオマスの湿潤重量について図.2の交点の時間を推定するために外挿法を用いた。将来のバイオマス変化(2018- 2037)を導き出すために、2010-2017年に算出された線形変化率を用い、それが一定であると仮定した。補足情報セクション2でさらに説明するように、全体的な傾向はほぼ中立であることがわかった。将来(2015年～2037年)の人為起源的な物質質量推定値は、指数関数的な成長シナリオの下で外挿した。指数は、一定であると仮定し、データが入手可能な最新の5年間を基に算出した²²。

バイオマスのC量推定

バイオマス計算の一環として、炭素重量ベースのバイオマスを乾燥重量ベースに変換するために、換算係数(2.25g/g)を乗じた。この換算係数は、^{バイオーム}生物群系ごとに異なる植物区

画(葉、茎、根)のC含有量を推定して算出したものである⁵⁷。バイオームごとに、各植物コンパートメントの質量割合に応じた平均的な植物C含有量を算出した⁵⁸。続いて、各バイオームの質量分率に基づいて、全体的な加重植物C含有量を算出した¹⁰。

次に、植物以外のバイオマスがバイオマス全体の 10%を占めると仮定して、植物と植物以外の要素の加重平均を計算することで、バイオマス全体のC含有量の換算係数を算出した(参考文献¹¹ および更新情報^{16,41} に基づく)。非植物性バイオマスの主な構成要素であるバクテリアのC含有量の推定値は、文献^{59,60} から入手した。生データから最終結果までのすべてのステップは、以下にあるジュピターノートブックに記録されている。

https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/C_content/biomass_C_content_estimation.ipynb

バイオマス湿潤重量の評価

バイオマスの湿潤重量は、湿潤／乾燥物質量の換算係数(M_{wet}/M_{dry} 、湿潤重量と乾燥重量の比)を用いて評価した。この係数は、根、茎、葉の3つのコンパートメントに対応する係数で構成されている。

根の換算係数は、4種の樹木の湿った状態から乾いた状態の根の物質量を30回測定した結果に基づいて算出した⁶¹。換算係数の最良の推定値は、すべてのサンプルの換算係数を計算したものの幾何平均値である。

茎の換算係数は、62の樹種の平均的な木材含水率($(M_{wet} - M_{dry})/M_{dry}$)のデータセットを用いて計算した⁶²。このデータセットには、各樹種の辺材と心材の含水率の値が含まれている。辺材と心材の含水率の平均値(心材と辺材の質量比を1:1と仮定)を用いて、各樹種の含水率の最適な推定値を求めた。次に、すべての含水率の値を湿潤／乾燥物質量換算係数に変換した。全種の換算係数の幾何学的平均値は1.9であり、これを最良の推定値とした。

葉の換算係数は、TRYDB⁶⁹を介して入手した218種の植物を含む乾燥物質量含量(M_{dry}/M_{wet})データセット^{63~68}から導き出した。それぞれの種について、幾何学的平均乾燥物質量の値を算出した。葉の乾燥物質量含有量の最良の推定値は、すべての値の幾何平均値であった。その結果、0.33 g/gであったため、使用した湿潤乾燥物質量換算係数は $1/0.33 = 3.0$ となった。

次に、3つの換算係数に、対応するコンパートメントの全球乾燥物質量¹¹ を乗じて、全球コンパートメントの湿潤物質量を算出した。これらを合計して、植物全体の全球湿潤物質

量を算出した。その後、3つの要素を組み合わせ、全世界の植物の湿潤質量を乾燥質量で割ることにより、1つの統合された換算係数を生成した。この統合係数(2.0 g/g)は、乾燥物質量に応じたバイオマス全体の湿潤物質量を導き出すために、本研究で使用した。生データから最終結果までのすべてのステップは、以下のジュピターノートブックに記録されている。

https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/wet_weight_calculation/wet_weight_calculation.ipynb

不確実性の推定

Python 不確実性パッケージ⁷⁰を用いて誤差の伝播を行った。炭素-乾燥重量変換係数は、異なるバイオマスから得られた炭素含有量の推定値に基づいて算出した(「バイオマスの炭素含有量推定」を参照)。全般的な不確実性は±6%であることがわかった。湿潤/乾燥変換係数は、根、茎、葉を別々に測定した値を用いて算出した(「バイオマスの乾湿重量変換推定」参照)。乾湿重量変換係数の全般的な不確実性は±15%であることがわかった。

人為起源的な物質量とバイオマスが交差する年の不確実性は、モンテカルロシミュレーションを用いて推定した。各パラメータ(湿潤重量や湿潤-乾燥変換係数など)は、その不確実性の範囲に応じてランダムに抽出した。このプロセスを10,000回繰り返し、その結果得られた分布により全般的な不確実性が決定された。不確実性は全て±1 s.d.として報告されている。人為起源的な物質量の不確かさは、正規分布を仮定した参考文献²²の対応する推定値に基づいている。人為的な質量の不確実性は、調査期間中、±2%から±6%の範囲で推移している。廃棄物の不確実性は、1900年の±4%から2015年の±7%までとなっている。すべての計算手順は以下のジュピターノートブックに記載されている。

https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/intersection_year_uncertainty/intersection_year_uncertainty.ipynb

バイオマス計算(「*Biomass change over the years 1900–2017*」に記載)の結果、乾燥バイオマスの不確実性は、1990年以降の年は±16%、それ以前の年は±29%(湿潤重量ベースでは±22%、±33%)となった。この不確実性は、植物成分についてはPython 不確実性パッケージを使用し、非植物成分と伝播⁷⁰についてはモンテカルロシミュレーションを使用して導き出した。すべての計算手順は以下のジュピターノートブックに記載されている。

https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/biomass_calculation/biomass_uncertainty.ipynb

報告概要

研究デザインに関する詳しい情報は、本論文にリンクされているNature Research Reporting Summaryで入手できる。

データの公開

本研究で使用したすべてのデータは、以下のGitHubで公開している。
(https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass)。人為起源的な物質量のデータは、文献²²および <https://boku.ac.at/wiso/sec/data-download> から入手できる。TRENDY Dynamic Global Vegetation Models の出力は <https://sites.exeter.ac.uk/trendy> で入手できる。葉の乾物含量の測定値は、TryDBを介して、以下を通して入手した。<https://www.try-db.org/>。本研究で使用したその他のデータセットは、「方法」および「補足情報」に詳述されているように、公表された文献から入手できる。

コードの入手

本研究で使用したすべてのコードは、以下で入手できる。GitHub (https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass)

1. Ramankutty, N. & Foley, J. A. 世界の土地被覆の歴史的変化の推定: 1700年から1992年までの作付地. *Glob. Biogeochem. Cycles* 13, 997–1027 (1999).
2. Krausmann, F. et al. 20世紀における世界の物質使用量、GDP、人口の増加. *Ecol. Econ.* 68, 2696–2705 (2009).
3. Matthews, E. 国々の重さ: 工業経済圏からの物質流出 (World Resources Inst., 2000).
4. Smil, V. 生物圏の収穫: 私たちが自然から奪ったもの. (MIT Press, 2013).
5. Smil, V. 現代の世界を作る: 素材と脱物質 (John Wiley & Sons, 2013).
6. Haff, P. K. 地質学的現象としてのテクノロジー: 人類の幸福への影響. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*395, 301–309 (2014).

7. Zalasiewicz, J. et al. ^{テクノスフィア} 物理的技術圏の規模と多様性:地質学的観点からの考察. *Anthropocene Rev.* 4, 9–22 (2017).
8. Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Williams, M. & Summerhayes, C. ^{アントロポシオン} 地質学的時間単位としての「人新世」。科学的根拠と現在の議論へのガイド (Cambridge Univ. Press, 2018)
9. Stephens, L. et al. 考古学的評価により、土地利用による地球の初期変化が明らかになる. *Science* 365, 897–902 (2019).
10. Erb, K.-H. et al. 森林管理と放牧が世界の植生バイオマスに与える予想外に大きい影響. *Nature* 553, 73–76 (2018).
11. Bar-On, Y. M., Phillips, R. & Milo, R. 地球上のバイオマス分布. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115, 6506–6511 (2018).
12. Pan, Y. et al. 世界の森林にある大きくて持続的な炭素吸収源. *Science* 333, 988–993 (2011).
13. Reddington, C. L. et al. ブラジルにおける森林伐採関連火災の減少による大気の質と人間の健康の改善. *Nat. Geosci.* 8, 768–771 (2015).
14. Ceballos, G. & Ehrlich, P. R. 哺乳類の個体数減少と絶滅の危機. *Science* 296, 904–907 (2002).
15. WWF. ^{ソシオメタボリック} リビング・プラネット・レポート-2018 より高い目標に向けて. (WWF, 2018).
16. Bar-On, Y. M. & Milo, R. バイオフィルムのグローバルな遍在性を定量的に把握するために. *Nat. Rev. Microbiol.* 17, 199–200 (2019).
17. Pauliuk, S. & Hertwich, E. G. 人間社会の生物物理学的基盤を研究するためのパラダイムとしての社会経済学的代謝. *Ecol. Econ.* 119, 83–93 (2015).
18. Haberl, H. et al. ^{ソシオメタボリック} 社会代謝研究の持続可能性科学への貢献. *Nat. Sustainability* 2, 173–184 (2019).
19. Fischer-Kowalski, M. et al. 経済全体のマテリアルフロー会計の方法論と指標. *J. Ind. Ecol.* 15, 855–876 (2011).

20. Krausmann, F., Schandl, H., Eisenmenger, N., Giljum, S. & Jackson, T. マテリアルフロ
ー会計:持続可能な開発のためにグローバルなマテリアル使用を測定する. *Annu. Rev.
Rev. Environ. Resour.* 42, 647–675 (2017).
21. Krausmann, F. et al. 世界の社会経済的物質ストックは、20世紀中に23倍に増加し、
年間の資源使用量の半分を必要とする. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114, 1880–1885
(2017).
22. Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W. & Wiedenhofer, D. 資源採掘から廃棄物・排出物の
流出まで:グローバル経済の社会経済的新陳代謝 1900–2015年. *Glob. Environ. Change*
52, 131–140 (2018).
23. Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. ^{アントロポシーン}人新世の軌跡:大
いなる加速. *Anthropocene Rev.* 2, 81–98 (2015).
24. Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. & Matson, P. A. 光合成の産物の人間に
よる利用. *Bioscience* 36, 368–373 (1986).
25. Haberl, H. et al. 地球上の陸域生態系における純一次生産の人間による占有の定量
化とマッピング. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 104, 12942–12947 (2007).
26. Haberl, H., Erb, K.-H. & Krausmann, F. 純一次生産の人間による占有: パターン、トレ
ンド、および惑星の境界. *Annu. Rev. Environ. Rev. Environ. Resour.* 39, 363–391 (2014).
27. Vitousek, P. M. 人類による地球生態系の支配. *Science* 277, 494–499 (1997).
28. Dirzo, R. et al. ^{アントロポシーン}人新世における^{デファウンデーション}生物減少. *Science* 345, 401–406 (2014).
29. Crutzen, P. J. 『^{アントロポシーン}人新世での地球システム科学』に所収。(eds. Ehlers, E. & Kraft,
T.) 13–18 (Springer, 2006)。
30. Steffen, W., Crutzen, J. & McNeill, J. R. ^{アントロポシーン}人新世: 人間は今、自然の偉大な力を圧倒
しているのか? *Ambio* 36, 614–621 (2007).
31. Lewis, S. L. & Maslin, M. A. ^{アントロポシーン}人新世を定義する. *Nature* 519, 171–180 (2015).
32. Waters, C. N. et al. ^{アントロポシーン}人新世は機能的にも層位学的にも^{ホロシーン}完新世とは異なる. *Science*
351, aad2622 (2016).

33. Krausmann, F. et al. 経済全体のマテリアルフロー会計. 入門とガイド Version 1, Social Ecology Working Paper 151 (Alpen-Adria Univ., 2015).
34. Miatto, A., Schandl, H., Fishman, T. & Tanikawa, H. 建設に使用される非金属鉱物の世界的なパターンと傾向. *J. Ind. Ecol.* 21, 924–937 (2017).
35. Cooper, A. H., Brown, T. J., Price, S. J., Ford, J. R. & Waters, C. N. 人間は、21世紀の地球上の最も大きな地形学的原動力である. *Anthropocene Rev.* 5, 222–229 (2018).
36. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2010年世界森林資源評価. メインレポート (Food & Agriculture Org., 2010).
37. Liu, Y. Y. et al. 地球上の陸域バイオマスの減少における最近の反転. *Nat. Clim. Chang.* 5, 470–474 (2015).
38. Sitch, S. et al. 二酸化炭素の地域別発生源・吸収源の最近の傾向と要因. *Biogeosciences* 12, 653–679 (2015).
39. Friedlingstein, P. et al. 世界の炭素予算2019. *Earth Syst. Sci.Data* 11, 1783–1838 (2019).
40. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org>.
41. Magnabosco, C. et al. 大陸地下のバイオマスと生物多様性. *Nat. Geosci.* 11, 707–717 (2018).
42. Haverd, V. et al. CABLE地表面モデルの新バージョン (Subversion revision r4601) は、土地利用と土地被覆の変化、木質植生の個体群統計学、および植物の光合成の調整に対する新しい最適化ベースのアプローチを組み込んでいる。 *Geosci. Model Dev.* 11, 2995–3026 (2018).
43. Melton, J. R. & Arora, V. K. カナダ陸域生態系モデル (CTEM) v. 2.0における植物の機能タイプ間の競争. *Geosci. Model Dev.* 9, 323–361 (2016).
44. Lawrence, D. M. et al. コミュニティ・ランド・モデル第5版: 新機能の説明、ベンチマーク、強制不確実性の影響. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11, 4245–4287 (2019).
45. Tian, H. et al. 北米陸域のCO₂吸収量はCH₄とN₂Oの排出量でほぼ相殺される: 温室効果ガス収支の完全な把握に向けて. *Clim. Change* 129, 413–426 (2015).

46. Meiyappan, P., Jain, A. K. & House, J. I. 将来の土地利用と土地利用変化によるCO₂排出に対する窒素制限の影響の増大. *Glob. Biogeochem. Cycles* 29, 1524–1548 (2015).
47. Mauritsen, T. et al. MPI-M地球システムモデル version1.2 (MPI-ESM1.2)の開発とCO₂増加への対応. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11, 998–1038 (2019).
48. Clark, D. B. et al. 共同英国土地環境シミュレータ (JULES), モデルの説明 – Part 2: カーボン・フラックス 二酸化炭素交換量と植生動態. *Geosci. Model Dev.* 4, 701–722 (2011).
49. Poulter, B., Frank, D. C., Hodson, E. L. & Zimmermann, N. E. 土地被覆と気候データの選択が 陸域の炭素動態とCO₂大気中分画の理解におよぼす影響. *Biogeosciences* 8, 2027–2036 (2011).
50. Smith, B. et al. 個体ベースの動的植生モデルにNの循環と一次生産に対するNの制限を取り入れることの意味. *Biogeosciences* 11, 2027–2054 (2014).
51. Lienert, S. & Joos, F. A. モデルパラメータと土地利用による炭素排出量を制約するベイズ式アンサンブルデータ同化法. *Biogeosciences* 15, 2909–2930 (2018).
52. Zaehle, S. & Friend, A. D. O–CN陸面モデルにおける炭素・窒素循環ダイナミクス。1. モデルの説明、サイトスケールでの評価、パラメータ推定値に対する感度. *Glob. Biogeochem. Cycles* 24, GB1005 (2010).
53. Krinner, G. et al. 大気–生物圏結合システム研究のための動的地球植生モデル. *Glob. Biogeochem. Cycles* 19, GB1015 (2005).
54. Goll, D. S. et al. JSBACH(バージョン3.10)による理想的なシミュレーションでの炭素–窒素相互作用. *Geosci. Model Dev.* 10, 2009–2030 (2017).
55. Walker, A. P. et al. 光合成カルボキシル化最大速度(V_{cmax})に対する代替的な特性尺度仮説が世界の総一次生産に与える影響. *New Phytol.* 215, 1370–1386 (2017).
56. Kato, E., Kinoshita, T., Ito, A., Kawamiya, M. & Yamagata, Y. プロセスベースの生物地球化学モデルを用いた、土地利用変化とバイオマス燃焼の空間的に明示された排出シナリオの評価. *J. Land Use Sci.* 8, 104–122 (2013).
57. Tang, Z. et al. 中国の陸域生態系における生産性に関連した植物の炭素・窒素・リン濃度のパターン. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115, 4033–4038 (2018).
58. Poorter, H. et al. 葉、茎、根へのバイオマス配分: 種間変異と環境制御のメタ分析. *New Phytol.* 193, 30–50 (2012).

59. Heldal, M., Norland, S. & Tumyr, O. X線マイクロアナリシス法による個々のバクテリアの乾物と元素含有量の測定. *Appl. Environ. Microbiol.* 50, 1251–1257 (1985).
60. von Stockar, U. & Liu, J. 微生物は常に負のエントロピーを糧にしているのか？微生物の成長の熱力学的分析. *Biochim. Bichim. Biophys. Acta* 1412, 191–211 (1999).
61. Guo, L., Lin, H., Fan, B., Cui, X. & Chen, J. 根の水分量が地中レーダーを用いた根のバイオマス推定に与える影響：フォワード・シミュレーションとフィールド制御実験からの証拠. *Plant Soil* 371, 503–520 (2013).
62. Glass, S. V. & Zelinka, S. L. 『木材ハンドブック：工学材料としての木材』に所収. vol. 190: 4.1–4.19 (US Dept. of Agriculture, 2010).
63. Loveys, B. R. et al. 葉と根の呼吸の熱順化：生得的に成長の早い植物と遅い植物を比較した調査. *Glob. Change Biol.* 9, 895–910 (2003).
64. Sheremetev, S. N. 土壌水分勾配におけるハーブ（水関係と構造機能組織）. (KMK, 2005)。
65. Michaletz, S. T. & Johnson, E. A. A. 森林火災における樹冠焦げの熱伝達モデル ^{クラウンスコーチ} *Can. J. For. Res.* 36, 2839–2851 (2006).
66. Messier, J., McGill, B. J. & Lechowicz, M. J. 形質は生態系のスケールを超えてどのように変化するのか？形質ベースの生態学のためのケース. *Ecol. Lett.* 13, 838–848 (2010).
67. Boucher, F. C., Thuiller, W., Arnoldi, C., Albert, C. H. & Lavergne, S. *Polygonum viviparum* L. (和名. ムカゴトラノオ)の野生個体群における機能的多様性の構造の解明. *Funct.. Ecol.* 27, 382–391 (2013).
68. Dahlin, K. M., Asner, G. P. & Field, C. B. 地中海型生態系における植物群落の化学 ^{プラント・キャンビー} に対する環境および群集の制御. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110, 6895–6900 (2013).
69. Kattge, J. et al. TRY-植物形質のグローバルデータベース. *Glob. Change Biol.* 17, 2905–2935 (2011).
70. Lebigot, E. O. 不確実性：不確実性を伴う計算のためのPythonパッケージ. <https://pythonhosted.org/uncertainties/> (2010).

71. Wiedenhofer, D., Fishman, T., Lauk, C., Haas, W. & Krausmann, F. 物質ストック動態を経済全体のマテリアルフロー会計に統合する: コンセプト、モデル化、1900–2050年のグローバルな適用. *Ecol. Econ.* 156, 121–133 (2019).

謝辞 U. U. Alon, S. Dan, G. Eshel, T. Fishman, E. Gelbrieth, T. Kaufmann, T. Klein, A. Knoll, E. Noor, N. Page, R. Phillips, J. Pongratz, M. Shamir, M. Shtein, B. Smith, C. Waters, T. Wiesel, M. Williams および研究室のメンバーには協力と議論を、S. Sitch および TRENDY DGVM コミュニティにはシミュレーション出力へのアクセスを提供していただいたことに感謝申し上げます。本研究は、欧州研究会議 (Project NOVCARBFIX 646827); ベック-カナダ代替エネルギー研究センター; Dana and Yossie Hollander; ウルマンファミリー財団; ヘルムズリー慈善財団; ラーソン慈善基金; ウォルフソン家族慈善信託; チャールズ・ロスチャイルド およびセルモ・ヌッセンバウムの支援を受けて実施した。R.M.は、チャールズ・アンド・ルイズ・ガートナー講座の教授。Y.M.B.-Oは、アズリエリ・フェロー。

著者の貢献 E.E., L.B.U., R.M. が原稿を執筆した。E.E.は研究とデータ解析の大部分を行った。L.B.U.は、人為起源物質質量分析とバイオマスの推定に貢献した。Y.M.B.-O.はバイオマス量の推定と炭素含有量の算出に貢献した。J.G.は水分量の算出に貢献した。E.E., J.G., Y.M.B.-O. が不確実性解析を実施。E.E.とR.M.が研究の構想を練った。R.M.が本研究を監督した。全著者が結果について議論し、原稿にコメントした。

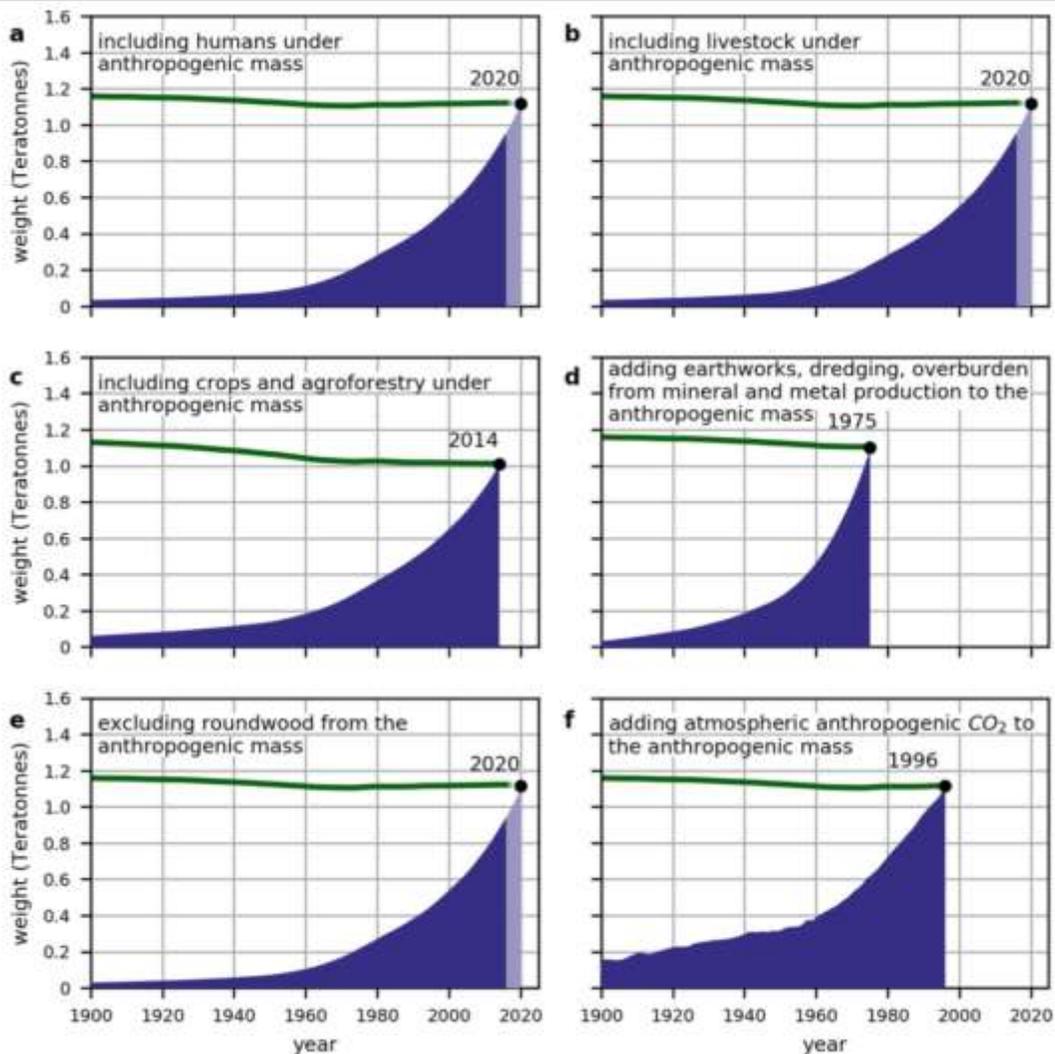
競合する利害関係 著者は競合する利害関係がないことを表明する。

補足情報 <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>。

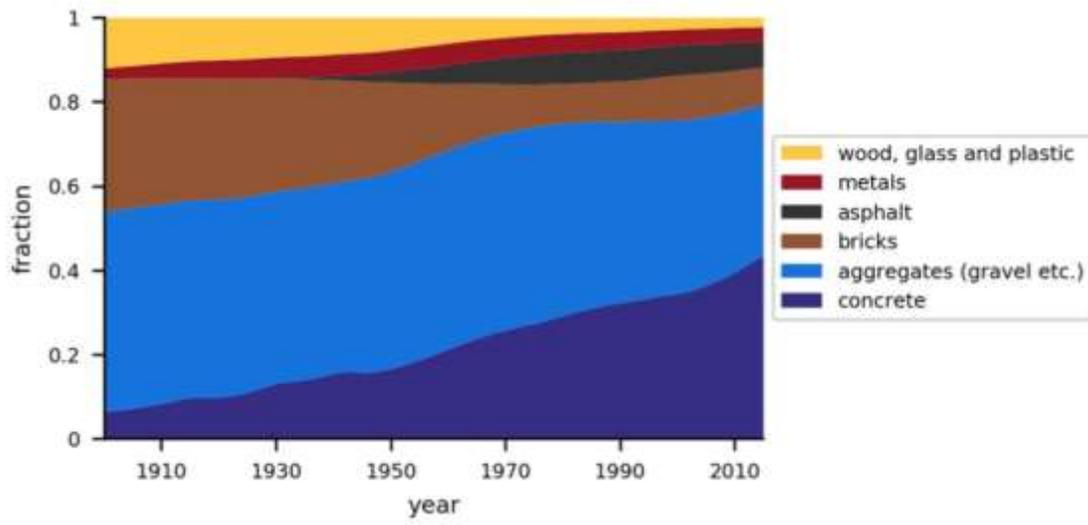
通信および資料請求は、R.M.宛のこと。

査読者情報 本論文の査読にご協力いただいた Fridolin Krausmann 氏, Dominik Wiedenhofer 氏, およびその他の匿名の査読者にNatureから感謝申し上げます。

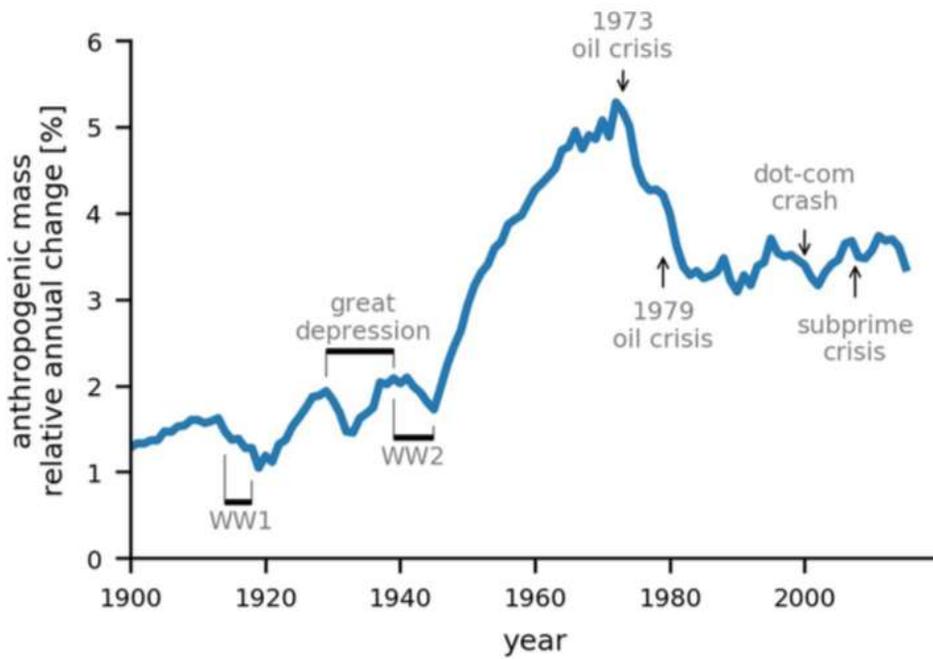
転載および許可に関する情報は、<http://www.nature.com/reprints>。



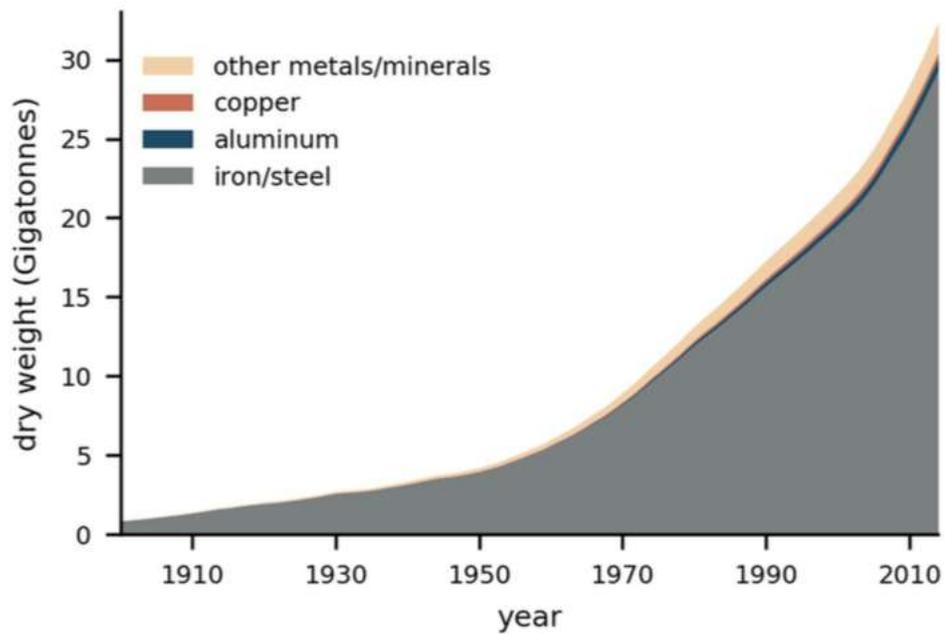
拡張データ 図1 | 人為起源物質量の定義の感度分析。人為起源物質量(濃い紫)に、a. 人口質量、b.家畜質量、c.農作物・農林業質量、d.土木・浚渫・鉱物・金属生産に伴う廃棄物・残渣物質、f.人為起源の大気中 CO₂ストック物質量を加えた場合、および工業用丸太の質量を除いた場合 e の効果を示す。バイオマスの総重量は緑の線で描かれている。黒い点は、代替的な人為起源物質量の定義に基づく交点の年を示す。紫色の領域と薄緑色の破線は、それぞれ外挿した人為的質量とバイオマスの推定値を示す。感度分析の詳細については、補足情報セクション1に記載した。



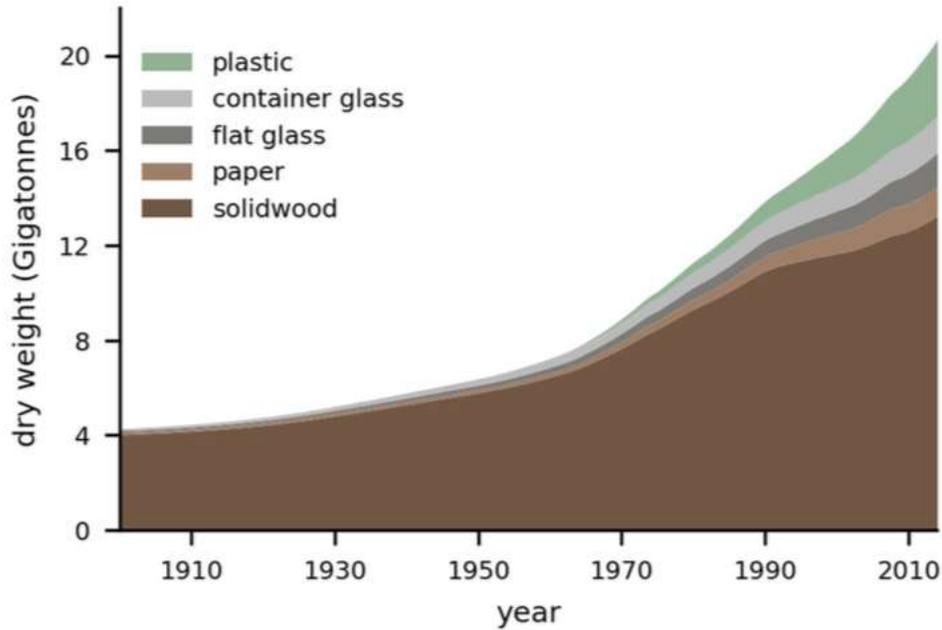
拡張データ 図 2 | 1900 年以降の人為起源物質質量組成を物質群に分けて示したもの。データセットは文献²²に基づく。



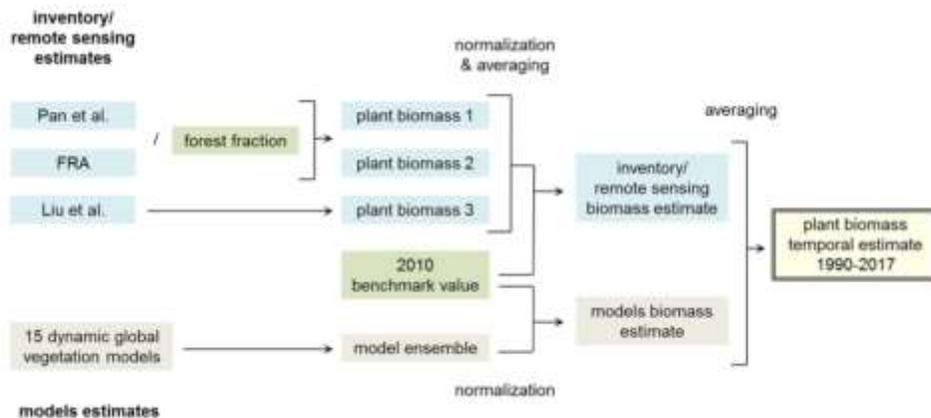
拡張データ 図 3 | 人為起源物質質量の年間相対変化量と注目すべき世界的な出来事のハイライト。年次変化率は、連続する 2 年の差を前年の人為起源物質質量の値で割ったものの。



拡張データ 図 4 | 20 世紀初頭以降の人為起源の金属量の推定値を、物質のサブグループに分けて示したもの。データはウィーンの社会生態学研究所の包括的な研究から得られたもの。最近の研究⁷¹を使用したか、主要な結果²²を得るために使用した研究と比較して、若干の更新がある。



拡張データ 図 5 | 20 世紀初頭以降の(工業用丸型)木材、ガラス、プラスチックの人為起源物質質量推定値を、材料のサブグループに分けて示したもの。データはウィーンの社会生態学研究所の包括的な研究から引用した。最近の研究⁷¹を使用した。主要な結果を得るために使用した研究と比較して、若干の更新がある²²。



拡張データ 図 6 | 1990-2017 年の植物バイオマス推定の計算ステップ。「方法」の項の 1900 年~2017 年のバイオマスの変化でさらに詳しく説明しているのと同じく、1900 年から 2017 年までのバイオマスの変化。

Anthropogenic mass group	Description	1900	1940	1980	2020
concrete	Used mostly for building and infrastructure construction. Comprises a mix of materials, including cement and aggregates (gravel and sand).	2	10	86	549
aggregates	Gravel and sand, mainly used as bedding for roads and buildings. Aggregates used for production of concrete and asphalt are accounted under those categories and not here.	17	30	135	386
bricks	Mostly composed of clay and used for constructions.	11	16	28	92
asphalt	Composed of bitumen and aggregates (gravel and sand), used mainly for road construction/pavement.	0	1	22	65
metals	Mostly iron/steel, aluminum and copper.	1	3	13	39
other	Including industrial roundwood, in the form of solidwood products and paper/paperboard, container and flat glass and plastic.	4	6	11	23

The mass values are presented here in gigatonnes (Gt; 1,000 Gt = 1 Tt). The 2020 estimate is partially extrapolated (since 2015). Overall, the categories of anthropogenic mass presented here give almost complete coverage of materials usage (>98% in terms of mass based on ref. 7).

拡張データ 表 1: 選択された年における異なる人為起源物質質量グループとその推定物質質量。