

※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。
原文をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

THE ROYAL SOCIETY

気候変動：科学と解決策 | 報告 2

ネットゼロのためのコンピューティング： デジタルテクノロジーはいかにして「地球を守る ための制御ループ」を創造できるか

概要

デジタルテクノロジーは、世界経済全体での排出削減を可能にすると同時に、コンピューティング自体が生み出す排出を抑えることにより、低炭素の世界への移行において重要な役割を果たすことができる。具体的には、産学官および第三セクターが力を合わせて、「全球のデジタ

ルツイン」あるいは直ちに運用できる「地球を守るための制御ループ」を作り出すチャンスがある。責任ある使い方をすれば、この方法で経済活動のシミュレーション、最適化、変革を行い、排出の最小化と効率の最大化を図ることができる。

知見

- 「ネットゼロのためのコンピューティング」は、世界、地域、そして各国のネットゼロ戦略において重要な役割を果たしうる。
- デジタルテクノロジー部門の電力使用とカーボンフットプリントは、内包排出量を含め、同部門がもたらす恩恵に釣り合わせるべきである。
- データの基準・品質・規制に関してグローバルな連携を深めることによって、自信を持って適切なデータを収集し、共有し、使用することが可能になり、温室効果ガス排出量の的確な定量化と、排出削減のためのデータ応用が促進される。
- 産学官および第三セクターの連携によって、都市、地域、国、そして最終的にグローバルレベルでの自然システムと経済システムの「デジタルツイン」を生み出すことができる。これにより、排出を最小化し、トレードオフに必要な情報を提供し、持続可能な開発を促進する。こうしたデジタルツインにより、行政機関が「仮説」シナリオと介入の効果を検討することも可能となるだろう。
- ネットゼロ・システムに向けたコンピューティングおよびデータのインフラのための信頼できるガバナンスの枠組みを構築するためには、グローバルレベルでの連携が必須である。この枠組みにはこれらのシステムの検査能力も含まれ、排出報告の透明性、誰にでも有効なアプリを用いたステークホルダーの参加、重要なデジタルインフラのレジリエンス等がその支えとなる。
- 例えば、テクノロジー企業が自社のエネルギー使用量と直接的・間接的排出量を公表すると同時に、再生可能エネルギーの利用を最適化するという形で、テクノロジー部門は模範を示すべきである。
- 行政機関のサポートのもと、無償または低コストのテクノロジー要素で構成された「デジタルコモンズ」を活用し、世界的な研究とイノベーションのエコシステムを強化することで進歩を支えることができる。
- テクノロジーとデータが幅広く利用できるようになれば、それを基盤に（こうした取り組みを）全世界に広げることができる。そして誰一人取り残さないようにするためには能力開発が不可欠である。

1. 背景

デジタルテクノロジーは、私たちの生活様式と働き方に大変革をもたらした。現在、世界人口の半数以上がインターネットに接続し、携帯電話を使用しているが、2023年には、さらにこの数が人口の3分の2に増えると予想される¹。最新の人工知能（AI）アルゴリズムにより、コンピュータは膨大なデータからパターンを学べるようになり、ドライバーの配達ルート計画、医師の病気の診断に役立っている。「デジタルツイン」と呼ばれる物理的資産のシミュレーションにより、すでに工場の生産性と効率が高まっている。

気候変動に関しては、デジタルテクノロジー部門はプラス・マイナスの両面で重要視されている。インターネットトラフィックの急速な拡大に伴い、この業界の炭素排出が注目を浴びるようになった。プラス面では、AIに物流のルートを一元管理させ、配達用トラックの空車回送をなくすなど、排出削減にデジタルテクノロジーが活用されている。気候変動への取り組みは、システ

ムズ・アプローチを必要とする複雑な課題である。すでに、スーパーコンピュータで実行され、地球の自然システムをシミュレーションする気候モデルが、気候変動への理解を深める上で中心的役割を果たしている²。

気候変動への国際的取り組みにデジタルテクノロジーがより幅広く貢献する可能性が次第に認識されるようになってきた。まずは「グリーン・コンピューティング」（デジタルテクノロジー部門自体のフットプリントをその有用性に応じたものにする）からスタートし、次に、排出削減の支援と推進にデジタルテクノロジーが果たせるさらに大きな貢献「ネットゼロのためのコンピューティング」へと歩を進める。そのためには、システムへの信頼を築くこと、すなわち「ネットゼロのための信頼できるコンピューティング」と、必要な研究・開発・導入を支援すること、すなわち「ネットゼロのためのコンピューティングのイノベーション」が必要である。

2. グリーン・コンピューティング

脱炭素化に向けてデジタルテクノロジー部門がどの程度前進したかを評価するためには、この部門の排出量とエネルギー使用量に関するデータへのアクセスが必要となる。

デジタルテクノロジー部門のカーボンフットプリントは、同部門がもたらす恩恵に釣り合わせるべきである。例を挙げると、暗号通貨「ビットコイン」は2021年3月現在、約80~100テラワット時（TWh）の電力を消費していると推定される。これは、ノルウェーの電力消費量に匹敵する^{3,4}。全世界の規制機関は、現在すでに大規模インフラ投資で習慣化されているように、デジタル活動についても環境影響分析を義務付けることによって、過度なエネルギー使用を防ぐ役割を果たすことができる。

排出を最適化するための新しいシステムの構築には新しい部品、センサー、ネットワーク、コンピューティング施設とストレージ施設が必要となる。これらは全て、排出を生み出すが、最終的な影響が、全体の排

出量をネットゼロに減らすことに貢献するのであれば、これはデータとデジタルテクノロジーのバランスの取れた使い方と言ってよいだろう。業界主導の調査によると、全ての部門で既存のデジタルテクノロジーを意欲的に採用すれば⁵、2030年までに必要とされる排出削減の約3分の1が実現され、地球の平均気温上昇を2°C^{6,7}よりかなり低く抑えるための道筋ができる可能性があるという。この推定には詳しく検討するだけの価値がある。

テクノロジー部門のカーボンフットプリントを定量化することは難しい。この部門の境界をどのように線引きするかによって、推定値は全世界の温室効果ガス（GHG）年間排出量の1.5%~6.0%と違ってくる^{8,9,10,11}。デバイス、ネットワーク、データセンタ

一からの排出は、製造と電力使用から生じる。ユーザーのデバイスについては、この2つの要因にほぼ均等に分かれる¹⁰。世界のインターネットトラフィックが毎年平均30%ずつ増加し、コンピュータの処理能力がかなり強化されたにもかかわらず、最近の分析では、データセンターのエネルギー需要がこの10年間でほとんど増えていないことが分かっている¹²。コンピューティングの効率が向上し、データセンターの管理方法が改善されたことが主因である。タスクとストレージを「クラウド」コンピューティングに移行する方法は排出削減策になりうる。そのメリットを完全に評価するためには、排出データの透過性強化が必要である^{13,14}。

インターネットに接続する世界人口の割合が増えれば、テクノロジー部門への要求も確実に高まる。エネルギー効率をさらに高めることが重要となり、それには例えば、アルゴリズムのエネルギー所要量を低減する方法や新形態のハードウェアに関する研究とイノベーションが必要となる。エネルギー効率向上は、全世界でグリーンエネルギーへの移行を実現させる上でも不可欠である。

大手テクノロジー企業は、再生可能エネルギーの主たる利用者である（コラム1参照）。結果として、これらの企業のデータセンターのカーボンフットプリントは低減される。インテリジェント・コンピュータ・プラットフォームの使用を開始した企業さえある。これらのプラットフォームにより、再生可能エネルギー発電のピーク時に、エネルギー集約的なタスクが実行されるよう予定を組むことが可能となった。クリーンエネルギー利用の最大化を約束する新たな局面と言える^{15,16}。進捗の監視を可能にし、信頼を維持するために、すべての企業が自社の再生可能エネルギー利用の詳細について透明性を確保すべきである。

コラム1

フットプリントの縮小を約束するビッグテック

今やテクノロジー企業は世界最大の企業群の一角をなしているため、カーボンニュートラル（炭素中立）に対する責務は重要であり、各社の責務の達成度を監視するための手段もまた重要となる。

Microsoft社は2030年までにカーボンネガティブを実現し、2050年までに同社が排出したすべての炭素を環境から除去する計画である³⁷。Apple社は、自社施設では100%再生可能エネルギーを使用中と発表している。また、サプライヤーを再生可能エネルギー電力に移行させ、2030年までに会社全体のフットプリントをカーボンニュートラルに到達させる計画である³⁸。Google社は2007年にカーボンニュートラルを実現したと発表した。100%再生可能エネルギーを使用しており、2030年までにカーボンフリーを目指すとしている³⁹。Amazon社は、2040年までにクライメイト・ニュートラル（気候中立）になり、2025年までにすべての業務活動の電力を再生可能エネルギーで賄うことを約束している⁴⁰。しかしながら、これらの目標に向けたテクノロジー部門の進捗状況を評価するためには、この部門の排出とエネルギー使用に関する高品質で信頼性の高いデータへの透過的なアクセスが必要である。

3. ネットゼロのためのコンピューティング

デジタルテクノロジーは、接続性の高いシステムをサポートし、全体のパフォーマンスが部分部分の合計を超えるソリューションを生み出すためのツールを提供する。

3.1 データとデジタルテクノロジーが気候変動の取り組みにますます取り入れられるように

コンピュータは次第にテクノロジー部門自体だけでなく、排出削減に役立つ幅広い用途で使用されるようになってきた。

例えば、正確な気象予報、ローカルセンサーとリモートセンサー（衛星など）からのデータ、さらには携帯電話の接続性とインターフェースは精密農業のためのツールとなっている。全世界の農家がこれらのツールを使いこなす手段を手に入れば、作物の選択、灌漑、肥料の使用、収穫時期についての決定を下すことができるようになる。

「持続可能な開発データのためのグローバル・パートナーシップ（Global Partnership for Sustainable Development Data）」の取り組みでは、デジタルツールによって持続可能な開発目標（SDGs）をより幅広くサポートする方法を探っている。この活動の一例として、17年分の衛星画像を使って地表水の範囲、土地利用、土地劣化を監視する「アフリカ地域データ・キューブ（Africa Regional Data Cube）」が挙げられる¹⁷。

エネルギーの分野では、近代的なAI方式を用い、電力消費需要のピークを予測したり、正確な気象パターン予測に基づいて太陽光発電・風力発電のピークを予想したりすることができる¹⁸。

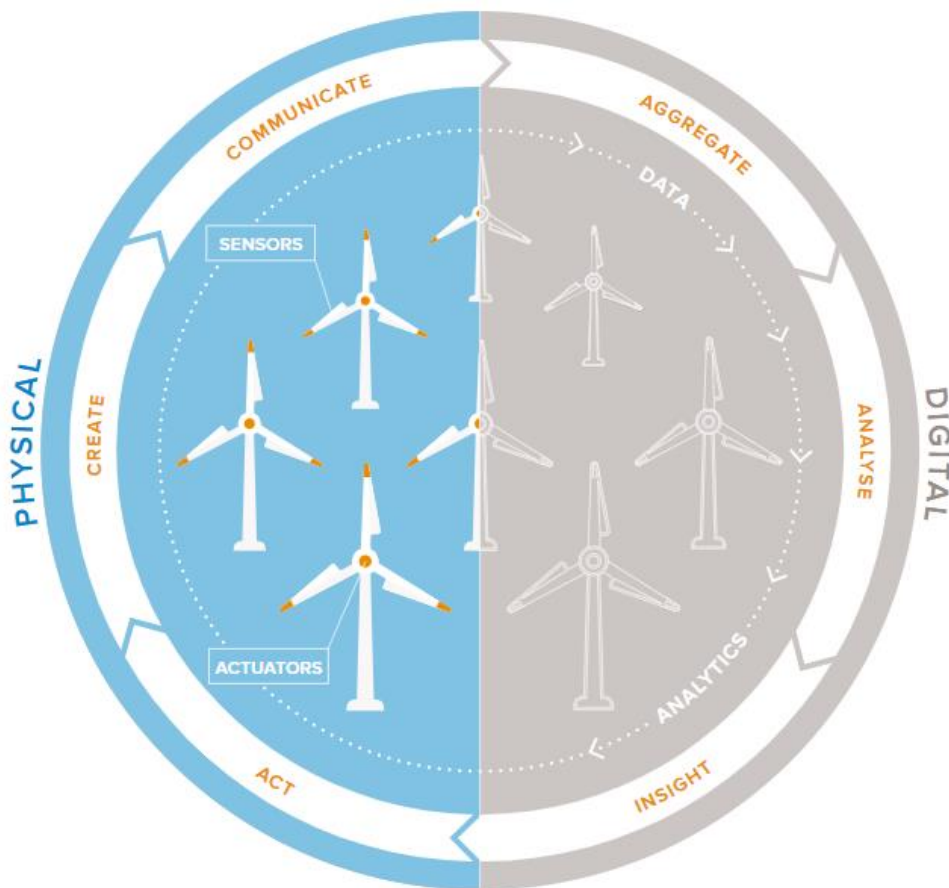
3.2 デジタルツインが地球のためのシステムズ・アプローチを支援

気候変動に取り組む上で課題の一つとなるのが、地球システム内に存在する相互依存性である。これにより、さまざまなSDGsを追求する際にコベネフィットとトレードオフが生じる。データとデジタルテクノロジーは、接続性の高いシステムをサポートし、全体のパフォーマンスが部分部分の合計を超えるソリューションを生み出すためのツールを提供する。

何十年もの間、航空機の飛行では適応制御を提供するシステムが使われてきた。これは、物理的な物体にその行動を調整できるモデルを装備することのメリットを示している。同様に、地球にとって有望な用途を持つデジタルケイパビリティ（デジタル化を推進するうえで求められる能力）の一つとして「デジタルツイン化」が挙げられる¹⁹。ツイン化にあたっては、プロセスの複数の側面からのデータ（一般にセンサーから収集）を用いて、活動のコンピュータシミュレーションを作成する。これらのシミュレーションは、所定の目標と制約に応じた最適なソリューションの評価に役立つ。次にこの情報を使って実際の運営を制御する。こうして、現実世界の活動に基づくデータをシミュレーションに入力し、その結果を用いて現実世界のプロセスの調整・改善を行うという、運営上の「制御ループ」が出来上がる（図1参照）。

タービン・ツイン

集合型風力発電所はデジタルツインのテストベッド（実証試験用プラットフォーム）になりつつある。事業者は、年間 20%前後の成長を遂げるこの部門で、効率を最大化する方法を研究している⁴¹。例えば、GE Renewable Energy 社は、このテクノロジーをいかに利用できるかを示すために、デジタルツインを用いたいくつかのプロジェクトを立ち上げた。これらの風力発電所は、まず、現地の風況をシミュレーション、コンピュータモデルとしてスタートする。エンジニアはこれを使って、最も効率的なポールの高さ、ローターの直径、タービンの出力を設定することができる。タービンが回転し始めると、各タービンの中のセンサーがナセルのヨー制御（ローターの向きを風向きに追従させる制御）から発電機のトルクまでのパラメータと翼端の速度をモニターする。デジタルツインは、ソフトウェアに組み込まれた物理モデルを使用して、データ処理、選択肢のシミュレーション、改善点の提案を行う^{42,43}。メンテナンスを改善すれば、インフラの寿命を延ばすことができる。



地球を守るための包括的な制御ループを構築するのに必要なデータへのアクセスに関しては非常に高いハードルが存在する。

- デジタルツインにより、多くの部門において、GHG 排出を監視・理解・最適化・削減するためのフィードバック・ループを確立することができる。電力網においては、再生可能エネルギーがますます優勢になってきた電力網を、デジタルツインにより分散化された多数の電力源を管理し（図 1 参照）、必要に応じてバックアップ電力に切り替えることで支援できる。
- 計画と開発の過程では、デジタルツインが資産の設置に役立つ。例えば、Google 社のプロジェクト「サンルーフ（Sunroof）」は²⁰、Google Earth と機械学習を使って無償の太陽エネルギー・マッピングを提供し、太陽光発電パネルの設置場所を決めるのに役立っている。
- 都市部では、デジタルツインがネットゼロの追求において価値を実証しており、国レベルと超国家レベルのデジタルツインの試験的運用の役目を果たしている。「ロンドン建築物ストックモデル（London Building Stock Model）」などのデジタルツインは、建築物の機能・構造・周りの空間との関連性から占有者の社会経済的背景に至るまでさまざまなデータを考慮に入れ、改善の必要性を明確にする目的で利用できる²¹。同様に、シンガポール、上海、北京、アマラーワティ（インド）、ドバイのデジタルツインは、都市設計と都市設計の品質向上を後押しするために構築された。いくつかの国が、それぞれのデジタルツイン化能力の開発を進めている。英国の「国家デジタルツイン（National Digital Twin）」プログラムは、インフラの構築・運用・廃止のあり方の改善を目指す。
- 輸送部門では、交通ネットワークの仮想レプリカを使って、公的機関と道路運送事業者が交通の流れを最適化できる¹⁸。
- 気候モニタリングにおいては、デジタルツインを衛星や地上での観測と組み合わせることによって、エネルギーの生産や消費から推定された情報ではなく、実際

の GHG 排出に関してより正確で動的な情報を提供するという点でさらなる役割を果たすことができる。

こうした局地的、国家、そして部門ごとのデジタルツインをグローバル規模で、十分な調整を行えば、「全球規模のデジタルツイン」、あるいは「地球を守るための制御ループ」へと漸進的に統合することが可能だろう（図 2 参照）。そうすれば、経済活動の監視・シミュレーション・理解・最適化・変革に役立ち、気候の応答をシミュレーションするモデルを補完することになるだろう。

こうした取り組みはすでに具体化し始めている。ここ 20 年の間に、「デジタルアース」（地球の多重解像度三次元表現）の概念が、世界の持続可能な開発を後押しするための研究と連携を促した²²⁻²³。EU は先ごろ、人間の活動と自然の活動の両方をモデル化するため、2030 年までに地球の高精度デジタルモデル「DestinE」を導入すると発表した²⁴。このプラットフォームは 2025 年までに 4~5 のデジタルツインを統合し、公共部門のユーザーが環境・気候政策案を策定し、その効果の監視と評価を行うのに役立っているかもしれない。

このように規模を拡大したデジタル・エコシステムの構築には技術的な課題があり、インターフェースを管理するための有効なアーキテクチャとシステムが要求される²⁵。また、データへのアクセスという点では、衛星から膨大なデータが次々に流れてくる一方で、例えば、地球を守るための包括的な制御ループを構築するのに必要なデータへのアクセスに関しては大きな課題が存在する。同時に、多部門にわたるグローバルなデジタルツインの構築には、負担分担の取決めが必要である。これは、グローバル・ノース（北の先進国）とグローバル・サウス（南の後進国）の両方を含む全ての国が参加し、恩恵を受けられるようにするためである。

3.3 ネットゼロのためのデータ・インフラストラクチャ

全球レベルのデジタルツインは、排出削減に向けた活動を最適化するために、全経済部門からの未曾有の規模のデータを必要とする。こうしたデータを入手するためのロードマップには、以下に挙げる初歩的段階が含まれると考えられる。

- **既存データの有効な使用を支援する。**
公的機関と独立機関が主導し、既存のデータセットを別の目的に使用したり、入手しやすくしたりできる。各国の統計機関も重要な役割を担うことができる。例えば、タンザニアの国家統計局（National Bureau of Statistics）は、電子廃棄物に関する報告書²⁶と気候変動統計²⁷を作成した。同時に、気候の非常事態に対処する上で重要な専有データへのアクセスを可能にする必要がある（コラム 2 参照）²⁸。
- **さらなるデータの必要性を明確にする。**
データの欠落部を明らかにし、それを埋めるためのプロセスを設計する必要がある。集合データやプロキシ（自然の中に刻まれた気候変動の記録）データでも十分かもしれない。ケースバイケースで新規データ収集の費用・便益を分析する必要がある。信頼できる合成データの生成は、もう一つの選択肢になりうる。

- **複数のデータソースを合体する。**
複数のデータのマージを可能にするには共通の基準が必要である。例えば、衛星データと地上での測定値を合体させれば、発電所や都市部からの排出追跡に役立つ。
- **既存データ・インフラストラクチャで能力を構築する。**
英国気象庁インフォマティクス・ラボや日本の宇宙天気予報センターといったデータストアの役割に倣った高品質のレポジトリが全世界で必要となる。さまざまな形態のデータ機関を検討することができる²⁹。
- **データ「レディネス」の保証が不可欠^{30, 31}。**
機械学習を使った実用的なデータの普及を促す「GO FAIR」イニシアチブ³²はデータのあり方として、人とコミュニティがデータを見つけられること、認証と認可を使用する場合を含めてデータにアクセスできること、相互運用可能で他のデータと統合できること、再利用できること、または別の設定で合体できることという条件を挙げている。

コラム 2

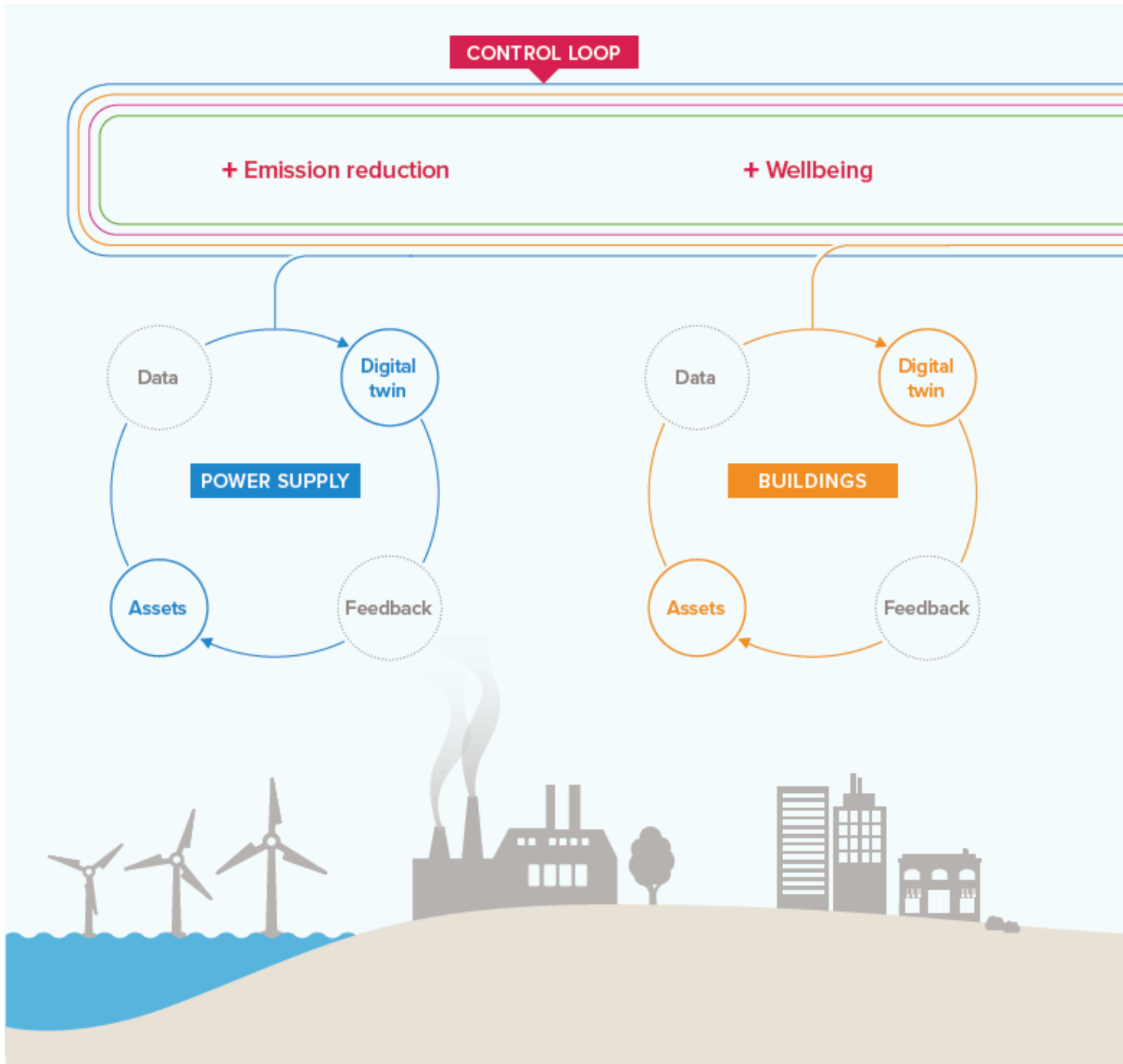
ロックダウンのデータで明らかになったネットゼロの課題

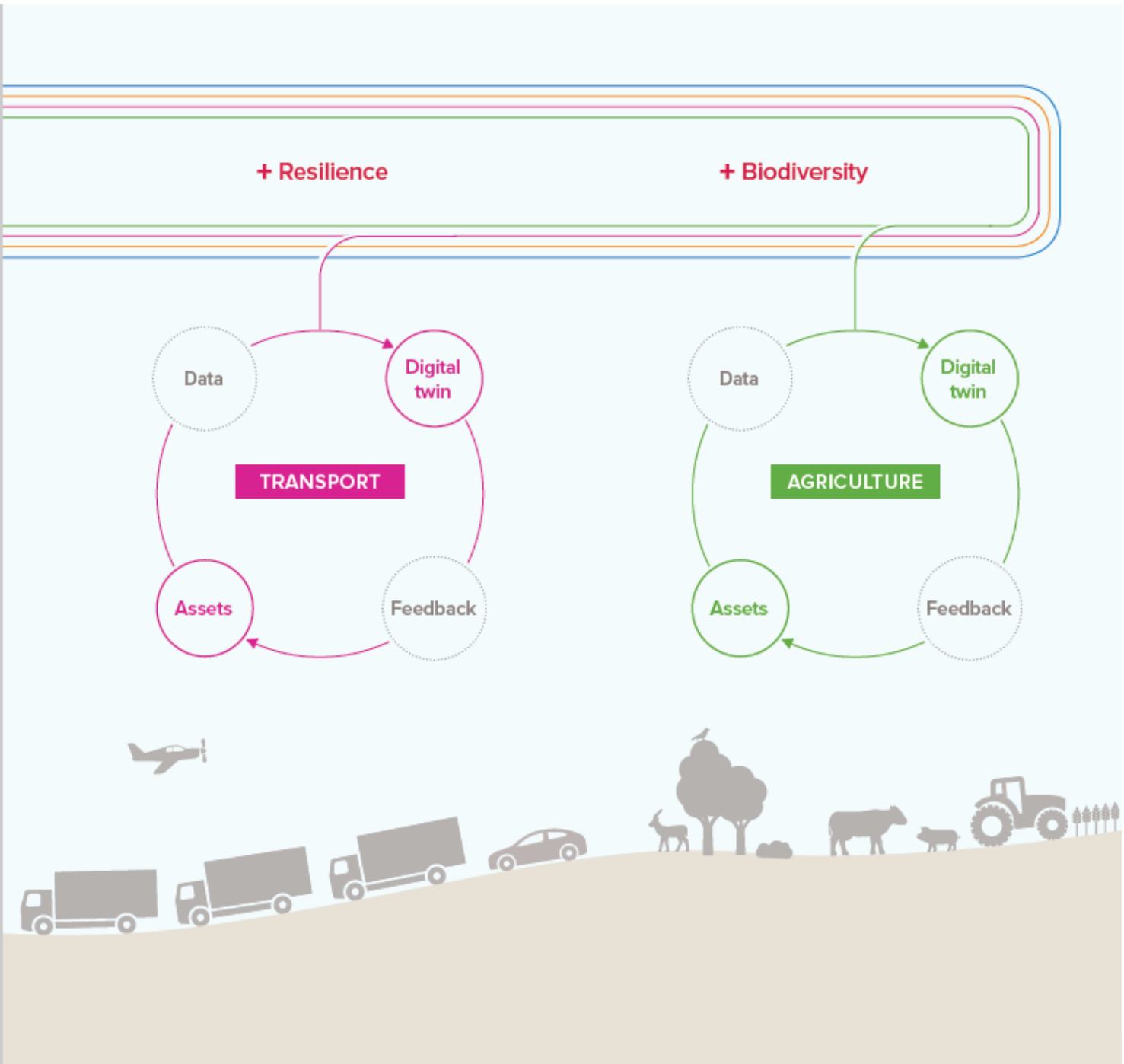
2020年に起きた新型コロナウイルスの世界的流行は、気候科学者がデータを調査し、ネットゼロ達成に必要な取組みの規模を立証するまたとない機会となった。世界の炭素排出の97%に関係する経済活動のリアルタイム・データを統合した結果、科学者たちは、広い範囲でロックダウンが実施された最初の数週間で各国の排出が平均26%減少したことを発見した。全世界の年間排出減少率は4.2~7.5%になる可能性が高いと研究者は見積もった。これは、地球の平均気温の上昇を

2°Cよりはるかに低く抑えるために、向こう30年間に必要とされる年間削減率と同じである。このプロジェクトは、米国の鉄鋼生産高から中国の石炭生産高、英国のスマートメーター統計まで、多数の公開データソースを使って何ができるかを立証した⁴⁴。ただし、研究者たちは一部のデータセットの特定とアクセスに関して障害にぶつかっていてもいる。将来的にこれらのデータタイプがさらに幅広く入手可能になれば、世界の排出を監視する新たな機会が生まれる。

地球を守るための制御ループ

シミュレーションを実行し、物理的な資産の計画と運用を改善するために、これらの資産の仮想表現（デジタルツイン）を作成することができる。これらを合体させて、「地球を守るための制御ループ」を確立すれば、気候変動、生物多様性の喪失その他の 21 世紀の課題に取り組むためのグローバルな解決策の発見につながる可能性がある。





4. ネットゼロのための信頼される コンピューティング

ネットゼロのためのコンピューティングを目的としてデータを収集する際には、信頼を築くために次に挙げるいくつかの要素を検討しなければならない。

- **レジリエンスとサイバーセキュリティ**

ネットゼロのためのコンピューティングは重要なインフラの一部であり、市民の信頼を得るために完璧なサイバーセキュリティを確立する必要がある。相互運用性、長寿命、セキュリティを初めから組み込まなければならない。インターネットは、レジリエンスのための冗長性の重要性を明らかにした。単一のルートやハブへの依存を避け、複数の選択肢を設けるのである。

- **参加**

デジタルテクノロジーは、ネットゼロのためのコンピューティングにとどまらず、あらゆる場面でプライバシーを巡る市民の不安を引き起こす可能性がある。これは、「AIに関するグローバルパートナーシップ（Global Partnership on AI）」が継続的に取り組むテーマである³³。データに戦略的価値があるという理由で公にしにくいこともありうる。よって、行動規範³⁴などのガバナンス上の取り決めに加えて、十分な技術的、法律的予防手段を考案する必要がある。ネットゼロシステムのためのコンピューティングだけでなく、関連するポリシーの設計にもあらゆるステークホルダーを関与させることは、求められる信頼の構築に役立つ

³⁵。

- **主張**

例えば、データログの監査を通じて、人々がデジタルシステムが処理したデータに疑問を投げかけることができるようにすべきである。「説明可能性」は、結果の検証、規制基準の遵守、バイアスの防止など、どのようなレベルにおいても重要である³⁶。

5. ネットゼロのためのコンピューティングのイノベーション

グローバルなデジタルツインの構築は、世界の研究とイノベーションにおける野心的な目標である。急速な進歩のためには、産学官、公共部門、市民社会の集団的努力（資金、データ、スキル、コンピューティング施設の提供を約束すること）が必要とされる。

行政機関はその調達力を駆使して、システム等の構成部品の「論理的インフラ」の構築を科学技術者に委託し、多数のアプリケーションを生み出すことができる。このインフラは、開発者が無償または低コストで利用できる構成要素の「デジタルコモンズ」となるだろう。ユーザーが導入する際のロイヤルティのような経済的誘因も、イノベーターにソリューションの開発を促す可能性がある。実験的パッケージをテストし、成功したものを徐々にスケールアップする方法も考えられる。

こうしたプラットフォームは、行政機関、テクノロジー企業、幅広い民間企業、小規模なイノベーション企業、大学や研究機関の研究者の協働を通じて運営される、コミュニティの利益のための研究所のネットワークを通じて促進することができる。こうしたコミュニティが、将来的に可能であれば独自の憲章と法的地位を持ち、支援を受ける国や企業から独立して、独自の文化を形成し、目標を立てるように促す必要がある。コンペ方式の資金供給と野心的な目標は、画期的なイノベーションへの意欲を掻き立て、公共部門の研究プログラムに人材を呼び込むことにつながるはずである。

今こそ、地球を守るための信頼できる制御ループを構築するための幅広いプログラムの一環として、上記のような国際的な研究とイノベーションのエコシステム構築に向けて最初の一步を踏み出すチャンスである。

急速な進歩のためには、産学官、公共部門、市民社会の集団的努力（資金、データ、スキル、コンピューティング施設の提供を約束すること）が必要とされる。

* この報告は、王立協会 (Royal Society) の報告書「Digital technology and the planet: harnessing computing for net zero」 (<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/digital-technology-and-the-planet/digital-technology-and-the-planet-report.pdf>) (2021年3月23日アクセス) 参照)、および全世界からの専門家の情報に基づく。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が2050年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる12の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先：creativecommons.org/licenses/by/4.0

発行：2021年5月 DES7287_4 © The Royal Society

参考文献

1. Cisco. 2020 *Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023)*. See: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf> (accessed 23 March 2021).
2. See briefing 1: *Next generation climate models*.
3. De Vries A. 2021 *Bitcoin boom: what rising prices mean for the network's energy consumption*. *Joule*, 5:509-13. (doi:10.1016/j.joule.2021.02.006)
4. Cambridge Centre for Alternative Finance. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. See: <https://www.cbeci.org> (accessed 23 March 2021)
5. Falk J *et al.* 2020 Exponential Roadmap 1.5.1, Scaling 36 solutions to halve emissions by 2030. Future Earth. See <https://exponentialroadmap.org> (accessed 23 March 2021).
6. GeSI and Accenture. 2015 #SMARTer2030, ICT solutions for 21st Century Challenges. See: https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf (accessed 23 March 2021).
7. United Nations Environment Programme. 2020 *Emissions Gap Report 2020*. See: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020> (accessed 23 March 2021)
8. Andrae ASG and Edler T. 2015 *On global electricity usage of communication technology: trends to 2030*. *Challenges*, 6:117-157. (doi:10.3390/challe6010117)
9. Andrae ASG. 2020 New perspectives on internet electricity use in 2030. *Eng. Appl. Sci. Lett.* 3:19-31. See: <https://pisrt.org/psrpress/j/easl/2020/2/3/new-perspectives-on-internet-electricity-use-in-2030.pdf> (accessed 23 March 2021).
10. Malmodin J, Lunden D. 2018 The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10: 3027. (doi:10.3390/su10093027)
11. Freitag C *et al.* 2021 The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations. See: <https://export.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2102/2102.02622.pdf> (accessed 11 May 2021).
12. International Energy Agency. 2020 Data Centre and Data Transmission Networks. See: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks#recommended-actions> (accessed 23 March 2021).
13. Accenture. 2020 The green behind the cloud. See: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-135/Accenture-Strategy-Green-Behind-Cloud-POV.pdf (accessed 23 March 2021).
14. Mytton D. 2020. Hiding greenhouse gas emissions in the cloud. *Nat. Clim. Chang.*, 10:701. (doi:10.1038/s41558-020-0837-6)
15. Grange L *et al.* 2018 Green IT scheduling for data center powered with renewable energy. *Future Generation Computer Systems*, 86: 99-120. See: https://oatao.univ-toulouse.fr/22386/1/grange_22386.pdf (accessed 23 March 2021).
16. Radovanovic A. 2020 Our data centers now work harder when the sun shines and wind blows. See: <https://blog.google/inside-google/infrastructure/data-centers-work-harder-sun-shines-wind-blows> (accessed 23 March 2021).
17. Global Partnership for Sustainable Development Data. See: <https://www.data4sdgs.org/our-impact> (accessed 23 March 2021).
18. Rolnick *et al.* 2019 Tackling climate change with machine learning. arXiv:1906.05433. See: <https://arxiv.org/pdf/1906.05433.pdf> (accessed 23 March 2021).
19. Arup. 2019 Digital twin, towards a meaningful framework. See: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework> (accessed 23 March 2021).
20. Google. Project Sunroof. See: <https://www.google.com/get/sunroof> (accessed 23 March 2021).
21. Steadman P *et al.* 2020 Building stock energy modelling in the UK: the 3DStock method and the London Building Stock Model. *Buildings and Cities*, 1:100–119. (doi:10.5334/bc.52)
22. International Society for Digital Earth. See: <http://www.digitalearth-isde.org> (accessed 23 March 2021).
23. Guo H, Goodchild MF, and Annoni A. 2020 Manual of Digital Earth. See: <https://www.springer.com/gp/book/9789813299146> (accessed 23 March 2021).
24. Bauer P, Stevens B, Hazeleger W. 2021 A digital twin of Earth for the green transition. *Nat. Clim. Chang.* 11:80–83. (doi:10.1038/s41558-021-00986-y)
25. De Meyer A and Williamson PJ. 2020 *Ecosystem Edge*. Stanford Business Press. See: <https://ecosystemedge.com/> (accessed 11 May 2021).
26. Tanzania National Bureau of Statistics. 2019 National E-Waste Statistics Report. See: <https://www.nbs.go.tz/index.php/en/census-surveys/environmental-statistics/483-national-e-waste-statistics-report-2019-tanzania-mainland> (accessed 23 March 2021).
27. Tanzania National Bureau of Statistics. 2019 *The National Climate Statistics Report*. See: <https://www.nbs.go.tz/index.php/en/census-surveys/environmental-statistics/593-the-national-climate-change-statistics-report-2019> (accessed 23 March 2021).
28. The Open Data Institute. 2021 *Accelerating progress on tackling the climate crisis through data collaboration*. See: <https://theodi.org/article/accelerating-progress-on-tackling-the-climate-crisis-through-data-collaboration/> (accessed 23 March 2021).
29. The Open Data Institute. 2020 *Designing sustainable data institutions*. See: <https://theodi.org/article/designing-sustainable-data-institutions-paper/> (accessed 23 March 2021).
30. Lawrence ND. 2017 Data readiness levels. arXiv:1705.02245. See: <https://arxiv.org/abs/1705.02245> (accessed 23 March 2021).
31. The Alan Turing Institute. 2019 '*The Turing Way*' - A handbook for reproducible data science. See: <https://www.turing.ac.uk/research/research-projects/turing-way-handbook-reproducible-data-science> (accessed 23 March 2021).
32. GO FAIR Principles. See: <https://www.go-fair.org/fair-principles/> (accessed 23 March 2021).
33. The Global Partnership on Artificial Intelligence. Working group on data governance. See: <https://gpai.ai/projects/data-governance/> (accessed 23 March 2021).

34. Global Open Data for Agriculture and Nutrition. Code of conduct toolkit. See: <https://www.godan.info/codes> (accessed 30 March 2021).
35. Wilsdon J and Willis R. 2004 *See-through Science: Why public engagement needs to move upstream*. See: <https://www.demos.co.uk/files/Seethroughsciencefinal.pdf> (accessed 23 March 2021).
36. The Royal Society. 2019 *Explainable AI: the basics*. See: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/explainable-ai/ai-and-interpretability-policy-briefing.pdf> (accessed 23 March 2021).
37. Microsoft. 2020 Microsoft will be carbon negative by 2030. See: <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/> (accessed 23 March 2021).
38. Apple. 2020 *Environmental progress report*. See: https://www.apple.com/tr/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2020.pdf (accessed 23 March 2021).
39. Google. Sustainability commitments. See: <https://sustainability.google/commitments/> (accessed 23 March 2021).
40. Amazon. *Amazon Sustainability – All In: Staying the Course on Our Commitment to Sustainability*. See: <https://sustainability.aboutamazon.com> (accessed 23 March 2021).
41. International Energy Agency. 2020 Renewables Information: Overview. See: <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview> (accessed 23 March 2021).
42. Rook B. 2019 How digital twins are transforming wind operations. Windpower Engineering & Development. See: <https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-are-transforming-wind-operations/> (accessed 23 March 2021).
43. General Electric. 2015 Wind in the cloud? How the digital wind farm will make wind power 20 percent more efficient. See: <https://www.ge.com/news/reports/wind-in-the-cloud-how-the-digital-wind-farm-will-2> (accessed 23 March 2021).
44. Le Quéré C *et al.* 2020 Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Chang.*, 10:647–653. (doi:10.1038/s41558-020-0797-x)