

オープンソースの 持続可能な エコシステム

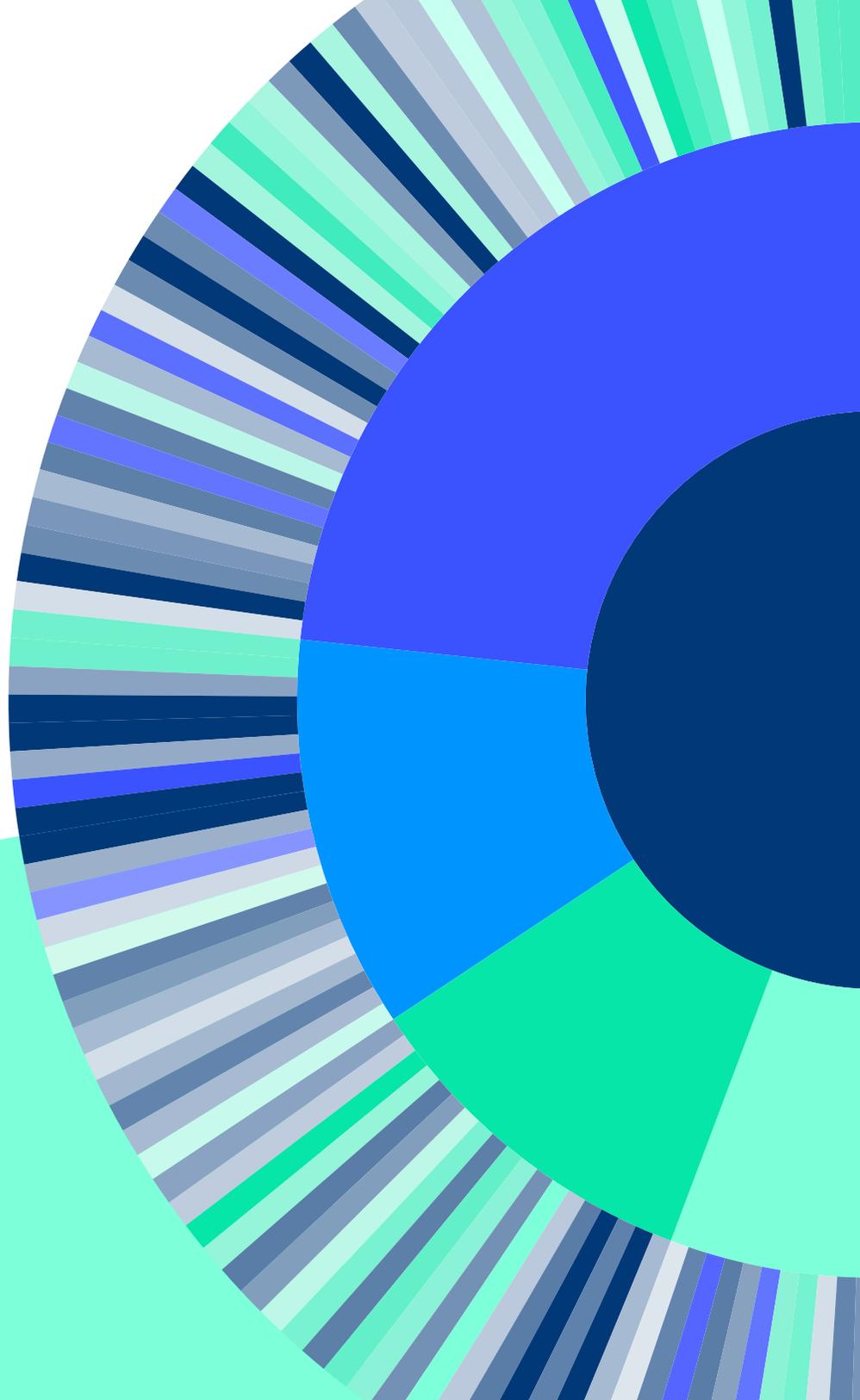
2023年8月

Tobias Augspurger
Eirini Malliaraki
Josh Hopkins
Dan Brown

Powered by

OPEN CORRIDOR

SUBAK



目次

序文.....	3	ユーザーと利用状況	24
なぜオープンソースなのか?	3	依存関係	24
持続可能性への取り組みにテクノロジーはどのように役立つか	4	エンドユーザー	25
サステナビリティにおけるオープンソース文化の歴史.....	4	金銭的価値	25
今後に向けて	7	今後に向けて	26
オープン サステナビリティ原則	7	資金調達モデル.....	27
透明性と信頼	7	提言	29
追跡可能な意思決定	7	全体	29
コラボレーティブ イノベーション	8	テクノロジー	31
地域化と地方分権.....	8	コラボレーション	33
エグゼクティブ サマリー	9	資金調達.....	35
インサイト	11	謝辞.....	37
エコシステム	12	付録.....	38
トピックス.....	13	方法論.....	38
人気と持続性	15	定量分析	38
プログラミング言語	18	開発分布スコア (Development Distribution Score).....	39
ライセンス.....	19	質的分析	39
コミュニティ	20	用語の定義	41
開発分布スコア (Development Distribution Score).....	20		
組織のダイバーシティ	21		
最も多く掲載されたプロジェクト.....	22		
組織の分布状況	23		

序文

技術の進歩は、気候変動や環境の持続可能性に対処するために不可欠ですが、人為的に設計されたシステム的设计、運用、メンテナンスに使用される OSS は、それ自体が考慮されることはほとんどありません。

オープンソースは、ソースコードのオープン性、それを修正する能力、そしてそれを配布する自由に依存しています。オープンソースソフトウェア (OSS) は、分散したコミュニティの共同作業によって開発され、彼らは協力してソフトウェアソリューションを改善し、その修正を他の人々と共有することで、リソースの効率的な配分と、より堅牢で信頼性の高い製品を生み出します。デジタルコモンズの確立、オープンイノベーションコミュニティの支援、ソフトウェア開発ライフサイクルの管理、共有リソースの管理に関する社会的慣行への情報提供において、OSS は基礎となるものです。

エネルギーや農業システムの脱炭素化といった持続可能性の目標を達成するためには、独占的な手法やツールに大きく依存してきた従来のモデルとは異なるアプローチが必要です。オープンソースは、すべてのステークホルダーが、よりクリーンで脱炭素の未来を創造するために、共同モデルのもとで、ソフトウェア、ハードウェア、標準、仕様を迅速かつ効率的、効果的に開発・展開できるモデルを提供します。

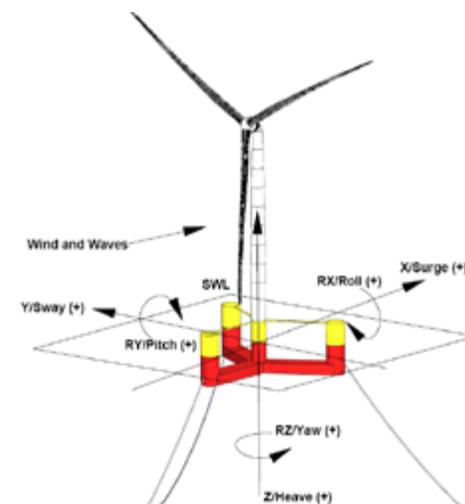
本レポートでは、様々な分野におけるオープンソースの持続可能性プロジェクトの既存のエコシステムを調査しています。本レポートでは、最も影響力のあるプロジェクトの多くを取り上げていますが、利用可能なプロジェクトの全容を把握するためには、読者はオンラインでオープンサステナブルテクノロジーの全容を確認する必要があります。本レポートはまた、持続可能な取り組みに役立つであろうギャップを特定することにも努めています。

なぜオープンソースなのか？

オープンソースが可能にした高いモジュール性なしには、今日のようなソフトウェア開発は存在しなかったでしょう。現代のソフトウェア開発は、過去数十年にわたってオープンソースとしてリリースされてきた何千もの小さなプロジェクトの開発に基づいています。PyPA や pip for Python のようなパッケージマネージャーやインデックスが、ソフトウェアコンポーネントのシンプルで安全な配布を可能にしました。このよう

な知識の生成、適応、変換のプロセスは、何世紀にもわたって数学や自然科学で知られてきました。現在では、オープンソースソフトウェア開発にも応用されています。このアプローチは、しばしば「巨人の肩の上に立つ」という比喻で表現されますが、これについては「オープンサステナビリティの原則」の章で詳しく説明しています。

中核となる情報技術インフラに加え、オープンソースソフトウェアは、環境科学、¹ 災害影響評価、² エネルギー効率、³ そして持続可能性⁴ 一般において、ますます重要性を増しています。技術の進歩は、気候変動や環境・水圏の持続可能性に取り組む上で極めて重要ですが、人為的に設計されたシステム的设计・運用・保守に使用される OSS は、それ自体が考慮されることはほとんどありません。これは、エネルギー生産や貯蔵などの技術や、大気圏、生物圏、水圏などの複雑な自然システムをシミュレーション、評価、予測するソフトウェアにも当てはまりません。



図A - 国際エネルギー機関は、国立再生可能エネルギー研究所 (National Renewable Energy Laboratory)、デンマーク工科大学 (Technical University of Denmark)、メイン大学 (University of Maine) と協力して、オープンソースの15メガワット洋上リファレンス風力タービンの設計と、オープンなシミュレーションおよび開発ツールの開発に取り組んでいます。ライセンス: Apacheライセンス 2.0

持続可能性への取り組みに テクノロジーはどのように役立つか

重要な自然システムを観察し、シミュレートすることなしに、それらの相互関係を理解することは不可能であり、また、完全に敵対的な空間に出現したこのユニークで生命を守る世界を、人類がどのように保全できるかを示すこともできません。数理モデル、テクノロジー、測定ツールは、地球の状態や人間が引き起こした影響の程度について、独立した報告書を提供してくれます。何十年にもわたって蓄積された知識は、世界中の人々が、新鮮な水、肥沃な土壌、きれいな空気、安定した気候といった重要な資源を保全する方法を理解できるようにしました。地球とその自然、経済、社会システムを深く理解することで、私たちは、人間の行動とそれに伴う以下のような影響について、重要な問いを立て、正確な予測を立てることができるようになります。

- 地球システムは地球規模の人為的変化にどのように反応するのか？
- 地球システムの閾値を超えるリスクは何か？ 残りの事業予算は？ どのように目標を設定し、責任を配分するのか？
- 製品やそのサプライチェーンが大気中に放出する温室効果ガスの量は？
- 素材の価値を維持し、廃棄物を減らすにはどうすればよいか？
- 天然資源の需要は生態系にどのような影響を与え、生物多様性はどのように保全できるのか？
- 自然は人々にどのような貢献をしているのか、生態系サービスはどのように経済を支えているのか？
- エネルギーを回収、貯蔵、分配するための最も効果的な方法は何か？
- ある技術が失敗した場合、人間や環境にはどのようなリスクがあるのか？

オープンデータ、厳密な科学、オープン ソフトウェアがなければ、技術や実践の実現可能性や潜在的な影響について、証拠に基づく検証可

能な評価を下すことは不可能です。国家や非国家主体による、テクノロジーや持続不可能な活動が環境に与える影響に関する情報の操作や隠蔽には、長い歴史があります。化石燃料産業による気候変動に関する研究の隠蔽、自動車産業による排出ガスに関するデータや測定値の操作、重要な環境安全情報の伝達不足など、汚染や環境災害は不透明な報告、難読化されたデータ、クローズドソース化されたモデルと密接に関係しています。グリーンウォッシングや環境情報の操作を避けるためには、技術の持続可能性、製品の環境フットプリント、人間の行動の影響に関する主張が、定量化可能で検証可能な証拠に基づいていることを確認する必要があります。同様に、政策の立案と、それが人々と地球に与える現実的な影響は、科学に基づいたオープンなアプローチによって導かれなければなりません。

サステナビリティにおける オープンソース文化の歴史

気象学者間の測定データの交換がなければ、この科学分野の黎明期に正確な天気予報を実現することは不可能だったでしょう。世界気象機関(WMO)の起源は約150年前に遡り、国際的な協力とデータの共有は当初からその活動の中心でした。

宇宙時代の到来により、気象衛星の数が少なくなったため、世界各国は大気やその他の地球システム全体の状態を理解するために、異なる観測所間でデータを共有する必要に迫られました。この技術革新の結果可能になった天気予報は、社会のあらゆる分野に大きな価値をもたらしました。このオープンな惑星規模の計算プロジェクトは、人為的な気候変動に対する私たちの認識を高め、このような環境下で行動する私たちの能力を向上させました。

民間の衛星データに対する商業的関心がますます強くなっているにもかかわらず、オープン データとオープン サイエンスの強力な文化が確立されています。現在、10 大国の未分類の地球観測衛星プログラムの41%がオープン データを提供しています。⁵ このデータへのオープン アクセスは、ランドサット アーカイブの例を用いて [図 B](#) に示したダウンロード数の急激な増加につながっています。また、第 2 回世界気候会

議で発足した全球気候観測システム (GCOS) の創設により、締約国は、データと分析の国際的かつ政府間共有を支援することが約束されました。⁶ より持続可能な社会への移行が急務であること、そして人為的な気候変動の兆候が明らかであることから、複数の新しい運動や組織が生まれましたが、そのすべてが領域を超えて同様のオープンな精神と使命を持っています。

- エネルギー分野では、[OpenMod Initiative](#) が 2014 年に設立されました。エネルギーモデルをオープン化することで、分野全体として製品の品質、透明性、信頼性を向上させ、より良い研究と政策を生み出すことを目標としています
- 2017 年、学者の Stefan Pfenninger は『[Nature](#)』に掲載された論文で、科学者たちにエネルギー分野の "Free The Models" を呼びかけ、Auke Hoekstra のような影響力のある科学者や Michael Liebreich のような起業家たちにも支持されました。これは、化石燃料を使わない経済への移行に不可欠な動きです。
- 2018 年、Shuli Goodman は、世界中の企業がエネルギー システム関連の OSS ツールを共同開発できるようにする Linux Foundation 内のオープンソース組織、[LF Energy](#) を設立しました。Shuli は 2023 年 1 月に惜しまれつつこの世を去りましたが、彼女の活動は LF Energy で続いています。
- [ClimateChange.ai](#) は、オープンなコミュニティを招集し、人工知能による気候変動への取り組みに関する複数の教育リソースを提供しています。
- よく知られた [Appropedia](#) コミュニティによって立ち上げられた [Open Climate Community Calls](#) は、オープン性と気候変動の関係を理解するために、異なるドメインの複数の個人間の世界的なつながりを作り出しました。
- [OS-Climate](#) は、環境・社会・ガバナンス (ESG) 評価の透明性とトレーサビリティを向上させ、オープンソースのツールチェーンを通じて持続可能な投資を支援するために、大手企業による Linux Foundation の大規模なコラボレーションを生みだしました。

- [The Digital Public Goods Alliance](#) は、デジタル公共財の発見と展開を促進する、国連事務総長お墨付きのイニシアチブです。[オープンサステナブルテクノロジー](#) プロジェクトと同様に、国連の持続可能な開発目標に関連する価値あるオープンソースプロジェクトのインデックスを提供し、[10 億ドルの投資コミットメント](#)を伴います。
- [The Coalition for Digital Environment Sustainability \(CODES\)](#) は、科学界、政府機関、NGO、ハイテク企業、市民社会が結集し、デジタル サステナビリティを推進する国際的なマルチステークホルダー連合です。

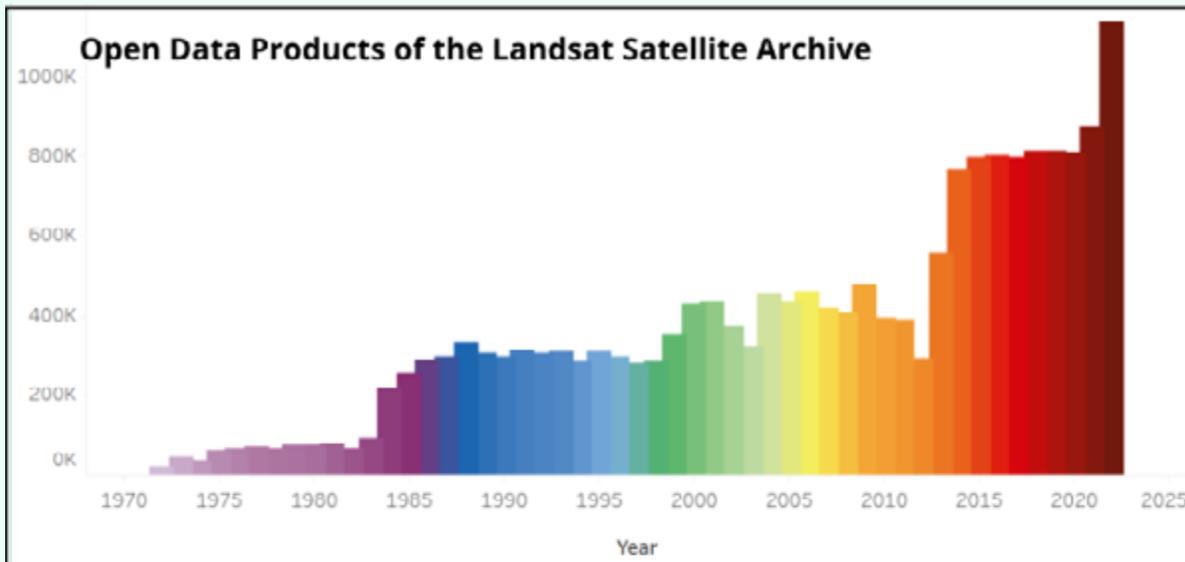
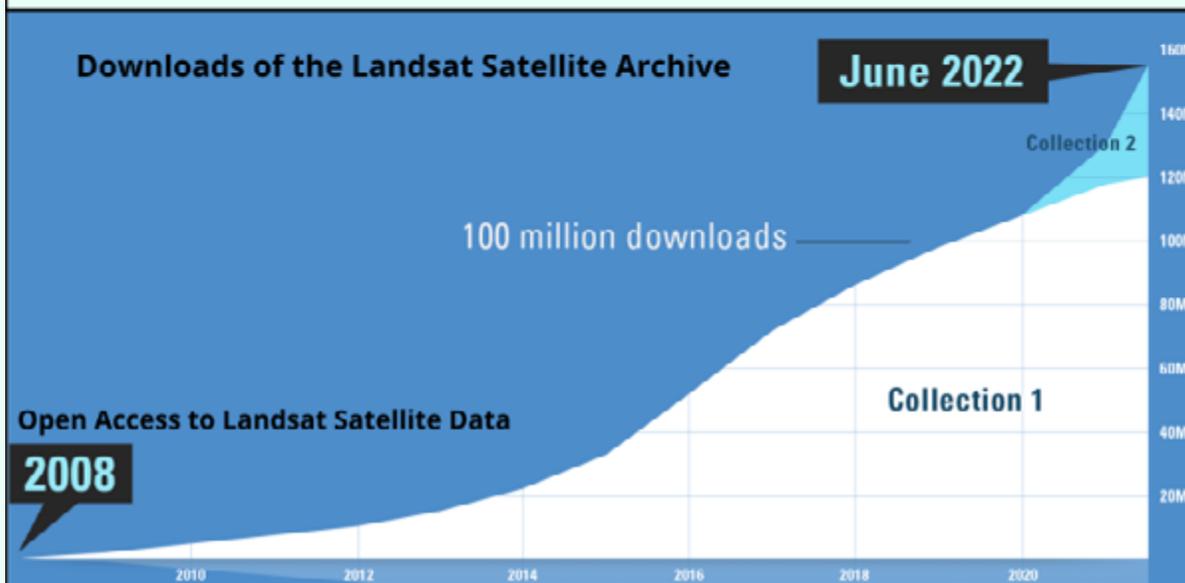


図 B - ランドサット アーカイブの公開により、これらの衛星データの利用は顕著に増加した。ランドサット アーカイブ ダッシュボード



オープン サステナビリティ原則

オープンであることは、**協調的なセンスメイキングの基礎を提供し、私たちの地球の状態についての正確で共有された理解に基づく有意義なコンセンサスを可能にします。**

オープンであることは、持続可能性の重要な指標です。オープンであることで、さまざまな分野、組織、社会が持続可能性に関する理解を体系的に深め、新しい情報に効果的に対応することができます。この反復的イノベーションの基本的な考え方は、しばしば Issac Newton の造語である「巨人の肩の上に立つ」¹ という比喩と関連しています。自分の意図や結論を透明化し、アクセスしやすくすることで、知識は蓄積され続け、時間の経過とともに洗練されていきます。「オープンであること」が長期的な持続可能性に不可欠なのは、情報と知識の完全性とアクセシビリティです。オープンであることは、協調的なセンスメイキングの基礎を提供し、私たちの地球の状態についての正確で共有された理解に基づく有意義なコンセンサスを可能にします。



図 C - 科学と知識の進歩は「巨人の肩の上に立つ」という比喩で表現されます。巨人とは、長年にわたって蓄積され、証明された情報と知識を表し、その肩の上にいる人は、他の方法では不可能なほど遠くまで見通すことができます。
日の出を探す盲目のオリオン
ニコラ・プッサン作 1658 年

本研究における領域横断的な定量的分析、議論、調査により、**オープン サステナビリティ原則**と呼ばれる以下の指針を特定することが可能となりました。

透明性と信頼

人間の行動が環境にどのような影響を与えるのか、そしてどのような慣行や技術が長期的に天然資源を保護するのかを理解することは、持続可能な経済にとって不可欠です。多くの解決策は複雑であり、経済的に実行可能かどうか、社会的に包括的かどうか、環境的に持続可能かどうかは必ずしも明らかではありません。オープンソースのアプローチは、公開の精査と独立した監査を可能にします。オープンなデータとモデルは、透明性の高い評価指標と、より包括的な持続可能性への影響評価を生み出します。

追跡可能な意思決定

オープンソース アプローチは、さまざまな解決策を展開し、環境への影響を科学的に評価するために何が必要かを共通理解します。より正確な情報を得ることで、最も有効な解決策に努力を集中することができます。オープンサイエンスは、これらのモデルや測定背後にある仮定を開示し、継続的な改善と観察を通じて長期的に不確実性を低減します。意思決定プロセスの各段階（例：モデル化、予測、影響評価）において透明性を求めることは、グリーンウォッシュを減らし、国家と非国家主体双方の環境影響が検証可能で追跡可能であることを保証するのに役立ちます。

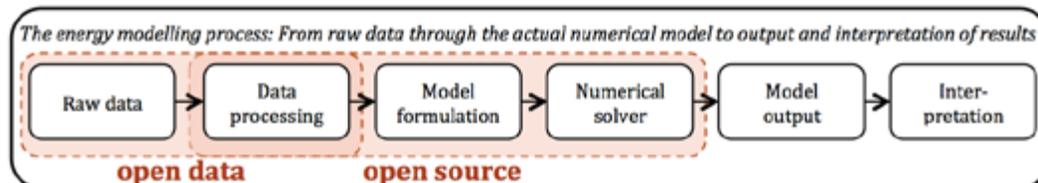
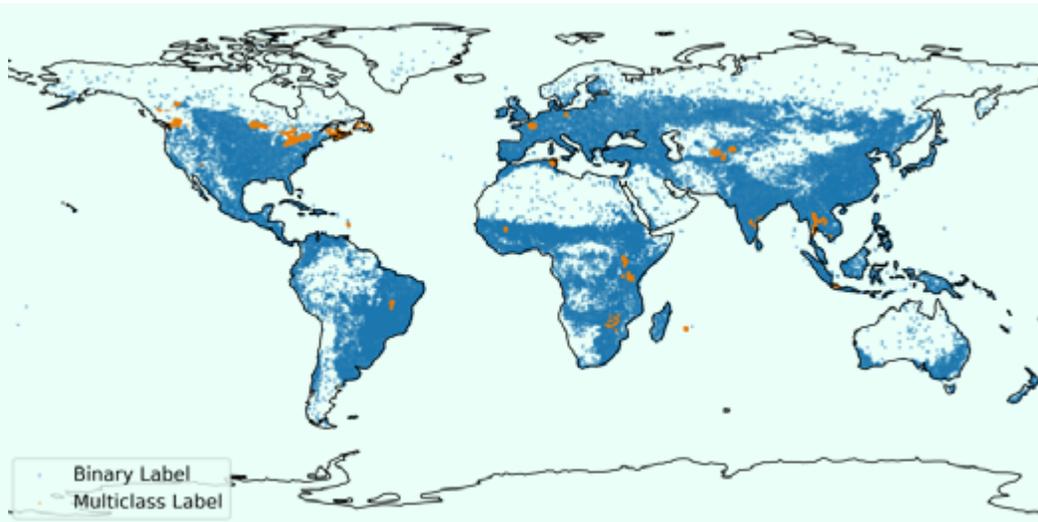


図 D - **openmod** マニフェスト は、エネルギー部門の脱炭素化において、いかに追跡可能な意思決定が可能かを示しています。データ、モデル、議論をオープンにすることで、科学と社会にとって追跡可能な知識の創造が可能になります。ライセンス: [CC 4.0](#)

コラボレーティブ イノベーション

オープン イノベーション戦略は、コラボレーション文化を加速させます。これは経済的にも商業的にも大きな利点となります。新たなビジネスチャンスの発見 新たなビジネスチャンスの発見、開発されたソリューションの柔軟性の向上、経済の多様性と複雑性の強化の多様性と複雑性の向上、そして、より広範なコミュニティが、継続的なイノベーションの流れを発展させる動機付けとなります。² オープンソース アプローチはまた、それぞれの明確な問題を一度だけ解決すればよいということを意味します。しばしば、複数の関係者がオープンデータ製品、アルゴリズム、ソフトウェアに投資し、重複、支離滅裂な結果、非効率な資源の利用を招いています。オープンなコラボレーションを通じて、OSS は資源配分の非効率性を緩和し、分散化された緩やかな協調アプローチによる秩序の出現を可能にします。OSS はまた、ソフトウェア貢献者間の共同作業の実践を標準化しました。これにより、共同ソフトウェア開発の利益は、共通の標準とより高いコード品質へと還元されます。



過去 10 年間、複数の企業がオープン ビジネスも成長し、財政的にも持続可能であることを実証してきました。オープンソース ソフトウェア とハードウェアの経済効果に関する 2021 年の調査では、オープンソース技術が欧州経済に 650 億ユーロから 950 億ユーロをもたらしたと結論付けています。オープンソースは、欧州で最も重要な水平的経済関係者である中小企業を大幅に後押ししました。その成長は、年間 650 社を超える技術系新興企業の増加にも反映されています。商用オープンソースは、独自のカンファレンス、ビジネスモデル、戦略、OSSC やオープン コア ベンチャーズのようなベンチャーキャピタルファンドを擁し、昨年大きな盛り上がりを見せました。これらの動きは、古典的なプロプライエタリなビジネスモデルからの体系的なシフトを推進する新しいオープンな考え方をすでに示しています。

地域化と地方分権

技術力の高い裕福な経済圏は、技術をオープンにライセンスすることで、新興経済圏が気候変動により迅速に適応できるようにすることができます。オープンソースをベースとした参加とコラボレーションは、持続可能な開発に関する知識のグローバルな循環に大きく貢献します。さらに、情報や技術を共有することで、資源に恵まれないコミュニティは、地域の学際的能力を迅速に構築することができます。デジタルと持続可能性の両方の変革を加速させることができます。これは、移動、食糧、住宅など、場所を基盤としたイノベーションにとって特に重要です。各国はまた、インフラのニーズを満たすために、オープンソース テクノロジーを迅速に展開し、適応させるための支援を受けなければなりません。これには、経済の複雑性を高め、雇用を拡大し、資源と効率の向上を促進する可能性があります。

図 E - CropHarvest は、ベンチマークを持つオープンソースの農業用リモート センシング データセットです。様々な農業土地利用データセットとリモート センシング製品からデータを収集します。ライセンス [CC-BY-4.0](#)

エグゼクティブ サマリー

オープンソースはどこにでも存在しています。その透明でコラボレーティブなイノベーションの文化は現代社会を変革し、重要なデジタル インフラやサービスの 97%以上がオープンソースに依存しています。オープンソースの役割は、環境問題に取り組む上でますます重要になってきています。数十年にわたって蓄積され、共有されてきた数学モデル、データ、計測ツールは、新鮮な水、肥沃な土壌、きれいな空気、安定した気候といった地球の重要な資源を保全するために必要な理解を世界中のコミュニティに与えてきました。オープンな文化的・技術的アプローチは、追跡可能な意思決定を支援し、ローカライゼーションとカスタマイズのための能力を構築し、参加のための新たな機会を提供し、透明性と信頼を確保することによってグリーンウォッシングを防止するために不可欠です。

しかし、オープンソースがもたらす変革のインパクトにもかかわらず、環境維持におけるその可能性は十分に理解されていません。その結果、組織的な投資不足が生じ、最終的には、社会の最も差し迫った課題に対処するための集団的な能力が制限されています。イノベーションと持続可能性を大規模に達成するために、オープンソースの取り組みを加速させる必要性は明らかです。しかし、どのプロジェクトが重要なデジタル インフラとみなされるのか、あるいは資金やリソースの面で大きなギャップが存在するのかを体系的に評価することは、これまで欠けていました。

本レポートは、持続可能性と気候変動技術の分野におけるオープンソース ソフトウェアのエコシステムを初めて包括的に分析したメタ分析です。**オープン サステナブル テクノロジー** プロジェクトとその**関連データベース**の一環として、活発に開発されている 1000 以上のオープンソース プロジェクトと組織をまとめ、定性的・定量的手法を用いて体系的に分析しました。この分析は、技術的、社会的、組織的といった複数の側面をカバーしており、コミュニティ構築、政策開発、将来の投資を導くための実証的な基盤を提供しています。この新たなエコシステムの健全性と活力を検証し、ユーザー、開発者、意思決定者にとっての主要なリスクと機会を浮き彫りにします。最後に、重要性を増すこの分

野において、オープンソースの普及と採用を加速させるための共有ビジョンと戦略を提示します。主要な目的は、環境持続可能性におけるオープンソースの利用を加速するためのビジョンを作成し、戦略を策定することです。

我々の調査結果は、より持続可能な未来への移行におけるテクノロジーの重要性が広く認識されている一方で、人間が設計したシステムの研究、設計、運用、保守に使用されるオープンな文化的・技術的アプローチが、それ自体として考慮されることはほとんどないことを明らかにしました。他の領域ではオープンソースの変革の可能性が証明されているにもかかわらず、変革戦略としての持続可能性においてオープンソースが果たす役割はまだ微々たるものです。

確認されたプロジェクトの半数は、気候科学、生物圏、エネルギーシステム モデリング、交通、建築物など、影響力が大きくデータが豊富な分野です。カーボン オフセット、バッテリー技術、持続可能な投資、排出量観測、統合評価モデリングなど、その他のテーマでは目立った進展は見られません。ほとんどの確認されたプロジェクトは比較的若く、年齢の中央値は 4.45 年です。にもかかわらず、オープンソースの貢献者は、十分なリソースとサポートがあれば、革新的な能力とプロジェクトの長寿命を維持できる高いレベルの知識と能力を示しています。

知識、作業、プロジェクト ガバナンスの分布を分析すると、小規模なオープンソース コミュニティが、このエコシステムにおける開発の大部分を主導していることがわかります。平均して、オープンソース ソフトウェア プロジェクトは、プロジェクトに対するコントリビューションの ~70% を担当する一人のプログラマーに大きく依存しています。これは、多くのプロジェクトの可能性を制限する潜在的な貢献者リスクを示しています。オープンな情報と知識の交換においては、学術機関といくつかの政府機関がこのエコシステムに大きく貢献しており、セクター間の不均衡が見られます。一方、オープンソースのビジネスモデルを持つ営利団体や新興企業の少なさは、特にこの領域におけるベンチャーの頭頭を考えると、注目に値します。

確認されたプロジェクトの多くは、持続可能な成果を可能にし、加速するものです。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の評価を支えるモデルを支えるコンソーシアムの取り組みから、世界中の意思決定者にリアルタイムの電力に関する洞察を提供するコミュニティ主導のプロジェクトまで、その範囲は多岐にわたります。

最後に、本レポートは、この新たなエコシステムの中で具体化される4つの指針を提示し、これを「オープンサステナビリティ原則」と定義しています。「透明性と信頼」、「追跡可能な意思決定」、「コラボレーティブイノベーション」、「地域化と分散化」です。これらの原則は、コラボレーティブなセンスメイキングの基礎を提供し、私たちの地球の状態に関する正確で共有された理解に基づく有意義なコンセンサスを可能にし、私たちの選択意思決定をどのように調整するのが最善かについての方向性を示し、効果的な行動のための能力を構築します。

私たちは、人々と地球にとって安全で公平な回廊を実現するためには、デジタルと持続可能な変革がデジタル公共財として融合しなければならないと結論づけます。オープンな持続可能性の原則は、政府、研究機関、非政府組織、企業が脱炭素化に向けて迅速に前進し、天然資源と生態系をよりよく保全するのに役立てられます。そこで、我々は、オープンソースの持続可能性のエコシステムのためのより大きな能力と支援を構築するためのいくつかの提言を行います。

- 特定されたオープンソース コミュニティの相互接続と知識交換を強化する。
- プロジェクトを地域のユースケースに接続することにより、能力を構築し、実社会へのインパクトの可能性を高める。
- 既存のプロジェクトを、グローバルサウス（南半球）の十分に代表されていない国々に適応させ、拡張する。
- 開発とメンテナンスのためのコア資金を提供する専用ファンドを含め、環境持続可能性におけるオープンソースのためのインキュベーターやその他の支援プログラムを創設する。
- 「車輪の再発明」を避けるため、部門間および部門内のプラットフォーム、データ、モデル、オープンソースツール間のより良い技術的インターフェイスを開発する。
- 異なるレベルの政府間での環境データ交換を標準化する。
- 国家や産業が環境に与える影響に関する知識のギャップを埋める。
- 持続可能な投資のための透明で科学的な意思決定を通じて、金融機関を変革する。
- 持続可能な技術に資金を提供する際、「オープンソース ファースト」の基準を適用する。
- 地球規模での持続可能な開発の推進におけるオープンソースの貢献を認識する。

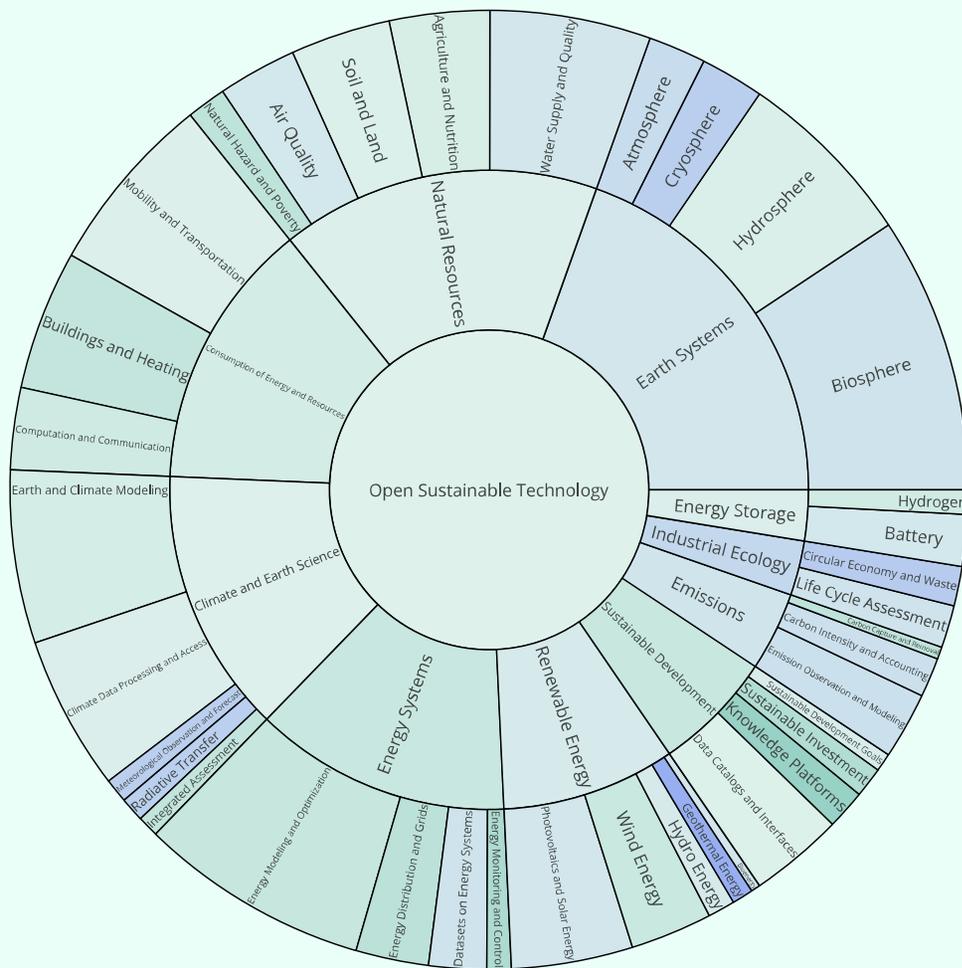
インサイト

本稿執筆時点で、世界中で 1339 のプロジェクトが確認されています。このうち、1188 プロジェクトが GitHub に、27 プロジェクトが GitLab に、125 プロジェクトがその他のウェブサイトやセルフホストの Git プラットフォームにホストされています。

合計 996 のアクティブなプロジェクトリポジトリが見つかりました。公開リポジトリに過去 1 年以内に少なくとも 1 つのコミットまたはクローズされた issue がある場合、そのプロジェクトはアクティブであるとみなされます。アクティブでないプロジェクトや、2 年前のデータ収集開始以降にアクティブでなくなったプロジェクト (192 件) は、現在のトレンドが歪むのを防ぐため、分析から除外しています。特に断りのない限り、この調査のすべてのプロットはアクティブなプロジェクトを指しています。

DIMENSION	VALUE
Total number of projects	1,339
GitHub projects	1,187
GitLab projects	27
Other platforms	125
Number of projects in personal namespace	547
Number of projects in community namespace	792
Total stars of all projects	126,568
Total contributors in all projects	14,628
Active GitHub projects	995
Inactive GitHub projects	192
Projects with contribution guide in %	30.58
Projects with code of conduct in %	13.98
Projects accepting donations in %	3.71
Median number of commits	481
Median stargazers	42
Median stars last year	11
Median Development Distribution Score	0.3043
Median number of contributors	6
Median closed issues last year	8
Median commits last year	23
Median age in years	4.45

図 1 - 全分析プロジェクトの概要分析

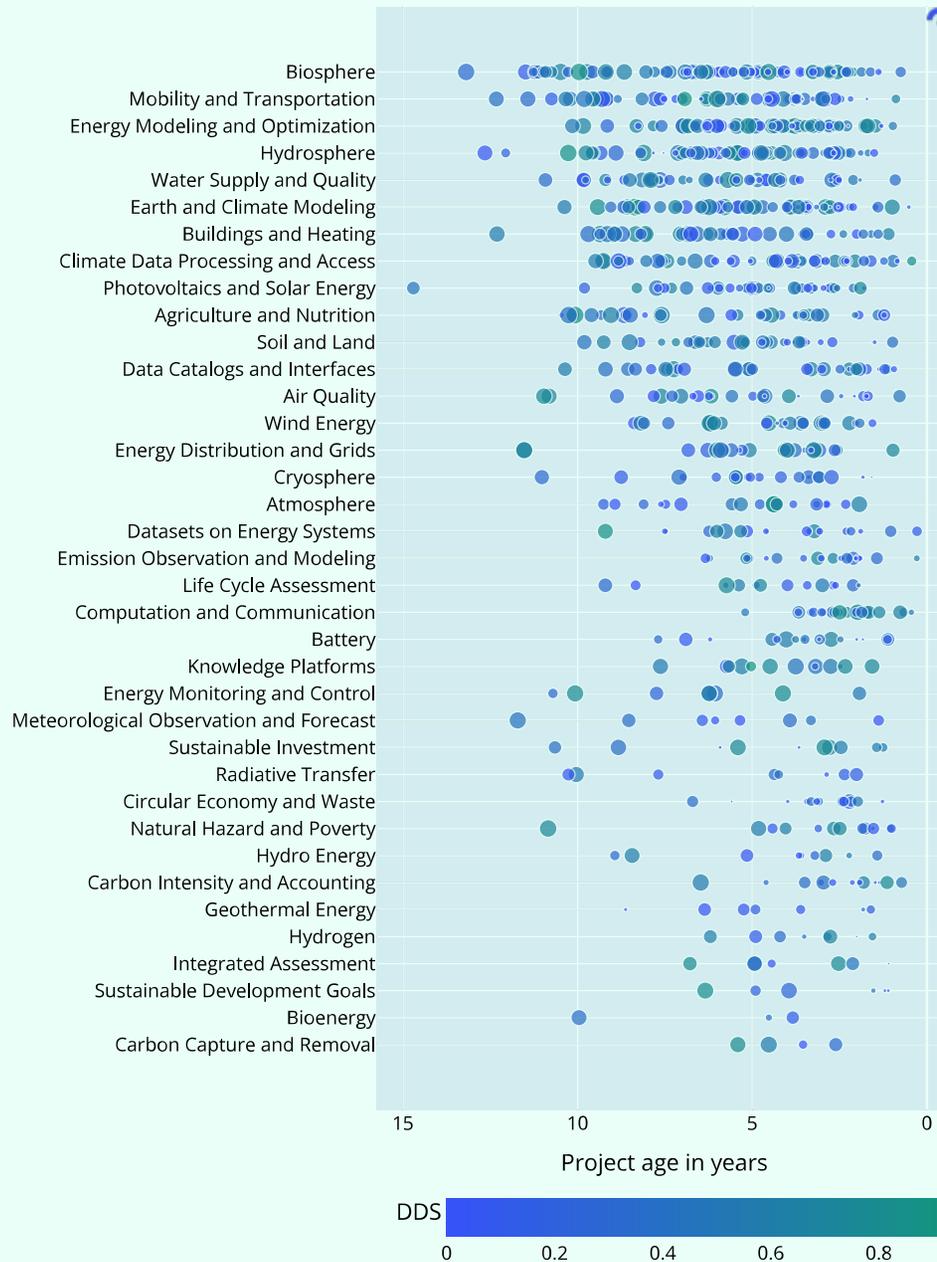


エコシステム

プロジェクトは、その主要なテーマに基づいて分野別に分類されています。その境界線はしばしば重なり合いますが、これらの分野は広い視野を描くのに役立ち、エコシステムの健全性と分野の複雑性を相対的に把握するのに助けとなります。以下のサンバースト図は、分野、トピック、プロジェクトの関係を示しています。色は、平均的な開発分布スコア (DDS) からの乖離を表しています。DDS は開発者間の仕事の配分を測定し、値が高いほど仕事の配分が多く、したがって開発者コミュニティが平均より強いことを示しています。インタラクティブなサンバースト図でエコシステムを発見してください。

図 2 - すべての調査対象プロジェクトは、対応する分野とトピックに分類されています

Projects over time by topic



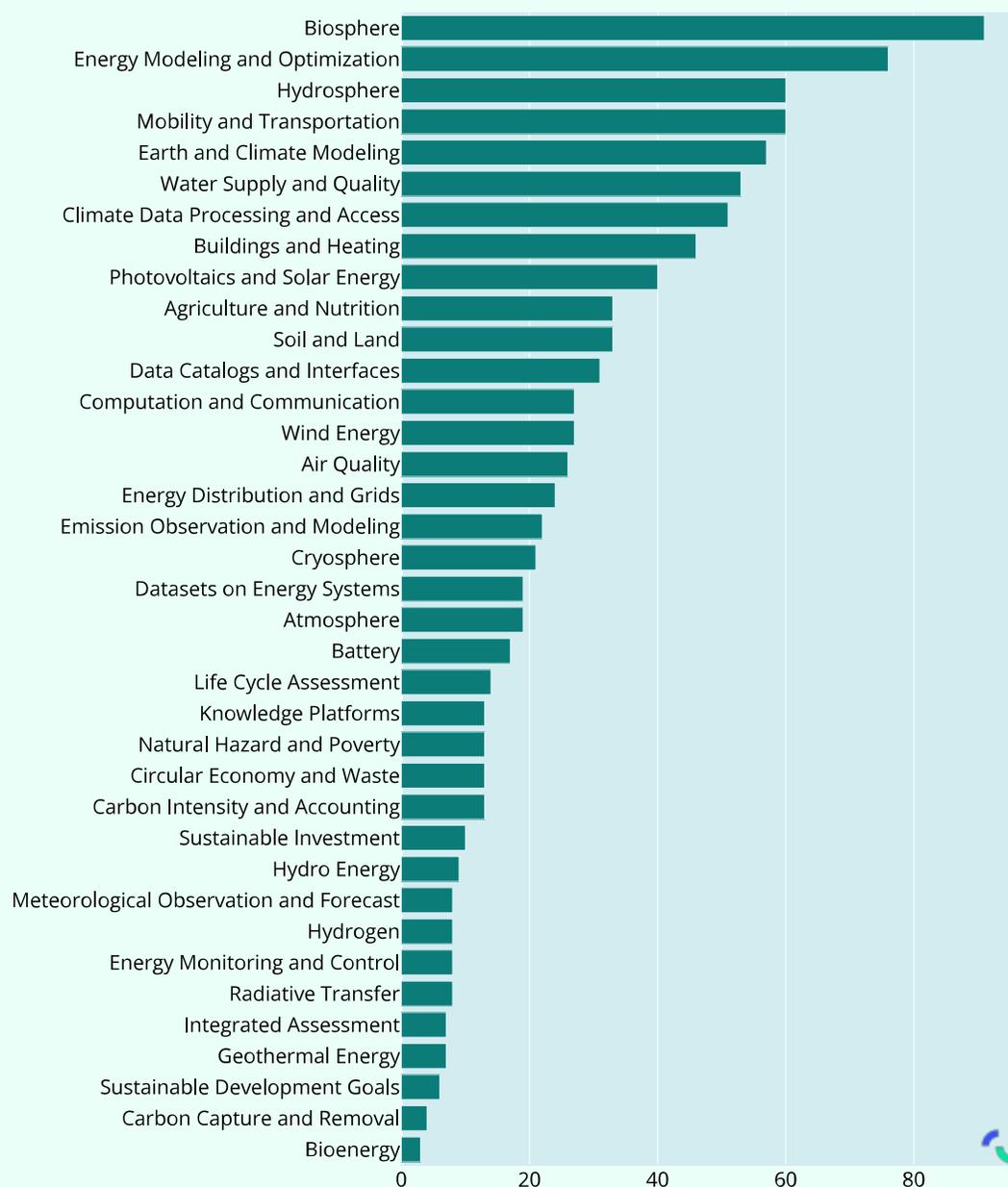
トピックス

プロジェクト トピックスは、セクター、技術、研究分野にまたがって抽出されています。このマッピングプロセスは、分析の一環として何度も繰り返されました。このマッピングプロセスは、分析の一環として何度も繰り返されたものであり、ニッチの発展や出現に伴い、今後も進化し続けるでしょう。トピックの範囲を直接比較することは難しいかもしれませんが、相対的な大きさや複雑さによって、無視され、活気があり、研究分野も多岐にわたるトピックを特定することができます。

以下の散布図は、それぞれのトピック内で調査されたすべてのプロジェクトの概要を示しています。円の大きさは、コミット数と貢献数の合計に基づく、プロジェクトの相対的な規模に比例しています。

図 3 - GitHub の立ち上げから 14 年間の全プロジェクトの概要

Projects within topics



特定されたプロジェクトの 45%は、生物圏、水圏、水供給と水質、エネルギーシステム モデリング、モビリティと輸送、建物と暖房の分野で見られます。これは、これらの分野の研究が成熟していること、背後に多数の科学組織があること、そしてこれらの分野のオープンデータが比較的利用しやすいことに起因していると思われます。特に、太陽光発電や風力エネルギーなど、さまざまな再生可能エネルギー技術にわたるエネルギー モデリングと最適化の分野では、強力なオープンソース エコシステムを見ることができます。しかし、エネルギー貯蔵のためのバッテリーの重要性にもかかわらず、開発中の OSS プロジェクトはわずかです。

その他の分野では、オープンソース プロジェクトの数はかなり限られています。例えば、持続可能な投資はわずか 1.15% (合計 11 プロジェクト)、排出量の観測とモデリングはわずか 2.1% (22 プロジェクト) です。

図 4 - トピック内の個別プロジェクト数

OSS の代表数が少ないトピックには、バイオエネルギー、水素、炭素回収などがあります。政府や投資家から多額の資金を集め続けているにもかかわらず、これらの技術に関連するオープンソース プロジェクトの数が少ないため、持続可能な開発の状況や潜在的な貢献を定量化することは困難です。カーボン オフセット、カーボン クレジット、気候中立性の開示といったトピックは、OSS プロジェクトが全般的に不足しているため、深く調査することができませんでした。

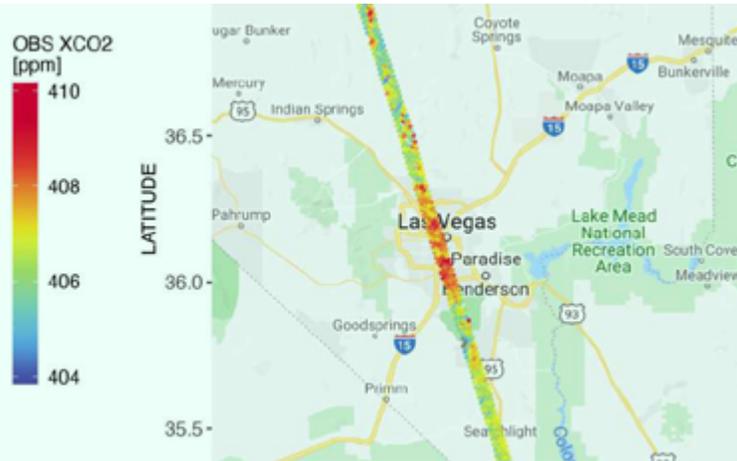


図 5 - pco2peak の目的は、NASA の OCO-2 Satellite によって測定された炭素濃度データに基づいて、地球上の CO2 排出量を局所化することです。排出量の観測とモデリングの分野で公開されている数少ないオープン ソフトウェア ツールのひとつです。

人気と持続性

特定のトピックや分野の人気は、GitHub 上のすべての関連プロジェクトの星の数を合計することで判断できます。しかし、GitHub で検索してみると、オープンソースのサステナビリティ エコシステム全体を合わせたよりも多くの星を持つプロジェクトが 27 あることがわかりました。星の数の中央値は 42 個で、星が 1,000 個以上のプロジェクトは 3 つしかないことから、サステナビリティ エコシステムは GitHub 上では比較的不人気であると考えられます。

エネルギー、輸送、地球観測、気象学などのトピックで、高い普及率が見られます。これらは、ソフトウェアの革新が特に重要視されている分野のほんの一例に過ぎず、オープンソース ソフトウェアがこれらのコミュニティでより広く認知されている理由を説明することができます。

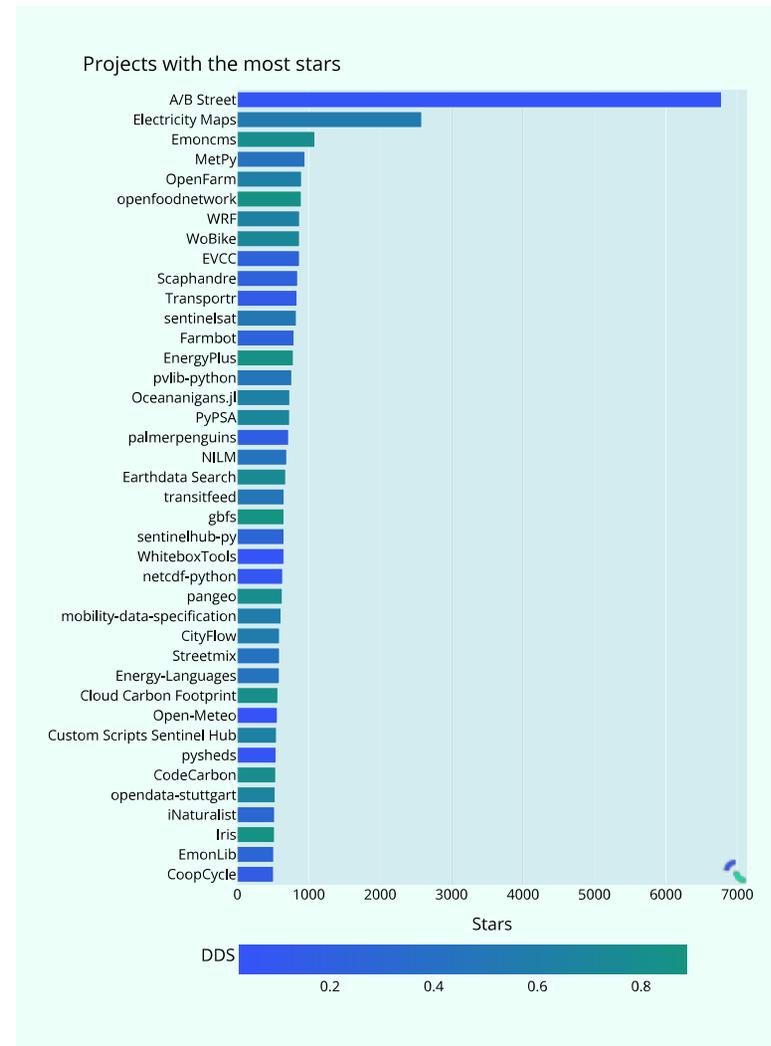


図 6 - 最も星の多いプロジェクト

ここでは、異なるドメインやアプリケーションのアクセシビリティも考慮しなければなりません。A/B Street、Electricity Map、OpenFarm、Open Food Network、Emoncms、StreetMix、Farmbot などのプロジェクトは、ソフトウェア開発者やエンドユーザーにとって比較的参入障壁が低くなっています。これらのプロジェクトは、幅広い利用者に語りかけることができ、貢献や利用に必要な専門知識や技術的知識も少なくてすみます。したがって、一般的な認知度も高いのです。

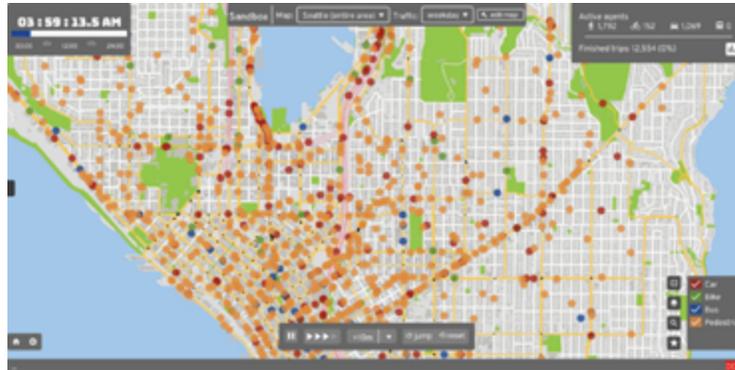
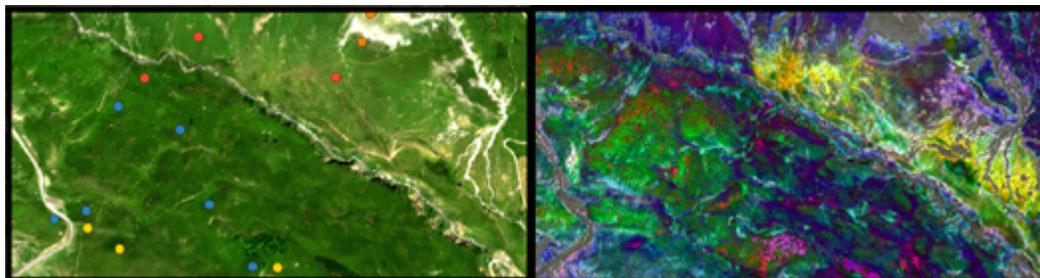


図 7 - A/B Street - 交通計画と交通シミュレーションソフトウェア 徒歩、自転車、公共交通に優しい都市づくりのために。ライセンス Apache-2.0

一方、人気とインパクトを混同してはいけません。例えば BiodivMapR は、マルチスペクトル衛星画像に基づいて生物多様性の世界地図を作成する可能性を秘めています。また、Santiago.jl のような衛生問題やバイオガスに関するプロジェクトも、スター指標に基づく一見人気がないように見えますが、それぞれエネルギー供給や水質に大きな影響を与える可能性があります。



リポジトリの寿命も重要な健康インジケータです。プロジェクトが長い間活発に使われていれば、開発者やユーザーがそのプロジェクトの継続的な開発に関心を持っていると推測できます。すべてのプロジェクトの年齢は、若いプロジェクトほど急激に下がり、3.2 年でピークに達するという、ほぼ正規分布に従っています。

リポジトリの年齢分布を詳しく見ると、年齢の中央値は 4.45 年であり、ほとんどのプロジェクト開発が最近始まったことを示唆しています。プロジェクトの年齢分布によると、新規プロジェクトの数は近年減少しています。これが実際の傾向かどうかを判断するには、さらなる分析が必要です。

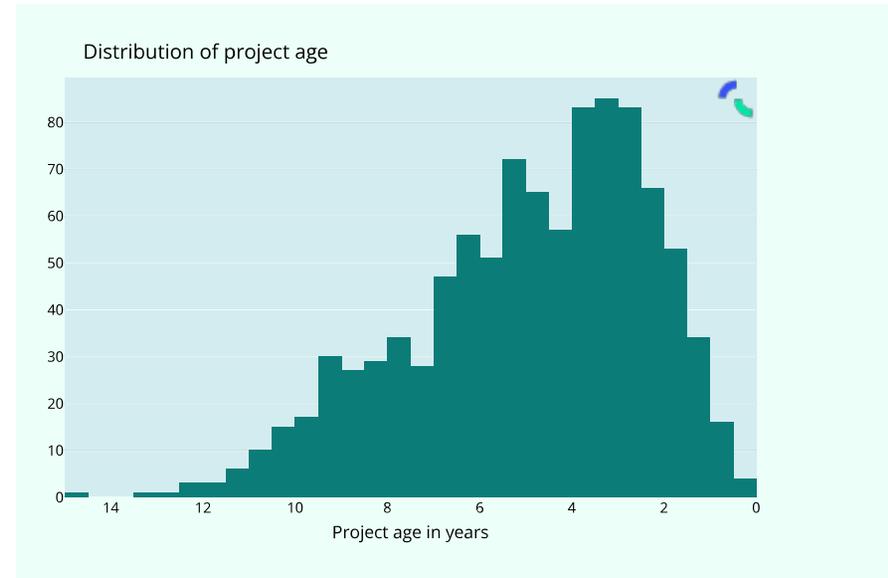


図 8 - biodivMapR - αおよびβ多様性のための R パッケージ。マッピングのための R パッケージ。画像。左の画像は可視スペクトル 複数の検証サイトを持つ。右の画像は 導出された生物多様性。ライセンス GPL-3.0

図 9 - プロジェクト年齢の分布

The oldest projects still active

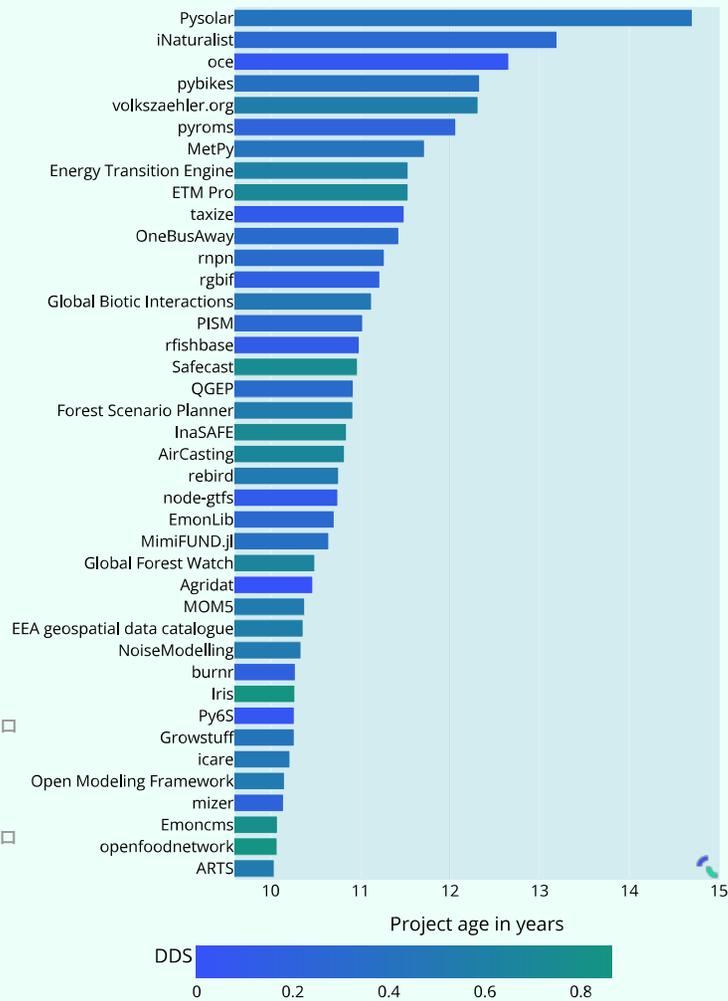
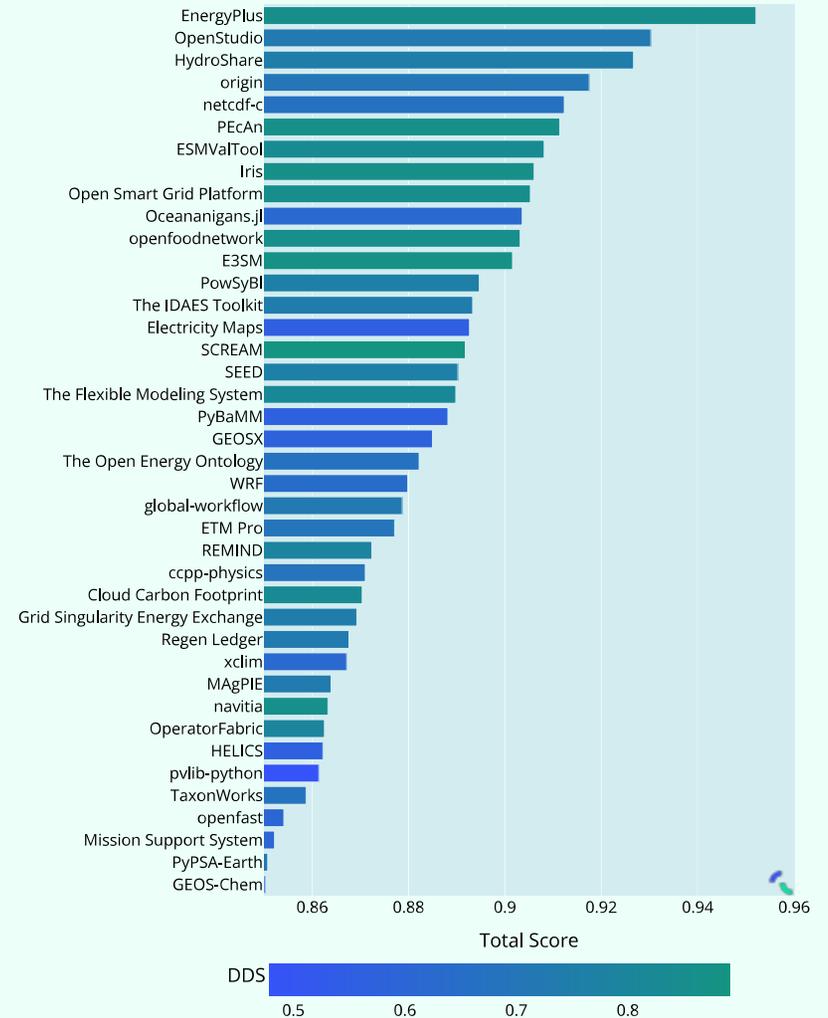


図 10 (左) -
現在も活動している最も古いプロジェクト

図 11 (右) -
総得点が最も高かった 40 のプロジェクト

Top 40 total score



Pysolar、iNaturalist、OCE など、最も古くから活動しているプロジェクトの多くは、OSS における他の組織のシェアがまだ低かった時代に、アカデミックなコミュニティで生まれたものです。これは、オープンソースコミュニティの草の根的な起源を示しています。これらのプロジェク

トの中には、Py6S、agridat、oce のように、10 年以上にわたって一人の貢献者によって主に開発されてきたものもあります。

プログラミング言語

利用されているプログラミング言語の種類は、コード貢献者に要求されるスキルやプロジェクト自体の性質についての洞察を提供します。この指標は、ビギナーがオープンソースプロジェクトをナビゲートするのに役立つだけでなく、プロジェクトやプロダクトの管理者が、自身の経験や組織の文脈の中でプロジェクトのプロファイルを洞察するのにも役立ちます。また、興味のあるトピックに応じて、どのプログラミング言語の学習に重点を置くべきかを学生に知らせるのにも役立ちます。

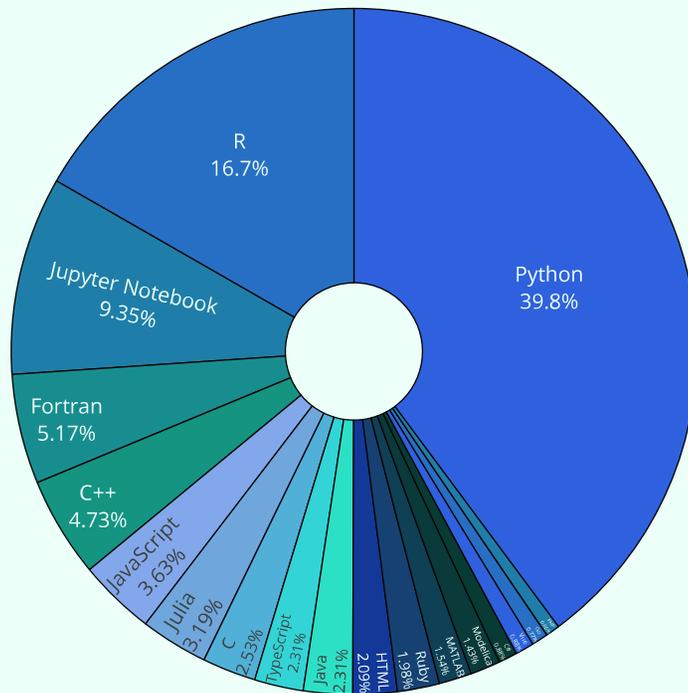


図 12 - プログラミング言語の分布

Pythonは、持続可能性のためのOSSムーブメントを支配し、全プロジェクトの39.8%で使用されており、R(16.7%)、Jupyter notebooks(9.34%)、Fortran、C++、Javaなどの他の言語がそれに続いています。GitHub 2.0の統計とGitHubの公式な数字から、オープンソースプロジェクトのプログラミング言語の使用状況についてより広く知ることができます。より広範なオープンソースエコシステムと比較すると、Pythonは、JavaScriptのような広く普及している言語と比較して、分析されたりポジトリ内で著しく高い使用率を持っていることは明らかです。これは、PythonとJupyter Notebooksがますます支配的になっている大規模なデータセットの分析に強く重点を置いていることを示しており、Webアプリケーション側にはあまり重点を置いていません。

Rの使用は、より広範なオープンソースのエコシステムから大きく逸脱しています。Rで書かれたソフトウェアは、特に生物圏、水圏、水供給、土壌と土地利用、気候、食糧と農業のトピックに集中しています。これは、これらのトピックにおいてデータ駆動型および統計関連のプロジェクトが多いことに起因しています。Fortranは65年以上の歴史があるにもかかわらず、水圏、気候、大気の各分野に適用される地球システムモデルで広く使用されています。これは、これらのプロジェクトの開発期間が長いことと、高性能計算のためにこのようなモデルの数値計算効率が必要であることから説明できます。比較的新しい言語であるJuliaもまた、特に気候分野において幅広い用途があります。建築シミュレーションのような特殊なユースケースでは、Modelicaのようなプログラミング言語がよく使われています。

ライセンス

ライセンスは、今日最も革新的な技術の多くを支えるコミュニティが、自分たちの創作物を適切と思われる方法で保護できることを保証します。オープンソースライセンスは、法的な観点からオープン性がどのように定義されるかを決定するものです。

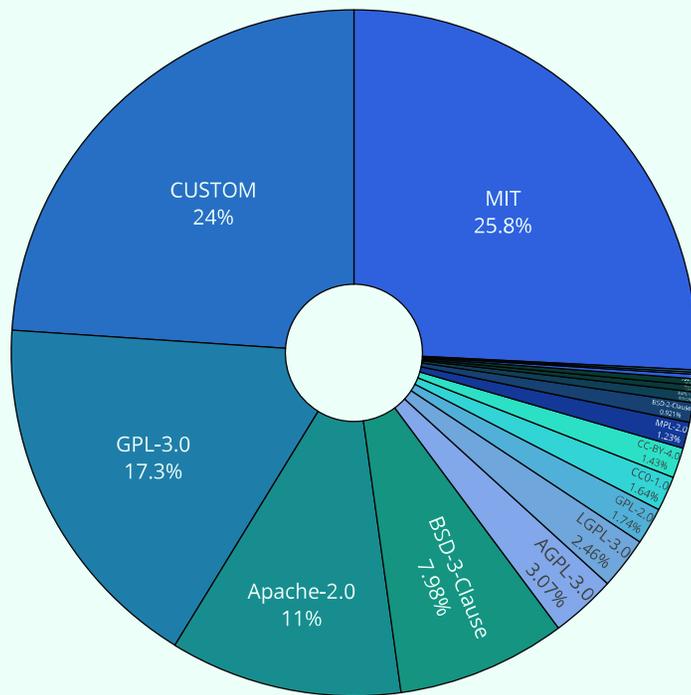


図 13 - ライセンスの分布

BSD、Apache、MITのような寛容なライセンスは、持続可能性の分野で最も人気があります。MITライセンスがトップで、プロジェクトの~26%で使われています。MITは短くシンプルな寛容ライセンスです。寛容なライセンスは、商用製品での使用が容易であり、コピーレフトのライセンスとは異なり、すべてのコードを同様のライセンスでリリースすることを強制するものではありません。MITのような寛容なライセンスは、プロプライエタリソフトウェアの中でOSSプロジェクトを再利用し、商業化するための多くの機会を生み出します。一方、このライセンスのプロジェクトは、プロプライエタリな製品の使用によって危険にさらされる可能性があります。例えば、企業はバグフィックスや機能拡張をリリースする必要がないため、改良をオープンソースプロジェクトに還元することができません。場合によっては、全体的な開発努力のキャパシティが減少していることが明らかになるにつれて、開発者が貢献するモチベーションを失うことにつながります。

2番目に多く使用されているライセンスは、カスタムライセンスで、24%のプロジェクトで使用されています。[SPDXライセンスリスト](#)に基づく標準的なオープンソースライセンスにマッピングできなかったすべてのプロジェクト、および元のオープンソースライセンスから変更を加えたプロジェクトは、カスタムライセンスであると考えられます。

GPL 3.0は、全プロジェクトの17.3%が使う、三番目によく使われるライセンスです。この強力なコピーレフトライセンスのもとでの許可は、ライセンスされた作品のソースコード全体と改変をライセンスすることを要求します。GPLは、ソフトウェアがプロプライエタリ、つまり私的なものにならないように保護するために作成されました。著作権とライセンス表示は保存されなければならない、貢献者は特許権を明示的に許諾しなければいけません。コピーレフトなライセンスは、中核となるプロジェクトの直接的な収益化に依存するビジネスモデルにおいて、より広く普及しています。

コミュニティ

開発分布スコア (Development Distribution Score)

Development Distribution Score (DDS) は、コミット数の多い貢献者を他の貢献者と比較することで、プロジェクトの貢献者間で開発がどのように分散されているかを評価するものです。知識、作業、ガバナンスの分散は、プロジェクトの長期的な存続に不可欠です。プロジェクトや組織が、社会的または技術的に大きな変化(たとえば、人材がプロジェクトから離れたり、貢献できなくなったり)を受けたとき、他のメンバーは、そのイニシアチブを継続するための知識や能力を必要とします。この指標は、プロジェクトが少数の貢献者に依存しているかどうか、その結果、変化に対する回復力があるかどうかを比較するものです。DDS が低いプロジェクトは、単一の組織や開発者による決定に対して脆弱であり、それが他の開発者やユーザーだけでなく、他のプロジェクトとの依存関係にも影響を及ぼしてしまいます。

コントリビューター

オープンソース プロジェクトには、ソフトウェア開発、製品管理、文書作成、イベント企画、コミュニティ管理、マーケティングなど、さまざまな活動を行うさまざまなタイプの貢献者がいます。何人の人々がプロジェクトに貢献しているのか、そして彼らが誰なのかを分析することは、OSS プロジェクトに対する組織と個人の関与を理解する上で非常に重要です。大規模な貢献基盤を持つプロジェクトのベストプラクティスは、その後、より広範なオープンソースの持続可能なエコシステムによって共有され、採用されることができます。この分析では、Git リポジトリに少なくとも 1 回コミットした人を貢献者と見なしています。図 14 に、貢献者の多い上位 40 プロジェクトのリストを示します。

貢献者の多いプロジェクトで DDS が高いのは、コミュニティ内のさまざまな人々の間で仕事を共有することの重要性を示しています。そうし

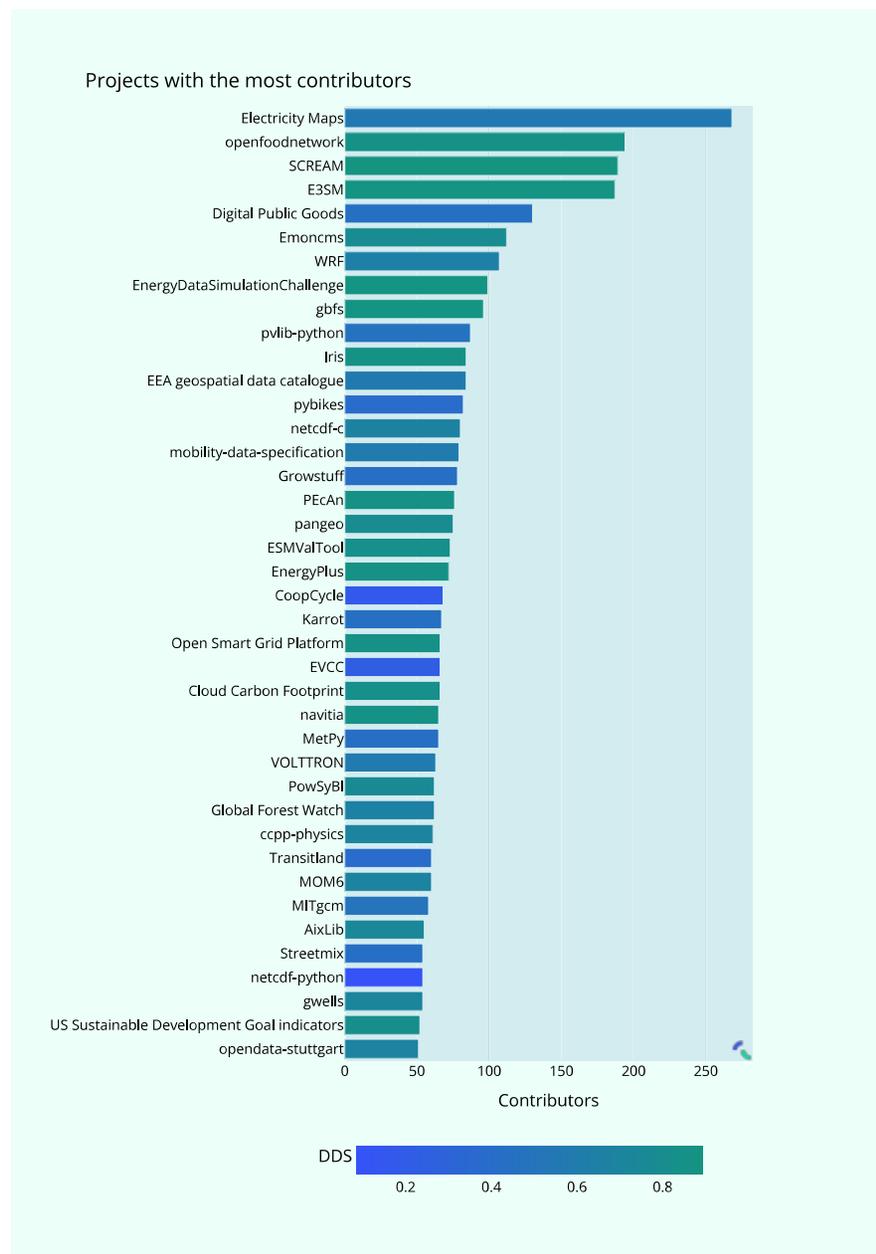


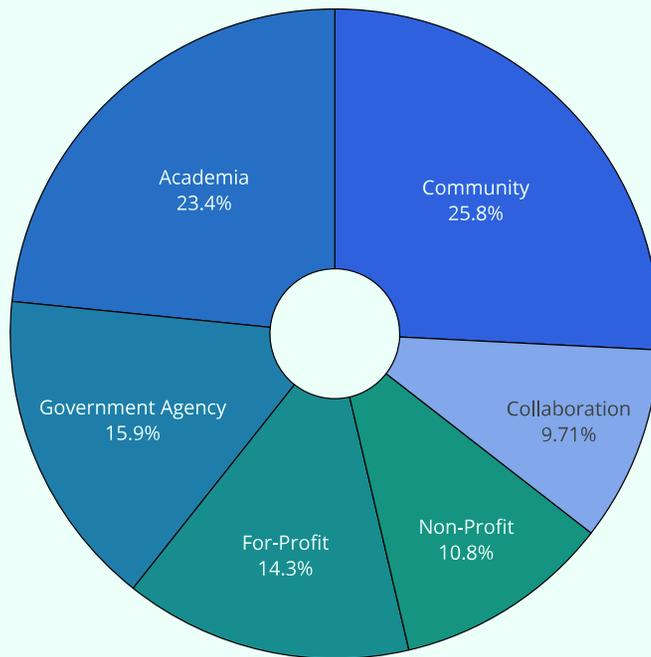
図 14 - 最も貢献者の多いプロジェクト

て初めて、大規模なコミュニティを構築することが可能になります。大気と気候を高解像度でグローバルにモデル化するプロジェクトは、多くの開発者を集めることができます。その例として、Energy Exascale Earth System Model (E3SM) と Simple Cloud-Resolving E3SM Atmosphere Model (SCREAM) が挙げられます。Electricity Maps は、地域の電力網からのエネルギー消費と生産に関するデータを単一のグローバルプラットフォーム上に統合するために、最も多くの開発者を動員することができました。

組織のダイバーシティ

図 15 - 組織形態の分布

特定されたプロジェクトに関連する組織の詳細が収集され、6つのカテゴリーに分類されました。



コミュニティ主導型 (25.8%): 組織に属さず、個人の貢献者が主導するプロジェクト。これらのプロジェクトは、私たちが確認した中で最も古いものでもあります。これらのプロジェクトを率いる組織は、高い柔軟性と自由度を特徴としており、OSS 運動そのものの原点を体現しています。組織的な提携やサポートがないため、財政的な持続可能性やリソースの面でリスクが大きくなる可能性があります。

ACADEMIA (23.4%): 学術研究所や研究機関によってホスト、管理、開発されているプロジェクト。大学、特にソフトウェア工学の研究室は、長期的な安定性と深い専門知識を提供することができます。同時に、そのような開発は、スタッフの入れ替わりが激しく、アカデミックな環境における財源が不足しているため、実用的な利用を回避し、開発能力を失う危険性があります。

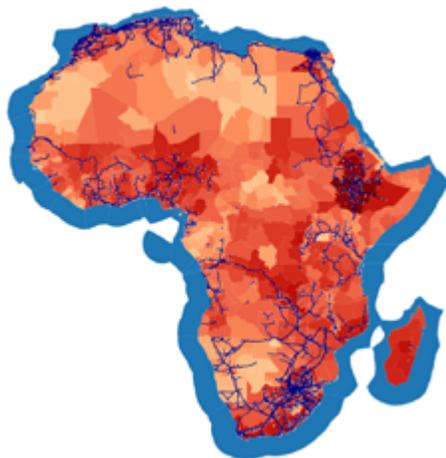
政府機関 (15.9%): 国や地方自治体が主催、主導、開発するプロジェクト。オープンソースは、ベンダーや政治的ロックインのリスクを低減する一方で、より大きなコントロールと独立性を提供し、政府がデジタル持続可能性の未来をより総合的に計画することを容易にします。このようなプロジェクトは、政治的再編成によってリソースを失う危険性があります。ここで良い例を示している米国の機関の多さには目を見張るものがあります。しかし、カナダのプリティッシュコロンビア州は、プロジェクトの多さと独自の「政府のためのデジタル原則」で際立っています。

FOR-PROFIT (14.3%): 民間企業が主導するプロジェクト。このようなプロジェクトは、急成長の可能性を秘めており、理論的な知識を実用化する機会を提供します。これらのプロジェクトは通常、開発初期に高いレベルの資源を持っていますが、企業戦略の変更により、それ以上の開発や維持ができなくなるリスクを抱えています。莫大な資本力があるにもかかわらず、オープンソースの環境持続可能性における営利組織の好例はほとんどありません。注目しているのは、Electricity Maps、Breakthrough Energy、Vizzuality、Ladybug Tools などです。

NON-PROFIT (10.8%): 株主に利益をもたらすことを主目的とせず、むしろ慈善的な目標を追求する組織によって開始されたプロジェクト。オープンソース開発の場合、十分なリソースが提供されれば、このような組織は、長期的なプロジェクトの持続可能性のための構造を提供することができます。Python Software Foundation や Linux Foundation のように、プロジェクトやコミュニティのさらなる成長のための法的構造を提供するために、コミュニティ指向のいくつかの組織が非営利団体となりました。ここで優先される強力な非営利団体は、[rOpenSci](#)、[Reiner Lemoine Institute](#)、[OpenClimateFix](#)、[Drawdown](#) などです。

コラボレーション (9.7%): 異なるアクターや機関のコンソーシアムがプロジェクトを主催、主導、または開発するイニシアチブ。このような組織形態は、異なるパートナー間の知識移転を生み出すのに特に適しています。さまざまな組織の多様性は、異なる視点からのメリットをもたらしますが、明確なリーダーシップがなければ、開発サイクルが長期化するリスクもあります。企業、市民社会、科学の間の目線レベルでの協力は、社会全体の持続可能な発展を促進する非常に高い可能性を秘めています。[科学的目標ネットワーク \(SBTN\)](#)、[カリフォルニア森林観測所](#)、[国際建築性能シミュレーション協会](#)などの協力がこれにあたります。

図 16 - [PyPSA-Earth](#) は、高い空間解像度と時間解像度のデータを持つ、初のオープンソースのグローバルエネルギーシステムモデルです。世界のエネルギーシステムまたはそのサブセットをモデル化できるツールを提供することで、大規模な共同研究を可能にします。ライセンス [GPL-3.0](#)



最も多く掲載されたプロジェクト

NAMESPACE	COUNTS
rOpenSci	28
National Renewable Energy Laboratory	24
Province of British Columbia	10
oemof community	8
PyPSA	7
National Center for Atmospheric Research	6
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	6
Unidata	6
USGS-R	5
Santander Meteorology Group (UC-CSIC)	5
Climate Modeling Alliance	5
WISDEM	5
Energy Exascale Earth System Model Project	4
advanced network science initiative	4
FZJ-IEK3	4
ncss-tech	4
IBPSA	4
Our World in Data	4
World Resources Institute	4
Open Climate Fix	4
NOAA - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	4
SLAC GISMo	4

図 17 - 最も多くのプロジェクトをリストアップした組織

組織の分布状況

国別では、アメリカ、ドイツ、フランス、イギリスが目立ちます。GitHub のユーザー数はヨーロッパよりも多いにもかかわらず、持続可能性のために OSS に取り組んでいる組織のうち、アジアはわずか 1.9% に過ぎません。さらに、オープンソース開発者の数が多いにもかかわらず、大規模な組織やプロジェクトが確認されておらず、インドにコミュニティがないことが目立ちます。同様に、オープンソース開発者の数が多く、科学的な出版物の量が多いにもかかわらず、中国発の組織やプロジェクトはほとんどありません。海外の組織や地理的な所属のないグローバルなプロジェクトの両方に関連します、十分に代表されていない地域のオープンソース開発者が存在する可能性があります、この差異についてはさらなる調査が必要です。

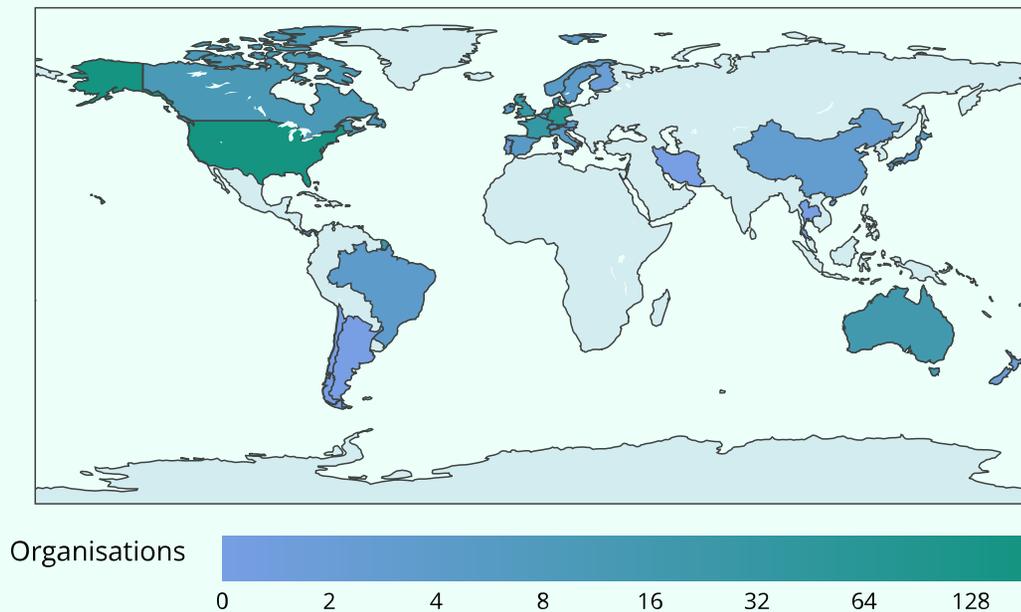


図 18 - 組織の世界分布

Python projects most frequently used as dependencies

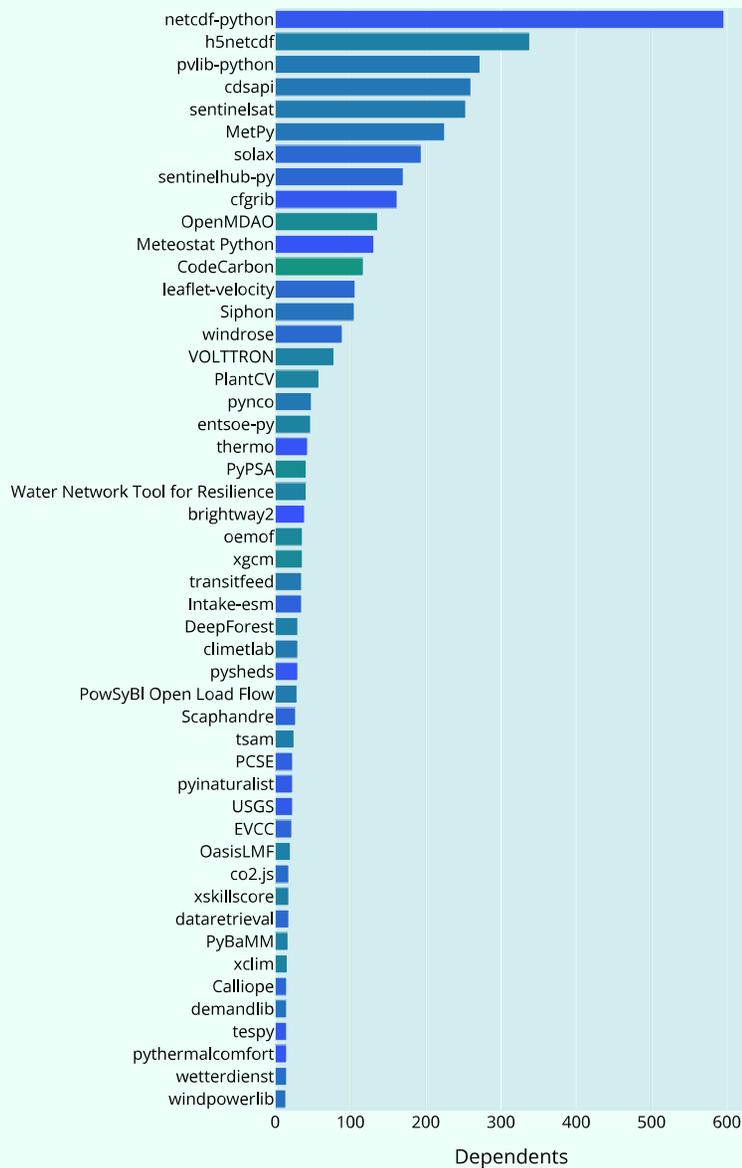
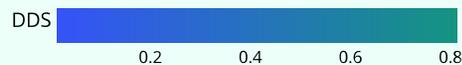


図 19 - 依存関係として最も頻りに使用される Python プロジェクト



ユーザーと利用状況

最近の報告書によると、主要な IT 企業の 95 ~ 97%^{1,2} が、それを知ってか知らずか、ミッションクリティカルな IT ポートフォリオの中で自明でない OSS 資産を活用していると推定されています。一方、米国や EU では、「オープンソースの変革力、革新力、協調力、その原則と開発手法を奨励し、活用する」³ 政府内政策が台頭しており、本レポートで特定されたプロジェクトの多くも含め、業務に OSS を採用する政府機関がますます増えています。しかし、持続可能性に関しては、まだ実現されていない可能性が多くあります。OSS に関連する成果や影響を追跡することは依然として困難ですが、以下の傾向は、環境持続可能性におけるオープンソースの重要性を、貢献者、エンドユーザー、そしてより大きな社会に対して浮き彫りにしています。

依存関係

オープンソースは無料で入手でき、自由に利用できるため、その最終的な利用状況を追跡することは困難です。オープンソースの利用の多くは、他のソフトウェア プロジェクトの依存関係としてライブラリや API を統合する際に生じます。特にクローズドソースのソフトウェアでは、OSS への依存は常に明らかにされることはありません。

公開ソフトウェア開発およびバージョン管理プラットフォームからのプロジェクト利用データは、依然として不足しています。GitHub は残念ながら、正確な統計データを作成するためのサポートをほとんど提供していません。しかし、Python エコシステムから得られた限られたデータで、流通量が多いが DDS スコアが低い個々のプロジェクトを特定することができました。ここでは、cfrib、sentinelhub-py、Meteostat のようなプロジェクトが際立っています。これらのプロジェクトは広く使われており、一人の開発者の善意に大きく依存しています。最も利用されている 50 の Python プロジェクトの DDS の中央値が 0.436 であることから、少数の強力な貢献者が開発をリードしていることがわかります。

PyBaMM や PyPSA のようなエネルギーやバッテリーのモデリングの主要プロジェクトのユーザー コミュニティは、学术界と産業界に比較的均等に分かれており、NGO や独立系コンサルタントのユーザーは少なくなっています。場合によっては、産業界が爆発的にユーザーを増やすこともあります。例えば、pvlib-python は 5 年間で、月に数千のダウンロードを記録しました。これは主に、このライブラリを自社のソフトウェア製品に統合し、pvlib-python を効果的に顧客に配布しているいくつかの営利企業によるものです。

エンドユーザー

OSS のエンドユーザーと最終的な利用を把握することは、依然として困難です。社会 - 技術 - 生態系における因果の連鎖を追跡することは複雑であるため、本報告書では、オープン サステナビリティ アプローチのインパクト（社会、経済、環境のいずれでもない）を網羅的に評価することは試みていません。むしろ、本報告書全体を通じて、重要な能力を示し、科学に基づくインパクトの方向性と整合性を実証しているプロジェクトの主要な事例を紹介しています。多くのオープンソースプロジェクトが持続可能な成果の支援と加速に貢献していますが、一部の貢献は他よりも顕著に現れています。このセクションでは、そのうちのいくつかに焦点を当てます。

特にインパクトのあるプロジェクトは、統合評価モデリング コンソーシアム (IAMC) が主導する pyam です。このプロジェクトは、最近発表された IPCC の「1.5°Cの地球温暖化に関する特別報告書」(SR15) において基本的な役割を果たし、報告書を支える定量的なモデルベースの気候変動緩和パスウェイのアンサンブルを作成しました。以来、この報告書は 106 回も引用さ、最新の気候研究と国際的な気候協定の達成状況について、政府や意思決定者に情報を提供し続けています。一方、グリーンソフトウェア管理ソリューションは、IT 業界で大規模に採用されつつあります。業界主導の非営利団体である Green Software Foundation は、グーグルやマイクロソフトをはじめとするハイテク大手から高いレベルの支持を得ており、彼らもこれらのオープンソース ツールを社内で使用していると主張しています。自然資本プロジェクトのツールである InVEST は、土地利用の変化、生態系サービ

スの経済評価、流域管理などに関連する質問に答えるために、世界中のセクター（アフリカ、インド、中央アメリカ、アメリカ、中国）に適用されています。最後に、World Resource Institute (世界資源研究所) が主導するオープンソース プロジェクトである Global Forest Watch (グローバル フォレスト ウォッチ) は、世界規模で保全プロジェクトを加速させるため、NGO、政府、意思決定者にリアルタイムの森林モニタリングツールを提供しています。2014 年の開始以来、400 万人以上がこのプラットフォームを訪れています。

オープンソース ソフトウェアとその原則の採用が、政府の公式政策に反映されることはほとんどありません。しかし、いくつかの有望な動きが見られます。2016 年、米国政府は連邦ソースコード ポリシーを発表しました。⁴ このポリシーでは、米国連邦政府機関が開発するカスタムソースコードの少なくとも 20% を OSS としてリリースし、機関間で共有することを義務付けています。同様に、欧州委員会の内部オープンソースソフトウェア戦略は、「社会に利益をもたらす、社会のコストを削減する、より良い欧州サービスを提供するために、ソフトウェア ソリューション、知識、専門知識の共有と再利用を促進する」。⁵ 持続可能性に限ったことではありませんが、この政策展開は、この分野での影響の可能性を認めています。

金銭的価値

一般的に使用されているプレミアム モデルを含むオープンソースのビジネスモデルは、OSS が社会に貢献する総価値を把握することは難しいのですが、オープンソースの経済的貢献に関する最近の研究では、大まかな指標を提供することができます。オープンソース ソフトウェアとハードウェアの経済的影響に関する 2021 年の調査では、オープンソース技術が欧州経済に 650 億～950 億ユーロを投入したと結論付けています。オープンソースは、欧州で最も重要な水平的経済的利害関係者である中小企業を大幅に後押しし、年間 650 社以上の技術系新興企業の創出増加に反映されています。オープンソースが環境の持続可能性にどの程度貢献しているのか、あるいはその潜在的な経済効果がどの程度あるのかは現在のところ不明ですが、金銭的価値は数桁大きいと予想されます。

今後に向けて

オープンソース プロジェクトの利用状況を把握し、そのユーザーと、彼らがエコシステムに提供し、エコシステムから得ている価値を理解することは、重要かつ重大な課題です。「巨人の肩の上に立つ」ことによって節約された時間とリソースを測定するための基準はまだ存在しません。今後の研究では 私たちが作成したさまざまな測定基準や方法を、的を絞った方法で使用することが不可欠となります。例えば、利用率が高く、成長が速く、DDS が低いプロジェクトを特定することで、的を絞ったインタビューを実施し、主要なユーザーや利用パターンを突き止め、直接的・間接的な影響を評価し、効果的なプロジェクトを支援する方法を評価することができます。この時点まで、私たちは何が可能かを描くのに役立ついくつかの代理的な方法を検討してきました。

資金調達モデル

この分野の開発者や組織は、多様な資金モデルによって支えられています。OSS プロジェクトは、学術・研究資金、民間投資、政府助成金から恩恵を受けています。それぞれのプロジェクトは、独自の構造とエコシステムに属しているため、資金調達モデルの組み合わせが異なります。

「公共交通機関向けのオープンソースソフトウェアに政府からの助成金がないのは、少し奇妙なことだ。」

-DEVELOPER OF POPULAR TRANSPORTATION PLANNING AND TRAFFIC SIMULATION SOFTWARE

GitHub のユーザーに寄付するオプションを公式に提供しているプロジェクトは、わずか 3.8% しかありません。コミュニティ ベースのプロジェクトが多いため、これは特に説明が難しくなります。プロジェクトの利用率や人気が低いために関心が低く、開発者が金銭的な支援を期待していないのかもしれませんが。

公的セクターの資金提供者や研究評議会は、学術機関や国立研究所とともに、オープンソースの持続可能なエコシステムを維持する上で重要な役割を果たしています。大学は知識の提供者であるだけでなく、**研究ソフトウェアエンジニアリング** チームを通じて、安定性、独立性、開発者リソースへのアクセスをもたらすことができます。

しかし、このエコシステムには、OSS 開発とメンテナンスのための専用資金がほとんどありません。大規模な学術プロジェクトは学術研究を優先し、オープンソースソフトウェア開発には少額のしか資金を割いていません。英国のUKRIのインフラストラクチャー ファンドやホライゾン ユーロツパのような資金がある場合、それらは主に新機能開発をサポートし、重要な戦略的ソフトウェア開発をサポートするような規模ではないことがよくあります。学術研究機関では、開発者や研究用ソフトウェア エンジニアは、複数の同時進行プロジェクトに人月を割き、このオープンな研究インフラを多くのプロジェクトで再利用できるようにしようとしています。さらに、機能は多くのプロジェクトで使用されることが多いため、メンテナンスやユーザー サポートのリソースを特定のOSS開発に割り当てることは複雑な場合があります。

非営利団体やシンクタンクの OSS プロジェクトも同様の課題に直面しており、新規プロジェクトに対する資金調達は比較的容易である一方、ソフトウェアやデータのインフラを維持するための資金調達は事実上不可能です。プロジェクト開発のライフサイクルのうち、利用とメンテナンスの段階に焦点を当てる資金提供者はほとんどいません。

より多くのユーザーを抱えるプロジェクト (openFAST など) には、投資、助成金、産業界からの収入が混在しています。しかし、この種のプロジェクトは、技術的負債を抱える可能性が高く、継続的なメンテナンスと将来の開発の両方のコストが増大することになります。このような成熟したプロジェクトは、産業界や政府からより多額の資金を必要とします。しかし、多くの場合、研究室主導のプロジェクトが寄付を受けたり、助成金の代替資金を求めたりする場合には、別の事業構造や法人格が必要となります。政府出資の研究所、研究評議会、学術研究所では、現在このようなことは不可能です。

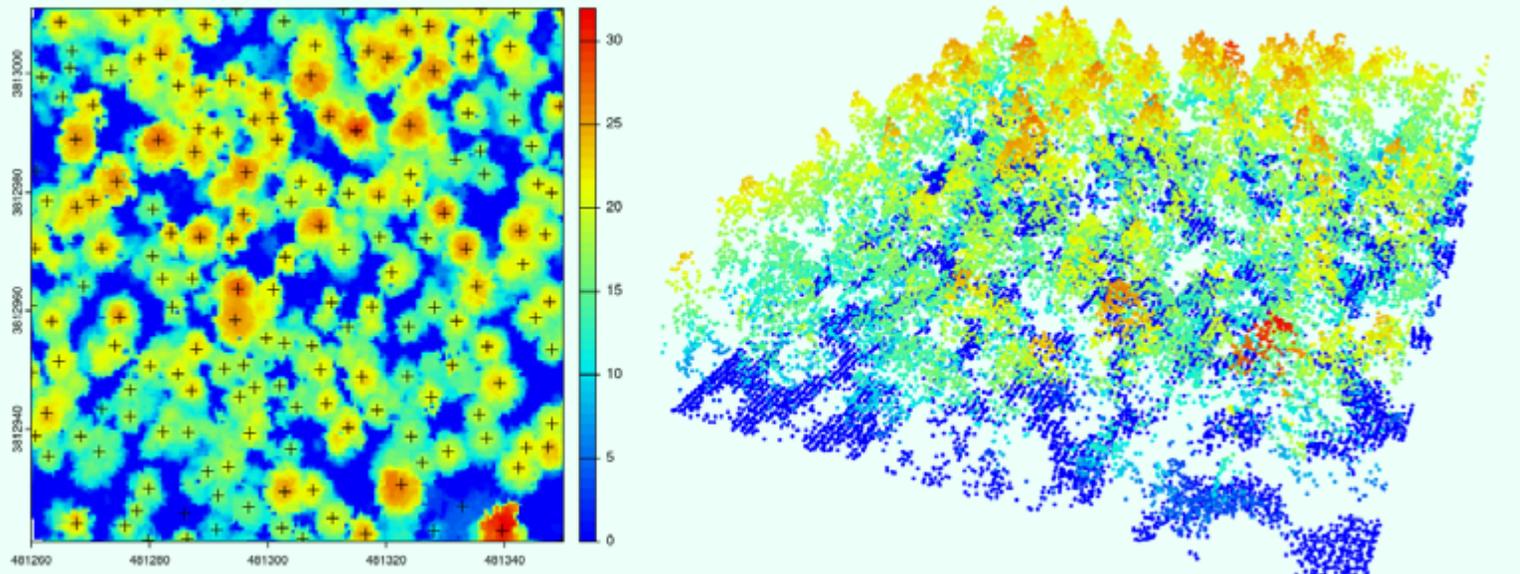
産学連携は、新たな課題と機会をもたらします。商業的な可能性を秘めたアカデミックなオープンソース ソフトウェアは、通常、集中的かつ長期的な財政支援を必要としますが、これはアカデミア内部からは提供できません。コードベースのバックボーンがオープンソースであるオープンコアのようなハイブリッド ビジネスモデルは、ますます人気が高まっています。私たちが話を聞いた多くの開発者は、オープンコアの経験があり、このアプローチのトレードオフのいくつかを痛感しています。例えば、プロジェクトのメンテナーは、商業化がコミュニティを犠牲にすることなくオープンソースをサポートしたいと考えています。同時に、企業が利益のためにオープンソースの貢献を悪用していると感じれば、ユーザーや貢献者が不快に思うかもしれないことも、メンテナーは認識しています。適切なオープンソースのビジネスモデル、ライセンス、開発者の関与、および組織形態を選択することは、商用アプリケーションとコミュニティ開発を成功させるために非常に重要です。

業界のコンサルティング モデルは、これまでさまざまな成功を収めてきました。状況によっては(データセンター オペレーションにおけるグリーンソフトウェアのように)、開発者の立場からコードをオープンソース化することは難しい要件です。この場合、産業界のパートナーからの反応は肯定的でした。また、自社のシステム (バッテリーなど) をモデル化

するために使用するプロジェクトを、競合他社が無料で使用することを懸念して、数年間クローズドソースにしておきたいという企業もありました。しかし、持続可能な成果を急速に拡大しようとする中で、クローズドソースの文化を維持することは逆効果かもしれません。

最後に、デジタル公共財を通じた「ソフトインフラ」という考え方が支持を集めています。これは、OSS の影響について社会全体の視点を取り入れたものです。政府機関は、研究所を通じてセクター横断的なイニシアチブに資金を提供し、研究所は産業界のパートナーと協力して、新たな公共目的の価値を生み出します。これらのプロジェクトが、オープンソースが社会により広く連鎖的な影響を与えることを実証できれば、これらのプロジェクトは資金を調達しやすくなります。

図 20 - lidR は、エアボーン LiDAR データに基づいて個々の樹木のセグメンテーションを可能にします。そのため、森林の変化や状態を正確に把握することができます。



提言

全体

上記の洞察に基づき、オープンソースの持続可能性のエコシステムにおいて効果的に支援し、能力を構築するための提言を行います。

国家と非国家主体との連携を強化する

国家や地域政府は、産業界、学術界、NGO とより緊密に連携し、共通の目標に向かうことで、デジタルと持続可能性の変革を加速させることができます。そのためには、政治的に中立な立場からマルチステークホルダーの連携を導き、促進し、スケールやシステムの境界を越えて変革が生まれるために必要な前提条件を作り出す手助けをする、効果的なトランジション プローカーが必要です。オープン サステナビリティ原則は、次のような目的で適用することができます。

- アドボカシーと支援の創出
- セクター横断的、省庁横断的な調整を支援する
- イノベーション資金調達の推進と指導
- 自治体、地域、州政府間の知識や情報のギャップを埋める
- 効果的な行動のための課題と機会を特定する
- 地域のコミュニティ グループが効果的な行動を起こすための能力を構築する
- 利害関係者を科学的根拠に基づく意思決定へと導く

産業が環境に与える影響に関する知識のギャップを解消する

私たちの分析によると、環境影響に関するオープンな科学的対話に積極的に取り組んでいる企業はごくわずかであることが明らかになりました。多くの企業がネットゼロを約束し、信頼できる排出削減経路に基づく科学的根拠に基づく目標の採用が増加しているにもかかわらず、測定、報告、検証をめぐる明確性と透明性の欠如は依然として残っています。排出量報告のための標準化された計算方法は出現しつつありますが、

¹ 企業はしばしば、脱炭素化の努力を完全かつ透明には反映しない推定値に頼っています。例えば、産業施設からの排出量は、しばしば自己報告されるか、検証不可能な調査方法を用いて外部の第三者によって評価されます。持続可能性への取り組みと科学的根拠に基づく成果を整合させるための標準化されたメカニズムを提供する、オープンソースの測定・報告・検証(MRV) フレームワークの必要性は明らかです。オープンソース アプローチは、手法開発の透明性とプロセスを改善し、採用された手法と経路に関する透明性を提供し、報告データの品質と検証可能性を高めることができます。オープン性と科学的検証可能性を持続可能性評価と製品開示声明に組み込むことは、共同イノベーションの取り組みを加速する一つの方法です。[SBTN](#)、[WRI](#)、[UNRISD](#) のようなイニシアチブは、オープンソース コミュニティを巻き込み、こうした取り組みを加速させるのに適した立場にあります。

既存の OSS を、グローバルサウスの代表的な国々に適応させ、拡張する

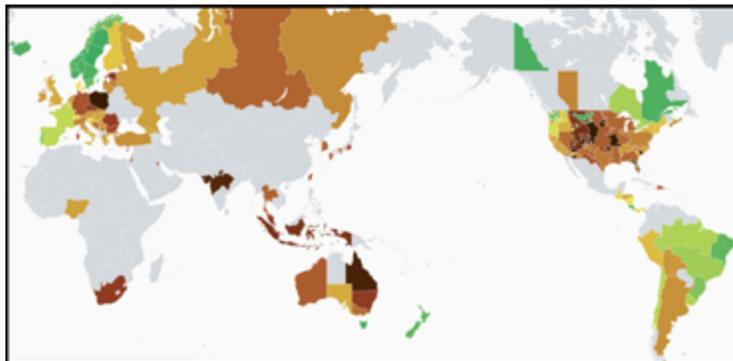
新興経済国のコミュニティは、自然環境に関連するオープンな知識、ソフトウェア、データの開発への関与が限られています。したがって、地域の技術的変革のためにオープンソース ツールを使用する地域コミュニティを構築し、権限を与えることは、広範囲に及ぶ可能性を秘めています。インドのような急成長している国では、多くの開発者が OSS を利用して地域の環境をよりよく理解し、必要不可欠な生態系を保護する可能性を秘めています。自然環境を理解するためにオープンソースを利用する方法を若者に教える奨学金は、気候や地球に大きな利益をもたらす可能性があります。このような投資は資源効率がよく、世界中に容易に拡大できます。OpenSustain.tech の[教育](#)セクションは、必要とされる知識、プロジェクト、人材の基盤を構築するのに役立てられます。[Earthlabs](#) と [Pythia](#) はすでに、地球科学の分野でこのような形式がどのようなものかを示しています。

オープンな地球情報インキュベーターを設立する

オープンソース文化と持続可能なテクノロジーの間には高い相乗効果があるにもかかわらず、環境持続可能性におけるオープンソース プロジェクト開発に特化したインキュベーターや支援プログラムはほとんど存在しません。一握りの個別プログラムが非営利団体やアカデミアに焦点を当てているものの、セクターを超えたコラボレーションに対する資金、知識、サポートが全般的に不足しています。この傾向は、オープンソースのビジネスモデルを通じて商業化される学術的なオープンソース プロジェクトの割合が低いことの説明にもなります。このようなインキュベーターは、以下のようなエコシステムにおける重要なギャップを埋めることができます。

- 既存のエコシステムの構成要素を創造的に組み合わせ、より公共的な価値を創造する新しいベンチャー企業や非営利団体の機会を特定する。
- 既存のモジュールやパッケージを効果的なオープンソース製品に組み合わせる新しいベンチャーやプロジェクトの開発を奨励する。
- マーケティング、設計、資金調達パッケージ、ビジネスモデル設計、コミュニティ管理を含むプロジェクトサポートの提供。
- 都市、政府機関、自然保護区などの潜在的なユーザーとのネットワーク構築。

図 21 - **E**lectricity Maps は、世界各国の電力網における再生可能エネルギーの量について、時間分解した過去のデータと予測を提供します。エネルギー消費量は、排出量をできるだけ少なくするように調整することができます。確かなビジネスモデルと、プロジェクトを支えるオープンソース コミュニティの両方を提供します。ライセンス: MIT



持続可能な投資のための透明で科学的な意思決定を通じて、金融機関を変革する

銀行、格付け機関、投資家は経済の中心であり、持続可能で実行可能であるとみなされるものに資源を配分しています。しかし、我々の分析によれば、OSS とオープンデータはこの分野では例外です。金融業界は、オープンな科学的手法に基づく持続可能な投資ファンドを展開するにはまだ十分ではありません。しかし、このようなアプローチは、民間および公的投資家にとって、グリーンウォッシュのない投資機会を生み出す可能性を秘めています。オープンでエビデンスに基づいた手法に基づく金融商品は、持続可能で有利なリターンを生み出すという点で、投資家の信頼を得る可能性が高いと思われます。そのため、銀行や格付け機関は、環境に関連する様々なオープンソース プロジェクトの重要なユーザーとなり、潜在的な貢献者となるでしょう。[OS-Climate](#) は、すでに重要なマイルストーンとなっています。

持続可能な技術に資金を提供する際には、「オープンソース ファースト」の基準を適用する

我々の調査結果は、オープンソースが持続可能な選択や技術の普及に大きな影響を与える可能性があることを示しています。しかし、持続可能な技術プロジェクトへの資金調達に関しては、オープンソースはしばしば決定的な投資基準とはなりません。ここで根本的な再考が必要です。オープン性は、持続可能な開発のための重要な指標として認識されなければなりません。特に、公的資金の投入は、この傾向を逆転させ、そのような投資が長期的に一般市民に直接利益をもたらすことを保証するのに役立ちます。公的研究開発においてオープンソースを優先させ

る政府の政策は、公的資金によるアウトプットが大学や企業の知的財産の制約を受けることなく、むしろ公共財としてコモンズに還元されることを確実にするために極めて重要です。

テクノロジー

オープンな地球観測とオープンソースのデータ処理を通じて、環境の持続可能性を監視する

オープンな衛星データの空間分解能とスペクトル分解能がますます向上することで、大規模な環境影響だけでなく、その要因も特定することが可能になります。これにより、政府、投資家、市民は、生物多様性、森林伐採、水ストレス、汚染、その他環境の健全性に関する多くの特徴の変化を、科学的に確かな証拠に基づいてよりよく理解し、予測することができるようになります。TRUTHS のような衛星ミッションは、衛星データのトレーサビリティと精度を、法的に確固としたものにします。そのため、主要な関係者は、資産レベルのリスクをより容易に評価し、上流および下流の環境への影響を惑星規模で測定することができます。官民パートナーシップは、グローバルな測定データを使って、これまでの推定モデルを検証し、さらに発展させるために生まれつつあります。Spatial Finance Initiative や WWF のようなプロジェクトは、企業のための強固な ESG 指標に情報を提供するこの可能性をすでに認識しています。衛星データと空間的に明示的なサプライチェーン情報に基づき、企業のバリューチェーンの環境、社会、コーポレート ガバナンスへの影響を判断するためのオープンソースの報告フレームワークとツールチェーンの開発は、企業、政府、投資家にとって計り知れない可能性を秘めています。

プラットフォームとツール間のより良い技術的インターフェイスとミドルウェアを作成する

環境サステナビリティにおけるオープンソース プロジェクトのほとんどは、単独で使用され、統合されることはほとんどありません。これは、断片化と設計の無駄(「車輪の再発明」)を増大させ、最終的にはイノベーション プロセスを阻害することにつながります。ロボット オペレーティング システムなど、他のオープンソースのエコシステムから学ぶことはたくさんあります。このようなエコシステムでは、高度なモジュール性

によって、さまざまな分野の異なるオープンソース コミュニティ間のコラボレーションが促進されています。これは、共通のインターフェイス、ワークショップ、コミュニティ ミーティング、アプリケーション、標準アーキテクチャによって可能になりました。同じ考え方が、持続可能性のさまざまな分野にも適用できます。多くのモノリシックなプロジェクトやプラットフォームは、さまざまなタイプのアプリケーションに必要な柔軟性を提供していません。しかし、既存のさまざまなオープンソース プロジェクトを組み合わせたデジタル アース ツインには、既存の知識やコミュニティを活用できるという利点があります。ここでは都市とコミュニティが特別な役割を果たします。なぜなら、環境に関連する多数の領域が集まって、即座に政策に影響を与える具体的なアプリケーションを形成するからです。環境持続可能性のためのモジュール化された領域横断的なオペレーティング システムが、プロセスやサービス間のマルチスケール相互運用性を可能にする都市アプリケーションには、大きな可能性が存在します。エネルギー システム モデリング、地球観測、地球科学などのサブ分野では、PyPSA、Julia Climate、Radiant.Earth、WhiteBox、Pangeo などの開発がすでに正しい方向性を示しています。

オープンな持続可能性の原則をハードウェアと設計図に適用する

我々の調査結果によると、持続可能性と強い結びつきを持つオープンソース ハードウェア プロジェクトはわずかです。Open Source Ecology、Open Hardware Observatory、Appropedia など、オープンハードウェアを支える強力なコミュニティは存在するものの、ハードウェア製品の開発と維持に必要な技術的要件は、個々の活動家の能力を超えていることが多く、大きな課題となっています。このため、製品のライフサイクルの各段階で循環型設計の原則を確実に体现するためには、セクター全体のアプローチと共同開発・運営モデルが不可欠となります。このアプローチを用いることで、オープンソース ハードウェアは、物理的な商品の設計、生産、流通、メンテナンス、そして使用終了についての考え方を革新し、性能、信頼性、費用対効果を向上させる可能性を秘めています。持続可能なハードウェア ソリューションの流通と拡張性を容易にするひとつの方法は、オープンソースの設計図、デジタルツイン、組み込みソフトウェアを開発することです。Biosphere Solar は、オープンソースの太陽光発電 (PV) 設計と共同ビジネスモデルを組み合わせ、世界初の循環型ソーラーパネルを製造する試みにおいて、このような可能性を認識している組織の1つです。完全にオー

オープンソースのプロセッサ アーキテクチャとエコシステムである RISC-V の登場により、このアプローチはすでにコンピューティング業界を変革しつつあります。持続可能性において同様の可能性を模索しているプロジェクトには、[Libre Solar](#)、[OpenEnergyMonitor](#)、[OpenEVSE](#)、[FarmBot](#) などがあります。しかし、[IEA-15-240-RWT](#) オープンソース風力タービンだけが、セクター全体を変革するのに必要な戦略と規模を示しています。このことは、企業、政府、研究者、産業界が、持続可能な成果に向けてオープンなハードウェアとソフトウェアのエコシステムを加速させるために、分野横断的な機会を受け入れる大きな可能性を浮き彫りにしています。

オープンソース コードと連動したオープン データ コモンズを開発する
インタビューしたすべての開発者や貢献者は、データの状況や、それぞれの分野におけるオープン データの質、出所、アクセシビリティの有無について深く理解しています。[Zenodo](#) のようなオープン データ プラットフォームは、オープン サイエンス運動におけるビッグデータ管理の中心であるが、トピック内のリンクはしばしば疎であり、簡単に発見できるようなオントロジーを欠いています。[Subak](#) のような組織は、様々なトピックにまたがる欠落したデータに投資し、管理することで、重要なリンクとしての役割を果たすことができます。オープンソース コードとデータセットのつながりを確立することで、水平的なアプリケーションを作成することができ、その結果、世界的な応用が可能になります。同様に、特定されたオープンソース プロジェクトに関連するデータセットの体系的な分析は、プロジェクトの成果物、利用、オープンソース 開発の間のギャップを埋めるのに役立ちます。

異なるレベルの政府間で、オープンソースを使用して環境データとモデルを標準化する

オープンソース アプローチを利用したデータ構造と API の標準化は、自然環境と建築環境に関するデータの相互運用性を確保し、価値ある洞察を提供することに大きく貢献します。ブリティッシュコロンビア州はこの点でのパイオニアであり、[給水](#)、[湿地帯](#)、[大気質](#)に関する様々なオープンソースとオープン データの開発を提供しています。このような標準化された環境データは、科学的分析だけでなく、公共事業やサービスのインテリジェントなモニタリングや最適化にも不可欠です。しかし、このようなデータの可能性は、その収集と提供が共通の標準に適合して

いる場合にのみ発揮されます。FIWARE Foundation が支援する[スマートデータモデル](#) プロジェクトは、そのようなオープン スタンドールの一例です。このようなオープン データ モデルは、セクター、場所、組織内および組織間の信頼できる交換とデータ主権を確保しつつ、標準に基づくイノベーションと調達に必要な技術的基盤において重要な役割を果たします。異なる州、都市、自治体間の環境に関する洞察を統合し、普及させることは、情報の縦割りを解消し、意思決定者、研究者、企業、市民が同様に共有する知識基盤に大きく貢献します。

オープンソース アプローチを使用して、サプライチェーンを通じて移動するリソースを理解する

デジタル化によってサプライチェーンの可視化が可能になり、関係者は資材や商品の流れを追跡・追跡し、ポイントからポイントへの動きを理解し、その影響を測定することができます。例えば、QR コードや RFID システムと連動した製品パスポートは、企業や消費者が製品のライフサイクルを通じて追跡することを可能にし、消耗品から建設資材まで幅広い資源の透明性を高めます。これらのツールは、プラスチック容器がリサイクル施設に到着した時点や、現在使用中の建築部品に関する情報など、ライフサイクルの任意の時点における製品の状態に関する情報を提供することができます。より詳細なトレーサビリティは、製品の「デジタルツイン」を生成することで達成されます。デジタルツインには、製品の材料構成、分解手順、労働慣行に関する情報が含まれません。循環型かつ効率的なサプライチェーンを構築するためには、このような可視性が不可欠です。[circularity.ID](#) のようなオープン スタンドールは、正しい方向を指し示しています。しかし、デジタル時代に最適化されたオープンなインフラは不足しています。[SEEA \(System of Environmental Economic Accounting\)](#)、[REA \(Resource-Event Agent\)](#)、その他の産業エコロジー アプローチなどの会計フレームワークと分散型メッセージング プロトコルの融合は、アクターとシステムレイヤーを安全な方法でリンクさせる上で有望です。私たちは、サプライチェーンが効率的で公正かつ持続可能であることを保証するために必要なレベルのトレーサビリティと可視性を提供する上で、オープンな原則と技術の採用を奨励します。

リモートセンシングによる温室効果ガス排出量モニタリングのためのオープンなコミュニティとフレームワークを構築する

Sentinel-5P、GOSAT、GOSAT2、OCO1 または OCO2 からの衛星データへの無料アクセスは、そのような協力の基盤となりえます。しかし、多くの場合、これらのデータを共通のフォーマットに統合するにはコストがかかります。また、これらの放出測定値を個々の点源まで遡って追跡できる、強力でオープンな輸送モデルも不足しています。これらのモデルには STILT や X-STILT のようなオープンなリポジトリが存在しますが、オープンなライセンスやコミュニティが不足しています。正しい方向への最初の重要なステップは、Emissions API と oco2peak によって示されています。オープンで追跡可能な衛星データとモデルによるポイントエミッションのモニタリングは、主要な排出源の隠蔽を防ぎ、汚染源の特定を可能にする長期的な可能性を秘めています。

コラボレーション

地域社会の相互関係をさらに強化する

コミュニティ間の知識共有と交流の盛んなエコシステムは、プロジェクト、アイデア、ニュースをオープンに配布できるネットワークとプラットフォームに依存しています。OpenSustain.Tech が設立される以前は、多くの組織、ユーザー、開発者は、持続可能性のための OSS のトピックを横断し、活発なプロジェクトをナビゲートすることが困難であると感じていました。コミュニティの相互接続性を強化することで、貢献者のリスクを軽減し、より多くの参加の機会を提供し、より効果的なコラボレーションのためのスキルを構築することができます。多様なグループの出現と収束は、オープン サステナビリティ原則に具現化された共通の価値観、ビジョン、考え方、アイデアを統合し、さらに発展させる上で重要な役割を果たします。

図 22 - 世界の石炭、石油、ガスのサプライチェーンにおける資産レベルの移行リスク。ライセンス：MIT



オープンソースプロジェクトを維持するために、メンテナーにトレーニングとサポートを提供する

メンテナーは、ソフトウェア開発だけでなく、コミュニティやプロジェクトの管理についても訓練を受けていなければなりません。多くのリード開発者は、その分野の専門家ですが、自分のプロジェクトの周りに健全なコミュニティを構築し、維持するために必要な知識や経験が不足していることが多く、マーケティングやその他の起業家的活動がおろそかになりがちです。多くの場合、質の高いプロジェクトはすぐにユーザーや貢献者を見つけることができると思われていますが、実際には必ずしもそうではありません。残念ながら、持続可能性における OSS のユニークな特性に合わせたトレーニング資料や機会が不足しています。文書化されたアプローチやトレーニング、サポートを提供することで、メンテナーがオープンソース プロジェクトを長期的に維持するために必要なコミュニティ能力を構築できるようにすることができます。これを促進する一つの方法は、組織内にオープンソース プログラムオフィスを設置することです。

プロジェクトを地域のユースケースにつなげる

都市は、様々なオープンソース テクノロジーの活用において中心的な役割を果たすことができます。しかし、オープンソースアプローチの可能性を最大限に活用するために必要な知識やスキルは、このレベルでは不足しがちです。同時に、研究、都市への応用、政策展開の間のギャップを埋めるには、自治体と直接協力する科学者やコミュニティ グループが鍵となります。このようなパートナーシップは、すべての関係者に大きな利益をもたらします。地方自治体は、安全で標準化されたインターフェイスを通じて、自然環境や建築環境に関するオープンデータを研究者や市民社会に提供することができます。一方、研究者は地域の応用や統合のためにリソースや知見を共有することができます。このようなオープンサイエンスのアプローチは、重要な研究課題への回答やオープンソース テクノロジーの継続的な改善に不可欠な、セクターを超えたコラボレーションを強化することができます。このようなマルチステークホルダー アライアンスは、情報交換における信頼と透明性を構築し、データ主導の意思決定を強化し、地域の状況やニーズに基づいた市民や企業との共創プロセスを促進することができます。

学術界におけるオープンな方向性を維持し、守る

本調査で確認されたプロジェクトの多くは公的資金を受けた研究の成果であるが、多くの研究機関はまだオープンサイエンスを受け入れ、オープンソースを既定の立場として推進していません。知的財産の保護は依然として一般的な慣行ですが、規制や法的な障害がイノベーションを積極的に妨げている^{2,3}ことは、調査によって絶えず実証されています。しかし、時代遅れの知的財産権モデルを放棄したいという願望は、学術関係者の間に明確に存在します。アメリカやカナダの学者の大半はオープン志向を支持しており、大学にオープンソースの寄付講座を設立するよう奨励しています。ウェスタンシドニー大学は、この種の公式なオープンソースへの取り組みを行った最初の学術機関のひとつです。「持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals)」を内部戦略に取り入れる大学が増える中、私たちは、オープンソースと公共目的の価値、特に環境の持続可能性に関する文脈の中で、これらのグローバル目標に対する貢献を評価するよう、学者と管理者の双方に奨励しています。このことを踏まえ、私たちは、持続可能性の分野で公的資金が提供されるすべての研究を、人々と地球の利益のために、オープンアクセスとオープンソースにすることを推奨します。

政府内でのオープンソース製品の使用とソフトウェア開発を支援する

オープンソース アプローチは、政府機関にテクノロジーと持続可能な成果に対するより良いコントロールを与えることができます。オープンソース ソフトウェアの採用とその原則が政府の公式政策に反映されることはほとんどありませんが、いくつかの公的機関では、OSS の効果的な利用を確保するための公式措置を実施しています。2016 年、米国政府は連邦ソースコード政策「The People's Code」を発表しました。この方針は、米国連邦政府機関が開発するカスタムソースコードの少なくとも 20% を OSS として公開し、機関間で共有することを義務付けています。同様に、欧州委員会の内部 オープンソースソフトウェア戦略は、「ソフトウェア ソリューション、知識、専門知識の共有と再利用を促進し、社会に利益をもたらす、社会のコストを削減する、より良い欧州サービスを提供する」としています。持続可能なアプリケーションに向けて政府全体で OSS 製品とオープンソース ソフトウェア開発を使用するメリットは膨大です。直接的なメリットとしては、総所有コストの削減、(納税者の負担となる) コストのかかるベンダー ロックインの防止、デジタル自律性の向上、マルチスケールおよび省庁横断的な相

互運用性の強化、インフラおよびデジタルサービスのセキュリティ強化、コミュニティ参加によるデジタルサービスの共同設計の強化などが挙げられます。クイーンズランド州政府が発表したオープンソースソフトウェアガイドラインは、政府内でオープンソースソフトウェアを使用・開発することで期待されるメリットを強調し、同様のアプローチを採用することを検討している政府機関に情報を提供しています。

資金調達

コア開発と維持のための専用資金を配分する

継続的で質の高いプロジェクトサポートを維持するためには、中核となる製品開発のための安定した確実な資金調達が基礎となります。持続可能なOSSのための維持資金は、特に注意を払うべきです。これには、以下のような資金配分が考えられます。

- ドキュメント、コードライブラリ、トレーニング、その他のリソースを開発し、より多くの人々が既存のテクノロジーを管理、開発、拡張しやすくする。
- レガシー問題の解決など、繰り返し発生する短期的な問題に対する堅牢なソリューションを開発する
- レガシーコードからの完全な移行
- 技術のデザインとユーザーエクスペリエンスの向上
- 技術標準の確立または採用

本研究の枠組みで開発された洞察、方法、ツールは、このような投資を透明化し、的を絞ったものにするために大きく貢献することができます。

オープンソースの原則をフィランソロピーやインパクト投資に組み込む

最新のデジタルインフラの97%以上がオープンソースコードを活用しており、あらゆる分野の組織がオープンソースへの依存を認識しつつあります。⁴ また、組織や社会がオープンソースを採用し関与することによって、直接的な利益だけでなく、コラボレーティブなイノベーションの共同利益も得られるということを実感しています。世界最大の健康管理情報システムから、パンデミック対策や気候変動適応ツールまで、オープンソースの規模と影響は膨大です。しかし、慈善活動やソーシャルインパクトの世界では、この増大する共有リソースへの直接的な貢献が望ましい成果として考慮されることはほとんどありません。我々の調査結果は、デジタルデバイドを解消し、包括的で再生可能な循環型経済を

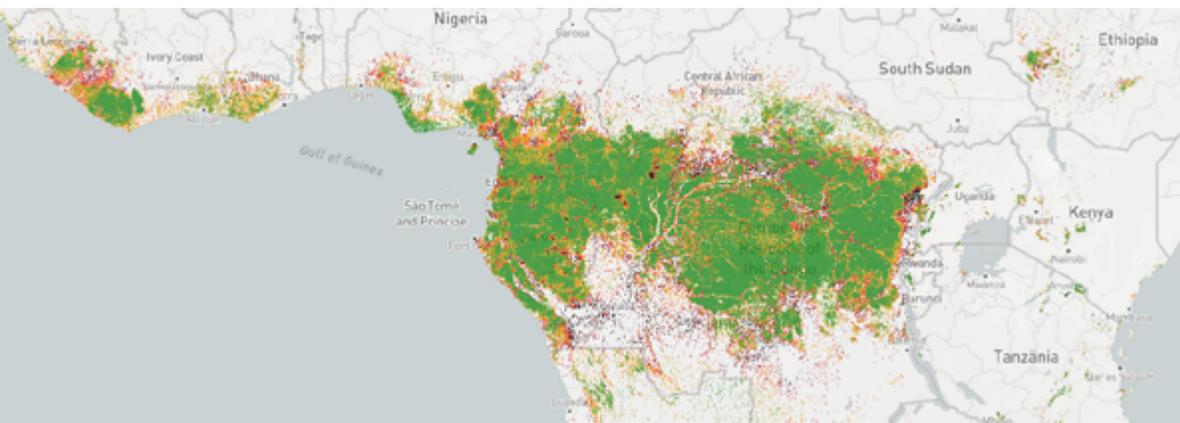


図 23 - forestatrisk Python パッケージは、熱帯の森林減少を空間的にモデル化し、森林減少の空間的リスクを予測し、熱帯の将来の森林被覆を予測するために使用できます。
ライセンス: GPL-3.0

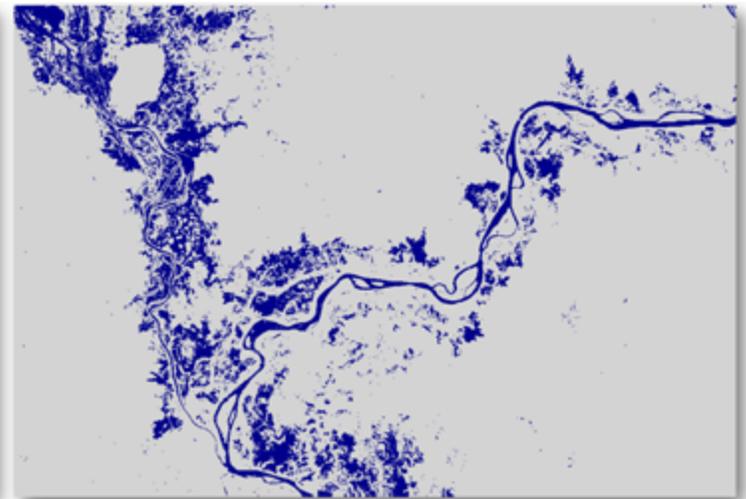
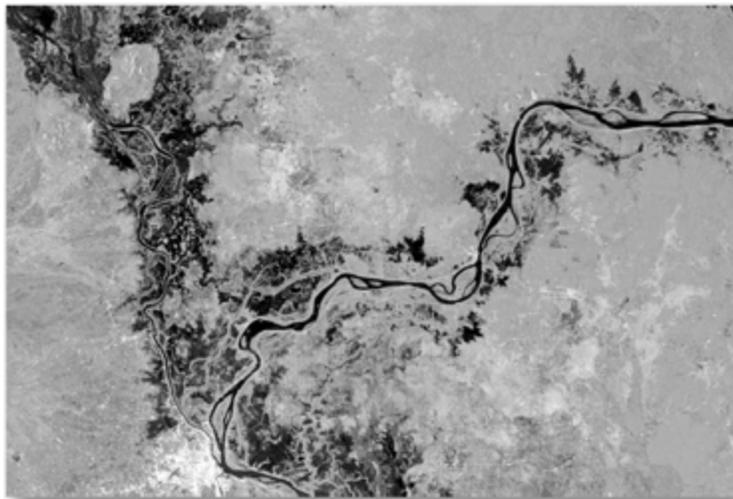
実現するためには、デジタルと持続可能性の変革をボトムアップで融合させることが極めて重要であることを明らかにしました。我々は、フィランソロピストやインパクト投資家が、オープンソースの変革的特性とその連鎖的効果、特に環境の持続可能性を認識し、その原則を資金提供基準の中で具体化することを奨励します。このようなコラボレーション志向を取り入れ、リソースのインパクトを最大化しようとする資金提供者の例としては、[Climate Subak](#)、[Open Technology Fund](#)、コミュニティ主導のプラットフォームである [Open Collective](#) などがあります。

オープンソースを政府投資の優先事項とする

あらゆるレベルの政府は、内部システムの開発時、調達プロセス、およびソフトウェアとハードウェアがアウトプットとなる研究開発に資金を提供する際に、オープンソースを優先事項とすることで、持続可能な生態系とそれ以外における OSS の能力構築において中心的な役割を果たすことができます。重要なことは、オープンソースの情報および技術に関

する学際的かつ学際横断的な能力の構築は、ビジネス、学術、産業、およびコミュニティ全体に連鎖的な効果をもたらし、内生的成長、^{5,6} 労働生産性、⁷ および新興企業の形成⁸を刺激することです。経済の複雑性の増大と資源効率の向上も明らかです。^{9,10,11} OSSは環境的、経済的、社会的に明確な利点をもたらすため、効果的なデジタル イノベーション戦略や持続可能性戦略の重要な要素と見なされるべきです。多くの政府が内部政策の中で持続可能な開発目標を認めている中、政策立案者や意思決定者に対し、オープンソースと公共目的の価値、特に環境の持続可能性に関する文脈の中で、これらのグローバル目標に対する貢献を評価するよう呼びかけています。[デジタル公共財アライアンス](#)のような新たなアライアンスは、政府とともにオープンソースを支援・育成することのメリットについて、規模を問わず共通の理解を生み出す上で重要な役割を果たします。

図 24 - [HYDRAFloods](#) は、リモートセンシングデータから得られた洪水マップをダウンロード、処理、配信するためのオープンソースの Python アプリケーションです。ライセンス：[GPL-3.0](#)



謝辞

貴重な洞察とインタビューに感謝します。

[Jackson Hoffart](#) (Rocky Mountain Institute)、[Daniel Huppmann](#) (International Institute for Applied Systems Analysis)、[Benoit Petit](#) (Hubblo)、[Ryan Abernathey](#) (Earthmover)、[Tom Brown](#) (PyPSA)、[Clifford Hansen](#) (pvlib)、[Valentin Sulzer](#) (PyBaMM)、[Jenni Rinker](#) (DTU Wind and Energy Systems)、[Julia Wagemann](#) (Independent)、[Dustin Carlino](#) (A/B Street)、[Shuli Goodman](#) (Linux Foundation Energy)、[Rafael Mudafort](#) (US National Renewable Energy Laboratory)、[Joe Hamman](#) (CarbonPlan)、[Sylwester Arabas](#) (PySDM)、[Trystan Lea](#) (Open Energy Monitor)

データ分析と可視化のレビューと貢献をしてくれた [Katarzyna Kulma](#) に感謝します。

以下の方々の貢献とサポートに感謝します。

[Tjark Döring](#)、[Alejandro Aristi](#)、[Victoria Lo](#)、[Nithiya Streethran](#)、[Felix Dietze](#)、[Johannes Karoff](#)、[Joe Torreggiani](#)、[Malgorzata Augspurger](#)、[Miriam Winter](#)、[Lars Oliver Zlotos](#)、[Nick Fiege](#)。

このレポートは、世界中の人々が [OpenSustain.tech](#) に貢献してくれたからこそ実現できたものです。

付録

方法論

オープンソース ソフトウェアの開発と維持は、技術的、社会的、組織的要因の統合に依存しています。そこで、この社会技術システムのあらゆる側面を理解するために、混合手法による研究が計画されました。量的データと質的データを同時に収集し、一方のソースから得られた知見をもう一方のソースの相互検証として使用しました。何千ものプロジェクトが、以下の5つの次元にわたって分析されました。

- **概要** — プロジェクトのテーマ、成長、年齢、人気、一般的なプロジェクトの成熟度。
- **技術** — 好まれるプログラミング言語、ライセンスの使用、貢献者が直面する技術的課題。
- **コミュニティ** — コミュニティの構成と参加、全体的な活動。
- **エコシステム コラボレーション** — セクターや分野を超えた、あるいは分野内の協力。
- **財政的持続可能性** — ビジネス モデルと資金調達メカニズム。

定量分析

2020年10月から2022年8月までに、活発に開発された1,300のオープンソース プロジェクトが、クラウドソーシングによって集められ、キュレーションされました。すべてのエントリーは、OpenSustain.techの貢献ガイドに基づいて選択されました。プロジェクトが掲載されるには、以下の条件があります。

1. **オープン サステナビリティ原則**の少なくとも1つの側面に従う。
2. オープンな技術、手法、データ、知識、インテリジェンス、ツールを通じて、自然生態系の保全と回復に貢献し、気候変動の緩和や適応を支援し、より広く環境の持続可能性を実現する。
3. 中核となるプロジェクトや組織以外の人々にも利用されること。
4. 維持管理、再利用、拡張が可能な方法で構造化され、文書化されていること。
5. オープンソース ライセンスの下で公開されること。

プロジェクト データセットは、OpenSustain.techのデータとGitHub APIのメタデータをもとに、すべて機械的に生成されています。データベースの制約上、プロジェクトは単一のリポジトリで行われると仮定しています。複数のリポジトリが単一のプロジェクトに属していることが確認できた場合は、メインのリポジトリを特定してリストアップしました。このため、本研究では、リポジトリとプロジェクトという用語を使い分けています。プロジェクトを入力する際は、プロジェクトのメインリポジトリを使用するように注意しました。データの解析と分析に使用された方法論とコードは、[AwesomeCure](#) リポジトリで入手可能です。プロットを生成するためのスクリプトは、研究の [リポジトリ](#) にあります。持続可能な技術と環境の持続可能性に関連する複数のキーワードを使用して、データ収集にできるだけ多くのプロジェクトを含めるために、いくつかの戦略がテストされました。

- Gitlab、GitHub、Bitbucket、Zenodo のような OSS プラットフォームを検索する。
- git のような用語のために科学論文をマイニングし、各論文のキーワード辞書で検索する。
- [Libraries.io](#)、[PyPi](#)、[rdr.io](#) などの OSS 検索エンジンを利用する。
- [Journal of Open Source Software](#) などの OSS 関連ジャーナルを調査する。
- クラウドソーシングや、関連するドメインで働く人々へのインタビューをする。
- その分野の開発者が受賞した星を閲覧する。

広範な研究と包括的な補完戦略の利用にもかかわらず、このデータベースはこの領域におけるプロジェクトのサブセットを代表するものに過ぎず、したがって網羅的であると考えべきではありません。環境サステナビリティにおける OSS に関連するいくつかの技術開発は、環境サステナビリティの成果に直接関係するものではないことを認めなければなりません。その代わりに、このソフトウェアを可能にする技術的基盤を提供しています。この境界線はしばしば曖昧であり、ある開発が環境持続可能性にどの程度貢献するかを予測することは困難です。例えば、油田の開発に貢献する地球科学の開発は、地熱エネルギーの開発にも貢献する可能性があります。

さらに、クローン数やダウンロード数といった重要な属性は、GitHub API では収集できませんでした。また、セルフホストの Git プラットフォーム上のプロジェクトを見つけるのはより困難です。現在はサポートされていませんが、将来の再分析では、GitLab のような他のプラットフォームをより広範囲に検討する予定です。オープンソースソフトウェアプロジェクトを再利用しているオープンプロジェクトの数も重要な属性です。Python プロジェクトについては、Web クローラーを使って GitHub 経由でこのデータを取得することができました。ユーザー権限のような他のデータは、追加的な権限がなければ個々のプロジェクトで見ることができません。このため、ほとんどのオープンソースプロジェクトのガバナンス構造を判断することは困難です。コードに貢献していない個人は、

分析から除外しました。たとえそのような貢献が重要であったとしても、現時点では GitHub API を通じて入手することはできません。

開発分布スコア (Development Distribution Score)

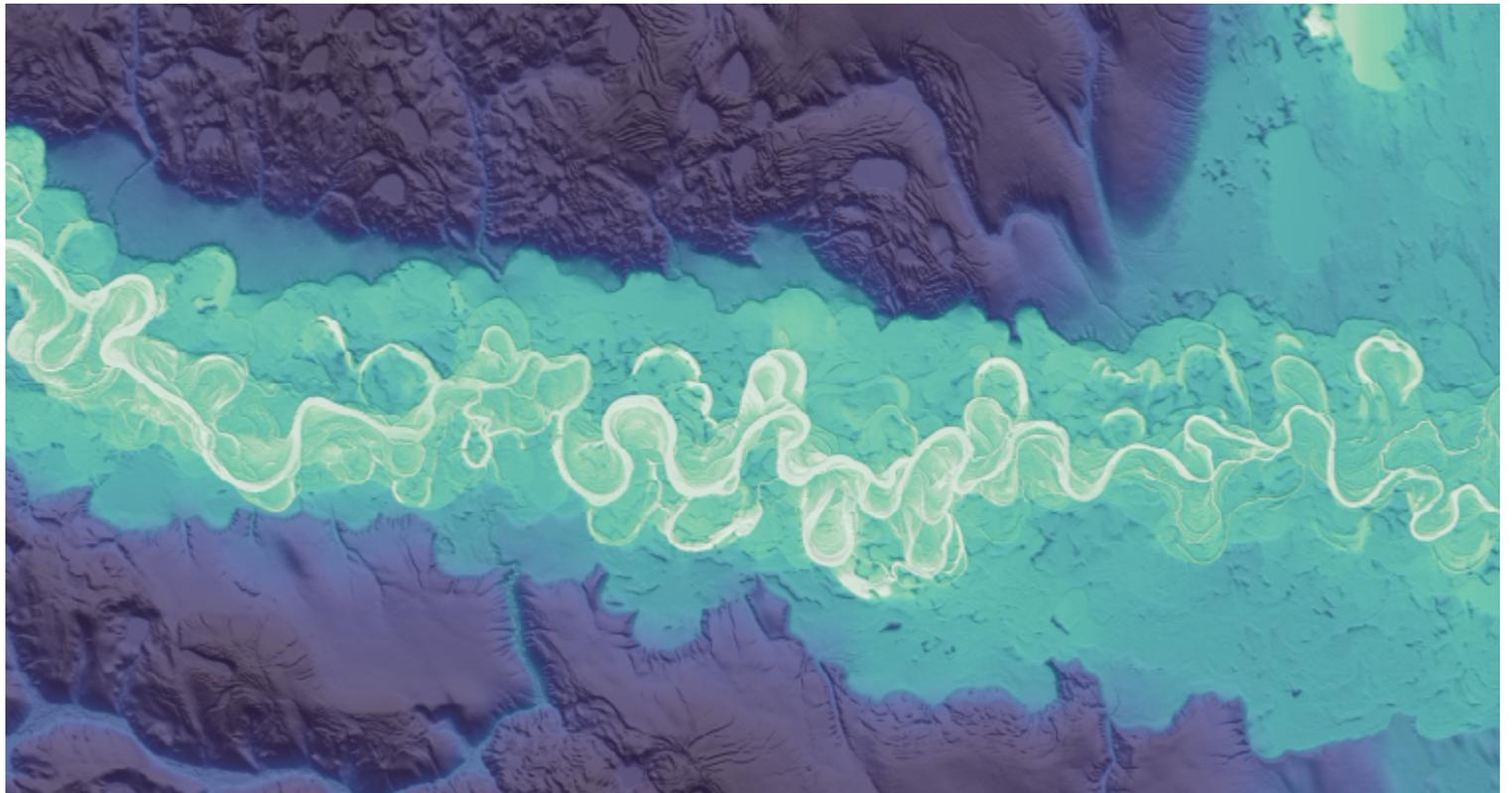
この研究では、[Bus Factor](#) を定量化するために、Development Distribution Score (DDS) という手法を開発しました。DDS は、他の開発者との関係において、最もコミット数の多い個人をベンチマークすることで、プロジェクトの貢献者間で開発がどのように分散されているかを量るものです。DDS は、知識、作業、ガバナンスが他のプロジェクトと比較してどの程度分散しているかを測定しようとするものです。この指標は、プロジェクトが少数の貢献者グループに依存しているかどうか、したがって変化に対する回復力があるかどうかを比較するものです。この指標は、健全性と複雑性の先行指標とみなすことができ、コミュニティに蓄積され、分散された知識の多様性が高いほど、コミュニティの回復力と生産能力は高くなります。これについての詳細は、「[Development Distribution Score](#)」の章を参照してください。

質的分析

OSS コミュニティは、OSS プロジェクトの要となるアクターです。コミュニティは通常、既存のソリューションでは満たされない特定のニーズを持つ個人やグループによって立ち上げられます。我々は、環境経済学、持続可能な金融、気候・地球科学、エネルギーシステムモデリング、再生可能エネルギー、バッテリー、輸送など、様々な規模や分野のプロジェクトの開発者や貢献者に 15 回のインタビューを行いました。逐次的な比較戦略ではなく、同時並行的な戦略を用いたため、インタビューによって明らかになった情報を考慮して、モデルを再検討し、強化する機会を得ました。開発者の課題、インセンティブ、ニーズ、プロジェクトの財政的な実行可能性、ベストプラクティスの開発を妨げている障壁について尋ねるために、私たちは [Roadwork ahead](#) で尋ねられた質問からインスピレーションを得ました。私たちは次のような質問をしました。

- **OSS における軌跡とポジション** — あなたは何に取り組んでいて、どのようにしてそこに行き着いたのですか？ あなたのプロジェクトは、より広範なオープンで持続可能なエコシステムとどのような関係にあるとお考えですか？
- **テクノロジーとサポート** — どのようなオープンデータセットやツールが不足していますか？ 近い将来、あなたのプロジェクトを維持するために何が必要ですか？
- **コミュニティ** — あなたのプロジェクトには何人のユーザーがいますか？ 多様な開発者基盤を構築するためにどのような努力をしていますか？ 開発者モデルはどのようなものですか？ 開発者はどのように確保されていますか？
- **コラボレーション** — どの分野でより多くのコラボレーションを望みますか？
- **財務的持続可能性** — 持続可能性の定義を達成するために、どのような取り組みを行っていますか？ 資金源やスポンサーは何ですか？
- **将来の展望** — あなたのプロジェクトは、将来あなたのコミュニティで広く利用されると思いますか？ あなたが注目している持続可能なオープン プロジェクトのトップ 5 は何ですか？

図 25 - ユーコン川の支流、ビーバー・クリーク (米国アラスカ州)。オープンソースの Python パッケージ [RiverREM](#) で作成したビジュアライズ。ライセンス: [GPL-3.0](#)



用語の定義

複雑な（社会 - 技術 - 生態系）システムに関しては、文脈によって様々な視点を取り入れられる可能性があります。本研究では、「オープンな持続可能性」という観点から、オープンソース文化、テクノロジー、環境持続可能性という3つの交差する次元の関係を検証したものです。この用語は、本研究に関連する他の類似概念と明確に区別されなければなりません。

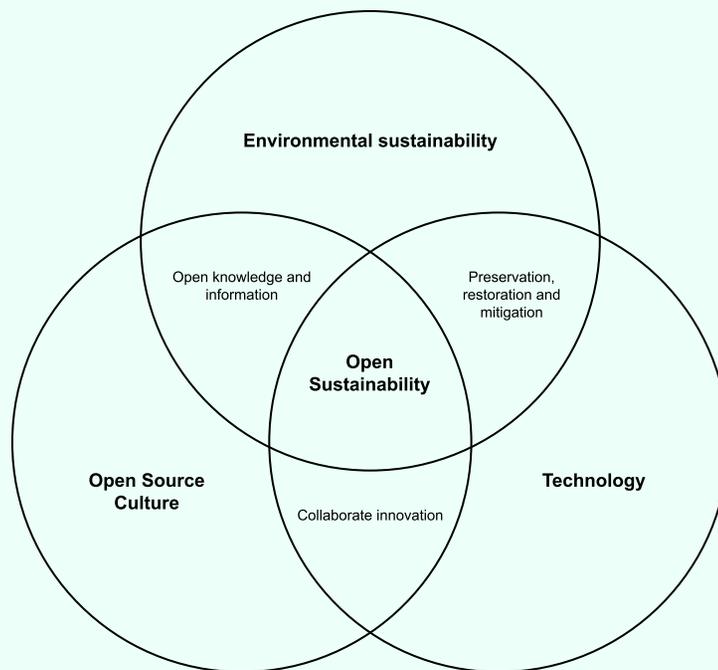


図 26 - オープン サステナビリティの側面

持続可能性 (SUSTAINABILITY) とは、将来の世代の資源を損なうことなく、現在のニーズを満たすことに関係する概念です。持続可能なシ

ステムとは、「将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、コミュニティの生産、決定、利用に関わる多くの個人の現在のニーズを満たす」システムです。¹ この意味で、持続可能性は「平均的な取水速度が平均的な補給速度を上回らない限り」達成されます。²

オープン サステナビリティ (OPEN SUSTAINABILITY) とは、持続可能な成果に向けたオープンな文化的・技術的アプローチの活用を意味しています。この概念では、オープンソースの文化、技術、手法が、持続可能性の3つの側面（生態学的、経済的、社会的）すべてにどのように貢献するかを検証します。哲学としてのオープン性が、透明でコラボレーティブなイノベーションの促進を通じて、いかに持続可能性に貢献するかに関心があります。この研究では、特に環境の持続可能性に焦点を当て、この概念を詳細に扱います。

これまでのオープン サステナビリティの定義は、持続可能な開発の文脈におけるオープンイノベーションに広く焦点を当てたものであり、多くの場合、純粋に企業内部の視点に立ったものでした。³ 私たちは、オープンソースを透明で協調的なイノベーションの不可欠な要素であると考え、その適用を特定のアクターに限定することなく、オープンソースの文化と手法を明確に体现する、より狭い定義を提供します。**オープンデザイン運動**によって作られた**オープンソース適正技術 (OSAT)** もまた、関連する用語です。適切な技術とは、大部分が持続可能で、小規模で、適切であると考えられるものであり、オープン サステナビリティの範囲内です。しかし、オープン サステナビリティは、技術の設計仕様や実装の詳細に関して規定しているわけではありません。その代わりに、類似の技術的属性が生まれるような方法と指針を定義しています。

デジタル サステナビリティ (DIGITAL SUSTAINABILITY) も関連用語のひとつで、「インターネットを通じて提供されるデジタル製品、サービス、データに社会的、経済的、環境的スチュワードシップの原則を適用するプロセス」と定義されています。⁴ デジタル トランスフォーメーション戦略に含まれることもしばしばあります。デジタル サステナビリティはオープン サステナビリティの一側面ですが、オープン サステナビリ

ティはオープンであることが前提であり、そのことを明確にしています。さらに、デジタル サステナビリティはデジタル製品に限定されるのに対し、オープン サステナビリティはそうではありません。

サステナブル テクノロジー (SUSTAINABLE TECHNOLOGY) とは、クリーンなエネルギー源や環境への影響を最小限に抑えるシステムを意味し、最も一般的に使われる広義の用語で表します。例えば、クラウド・コンピューティングのエネルギー消費と炭素強度を下げることを目的とした、いわゆる「グリーン ソフトウェア」は、持続可能なテクノロジーとみなされます。エネルギーを大量に消費する気候モデルは、その運用において持続可能ではないかもしれませんが、持続可能な意思決定に多大な影響を与える重要な洞察を提供することができます。

オープンソースの持続可能性 (OPEN SOURCE SUSTAINABILITY) とは、オープンソース プロジェクトとそのコミュニティが、長期にわたって持続し、新しい状況や技術にプロジェクトを適応させる能力のことで、強力なコミュニティとガバナンス構造は、バグフィックスや新機能を提供する上で中心的な役割を果たします。

オープンソースの持続可能性は広く知られており、数多くの書籍や出版物の中で詳細に分析されています。⁵ オープンソース ソフトウェアのサポート、リスク分析、資金調達を商業化する目的で、**エコシステム全体が形成**されています。Linux Foundation 内では、オープンソース プロジェクトの健全性を判断するための新しいコミュニティが出現しました。Community Health Analytics Open Source Software (CHAOSS) です。この分野で形成されたもう一つの強力なコミュニティは **Sustain** です。大規模で有名なプロジェクトは、一般的に小規模なものよりも多くの寄付を受けるので、この活動は重要です。しかし、小さなモジュール化されたプロジェクトは、グローバルなデジタル基盤にとって重要な役割を果たすことがあります。大企業がこのようなプロジェクトを利用していても、必要な開発リソースに比べれば寄付はわずかなものです。⁶

2023年8月



Copyright © 2023 [The Linux Foundation](#)

このレポートは、[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International Public License](#) の下でライセンスされています。

この著作物を参照する場合は、以下のように引用してください。

Tobias Augspurger, Eirini Malliaraki, Josh Hopkins, Dan Brown, “The Open Source Sustainability Ecosystem, The Linux Foundation, August 2023.

この日本語レポートは、以下の文書の参考訳です。
[2023 Open Source Sustainability Ecosystem Report](#)

翻訳協力：吉田行男

