

様式3⑤ 研究成果の概要(概要編)

グリーンインフラ整備の脱炭素化効果 の推計と負担配分に関する研究

名古屋工業大学大学院工学研究科 教授 秀島栄三

概要:

持続可能な社会の実現に向け、農地、遊水池、河川などが有する自然的機能を活用し、コンクリート構造物や鋼構造物といったグレーインフラと組み合わせる、または取り替えることで減災効果や環境負荷低減効果が期待されるグリーンインフラに注目が集まっている。しかしながら一向に実現が進まない。この問題認識のもと以下の研究を行った。水田を例にライフサイクルアセスメントを行い、環境負荷物質の収支を算出し、気候緩和機能、大気浄化機能は有意であると結論づけられた。遊水池を例に整備便益を推計し、遊水池の減災効果が高い場合には上流部に整備することで流域全体の便益が大きくなり、短期間で整備できれば便益が費用を上回る可能性があり、下流部に資産が集中する場合は便益の偏りが生じる等の結論を得た。河川を例にとり、広域にわたる川辺の景観を定量的に評価し、「川がある」ことと「川が見える」ことのギャップを明らかにした。

キーワード: グリーンインフラ、脱炭素化、負担配分、景観評価

1. 研究の背景と目的

持続可能な社会の実現に向けて、森林や農地、河川、遊水池、公園などが有する自然環境の機能を活用し、コンクリート構造物や鋼構造物といったグレーインフラと組み合わせる、または取り替えることで減災効果や環境負荷低減効果が期待されるグリーンインフラに注目が集まっている。その概念は定着しつつあるが、少なくとも周囲では一向に具体化されず、実現しない。これには様々な原因が考えられる。

一つには効果、便益の定量的な評価手法が一般化されていない。温室効果ガス、大気中の窒素酸化物、硫黄酸化物、水中の窒素、リンなどを吸収する機能が期待されるが、これらがどのように、どの程度まで活用できるかを考察するべきである。そこで、グリーンインフラ整備について、そのライフサイクル全体を通じて排出量と吸収量の収支を評価することが必要と考えた。

また、グリーンインフラは、災害を軽減することが期待される。その整備効果は流域の広範囲に及ぶため、整備にかかる費用は、その効果が及ぶ流域の各地域で負担配分することが考えられる。しかし、効果を推計する手法や、流域の各地域が受ける効果の違いか

ら地域間で公平に負担を配分する手法が確立していない。そこで、グリーンインフラ整備による流域の各地域の減災に係る便益を推計する方法を案出することが必要と考えた。

一方、グリーンインフラの整備効果はその存在価値によっても評価されるべきかもしれない。緑地や河川の景観を簡便に評価する方法が必要と考えた。

以上3つの問題意識から、それぞれについて水田、遊水池、河川というように対象を具体化して分析と考察を進めた。これらの研究の成果をまとめる。

2. グリーンインフラ整備の脱炭素化効果の推計

に関する考察

農地は環境面の機能として、気候緩和、大気浄化、水質浄化機能を有する¹⁾。気候緩和機能は温暖化の原因である温室効果ガス(以下「GHG」という。)を吸収し、大気浄化機能は大気汚染ガスである窒素酸化物、硫黄酸化物を吸収し、水質浄化機能は有機汚濁の原因である有機物、富栄養化の原因である窒素、リンを吸収する機能である(表1)。

しかし、グリーンインフラは新たな概念であるため、定量的な評価手法が一般化されておらず、事業拡大の妨げとなっている。

以上を踏まえ、水田を対象としてライフサイクルインベントリ分析を行う。水田の建設から撤去までのライフサイクル全体における各環境負荷物質の収支を集計することで、気候緩和、大気浄化、水質浄化機能による実質の効果を定量化し、適切に評価することを目的とする。

一般化された分析とするため、日本の標準的な水田の形状から、一つの水田モデルを想定する。対象とするライフサイクルステージは、圃場の建設、水田の営農、構造物の交換、圃場の撤去の4段階とする。圃場の建設の後、水田の営農と構造物の交換が水田の標準耐用年数である100年間行われ、その後に圃場の撤去が行われるものとする。分析の対象とする環境負荷物質は、表1に示された各機能により吸収される物質とする。これらの物質が投入物の製造や工事・農作業により排出される量と機能によって吸収される量を算出の対象とする。

表1 グリーンインフラの機能と吸収される環境負荷物質

GIの機能	吸収される環境負荷物質
気候緩和	GHG (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆ , NF ₃)
大気浄化	NO _x (窒素酸化物) SO _x (硫黄酸化物)
水質浄化	COD(化学的酸素要求量) T-N(窒素), T-P(リン)

各段階での投入物を小林ら²⁾、伊藤ら³⁾、野口ら⁴⁾を参考に設定し、各投入量を水田モデルの形状に合わせて物量ベースで算出する。これにWebで公開されている単価表^{5,6)}から入手した単価を乗じ、投入量を金額ベースに換算した上で、環境省の排出原単位データベース⁷⁾、国土交通省の流域別下水道整備総合計画調査指針と解説⁸⁾、南齋ら⁹⁾から得られる排出原単位を乗じることによって投入物の製造による環境負荷物質の排出量を算出する。算出した排出量や吸収量を集計し、インベントリ表にする。表2に示す。排出を正、吸収を負とする。

ライフサイクル全体の収支は、GHGが-3,249t-CO₂、NO_xが-572kg、SO_xが-2,061kg、CODが13,555kg、T-Nが3,005kg、T-Pが611kgと算出され、ライフサイクルを通じてGHG、NO_x、SO_xは吸収量が上回り、COD、T-N、T-Pは排出量が上回ることを示しているhyou。つまり、水田の気候緩和、大気浄化機能は、ライフサイクル全体で見ても、その効果が有意であると言える。一方、水質浄化機能は、ライフサイクル全体で見ると、その効

果が有意であるとは言えない結果となった。農作業や水田による収支は、温室効果ガスが-4,434t-CO₂、NO_xが-2,895kg、SO_xが-2,782kg、CODが11,820kg、T-Nが2,451kg、T-Pが-62kgであり、COD、T-N、T-Pは他の物質に比べて排出側に大きく、これが原因として挙げられる。この収支を他の土地利用だった場合の収支と比較し、土地利用の観点から水田の水質浄化機能の有無を確認する。比較対象を住居、工場とし、3,000m²における100年間の収支を各種報告書¹⁷⁾¹⁸⁾をもとに算出した。比較の結果、農作業や水田による各物質の収支は、工場による収支よりも大幅に小さく、住居による収支と比較しても、同程度であるか小さい結果となった。つまり、水田は他の土地利用に比べて各物質の排出量が少なく、水質において有利であるといえる。

本章の結論として水田の気候緩和、大気浄化機能はライフサイクル全体で見てもその効果が有意であると言える。

3. グリーンインフラ整備の負担配分に関する考

察

グリーンインフラを整備する上での課題のひとつに財源の問題が指摘されている¹⁹⁾。グリーンインフラ整備の効果は流域の広範囲に及ぶため、整備にかかる費用は、その効果が及ぶ流域の各地域で負担配分することが考えられる。しかし、この負担配分の実現には、グリーンインフラ整備による効果を推計する手法や、流域の各地域が受ける効果の違いから地域間で公平に負担を配分する手法が確立していない。各地域が受ける効果は、効用の変化を貨幣価値化した便益で比較可能である。安藤²⁰⁾はグリーンインフラ整備による効果を代替法によって貨幣価値化し、各地域の便益を推計している。

以上を踏まえ、遊水地の整備を対象としてグリーンインフラ整備による流域の各地域の減災に係る便益を推計することを目的とする。便益の推計に当たっては諸々の財またはサービスを消費することで得る効用を貨幣価値化する。

手法は以下のとおりである。各地域の経済活動を考慮し、一般均衡分析によって便益を推計する。次いで、便益が推計結果のようになる要因を分析するため便益帰着構成表²¹⁾を作成する。

武藤ら²²⁾が提案したモデルを参考にまず社会経済モデルを構築する。各地域で諸産業、不在地主、家計、政府が経済活動を行うものと想定する。便益は、家計における消費財の消費による効用の貨幣価値とし、消費額の変化で推計する。遊水地は農地としても利用さ

れるとし、整備により土地市場などで変化が生じる。それら経済活動の変化を考慮することで、遊水地が発揮する農作物生産効果や減災効果に焦点を当てた評価が行える。なお遊水地は災害リスクの高い宅地から置き換えて建造することを想定する。また遊水地を整備する整備期間は経済活動の変化はないものと仮定し、整備期間の後に50年間の供用期間があるとする。

構築した社会経済モデルを用いて数値シミュレーションを行う。その結果を便益帰着構成表にまとめる。上流部よりも資産が集中する下流部の方が高い便益を得るという仮説を立て、その検証のため、対象地域は庄内川流域の岐阜県と愛知県とする。なお、岐阜県を上流部にある地域、愛知県を下流部にある地域とする。遊水地の規模を推定するに当たり、建設データが入手できた岩手県に所在する一閑遊水地^{23,25)}を参照した。

遊水地の整備によって上下流域の便益を合わせた全体の便益が高くなるという仮説について検証する。表3に流域全体の費用便益分析の結果を示す。分析の結果、想定した全てのシナリオで便益が費用を上回った。遊水地の整備では、位置や期間が異なる多くの場合で便益が費用を上回ることが推察される。

整備期間が50年間の場合は、20年間の場合と比べて費用便益比が小さい結果となった。これは、整備期間が長くなったことで供用開始が遅れ、現在から見た便益の価値が低くなったためと考えられる。

上流部にある遊水地はその貯水機能により、上流部にある地域が浸水被害を免れるだけでなく、下流に配分される河川流量が減少することで下流部にある地域の減災効果も期待できる。このような観点から、上流部に遊水地を整備する場合は、下流部のみ整備する場合に比べて便益が高くなるという仮説を検証する。結果は、上流部に遊水地を整備する場合に便益が高くなる結果が得られた。上流部の遊水地の減災効果が下流部にも及んだためと考えられる。

各地域が単独で遊水地を整備した場合の費用便益分析の結果、上流部に遊水地を整備する場合、上流部単独での便益は費用を下回ることになった。すなわち、上流部に遊水地を整備した場合に下流部がより高い便益を得ていることが定量的に示された。

本章の結論として1)遊水地による減災効果が高い場合には流域の上流部に遊水地を整備することで流域全体の便益がより高くなる、2)短期間で遊水地を整備できれば便益が費用を上回る可能性がある、3)流域に資産が集中する場合には高い便益が得られることなどが明らかとなった。

4. グリーンインフラ整備の視覚的効果に関する一考察

緑地や河川などに代表される自然の風景は、人々の幸せを向上させる²⁷⁾。景観要素の評価方法として青木²⁸⁾は緑被率を手動で定量化している。しかし、この方法では広域的な評価が困難である。近年は、ストリートビュー画像(Street View Image, 以下 SVI)の蓄積、大量の SVI を処理可能な深層学習を用いた画像処理技術の発達により広域的な景観の定量的評価が可能になっている。また景観の評価として緑被率の評価²⁹⁾や景観全体の類型化³⁰⁾などは行われているが、水辺の景観を評価した事例は少ない。

そこで SVI に対して深層学習を用いて景観要素を抽出し、川の視認性に着目した広域的な景観評価手法を開発する。具体的には、対象地域の SVI について学習済みの深層学習モデルを用いて川の範囲を抽出し、道路から目視できる川を定量的に把握する。次に、SVI の川の範囲の抽出結果と撮影地点の座標から「川が見える」エリアマップを作成する。また、深層学習モデルが分析対象の SVI を中の川の領域をどの程度正確予測できているかの評価を行う。SVI としてゼンリン株式会社提供の細道路画像データを用いる。土地利用データとして、土地利用細分メッシュの「河川及び湖沼として利用されている土地」を「川がある」エリアとして使用した。Mask2Former が画像セグメンテーションで分類できる65項目のうち「Water」(水)のピクセル数を川のピクセル数とみなし、SVI の総ピクセル数に対する川のピクセル数の割合を「Water Visibility」(以後 WV)として算出する。これを川の視認性の定量的な評価指標として用いる。SVI に対する画像セグメンテーションの結果からした WV と、各 SVI 撮影地点の座標データから「川が見える」エリアマップを作成する。また、「川が見える」エリアマップと、土地利用細分メッシュから得た川が見えるエリアから「川がある」エリアマップを一度作成し、2つのエリアマップを比較することで、「見える川/見えない川マップ」の作成を行う。

88,443 個の SVI 撮影地点における WV の出現頻度について、全体で $0.0 \leq WV \leq 14.0$ の範囲に収まっており、 $0.0 \leq WV \leq 1.0$ の範囲で 86704 個、 $11.0 \leq WV \leq 12.0$ の範囲で 188 個であり、この2つの範囲の頻度が極大値となった。このことから、川があまり見えないエリアが多くを占め、その次に比較的川が見えやすいエリアが多く存在することが分かる。

図1に「見える川/見えない川」マップを示す。オレンジ色のエリアが「見える川」を示し、青色のエリアが「見えない川」を示す。この「見える川/見えない川」マップをもとに SVI を分析したところ「見える川」と予測されたエリ

アは橋から撮影されたSVIが主であった。堤防越しに見える川もあったがGoogle MapのSVIでは見えず、計測車両のカメラ位置が地上2.0mと高いことが要因だと考えられる。一方で「見えない川」と予測されたエリアは、川沿いを堤防や空き家などの構造物が遮っている場合がほとんどであったが、橋から撮影されているが走行車線や歩道の広さの影響で川が写っていないSVIも確認された。対象地域の空間的特徴として、基本的には何らかの障害物によって河川への視線が遮られており河川への視認性は少なく、橋から撮影されたSVIは両側から河川が見えるので、河川への視認性は橋以外の道路と比べ必然的に上がっているということが原因と考えられる。またSVIの特性からは、SVIが自動車道路からのものに限られているという条件や、より川に近い道路は存在するがSVIが撮影されていないというケースの存在から、あまり川が「見えない」エリアと予測されたSVIは周辺地域の川の視認性を正確に反映していない可能性が考えられる。

本章の結論として、SVIに事前学習済みの深層学習モデルを使用することで「川がある」と「川が見える」ことのギャップを明らかにした。ただし、川があるが川を写していないSVIの存在など使用データの限界も明らかとなった。



図1 「見える川/見えない川」マップ

5. 研究のまとめ

研究助成を得て行った3つの研究をまとめる。

2章では、水田を例にとり、インベントリ分析によりライフサイクル全体の視点から環境負荷物質の収支を算出することで、環境面の機能による効果の定量評価を行った。結果として水田の気候緩和機能、大気浄化機能は様々な仮定の下ではあるがライフサイクル全体で見ても有意であると結論づけられた。

3章では遊水地を例にとり、整備便益を推計した。遊水地の減災効果が高い場合には上流部に整備することで流域全体の便益が大きくなり、短期間で整備でき

ば便益が費用を上回る可能性があり、下流部に資産が集中する場合は便益の偏りが生じる、などの結論を得た。

4章では河川を例にとり、広域にわたる川辺の景観を定量的に評価し、「川がある」と「川が見える」ことのギャップを明らかにした。

グリーンインフラは実社会において全く整備が進んでいない。そのような状況の下、容易に思い当たる3つの問題意識に対して急ぎ研究に着手した次第である。さらなるデータと結果の精査、研究方法の改善、新しい課題への洞察が求められよう。

謝辞：本研究は一般財団法人国土技術研究センターの支援を受けて遂行することができた。研究の完成に向けては名古屋工業大学都市基盤計画分野研究室に在籍した中居楓子先生、新井優希君、直海響君、中平亜都夢君の貢献が非常に大きい。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)日本学術会議 農業・森林の多面的機能に関する特別委員会：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について（答申）.2001.
- 2)小林久，阿部幸浩：農業を対象としたLCAの特殊性と推計手法に関する考察，農業土木学会誌，Vol. 71，No. 12，pp. 1077-1081，2003.
- 3)伊藤寛幸，増田清敬，山本康貴：草地圃場整備が及ぼす環境影響の経済評価，環境科学会誌，Vol. 23，No. 2，pp. 96-105，2010.
- 4)野口良造，齋藤高弘：インベントリ分析による機械化水稲生産のエネルギー消費量・効率の考察，農業情報研究，Vol.17，No.1，pp. 20-30，2008.
- 5)岐阜県 農政部・林政部・県土整備部・都市建築部：令和4年「実施設計書に使用する単価表」.2022.
- 6)一般財団法人建設物価調査会：Web 建設物価. 2022. <https://www.web-ken.jp/>.
- 7)環境省：サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース（Ver.3.2）.2022.
- 8)国土交通省水管理・国土保全局下水道部：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説，2015.
- 9)南齋規介，森口祐一，東野達：環境負荷原単位一覧表，産業関連表による環境負荷原単位データブック(3EID)-LCA のインベントリデータとして，2002.
- 10)農林水産省：令和4年度土地改良工事積算基準（土木工事）. 2022.
- 11)環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 2020.
- 12)国立環境研究所：産業関連表による環境負荷原単位データブック(3EID). 1995.

- 13) 瀧巻峰夫, 野池達也: LCAにおける多項目環境負荷量の定量化に関する研究, 環境システム研究, Vol.25, pp.217-227, 1997.
- 14) 野内勇: 農業における温室効果ガスの排出と削減, 大気環境学会誌, 第41巻 第3号, pp.103-122, 2006.
- 15) 松尾芳雄, 三宅博, 青木正敏: 大気浄化機能からみた農林業的土地利用の存在効果, 農業土木学会誌, Vol.58, No.2, pp.131-137, 1990.
- 16) 鶴田治雄, 尾崎保夫: 水田における温室効果ガス及び水質に関するLCA, 農林水産技術研究ジャーナル, 第22巻 第10号, pp.20-25, 1999.
- 17) 千葉県: 生活排水の原単位と各種浄化槽による排出負荷. 2020.
- 18) 環境省 水・大気環境局 水環境課: 令和3年度水質汚濁物質排出量総合調査 調査結果報告書. 2022.
- 19) 国土交通省: グリーンインフラ推進戦略 2023, 2023.
- 20) 安藤翼: 便益帰着構成表に基づくグリーンインフラの投資効果の可視化に関する考察, 名古屋工業大学大学院, 2021.
- 21) 社会資本整備の便益評価—一般均衡理論によるアプローチ—, 勁草書房, 1997.
- 22) 武藤真一, 上田孝行, 稲垣貴政: 地域特性と地域相互作用を考慮した地域政策の経済分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 16, pp. 279-287, 1999.
- 23) 国土交通省東北地方整備局: 河川事業—再評価—北上川上流直轄河川改修事業(一関遊水地) 参考資料, 2020.
- 24) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所: 一関遊水地事業パンフレット, 2017.
- 25) 国土交通省: 北上川水系河川整備基本方針, 2006.
- 26) 国土交通省: 庄内川水系河川整備基本方針, 2005.
- 27) Chanuki Illushka, seresinhe, Tobias Preis, George MacKerron, Helen susannah Moat: Happiness is Greater in More Scenic Locations, Scientific Reports, Vol. 9, No.1, 2019
- 28) 青木陽二: 都市景観の識別と評価に及ぼす緑の影響, 日本不動産学会誌, vol.3, No.3, pp. 68-74, 1987
- 29) 浅田 拓海, 亀山 修一: Google ストリートビューのパノラマ画像を用いた広域・網羅的な地域景観分析, 土木計画学研究・論文集第33巻, Vol. 72, No. 5, p.p. I_383-I_392, 2016.
- 30) Yujun Hou, Matias Quintana et al.: Global Streetscapes — A comprehensive dataset of 10 million street-level images across 688 cities for urban science and analytics, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 215, pp.216-238, 2024
- 31) Gerhard Neuhold, Tobias Ollmann et al.: The Mapillary Vistas Dataset for Semantic Understanding of Street Scenes, IEEE International Conference on Computer Vision, pp.5000-5009, 2017
- 32) Bowen Cheng, Ishan Misra, Alexander G. Schwing, Alexander Kirillov, Rohit Girdhar: Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1280-1289, 2022

表2 インベントリ表

対応する機能	気候緩和	大気浄化		水質浄化		
事業段階	GHG (t-CO ₂)	NO _x (kg)	SO _x (kg)	COD (kg)	T-N (kg)	T-P (kg)
建設: 投入製品	110.956	241.951	86.490	319.056	10.789	19.553
建設: 工事	26.896	412.065	21.174	33.063	20.516	20.380
営農: 投入製品	662.293	427.074	256.512	432.295	414.262	515.174
営農: 農作業	123.184	1,078.091	56.529	11,820.000	2,451.000	-62.100
営農: 水田由来	-4,557.493	-3,972.776	-2,838.084			
交換: 投入製品	345.276	707.355	327.752	821.716	28.695	39.205
交換: 工事	23.092	353.788	18.180	126.489	78.488	77.969
撤去: 投入製品	5.021	1.918	1.056	1.295	0.068	0.023
撤去: 工事	11.621	178.046	9.149	1.281	0.795	0.789
合計	-3,249.154	-572.488	-2,061.242	13,555.195	3,004.613	610.993

表3 流域全体の費用便益分析の結果

			便益	費用	費用便益比
シナリオ1	下流部のみ	20年間	1135107	326048	3.48
シナリオ2	上下流域に併設	20年間	1146657	271903	4.22
シナリオ3	上流部のみ	20年間	1147814	203443	5.64
シナリオ4	下流部のみ	50年間	349975	205012	1.71
シナリオ5	上下流域に併設	50年間	353536	170884	2.07
シナリオ6	上流部のみ	50年間	353893	128076	2.76