慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	自然を活用する：グリーンインフラとその可能性
Sub Title	Working with nature : green infrastructure and its potential
Author	大沼, あゆみ(Onuma, Ayumi)
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	2026
Jtitle	三田学会雑誌 (Mita journal of economics). Vol.118, No.3 (2026. 2) ,p.261 (1)- 276 (16)
JaLC DOI	10.14991/001.20260201-0001
Abstract	気候変動に伴う豪雨・洪水の増加に対し，自然を活用した解決策（NbS）であるグリーンインフラが注目されている。これは，洪水緩和と生態系保全の両立を可能にする仕組みである。本稿では，グリーンインフラをめぐる経済学的分析を理論・実証の両面から示し，その意義と社会実装に向けた課題を明らかにする。さらに，維持管理を通じた協働が地域の信頼とウェルビーイングを高める可能性を指摘する。 As climate change increases the frequency and intensity of heavy rainfall and flooding, green infrastructure as a nature-based solutions (NbS) has gained growing attention. Green infrastructure offers a means to simultaneously achieve flood risk reduction and ecosystem conservation. This paper presents an economic analysis of green infrastructure from both theoretical and empirical perspectives, clarifying its significance and the challenges associated with social implementation. It further highlights the potential of collaborative management and maintenance to enhance community trust and human well-being.
Notes	会長講演
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20260201-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

「三田学会雑誌」118 巻 3 号（2026 年 2 月）

会長講演

自然を活用する～グリーンインフラとその可能性

大沼あゆみ *

Working with Nature: Green Infrastructure and Its Potential

Ayumi Onuma *

Abstract: As climate change increases the frequency and intensity of heavy rainfall and flooding, green infrastructure as a nature-based solutions (NbS) has gained growing attention. Green infrastructure offers a means to simultaneously achieve flood risk reduction and ecosystem conservation. This paper presents an economic analysis of green infrastructure from both theoretical and empirical perspectives, clarifying its significance and the challenges associated with social implementation. It further highlights the potential of collaborative management and maintenance to enhance community trust and human well-being.

Key words: green infrastructure, nature-based solutions, flood risk management, cost-benefit analysis, public policy

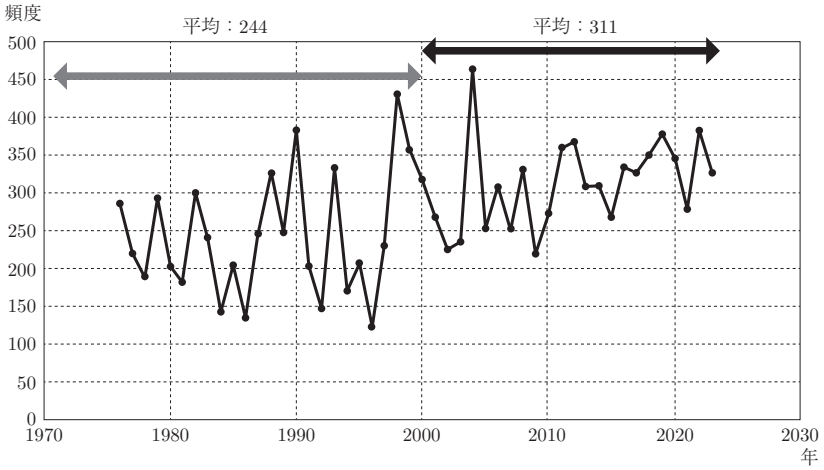
JEL Classifications: Q54, Q51, H54

＊ 慶應義塾大学経済学部
Faculty of Economics, Keio University
onuma@keio.jp

謝辞：本稿は，2024 年 12 月 19 日に行った慶應義塾経済学会　会長講演「自然を活用する」にもとづき，加筆・修正を行ったものである。講演会の参加者から，多くの有益な質問・コメントをいただいた。また，本稿に対し，匿名の査読者から貴重な指摘をいただいた。ここに記して感謝申し上げる。

Copyright©2026, by the Keio Economic Society

図１　１時間当たり 50 ミリを超える降雨の発生回数



出典：気象庁ウェブサイト掲載データより筆者作成。

1　はじめに

今日の環境問題の一つの大きなテーマは気候変動である。気候変動の影響は多岐にわたるが，一つ大きな問題として挙げられるのが豪雨である。豪雨に伴う洪水の発生の頻度がおそらく増えていくだろうと言われている。

IPCC 第 6 次評価報告書作業部会 Ⅱ（AR6: 2022）の第 4 章では，気候変動と洪水の問題を扱っている。極端な降水と，それに伴う河川洪水の頻度と規模が増大することが高い確信度で評価されている。実際，1950 年代以降，世界の多くの地域で豪雨の頻度が高まり，その規模が大きなものとなってきていると報告されている。地球温暖化が進むと，この傾向は今後も継続するものと予想される。気候変動はもはや止めることはできないので，これに対する適応戦略が重要になる。

日本でも豪雨の頻度が増加している。図 1 は，1 時間当たり 50 ミリを超える降雨の発生回数を，2000 年以前と 2000 年以降で比較したものである。2000 年以前は年平均 244 回だが，2000 年以降は 311 回になっていることが気象庁のデータで示されている。毎年のように多くの水害が日本で発生してくるようになっているのは，こうした気候変動の影響があるからと考えられる。

このような状況の中で今注目されている手法の一つが Nature-based Solutions（NbS: 自然を活用した解決策）である。これは自然の持つ機能を活用して社会的な問題に対処していこうというもので，先ほど紹介した AR6 でも，この NbS というのは気候変動の影響を軽減するために重要な戦略であることが強調されている。

気候変動に対処する NbS というのは洪水対策だけではない。たとえば森林減少や劣化を抑制して

森林から放出される二酸化炭素を減らすことは，温室効果ガスの排出削減であり，NbS における気候変動の緩和策と位置づけられる。一方，気候変動の適応策の重要な柱として考えられているのが，自然を活用した洪水対策である。以下では，この洪水対策について考察し，さらにより広範に自然を活用することの社会における可能性について述べる。

2　自然を活用した防災・減災の考え方

洪水対策として通常用いられる手段は堤防を設置することや，既存の堤防を増強することである。堤防というのは水を抑え込む役割を持つが，NbS では抑え込むのではなく，流量のピークを減らす役割により効果を持つ。これが NbS に特徴的な性質である。

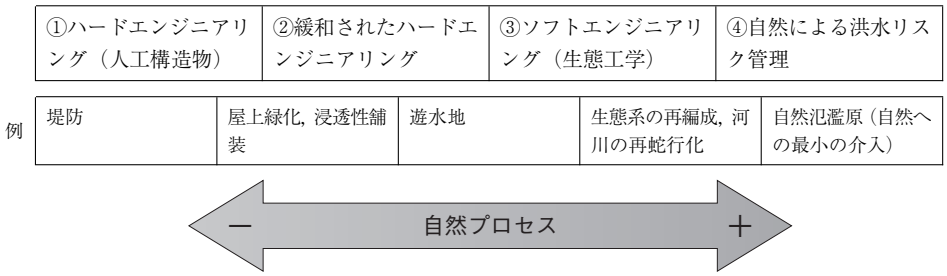
釧路湿原の洪水緩和における役割をシミュレーションで示した興味深い研究がある（Nakamura et al., 2020）。これは，実際に 2016 年の 8 月に釧路地方を豪雨が襲ったときの釧路川の水量が，仮に，釧路湿原に開発が行われていたとしたらどの程度増えていたのかをシミュレーションにより示したものである。そして，湿原が存在することで，実際のピークの水量を 3 割減らすことになったと結論づけている。このような効果が起こる理由は，上流に位置する湿原が，雨水を一時的に溜め込み，川の流量を緩和する遊水地としての働きをしてくれるからである。そうした遊水地としての働きをしてくれる自然の機能は，洪水リスクを減らす適応策として大きな魅力を持つことがわかる。

加えて，洪水対策として自然を活用すると，洪水を抑えるだけではなくて，コベネフィット（副次的便益）が発生する。たとえば遊水地をつくると，そこが湿原になって渡り鳥が飛来するなど生物多様性が高まることが期待される。森林を設置すれば，二酸化炭素を削減したり，水質が改善されたりすることが起こる。

自然を活用するときに用いる生態系などのインフラのことを，グリーンインフラと呼ぶ場合が多い。グリーンインフラとは，狭い意味では森林や自然湿地など自然の生態系を指す。たとえば森林や自然湿地は，先述のように，雨が降ると，それを溜め込み時間をかけて放出するという形で川のピーク水量を減らしてくれる。サンゴ礁やマングローブ林は，海の高波や，場合によっては津波を緩和してくれる重要な役割を果たす。2004 年に起こったインド洋津波では，のちの実証研究において，マングローブ林が津波の被害をかなり軽減したことが明らかになっている（Kathiresan and Rajendran, 2005）。その意味で，マングローブ林は，気候変動における沿岸域の高潮の被害を軽減するグリーンインフラとして重要な位置を占めている（Asian Development Bank, 2019）。

ただしグリーンインフラは，こうした原生の自然のものだけではなくて，より広い概念のインフラを指している。たとえば，改変した自然や造林などのように人為的に設置したもの，さらにはグレーインフラ（コンクリートの堤防に代表されるインフラ）を補完的に組み合わせたものもグリーンインフラとしてみなされる。イギリスは自然の力を生かした防災を積極的に行っている国だが，図 2

図２　純粋な人工構造物から自然まで～さまざまな防災・減災インフラ



出典： Environmental Agency and Defra, UK (2010) Fig. 7にもとづき筆者作成。

のように，防災インフラの種類と大きさを４つに分けて，完全な堤防のような人工物から，自然湿地といった完全な生態系の間にいろいろなグラデーションを定めている。

図２は，自然のウエイトが低いものから高いものまで，防災・減災インフラを連続的に表している。グリーンインフラは，③と④を指すものであるし，異論はあるが②を含むとする人もいる（ただし②を含めるとグリーンウォッシュ（実際には環境配慮の実態が乏しいにもかかわらず，環境に優しいかのように見せかける行為）を生みやすい）。

3　グリーンインフラの代表的導入事例：イギリス・ピケリング

グリーンインフラが設置された有名な事例として，イギリスのヨークシャーにあるピケリングのケースを取り上げる。ピケリングは，三方を山に囲まれるという，その地理的特徴によりたびたび洪水に見舞われていることで有名である。その頻度は４年に１回というレベルで，特にグリーンインフラ設置が始まった2009年までの10年間には４度の洪水に見舞われている。ピケリングの町では，堤防を設置することを要請したが却下された。理由は，人口が少ない（6,000人程度）ので，設置費用に比して便益が少ないと評価されたからである。

そこでオックスフォード大学とイギリス森林研究所と協力し，グリーンインフラを設置することで洪水管理を行うプロジェクトが始まった。その名前がSlowing The Flow（流れを遅らせる）である。先述のように，水を抑え込むのではなく，水の集中を分散させ，ピーク水量を減らそうというものである。

グリーンインフラの構造は，設置地域独自の地形や自然状況にもとづき工夫してデザインされる。ピケリングのグリーンインフラは主に３つの要素を設置することから構成されている。

第一に，リーキーダム（デブリダム）である。これは，森に多くみられるデブリ（倒れた木）を活用し，垂直に積み重ねて作ったものである。水がリーキーダムに押し寄せてくると，水を貯める役割を果たすが，デブリ間に隙間があり時間をかけて水が漏れていくという構造である。これが山の

中に多く点在しており，ピケリングのグリーンインフラで中心的なものとなっている。第二に，草を固めたヒースのベールのようなものを多数配置することである。これらがスポンジのような形で水を吸収してくれる役割を果たす。さらに，第三に植樹である。これらは樹木の持つ機能により雨水を遮断・蒸散させる。

グレーインフラのようにコンクリートで堤防をつくるのと対照的に，こうしたさまざまなものを組み合わせて水の集中を防ぐデザインを工夫するのである。一方で，人工の構造物である大きな貯水ダムも，山の斜面に一つ設置した。これは確実に斜面を流れる水を一定量溜め込んでくれる役割を果たしている。以上のものが組み合わさって，洪水を効果的に防ぐ機能を発揮し，4 年に 1 回の洪水の発生頻度（25%の発生確率）を，4%（25 年に 1 回）に低下させると予想された。このグリーンインフラは，2009 年にフェーズⅠが着工され，2015 年にフェーズⅡが完成したが，その後 1 度も洪水が起きておらず，確かな防災・減災効果があることが示されている。

一方，グリーンインフラ設置の総費用は，グレーインフラを設置した場合と比較すると，約 10 分の 1 になると評価されており，費用効果的な結果になっている。また，その便益/費用比率は，環境面での副次的便益を考慮するか否かによって幅があるが，1.3〜5.6 と十分に大きな値になると推定された（Nisbet et al., 2015）。

防災インフラの費用効果性で記憶に新しいのは，2011 年に発生した東日本大震災によって大災害を起こした津波に対するその後の対策・災害復興として，岩手・宮城・福島県の海岸に 400 キロに及び建設された防潮堤である。総事業費が 1.3 兆円と巨額なものになったが，費用効果性からは疑問がつく部分も多い。たとえば，宮城県気仙沼市の中島海岸には，巨大防潮堤が，それまで存在した砂浜を埋めて建設された。しかし，実際，この防潮堤の背後には人は住んでおらず，高台に集団移転してしまっていた。一方，この建設費用は 300 億にのぼると言われている。つまり，減災の対象となる住民のいないところに巨額の費用を投じて防災インフラが建てられるという，費用便益評価から言えば，どのようにしても正当化できないものだった。防災・減災対策が持続可能なものとなるためには，少なくとも便益が費用を下回らないものであることが必要であろう。

4　グリーンインフラの理論的基礎と経済学的定式化

グリーンインフラが社会的に望ましいとする状況はどのようなものなのか。このような考察は経済学が歴史的に行ってきたものである。経済学でも，防災・減災での自然資本の役割を論じた研究は多く存在する。しかしその多くはサイトベースでの経済評価研究であり，典型的には自然生態系の減災効果を金銭的に定量化するといったものである。たとえば，マングローブ林が存在することで津波の災害が減ったことにもとづき，マングローブ林の経済価値を導出するものである。一方，経済理論の中で防災・減災を扱う研究はきわめて少ない。

防災・減災を経済理論の中に位置づけるために，発生したハザード（H）から災害（D）に至る連関を明確に定義する必要がある。以下は，Onuma and Tsuge（2018）および Onuma（2022）にもとづく説明である。

洪水のケースでは，ハザードとは，降雨量を表す。それが災害に結びつくプロセスというのは，まず地域（人々）がそのハザードに暴露して，その暴露した地域の脆弱性にもとづいて災害が決定される。

防災インフラはハザードから暴露（X）に至る経路に関与し，X を減らす役割を果たす。この暴露にもとづいて一家庭当たりの被害（$D(X)$）が決まって，さらに地域の人口にもとづいて地域の災害が決まるという連関が考えられる。これを定式化してみる。ハザード H を区間 $[0, H^m]$ で定義される確率変数とし（ここで H^m はハザードの想定される最大値），確率密度関数 $f(H)$ に従うものとする。防災インフラ K は，このハザードを減少させる。防災インフラがなければ，X は常にハザード H に等しくなるが，防災インフラがあるおかげで，X は H より小さなものになる。すなわち，$X(K, H)$ として暴露水準を表すことができる。最終的に暴露した大きさにもとづいて，一人当たりの被害の規模が決まり $D(X(K, H))$ で表す。防災インフラがない場合，すなわち $K = 0$ の場合は，$D(X) = D(H)$ である。

次に，災害リスク（Disaster Risk）を防災インフラ K の関数として期待災害規模と定義し，$DR(K) = n\int_0^{H^m} f(H)\, D(X(K, H))\, dH$ と表す。つまり，期待被害に人口 n を掛けたものが，その地域の災害リスクになる。一方，防災インフラがない場合の災害リスクは，$DR(0) = n\int_0^{H^m} f(H)\, D(H)\, dH$ となる。

したがって，防災インフラがあることで，災害リスクは減少する。これが Disaster Risk Reduction（DRR）と言われるものである。Disaster Risk Reduction を経済学で定義すると，防災インフラがあることで，ないときと比較して減少する災害リスクと定め，$DRR(K)$ で表す。すなわち，

$$DRR(K) = DR(0) - DR(K)$$

である。この DRR を，防災インフラを導入することの便益と考えることができる。次に防災インフラがどのような機能を持っているのかを単純化して表す。

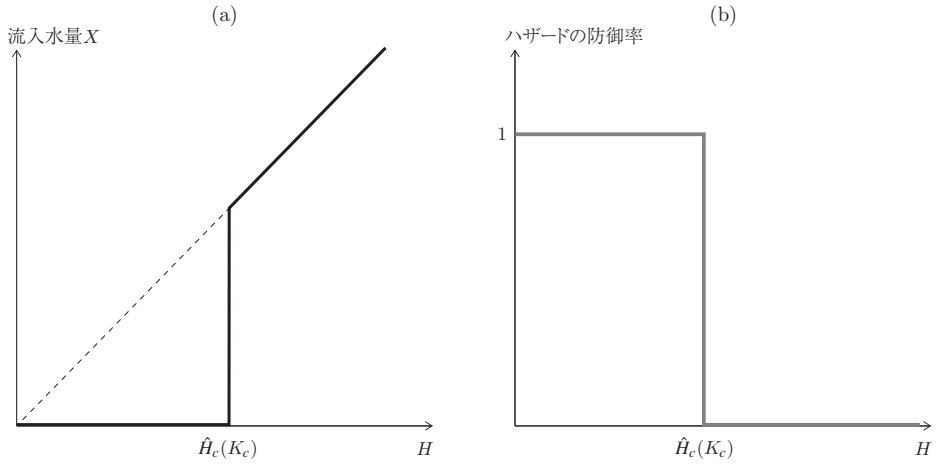
4. 1　グレーインフラの定式化

まず，グレーインフラは，コンクリートの堤防に代表されるものである。図 3 のように，ハザードを横軸に，縦軸に流入する水量をとると，グレーインフラは，ある閾値までは，水量を堤防により完全に防御する（図 3 (a)）。

しかし，ある閾値を超えると外力で破壊されて，全ての水が流れ込んでくる。したがって，これをハザードを防御する確率で表すと，閾値までは確実に確率 1 で防御してくれるけれども，それを

図 3　グレーインフラの防災機能

$\hat{H}_c$ までは完全に防御するが，その閾値を超えるとまったく防御不能になる。(H: ハザード)



超えるものは確率 0 になってしまうと描き表すことができる（図 3(b)）。

この理解のもとで，グレーインフラ K_C の場合の便益は，

$$DRR\left(K_C\right) = DR\left(0\right) - DR\left(K_C\right) = n\int_0^{\hat{H}_C(K_C)} f\left(H\right) D\left(H\right) dH$$

と表される。グレーインフラの堤防を設置すると，閾値 $\hat{H}_C\left(K_C\right)$ までのハザードリスクは全部消えることになる。それがこの場合の災害リスク減少の定式化である。

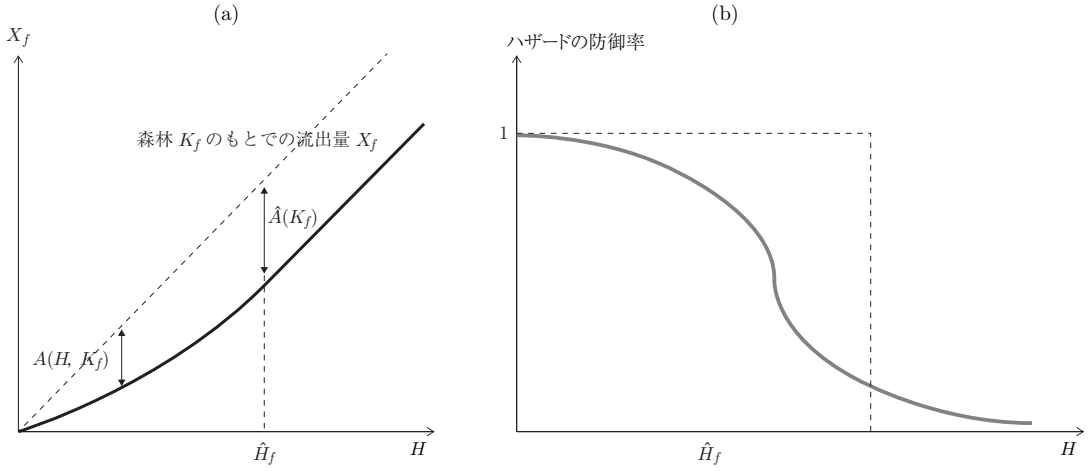
4. 2　グリーンインフラの定式化

今度は，グリーンインフラはどのように描き表されるのか，森林を例に考えてみる。森林が水を防御する機能は，遮断と吸収である。葉が水を受け止め一部を蒸散させて地面に落下しないようにするのが遮断である。葉の面積が大きいほど遮断する水の量は多くなるため，広葉樹と針葉樹ではその能力が異なる。広葉樹のほうが葉面積は大きいが，秋から春にかけて落葉するため，落葉期には遮断力がほとんど失われる。一方，針葉樹は葉面積は小さいものの常緑であるため，年間を通じて遮断機能を発揮する。このように，森林の種類によっても防災機能は異なる。遮断率は地域や樹種，地形によって大きく異なる。たとえば，Muzylo et al.（2009）では，粗降雨量の 15％程度が遮断されるとされる。

一方，地面に落ちた水は，まず 1 回土壌の中に吸収される。それが吸収能力の上限を超えると地表を流れていくようになる。これをグラフに描くと，図 4(a) のようになると考えられる。横軸に水量，縦軸に流出量をとると，水量が小さいときは流出比率が小さいが，水量が増えるにつれだんだん流出比率が大きくなってくる。この 45 度線と水の流出量の間の距離が森林の吸収量あるいは遮断

図 4　グレーインフラの防災機能

$\hat{H}_f$ まで遮断・吸収・浸透量 A が増加する。$\hat{H}_f$ でその量は上限となる。



出典： Onuma and Tsuge (2018), Onuma (2022) をもとに筆者作成。

量の大きさということになる。これを防御率で書き表したものが，図 4(b) である。

さらに，グレーインフラと同様に災害リスク減少を定式化すると次のようになる。森林を K_G とし，森林により防御される水量を $A(H, K_G)$ とすると，

$$DRR\left(K_G\right) = DR\left(0\right) - DR\left(K_G\right) = n\int_0^{\infty} f\left(H\right)\left(D\left(H\right) - D\left(H - A\left(H, K_G\right)\right)\right) dH$$

となる。ここで，$\frac{\partial A(H,K_G)}{\partial K_G} > 0$ である。

このように，グレーインフラとグリーンインフラでは便益の定式化にそれぞれの特徴が反映されている。この便益からそれぞれの設置費用 $C_C\left(K_C\right), C_G(K_G)$ を引き，環境便益 $B_C\left(K_C\right), B_G(K_G)$ を足したものが社会的純便益となる。

このように経済学的定式化を行うことで，グレーインフラとグリーンインフラのどちらが望ましいかという比較を行うことができる。関数特定化のもとで，社会的純便益はどちらが大きくなるのかをみてみると，他のパラメータを所与として，人口の規模に着目して評価することができる。人口が非常に多いときにはグレーインフラが望ましい。一方，人口がある水準を下回るときにはグリーンインフラが望ましいというように，人口の規模によって望ましい防災インフラが異なるソリューションが得られる。

人口規模と関わる理由は，防災サービスというのは公共財の特徴を持つからである。人口が大きいほど，防災サービスを享受する便益も大きくなる。たとえば，堤防を一つ建設すると，洪水から防御される家屋や財産が，人口が多くなるほど増加し，被害を免れる価値が増え，当然同じ建設費用でも便益が大きくなるので，社会的純便益が大きくなる。人口が大きいほど，グレーインフラが

確実に防御してくれることによる効果が大きくなってくるのである。

4.3 ハイブリッドインフラ

ところで，先ほどのピケリングのケースがそうであるように，グリーンインフラは，部分的にグレーインフラを含んで導入されているものがほとんどである。これをハイブリッドインフラと呼ぶときもある。このように，グリーンインフラというのは一般的に完全な自然生態系ではなくて，グレーの部分と組み合わせたものになる。先ほど紹介した経済学的な考察では，グリーンインフラかグレーインフラかという二項対立的なソリューションで，こうした中間的なソリューションとはならなかった。その意味では，経済学でいう単点解を選択する問題であったわけだ。一方，グリーインフラのどのようなグラデーションを選択するのかというのは，いわゆる内点解を求めるものなので，経済学的な問題として典型的なものとも考えることができる。

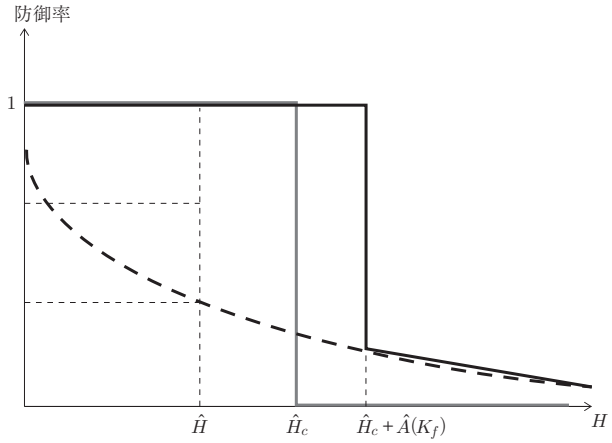
図 3 と 4 を組み合わせて，グリーンインフラとグレーインフラを組み合わせた防災機能を考える（図 5）。これは堤防の上流に森林があったときに，防災機能がどのように変化するかを描いたものであるが，堤防の上流に森林があると，森林が降雨量の一部を吸収してくれるので，堤防に流れ込む水の量が少なくなる。すると，人工の堤防の閾値が，たとえばグレーインフラ単独だと 100 のハザードの水準だったとする。つまり，降雨量が 100 を超えると堤防が壊れてしまったのが，上流に森林が存在することで森林が降雨量の一部を吸収してくれるので，100 のハザードが起こっても，実際に堤防に流入する水量は 100 を下回ることになる。これは，堤防の閾値が上昇することを意味する。たとえば，110 のハザードまで耐えられることになる。その意味で，上流に森林や遊水地が設置されると，堤防の機能が増強される結果になる。堤防の規模はそのままだけれども，実質的に増強されたのと同じ結果になる。

少し複雑だが，図 5 で，グレーインフラの堤防は，薄い実線の防御率で示されているのが，濃い実線の形のグラフに変わることが示される。つまり閾値が上昇し，新たな閾値を超えたハザードについてもグリーンインフラが少し防御してくれる防災インフラが構築されることになる。

これを定式化して解いてみると，いわゆる内点解として，最適インフラのグレー/グリーン比率が得られる。たとえば設置費用や環境便益・環境費用，あるいは人口などのパラメータが変化すると，それに応じてグレー/グリーン比率が上下する結果が導かれる。たとえば，先ほどと同様に人口というものをベースにして考える。人口が増えると，土地価格が当然上昇する。この部分を考慮すると，グレーインフラかグリーンインフラかの議論にあった防災による便益部分だけではなく，土地価格を考慮したグリーンインフラの設置費用（広大な土地を要するため大きく増加する）の観点からも，人口とともにグレーインフラの比率が増大することになる。こうして，最適な防災インフラを，すなわち，どのようなグリーンのグラデーションを帯びる防災インフラが最適であるか導出できる。

人口の多い大都市では，グレーインフラもやはり経済的には合理的・最適であるという結果が生

図５　ハイブリッドインフラの機能と防御率



グレーインフラの上流にグリーンインフラ（森林）を設置。グレーインフラ部分に流入する水量が森林の遮断・吸収分減少する。結果として，グレーインフラの閾値が増大する。

出典：Onuma (2022) をもとに筆者作成。

じやすいが，人口が少なくなると，グリーンインフラとグレーインフラを組み合わせる状況が起きやすいし，人口が少なくなるほどグリーンの比率が高まるのが望ましいことになる。これまで，防災・減災インフラをグレーインフラに限ることが圧倒的に多かったが，グリーンインフラも含めた幅広い可能性を考えていくことが社会的に望ましい。これが経済理論研究での示唆である。

5　グリーンインフラの不確実性と利他心についての実証研究

社会にとってグリーンインフラというのは，防災機能を持ち，自然環境も高めてくれる。さらに費用も安くしてくれるという意味で，非常に魅力的なものである。しかし，デメリットもある。それは，防災インフラとして最も重要なものである防災機能に確実性がないことである。グレーインフラのように，ここまでは確実に防御するという 100％の防御の確実性を保証することができない。たとえば森林があると，確かに洪水制御の機能は持つが，どれだけの防災機能があるのかは明確には言えない。

このように防災機能に不確実性・不完全性があると，政策的に受け入れられるのかという問題が生じる。たとえば，実際にハザードマップでリスクが高い場所の住民が，果たしてこれを受容してくれるのかという疑問が出る。

さらに，グリーンインフラは，グレーインフラの堤防などに比べて，大きな地理的空間を必要とする。すなわち，ステークホルダーが多種多様で多い。中には，デメリットを受けてしまうステークホルダーが出てくる可能性もある。このように不確実性の問題に加えて，人々が設置に合意して

表1　グリーンインフラの不確実性の評価

成功確率	不確実性の重視
30%	1
40%	0.83
50%	0.67
60%	0.51
70%	0.35
80%	0.19
90%	0.03

出典： Tsuge et al.（2022）より筆者作成。

くれるかどうかという問題もある。

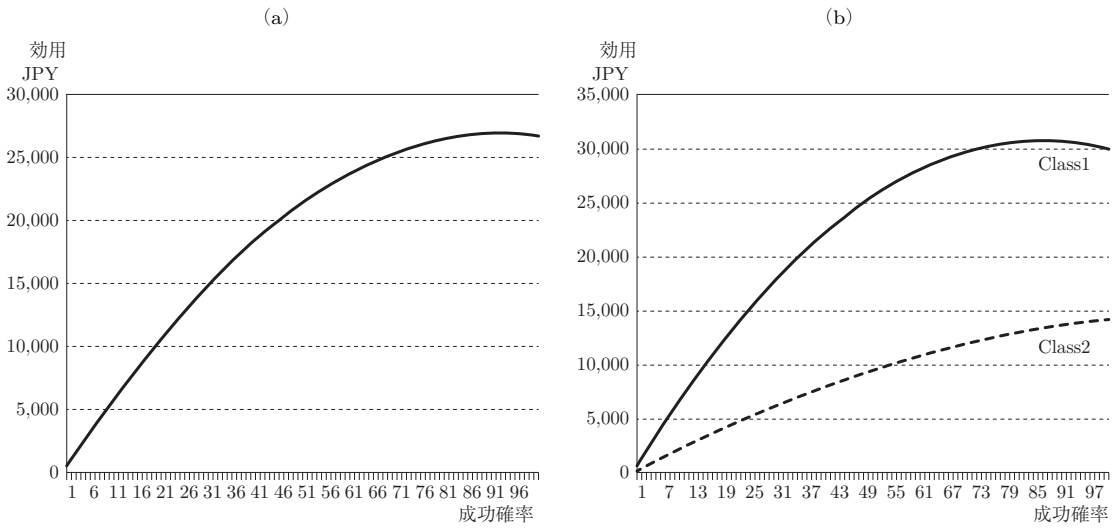
市民の不確実性に対する評価を調べるため，筆者らは Web を用いて選択型実験を行った（Tsuge et al., 2022）。全国の一般市民を対象とし，5,224 人から回答を得た。選択型実験では，回答者が居住する地域の洪水の被害を軽減するために，上流でダムや遊水地を整備するなどの治水事業を実施する計画があると想定してもらった。このとき，次の 6 つの属性と 3〜5 のレベルを設定した。

① 「遊水地の防災以外の活用」（野鳥保護区として活用する，運動公園として活用する，なし）
② 「防災の成功確率」（20%，40%，60%，80%，100%）
③ 「水害が発生したときの人的被害（死者，行方不明者，負傷者の合計）の軽減」（20 人減る，40 人減る，60 人減る，80 人減る，100 人減る）
④ 「水害による物的被害（住家の全壊，半壊，一部損壊，床上浸水，床下浸水）の軽減」（50 棟減る，100 棟減る，150 棟減る，200 棟減る，250 棟減る）
⑤ 「水害による間接的被害の軽減（洪水の影響で日常生活に支障が生じる日数の短縮）」（1 日短縮，3 日短縮，5 日短縮，7 日短縮，10 日短縮）
⑥ 「遊水地設置の負担額（1 回限りの税金上昇）」（1000 円，3000 円，5000 円，10000 円，30000 円）

この選択型実験から，グリーンインフラが災害を防御してくれる確率の評価を導出したものが図 6(a),(b) および表 1 である。図 6(a),(b) は横軸に災害防御の成功確率，縦軸に効用をとったものである。防御する確率が上昇すると効用も上昇していくが，限界効用は低下していく形状になっている（図 6 (a)）。

ここで成功確率が 1%上がることの重みを，限界効用の比率で示したものが表 1 である。成功確率 30%のときの限界効用を 1 として表している。成功確率が高いほど，1%成功確率が下がっても，それほど不効用は生まれないことになる。たとえば，成功確率が 90%のときの限界評価は，70%のときの 10 分の 1 程度になっている。これをみると，成功確率が十分高ければ，100%の防災機能を

図 6　グリーンインフラの防御成功確率と効用



出典： Tsuge et al. (2022) Fig. 2, Fig. 3

持たない防災インフラでも十分許容してくれるのではないかと推測される。

一方，回答者を二つのグループに分けて評価したものが図 6 (b) である。Class 1 は，洪水により直接的な被害を受ける可能性，つまりハザードマップでリスクの高いところに住んでいる人の成功確率の評価は，そうではない人（Class 2）と比べて大きくなっていることがわかる。ここから，洪水のリスクを意識している人は，成功確率を重く考えるということが推察される。しかしそれでも限界効用については成功確率とともに低下する傾向を示しているため，十分な成功確率を与えるようなグリーンインフラであれば受容してもらえるのではないかと推測できる。

また，筆者らが行った他の研究では，利他性に関する意識の分析を行った（Tsuge and Onuma, 2024）。グリーンインフラとしての遊水地は，下流の被害を軽減するために上流に設置されることが考えられる。下流の洪水被害を軽減するために，上流地域で遊水地を設置するというシナリオをつくって，その上流に住んでいる人の意識を調査した Web アンケート調査を行った。これは，自身の地域でない場所の被害を軽減するために，遊水地を自地域に設置することへの評価を知るためである。回答者は，日本で過去に洪水が起こった河川の上流の町や都市に住んでいる人に限定してアンケートを取った研究である。ここでは，遊水地を設置することで，下流地域での洪水被害が軽減することを伝える。また，メリットとデメリットを提示している。メリットは，生物多様性が豊かになることで，飛来する野鳥の種数や数が増えることを意味する。さらに，金銭的な補償額としてクーポンが与えられる。一方，デメリットは，道路の冠水，床下浸水や床上浸水する可能性である。

アンケートの分析では，遊水地を設置するときに，下流の被害軽減と自分たちの地域での家屋への浸水も重視するという結果が得られた。一方，生物多様性やクーポンには，あまり関心が示され

なかった。また，ベストワーストスケーリングという手法で，遊水地設置の際，何を重視するかを調べると，やはり下流での被害軽減に一番重きを置き，次に，上流地での被害が発生しないことも重視したという結果であった。

こうした結果から，水害リスクが高い河川で被害発生地域の上流の住民は，下流に対し十分な利他性を持っている可能性がある。上流地域の被害を軽減するなどの条件のもとでは，下流のために遊水地を設置するという選択肢は十分に受け入れられる可能性がある。

6　イギリスの WWNP 政策と社会的実装

グリーンインフラを拡大していく上で，どのようにグリーンインフラの受容性を高めることができるのかということの私見を述べたい。以下は，優れた特徴と思われることをまとめたものである（大沼，2022）。

イギリスは「自然の働きと連携する」（WWNP：Working With Natural Process）政策を展開している。これは，自然を活用して問題を解決しようという，NbS と同じような意味合いを持つ。WWNP はグリーンインフラの導入を積極的に進めるスローガンであり，実際，2019 年までに全国で 65 のグリーンインフラの設置を行った。

イギリスでは事前でも事後でも，可能な限り費用と便益を示してくれている。先述のピケリングの例でも，堤防の設置が却下されたのはまさに費用便益評価だった。費用と便益をできるだけ定量化して可視化し，意思決定に反映させているのが政策的特徴の一つである。

費用便益に関しては，イギリスではグリーンブックというさまざまな公共事業の政策評価を行うガイドラインがつくられ，公表されている。その中には洪水リスクの軽減の評価法も記載されていて，洪水リスクを軽減すると便益がどれほどあるのかが，計算法に当てはめると求められる。たとえば財産や人々の健康や環境への影響なども考慮されている。

このような便益の計算は市民レベルでも実施されている。イギリスのイングランド北西部に，マージーフォレスト（Mersey Forest）という，年月をかけて 900 万本の植樹を行った森があり，グリーンインフラとしての機能を発揮している。その管理を担う団体である Mersey Forest が，木の本数や面積などを入れるだけで便益を定量的に計算するエクセルのキットを開発して公表し，森の便益をマネーに直すことで可視化するという試みを行っている。

このマージーフォレストの森で最も大きな効果があったのは，市場で金銭的に実際に評価されるものとしては不動産価値だった。一方，市場で金銭的には評価されないものでは，健康面であった。健康面効果というのは，イギリスで特徴あるもので，以前訪問したスコットランドの森林局で次のような興味深い説明を受けた。スコットランドは森林の被覆面積を高める努力をしていたが，どのような目的で森林を増やそうとしているのか尋ねたところ，財政負担をなくすためだと教えてもらっ

た。なぜ森林を増やすと財政負担が減るのかというと，イギリス人は森ができると散歩をするようになる。すると健康になって医療費が減るということである。マージーフォレストの健康面での評価も大きかったわけである。

もう一つの特徴は，科学にもとづく正確な情報を国民に提供していることである。一般に，あるものについて正確にどのようなリスクがあるかを知っているときと，どういうリスクがあるかわからないときでは，市民の対応や評価は異なることが考えられる。イギリスでは，科学的知見にもとづく正確な情報を適切に提供することが重要であるという方針をとっているという印象を受けた。

たとえば，グリーンインフラの機能とリスクについて積極的に可視化している。グリーンインフラの機能とリスクを，学術誌に掲載された論文をもとに，わかりやすいグラフをつくり，一つ一つ紹介している。このグラフは，科学者間での合意の程度，それからエビデンスの量を表すもので，それぞれ高・中・低の 3 段階で示され，グラフ化された 3×3 のマトリックスで，程度に応じた箇所を表示し，各知見の信頼性を可視化している。つまり，リスクについての科学的知見とその信頼性を知ることができるようになっている。

おそらく市民や地方自治体にとってみれば，リスクを受容することで生じるベネフィットとそのリスクを客観的に冷静に比較評価することになり，情報不足のため反対することを減少させる効果を持つだろう。その中でグリーンインフラの導入に賛成する場合も出てくる。

いずれにせよ今必要なことは，グリーンインフラの機能についての科学的知見を蓄積することである。グレーインフラの科学的知見は，長い研究の歴史を持っていて，きわめて正確な知見が蓄積されている。一方でグリーンインフラを使おうとするときには，こうした科学的知見が，まだグレーインフラと比較すると著しく不足している。そのため，行政側からみても，予算化しにくい点もあると感じる。その意味で，分野を超えて研究を蓄積することが，今後グリーンインフラの拡大に必要になってくる。

グリーンインフラの社会実装を進める上で，経済学の役割はきわめて重要である。第一に，グリーンインフラがもたらす防災効果や生態系サービスを定量的に可視化し，費用便益の形で比較可能にする評価手法を確立することが求められる。第二に，地域の条件に合わせて経済学的に適切なグレー/グリーン比率を示すことである。さらに，維持管理の段階では，地域協働を促すインセンティブ構造の設計が経済学の新たな課題となるであろう。

7　おわりに〜グリーンインフラとウェルビーイング

最後に，グリーンインフラの研究を行ってきた中で，特に論拠などを研究で得たわけではないが感じたことを述べたい。

OECD（2020）によるウェルビーイングの枠組みでは，人生全体に対して「どれだけ満足してい

るか（life satisfaction）」という主観的評価が示されている。それによれば，健康状態が良好で，強い社会的つながりを持ち，十分な物質的資源（所得や資産）がある場合，また信頼と市民参加によって特徴づけられる地域社会に暮らしている場合，より高い人生満足度が報告される傾向がある。さらに，雇用状況，教育・能力，仕事と生活のバランス，安全・安心と並んで，環境の質そして市民参加や統治に関する条件も，人生満足度の有意な要因として挙げられている。

以前，駿河湾のサクラエビ漁業のプール制を研究したことがある。通常の漁業では各人の漁業収入はそれぞれの漁獲量で決まるが，プール制では，（当初は由比地区のみの）サクラエビの漁業者が漁獲量を全部プールし，その販売収入を完全に平等に分ける。船の大きさや，誰がどれだけ獲れたかなどはいっさい関係なく，完全に平等に収入を配分するのがプール制である。それが 1968 年に導入されて，今日まで続いている。さらに，この制度は大井川・蒲原地区までにも拡がった。筆者は，このプール制自体に経済学的に合理的なものを指摘した研究を行ったが（Omori, Onuma and Okubo, 2017），その研究の過程で，こうした制度が導入され，かつ 50 年以上続いているのに驚くことになった。たとえ合理性が存在したとしても，漁師の人たちの間の強い信頼関係や結びつきがなければ，このような制度は早い段階で撤廃されたのではないかとも感じたのである。

なぜサクラエビ漁師の人たちは結びつきが強いのだろうか。そのとき思ったことは，次のことである。漁業者は，結構な頻度で顔を合わせて話し合わなければならないことが多いのではないか。漁場の状態や，資源の状態など，いろいろな状況に合わせて，どれだけ獲るか，いつ休漁にするかといった，さまざまな合意形成に，漁業者の人たちは対面で話し合い，かつ協働する必要がある。つまり，同じ目的を持ち自分の生活に関わることで協力して行動することで結びつきが強くなっているということが，このプール制を維持していくことができる背景にあるのではないかと思ったのである。先ほどのウェルビーイングの視点で言えば，コミュニティの人同士のつながりが強まり，さらに意思形成に参加している点からも，主観的幸福度を向上させる効果を持つことが推測される。

グリーンインフラというものも，持続的に維持管理をしていく上で，地域の人たちの協力と協働が求められる。グリーンインフラの手入れを継続して行う必要があるからである。先ほど紹介したピケリングの中心になった市民の一人に何回かヒアリングを行ったが，住民の間で顔を合わせて話し合っていく必要があったという。その結果，結びつきが高まったと述べていた。

一方でグレーインフラというのは，そうした手間を必要とせず，完成して当分の間は放置しておけばよく，地域の住民の関与が特に必要というわけではない。その意味で，グリーンインフラというのは，人々の間の結びつきを強くするのではないか。大学教員も半年間入試の仕事で協働すると結びつきが強まることがある。グリーンインフラは，その維持管理を通して，地域住民の結びつきを強くするという副次的効果を持ち，さらには自然環境へのアクセスや森林の存在がもたらす健康効果を生むことで，人々のウェルビーイングを高める役割を持つことを期待するものである。その

方向性を推進するためにも，経済学の役割は大きい。

参 考 文 献

Asian Development Bank (2019) *Asian Development Outlook 2019: Strengthening Disaster Resilience*, Asian Development Bank.

Environmental Agency and Defra, UK (2010) “Understanding the risks, empowering communities, building resilience.”

Kathiresan, K. and Rajendran, N. (2005) “Coastal mangrove forests mitigated tsunami Estuarine,” *Coastal and Shelf Science*, 65(3), 601–606.

Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., and Gash, J. H. C. (2009) “A review of rainfall interception modelling,” *Journal of Hydrology*, 370 (1–4), 191–206.

Nakamura, F., Ishiyama, N., Yamanaka, S., Higa, M., Akasaka, T., Kobayashi, Y., Ono, S., Fuke, N., Kitazawa, M., Moritomo, J., and Shoji, Y. (2020) “Adaptation to climate change and conservation of biodiversity using green infrastructure,” *River Research and Applications*, 36(6), 921–933.

Nisbet, T., Roe, P., Marrington, S., Thomas, H., Broadmeadow, S., and Valatin, G. (2015) *Project RMP5455: Slowing the Flow at Pickering Final Report: Phase II*, Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK.

OECD (2020) *How’s Life? 2020: Measuring Well-being*, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/9870c393-en.

Omori, M., Onuma, A., and Okubo, N. (2017) “A story of the successful application of a comanagement fishing regime in Suruga Bay, Japan,” Chapter 13 in Nunes, P.A.L.D. et al. (eds.) *Handbook on the Economics and Management of Sustainable Oceans*, Edward Elgar.

Onuma, A. and Tsuge, T. (2018) “Comparing green infrastructure as ecosystem-based disaster risk reduction with gray infrastructure in terms of costs and benefits under uncertainty: A theoretical approach,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 32, 22–28.

Onuma, A. (2022) “An economic analysis of optimal hybrid infrastructure: A theoretical approach in a hydro-economic model.” In: Nakamura, F. (ed.) *Green Infrastructure and Climate Change Adaptation*, Springer, Singapore, 31–42.

大沼あゆみ（2022）「イギリスにおける自然プロセスとの連携（WWNP）によるグリーンインフラの拡大」『環境経済・政策研究』15 巻 2 号，53–56.

Tsuge, T., Shoji, Y., Kuriyama, K., and Onuma, A. (2022) “Using a choice experiment to understand preferences for disaster risk reduction with uncertainty: A case study in Japan,” *Sustainability*, 14(8), 4753.

Tsuge, T. and Onuma, A. (2024) “Uncovering upstream residents’ preferences for flood damage reduction in downstream areas due to the installation of a retarding basin,” presented at 10$^{\text{th}}$ Atlantic Workshop on Energy and Environmental Economics, *A Toxa, Galicia*, Spain, 20–21 June, 2024.

要旨: 気候変動に伴う豪雨・洪水の増加に対し，自然を活用した解決策（NbS）であるグリーンインフラが注目されている。これは，洪水緩和と生態系保全の両立を可能にする仕組みである。本稿では，グリーンインフラをめぐる経済学的分析を理論・実証の両面から示し，その意義と社会実装に向けた課題を明らかにする。さらに，維持管理を通じた協働が地域の信頼とウェルビーイングを高める可能性を指摘する。

キーワード: グリーンインフラ，NbS，防災・減災，費用便益分析，公共政策