

気候変動と環境リスクの経済的影響^{*1}

八木 迪幸^{*2}
馬奈木 俊介^{*3}

要 約

気候変動は極端現象の増加や海面上昇、自然資本の劣化を通じ、経済・社会に長期的影響を及ぼす。さらに、環境汚染・自然災害・紛争・感染症が同時に発生し相互増幅する複合ハザードは、曝露・脆弱性を介して需要・供給・資産のショックに表れ、サプライチェーン・金融の相互依存を通じ複合リスクを高める。本稿は、ショックの経済的影響を「ショック－GDP（フロー）－新国富指標（人工・人的・自然資本のストック）」で連続評価する枠組みを提示する。仮に名目GDPが一時的に上振れても、資本ストックの毀損が残れば成長力と厚生は低下し得る。指標を市区町村・グリッド等の小地域に分解し、脆弱地域の把握、投資の重点化、世代・地域間の効率性と衡平性点検に活用する。これによりフローとストックを並行評価し、実質的レジリエンスを測定できる。政策領域はカーボンプライシング、防災・適応、サプライチェーン強靱化、国際ガバナンス・情報開示を、フローとストックを見据え検討する。

キーワード：気候変動、環境リスク、新国富指標、複合リスク、経済波及効果、レジリエンス

JEL Classification：Q54, Q56, H23

I. はじめに

温室効果ガスの累積排出量は産業革命以降2,390GtCO₂を超え、2011～2020年の世界平均気温は約1.1℃上昇した（IPCC, 2023）。2024年には単年で1.55℃の上昇が観測され、パリ協定の1.5℃目標を一時的に超えた可能性も指摘されている（WMO, 2025）。温暖化は、極端現象（IPCCの extreme weather events/climate

extremes）の頻度や強度を高め、猛暑・豪雨・台風の強度増大に加え、海面上昇や生態系劣化を通じて自然資本依存部門を直撃し、労働生産性の低下や格差拡大など社会経済面にも波及する（Burke et al., 2015; Cheung et al., 2010; Dell et al., 2012; IPBES, 2019; IPCC, 2023; Knutson et al., 2020; Muis et al., 2016）。加えて、地震・

* 1 本研究はJSPS科研費21K01698, 20H00648の助成を受けたものである。

* 2 富山大学経済学部・教授

* 3 九州大学都市研究センター・主幹教授

洪水などの自然災害や紛争・感染症が同時に発生して相互に増幅する複合ハザード (multi-hazard) が、サプライチェーンや金融の相互依存を通じて複合リスク (systemic risk) を高めている (Celbiş et al., 2023; Collier, 1999; Collier & Hoeffler, 2004; Eichenbaum et al., 2021; Guan et al., 2020; Raj et al., 2022)。

こうしたショックの影響や政策効果を判断するには拠り所となる指標が不可欠だが、国内総生産 (Gross Domestic Product: GDP) などのフロー指標のみに依拠すると実態を過小評価しかねない。支出側 GDP は民間消費 (C)、政府支出 (G)、投資 (I)、純輸出 (X-M) で構成されるが、大災害後はこの投資 (I) に含まれる復旧投資や保険金支払いで名目 GDP が一時的に押し上げられても、インフラ・生態系・健康・教育といった資本ストックが毀損し、長期的厚生やレジリエンス (resilience) は低下し得る (Stiglitz et al., 2009)。

このストック側の把握に資する指標の1つが新国富指標 (Inclusive Wealth Index: IWI, あるいは Comprehensive Wealth Index) である。IWI は人工資本 (Produced Capital: PC)、人的資本 (Human Capital: HC)、自然資本 (Natural Capital: NC) を金額換算して合計するものであり、必要に応じて、炭素ダメージ、原油価格変動、全要素生産性 (Total Factor Productivity: TFP) の変化などを調整項目として組み込む (Arrow et al., 2012; Dasgupta et al., 2015; Managi & Kumar, 2018; UNEP, 2023; UNESCO MGIEP, 2024)。Inclusive Wealth Report (IWR) が UNEP 等により 2012 年に創刊されて以降、IWI の認知度が高まってきた。近年では複数の国際報告書にて同様の推計結果が示されるようになっており、例えば World Bank (2024) による The Changing Wealth of Nations 2024 (CWON2024) や Chen & Managi (2024) が挙げられる。

本稿はフローとストックの乖離に注目し、ショックの発生からフロー (GDP) を経てストック (IWI) の増減へ至る経路を体系化する「ショック-GDP-IWI」評価枠組みを提示す

る。図 1 は、ハザードの発生 (ショック源) が曝露 (exposure)・脆弱性 (vulnerability) を介して需要・供給ショックを引き起こし、GDP (フロー) と IWI (ストック) へ波及する因果連鎖を示す。厚生とレジリエンスの評価には両者の並行評価が不可欠で、カーボンプライシング等の政策手段や防災・適応投資はその同時改善に資する。さらに本稿は、この枠組みを気候・災害に限らず紛争・感染症を含む複合ハザードへ拡張し、統一的に評価する。東日本大震災 (2011 年) と阪神・淡路大震災 (1995 年) の対照事例を用い、需要・供給ショックが名目・実質 GDP と資本ストックに与える影響の乖離を明らかにし、カーボンプライシング、防災投資、サプライチェーン強靱化等の費用対効果を短期フローと長期ストックの両観点から再評価する視座を示す。

本稿の構成は次の通りである。第 II 章では、気候変動・自然災害・環境リスク・感染症・紛争といった複合リスクの全体像を整理し、その経済社会への影響を概観する。第 III 章では、不確実性の位置づけと費用便益分析の論点を踏まえつつ、5つの分析カテゴリー (ショック定義、短期波及、一般均衡、長期整合、統合的評価) および各モデルの適用範囲と限界を整理する。第 IV 章では、IWI の構成と推計方法、IWR・CWON 等のデータ源の整合性、小地域 IWI (自治体・グリッド) の設計とインフラ評価への応用を示す。第 V 章では、「ショック-GDP-IWI」評価枠組みを定義し、需給ショックの波及メカニズムを整理したうえで、東日本大震災と阪神・淡路大震災に適用し、段階別設計をまとめる。第 VI 章では、カーボンプライシングと技術政策、防災・適応投資、小地域 IWI に基づく優先地域の選定 (ターゲティング)、環境規制と情報開示、国際ガバナンスと金融安定を含む政策的含意を提示し、評価の最小要件を明記する。第 VII 章では、データ整備・モデル連携・不確実性の標準化・測定と可視化の要件から、今後の研究課題と実装基盤を整理する。最後に第 VIII 章では、本稿の結論と今後の展望を述べる。

II. リスクの全体像（慢性・突発・伝播）

本稿は、ハザード（出来事）が曝露・脆弱性を介して需要・供給・資産のショックとして表れ、その頻度・強度・連鎖が増すほどリスク（損失の確率分布）が拡大すると捉える。複合ハザードは、地震・洪水・熱波・感染症・紛争など異なる要因が同時または連鎖して発生し、相互作用により影響が増幅する出来事である。複合リスクは、これらの出来事が曝露と脆弱性を通じて、社会経済システム全体に広域・連鎖的な損失可能性として表れる状態を指す。

II-1. 慢性的リスク（気候）

本稿でいう慢性的リスクとは、気温上昇・降水パターン変化・海面上昇・生態系劣化などの徐進的（slow-onset）ハザードが、曝露と脆弱性を通じて資本ストックや生産性に累積的な損失可能性をもたらす状態を指す。

世界のCO₂排出は現状で年約40 GtCO₂で推移しており、IPCC（2023）によれば、2020年初時点の残余炭素予算（remaining carbon budget、温度目標達成確率50%基準）は1.5°Cで約500 GtCO₂、2.0°Cで約1,350 GtCO₂である。産業革命以降の排出と森林減少で温室効果ガスは累積し、CO₂濃度は約420 ppm（2023年）、世界平均気温は2011-2020年で+1.1°C（IPCC, 2023）、2024年単年で+1.55°Cに達した（WMO, 2025）。平衡気候感度は2.5-4.0°Cに収れんしつつあり、今世紀末に2-3°Cの昇温が続くシナリオでは、熱波・豪雨・強い熱帯低気圧や海面上昇の増加が確実視される（Burke et al., 2015; IPCC, 2023）。

経済影響は不確実だが、昇温2.5°Cで世界GDPを1-2%下押しする推計が多く、Tol（2024）の再分析（39研究・69推計）でも中央値は-1.7%である（範囲は0%近傍～数%超）。炭素1トン当たりの社会的費用（Social Cost of Carbon: SCC）

は原則tCO₂を単位とし、Tol（2024）のメタ分析が報告する中心傾向は約14～16ドル/tCO₂（元表示：50～60ドル/tC）である。他方、割引率・損害関数・基準年・シナリオの前提に強く依存し、文献全体では-97～+160ドル/tCO₂（元表示：-355～+587ドル/tC）まで大きく振れる（Nordhaus, 2017; Pindyck, 2013, 2017; Stern, 2007, 2008; Tol, 2024）。それでも、削減の先送りが将来被害を増やす点では一致がある（Carleton & Hsiang, 2016; Kalkuhl & Wenz, 2020; Stiglitz et al., 2009; IPCC, 2023）。

影響経路は、（1）気温・降水変化と極端現象の増加による自然資本依存部門の生産性低下、（2）海面上昇・酸性化・生態系劣化による自然資本の減耗、（3）熱ストレス等による労働供給・健康の毀損、などである（Burke et al., 2015; IPCC, 2023）。これらは短期GDPに現れにくい一方、資本ストックを継続的に削り長期成長を抑制する。

したがって、緩和策（CO₂排出を減らす：カーボンプライシング等）と適応策（温暖化の影響に備え被害を回避・軽減する：防災・インフラ整備・土地利用計画等）の同時実施、および国際協調の強化が不可欠である（Stern, 2007, 2008; IPCC, 2023）。なお、国連事務総長アントニオ・グテーレスは2019年に、気候レジリエントなインフラ投資の便益費用比が約6対1、すなわち投資額1ドルに対し約6ドルの便益に相当すると指摘している（UN press release, 2019）。

II-2. 突発的リスク（災害）

突発的リスクとは、地震・津波・台風・洪水など短時間・高強度の突発（sudden-onset）ハザードが、曝露と脆弱性を介して短期に大きな損失可能性をもたらす状態を指す。

地震・津波・台風・洪水といった突発的リス

クは、インフラや生産設備を一瞬で損壊させ、サプライチェーン寸断を介して遠隔地の生産・消費にも波及する (Noy, 2009; Okuyama & Rose, 2019)。EM-DAT の集計では、2000 年から 2025 年 1 月までに世界で 16,103 件の災害が報告され、死亡約 178 万人、負傷約 739 万人、被災者約 46 億 8,500 万人、ホームレス約 4,200 万人に達し、経済被害は報告のある 3,113 件だけで約 4 兆 5,955 億ドルに上る (Delforge et al., 2023)。

被害の大小は、ハザードの特性、曝露 (人口・立地)、社会経済的脆弱性の相互作用で決まるとされる (Strömberg, 2007)。高所得国では建築基準・医療・防災投資の整備により死亡率が相対的に低い一方、統治や所得分配が脆弱な地域では犠牲が増えやすい。国際援助は深刻度や所得水準が低いほど集まりやすいが、地理・文化的近接性やドナーの利害で偏在し、干ばつのように可視性の低い災害は支援が届きにくいという歪みも残る。

投資 (I) に含まれる復旧投資や保険金により名目 GDP が一時的に上振れても、毀損した人的・物的資本は厚生と成長力をむしろ低下させる。影響の帰結は、防災制度や金融・保険の普及、復興プロセス設計に大きく依存し、大規模災害では公的支出が将来財政の重荷となるリスクも無視できない (Felbermayr & Gröschl, 2014; Loayza et al., 2012; Cavallo & Noy, 2011; Cavallo et al., 2013; Noy & Nualsri, 2011)。さらに気候変動は極端現象の頻度・規模を高め、複合リスク下でのレジリエンス強化の必要性を一段と高めている (Weyant, 2017)。

事例として、東日本大震災 (2011 年) は死者・行方不明者 22,325 人に達し、津波で港湾・工場が被災して世界的な部品不足を招いたうえ、福島第一原発事故の長期化が地域復興を阻害した。2011~2025 年度の復興予算は約 32.9 兆円に上る (内閣府, 2024; 復興庁, 2024; Carvalho et al., 2021; Managi & Guan, 2017; Okuyama & Rose, 2019; Yagi et al., 2020)。同年のタイ洪水では工業団地の浸水が自動車部品やハードディスクドライブの供給を止め、局地的災害がグロー

バル経済へ波及しうることを示した (Haraguchi & Lall, 2015; Singkran, 2017)。

II-3. 伝播型リスク (ネットワーク)

伝播型リスクとは、局所的なハザードが制度・ネットワーク (物流・金融・情報) を介して曝露・脆弱性に波及し、損失の可能性が広域に高まる状態を指す。代表的なハザードには、環境汚染、紛争、感染症がある。環境汚染や有害物質の漏洩は、健康被害や土壌・水質汚染を通じて住宅資産価値・生産性を毀損し、風評による地域ブランド低下が投資・人材流出を誘発する (Palmquist et al., 1997; Chay & Greenstone, 2005; Freire-González, 2018; Kellenberg & Mobarak, 2011)。紛争は国際物流と決済網を分断し、エネルギー・食料価格の高騰を通じて広範な物価上昇 (インフレ) と景気後退を同時に招き、社会基盤 (インフラ) の破壊と貿易分断が長期成長を抑制する (Collier & Hoeffler, 2004; Martin et al., 2008; Blattman & Miguel, 2010; Bazzi & Blattman, 2014)。感染症は移動制限と対面活動縮小により、供給制約と需要喪失の二重ショックをもたらし、グローバル・サプライチェーンの混乱を拡大させる (Eichenbaum et al., 2021; Guan et al., 2020; Yagi & Managi, 2021)。

さらに、気候変動はマラリアをはじめとする媒介性疾患の感染地域を拡大させ、人的資本を毀損するリスクを高めることが懸念される (Nomura et al., 2022; Li & Managi, 2022; Zhang et al., 2022)。とくに熱帯地域では、気温上昇と降水パターンの変化が感染拡大と死亡率の上昇を招き、長期的な人的資本への影響が経済成長の制約要因となる。

これらは独立ではなく、しばしば複合ハザードとして連鎖・増幅し、複合リスクを高める。例えば、国内洪水で農地が損傷した直後に地政学的緊張で国際穀物市場が逼迫すれば食料安全保障は二重に脅かされ、感染症による国境・港湾の閉鎖は復旧資材の調達を遅らせ復興を長期化させる。内戦や自然災害が重なると難民・移民が

急増し、受入国の財政・医療・治安に持続的な負荷がかかる（Collier, 1999; Fearon & Laitin, 2003; Noy, 2021）。加えて、海面上昇や極端現象が臨界点を超えると不可逆の変化が連鎖し、被害分布はファットテール（fat tails, 確率分布の

裾が厚い形状）を帯びるため、企業・政府・国際社会は不確実性を前提にレジリエンスを底上げする戦略設計が不可欠である（IPCC, 2023; Weitzman, 2009）。

Ⅲ．評価基盤（不確実性・指標）

Ⅲ－１．不確実性と評価

気候変動、自然災害、環境汚染、紛争、感染症といったリスクは、価格に十分に反映されない損失を伴う典型的な負の外部性である。環境資源の有限性を強調するマテリアルバランス論や、それを発展させた持続可能成長モデル（Ayres & Kneese, 1969; Akao & Managi, 2007）は、この問題を理論的に裏付けてきた。こうした外部性の内部化には、炭素税や排出量取引といった制度が不可欠である（Coase, 1960; Bovenberg & de Mooij, 1994; Ellerman et al., 2010; Managi et al., 2013; IPCC, 2023; ADBI, 2024）。もっとも費用便益分析（cost-benefit analysis: CBA）の結論は大きく三点に依存する。第一に損害関数の仕様、第二に社会的割引率、第三に低確率かつ高被害のいわゆるファットテールをどのように扱うかである（Weitzman, 2009; Pindyck, 2013, 2017; Stern, 2007）。さらに、紛争や感染症、あるいはサプライチェーンを介して波及する越境的な影響は、単一国を対象としたCBAでは体系的に過小評価されやすい（Bazzi & Blattman, 2014; Eichenbaum et al., 2021; Guan et al., 2020）。

実務的には、非市場の便益や被害を貨幣化してCBAに組み込むことが行われる。具体的には、ヘドニック価格法、旅行費用法、支払意思額（Willingness to Pay: WTP）／受入意思額（Willingness to Accept: WTA）、さらには統計的生命価値といった手法により、健康や安全の価値を評価する（Palmquist et al., 1997; Chay

& Greenstone, 2005; Nordhaus, 2017）。同時に、損失回避や保有効果によるWTA>WTPの傾向や、リスク認知の歪みといった行動バイアスを踏まえ、情報提示やナッジ設計を組み合わせることも重要である（Plott & Zeiler, 2005; Morgan, 2014; Stiglitz, 2019）。また、前提条件の不確実性が大きい領域においては、広範なシナリオ設定や感度分析によって堅牢性を検証するとともに、国際協調や資金動員を明示的に前提に組み込むことが求められる（IPCC, 2023; Ellerman et al., 2010）。

Ⅲ－２．５つの分析カテゴリーと統合への道筋

本節では、（１）ショックの定義、（２）短期的波及、（３）一般均衡分析、（４）長期整合性、（５）統合的評価の５つを、リスク評価と政策分析の方法論的基盤として整理する。各カテゴリーは独立だが、結果の受け渡しを行うことで、GDP（フロー）とIWI（ストック）を一體的に評価できる。

（１）ショックの定義（シナリオ設計）

想定するショックの規模・期間・空間範囲と、需要ショックか供給ショックかの別を明確にするためのカテゴリーである。気候関連では、代表濃度経路（Representative Concentration Pathways: RCP）と共有社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways: SSP）を組み合わせたシナリオ分析が中核的枠組みとして用いられる（Fankhauser & Tol, 2005; O'Neill et al.,

2014; Riahi et al., 2017)。具体的事象の列挙や専門家エリシテーション (expert elicitation) を通じてショックを記述し、損害関数や復旧速度など不確実性の高いパラメータに確率分布を付与する (Morgan, 2014)。この段階で定まるショック記述は、後続の数量分析に渡す外生的入力として機能する。

(2) 短期的波及

ショック直後のボトルネックや代替可能性を把握するために、産業連関 (Input-Output: IO) 分析が用いられる。基礎は需要主導の数量モデルで、固定係数・比例生産を仮定する。もっとも、数量モデルは供給制約や価格調整を明示しないため、損失を過大評価しがちである。このため価格モデルを併用し、価格転嫁・在庫・代替の効果を取り込む (Hallegatte, 2008; Oosterhaven, 2017; Yagi & Managi, 2021, 2023)。地域間・国際間の波及には多地域 IO を用い、短期の生産・価格・雇用への影響を指標化する。

(3) 中期一般均衡

価格調整、家計・企業の代替行動、所得効果、貿易などの相互作用を整合的に記述するため、応用一般均衡 (Computable General Equilibrium: CGE) や動学確率的一般均衡 (Dynamic Stochastic General Equilibrium: DSGE) が用いられる。国際貿易・エネルギー連関の分析には GTAP-E 等の CGE が、短期動学や金融の役割を重視する場合には DSGE が選好される (Böhringer et al., 2012; Golosov et al., 2014)。中期の均衡価格・賃金・貿易量、余剰変化などが得られる。

(4) 長期整合性

超長期にわたる気候・エネルギー・土地利用の整合性の検討には、統合評価モデル (Integrated Assessment Model: IAM) が用いられる。DICE/RICE は最適炭素価格や排出削減経路の評価に、GCAM は技術進歩・エネルギーミックス・土地利用を含む包括的シナリ

オに適している (Nordhaus, 2017)。ここでいうバックストップ技術とは、化石燃料を全面的に置換し得る無炭素の最終代替 (例: 再生可能エネルギー、炭素回収貯留) を指す。IAM では、学習により逡減し得る一定の長期限界費用と十分な潜在供給量をもつ仮想技術として定式化し、炭素 (またはエネルギー) 価格が当該費用を上回ると置換が進行する仕様を採る。このため、バックストップ技術の導入可能性は、最適炭素価格や長期削減費用の推計に高い感度をもたらす (Tamaki et al., 2017)。長期の排出経路・損害コスト・炭素価格の時系列は、他のカテゴリと接続される。

(5) 統合的評価 (フローとストック)

最終段階では、フロー指標である GDP (名目・実質) と、ストック指標である IWI (各資本の純変化から合成) を同一の図表に並べて提示する。この統合的評価により、復旧投資などで一時的に GDP が上振れしても、豊かさの源泉である資本ストックの毀損が残るという、フローとストックの乖離を明確にできる (Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012)。

Ⅲ-3. 横断的手法: パラメータ推定・検証

各段階のパラメータ推定・検証には、横断的に実証・準実験を併用する。実験とは無作為割当により因果効果を直接識別する手法であり (Banerjee & Duflo, 2009)、準実験は外生的変動を利用して観察データから因果効果を推定する枠組みである (Angrist & Pischke, 2010)。計量経済学の代表的手法として、差の差分 (Difference-in-Differences: DiD; Callaway & Sant'Anna, 2021)、操作変数 (Instrumental Variables: IV; Imbens & Angrist, 1994)、回帰不連続デザイン (Regression discontinuity design: RDD; Lee & Lemieux, 2010) が広く用いられる。

Ⅲ-4. モデル別の限界と適用領域

本節では、主要な分析カテゴリの得意領域 (時間・空間・市場仮定・対象量) と限界を簡

潔に整理し、結果を接続する際の前提を明確にする。単一のモデルであらゆる現象を説明することはできない。したがって、各手法の守備範囲で得られた結果を、必要に応じて他の手法や勘定へ受け渡す設計が不可欠である。フロー（GDP）とストック（IWI）をつなぐことは重要だが、接続の問題はそれだけに還元できない多次元の課題である（表1）。

まずシナリオ設計（ショックの定義）では、規模・期間・空間範囲、需要／供給の区分、価格基準・割引率などを外生的に設定する。RCPとSSPの組合せ、事象の列挙、専門家エリシテーションなどを用いて、損害関数や復旧速度に確率分布を与える。

IOは、ショック直後から短期にかけての数量波及を可視化する点に強みがある。総産出や最終需要を基に、部門別・地域別のボトルネックを把握できる。一方で、技術係数が固定であるため、代替や価格調整、在庫や容量制約の表現が弱く、分析の射程は数四半期程度に限られる。

CGEは、中期における価格調整・代替・貿易を一貫して扱える。税制・規制・通商などの政策を比較静的的に評価するのに適している。ただし、基準年の設定（較正）や代替弾力性の仮定に対する感度が高く、完全市場の前提は分配や地域差の評価を歪める可能性がある。DSGEは、期待形成を伴う短中期のマクロ動学に強く、金融・財政ショックや政策ルールの評価に適している。一方で、人的資本・自然資本の蓄積を明示しないことが多く、大規模で非線形なショックやパラメータ識別の不確実性に脆弱である。

IAMは、数十年から世紀スパンの時間軸で、排出経路、炭素価格の系列、損害費用などを整合的に提示できる。局地的な空間不均一や極端現象の連鎖は取り込みが限定的である。一方で、割引率、損害関数、学習曲線、バックストップ技術の仮定に対して感度が高い。

ストック勘定（第IV章）は、資本量（S）と価格（P）を組み合わせた会計により、フロー

表1 モデル別の適用領域（時間、空間、市場仮定、評価対象）

モデル	時間	空間	市場仮定（均衡概念）	主な評価対象・出力
ショックの定義（シナリオ）	事前設計～全期間	分析対象に応じて（グリッド／自治体～国・多地域・地球）	均衡は扱わず外生設定：事象列挙、専門家エリシテーション、RCP×SSPの組合せ、損害関数・復旧速度の確率分布設定	ショックの規模・期間・空間範囲、需要／供給の別、確率分布、価格基準・割引率などの前提群（各モデルへの外生入力）
IO	直後～短期	部門／地域	固定係数、比例生産。基本は数量モデル	総産出（必要に応じ付加価値へ換算）、ボトルネック把握
CGE	中期	国／多地域	価格調整、代替、貿易	付加価値・余剰（厚生）、分配・価格の比較静学
DSGE	短中期	国マクロ	期待形成、名目硬直、金融摩擦	フロー（GDP・消費・投資）、政策ショックの動学応答
IAM	長期	地球／大地域	政策系列（排出経路・炭素価格等）	厚生フロー（消費）、費用・炭素価格系列
ストック勘定（IWI）	任意（年次等）	自治体／グリッド～国	ストック（S）×価格（P）による会計（配賦・価格基準の整合）	ストック（PC・HC・NC）、一人当たり・面積当たり指標
実証・準実験	局地～短中期	市区町村／グリッド／施設等	外生変動の因果識別（DiD／IV／RDD等）	因果効果（局所平均）：雇用・価格・環境質・健康ほか

（出所）筆者作成

では把握しにくい資本基盤の増減を統合的に示す。自治体やグリッドなどへの空間分解と相性がよい一方で、推定誤差、森林の市場価値と非市場価値／生態系サービスの二重計上、就業地と居住地、面積と人口といった配賦ルール、価格基準や割引率の整合が、継続的な検討課題となる。

実証・準実験 (DiD/IV/RDD) は、観測データを用いて局地的・短中期の因果効果を推定する点に強みがある。ただし、一般均衡のフィードバックや長期追跡については、別の手法による補完が必要となる。

評価の主な軸は次の四点である。第一に時間 (直後・短期・中期・長期)、第二に空間 (グリッ

ド、自治体、国内、多地域、地球規模)、第三に市場仮定 (数量固定か価格調整か、完全市場か不完備市場か)、第四に対象量 (総産出、付加価値、厚生、資本ストック) である。典型的な接続としては、IO で把握した短期の数量波及を CGE/DSGE に引き継いで価格や代替の調整を評価し、さらに IAM が与える排出・炭素価格・損害の系列を参照する。加えて、実証分析で得た環境・健康の因果効果は、ストック勘定における被害係数、回復パラメータ、代替弾力性などの較正值に反映させる。これらの接続は、第 IV 章の IWI の定義と会計規則で具体化する。

IV. 新国富指標 (IWI)

IV-1. IWI の構成

IWI は、PC・HC・NC を金額換算で統合し、TFP 変化・炭素ダメージ・資源価格などを調整項目として扱うストック指標である (Arrow et al., 2012; Managi & Kumar, 2018)。一人当たり IWI は世代間の厚生比較に有効で、復旧投資等で一時的にフローが上振れしても、長期厚生 of 低下を捉えられる。推計は、PC を恒久棚卸法、HC を Jorgenson-Fraumeni 型の教育・生涯所得アプローチ、NC を資源レントや SCC で評価するのが通例である。ただし HC については、データ包絡分析や確率的フロンティア分析によりシャドウプライス (影の価格) を推定して評価する手法も用いられる。

補完指標として、真の貯蓄率 (Genuine Savings) は国民貯蓄から自然・人的資本の減耗を控除して持続可能性を判定し、グリーン GDP は汚染・資源枯渇等を差し引く調整フローとして位置づく (Dasgupta, 2021; Song et al., 2019)。これらを併用することで Beyond GDP の評価軸を実装できる。

IV-2. データ源の整合性 (IWI 報告書)

IWI の公的推計は IWI 報告書として継続的に公表されている。UNEP 等の IWR (2012, 2014, 2018, 2023, 2024 特別版) と World Bank (2024) の CWON2024 は、更新範囲や焦点を部分的に変えながら国別・年次の IWI を提示しており、相互に補完して参照できる。IWR2012 および IWR2014 (UNU-IHDP & UNEP, 2012, 2014) は IWI 評価の枠組みと国際比較を提示した創刊期のレポートであり、IWR2018 (Managi & Kumar, 2018) は 1990~2014 年の国別時系列を整備、IWR2023 (UNEP, 2023; 先行資料 UNEP, 2022) および IWR2024 特別版 (UNESCO MGIEP, 2024) は最新の推計結果と分析的展開を示す。CWON2024 (World Bank, 2024) は IWR とは異なる推計手法に基づき、2020 年までの IWI データを収録している。

両者は定義と推計法が一部異なるため、同一年の水準比較には注意が必要である。第一に、PC については CWON2024 が都市用地を資産として計上するのに対し、IWR2018 では取り

扱いが異なる。第二に、HCについてはCWON2024が生涯労働所得の現在価値に基づく手法を採用する一方、IWR2018は教育・健康等を反映する評価アプローチを用いる。これらが総額差の主因である。

他方、NCについては、IWRが長期平均に基づくシャドープライス（固定）で評価するのに対し、CWONは各年の市場価格とコストから算出した単位レント（資源レント）を用いるため、原油価格などの年次ショックが推計値に反映されやすい。したがって後者の推計値は年次の価格変動に左右されやすく、ストック価値としての安定的な比較には注意を要する。なお、年次価格による評価は景気・資源価格サイクルに敏感で動学的点検に適する一方、平均価格による評価は長期のストック比較に適合する。

表2が示すとおり、日本のIWR2018による2014年のIWI（合計）は36,085十億ドル（実質2005年基準）で、PCが20,939十億ドル、HCが14,688十億ドル、NCが458十億ドルとPC比重が高い。CWON2024では2014年46,402十億ドル（実質2005年基準）、2020年47,305十億ドルと水準差は前述の都市用地計上とHCの推計法の違いに整合的で、NCの差は限定的である。参考と

してGDPは2014年5,068十億ドル、2020年5,227十億ドルと伸びが鈍く、フローの停滞とストックの横ばいが並行して観察される。

実務では、水準の国際比較は単一ソースに統一し、動向比較は各ソース内の成長率・構成比で評価するのが妥当である。例えば、長期系列・国際比較にIWR2018、直近水準の点検にCWON2024を主参照とし、必要に応じて（1）都市用地を除いた人工資本の補助比較、（2）一人当たりIWIとPC・HC・NC構成比による健全性チェックを併用する。

Ⅳ-3. IWIの小地域指標とインフラ評価への応用

（1）小地域IWIの設計

本節では、IWIを小地域で推計するための計算手順を、ストック要因（S）とシャドープライス要因（P）に分けて示す。表3は、各勘定（PC/HC/NC）についてS（量や質）とP（シャドープライス）、および接続に用いる代表指標の対応関係を整理した表である（馬奈木、2017；馬奈木ほか、2019）。ここで、Sは量（資産量・人口・面積・機能量など）、Pは価格（影響度・単価・割引・レンタル率など）を指し、IWIは $S \times P$ の骨格に沿って整理する。参照統

表2 日本のIWI：2014年・2020年（十億ドル、実質2005年基準）

区分	指標	2014年	順位	2020年	順位
IWR2018	IWI（合計、調整なし）	36,085	5位	—	—
	人工資本（PC）	20,939	2位	—	—
	人的資本（HC）	14,688	9位	—	—
	自然資本（NC）	458	29位	—	—
CWON2024	IWI（合計、国内のみ）	46,402	3位	47,305	3位
	PC（都市用地含む）	23,634	2位	25,296	2位
	HC	22,330	4位	21,631	4位
	NC（非再生+再生）	438	22位	378	24位
参考	年間GDP	5,068	3位	5,227	3位

（注） IWIについて、上段はIWR2018の2014年値（最新年）、下段はCWON2024の2014年値・2020年値を比較のために併記した。金額はすべて十億ドル（実質2005年基準）に統一。順位は各年の世界順位。

（出所） Managi & Kumar (2018), World Bank (2024), World Development Indicators より筆者作成

表3 IWI 計算の S×P 分解と参照統計 (小地域用)

対象	S:ストック要因	P:シャドウプライス要因	参照統計 (例・任意)
PC	実物資本ストック (初期資本を投資・減耗で蓄積)	基準価格 = 1 (必要なら品質補正係数)	県民総生産, 投資額
HC (教育)	教育年数 × 労働力 (就業者または労働年齢人口)	教育の限界生産性 (賃金プレミアム等)	卒業者数・在学者数, 県内雇用者数
HC (健康)	生存関数に基づく期待 (健康) 余命 × 人口	健康1年の限界生産性 (賃金ベース)	生命表の死亡数, 年齢階層別人口
NC:森林 (市場)	森林蓄積	立木のレンタル価格 (伐採益の純レンタル率)	森林蓄積, 木材生産価格
NC:森林 (非市場)	炭素吸収・大気浄化・保水等の機能量	サービス別単価 (炭素価格等)	現況森林面積, 生態系サービス単価
NC:農地	実効生産面積 (耕地面積 × 作物構成)	地代/レンタル率	作付面積, 農業産出額
NC:漁業	漁獲可能資源量 (資源量・沿岸利用)	漁場レンタル率 (利益率)	海面漁業の漁獲量, 海面養殖生産
調整項目:炭素ダメージ	CO ₂ 排出量	SCC	CO ₂ 排出量 (部門別)
調整項目:資源貿易	主要資源の純輸入量 (構成分)	レンタル率 (域外自然資本)	化石燃料・鉱物の純輸入額
裏づけ:環境質	※ S は付さない	※ P は付さない	大気:SPM・NO ₂ ・SO ₂ /水質:BOD・COD・大腸菌群/汚水処理人口普及率, 都市公園面積, 廃棄物の最終処分量

(注) 参照統計 (例・任意) の列は実装に必須ではなく, 都道府県レベルより小さい単位へ分解する場合は, 入手可能な代理指標に置き換えて推計する。

(出所) 馬奈木 (2017), 馬奈木ほか (2019) を参考に筆者作成

計 (例・任意) は, 統合データの主要項目のみを示す (必要に応じて都道府県統計を小地域に按分した推計値を含む)。なお, この列は実装に必須ではなく, 都道府県レベルより小さい単位 (市区町村・グリッド等) へ分解する場合は, 入手可能な代理指標に置き換えて推計する。

(2) グリッド化・不確実性・検証

政策評価の単位は主として市区町村などの行政区域である。しかし, インフラ投資の便益や生態系サービスの効果は地理的に連続しており, 行政区域の境界で不連続にはならない。このため, 市区町村勘定に加えて, 1 km や 250m グリッドでハザード・環境質・人口・資本を重ね合わせ, 行政×メッシュの二重スケールで

運用する。主たる課題は, (1) 価格・レンタル率の空間補間 (地価・賃金・収益性の空間勾配をどう入れるか), (2) 移動・通勤圏の帰属 (就業地配分と居住地配分の整合), (3) 二重計上 (森林の市場価値と非市場価値, 生態系サービスと自然資本ストック) の三点である。これらは, 行政区域とグリッドを結びつける変換表 (クロスウォーク表) と機能圏データ (通勤圏・医療圏) を用い, さらに価格基準・割引率・帰属ルールの仮定を振って感度分析を行うことで, 統計上の偏りを抑える。なお, 中国と日本を対象とする分析では, 分析単位を細かくするほど都市と農村, 沿岸と内陸の格差が明瞭化し, 国全体が改善していても小地域内に「富の減耗」エリアが残存しうることが示されている。

る (Zhang et al., 2021)。

(3) インフラ評価への応用：大気・水質の改善を資本勘定に反映

都市鉄道ネットワークの拡充は、交通手段の置き換え（モーダルシフト）と移動効率の向上を通じて、大気質（浮遊粒子状物質 [SPM], NO_2 ）を改善し得る。例えば東京圏では、鉄道ネットワークの拡充が約25年のスパンでSPMおよび NO_2 に統計的に有意な低下をもたらすことが報告されている (Yoo et al., 2025)。同様に、下水道網の整備・更新、処理場の高度化、工場・事業所排水規制の強化は、水質（生物化学的酸素要求量 [BOD], 化学的酸素要求量 [COD], 大腸菌群）を改善し得る。実証段階では、これらの事業着手・稼働を外生的な変化として扱い、グリッド単位で環境指標の変化を推定する。

次に、推定された改善量を健康便益（死亡・疾病の回避）や環境便益に換算し、HCとNCの増加として計上する（表3）。あわせて、ネットワーク／処理能力の質の向上はPCの質調整

分として加算する。最後に、グリッドで得た効果を市区町村勘定へ集計し、一人当たりIWIとして政策評価に反映する。これにより、GDPの一時的な押し上げとPC・HC・NCのストック変化を、同一の地理スケールで比較できる。

(4) 実装上の注意（再現性・統合）

第一に、式・係数・配賦ルールの透明化である。減価償却率、割引率、レンタル率、教育・健康の影響度の推定仕様、初期資本の推計式、配賦キー（就業・面積・資産密度など）は、別資料に明示しておく。

第二に、二重計上の点検を定例化する。森林の市場価値と非市場価値、生態系サービスと自然資本本体の扱いは、定義域を明確に分けて集計する。

第三に、欠測や外挿の処理を記録し、主要な仮定に対する感度の幅（上限・下限）を提示する。

これらにより、小地域でBeyond GDPを実装するための「方法、検証、応用」の一貫性を確保できる。

V. 評価枠組みの定義と適用

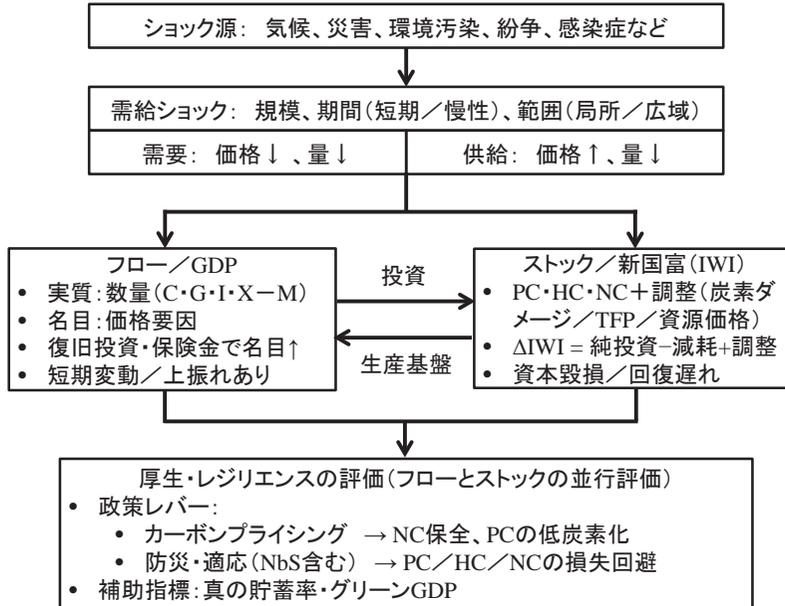
V-1. 「ショック-GDP-IWI」評価枠組み

本枠組み（図1）は、外生ショック（気候変動・自然災害・環境汚染・紛争・感染症）により生じる需要・供給ショックを起点に、価格・数量の調整を経て支出側GDP ($C \cdot G \cdot I \cdot X - M$) に表れる短期のフロー効果と、PC・HC・NCに蓄積される中長期のストック効果を、同一の評価枠組みで連結する (Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012; Managi & Kumar, 2018)。ショックの持続性と空間スケールに応じて、需要側・供給側のいずれにも衝撃が立ち上がり、 $C \cdot G \cdot I \cdot X - M$ の配分と価格水準に即時の変化が生じる一方、インフラ損傷・人的被害・生態系劣化等

としてPC・HC・NCのネット変化（毀損／再蓄積）が記録され、その結果、IWIの成長経路が変化する。したがって、厚生・レジリエンスの評価は、フロー（実質・名目）とストック（IWI）を並行して読み解くことを前提とする。

税制や補助、規制、開示など個別の手段を「政策レバー」、それらを目的別に束ねた設計を「政策パッケージ」と本稿では呼ぶが、政策レバーはフローとストックの二層に同時に作用する。カーボンプライシングは相対価格と投資配分を通じて $C \cdot I \cdot X - M$ を再配分しつつ、排出抑制によりNCの劣化速度を鈍化させ、低炭素資本の形成を通じてPCの質を高める。防災・適応

図1 「ショックーGDPー新国富指標 (IWI)」 評価枠組みの概念図



(出所) 筆者作成

投資はG・Iを通じて短期の需要と代替生産を下支えしながら、被害分布の裾を削りPC・HC・NCの期待損失を縮小する。保険・再保険は資金制約と時間選好の歪みを緩和し、復旧の弾力性を高める。サプライチェーン強靱化やガバナンス改革は、数量制約と価格スパイクの振幅を抑え、フローのボラティリティ低減とストックの劣化回避を同時に狙う(Dasgupta, 2021)。

実装上は、図1に示すとおり、(1)ショックの型と需給経路、(2)C・G・I・X-Mと価格の同時変化、(3)PC・HC・NCの純変化(ΔIWI)を統合的に図示し、名目・実質の乖離や「短期V字回復(ショックで急落して即回復すること)ー長期遅延」の非対称性を可視化する。評価指標は少なくとも ΔGDP と ΔIWI を併記し、フローの一時的押上げ(復旧投資・保険金)とストックの恒久的毀損を峻別することを要件とする。これにより、単一のフロー指標では捉えにくい厚生の経路と政策の同時最適化問題を、透明な形で提示できる。

V-2. 需給ショックと波及

本稿が対象とするショックは、需要起因(不況・制裁・風評等)と供給起因(災害・資源制約・感染症の供給側)に大別でき、紛争や感染症は両者が重なる混合型である。需要ショックでは価格低下が先行し、生産者余剰の縮小が前面化する。他方、供給ショックは数量制約と価格上昇を伴い、消費者余剰の毀損が大きい。混合型では需給双方が縮小し、価格と数量の振幅が増幅され、国際物流・決済の分断を通じて貿易収支に直接的な下押し圧力がかかる(Celbiş et al., 2023; Collier, 1999; Collier & Hoeffler, 2004; Eichenbaum et al., 2021; Guan et al., 2020; Raj et al., 2022)。同じ産出減でも価格の反応と余剰の失われ方が異なるため、ショックの性質に応じて、いずれを優先して緩和するかという政策順位は分岐する。

これらの一次的な需給ショックは、主要拠点の停止や代替経路の逼迫を介してサプライチェーン上を伝播し、遠隔地の生産・価格形成まで連鎖的に攪乱する(Hallegatte, 2008;

Okuyama & Rose, 2019; Cavallo et al., 2013; Craighead et al., 2007)。この過程で、復旧投資や保険金の流入により名目 GDP が一時的に押し上げられる一方、実質産出と社会的余剰は低下し、PC・HC・NCには不可逆的な損耗が残る。名目と実質の乖離、短期のV字回復と中長期の遅延、将来の財政負担と厚生損失の非対称性は、フロー指標のみでは把握しにくい。IWIや必要に応じて真の貯蓄率やグリーンGDPを補助指標として併置することで、PC・HC・NCの純変化を明示し、フロー上の「見かけの回復」とストック面の恒久的損失を峻別できる（Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012; Dasgupta, 2021; Managi & Kumar, 2018）。

事前のストック強化は、こうした二重の歪みを同時に緩和する効果を持つ。具体策として、在庫水準の確保、調達先の分散、重要拠点の冗長化、事業継続計画の実装、さらには環境・社会・ガバナンス（Environmental, Social, and Governance: ESG）に基づくサプライヤー管理の改善が挙げられる。これらの対策は、数量制約と価格スパイクの振幅を抑えることで、ショック時のフローの落ち込みとIWIの毀損を共に縮小させる（Chopra & Sodhi, 2004; Tang, 2006; Azadegan et al., 2020; Zsidisin et al., 2005; Ruiz-Benitez et al., 2018; Touriki et al., 2021; Xie et al., 2019; Klassen & Vachon, 2003）。この知見は、国際的なバリューチェーンに関する近年の研究とも整合的である。例えばBarrot & Sauvagnat（2016）は、局所的な工場の生産停止が、取引ネットワークを通じて遠隔地の生産を大きく減少させることを実証し、サプライチェーン分析の重要性を示した。

V-3. 東日本大震災（2011年）と阪神・淡路大震災（1995年）

東日本大震災は、発電・港湾・工場の停止と国際サプライチェーンの寸断を伴う典型的な供給ショックであった（表4）。支出側では、2010～2011年度の実質GDPが512兆円から515兆円と水準は微増する一方、成長率は

+3.3%から+0.5%へ急減（-2.8pt）、純輸出は+5兆円から-1兆円へ転落、輸出伸び率は+17.9%から-1.4%へ反転した。他方、復旧・代替需要により民間設備投資は74兆円から77兆円へ拡大した。もっとも、これは回復を意味しない。名目（当時価格）で評価した資本損失は、建物・ライフライン・社会基盤・農林水産の合計で16.9～25兆円に達し、人的資本では死者・行方不明22,325人に相当する損失が生じ、自然資本でも津波・放射性汚染による長期劣化が残存した（内閣府, 2011b, 2024; Okuyama & Rose, 2019; Managi & Guan, 2017; Carvalho et al., 2021; Yagi et al., 2020）。

図2に示すように、被災3県（岩手・宮城・福島）の実質GDP（2006年度=100）は、震災年度である2010年度（2011年3月発生）に93.4（全国96.6）まで低下したものの、その後急速に回復し、2013年度には基準年を上回る101.3（全国100.5）に達した。その後も全国平均を上回るペースでの推移を経て、2021年度には102.4と全国平均（102.6）にほぼ並んだ。しかし、その需要構成には歪みが見られる。2021年度時点で、民間消費（96.8）および政府支出（91.9）が基準年を下回る一方、固定資本形成は111.0と突出している。加えて、2011～2018年度には純移出（移出入）の赤字（-2.1～-3.0兆円）が継続した。このように、復興財政（2011～2025年度計約32.9兆円）に大きく依存したフロー面の回復は、将来への負担を残す構造である。

阪神・淡路大震災の事例（図3）においても同様の傾向が見られる。兵庫県の実質GDP（1990年度=100）は、被災年度である1994年度（1995年1月発生）に101.7と全国（103.2）を下回ったが、震災直後の復興需要で一時的に押し上げられた（1995年度108.1、1996年度110.7）。しかし、この成長は持続せず、2009年度には県内実質GDPが102.3に低迷し、全国（121.2）との経済格差はむしろ拡大した。

この経済停滞の背景には、死亡・行方不明者6,437人、建物の全半壊約25万棟という甚大な

表4 東日本大震災の分析例（2010年度と2011年度の比較）

	実質値（兆円） 2010年4月～3月	実質値（兆円） 2011年4月～3月	前年比成長率 2010年度	前年比成長率 2011年度	成長率の差分 （ポイント）
実質 GDP	512	515	3.3%	0.5%	-2.8
民間最終消費支出（C）	290	292	1.3%	0.6%	-0.7
民間住宅（I）	18	19	4.8%	4.4%	-0.4
民間企業設備（I）	74	77	2.0%	4.0%	+2.0
民間在庫変動（I）	1	2	—	—	—
政府最終消費支出（G）	98	100	2.3%	1.9%	-0.4
公的固定資本形成（I）	26	26	-7.2%	-2.2%	+5.0
公的在庫変動（I）	-0.07	0.006	—	—	—
純輸出（X - M）	5	-1	—	—	—
輸出（X）	84	83	17.9%	-1.4%	-19.3
輸入（M）	79	83	12.1%	5.2%	-6.9
新国富指標（IWI）					
人工資本（PC）	約 16.9～25 兆円（名目換算）の毀損。出典：内閣府（2011b）				
人的資本（HC）	約 8,900 億円（実質額，死者・行方不明者数 22,325 人の換算）。出典：内閣府（2024），Managi and Kumar（2018）				
自然資本（NC）	不明だが相対的に小さい。農地（塩害・土壌汚染），漁業施設（漁港・養殖設備），放射性物質の影響（福島周辺）など。				

（注） 本表は，東日本大震災（2010年度=2011年3月発生）の影響を「ショック-GDP-IWI」評価枠組みで示した例である。2010年度未発生のため2010年度への影響は限定的だが，2011年度実質 GDP 成長率は前年比で-2.8ポイント，特に輸出（X）は-19.3ポイントと大幅に落ち込んだ。GDP 統計では PC・HC・NC の損失を十分捉えられず，IWI の視点が重要となる。
 （出所） 実質 GDP は内閣府「国民経済計算（GDP 統計）・年次 GDP 実額」を用い，被害推計等は内閣府（2011b，2024），Managi & Kumar（2018）より筆者作成

被害によって，県内の PC と HC が永続的な損害を受けたことがある（Yagi et al., 2020）。事実，GDP 構成を見ると，2009年度の兵庫県では政府支出（G）が157.8へと増加した一方，GDP 成長の鍵となる固定資本形成（I）は1997年度の132.3をピークに68.7へと大幅に減少した。このように，資本ストックの毀損が県内投資の長期的な落ち込みを招き，経済全体の停滞に繋がったと考えられる。

これら両事例が示すように，復旧投資や保険金の流入で GDP が一時的に上振れても，それが真の厚生やレジリエンスの回復を意味するわけではない。これは，経済活動のフローを示す GDP が V 字回復しても，豊かさの源泉である資本ストックの回復は大きく遅れるためである。このフローとストックの乖離を正確に捉えるには，GDP（C・G・I・X-M）の変化と，PC・HC・NC から成る IWI の変化を併せて分

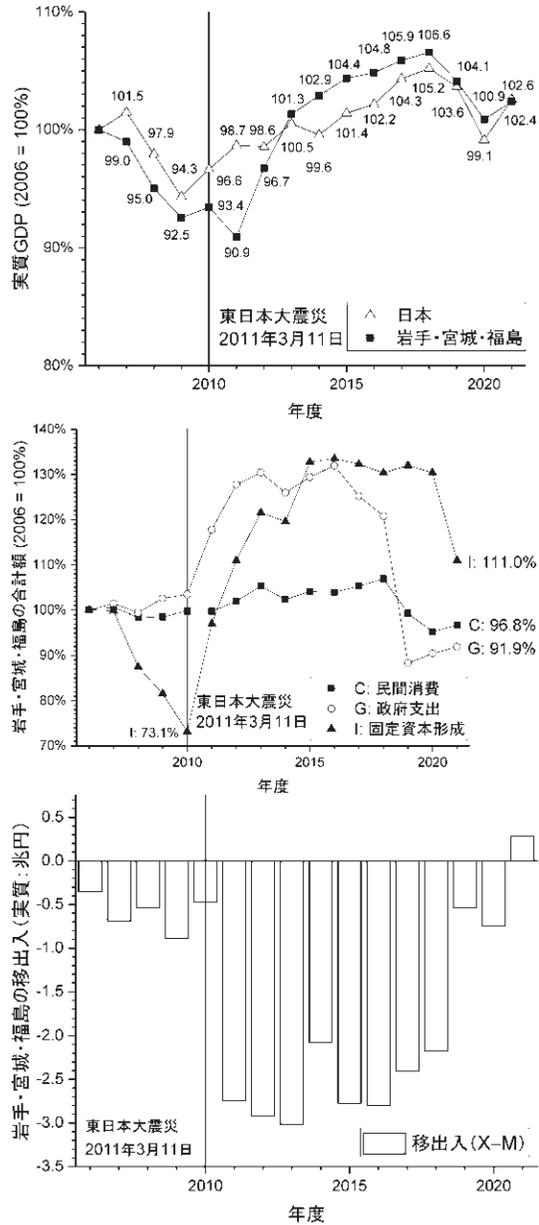
析する必要がある。

V-4. 段階別設計

本節は，これまでの分析を本枠組みに沿って五つの段階に並べ，各段階の役割と入出力の関係を簡潔に示す。

まず，シナリオとショックの定義では，規模・期間・空間範囲，需要か供給かの別を定め，RCP と SSP の組合せなどで不確実性を記述し，ここで得た量を以後の数量分析の外生入力とする。次に，短期の波及では，IO（数量モデルと価格モデル）を用いて，ショック直後のボトルネックや代替可能性を把握し，生産・価格・雇用などの短期指標を得る。続いて，中期の一般均衡では，CGE や DSGE により，価格調整，家計・企業の代替行動，所得効果，貿易を整合的に同時決定し，均衡価格や賃金，貿易量，余剰の変化を出力する。さらに，長期の整

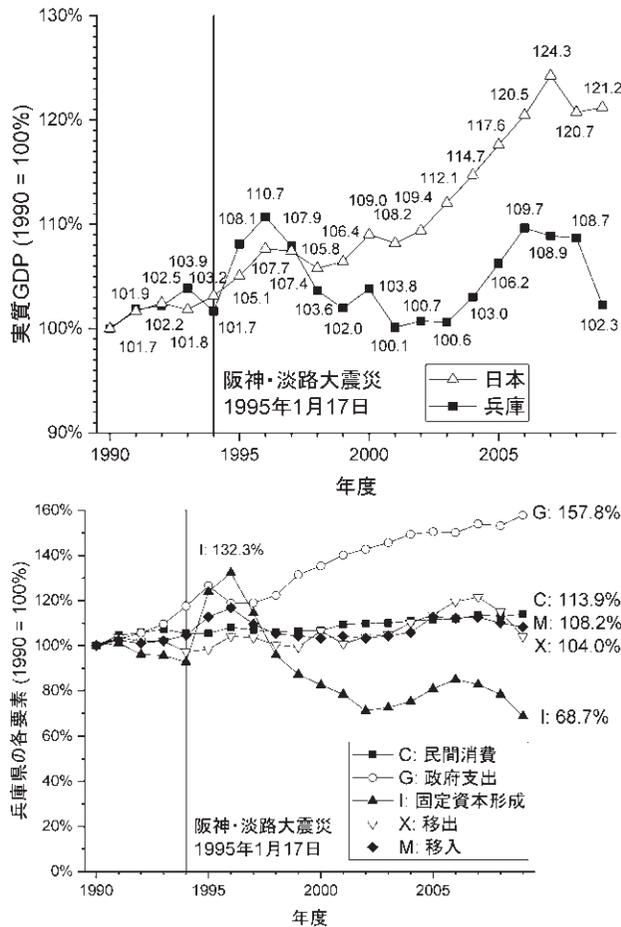
図2 東日本大震災（2010年度＝2011年3月発生）における岩手・宮城・福島の実質GDP（2006～2021年度）



(注) 日本と3県の実質GDP（2006年度＝100%）、民間消費・政府支出・固定資本形成の推移、および移出入（X-M）の変動をそれぞれ示す。基準年の2006年度に日本の実質GDPは522兆円、3県合計は20兆円（シェア3.8%）。

(出所) 内閣府「県民経済計算」より筆者作成。2006～2018年度は2008SNA（平成23年基準）、2019～2021年度は2008SNA（平成27年基準）を用い、2018年度の実質GDP比率を掛けて接続した。

図3 阪神大震災（1994年度＝1995年1月発生）における兵庫県の実質GDP（1990～2009年度）



(注) 日本と兵庫県の実質GDP（1990年度＝100%），ならびに兵庫県の民間消費・政府支出・固定資本形成・移出・移入の推移を示す。基準年の1990年度に日本の実質GDPは464兆円，兵庫県は20兆円（シェア4.2%）。

(出所) 兵庫県「県民経済計算長期時系列データ」（平成12年基準長期時系列・1993SNA）より筆者作成

合では，IAMを用いて，気候・エネルギー・土地利用の整合を検討し，排出経路，損害コスト，炭素価格といった長期系列を得る。最後に，統合的評価として，GDPとIWI（各資本の純変化）を同一の図表に並べ，フローとストックの乖離を可視化する。

これらの段階は，前段の出力を次段の入力として受け渡すことで接続され，全体を通じて単

位系・価格基準・割引率を整合させ，必要に応じて感度分析を付す。例として，短期のIOの結果はCGEに，長期の炭素価格や損害の系列はIWIの調整項目に用いる。

V-5. 評価枠組みの運用指針

本枠組みを運用するにあたっては，各モデルの限界を認識しつつ，結果を頑健なものとする

ための実践的な指針が必要である。

第一に、分析の透明性と不確実性への対処である。前提条件は明確に記述することが求められ、とりわけシナリオ設定（RCP × SSP など）は明示する必要がある。IAM の推計結果は、割引率や高温域における損害関数の仕様に強く依存し、実証データが乏しい領域では被害を過小評価するリスクがある（Weitzman, 2009; Pindyck, 2013）。したがって、こうした重要パラメータを単一の値に固定せず、広範な感度分析を行い、結果が変動しうる範囲を示すことが不可欠である。

第二に、モデルの段階的かつ複合的な活用が求められる。単一のモデルで全ての経済現象を評価することはできないため、それぞれの長所を組み合わせる必要がある。例えば、IO 分析は供給ショックを需要減少として処理しやすく、被害を構造的に過小評価するリスクがある。このため、価格モデルを併用して価格転嫁効果を織り込み、在庫や代替といった調整行動を取り込むことが望ましい（Hallegatte, 2008; Oosterhaven, 2017; Yagi & Managi, 2021, 2023）。短期的な供

給寸断は IO で一次評価し、価格調整を含むマクロ経済への影響は CGE で分析し、さらに長期的な政策評価は IAM で検証する、といった複合的なアプローチが有効である。

第三に、フローとストックの統合的評価と因果関係の明示が必要である。本分析の核心は、GDP の一時的な V 字回復と、資本ストック（IWI）の回復の遅れとの乖離を正確に捉える点にある。このため、分析結果は常にフロー指標とストック指標を同一の図表に併置し、短期の経済活動の持ち直しと長期的な資産基盤の回復状況を同時に示さなければならない。また、政策評価に際しては、その政策が GDP 構成要素（ $C \cdot G \cdot I \cdot X - M$ ）のどの経路に作用し、最終的に $PC \cdot HC \cdot NC$ の量や質をどのように変化させるか、因果の連鎖を明確に記述する必要がある。複数のリスクが重なる状況では、異なる手法から得られた結果を比較し、多角的に検討するトライアングレーション（三角測量）によって結論の頑健性を担保することが望ましい（Weyant, 2017）。

VI. 政策設計とガバナンス

VI-1. カーボンプライシングと技術

本章では、前章の評価枠組みに基づき、フロー（GDP）とストック（ $PC \cdot HC \cdot NC$ ）を一貫して評価し、社会的厚生 of 改善に資する実践的な政策介入を整理する。評価は、支出側 GDP（ $C \cdot G \cdot I \cdot X - M$ ）の変化と $PC \cdot HC \cdot NC$ の純変化を常に併せて分析する。本稿では、カーボンプライシング（炭素税・排出量取引等）を総称とし、税収の用途や還元設計の議論では炭素税を念頭に置く。

(1) カーボンプライシングのマクロ経済・国富への影響

IPCC 等の分析によれば、100～200ドル/tCO₂ 級の炭素価格が中期的な実質 GDP に与える影響は概ね±1%の範囲に収まり、長期的には気候変動による被害の回避便益がコストを上回るとされる（IPCC, 2023）。また、実証研究では、カーボンプライシングの表示効果（salience）が消費者行動に影響し、政策の受容性や実効性に差が生じることも確認されている（Rivers & Schaufele, 2015）。IWI の視点からは、カーボンプライシングは NC の劣化を抑制すると同時に、省エネ・再エネ投資等を誘発

してPCの質を向上させる効果を持つ。

(2) 技術政策との連携

カーボンプライシングの価格シグナルに研究開発や導入支援といった技術政策を組み合わせることで、短期的な経済への負の影響を緩和しつつ、長期的なストック成長を促すことができる。特に、環境政策がイノベーションをクリーン技術へ誘導する相互作用については多くの研究が存在する (Acemoglu et al., 2012; Oikawa & Managi, 2015)。技術の学習効果を考慮すれば、このような政策パッケージは不可欠である。

(3) 制度設計上の要点

政策の有効性は制度設計に大きく依存する (Akao & Managi, 2013; Newell et al., 2013)。炭素リーケージを抑制する国境炭素調整措置 (Carbon Border Adjustment Mechanism) や、国内排出量取引制度における厳格なモニタリング・報告・検証と排出枠配分の設計がその中核である (Ellerman et al., 2010; Böhringer et al., 2012)。日本では、2023年4月に運用を開始したGX-ETSの本格運用を見据えた詳細設計が急務である (ADBI, 2024)。

(4) 税収の中立的還元

炭素税等の税収の用途は政策全体の効率性を左右する。税収は、(1) 低所得者層への補填 (逆進性の緩和) と、(2) 法人税・所得税など歪みのある既存税の引き下げに充てられうる。後者は、環境改善 (第一の配当) に加えて経済効率性の改善 (第二の配当) をもたらし得る、いわゆる二重の配当 (double dividend) の文脈で議論される。既存税制との整合を図り、経済全体の効率性損失を最小化する設計が求められる (Bovenberg & de Mooij, 1994; Goulder, 1998; Stiglitz, 2019)。

VI-2. 防災・適応投資

適応策の有効性については、農業慣行の転換や都市インフラの改善など多様な取り組みが、

費用便益比の観点から高い効果を持つことが報告されている (Challinor et al., 2018; Nozawa et al., 2018)。特に途上国の地域研究では、灌漑や農業技術の改善がレジリエンスを強化し、長期的な自然資本と人的資本の保全につながることを確認されている。堤防、耐震、早期警戒といった事前投資の平均的費用便益比は4~10倍に達し、国連事務総長も気候レジリエントなインフラの費用便益比を「6対1」と言及している。

IWIの観点では、インフラ延命と復旧費削減によるPCの保全、死傷・疾病・避難回避によるHCの保全、さらに湿地やマングローブ、都市緑化など自然を活用した解決策 (Nature-based Solutions: NbS) によるNCの増加が同時に実現される (Dasgupta, 2021; Managi & Guan, 2017; Tamaki et al., 2017)。資金面では、災害債 (Cat Bond) や再保険による即時資金の確保が有効であり、トリガー設計や自己負担を組み込むことでモラルハザードを抑制する制度設計が不可欠である (Coval et al., 2009; Noy & Nualsri, 2011; Freddi et al., 2021)。

VI-3. 小地域 IWI による優先地域の選定と資源配分

小地域 IWI (市区町村やグリッドといった細かな単位) は、GDPの短期変動では見えにくい資本基盤の偏在や脆弱性を可視化し、政策資源の配分を実質的に改善できる (表3)。PC, HC, NCについて、一人当たりと面積当たりの水準および増減を併記し、脆弱地域の特定、インフラ投資の優先順位付け、保全・適応の重点化に用いる。施策の影響範囲が市区町村の境界と一致しない場合は、まずグリッドで推計した値を、行政区域とグリッドの対応表 (クロスウォーク) で自治体勘定に集計する。その際、価格基準、割引率、配賦ルール (二重計上を避ける基準を含む) を明示する。空間単位を細かくするほど地域内の格差や「富の減耗」エリアが鮮明になることは、既存研究が示している (Zhang et al., 2021)。

インフラ評価では、鉄道ネットワークの拡充のような外生的なネットワーク変化が大気質の改善につながり得ることが報告されている（Yoo et al., 2025）。この実証結果を、NC（環境質の改善）とHC（回避される死亡・疾病）の増加として計上し、あわせて移動効率の向上をPCの質向上として反映する。政策の手段から資本勘定、最終的にIWIへと一貫してつなぐことで、効果を統一的に提示できる。運用面では、GDPとIWIの増減（ Δ ）を同じ地理スケールで並べ、重要業績評価指標として一人当たり Δ IWIと面積当たり Δ IWIを用いる。これにより、短期の景気刺激と長期の資本形成を同時に管理し、世代間および地域間の衡平性を定量的に示すことができる（馬奈木, 2017；馬奈木ほか, 2019）。

VI-4. 環境規制と企業の情報開示

環境規制は、適切な設計と補完策の下で技術更新を促進し得る一方、監視や移行支援を欠くとリーケージや地域ブランドの毀損を招く。したがって、厳格な基準に加え、対象補助、規制遵守の可視化、被害地域の転換支援を組み合わせる必要がある（Porter & van der Linde, 1995; Jaffe et al., 1995; Chay & Greenstone, 2005; Freire-González, 2018; Kellenberg & Mobarak, 2011）。情報開示では、国際サステナビリティ基準審議会（ISSB）の国際財務報告基準（IFRS）S1/S2が気候関連財務情報開示タスクフォースを実装段階に引き上げ、短期・中期・長期の気候リスクと機会を財務情報と同等に扱う枠組みが整えられた（IFRS Foundation, 2023）。こうした開示をESGと連動したサプライチェーン強靱化（在庫や拠点の分散、重要部材の代替確保、

スコープ3排出の管理）と組み合わせることで、フローの変動を抑制しつつIWIの毀損回避を同時に狙うことができる（Xie et al., 2019; Klassen & Vachon, 2003）。

VI-5. 国際ガバナンスと金融安定

越境性の高いリスクに対しては、パリ協定下での国が決定する貢献（Nationally Determined Contributions）の高度化、「損失と損害」の制度化、公正な移行（Just Transition）を軸とする資金・技術動員が不可欠である（IPCC, 2023; Stiglitz, 2019）。国内では、気候・災害・移行リスクが金融に及ぶ経路を把握し、ストレステストやシナリオ分析、ポートフォリオのエクスポージャー（曝露）額の定量化を通じてマクロ・ブルーデンスを強化することが求められる（Noy, 2021; Freddi et al., 2021）。これにより、信用収縮や投資停滞を抑制し、消費（C）や投資（I）の落ち込み、さらにはPC・HC・NCへの二次的損傷を小さくできる。

VI-6. 評価の最小要件

本章の政策評価に関する最小要件は次の一点に収めらる。すなわち、評価は常に名目・実質GDPと Δ IWI（PC・HC・NCの純変化）を併置し、復旧投資や保険金による名目の上振れを厚生回復と混同しないことである。短期の影響は価格調整を伴うIOで補正し、中長期の整合性はCGE・DSGE・IAMで検証・補完する（Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012; Oosterhaven, 2017）。割引率や高温域損害、壊滅的リスクの扱いは感度分析で明示する（Pindyck, 2013, 2017; Weitzman, 2009）。具体的な測定・可視化の技術仕様は第VII-4節を参照されたい。

VII. 研究課題と実装基盤

本章では、本稿の枠組みを恒常的に運用する

ために必要な研究課題と実装要件を、データ、

モデル、不確実性、配分の四つの観点から整理する。

Ⅶ-1. データの整備と統合

まず、地域別 IWI (=PC・HC・NC) の時系列整備が出发点となる。国民経済計算や資本ストック統計を基盤とし、PC は恒久棚卸法で接続し、HC は教育・健康に関する縦断データで補正する。NC は炭素吸収や沿岸防災機能などを高解像度で推計し、リモートセンシングとの統合により更新する。

次に、災害、環境汚染、感染症によるサプライチェーン寸断を高頻度で観測する必要がある。衛星由来の活動指標や輸送・物流・モビリティに関する民間データを企業間取引ネットワークと照合し、IO・貿易統計と統合する。

さらに、複数ハザードの同時・連鎖発生を一元的に記録する複合ハザード・レジストリの整備が不可欠である。既存の EM-DAT などを補完し、発生時刻・場所 (ハザード)、被災範囲 (曝露)、インフラ停止・人的/物的被害・価格変動 (影響指標)、政策介入 (対応) を共通メタデータで紐づける必要がある (Delforge et al., 2023)。これらのイベントデータを基にリスク (損失可能性) を随時更新する。いずれも、版管理・再現可能性・秘匿性を前提に、学術・行政・民間の相互運用を担保することが求められる。

Ⅶ-2. モデル連携とスケール接続

マクロ (CGE/DSGE・IAM) とミクロ (IO・価格モデル・企業レベル) のスケール差を埋めるには、中間層 (メゾ) モデルの開発が必要である。短期には価格調整を伴う IO 拡張で局所的な供給制約と価格上昇を捉え (Oosterhaven, 2017; Okuyama & Rose, 2019; Yagi & Managi, 2021, 2023)、中期以降は CGE により代替、所得、貿易を同時決定して GDP 構成要素 (C・G・I・X-M) に反映させる (Böhringer et al., 2012)。長期的な政策整合性は IAM (DICE/RICE/FUND/PAGE/GCAM) で検証し、炭素ダメージ、資源レント、TFP の調整項目として IWI 会計に

落とし込む (Arrow et al., 2012; Managi & Kumar, 2018; Dasgupta, 2021)。主体間の相互作用や行動の異質性はエージェント・ベース・モデル (Agent Based Model: ABM) と CGE/IO を結合することで補い、ボトルネックや連鎖停止を顕在化させる (Farmer & Foley, 2009)。

不確実性の扱いも重要である。ベイズ的統合として、階層ベイズにより各モデルのパラメータを部分プーリングし、モデル横断で整合的な事前分布を設定する。シナリオは RCP × SSP を基盤とし、列挙法や専門家エリシテーションを重ねて極端現象を含む分布を維持する (Fankhauser & Tol, 2005; Morgan, 2014)。割引率、高温域の損害、壊滅的リスクの扱いは結果を大きく左右するため、感度分析を含む不確実性空間の全面開示と、モンテカルロ法による堅牢性 (ロバスト性) の比較を標準化する必要がある (Weitzman, 2009; Pindyck, 2013, 2017; Weyant, 2017)。

Ⅶ-3. 不確実性の標準化

気候や災害の不可逆性およびファットテールを前提に、最適解のみならずセーフティ・マージン (安全余裕) を含む運用域を提示することが重要である (Weitzman, 2009; Stern, 2008)。配分面では、世代間・地域間の厚生を一人当たり IWI や真の貯蓄率で補足し、費用便益分析における分配ウェイトや非限界変化の扱いを明示する (Arrow et al., 2012; Dasgupta, 2021; Stiglitz, 2019)。政策は外生的に与えられるのではなく、炭素価格、防災投資、金融規制、国際協調を組み合わせた内生的最適化、あるいはロバスト制御の枠組みで評価すべきである。

Ⅶ-4. 測定・可視化の最小要件

本節は、第 VI 章で示した政策評価の原則を、実装レベルの技術仕様に落とし込むものである。

(1) 短期の被害推計は IO と価格モデルを組み合わせて名目と実質の乖離を補正し、(2) 長期の整合性は CGE・DSGE・IAM で検証する。そのうえで、(3) 報告は常に名目・実質 GDP

と ΔIWI （PC・HC・NCの純変化）を同一図表に併置し、復旧投資や保険金によるフローの一時的な上振れを厚生回復と混同しないようにする（Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012;

Dasgupta, 2021）。政策パッケージは、この仕様に沿って比較されるべきであり、過大評価や過小評価を防ぐための最小限の基準となる。

VIII. 結論

本稿は、気候変動・自然災害・環境汚染・紛争・感染症などのリスクを、ショックからGDP（フロー）を経て、IWI（PC・HC・NCの各資本のストック）に至る経路として整理する評価枠組みを提示した。従来のGDP偏重は、復旧投資や価格上昇による一時的なGDPの上振れを厚生回復と取り違えるおそれがある。本稿の枠組みは、資本ストックの不可逆的な毀損を可視化することで、短期のV字回復と長期の厚生停滞との乖離を明確に示した。

政策的含意として、カーボンプライシングや防災・適応投資（NbSを含む）、サプライチェーンの強靱化、企業の情報開示、国際ガバナンスは、GDPの一時効果にとどまらずIWIを押し上げ得る。政策効果の提示は、 ΔGDP と ΔIWI の並行評価を最低要件とする。短期はIOの価格モデルを用いて名目と実質の乖離に配慮し、長期はCGE・DSGE・IAMにより割引率、高温地域の損害、壊滅的リスクの扱いを明示することが望ましい。

現状の課題として、地域別IWIの時系列整備、サプライチェーン寸断の高頻度データ、自然資本の地理的リスク指標、人的資本の長期追

跡、複合ハザードを記録するレジストリが未整備である。計量分析とIO・CGE・DSGE・IAM・ABMのスケール統合、パラメータの共通確率分布化、政策の内生的最適化も途上にある。不確実性については、割引率・損害関数・連鎖的ショックの表現に起因する推計幅が依然大きく、幅広いシナリオと専門家エリシテーションに加え、ベイズ的統合（階層モデル等）による推定手順の標準化が必要である。

今後は、データ基盤とモデル連携を前進させ、極端現象や裾の厚いリスクを含むシナリオで検証を重ねることで、短期のフロー安定化と長期のストック蓄積を両立する政策設計が可能になる。Beyond GDPの観点では、GDP（フロー）とIWI（ストック）を併読する二指標体制が妥当であり（Stiglitz et al., 2009; Arrow et al., 2012; Managi & Kumar, 2018）、小地域IWIを用いた優先地域の選定によって、脆弱地域の特定、投資の優先順位付け、世代間・地域間の衡平性の点検を実務に実装できる。今後は、 ΔGDP と ΔIWI （1人当たり・面積当たりを含む）を同一の地理スケールで定例的に併記し、価格基準・配賦・割引率の前提とその感度幅を明示する運用へ移行すべきである。

参 考 文 献

内閣府（2011a）「平成23年度の経済動向について（内閣府年次試算）（平成23年8月12日）」<<https://www5.cao.go.jp/keizai1/mitoshi/2011/h230812shisan.pdf>>（accessed

January 19, 2025）

内閣府（2011b）「東日本大震災における被害額の推計について（平成23年6月24日）」<<https://www.bousai.go.jp/2011daishinsai/pdf/110624->

- lkisya.pdf> (accessed January 19, 2025)
- 内閣府 (2024) 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) について (令和 6 年 3 月 8 日)」 <https://www.bousai.go.jp/2011_daishinsai/pdf/torimatome_20240308.pdf> (accessed January 19, 2025)
- 復興庁 (2024) 「復興の枠組みについて (令和 6 年 4 月 30 日)」 <https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat7/sub-cat7-2/20240430_03_shiryo03-01.pdf> (accessed January 19, 2025)
- 馬奈木俊介 (編著) (2017) 「豊かさの価値評価—新国富指標の構築」中央経済社
- 馬奈木俊介, 中村寛樹, 松永千晶 (2019) 「持続可能なまちづくり—データで見る豊かさ」中央経済社
- ADB (2024), “Carbon Pricing for Green Transition (No. 2024-7 (May))”. Asian Development Bank Institute. pp. 1-7.
- Akao, K.-I., & Managi, S. (2007), “Feasibility and optimality of sustainable growth under materials balance”. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 31(12), pp. 3778-3790.
- Akao, K.-I., & Managi, S. (2013), “A tradable permit system in an intertemporal economy”. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 55(3), pp. 309-336.
- Angrist, J.D., & Pischke, J.S. (2010), “The credibility revolution in empirical economics: How better research design is taking the Con out of Econometrics”. *The Journal of Economic Perspectives: A Journal of the American Economic Association*, Vol. 24(2), pp. 3-30.
- Arrow, K.J., Dasgupta, P., Goulder, L.H., Mumford, K.J., & Oleson, K. (2012), “Sustainability and the measurement of wealth”. *Environment and Development Economics*, Vol. 17 No. 3, pp. 317-353.
- Ayres, R.U., & Kneese, A.V. (1969), “Production, Consumption, and Externalities”. *American Economic Review*, Vol. 59(3), pp. 282-297.
- Azadegan, A., Mellat Parast, M., Lucianetti, L., Nishant, R., & Blackhurst, J. (2020), “Supply chain disruptions and business continuity: An empirical assessment”. *Decision Sciences*, Vol. 51 No. 1, pp. 38-73.
- Banerjee, A.V., & Duflo, E. (2009), “The experimental approach to development economics”. *Annual Review of Economics*, Vol. 1(1), pp. 151-178.
- Bazzi, S., & Blattman, C. (2014), “Economic shocks and conflict: Evidence from commodity prices”. *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 6 No. 4, pp. 1-38.
- Blattman, C., & Miguel, E. (2010), “Civil war”. *Journal of Economic Literature*, Vol. 48 No. 1, pp. 3-57.
- Bosetti, V., Carraro, C., Massetti, E., & Tavoni, M. (2008), “International energy R&D spillovers and the economics of greenhouse gas atmospheric stabilization”. *Energy Economics*, Vol. 30 No. 6, pp. 2912-2929.
- Botzen, W., Deschenes, O., & Sanders, M. (2019), “The economic impacts of natural disasters: A review of models and empirical studies”. *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 13, pp. 167-188.
- Bovenberg, A., & de Mooij, R. (1994). “Environmental Levies and Distortionary Taxation”. *American Economic Review*, Vol. 84(4), pp. 1085-1089. <https://www.jstor.org/stable/2118046>
- Böhringer, C., Balistreri, E.J., & Rutherford, T.F. (2012), “The role of border carbon adjustment in unilateral climate policy: Overview of an Energy Modeling Forum study (EMF 29).” *Energy Economics*, Vol. 34 No. S2, pp. S97-S110.
- Burke, M., Hsiang, S.M., & Miguel, E. (2015), “Global non-linear effect of temperature on

- economic production”. *Nature*, Vol. 527 No. 7577, pp. 235-239.
- Carleton, T.A., & Hsiang, S.M. (2016), “Social and economic impacts of climate”. *Science*, Vol. 353 No. 6304, aad9837.
- Carvalho, V.M., Nirei, M., Saito, Y.U., & Tahbaz-Salehi, A. (2021), “Supply chain disruptions: Evidence from the Great East Japan Earthquake”. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 136 No. 2, pp. 1255-1321.
- Cavallo, E., Galiani, S., Noy, I., & Pantano, J. (2013), “Catastrophic natural disasters and economic growth”. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 95 No. 5, pp. 1549-1561.
- Cavallo, E., & Noy, I. (2011), “Natural disasters and the economy — a survey”. *International Review of Environmental and Resource Economics*, Vol. 5 No. 1, pp. 63-102.
- Callaway, B., & Sant’Anna, P.H.C. (2021), “Difference-in-Differences with multiple time periods”. *Journal of Econometrics*, Vol. 225 (2), pp. 200-230.
- Celbiş, M.G., Kourtit, K., & Nijkamp, P. (eds.) (2023), “Pandemic and the city,” Springer International Publishing.
- Chay, K.Y., & Greenstone, M. (2005), “Does air quality matter? Evidence from the housing market”. *Journal of Political Economy*, Vol. 113 No. 2, pp. 376-424.
- Chen, S., & Managi, S. (2024), “Tracing the evolution of natural capital in global sustainability metrics: the advance of inclusive wealth”. *Sustainability Science*. doi:10.1007/s11625-024-01600-8
- Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., Zeller, D., & Pauly, D. (2010), “Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change: CLIMATE CHANGE IMPACTS ON CATCH POTENTIAL”. *Global Change Biology*, Vol. 16 No. 1, pp. 24-35.
- Chopra, S., & Sodhi, M.S. (2004), “Managing Risk To Avoid Supply-Chain Breakdown”. *MIT Sloan Management Review*, Vol. 46 No. 1, pp. 53-61.
- Coase, R.H. (1960), “The Problem of Social Cost”. *Journal of Law and Economics*, Vol. 3, pp. 1-44.
- Collier, P. (1999), “On the economic consequences of civil war”. *Oxford Economic Papers*, Vol. 51 No. 1, pp. 168-183.
- Collier, P., & Hoeffler, A. (2004), “Greed and grievance in civil war”. *Oxford Economic Papers*, Vol. 56 No. 4, pp. 563-595.
- Coval, J.D., Jurek, J.W., & Stafford, E. (2009), “Economic catastrophe bonds”. *American Economic Review*, Vol. 99 No. 3, pp. 628-666.
- Craighead, C.W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M.J., & Handfield, R.B. (2007), “The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities”. *Decision Sciences*, Vol. 38 No. 1, pp. 131-156.
- Dasgupta, P. (2021), “The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review”. HM Treasury, UK.
- Dasgupta, P., Anantha Duraiappah, A., Managi, S., Barbier, E.B., Collins, R., Fraumeni, B., Gundimeda, H., Liu, G., & Mumford, K. (2015), “How to measure sustainable progress”. *Science*, Vol. 350 No. 6262, pp. 748-748.
- Delforge, D., Wathelet, V., Below, R., Sofia, C.L., Tonnelier, M., van Loenhout, J., & Speybroeck, N. (2023), “EM-DAT: The Emergency Events Database”. In *Research Square*.
- Dell, M., Jones, B.F., & Olken, B.A. (2012), “Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century”. *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 4 No. 3, pp. 66-95.
- Edmonds, J., Wise, M., & MacCracken, C. (1994),

- “Advanced energy technologies and climate change an analysis using the global change assessment model (GCAM)”. Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
- Eichenbaum, M.S., Rebelo, S., & Trabandt, M. (2021), “The macroeconomics of epidemics”. *The Review of Financial Studies*, Vol. 34 No. 11, pp. 5149-5187.
- Ellerman, A.D., Convery, F.J., & de Perthuis, C. (2010), “Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme”. Cambridge University Press.
- Fankhauser, S., & Tol, R.S.J. (2005), “On climate change and economic growth”. *Resource and Energy Economics*, Vol. 27 No. 1, pp. 1-17.
- Farmer, J.D., & Foley, D. (2009), “The economy needs agent-based modelling”. *Nature*, Vol. 460 No. 7256, pp. 685-686.
- Fearon, J.D., & Laitin, D. (2003), “Ethnicity, Insurgency, and Civil War”. *American Political Science Review*, Vol. 97 No. 1, pp. 75-90.
- Felbermayr, G., & Gröschl, J. (2014), “Naturally negative: The growth effects of natural disasters”. *Journal of Development Economics*, Vol. 111 No. C, pp. 92-106.
- Fernandez, G., & Ahmed, I. (2019), ““Build back better” approach to disaster recovery: Research trends since 2006”. *Progress in Disaster Science*, Vol. 1 No. 100003, pp. 100003.
- Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall’Asta, A., Di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzúa, F., Málaga-Chuquitaype, C., Mitoulis, S.A., Petrone, C., Sextos, A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J., & Woo, G. (2021), “Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 60 No. 102267, pp. 102267.
- Freire-González, J. (2018), “Environmental Taxation and the Double Dividend Hypothesis in CGE Modelling Literature: A Critical Review”. *Journal of Policy Modeling*, Vol. 40 No. 1, pp. 194-223.
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. (2014), “Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium”. *Econometrica*, Vol. 82 No. 1, pp. 41-88.
- Goulder, L.H. (1998), “Environmental policy making in a second-best setting”. *Journal of Applied Economics*, Vol. 1 No. 2, pp. 279-328.
- Guan, D., Wang, D., Hallegatte, S., Davis, S.J., Huo, J., Li, S., Bai, Y., Lei, T., Xue, Q., Coffman, D., Cheng, D., Chen, P., Liang, X., Xu, B., Lu, X., Wang, S., Hubacek, K., & Gong, P. (2020), “Global supply-chain effects of COVID-19 control measures”. *Nature Human Behaviour*, Vol. 4 No. 6, pp. 577-587.
- Hallegatte, S. (2008), “An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina”. *Risk Analysis*, Vol. 28 No. 3, pp. 779-799.
- Hallegatte, S., Maruyama Rentschler, J.E., & Walsh, B.J. (2018), “Building back better: achieving resilience through stronger, faster, and more inclusive post-disaster reconstruction (English)”. Washington, D.C.: World Bank Group.
- Haraguchi, M., & Lall, U. (2015), “Flood risks and impacts: A case study of Thailand’s floods in 2011 and research questions for supply chain decision making”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 14, pp. 256-272.
- Helbing, D. (2013), “Globally networked risks and how to respond”. *Nature*, Vol. 497 No. 7447, pp. 51-59.
- IFRS Foundation (2023), “ISSB issues inaugural global sustainability disclosure standards (June 26, 2023).” <<https://www.ifrs.org/news-and-events/news/2023/06/issb-issues-ifrs-s1-ifrs-s2/>> (accessed January 19, 2025)

- Imbens, G.W., & Angrist, J.D. (1994), "Identification and estimation of local average treatment effects". *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 62(2), pp. 467-475.
- IPBES (2019), "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services". IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IPCC (2023), "Climate Change 2023: Synthesis Report". Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.
- Jaffe, A.B., Peterson, S.R., Portney, P.R., & Stavins, R.N. (1995), "Environmental Regulation and the Competitiveness of U.S. Manufacturing: What Does the Evidence Tell Us?" *Journal of Economic Literature*, Vol. 33 No. 1, pp. 132-163.
- Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020), "The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions". *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 103, 102360.
- Kellenberg, D.K., & Mobarak, A.M. (2011), "The Economics of Natural Disasters". *Annual Review of Resource Economics*, Vol. 3, pp. 297-312.
- Klassen, R.D., & Vachon, S. (2003), "Collaboration and evaluation in the supply chain: The impact on plant - level environmental investment". *Production and Operations Management*, Vol. 12 No. 3, pp. 336-352.
- Klomp, J., & Valckx, K. (2014), "Natural disasters and economic growth: A meta-analysis". *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, Vol. 26, pp. 183-195.
- Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020), "Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 101 No. 3, pp. E303-E322.
- Koks, E.E., & Thissen, M. (2016), "A Multiregional Impact Assessment Model for disaster analysis". *Economic Systems Research*, Vol. 28 No. 4, pp. 429-449.
- Lee, D.S., & Lemieux, T. (2010), "Regression Discontinuity designs in economics". *Journal of Economic Literature*, Vol. 48(2), pp. 281-355.
- Li, C., & Managi, S. (2022), "Global malaria infection risk from climate change". *Environmental Research*, Vol. 214(Pt 3), 114028.
- Loayza, N.V., Olaberría, E., Rigolini, J., & Christiaensen, L. (2012), "Natural disasters and growth: Going beyond the averages". *World Development*, Vol. 40 No. 7, pp. 1317-1336.
- Managi, S., & Guan, D. (2017), "Multiple disasters management: Lessons from the Fukushima triple events". *Economic Analysis and Policy*, Vol. 53, pp. 114-122.
- Managi, S., & Kumar, P. (eds.) (2018), "Inclusive wealth report 2018: Measuring progress towards sustainability". Routledge.
- Martin, P., Mayer, T., & Thoenig, M. (2008), "Make trade not war?" *The Review of Economic Studies*, Vol. 75 No. 3, pp. 865-900.
- Martin, I.W.R., & Pindyck, R.S. (2021), "Welfare costs of catastrophes: Lost consumption and lost lives". *Economic Journal (London, England)*, Vol. 131 No. 634, pp. 946-969.
- Morgan, M.G. (2014), "Use (and abuse) of

- expert elicitation in support of decision making for public policy”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 111 No. 20, pp. 7176-7184.
- Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H.C., Aerts, J.C.J.H., & Ward, P.J. (2016), “A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels”. *Nature Communications*, Vol. 7, pp. 11969.
- Mukherjee, S., & Hastak, M. (2018), “A novel methodological approach to estimate the impact of natural hazard-induced disasters on country/region-level economic growth”. *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 9 No. 1, pp. 74-85.
- Newell, R.G., Pizer, W.A., & Raimi, D. (2013), “Carbon markets 15 years after Kyoto: Lessons learned, new challenges”. *The Journal of Economic Perspectives: A Journal of the American Economic Association*, Vol. 27(1), pp. 123-146.
- Nordhaus, W.D. (1992), “The ‘Dice’ Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate Economy Model of the Economics of Global Warming”. *Cowles Foundation Discussion Papers*, 1252.
- Nordhaus, W.D. (2017), “Revisiting the social cost of carbon”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114 No. 7, pp. 1518-1523.
- Noy, I. (2009), “The macroeconomic consequences of disasters”. *Journal of Development Economics*, Vol. 88 No. 2, pp. 221-231.
- Noy, I. (2021), “The Economics of Pandemics: The Case of COVID-19”. In J. Gans (eds.), *Economics in the Age of COVID-19*. MIT Press. pp. 47-58.
- Noy, I., & Nualsri, A. (2011), “Fiscal storms: public spending and revenues in the aftermath of natural disasters”. *Environment and Development Economics*, Vol. 16 No. 1, pp. 113-128.
- Nozawa, W., Tamaki, T., & Managi, S. (2018), “On analytical models of optimal mixture of mitigation and adaptation investment”. *Journal of Cleaner Production*, 186, 57-67.
- Oikawa, K., & Managi, S. (2015), “R&D in clean technology: A project choice model with learning”. *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 117, pp. 175-195.
- Okuyama, Y., & Rose, A. (eds.) (2019), “Advances in spatial and economic modeling of disaster impacts (1st ed.)”. Springer Nature.
- O’Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., & van Vuuren, D.P. (2014), “A New Scenario Framework for Climate Change Research: The Concept of Shared Socioeconomic Pathways”. *Climatic Change*, Vol. 122 No. 3, pp. 387-400.
- Oosterhaven, J. (2017), “On the Limited Usability of the Inoperability IO Model”. *Economic Systems Research*, Vol. 29 No. 3, pp. 452-461.
- Palmquist, R.B., Roka, F.M., & Vukina, T. (1997), “Hog Operations, Environmental Effects, and Residential Property Values”. *Land Economics*, Vol. 73 No. 1, pp. 114-124.
- Pindyck, R.S. (2013), “Climate change policy: What do the models tell us?” *Journal of Economic Literature*, Vol. 51 No. 3, pp. 860-872.
- Pindyck, R.S. (2017), “The use and misuse of models for climate policy”. *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 11 No. 1, pp. 100-114.
- Plott, C.R., & Zeiler, K. (2005), “The willingness to pay-willingness to accept gap, the “endowment effect,” subject misconceptions, and experimental procedures for eliciting

- valuations”. *American Economic Review*, Vol. 95 No. 3, pp. 530-545.
- Porter, M.E., & van der Linde, C. (1995), “Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship”. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9 No. 4, pp. 97-118.
- Raddatz, C. (2007), “Are external shocks responsible for the instability of output in low-income countries?” *Journal of Development Economics*, Vol. 84 No. 1, pp. 155-187.
- Raj, A., Mukherjee, A.A., de Sousa Jabbour, A.B.L., & Srivastava, S.K. (2022), “Supply chain management during and post-COVID-19 pandemic: Mitigation strategies and practical lessons learned”. *Journal of Business Research*, Vol. 142, pp. 1125-1139.
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017), “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview”. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, Vol. 42, pp. 153-168.
- Rivers, N., & Schaufele, B. (2015), “Salience of carbon taxes in the gasoline market”. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 74, pp. 23-36.
- Ruiz-Benítez, R., López, C., & Real, J.C. (2018), “The lean and resilient management of the supply chain and its impact on performance”. *International Journal of Production Economics*, Vol. 203, pp. 190-202.
- Russo, N., Reis, L., Silveira, C., & Mamede, H.S. (2023), “Towards a comprehensive framework for the multidisciplinary evaluation of organizational maturity on business continuity program management: A systematic literature review”. *Information Security Journal: A Global Perspective*, Vol. 33 No. 1, pp. 1-19.
- Singkran, N. (2017), “Flood risk management in Thailand: Shifting from a passive to a progressive paradigm”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 25, pp. 92-100.
- Skidmore, M., & Toya, H. (2002), “Do natural disasters promote Long - Run growth?” *Economic Inquiry*, Vol. 40 No. 4, pp. 664-687.
- Song, X., Zhou, Y., & Jia, W. (2019), “How do economic openness and R&D investment affect green economic growth?—evidence from China”. *Resources, Conservation, and Recycling*, Vol. 146, pp. 405-415.
- Stern, N. (2007), “The Economics of Climate Change: The stern review”. Cambridge University Press.
- Stern, N. (2008), “The Economics of Climate Change”. *American Economic Review*, Vol. 98 No. 2, pp. 1-37.
- Stiglitz, J.E. (2019), “Addressing climate change through price and non-price interventions”. *European Economic Review*, Vol. 119, pp. 594-612.
- Stiglitz, J.E., Sen, A., & Fitoussi, J.-P. (2009), “Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress”. Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, OECD.
- Strömberg, D. (2007), “Natural disasters, economic development, and humanitarian aid”. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 21 No. 3, pp. 199-222.
- Tamaki, T., Nozawa, W., & Managi, S. (2017), “Evaluation of the ocean ecosystem: Climate change modelling with backstop technologies”. *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 428-439.
- Tang, C.S. (2006), “Perspectives in supply chain risk management”. *International*

- Journal of Production Economics, Vol. 103 No. 2, pp. 451-488.
- Tol, R.S.J. (2024), "A meta-analysis of the total economic impact of climate change". *Energy Policy*, Vol. 185, pp. 113922.
- Touriki, F.E., Benkhalti, I., Kamble, S.S., Belhadi, A., & El fezazi, S. (2021), "An integrated smart, green, resilient, and lean manufacturing framework: A literature review and future research directions". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 319 No. 128691, pp. 128691.
- UNEP (2022), "Inclusive Wealth Report 2022 Executive Summary". United Nations Environment Programme, Washington D.C., USA.
- UNEP (2023), "Inclusive Wealth Report 2023: Measuring Sustainability and Equity". <https://www.unep.org/resources/report/inclusive-wealth-report-2023-measuring-sustainability-and-equity>
- UNESCO MGIEP (2024), "Inclusive wealth report 2024: Special issue on Social Emotional Capital Accounts (SECA)".
- UN press release, (2019), "For Every Dollar Invested in Climate-Resilient Infrastructure Six Dollars Are Saved, Secretary-General Says in Message for Disaster Risk Reduction Day", Press Release SG/SM/19807-IHA/1472-OBV/1927, 2019/10/10.
- UNU-IHDP and UNEP (2012), Inclusive Wealth Report 2012. Measuring progress toward sustainability. Cambridge: Cambridge University Press.
- UNU-IHDP and UNEP (2014), Inclusive Wealth Report 2014. Measuring progress toward sustainability. Cambridge: Cambridge University Press.
- Weitzman, M.L. (2009), "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change". *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 91 No. 1, pp. 1-19.
- Weyant, J. (2017), "Some contributions of integrated assessment models of global climate change". *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 11 No. 1, pp. 115-137.
- WMO (World Meteorological Organization) (2025), "WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level (January 10, 2025)". <<https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>> (accessed January 19, 2025)
- World Bank. (2024), "The Changing Wealth of Nations 2024: Revisiting the Measurement of Comprehensive Wealth (English)". Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099100824155021548>
- Xie, J., Nozawa, W., Yagi, M., Fujii, H., & Managi, S. (2019), "Do environmental, social, and governance activities improve corporate financial performance?" *Business Strategy and the Environment*, Vol. 28 No. 2, pp. 286-300.
- Yagi, M., Kagawa, S., Managi, S., Fujii, H., & Guan, D. (2020), "Supply constraint from earthquakes in Japan in input-output analysis". *Risk Analysis*, Vol. 40 No. 9, pp. 1811-1828.
- Yagi, M., & Managi, S. (2021), "Global supply constraints from the 2008 and COVID-19 crises". *Economic Analysis and Policy*, Vol. 69, pp. 514-528.
- Yagi, M., & Managi, S. (2023), "Trends in international energy prices and sectoral economic damage: A global input-output approach". *Economic Analysis and Policy*, Vol. 77, pp. 680-695.
- Yoo, S., Kumagai, J., Aki, R., & Managi, S. (2025), "Railway network expansion reduces air pollution in Tokyo over 25 years". *Sustainable Cities and Society*, Vol. 127, 106408.

Zhang, B., Nozawa, W., & Managi, S. (2021), "Spatial inequality of inclusive wealth in China and Japan". *Economic Analysis and Policy*, Vol. 71, pp. 164-179.

Zsidisin, G.A., Melnyk, S.A., & Ragatz, G.L.

(2005), "An institutional theory perspective of business continuity planning for purchasing and supply management". *International Journal of Production Research*, Vol. 43 No. 16, pp. 3401-3420.

補論

1. 略語

- ・ ABM : Agent Based Model エージェント・ベース・モデル
- ・ BOD : Biochemical oxygen demand 生物化学的酸素要求量
- ・ CBA : Cost-benefit analysis 費用便益分析
- ・ CGE : Computable General Equilibrium 応用一般均衡（モデル）
- ・ CO₂ : Carbon dioxide 二酸化炭素
- ・ COD : Chemical Oxygen Demand 化学的酸素要求量
- ・ CWON 2024 : The Changing Wealth of Nations 2024
- ・ DiD : Difference-in-Differences 差の差分
- ・ DSGE : Dynamic Stochastic General Equilibrium 動学確率一般均衡（モデル）
- ・ ESG : Environmental, Social, and Governance 環境, 社会, ガバナンス
- ・ GDP : Gross Domestic Product 国内総生産
- ・ GtCO₂ : Gigatonne CO₂ ギガトン二酸化炭素
- ・ GX-ETS : Green Transformation Emissions Trading System グリーントランスフォーメーション排出量取引制度
- ・ HC : Human Capital 人的資本
- ・ IAM : Integrated Assessment Model 統合評価モデル
- ・ IFRS : International Financial Reporting Standards 国際財務報告基準
- ・ IO : Input-Output 産業連関
- ・ IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
- ・ ISSB : International Sustainability Standards Board 国際サステナビリティ基準審議会
- ・ IV : Instrumental Variables 操作変数
- ・ IWI : Inclusive Wealth Index 新国富指標
- ・ IWR : Inclusive Wealth Report
- ・ NbS : Nature-based Solutions 自然を活用した解決策
- ・ NC : Natural Capital 自然資本
- ・ PC : Produced Capital 人工資本
- ・ RCP : Representative Concentration Pathways 代表的濃度経路
- ・ RDD : Regression discontinuity designs 回帰不連続デザイン
- ・ SCC : Social Cost of Carbon 炭素の社会的費用
- ・ SPM : Suspended Particulate Matter 浮遊粒子状物質
- ・ SSP : Shared Socioeconomic Pathways 共有社会経済経路
- ・ tC : tonne C 炭素トン
- ・ tCO₂ : tonne CO₂ 二酸化炭素トン
- ・ TFP : Total Factor Productivity 全要素生産性
- ・ WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
- ・ WTA : Willingness to Accept 受入意思額
- ・ WTP : Willingness to Pay 支払意思額

2. 用語

- ・一般均衡 (general equilibrium) : 複数市場の相互作用を同時に扱い、価格・数量・所得配分が同時決定される分析枠組み。
- ・カーボンプライシング (carbon pricing) : CO₂ 排出に価格を付ける政策手段の総称 (炭素税・排出量取引等)。
- ・極端現象 (extreme weather events / climate extremes) : 本稿では、統計的に稀な尾部に位置する気候現象 (豪雨・猛暑・寒波等) を意味する訳語。
- ・グリッド / メッシュ : グリッドは、空間を等間隔に区切る格子の概念。メッシュは、統計で定義された格子の実務単位 (例 : 1 km メッシュ)。
- ・堅牢性 (ロバスト性 / robustness) : 仮定・パラメータ・データの変更に対して結論が大きく揺れない性質。
- ・自然資本 (natural capital : NC) : 森林・土地・魚・鉱物・原油など自然が持つ資本で、特に経済活動に利用されるもの。
- ・シナリオ (scenario) : 将来の前提・経路 (パラメータ集合と物語) を定め、政策やリスクの影響を比較する設定。
- ・シャドープライス (影の価格 / shadow price) : 市場価格が欠如・歪曲した資源や外部性、または制約条件に対する限界的な社会的価値 (ラグランジュ乗数に相当)。
- ・ショック (shock) : 需要・供給・資本ストックに急激な変化を与える外生的攪乱。
- ・新国富指標 (Inclusive Wealth Index : IWI) : 人工 (生産) 資本・人的資本・自然資本を実質貨幣評価で合計したストック指標。純投資の正負で持続可能性を判定する。
- ・人工資本 (produced capital : PC) : 機械・設備・建物・インフラなど人為的に蓄積された資本 (生産資本)。
- ・人的資本 (human capital : HC) : 教育・健康に由来する人の能力の資本化で、経済活動に利用されるもの。
- ・ストック (stock) : ある時点における蓄積量。例 : IWI。
- ・脆弱性 (vulnerability) : ショックに対する被害の受けやすさ (耐力・代替可能性・適応能力に依存)。
- ・曝露 (exposure) : 被害を受け得る対象の量・空間分布 (人口・資産・インフラ等)。
- ・ハザード (hazard) : 損失をもたらし得る外生的な出来事 (地震・洪水・熱波・感染症・紛争等)。
- ・複合ハザード (multi-hazard) : 複数ハザードの同時・連鎖・相互作用。
- ・複合リスク (systemic/multi-hazard risk) : 相互連関により局所ショックが波及・拡大して全体不安定化を招くリスク。
- ・フロー (flow) : 一定期間あたりの流量。例 : GDP。
- ・リーケージ (leakage) : 規制の弱い地域・部門へ排出や活動が移転し、全体削減が相殺される現象。特に温室効果ガスが境界外へ移転するカーボンリーケージの文脈で使われる。
- ・リスク (risk) : 一般にハザード (出来事) × 曝露 × 脆弱性の組合せとして表現される損失可能性。
- ・レジストリ (registry) : クレジットの発行・移転・償却を記録する電子台帳。唯一性の付与と二重計上防止のために使用される。
- ・レジリエンス (resilience) : 攪乱後に機能水準を維持・回復する能力。復帰速度や累積損失の小ささで評価される。
- ・ロバスト制御 (robust control) : モデルや真の確率分布を特定できない不確実性下で、想定しうる「最悪の場合」の損失を最小化するように設計された政策・意思決定の枠組み。