

厚生労働科学研究費補助金（地球規模保健課題解決推進のための行政施策に関する研究事業）
総括研究報告書

カーボンニュートラル社会におけるヘルスケアシステムの設計と転換策の提案のための研究

研究代表者 南齋 規介 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 領域長

研究要旨

医療・介護・保健衛生のヘルスケア需要が固定資本形成を含むサプライチェーンを通じて誘発する GHG 排出量（カーボンフットプリント）を「2020 年産業連関表」を用いて定量化した。また、昨年度に開発した標的型サプライチェーン分解分析法を適用し、ヘルスケアの医療のカーボンフットプリントを英国保健サービス（NHS）の事例を参考に定めた 30 個の脱炭素化オプション別に分解した。また、昨年度から続けてきた市区町村別のヘルスケア関連およびその他の消費に伴うサプライチェーン全体での将来の GHG 排出量推計を改良した。これまでの結果との整合性を保ちつつ、消費項目や市区町村と GHG 排出量との関係が明確になった。

日本の各都道府県における CT および MRI の運用効率性を横断的および時系列的に定量評価した。具体的には、非効率な運用の改善に基づくライフサイクル CO₂削減ポテンシャルを定量的に推計した。その結果、不要な機器運用に起因する CO₂排出量は医療分野全体の約 7%に相当することが明らかとなった。加えて、2050 年に日本がカーボンニュートラルを達成する経路として、電力の脱炭素化と次世代自動車に対する物質効率化、住宅・非住宅建築物の長寿命化、循環利用率の向上を仮定すると、2050 年までにヘルスケアに求められる資源利用の効率は最大で 8 倍程度向上する必要があると示唆された。

昨年度に実施した構造経路分析の結果を踏まえ、電力を中心に国のエネルギー基本計画に沿ったエネルギー移行が起きた場合に、介護需要に伴うサプライチェーン全体の GHG 排出量が今後どの程度削減されるかを推計した。さらに、介護需要を維持していくために必要な直接・間接労働力についても定量化し、現状のサプライチェーン構造下では商業や農業等の介護現場以外でも労働力が新たに必要になる可能性が示唆された。したがって、介護におけるカーボンニュートラル化には、被介護者のウェルビーイングや少子高齢化で切迫する人材不足も鑑みて、介護需要そのものを抑制しつつ低炭素な介護予防策の推進が不可欠であると考えられる。

研究分担者氏名・所属研究機関名及

び所属研究機関における職名

・重富陽介・立命館大学・理工学部・

准教授

・金本圭一朗・東北大学・環境科学研究

科・准教授

A. 研究目的

日本は超高齢化社会を背景とした医療、保健、介護等のヘルスケア需要の増加が見込まれる一方で、ヘルスケア自身の環境的持続可能性を高めることが求められる。日本のヘルスケア需要はそのサプライチェーンを通じて年間 6250 万トン（2011 年値）

の温室効果ガス（GHG）の排出を誘発し、総 GHG 排出量の約 5%を占める。

確実な需要増加を見込むヘルスケアの脱炭素化は不可欠であるが、日本が宣言した「2050 年カーボンニュートラル」と整合的に実現するには、30 年余りの期間でこれを急速に展開する必要がある。ヘルスケアの脱炭素化対策には需要側（例、患者や要介護者の減少）と供給側（例、再生可能エネルギー導入、機器等の長期使用）のオプションが考えられるが、どのオプションにどの程度の GHG 削減効果があるかは未解明であり、脱炭素化に向けた需要側と供給側の対策の最適な組み合わせと導入量の究明ができない。このヘルスケアの脱炭素化

ションに関する科学的知見の欠如は、保健行政や医療機関等による戦略的な脱炭素計画の立案と実践を阻害し、ヘルスケアがカーボンニュートラル社会に適合できないリスクを生む。

今日、世界のヘルスケア需要による GHG 排出量は 24 億トンと推計され、英国、米国、豪州、中国などの国別推計もサプライチェーンモデルを用いて行われている。一方、MRI や CT を含む医療検査機器の使用に伴う GHG 排出量も算定され、ヘルスケアと GHG 排出との関係が巨視的・微視的の両視点から明らかになりつつある。しかし、ヘルスケアとカーボンニュートラル社会との整合性については国内外で未検討である。そこで本研究では、日本のヘルスケアのサプライチェーンに脱炭素化オプションを組み込む GHG 排出算定モデルを独自に開発し、ヘルスケアのカーボンニュートラル化を達成するための需要側と供給側対策の排出削減効果とその導入量を定量化することを目的とする。

B. 研究方法

[1] 2020 年のヘルスケアサービスに伴う GHG 排出量の推計と脱炭素化オプション別への分解

固定資本サプライチェーンを含む産業連環モデル

本研究ではヘルスケアサービスが要するサプライチェーンを生産プロセスだけでなく固定資本形成を含めて包括的に捉えるため、固定資本内生化型の環境産業連環モデルを開発した。このモデルは、ヘルスケアサービスが直接形成する固定資本だけでなく、サプライチェーンを通じて間接的に形成に関与する固定資本によるカーボンフットプリントへの影響を計測することができる。

本モデルでは式(1)のように商品の総国内生産量 $x = (x_i)$ は国産品に対する中間需要 $Z = (z_{ij})$ と最終需要 $f = (f_i)$ の和と均衡する。ここで i は全ての要素を 1 とする集計ベクトルを示す。行列 Z は式(2)のように 4 つのブロック行列から構成される。 z^{pp} は商品生産における商品の取引額、 z^{pc} は固定資本

形成における商品の取引額、 z^{cp} は商品生産における固定資本形成の取引額、 0 は要素が全ての 0 の行列を示す。

$$x = Zi + f \quad (1)$$

$$Z = \begin{pmatrix} z^{pp} & z^{pc} \\ z^{cp} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、投入係数行列 $A = Z\hat{x}^{-1}$ ($\hat{\cdot}$ はベクトルを対角成分、他の要素をゼロとする行列を示す) と定義すると、 $Zi = A\hat{x}i = Ax$ となり、これを式(1)に代入すると式(3)を得ることができる。式(3)をベクトル x について解き、式(4)のように GHG 排出原単位ベクトル $d^* = (d_j^*)$ を乗じて、最終需要 f に起因するサプライチェーンを通じた GHG 排出量 e を決定する。 I は単位行列、 L はレオンティフ逆行列である。

$$x = Ax + f \quad (3)$$

$$e = d^*x = d^*(I - A)^{-1}f = d^*Lf \quad (4)$$

本研究では、式(1)の取引額 x, Z, f の単位は百万円とし、日本の最新の 2020 年産業連環表を用いて設定した。具体的には、輸入率を要素とするベクトル $m = (\overline{m_i})$ を設定し、 $Z = (\overline{I - m})Z^*$ および $f = (\overline{I - m})f^d + f^{ex}$ によって輸入品を除いた。ここで Z^* , f^d , f^{ex} はそれぞれ国産品と輸入品を含む中間需要行列、国内最終需要、輸出需要を示す。なお、 Z の部門数は 507 部門であり、商品部門 p は 390 部門、固定資本形成部門 c は 117 部門から構成される。最終需要 f にはヘルスケアサービスに該当する 6 部門に需要額を計上し、他部門は 0 を付与した。

ベクトル d は部門別の直接 GHG 排出量 (tCO₂eq) を国内生産額 d で除して算定した。直接 GHG 排出は日本の国家 GHG インベントリの 2025 年 UNCCC 報告版に記載の 2020 年値を利用して算定した。算定方法は 2011 年表を作成した方法を援用した。GHG は CO₂, CH₄, N₂O, Hydrofluorocarbon (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), SF₆, NF₃ を含む

英国 NHS の先行研究を参照した 30 個の脱炭素化オプションの設定と医療カーボンフットプリントの分解

ヘルスケアの中でも医療サービスに注目し医療サービスのカーボンフットプリント

を脱炭素化オプション別に分解した。脱炭素化オプションは英国 NHS（国民保健サービス）の先行事例を参照し、以下の 30 項目を設定した。

- 1 施設（電気）の最適化
- 2 施設（ガス）の最適化
- 3 施設（熱）の最適化
- 4 施設（水）の最適化
- 5 施設（廃棄物処理）の最適化
- 6 施設（石油燃料）の最適化
- 7 自家発と熱の再生可能エネルギー化
- 8 全国的な電力脱炭素化
- 9 ゼロエミッション救急車
- 10 車両・職員車両の電動化
- 11 使い捨てプラスチック削減
- 12 金属器具の再処理
- 13 医療機器の再利用・再生
- 14 紙の使用削減
- 15 食品廃棄物削減
- 16 脱炭素技術革新（鉄鋼）
- 17 脱炭素技術革新（セメント）
- 18 脱炭素技術革新（非鉄金属）
- 19 脱炭素技術革新（石油・石炭）
- 20 脱炭素技術革新（ガラス）
- 21 バイオベースポリマーへの転換
- 22 植物由来中心の食転換
- 23 脱炭素化建設
- 24 貨物輸送の電動化
- 25 非医薬品の NHS 基準達成
- 26 医薬品の NHS 基準達成
- 27 麻酔薬削減に向けた長期計画
- 28 吸入器（MDI）削減に向けた長期計画
- 29 固定資本（医療）
- 30 固定資本（保健・介護）

医療サービスのカーボンフットプリントに対する上記 30 の各オプション寄与を特定するため、昨年度開発した標的型サプライチェーン分解分析法を適用した。なお、オプション以外の寄与は「その他」とした。

[2]自治体別のヘルスケア関連需要に伴うカーボンフットプリントの算定

昨年度から行っている市区町村家計消費データとサプライチェーンモデルとの統合によるカーボンフットプリントの分析を進めた。特に、家計消費データとサプライチェ

ーンモデルの部門の対応表の見直しやサプライチェーンモデルである世界多地域間産業連関表の改良を実施した。

さらに年代別などの結果を新たに推計した。ただし、家計消費データは個人単位ではなく、世帯単位のため、年齢が分かれている各個人のカーボンフットプリントは、世帯のカーボンフットプリントを世帯規模で割ったものとした。ただし、単身世帯のみに絞ったものも別途推定した。また、ヘルスケア関連の消費項目としては、コンタクトレンズ、出産入院料、歯科治療代、健康保持用摂取品、保健用消耗品、医科診療代、医薬品、介護サービス、整骨治療代、他の入院料、他の保険サービス、他の保健医療用品・器具、大人用紙おむつ、眼鏡を対象に計算した。

[3] 医療機器の運用効率に着目した CO₂削減可能量の算定

日本は他国と比較して CT および MRI といった診断用画像機器の保有台数が多い一方で、1 台当たりの検査件数は相対的に少なく、運用効率の低さが指摘されている。これらの機器は高エネルギー消費型設備であるため、非効率な運用は不要な環境負荷を増大させる可能性がある。そこで本研究では、データ包絡分析（Data Envelopment Analysis: DEA）を用いて、日本の 47 都道府県における CT および MRI の運用効率性を推計する。さらに、得られた効率性スコアに基づき、非効率な運用によって誘発されるライフサイクル CO₂排出量を推計するとともに、効率性の改善による環境負荷削減ポテンシャルを定量的に評価する。加えて、マalmquist 指数を用いて 2014 年から 2020 年までの 7 年間における運用効率性の時系列変化を分析し、効率性の変動に伴う CO₂排出量の増減を推計する。

日本の医療機器の運用効率性分析

DEA は、効率的な意思決定主体（Decision Making Unit: DMU）を特定するための数理計画法である。本研究では、各都道府県における CT および MRI の運用効率性を測定するために DEA を用いた。DEA

では、観測された投入・産出の組み合わせに基づいて生産フロンティアを構築し、各 DMU の効率性はこのフロンティアからの距離によって相対的に評価される。

DEA には主に 2 つのモデルが存在する。1 つは規模に関して収穫一定 (constant returns to scale: CRS) を仮定する CRS モデルであり、もう 1 つは規模に関して収穫可変 (variable returns to scale: VRS) を仮定する VRS モデルである。本研究では、診断用画像機器の運用における規模の経済性の有無が先行研究において明確でないことから、より一般的な枠組みである CRS モデルを採用した。

また、DEA モデルには投入指向型と産出指向型の 2 種類が存在する。本研究では投入指向型モデルを採用した。CT および MRI の運用効率性を推定するにあたり、投入要素として医療機器の設置台数、診療放射線技師数、放射線科医数の 3 要素を、産出要素として医療機器による検査件数を設定した。一般に、画像検査の必要性は医師の臨床判断に基づくため、効率性向上のために検査件数を削減することは適切ではない。したがって、効率性改善は不要な投入の削減によって達成されるべきである。

本研究では特に、診療放射線技師および放射線科医という労働投入に着目した。診療放射線技師は CT や MRI 検査に加え、X 線撮影、超音波検査、核医学、放射線治療など多様な業務を担っている。一方、放射線科医は主に画像診断や放射線治療に関与している。このような状況において、運用効率性の観点のみからこれらの人員を削減することは現実的ではない。そのため、本研究では、診療放射線技師および放射線科医を外生的に固定された投入とみなし、内生的に調整可能な投入として機器台数を扱う投入指向型 DEA-CRS モデルを採用した。

上記の外生的固定投入を考慮した投入指向型 DEA-CRS モデルは、以下の数理計画問題として定式化される。

$$\text{Min. } \theta_m \quad (5)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{fn} &\leq \theta_m x_{fm}^D; d = 1, 2, \dots, F \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{gn} &\leq x_{gm}^{ND}; g = 1, 2, \dots, G \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n y_{jn} &\geq y_{jm}; j = 1, 2, \dots, J \\ \lambda_n &\geq 0; n = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

ここで、 x_{fm}^D と x_{gm}^{ND} 、 y_{jm} 、それぞれ m 番目の DMU における裁量的投入、非裁量的投入、および産出を表す。裁量的投入は最適化問題において内生的に調整される一方、非裁量的投入は外生的に固定される。 D および ND はそれぞれ裁量的投入および非裁量的投入を示し、 F 、 G 、 J はそれぞれの要素数を表す。 N は DMU の数、 λ_n は各 DMU に対する強度変数である。 θ_m は m 番目の DMU の効率性スコア (0 から 1 の範囲) を示し、1 未満の場合は、その DMU の投入を最大で $100 \times (1 - \theta_m) \%$ 削減可能であることを意味する。

以上を踏まえ、本研究では、日本の各都道府県を DMU とし、診療放射線技師数および放射線科医数を外生的固定投入、CT または MRI の機器台数を内生的投入、検査件数を産出とする投入指向型 DEA-CRS モデルを適用した。これにより、CT と MRI それぞれについて効率性評価を行った (図 1)。

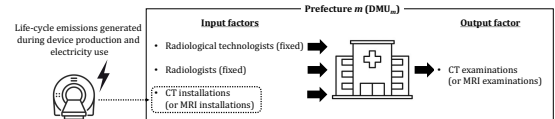


図 1: 外生的固定投入を用いた投入指向型 DEA-CRS モデル

さらに、本研究では外生的固定投入を考慮した投入指向型 DEA-CRS モデルを採用したが、スラックを明示的に考慮する非放射型モデル (例: SBM モデル) などの代替手法も存在する。しかし、DEA-CRS モデルは、非効率な DMU に対してすべての投入要素を比例的に削減することを仮定しており、投入要素間の相互依存性が強い場合に適して

いる。本研究においては、機器台数と診療放射線技師数は密接に関連しており、各機器の運用には対応する技師の配置が必要である。このため、スラックを個別に調整する非放射型モデルは、実際の運用制約を十分に反映しない可能性がある。以上の理由から、本研究ではDEA-CRSモデルを、解釈可能性および実務的妥当性の観点から適切な手法として採用した。

要因分析（トービット回帰分析）

本研究では、医療機器の運用効率性の決定要因を明らかにするため、従属変数が一定の範囲内に制約される Tobit 回帰分析を実施した。具体的には、2020 年における各都道府県の CT および MRI の運用効率性を従属変数とし、以下の 7 つの説明変数により効率性が規定されると仮定した。

（1）高齢化率（AGING）

高齢化率は、2020 年における各都道府県の総人口に占める 65 歳以上人口の割合を示す。高齢化率が高い地域では、CT や MRI 検査に対する需要が高い可能性がある。そのため、DEA による効率性分析においては、高齢化率は産出要素（例：装置あたり検査件数）だけでなく、投入要素（例：装置設置台数や従事者数）にも影響を与えると考えられる。

（2）所得（INCOME）

所得は、2020 年における各都道府県の総所得を人口で除することで一人当たり所得として算出した。都道府県所得は県民経済計算に基づき、雇用者報酬（賃金・退職給付等）、財産所得（利子・地代等）、企業所得（企業や個人事業主の営業利益等）を含む。CT や MRI 検査は他の医療行為と比較して費用が高いため、所得水準の高い地域ほど高額な検査を受ける傾向があると考えられる。

（3）国民医療費（NHE）

国民医療費は、2020 年に各都道府県において医療機関で傷病の治療に要した費用を示す。この中には CT および MRI 検査に要する費用も含まれる。そのため、国民医療費が高い地域ほど、これら医療機器による検査件数が多い可能性がある。

（4）公立病院比率（HR）

公立病院比率は、2020 年における各都道府県の全病院数に占める公立病院の割合を示す。公立病院は民間病院と比較して国や地方自治体の政策を反映しやすい傾向がある。そのため、公立病院比率が効率性に影響を与える場合、効率性の低い地域に対しては資源の効率的利用を促す政策的対応が必要となる。

（5）診療放射線技師所得（IRT）

診療放射線技師所得は、2020 年における各都道府県の診療放射線技師の平均所得を示す。技師の所得水準は、その地域における技師数の確保に影響を与える可能性がある。

（6）放射線科医所得（IRA）

放射線科医所得は、2020 年における各都道府県の医師の平均所得を示す。医師の所得水準は、当該地域における放射線科医数に影響を与える可能性がある。

（7）人口（POP）

人口は、2020 年における各都道府県の総人口を示す。人口規模が大きい地域ほど、医療機器に対する需要が高いと考えられる。

Tobit 回帰モデルは以下のように定式化される。

$$\tau_k = \begin{cases} 1, \tau_k^* \geq 1 \\ \tau_k^* = \beta' \mathbf{x}_k + \varepsilon_k, 0 < \tau_k^* < 1 \\ 0, \tau_k^* \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 τ_k は都道府県 k における CT または MRI の運用効率性、 β は内生的に推定されるパラメータベクトル、 $\mathbf{x}_k$ は説明変数（高齢化率、所得、国民医療費、公立病院比率、診療放射線技師所得、放射線科医所得、人口）からなるベクトル、 ε_k は誤差項であり、 $\varepsilon_k \sim N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定する。パラメータ β は最尤推定法により推定した。

非効率運用より誘発されたライフサイクル CO₂ 排出量の推計

不要な医療機器の稼働は CO₂ 排出量の増加を招くが、適切な効率性改善政策によりこれらの排出は削減可能である。本研究では、製品ライフサイクルの観点から不要な機器を最小化することで、ライフサイクル

CO₂ (LC-CO₂) 削減ポテンシャルを推計した。

ライフサイクル CO₂排出量を推計する際には、分析対象とするライフサイクル段階を規定するシステム境界の設定が極めて重要である。本研究では、原材料の採取、製造、および使用段階（10 年間の減価償却期間における電力消費）を対象とする「cradle-to-gate」アプローチを採用した。一方で、廃棄段階については、医療機器の廃棄・リサイクルに関するコストデータが限定的であるため分析対象から除外した。なお、廃棄段階における CO₂排出量を推計するには、廃棄およびリサイクルに関する詳細なデータ収集が必要である。本アプローチにより、医療機器のライフサイクル排出量の中でも大きな割合を占めるとされる製造段階および使用段階に着目した分析が可能となる。

まず、原材料採取および製造段階における CO₂排出量（すなわち、機器製造に伴う直接・間接の体化 CO₂排出量）については、国立環境研究所による公表データに基づく医療用機械器具部門の CO₂排出原単位に、医療機器の価格を乗じることで推計した。

さらに、使用段階における電力消費に伴う CO₂排出量（電力供給に伴う直接・間接排出）については、機器の年間電力消費量に、事業用電力の平均単価（総務省, 2020a）および電力供給部門の CO₂排出原単位を乗じることで、10 年間の排出量として推計した。

最後に、機器 1 台あたりの製造段階および使用段階における直接・間接 CO₂排出量の合計に、当該機器の投入削減ポテンシャルを乗じることで、CO₂削減ポテンシャルを算出した。

効率性変化の分析（マルムクイスト指数分解法）

本研究では、2014 年から 2020 年までの 7 年間における CT および MRI の運用効率性の変化を、マルムクイスト指数 (Malmquist index) を用いて分析した。式 (5) で示した外生的固定投入を考慮した投入指向型 DEA-CRS モデルに基づき、時点 t における

都道府県 m の効率性スコアは、時点 t の生産フロンティアに対する相対的位置として、以下の最適化問題により定義される。

$$\theta_m^t(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t) = \text{Min. } \theta_m \quad (7)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{fn}^t &\leq \theta_m x_{fm}^{D,t}; f = 1, 2, \dots, F \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{gn}^t &\leq x_{gm}^{ND,t}; g = 1, 2, \dots, G \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n y_{jn}^t &\geq y_{jm}^t; j = 1, 2, \dots, J \end{aligned}$$

$$\lambda_n \geq 0; n = 1, 2, \dots, N.$$

同様に、時点 $t+1$ の観測値を時点 t の生産フロンティアで評価する混合期の効率性スコアは、以下の最適化問題により求められる。

$$\theta_m^t(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1}) = \text{Min. } \theta_m \quad (8)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{fn}^t &\leq \theta_m x_{fm}^{D,t+1}; f = 1, 2, \dots, F \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{gn}^t &\leq x_{gm}^{ND,t+1}; g = 1, 2, \dots, G \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n y_{jn}^t &\geq y_{jm}^{t+1}; j = 1, 2, \dots, J \end{aligned}$$

$$\lambda_n \geq 0; n = 1, 2, \dots, N.$$

さらに、時点 t の観測値を時点 $t+1$ の生産フロンティアで評価する混合期の効率性スコア $\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)$ も同様に算出する。これらを用いて、マルムクイスト指数は次式のように定義される。

$$MI[t, t+1] = \left[\frac{\theta_m^t(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1})}{\theta_m^t(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)} \cdot \frac{\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1})}{\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

マルムクイスト指数 $MI[t, t+1]$ は、時点 t から $t+1$ にかけての運用効率性の変化を示す指標であり、 $MI[t, t+1] > 1$ の場合は効率性の向上、 $MI[t, t+1] < 1$ の場合は効率性の低下または停滞を意味する。

さらに、このマルムクイスト指数は、以下のように技術効率の変化とフロンティアのシフトに分解することができる。

$$MI[t, t+1] = \frac{\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1})}{\theta_m^t(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)} \quad \text{First term}$$

$$\left[\frac{\theta_m^t(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)}{\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t}, x_{gm}^{ND,t}, y_{jm}^t)} \frac{\theta_m^t(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1})}{\theta_m^{t+1}(x_{fm}^{D,t+1}, x_{gm}^{ND,t+1}, y_{jm}^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Second term}$$

(10)

式 (10) の第 1 項は相対的な効率性の変化を表し、時点 t から $t+1$ にかけての技術効率の変化の大きさを示す。一方、第 2 項は技術変化を表し、生産フロンティア自体のシフト、すなわち技術進歩または退歩を示す指標である。技術変化の値が 1 を上回る場合は技術進歩、1 に等しい場合は変化なし、1 未満の場合は技術退歩を意味する。

[4]カーボンニュートラルに整合する物質フロー転換がもたらすヘルスケアへの影響分析

本研究では、Hata et al. (2020) が構築した固定資本内包型産業連関モデルおよび国内に投入される天然資源・循環資源・輸入製品の物質フローデータを利用し、最終消費に誘発される総物質消費量 (MF: material footprint) を次のように定義する

$$MF = \mathbf{qR}(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}\mathbf{y}^d + \mathbf{O} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{q}$ は輸入資源及び輸入製品の国外波及効果、 $\mathbf{R}$ は単位生産あたりの直接資源消費量、 $\mathbf{A}$ は固定資本形成を内生化した非競争輸入型の投入係数、 $\mathbf{y}$ は最終需要、 $\mathbf{O}$ は最終需要に対する資源の直接投入量を表す。なお、 $\mathbf{R}$ は 44 種の天然資源 (輸入・国内)

から構成される。輸入天然資源及び輸入製品の国外波及効果は GLORIA データベースを用いて定義する。

また、本モデルおよび単位生産あたりの炭素排出量 $\mathbf{d}$ および最終需要の直接排出 $\mathbf{G}$ を用いて、カーボンフットプリント (CF) は $CF = \mathbf{d}(\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}\mathbf{y}^d + \mathbf{G}$ と表現できる。 $\mathbf{d}$ および $\mathbf{G}$ は 3EID より取得する。

本研究では、Hata et al. (2025) の二次計画法モデルを基礎として、MF/capita 削減目標の下で家計消費構造の変化を最小化する動学最適化モデルを構築した。モデルは 2015 年から 2050 年まで 5 年刻みで計算し、各期において前期からの世代別・部門別一人当たり家計消費の変化率を最小化する。これにより、現在の家計消費構造からの乖離をできるだけ抑えながら、物質フロー制約と社会経済的制約を満たす消費経路を探索した。なお、目的関数に含まれるのは世代別家計消費である。家計消費に連動すると考えられる政府支出の一部は家計消費に合算した一方で、家計消費と直接連動しないその他の最終需要は MF 算定および総 MF/capita 制約には含めたが、家計消費変化の最小化対象には含めない。

$$\min \sum_{\sigma} \sum_i \left(\frac{c_{i,\sigma,t} - c_{i,\sigma,t-1}}{c_{i,\sigma,t-1}} \right)^2 + P_t \quad (12)$$

ここで、 P_t はダミー部門、輸出変動制約の緩和、生産能力制約の緩和に対するペナルティ項を表す。この目的関数に対して、将来の労働力供給を満たす雇用制約、過去の変動幅に基づく輸出変動制約、最低限の食料需要を維持する食料需要制約、基準年の生産能力を超えないための生産能力制約、世代間で MF 削減率が過度に偏らないようにする世代間公平性制約を設定した。世代間公平性制約では、部門別の一人当たり家計消費に誘発される全資源合計 MF について、前期からの変化率がすべての世代で等しくなるように制約した。厳しい物質削減目標の下では、これらの制約を同時に満たすことが困難になる場合があるため、Hata et al. (2025) と同様に、ダミー部門、輸出変動ダミー、生産能力超過ダミーを導入した。

これらのダミー変数には目的関数内で大きなペナルティを課し、物質削減目標を満たしつつ、社会経済的制約からの逸脱を最小化するようにした。

物質削減目標の厳格化が GHG 排出量および消費構造に与える影響を評価するため、3つの物質フロー削減シナリオを設定した。すべてのシナリオに共通して、将来人口・世帯構成、電力部門の脱炭素化、および物質効率化戦略を外生条件として導入した。の電力部門の脱炭素化については、日本の 2030 年および 2050 年の将来エネルギーミックスに基づき、電力部門の GHG 排出原単位を設定した。その他の年については、2030 年および 2050 年の値を用いて線形補間した。物質効率化戦略はすべてのシナリオに共通して導入し、Hata et al. (2025) と同様に、次世代自動車に対する物質効率化戦略、住宅・非住宅建築物の長寿命化、循環利用率の向上を組み込んだ。

ベースラインシナリオとして、MR over 0.5%シナリオを設定した。このシナリオでは、第五次循環型社会形成推進基本計画における MF/capita 目標から年率換算した削減率に基づき、MF/capita を少なくとも年率 0.5%削減する制約を課した。これは、日本の現行物質フロー目標の延長に相当するシナリオとして位置づけられる。次に、より野心的な物質削減目標として、MR over 2%シナリオを設定した。このシナリオでは、MF/capita を少なくとも年率 2%削減する制約を課した。2%という削減率は、Hata et al. (2025) において、2050 年 CN 達成には現行の物質管理目標を大きく上回る物質削減が必要であることが示されたことを踏まえ、現行目標よりも厳格な削減水準として設定した。さらに、MR over 2% with NDC シナリオでは、MR over 2%シナリオの条件に加えて、日本の NDC および 2050 年 CN 目標と整合する国内 GHG 排出制約を追加した。排出制約は、日本の NDC で目標が設定される 2030 年、2035 年、2040 年、および 2050 年に適用した。2050 年については、森林吸収および CCS の導入可能性を考慮したネットゼロ達成を CN 目標と

して扱い、国内 GHG 排出量の上限を設定した。

[5]介護由来のカーボンフットプリント削減と労働力確保に向けた検討

前年度の研究において実施した介護需要由来の CF の構造経路分析の結果を踏まえ、今年度は電力のグリーン化に着眼した分析を行った。また、高齢化によって同時に増えゆく介護需要を満たす上で必要となる労働力構造についても検討するために、以下の手法を実施した。

本研究では、鷲津・中野 (2021、2022) が開発した次世代エネルギーシステム分析用産業連関表 (Input-Output Next Generation Energy System: IONGES) と国勢調査における産業部門別労働者の情報の接続を図った。IONGES は 2015 年の国内 IO 表をベースに、総務省が公表する国内 IO 表には表記されていない低炭素技術に関する部門拡張を施した単地域 IO モデルである。IONGES には「組込表」と「想定表」が存在する。前者では基準とする 2015 年の低炭素技術のサプライチェーン、後者では第 6 次エネルギー基本計画において想定される 2030 年の同技術のサプライチェーンが、それぞれ表現されている (低炭素技術以外のサプライチェーンについては、2015 年国内 IO 表と同一)。以降、本研究では、前者と後者のモデルを、それぞれ 2015IONGES と 2030IONGES と呼称する。さらにここでは後述する将来シナリオ推計のために、先行研究 (Nansai et al. 2008; Hata et al. 2022) の手法に基づいて各 IONGES に対して固定資本形成部門の内生化を図った。

次に、それらの 2つの固定資本形成内生化 IONGES (2015FC-IONGES および 2030FC-IONGES) をもとに導出した内包型 CO₂ 排出原単位に、前年度に推計した将来介護需要を乗じることで、エネルギー基本計画に沿ったエネルギー移行が起きなかった場合 (BaU シナリオ) と起きた場合 (エネルギー移行シナリオ) の同需要由来 CF の比較を可能とした。また、上記の固定資本形成内生化 IONGES に部門別労働力を接続することで、シナリオ別内包型労働力 (ここでは雇用者

数) 原単位の内訳を推計した。これにより、将来の介護需要を満たすために介護現場とそのサプライチェーンにおいて必要となる直接・間接的労働力(労働力フットプリント: LF)について見積もった。

最後に、将来の介護サービスにおける最終需要については、Kira et al. (2025) において要支援・要介護度別に推計した各介護需要の合計における変化率を、各 IONGES の介護部門における最終需要計に適用して推計した。

C. 研究結果

[1] 2020 年のヘルスケアサービスに伴う GHG 排出量の推計と脱炭素化オプション別への分解

2020 年の日本のヘルスケア全体の固定資本形成を含む国内サプライチェーンを通じた GHG 排出量は 80MtCO₂e と推計された。これは 2020 年の日本全体の GHG 排出量 (MtCO₂e) の 6.9% に相当し、2020 年の人口 (1 億 2614 万人) 一人当たりで見ると約 0.6tCO₂e/cap である。図 1 に示す排出の内訳を見ると、病院、一般診療所、歯科、調剤部門を含む医療サービスによる寄与が最も大きく、全体の 75% (60MtCO₂e) を占める。病院に起因する排出量が 24% と医療を占め、次に続く一般診療所と調剤は同程度の 11% の寄与を持つ。しかし、家計が薬局で購入する医薬品 (OTC) や輸出される医薬品による排出 (4MtCO₂e) を含めると、医薬品全体による排出量は、一般診療所による排出量を超える。

医療が直接間接的に必要とする固定資本形成は 21MtCO₂e の排出を生み出し、医療サービスに起因する排出を消費財のみを含む 39MtCO₂e から 60MtCO₂e へと約 1.5 倍に押し上げる。医療の内訳となる病院、一般診療所、歯科診療、調剤を比較すると、病院は 1.53 倍、一般診療所と調剤は共に 1.48 倍、歯科診療は 1.88 倍と消費財のみの排出と比べて増加し、歯科診療の固定資本形成を含めた GHG 排出量の把握と管理の意義は大きい。

介護サービスは全体の 17% を占める 14MtCO₂e を生じ、高齢化社会を背景にヘルスケアに関わる排出要因として無視できない要因である。訪問型の施設サービスを除く介護の方が施設サービスによる介護よりも消費財による排出量は大きい。固定資本形成に伴う排出はそれぞれ 1.3MtCO₂e と 2.5MtCO₂e であり、施設サービスの排出が 2 倍程度ある。医療と同様に、施設サービスによる介護も固定資本形成による排出増加率が高い。

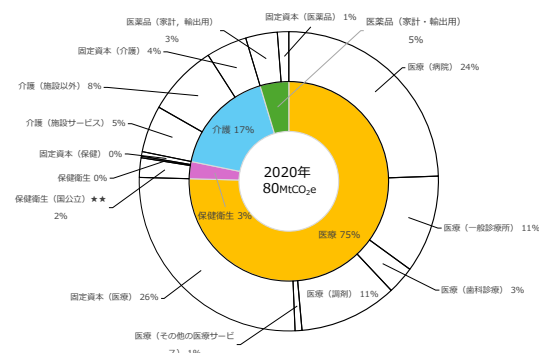


図 2: 2020 年の日本のヘルスケアサービスのカーボンフットプリント

医療サービスによるカーボンフットプリントを 30 個の脱炭素化オプションの寄与に分解すると、オプションの寄与は全体の 98% の排出を占めた。特に寄与の大きいオプションとして「26: 医薬品の NHS 基準達成」, 「8: 全国的な電力脱炭素化」, 「1: 施設 (電気) の最適化」, 「29: 固定資本 (医療)」が挙げられる。続いて「10: 車両・職員車両の電動化」, 「5: 施設 (廃棄物処理) の最適化」, 「15: 食品廃棄物残渣」, 「24: 貨物輸送の電動化」, 「24: 脱炭素技術革新 (鉄鋼)」, 「28: 吸入器 (MDI) 削減に向けた長期計画」が上位 10 個に入るが、寄与の大きさに顕著な違いはない。

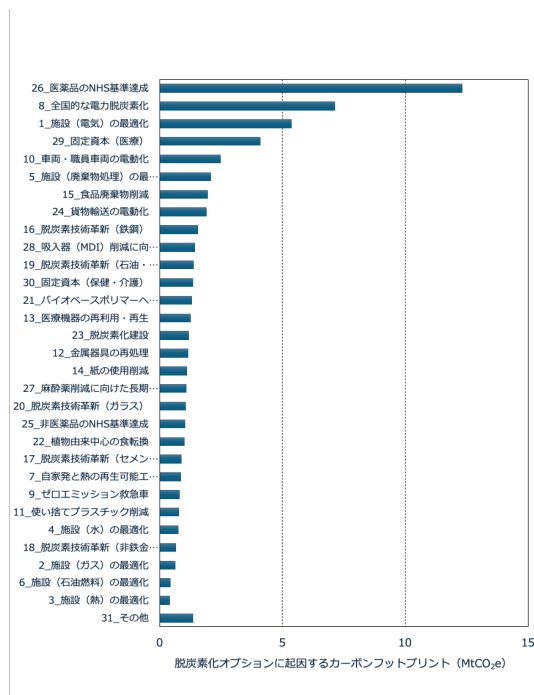


図 3: 日本の医療のカーボンフットプリントに対する脱炭素化オプションの寄与

[2]自治体別のヘルスケア関連需要に伴うカーボンフットプリントの算定

2014 年の年代別の平均的なヘルスケア由来のカーボンフットプリントを推定した。その結果、年齢があがると、ヘルスケア由来のカーボンフットプリントが緩やかに上昇することが分かった(図4)。ただし、これは、世帯の他の構成員を含むものであるため、単身世帯に限ると、90代のヘルスケア由来のカーボンフットプリントが大きく上昇することが明らかになった。

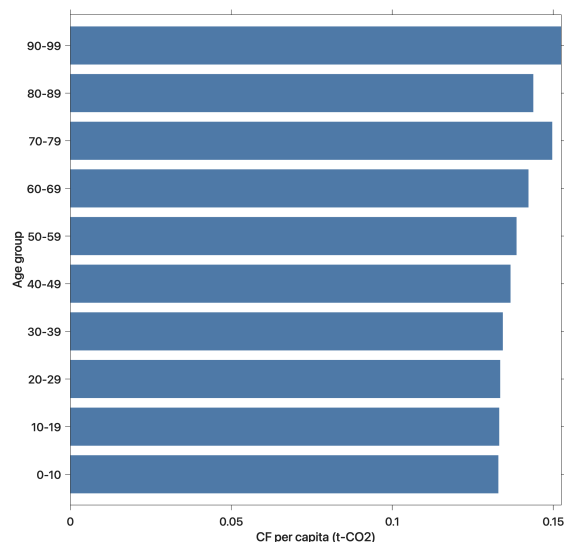


図 4: 2014 年の年代別ヘルスケア由来のカーボンフットプリント

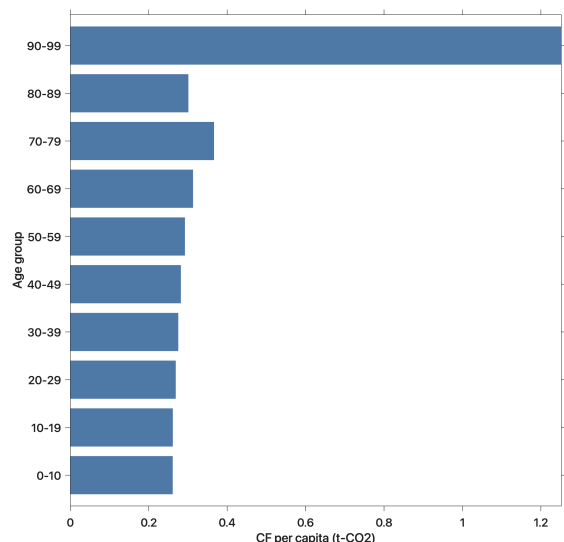


図 5: 2014 年の単身世帯のヘルスケア由来のカーボンフットプリント

[3] 医療機器の運用効率に着目した CO₂削減可能量の算定

都道府県別 CT および MRI の運用効率性

図 6 は、2020 年における日本の 47 都道府県の CT および MRI の運用効率性を示した地図である。本図において、色が濃いほど効率性が高いことを示す。

2020 年における CT の平均運用効率性は 0.72 であり、全国平均で約 28%の改善余地が存在することが示された。また、千葉、東京、神奈川、長野、岐阜、奈良の 6 都県において CT の運用が効率的であった一方、

残りの 41 都道府県（約 87%）では非効率な運用が確認された。2020 年において最も効率性が低かったのは宮崎県であり、運用効率性は 0.42 であった。

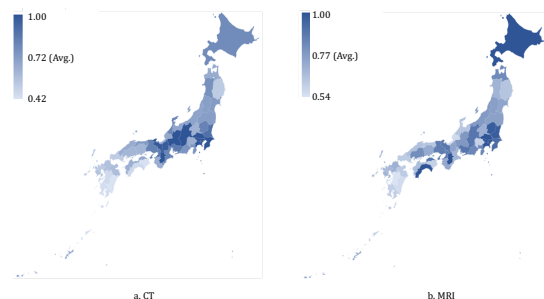


図 6. 2020 年における各都道府県における CT と MRI の運用効率性

MRI については、2020 年の平均運用効率性は 0.77 であり、全国平均で約 23%の改善余地が示された。また、北海道、埼玉、東京、神奈川、奈良、高知の 6 都道県において効率的な運用が確認された一方、残りの 41 都道府県（約 87%）では非効率な運用が見られた。2020 年において最も効率性が低かったのは熊本県であり、人口密度順位 27 位の中規模地域で、運用効率性は 0.54 であった。これに対し、人口密度が高い大都市である東京（1 位）および神奈川（3 位）は、2020 年において CT および MRI のいずれにおいても効率性スコア 1.00 を示した。

運用効率性の決定要因

表 1 に Tobit 回帰分析の結果を示す。分析の結果、各都道府県の人口は CT および MRI の運用効率性に対して正で統計的に有意な影響を与えることが明らかとなった。一方で、高齢化率、都道府県所得、公立病院比率、診療放射線技師および医師の所得といったその他の要因は、CT および MRI の効率性に対して統計的に有意な影響を示さなかった。ただし、国民医療費については、CT の効率性に対して負で統計的に有意な影響が確認された。

本 Tobit 分析における最も重要な知見は、人口規模の小さい都道府県において CT および MRI の運用効率性が低下する傾向にある点である。日本では高齢化の進展が今後も

継続すると見込まれる一方で、総人口は減少すると予測されている。その結果、多くの地域で人口減少が進行し、とりわけ地方部においてその傾向が加速すると考えられる。

このような人口動態を踏まえると、CT および MRI の設置台数を今後も増加させ続けることは、人口減少が見込まれる地域において機器の運用効率性を著しく低下させる可能性がある。したがって、医療機器の導入および配置を検討する際には、将来の人口動態を十分に考慮することが不可欠である。

表 1. トービット回帰分析の結果

Independent variable	CT	MRI
β_0 (CONSTANT)	1.45*** (3.20)	0.83* (1.93)
β_1 (AGING)	0.17 (0.15)	1.38 (1.26)
β_2 (INCOME)	-0.20 (-0.24)	-0.36 (-0.44)
β_3 (NHE)	-2.50*** (-2.86)	-1.25 (-1.49)
β_4 (HR)	0.28 (0.98)	-0.26 (-0.93)
β_5 (IRT)	0.12 (0.35)	0.40 (1.19)
β_6 (IRA)	-0.39 (-0.33)	-1.30 (-1.18)
β_7 (POP)	0.40*** (3.14)	0.42*** (3.51)

注：独立変数の t 値を括弧内に示す。また、***と*はそれぞれ 1%水準および 10%水準で統計的に有意であることを示す。

医療分野の脱炭素化に向けた CO₂削減ポテンシャル

製造段階における直接・間接の体化 CO₂ 排出量と、使用段階における 10 年間の電力消費に伴う CO₂排出量の双方を考慮した結果、2020 年における全国のライフサイクル CO₂削減ポテンシャル (LC-CO₂ RP) は、CT で約 134 万 t-CO₂（人口 100 万人当たり

10,889 t-CO₂)、MRI で約 149 万 t-CO₂ (人口 100 万人当たり 12,064 t-CO₂) と推計された (図 7)。CT と MRI を合わせた削減ポテンシャルは、合計で約 283 万 t-CO₂に達する。

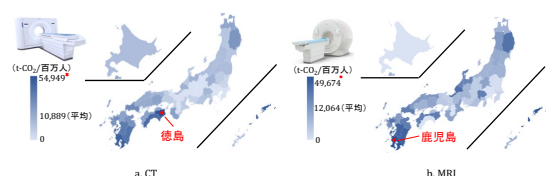


図 7. 非効率性改善に伴うライフサイクル CO₂ 排出量の削減ポテンシャル

ここで、医療分野の脱炭素化に対する影響を評価するため、LC-CO₂ RP が医療分野全体の CO₂排出量に占める割合を算出した。医療サービスの最終需要によって誘発される直接・間接の CO₂排出量は 4,150 万 tとされており、不要な CT および MRI 機器に起因する LC-CO₂削減ポテンシャルは、2020 年時点でその約 7%に相当することが明らかとなった。

日本医師会が示す医療分野における CO₂ 排出削減目標は、単位当たり年間 1.6%の削減である。非効率な医療機器の運用を是正することによる LC-CO₂排出削減は、この目標達成に大きく寄与する可能性がある。

時系列における運用効率性の変化

本研究結果では、全国におけるマルムクイスト指数 (MI) の幾何平均は、CT で 0.94、MRI で 0.95 であり、7 年間でそれぞれ約 6%および約 5%の効率性低下が生じたことが示された。MI の分解要素である効率性変化と技術変化をみると、効率性変化の全国幾何平均は、CT で 0.96、MRI で 1.04 であった。これは、同期間において CT の相対的運用効率性は約 4%低下した一方、MRI は約 4%改善したことを意味する。これに対し、技術変化の幾何平均は、CT で 0.98、MRI で 0.92 であり、フロンティアを形成する都道府県の効率性はそれぞれ約 2%および約 9%低下したことが示された。さらに、MI が 1 未満となった都道府県は、CT で 30 (全体の約 64%)、MRI で 33 (約 70%) に

のぼり、多くの地域で効率性の低下が確認された (図 8)。

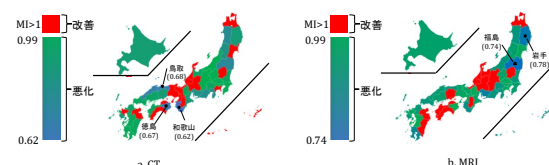


図 8. 2014 年から 2020 年までの各都道府県における CT および MRI のマルムクイスト指数 (MI)

日本では、高齢化の進展に伴う医療需要の増加と並行して、CT および MRI の設置台数が増加してきた。今後も高齢化の進行により機器数の増加が見込まれる一方、人口当たりの機器数の増加は、装置 1 台当たりの検査件数の減少を招く可能性がある。本研究の結果は、2014 年から 2020 年にかけて CT および MRI の運用効率性がそれぞれ約 6%および約 5%低下していることを示しており、今後も機器数の増加が続く場合には、1 台当たりの稼働率の低下が進み、不要な機器の増加やそれに伴う CO₂排出量の増加を招く可能性がある。本研究に基づくライフサイクル CO₂削減ポテンシャル (LC-CO₂ RP) は、2014 年で約 270 万 t-CO₂、2020 年で約 280 万 t-CO₂と推定され、約 6%の増加が示された。

以上の結果から、新規医療機器の導入には慎重な判断が求められる。特に、Tobit 回帰分析の結果が示すように、人口規模が小さく、今後人口減少が見込まれる地域においては、新規機器の導入が運用効率性をさらに低下させる可能性がある。そのため、これらの地域では新規導入を抑制し、既存機器の有効活用を優先する政策が重要である。

[4]カーボンニュートラルに整合する物質フロー転換がもたらすヘルスケアへの影響分析

脱炭素目標と整合的な医療・ヘルスケア部門における資源利用水準を分析した。まず、図 9 では、医療・ヘルスケア部門における 1 人当たりマテリアルフットプリント (MF/capita) について、2020 年時点の水

準と 2050 年時点のシナリオ別水準を比較した。

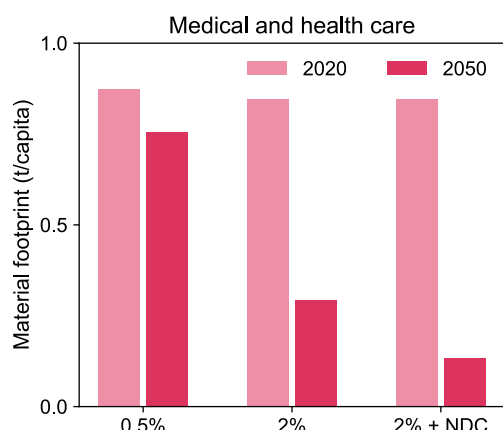


図 9: シナリオ別の 2020 年と 2050 年における医療部門の一人あたり MF

ベースラインに相当する MR over 0.5% シナリオでは、2050 年においても医療・ヘルスケア部門の MF/capita は大きく低下しないことが示された。一方で、この水準は脱炭素目標（NDC）と整合的な水準には十分に達しておらず、MR over 2% シナリオ、さらに NDC を考慮したシナリオにおいて、より大きな資源利用削減が必要となることが示された。なお、本分析ではエネルギー部門の脱炭素化を既にシナリオに織り込んでいるため、ここで示される削減要求は、エネルギー転換のみでは十分ではなく、医療・ヘルスケア部門における資源利用そのものの効率改善が追加的に求められることを意味している。

ただし、この結果は、医療提供に必要な資源を単純に削減し、医療・介護サービスの量や質を低下させる必要があることを意味するものではない。むしろ、脱炭素目標と整合的な社会を実現するためには、医療・ヘルスケア部門においても、同じ医療・介護機能をより少ない資源投入で提供するための資源効率改善が不可欠であることを示している。単純な指標として解釈すれば、NDC と整合的な水準を達成するためには、医療・ヘルスケア部門全体で約 4 倍の効率改善が必要となることが示唆された。

次に、図 10 では、2020 年を基準として、各年における資源効率改善要求度を年齢階級別に算定し、2020 年から 2050 年までの

変化を示した。ここでの資源効率改善要求度は、2020 年時点の資源投入水準を基準とし、将来の脱炭素・資源制約下で同等のサービス機能を維持するために、どの程度の効率改善が必要となるかを表す指標である。

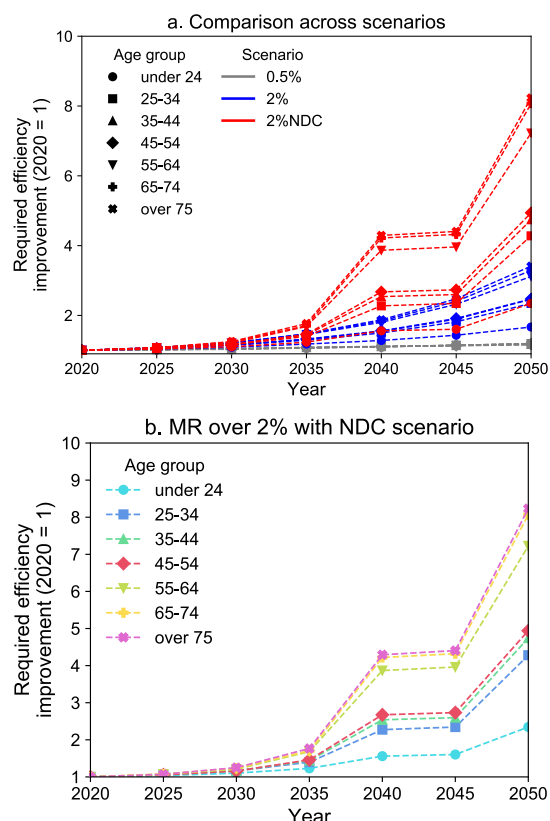


図 10: 2020 年を基準とした世代別の資源効率の改善要求度（a. シナリオ別、b. MR over 2% with NDC シナリオ）

図 10a に示すシナリオ間比較から、資源削減シナリオが厳しくなるにつれて、医療・ヘルスケア部門に求められる効率改善要求度が大きくなることが確認された。さらに、改善要求度の増加は全ての年齢階級に一樣に生じるのではなく、シナリオが厳しくなるほど、年齢階級間の差も拡大する傾向が見られた。特に MR over 2% with NDC シナリオ（図 10b）では、高齢世代、特に 55 歳以上の年齢階級において、若年世代に比べて著しく大きな効率改善が求められることが示された。これらの結果は、医療・ヘルスケア部門における資源効率改善が、部門全体の平均的な課題にとどまらず、年齢階級ごとに異なる影響を持つことを示

している。すなわち、脱炭素目標と整合的な資源利用水準を達成する過程では、医療・介護サービスへの依存度が高い世代ほど、より大きな効率改善の影響を受ける可能性がある。

[5]エネルギー基本計画に沿ったエネルギー移行における介護需要由来の CO₂ 排出量と労働力

2015FC-IONGES と 2030FC-IONGES によるシナリオ別介護需要由来 CF を図 11 に示す。なお、IONGES の排出係数は CO₂ のみを対象としており、メタンや窒素ガス等の非 CO₂ は含まれていないため、前年度の結果と直接比較することはできない点に留意する必要がある。2015 年の介護 CF は約 1310 万 t-CO₂/年と見積もられ、そこから BaU シナリオでは 2030 年に約 1720 万 t-CO₂/年、2050 年に約 1990 万 t-CO₂/年と増加した。一方で、エネルギー移行シナリオでは、2030 年に約 1320 万 t-CO₂/年に留まり、2050 年でも約 1530 万 t-CO₂/年となって、BaU シナリオにおける 2030 年の CF を下回った。

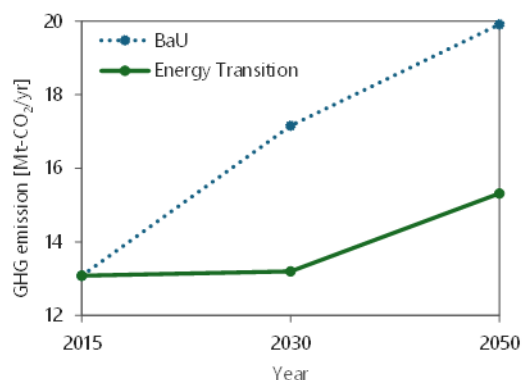


図 11: エネルギー移行の有無に着目した介護需要由来 CF の 2015 年から 2050 年までの推移 (BaU シナリオ・エネルギー移行シナリオ)

次に、同モデルから推計した LF の結果について記述する。BaU における基準年の 2015 年の介護需要が誘発する LF は、244.6 万人/年と見積もられた。そのうち 205.0 万人/年が介護部門で生じる一方、間接的に 39.6 万人/年が別の部門で必要となると考えられる。その内訳は、分類不明の産業 (6.6

万人/年)、商業 (5.4 万人/年)、その他の建設業 (5.3 万人)、その他の対事業所サービス (4.4 万人/年)、農業 (2.0 万人/年)と続いた。さらに、BaU における 2050 年の LF は、2015 年から膨れ上がり、介護部門では 320.9 万人/年まで増加すると見積もられた (それ以外の部門では 63 万人/年)。なお、エネルギー移行シナリオにおいても、介護部門で直接要する労働力は BaU とほぼ同等であるが、サプライチェーン全体では約 4%減少した (2050 年で約 15 万人差)。

D. 考察

[1] 2020 年のヘルスケアサービスに伴う GHG 排出量の推計と脱炭素化オプション別への分解

ヘルスケアのサプライチェーンを経由した GHG 排出量は 2011 年や 2015 年推計値と比較して大きな変化はない。2020 年はコロナ禍であったが、コロナ以外の医療需要が抑制されたことが考えられる。排出量には固定資本形成に関わるサプライチェーンからの排出を含めると含めない場合と比べて医療サービスでは 1.5 倍程度の排出量になることから、固定資本形成を含めて脱炭素化の計画を立案する必要性を示唆する。

ヘルスケアのサプライチェーンを通じた排出量を設定した脱炭素オプションが寄与する排出量に分解する手法を開発し、英国 NHS を参照した 30 個のオプション別に分解した。NHS の脱炭素オプションは日本のヘルスケアに対してもカーボンフットプリントの 98%を捕捉しており、日本でも参考すべき対策群と言える。オプションの中でも、医薬品の脱炭素基準、脱炭素電力、施設の省エネ、固定資本の寿命延長は優先オプションと同定されたが、これらはサプライチェーン、全国的取り組み、医療現場対策 (商品、資本) への関与を必要とするものであり、医療と広範なステイクホルダーとの協働が必須であることを指す。一方、上記の 4 つオプション以外は効果に大きな差はないため、実行可能性の高いオプションからの実施は適切である。

[2]自治体別のヘルスケア関連需要に伴うカーボンフットプリントの算定

本研究結果は、今後の高齢化に伴って、ヘルスケア由来のカーボンフットプリントが大幅に増加する可能性を示唆している。特に、90歳以降の人口増加に伴って、医療費、介護費、ヘルスケア関連のものの支出（大人用おむつ、車椅子など）が大幅に増加する可能性が高い。さらに、平均寿命の延伸が必ずしも健康寿命の延伸を伴わない場合、医療・介護依存期間の長期化を通じて、ヘルスケア関連排出がさらに増加する可能性がある。一方で、予防医療や健康寿命延伸政策は、将来的なヘルスケア需要そのものを抑制し、結果としてカーボンフットプリント削減にも寄与する可能性がある。

[3]医療機器の運用効率に着目したCO₂削減可能量の算定

これら医療機器の運用効率性のさらなる低下を防ぐため、本研究では医療機器の導入に関する規制の導入を提案する。特に、地域内における医療資源の適切な配分を担う権限を有する地方自治体を対象とし、人口規模が小さく将来的に人口減少が見込まれる都道府県において重点的に対応することが重要である。CTおよびMRIの運用効率性を改善する方法として、運用効率性の低い地域における不要な機器の削減が挙げられる。しかし、CTおよびMRIは臨床的に有用な機器であることから、単純な削減ではなく、医療ツーリズムの活用や医療機関間での共同利用の促進など、効率的な活用を図る方策が望ましい。

新規機器導入に関する規制

都道府県は、以下の条件を満たす場合に新規機器の導入を慎重に検討すべきである。

- 運用効率性が低い
- 年々効率性が低下している（MI<1）
- 人口規模が小さい
- 将来的に人口減少が見込まれる
- 検査供給量が需要を上回っている

ここで、第5の条件である「検査供給量」は、当該地域における現実の検査実施量を指す。一方、「需要」は、全国の年齢・性別

別の受診率に基づいて推計される期待検査件数である。

例えば、2020年において人口密度順位40位の和歌山県は、CTおよびMRIともにMIが最も低く、2014年から2020年にかけて効率性の大幅な低下が確認された。CTの効率性は0.64であり、約36%の改善余地が存在する。また、MIは0.62であり、約38%の効率性低下が示された。さらに、実際の検査件数と推計需要との差を需要で除した過剰供給率は21%と推定され、過剰検査の可能性が示唆される。このような地域では新規導入を抑制し、既存機器の活用促進が求められる。

医療ツーリズムの活用

効率的な機器活用の一例として、運用効率性が低い地域において外国人患者を対象とした医療ツーリズムを推進することが挙げられる。医療ツーリズムとは、医療サービスを受ける目的で他国へ渡航する行為を指す。グローバル化と医療技術の進展に伴い、この分野は急速に拡大している。日本は医療機器の充実度および医療サービスの質の高さから、有望な医療ツーリズムの受入国とされている。また、2020年時点で最大約43万人の外国人医療需要が見込まれている。CTおよびMRIは診断だけでなく健康診断にも利用されるため、効率性の低い地域では医療ツーリズムの積極的な推進により機器利用を促進することが可能である。

医療機関間での共同利用

もう一つの方策として、医療機関間での機器共同利用が挙げられる。運用効率性の低い地域においても、検査需要が高く予約が困難な医療機関と、機器が十分に活用されていない医療機関が共存している場合がある。このような場合、機器利用状況の情報共有を行い、検査件数の少ない医療機関へ患者を紹介するなどの連携を促進することで、地域全体としての機器利用効率の向上が期待される。

[4]カーボンニュートラルに整合する物質フロー転換がもたらすヘルスケアへの影響分析

本分析の結果は、NDC を含む脱炭素目標を達成しながら、今後も適切な医療・介護サービスを提供し続けるためには、医療・ヘルスケア部門における大幅な資源効率改善が必要であることを示している。医療部門の環境対策では、施設の省エネルギー化、再生可能エネルギーの導入、医薬品・医療機器のサプライチェーンにおける GHG 排出削減などが重視されてきた。しかし、本研究の結果は、エネルギーの脱炭素化を織り込んだ場合であっても、資源利用量そのものが重要な制約となり得ることを示唆している。

したがって、医療・ヘルスケア部門の環境対策では、GHG 排出削減に加えて、省資源化、材料代替、製品寿命の延長、再使用・再製造、廃棄物削減、調達構造の見直しなど、資源利用に直接関わる対策を統合的に検討する必要がある。特に、医療機器、医薬品、消耗品、施設・設備、介護関連サービスは、サプライチェーンを通じて多様な資源投入を必要とするため、医療の質や安全性を維持しつつ、同等の機能をより少ない資源投入で提供する仕組みが重要となる。

一方で、医療・ヘルスケア部門の資源効率改善は、単純な資源投入削減として実施すべきではない。医療・介護サービスは人々の健康と生活の質を支える基礎的サービスであり、特に高齢世代ほどその利用量が多い。本分析でも、脱炭素・資源制約が厳しくなるほど、高齢世代により大きな効率改善要求が生じる傾向が示された。したがって、資源効率改善策は、医療サービスの利用抑制やアクセス制限ではなく、同等またはより高い健康アウトカムを少ない資源投入で達成するための制度的・技術的改善として位置づける必要がある。

[5]介護需要における脱炭素化とサービスの維持に向けた方策

本分析によって定量化された CF と LF は、2015 年から電源構成を含むサプライチェー

ンが変化せず、介護需要のみが要支援・要介護者に応じて増加した場合に生じる直接・間接 CO₂ 排出量および同労働力と、2030 年時点で目標と設定されている電源構成および電動車や充電ステーション等の設備が導入されているサプライチェーン下における同排出量と労働力を表す。したがって、その差分は、社会全体のグリーンエネルギー化が介護需要 CF に及ぼす影響と考えることができる。本分析の結果、第 6 次エネルギー基本計画におけるエネルギー移行が生じた場合、同じ介護需要であっても 2030 年時点で 400 万 t-CO₂ 近く、2050 年時点で 500 万 t-CO₂ 近く CO₂ 排出量を削減することが示唆された。後者では依然として約 1500 万 t-CO₂ の CF が発生することになり、同年のカーボンニュートラル目標に向けては、さらなる脱炭素化に取り組む必要がある。

一方で、高齢化に応じて増えることが見込まれる介護需要を支える労働力 (LF) については、2015 年からサプライチェーン全体で約 142 万人増やす必要が生じると見積もられた。このうち、介護現場では約 125 万人の増員が必要となるが、それ以外の部門においても約 17 万人の労働力が追加が必要となる。すなわち、例えば介護施設等における食事提供の増加に応じて、その原料に関わる農業需要の間接的な誘発による労働力といった、一見認識されづらい労働力の確保についても重要な検討課題であると考えられる。特に農業部門では 2050 年時点で 2015 年比 1.1 万人の労働力が追加が必要になると推計され、すでに高齢化が進んで後継者に悩む同部門に対する労働力不足に拍車をかけかねない。

以上の点から、エネルギー技術の改善だけに依存した介護分野の脱炭素戦略の効果は限定的であり、気候変動対策の面からも介護需要そのものを無理なく抑制していく必要があることが明らかとなった。今後は「通いの場」等の介護予防策における介護需要への影響を定量化するとともに、その予防策の実施による CF を同時に算定することで、それぞれを差し引いた正味の GHG 排出削減効果を明らかにすることが求められる。

E. 結論

本研究では、2020 年の日本のヘルスケアサービスに伴う国内で生じるカーボンフットプリントを算定し、顕著な減少傾向は見られないこと、固定資本形成に関連する排出はフットプリントに対する影響が大きいことを示した。

また、市区町村別のヘルスケア関連およびその他の消費に伴うサプライチェーン全体での将来排出推計を改良し、消費項目や市区町村と GHG 排出量との関係を明確にした。

日本の各都道府県における CT および MRI の運用効率性を横断的および時系列的に定量評価した。特に、非効率な運用の改善に基づくライフサイクル CO₂削減ポテンシャルを定量的に推計した。その結果、不要な機器運用に起因する CO₂排出量は医療分野全体の約 7%に相当することが明らかとなった。

2050 年に日本がカーボンニュートラルを達成する経路として、電力の脱炭素化と次世代自動車に対する物質効率化、住宅・非住宅建築物の長寿命化、循環利用率の向上を仮定すると、2050 年までにヘルスケアに求められる資源利用の効率は最大で 8 倍程度向上する必要があると示唆された。

最後に、電力を中心に国のエネルギー基本計画に沿ったエネルギー移行が起きた場合に見込まれる、介護需要に伴うサプライチェーン全体の GHG 排出量の削減量を推計した。加えて、将来にわたり介護需要を維持していくために必要な直接・間接労働力についても定量化を試みた。介護におけるカーボンニュートラル化には、被介護者の心身と少子高齢化に伴い切迫する労働力に鑑みて、可能な限り低炭素な方法における介護予防策の推進が重要であると考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Ushijima, D. et al., 2025. Significant CO₂ emission reduction potential in the healthcare sector: Evidence from Japan. *Journal of Environmental Management* 391, 126372.

Kira N., et al. 2025. Detailed carbon footprint of long-term care in an aging society. *Environmental Research Letters* 20(8), 084014.

2. 学会発表

畑奨, 南齋 規介, 重富 陽介, 鬼頭 みなみ, 中島 謙一 (2026) カーボンニュートラルと整合する物質フロー転換がもたらす世代別の消費影響, 第 21 回日本 LCA 学会研究発表会, 東京

南齋 規介, 畑奨 (2026) ヘルスケアのカーボンフットプリントを対象とした脱炭素化対策別の構造分解, 第 21 回日本 LCA 学会研究発表会, 東京

笠原正幸, 重富陽介, 梶有貴, 池田俊也, 近藤克則: 要支援・要介護認定リスク評価尺度に基づく将来の介護需要に伴う サプライチェーン温室効果ガスの実証分析, 第 21 回日本 LCA 学会研究発表会, 東京

重富陽介, Andrew Chapman, 稗貫 峻一: 2050 年に向けた国内サプライチェーン労働力需要の検討, 第 21 回日本 LCA 学会研究発表会, 東京

Narumi Kira, Yosuke Shigetomi (2025) Evaluating the carbon footprint and financial effects of expanding long-term care prevention policies in Japan, The 1st GREENIE Conference, Taipei.

Narumi Kira, Yosuke Shigetomi Detailing the structure of carbon footprint focusing on long-term care demand in Japan, The 31st International Input-Output Association Conference, Maldives.

Narumi Kira, Yosuke Shigetomi (2025) Analyzing the carbon and economic impact of introducing preventive care policies in Japan, The 12th International Conference on Industrial Ecology.

重富陽介 (2025) 日本の高齢化に伴う需要から見たプラネタリーヘルス研究の一考察, プラネタリーヘルス Cafe & Bar, オンライン

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし