

課題名 S-11-2 資源環境制約の観点からの目標と指標の提示

課題代表者名 馬奈木 俊介（九州大学）

研究実施期間 平成25～27年度

累計予算額 83,124千円（うち平成27年度：26,624千円）
 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 包括的富、資源制約、幸福度、生物資源、鉱物資源

研究体制

- (1) Beyond GDP目標と指標の提示（九州大学）
- (2) 資源・環境制約下での開発及び成長実現のための目標や指標の提示（上智大学）
- (3) 地球システムからの制約の検討（生物資源に焦点を当てた検討）（立命館大学）
- (4) 地球システムからの制約の検討（鉱物資源に焦点を当てた検討）（東京大学）

研究協力機関

日本女子大学、関西大学、大阪大学

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

1944年ブレトン・ウッズ協定以来、国内総生産（Gross domestic production, GDP）は一国の経済発展を測る主要な指標として世界各国に普及してきた。しかしながら、経済の安定成長を目的とする指標設計であったため、環境負荷や自然資源の減損など非経済的要素は考慮されていなかった。1972年にローマクラブが発表した報告書『成長の限界』では、「経済の拡大成長が続けば、自然への負荷が増大し、100年以内に制御不能な危機に陥る可能性がある」と指摘されている。また、2009年にRockströmらは9つのプラネタリーバウンダリー（Planetary Boundaries）を定義し、そのうち気候変動、生物多様性の損失、窒素循環の問題の3つが既に地球の境界を超えていることを示した。さらに、2012年6月には「国連持続可能な開発会議（通称リオ+20）」で自然の富等を図るための科学的知見に基づいた厳格な方法論による指標の開発の必要性が確認された。このように、長期にわたってGDPの成長を目標としてきた国際社会は既に深刻な地球環境問題に直面しており、持続可能な発展のために早急な対応が求められている。そのためには、資源環境総量に基づく新たな成長目標や指標の指導による社会システムの転換が必要である。

環境研究総合推進費 S-11(2)

資源環境制約の観点からの目標と指標の提示

研究開発の背景と課題

- > Planet Boundaries: 9つプロセスのうち3つがすでに地球の境界を超えている
- > 社会開発の尺度としてのGDPの限界
- > 開発目標MDGsの達成による環境への影響



資源環境総量に基づく成長目標や指標による社会発展のあり方の転換が必要

図2-(1) 研究開発の背景と平成25年度の研究開発

2. 研究開発目的

上記の背景を踏まえ、本テーマでは、資源環境制約の下での持続可能な成長・開発に関するビジョンや方向性を描くために、科学的根拠に基づいた目標と指標を提示することを目的とする。具体的には、資源環境制約に重点を置き、計量経済学的手法を用いて、持続可能な開発のための目標の提示と指標の精緻化を試みる。また、実証に基づく政策立案に資する観点から、提示した指標を用いた目標の実現可能性を実証研究で検証し、ライフスタイルの変更やグリーン経済実現のための政策提案を行う。

統合的な持続可能性目標の設定および指標の作成には各国における経済・環境・社会の現状を把握することが必要であるが、国や年次によっては入手が困難なデータが少なくはない。そこで、本研究期間では、本テーマでは、図2-(1)に示したように、まず、資源環境のデータベースの応用方法を確立し、世界規模のデータベースの作成に挑戦する。次に、持続性の継続指標の価値面での発展を試みる。また、食料、資源、環境制約の値を算出し、持続可能性指標の構築に導入する。さらに、市民サイドからの合意レベルを調べるためのアンケート票を設計する。

本テーマの全体目標は、資源環境制約のデータベースの構築及び持続可能な社会発展モデルの構築である。そのため、各サブテーマによるデータや情報を収集し、モデルの構築に努める。さらに、S6、S8やS10などのプロジェクトと連携し、関連する情報を共有する。既存の目標や指標について収集したデータをテーマ1に提供し、全プロジェクトのデータベース構築に資する。

3. 研究開発の方法

(1) Beyond GDP目標と指標の提示

平成25年から平成27年の3年間の研究を以下のステップ・方法に基づいて実施した。

- 1) マルチプルインピテーションによるデータベース構築
- 2) 自然資源の利用効率性や廃棄物排出強度の把握
- 3) 資源利用効率に関する数値目標の提示と達成するための経済コストの推計
- 4) グローバルな視点から見た資源の価値
- 5) 新国富と中心目標の関係性分析

(2) 資源・環境制約下での開発及び成長実現のための目標や指標の提示

平成25年から平成27年の3年間の研究を以下のステップ・方法に基づいて実施した。

- 1) 国際的に関心の高いターゲットまたは専門家の見解による指標・目標を、ヒアリング調査を通して抽出。この要素の抽出結果に基づき、以下の項目を含むアンケート調査票を設計しアンケート調査を実施。
- 2) 日本でアンケート調査を実施。日本のアンケート調査の結果を分析。
- 3) 海外(タイ、アメリカ、インドネシア)においてアンケート調査を実施。海外の調査結果を日本の調査結果と比較。
- 4) 特定のステークホルダー(「将来世代」の代表として大学生及び大学院生)に焦点を絞って持続可能な開発の課題に関する関心を抽出。
- 5) 「持続可能な開発のための2030アジェンダ」として新しく採択されたSDGsに向けた提言

(3) 地球システムからの制約の検討(生物資源に焦点を当てた検討)

- 1) 生物資源の利用と4つのプラネタリーバウンダリー(土地利用の変化、生物多様性の損失、窒素とリンの循環、世界の淡水利用)の定性的関係を整理した。
- 2) 生物資源利用のうち食料とバイオ燃料に焦点を当て、今後の食料・バイオ燃料の需要とそれに関わる農地面積需要量を推計した。このため、世界の184の国・地域、96品目の食料用の作物を対象として、今後の食料用作物需要量の推計を行うとともに、今後のバイオ燃料政策を考慮したバイオ燃料用作物需要量の推計を行い、これらの作物を生産するために必要な耕作地面積を推計した。また、家畜の生産に必要な牧草需要量の推計を行い、これをもとに牧草地面積を推計し、耕作地面積と合計することで農地面積需要量を推計した。

- 3) 生物資源利用による土地利用の変化への影響を検討するため、2)において推計した農地面積需要量をもとに、世界各国の土地利用の変化の推計を行った。
- 4) 農地面積の拡大による林地面積の減少が生物多様性の損失に与える影響を検討するため、3)において推計した林地面積の減少によって生物種の絶滅数の期待値を推計するモデルを作成し、影響の推計を行った。
- 5) 農地面積の拡大による肥料使用がリンの循環に与える影響を検討するため、2)において推計した農地面積需要量をもとに、水圏へのリンフローを推計するモデルを構築し、影響の推計を行った。
- 6) 農地面積の拡大が農業用の淡水利用に与える影響を検討するため、2)で推計した各国の将来の食料需要をもとに、将来の淡水利用の変化を推計するモデルを構築し、影響の推計を行った。
- 7) 土地利用の変化と生物多様性の損失について、これらをプラネタリーバウンダリー内に収めるための対策の検討を行うことで、持続可能な生物資源利用の在り方と生物資源利用に関わる適切な持続可能な開発(SD)指標の検討を行った。

(4)地球システムからの制約の検討(鉱物資源に焦点をあてた検討)

本研究は鉱物資源からみた持続可能な開発に対する制約の検討である。しかしながら、鉱物資源と言ってもその種類は多様であり、これが社会の持続可能性に与える影響の在り方も様々である。そこでまず研究の第一段階として、既存文献等から、資源そのものの制約と、それに起因する環境影響による制約の2つの視点から要検討鉱種を抽出する作業を行った。環境影響については、プラネタリーバウンダリーの中で検討されている全ての項目について各種鉱物の利用がどの程度の影響を与えるかを検討し、重要なものについての影響度の高いものが、鉱物として特に注目されるべきであると考え整理を行った。

こうした整理の後、特定の鉱物に対して具体的な需給をシミュレーションするモデルを開発し、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に対して阻害要因となりうるかどうかの検討を行った。まずその第一段階として、エネルギーシナリオをおき、そのために必要なエネルギーインフラ構築のための銅需要を予測した。敢えて極端なシナリオ設定もおくことによって、急速なエネルギーインフラ構築がどのような銅需要を引き起こすのかについて検討を行った。これは、SDGs達成のために基本的な項目だと考えられる、エネルギーアクセスの改善が実施可能なものかどうかを検討するものである。

次にこの需要側からの検討をより意味のあるものとするために、銅供給に関する詳細なモデルの構築を実施した。銅に関しては、Peak Copperの議論が見られるなど、その供給の限界が公に議論されつつある現実がある。そこで、既存の文献等から得られる資源量に関する精緻なデータの中で最も大きな資源量を持つと考えられる(良く言われる埋蔵量よりはるかに大きい)データベースを元に、現状では開発に着手されていないような鉱山の開発までを視野に入れた供給モデルの構築、結果の検討を行った。

需要側、供給側双方の検討に際してモデリングのアプローチとしてはシステムダイナミクス的なモデルを用いた。どちらもしサイクルは陽に描かれている点が、既存の検討に対する明らかな差別点でもある。また、供給サイドについては、全ての鉱山(これから新規に開発されるものも含め)が、それぞれ独立な生産に関する意志決定を行うような、非常に詳細なボトムアップ的なモデルである点も特徴になる。結果としては銅の供給は十分制約条件となり得るとの結論を得た。詳細については結果の節に示す。

4. 結果及び考察

(1)Beyond GDP目標と指標の提示

本研究では、構築したデータベースを用いて、環境資源利用の限界や経済成長に与える影響などに基づき廃棄物削減に関する数値目標の設定や既存目標の補充など政策提言を行った。具体的には、資源利用の効率性や廃棄物排出強度などの観点から、ゼロドラフトに挙げられた目標や指標により詳細な目標設計に関する提言ができた。その上で最終的にローカルな生活者の視点を織り込んだポスト2015年開発目標の策定に向けて新しい指標・目標を提案すると共に策定後にどのようにグローバルなレベルとローカルなレベルを結ぶことができるか提案をした。さらに、

貧困撲滅など中心目標と統合的なSD指標や資源ストックとの関連性を明らかにし、数量的に中心目標の重要性や影響力、並びに具体的な目標設定に有力な根拠の提示ができた。そして、SDGsの今後の在り方の議論の一助として、SDGsを達成するために実施される施策が有効かどうか、また、それをどのように判断すべきかについて、「新国富」という新しい指標を活用し、その指標に必要な資本の量と価値という視点から、環境資源制約下での持続可能性の評価を実施することの必要性について議論した。具体的には、「新国富」によって、従来計測されることのなかった自然資本など新たな資本が計測され、より地域の持続可能性の評価が可能となることを示した。

今後、これらの対策が国や地域の持続可能性にもたらす効果についても「新国富」を用いて評価することが可能となるだろう。国際的な対策や地域レベルでの対策が、自国さらには世界に対してもたらす効果が、「新国富」といった指標で明確に示されれば、適切な資源管理に関する政策への第一歩へとつながることが期待される。

(2) 資源・環境制約下での開発及び成長実現のための目標や指標の提示

本研究の結果は、SDGsへの関心は先進国と途上国の間、また、個人の置かれている環境によって大きく異なることを示している。環境問題については日本においては自分の生活に直接的・短期的に影響を与える環境問題よりも国際的な環境問題である温暖化問題を最も大事な環境問題であると答えた人が多かった。このような結果になった理由として様々な理由が考えられるが、1つに理由として、近年、不規則な気温の変化、大気の乱れ、動植物への影響などが顕著になってきておりこの傾向が続いた時の将来への不安が関心度の高さとして出てきているのではないかと考えられる。また大気の汚染を大事な環境問題であると答えた人も多く、PM2.5などの大気汚染の問題が日本では高くなってきていることを示している。

環境問題の他に、ポストMDGsに関わるそれぞれの問題(差別・平等、健康、教育、貧困、法と人権、水、環境、エネルギー、国際的な課題、食糧と栄養、雇用)に対する日本の一般の人たちの関心度を調査した。例えば健康問題に関しては、精神的なストレスと適度な運動を行なうことへの関心が非常に高い一方、従来のMDGsの目標で取り上げられていた幼児死亡率の削減やHIV/エイズやマライアの蔓延防止という課題への関心は低いという結果になった。このように様々な分野において先進国と途上国の関心が異なるケースが多い可能性を示している。SDGsの実施段階において、SDGsの恩恵を受ける一般市民の関心の所在をより明らかにしていく必要がある。

SDGs合意後の現在においては、様々な分野をカバーしているSDGsの目標を包括的にモニタリングすることも大事ではあるが、これら一般市民の関心が高いとわかった重点領域・目標についてはそれぞれの国内において実施体制を強化する必要がある。現在、SDGsのモニタリングに活用をする指標の選定に関してInter-agency Expert Group on SDG Indicatorsにおいて議論が行なわれているが、どのような指標を使用し、どのような実施体制で2030年に向けて目標の進捗状況をモニタリングしていくか判断をしていく必要がある。また指標に関しては、特に途上国においては指標で追跡するデータの有無も含めてデータの整備が重要な課題であり、目標のモニタリングにむけた途上国へのキャパシティービルディングを含めた支援が必要である。

一方、将来への課題として専門家の見解と一般市民の関心の間で乖離がある場合はどうすればよいかという問題がある。環境問題については大気の汚染、水の汚染、森林破壊という問題への一般市民の関心が高かったが、プラネタリーバウンダリーのboundary valueを超えると専門家が判断するイシューとして地球温暖化問題と共に生物多様性の減少の問題とリン・窒素の循環の問題への高い関心は見られなかった。環境問題の緊急性に対する専門家の見解と一般市民の認識に大きな乖離がある場合どのように取り組んで行くか検討をする必要がある。

(3) 地球システムからの制約の検討(生物資源に焦点を当てた検討)

本研究では、生物資源の用途をエネルギー、食料、木材製品とし、これらを生物資源の需要と対応付け、生物資源需要が4つのプラネタリーバウンダリーとどのように関係しているかを整理した。また、食料・バイオ燃料に関わる農地需要、それに関わる土地利用の変化(農地の拡大)、農地拡大による生物多様性の損失への影響、農地利用に関わるリンフロー・淡水消費量への影響を推計できるモデルを構築し、これらの関係を総合的に検討する基礎を確立した。さらに、農地面積需要量は2100年までに最大で5.48Ghaになると推計され、人口増加が主な因子と考えられた。

2100年までの期間を通して、畜産に関わる農地が全体の60%を占める結果となり、飼料・牧草を必要とする畜産物の消費を削減することで、農地面積の需要を抑制できることが示唆された。

土地利用の変化については、いずれのシナリオにおいても2050年頃まで増加し、それ以降は増加を続けるシナリオと減少に転じるシナリオに分かれた。すべてのシナリオで、2025年までにプラネタリーバウンダリーの400Mhaを超えてしまう結果となり、今後農地面積拡大抑制のための対策が必要であることが示唆された。2010年までの要拡大面積の最大値は1,378Mhaとなり、プラネタリーバウンダリーを3倍以上上回る結果となった。

一方、生物多様性の損失は、要拡大農地面積の配分シナリオによって結果が大きく異なった。哺乳類の絶滅種数が最も少なく、64.6～108.8 E/MSY(extinctions per million species per year)と推計された。爬虫類は202.1～399.2 E/MSY、両生類は311.7～717.3 E/MSYと推計され、すべてを合わせた絶滅種数は200.9～432.6 E/MSYとなった。これらは、プラネタリーバウンダリーである10 E/MSY(幅を持たせて～100 E/MSY)を一桁上回る結果となっており、最も緩い基準(100 E/MSY)と比較しても、哺乳類以外は地球システムの限界を超える結果となった。

リンフローは、いずれのシナリオにおいても2030年頃まで大きく増加し、2040年以降は緩やかな増加傾向となった。肥料由来が全体の80%以上を占めており、肥料からの流出の影響が大きいことが示された。また、本推計結果は、プラネタリーバウンダリーの限界値である11Mt-Pを越えてしまっており、この境界に近付けるには肥料の使用量を半分以下にする必要があることが示唆された。下水道整備の効果としては、下水道普及率の低いシナリオと高いシナリオでは生活排水由来のリンフローに約19～41%の差が見られた。

淡水利用は、いずれのシナリオにおいても2060年ごろまでは増加を続けるが、それ以降は増加を続けるシナリオと減少に転じるシナリオに分かれた。全てのシナリオにおいて、年間4000 km³のBlue Waterの消費を下回り、プラネタリーバウンダリーを越えることはないという結果となった。ただし、水資源の賦存量および需要量については地域偏在性があることに注意が必要である。

食品廃棄物の半減、肉食の4割減、これまでのトレンドでの単収の増加等の組合せにより、土地利用の変化をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性が示唆された。また、森林の面積が大きい国・地域で農地の開発を行うことにより、生物多様性の損失をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性も示唆された。食品廃棄物の削減、単収の増加、肉食の削減、施肥の管理等はSD指標の候補となるものであるが、2015年に策定されたSDGsにおいては、Target 2.3において2030年までの農業生産性の倍増、Target 12.3において2030年までの食品廃棄物の半減、Target 15.2において森林の保全等が掲げられている。しかしながら、これだけではプラネタリーバウンダリーを越えてしまう可能性がある。肉食の抑制や施肥の管理等も含め、より多面的なアプローチについて検討する必要があると考えられる。

(4)地球システムからの制約の検討(鉱物資源に焦点をあてた検討)

要検討鉱種の同定にあたり、プラネタリーバウンダリーの中で言及されている環境制約について改めて検討したところ、本サブテーマが検討するエネルギー資源消費、並びに鉱物資源消費に関連するものは次の7つであることを改めて確認した。すなわち、生物多様性の減少、窒素・リン循環の変化、気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの減少、エアロゾルの不可、化学物質による汚染である。そのそれぞれと資源消費の間の関係を既存文献等の情報を整理したところ、一部LCAのインベントリ・インパクトデータとして整備されているものが散見されるものの、その多くは集約されたバックグラウンドデータとしての利用を想定しており、1つの代表的な係数などである場合が多い。また、最終的な製品利用による環境負荷、並びにこれによる環境影響については多くのデータが存在するものの、資源採取現場における環境負荷については、公表データは余り多くないこと、さらに生物多様性の減少や、化学物質による汚染など、比較的ローカルな環境影響が大きく懸念されていることが改めて明らかになった。

また、資源制約そのもの、すなわち資源供給制約に関しては、おおよそ全ての枯渇性資源についてデータが入手可能であるものは「埋蔵量」であり、「資源量」ではない。埋蔵量とは、現時点での技術・経済環境下で資源として採掘可能である、すなわち利益を生むことの出来る量であり、またその存在がある程度の確度をもって保証されるものである。よって、まだ見つけられていない資源、もしくは価格の高騰などに依存して新たに埋蔵量として勘定されうるも

のなどについてはまったく分からない。そこで、「探査」とその結果得られる「埋蔵量の増分」については某かの仮定を置いたモデル化が必須である。これらについては、供給側のモデル化において実施することとした。

結果としては、ベースメタルでは銅、貴金属では白金とパラジウム、場合によっては金、その他レアメタルについては、いわゆるエネルギークリティカルメタルの代表格でもあるレアアース、インジウム等が要検討鉱種であることが明らかになった。要検討鉱種の同定結果を受け、需給の検討に際しては、銅を中心にその他のエネルギークリティカルメタルを検討することとした。

需要サイドのモデル化の結果、図1のような結果を得た。

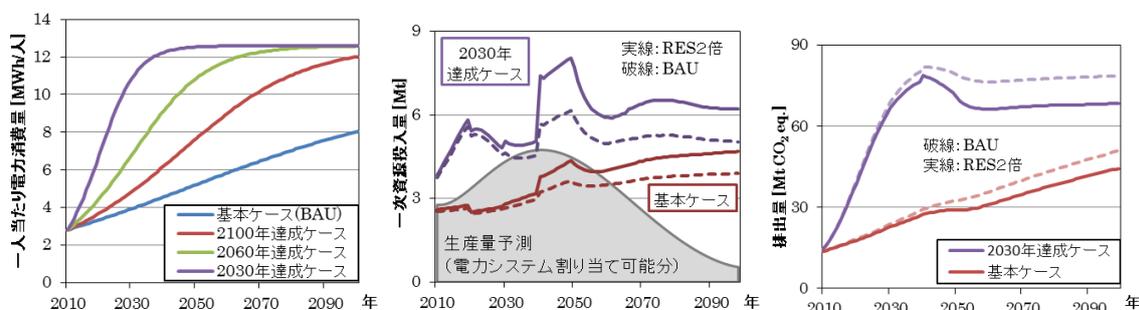


図1 電力消費量シナリオ(左)、銅一次資源投入量(中)、温室効果ガス排出量の予測結果

かなり極端に電力インフラを普及させるようなシナリオを(左図における2030年達成ケース)引いた場合、基本ケース(WECのJAZZシナリオに基づいている)の場合と比べ、かなりの銅の一次資源投入が起きる。(図中)あわせて急激なCO₂排出が起きている(右図)ことは、素材生産量を考えれば整合的な結果であると言える。ここで重要な点は、再生エネルギーの導入量を拡大するシナリオの意味合いであろう。銅の一次資源投入量の結果を見れば分かるように、再生可能エネルギーのシェアを倍に拡大したシナリオにおいては、銅の消費量が大きく増えることになる。これは、再生可能エネルギーの不安定性に起因するもので、発電量の不安定な再生可能エネルギーのシェアを拡大する場合、結果的には不確実性に対応すべく大きめの容量の発電設備を設置、これに応えるだけのグリッドが必要になる。このように、基本的には社会にとって望ましいはずの再生可能エネルギーのシェア拡大が、銅消費量を拡大し、結果的にはこれがボトルネックとなりそれを阻む可能性があることが示された。

もう一つ得られた大きな示唆は、二次資源供給に関するものである。余りに急激なエネルギーインフラの構築は、急激な銅需要の増加を引き起こす。スクラップ等の二次資源は、基本的には投入された資源がその製品寿命を終え社会に現れるものであり、急激な需要の増加の際にはその増分はほぼ天然資源で賄われることになる。よって、投入原料中の二次資源比率は低下し、想像以上の資源供給上の問題を引き起こすことが予想される。現時点で予想されている銅の供給サイドのシナリオを踏まえれば、かなり極端にリサイクルが進まない限り2060-70頃には絶対的な供給不足に陥る。これをリサイクルで補うなら現在30%程度のリサイクル率を2100年までに90%までに、利用技術の資源効率で改善するなら2.5倍にあげる必要がある。

この現象は、最後に行った供給サイドのモデル化によって再確認された。ここまでの需給双方の検討から言えることは、我々が鉱物資源をより持続可能な形で利用していくためには、天然資源側の供給に過度なプレッシャーとならない程度の需要規模に需要を抑えることが重要であることが分かる。ただしこれは社会としての資源需要から、二次資源による供給を差し引いた天然資源に対する需要という意味である。非再生可能資源である以上、天然資源の供給はいつか頭を打つものと考えられるが、代替資源や非在来型の資源が現れる前に、供給を途絶させないためにもこうした視点は必要不可欠であり、そのためにどの程度のレベルの資源利用効率の向上が必要になるかをこれからも検討する必要がある。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究では、構築したデータベースを用いて、環境資源利用の限界や経済成長に与える影響などにに基づき廃棄物削減に関する数値目標の設定や既存目標の補充など政策提言を行った。本研究の最も大きな貢献は、資源利用の効率性や廃棄物排出強度などの観点から、ゼロドラフトに挙げられた目標や指標により詳細な目標設計に関する提言ができたことである。また、その上で最終的にローカルな生活者の視点を織り込んだポスト2015年開発目標の策定に向けて新しい指標・目標を提案すると共に策定後にどのようにグローバルなレベルとローカルなレベルを結ぶことができるか提案をした。さらに、貧困撲滅など中心目標と統合的なSD指標や資源ストックとの関連性を明らかにし、数量的に中心目標の重要性や影響力、並びに具体的な目標設定に有力な根拠の提示ができた。そして、SDGsの今後の在り方の議論の一助として、SDGsを達成するために実施される施策が有効かどうか、また、それをどのように判断すべきかについて、「新国富」という新しい指標の活用し、その指標に必要な資本の量と価値という視点から、環境資源制約下での持続可能性の評価を実施することの必要性について議論した。具体的には、「新国富」によって、従来計測されることのなかった自然資本など新たな資本が計測され、より地域の持続可能性の評価が可能となることを示した。

今後、これらの対策が国や地域の持続可能性にもたらす効果についても「新国富」を用いて評価することが可能となるだろう。国際的な対策や地域レベルでの対策が、自国さらには世界に対してもたらす効果が、「新国富」といった指標で明確に示されれば、適切な資源管理に関する政策への第一歩へとつながることが期待される。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本テーマの研究成果を環境省マクロフレームWG・技術WG合同会合にて紹介し、我が国の開発の方向性について数値的な資料を提供した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の最も大きな貢献は、グローバルなレベルで議論及び交渉が行われてきたSDGsの 이슈に関してローカルな生活者の見解及び 이슈の選好結果を提供することである。本研究はグローバルなレベルとローカルなレベルの間における「生活者の豊かさ・幸福度」と「グリーン経済・成長」に関する見解の相違点を明らかにした。前述のとおり、SDGs合意後の焦点は、新たに合意されたSDGsをどのように各国の事情を考慮しながら2030年に向けて国レベルで政策として実施していくかという局面に移行した。本局面において、一般市民の関心・懸念を示す本研究結果は国内政策の形成・実施において有用であると考えられる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 観山恵理子、楊珏、馬奈木俊介：環境科学会誌, 26, 579-586 (2013)
特集持続可能性評価のためのグローバル・データ分析：多重代入法を用いた EKC の推計と GS の算出
- 2) E. MIYAMA, and S. MANAGI: Environmental Economics and Policy Studies 16 (2): 115-135 (2014)
Global environmental emissions estimate: application of multiple imputation
- 3) N. KANIE, N. ABE, M. IGUCHI, J. YANG, N. KABIRI, Y. KITAMURA, S. MANAGI, I. MIYAZAWA, S. OLSEN, T. TASAKI, T. YAMAMOTO, T. YOSHIDA, Y. HAYAKAWA: Sustainability 6, 1761-1775 (2014)
Integration and diffusion in sustainable development goals: learning from the past, looking into the future
- 4) S. MURAKAMI, T. KAWAMOTO, A. MASUDA, and I. DAIGO: Global Environmental Research, 19, 181-186 (2015)
Metal Demand to Meet SDG Energy-related Goals

- 5) J. YANG, S. MANAGI, and M. SATO, M: Environmental Economics and Policy Studies 17 (3): 431–453 (2015)
The Effect of Institutional Quality on National Wealth: An Examination using Multiple Imputation Method
- 6) M. SUZUKI, K. IKEDA, T. KUSAGO, K. HARA, M. UWASU, and O. TYUNINA: Global Environmental Research, Vol.19 No.2 (2015)
Analysis of Citizens' Priorities over Sustainable Development Goals in Japan: Evidence from a Questionnaire Survey,
- 7) C. KAYO, H. OKA, S. HASHIMOTO, M. MIZUKAMI, and S. TAKAGI: Journal of Forest Research, 20(3), 309–320 (2015)
Socioeconomic development and wood consumption
- 8) S. HASHIMOTO, T. EHARA, K. TAMURA, and T. YAMAMOTO: Global Environmental Research, 19(2), 165–172 (2015)
How can we solve the problems of hunger and obesity simultaneously? An alternative indicator for sustainable development
- 9) J. YANG and S. MANAGI: Global Environmental Research, 19, 2, 199–206 (2015)
The Dematerialization of Natural Resources and Resource Efficiency During 1990 to 2010

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU, O. TYUNINA: 3rd Annual Sustainable Development Conference, Bangkok (2015)
What Are the Citizens' Priorities over Sustainable Development Goals in Thailand? : Evidence from a Questionnaire Survey, July 2015.
- 2) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU, O. TYUNINA: Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference (2015)
Identification of key sustainable development goals and indicators: results of a questionnaire survey conducted in the US, Japan and Thailand

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) M. SUZUKI: (2014) Side-event organized by Research Institute for Humanity and Nature at Nexus 2014: Water, Food, Climate and Energy Conference, March 5–8 in Chapel Hill, North Carolina
“Conducting a Survey on Citizen's Views and Priorities over Sustainable Development Issues and Agenda for the post-MDGs era.”
- 2) 池田和弘、鈴木政史、草郷孝好、原圭史郎、上須道徳、環境経済政策学会 (2014)
「日本における持続可能な開発目標に対する市民の関心の計測と分析 アンケート調査結果に基づく関心の規定要因の考察」
- 3) J. YANG, 馬奈木俊介: 環境経済・政策学会2014年大会 (2014)
“Inequality and inclusive wealth: measurement of sustainable index by multiple imputations.”
- 4) J. YANG, S. MAMAGI: World Congress of Environmental and Resource Economics, Istanbul, Turkey (2014)
“Institutions and national inclusive wealth: an examination using multiple imputation method.”
- 5) K. TAMURA, N. YOSHIKAWA, K. AMANO, and S. HASHIMOTO: The 11th International Conference on EcoBalance, Tsukuba (2014)
“Land constraints associated with future food and biofuel demands.”
(The 11th International Conference on EcoBalance (2014年10月27–30日、つくば)で、Poster Award Bronze

- を受賞した。125件のポスター発表から Gold 2件、Silver 2件、Bronze 2件が選出された。)
- 6) S. HASHIMOTO, K. TAMURA, N. YOSHIKAWA, and K. AMANO: Joint 11th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne (2014)
“Land constraints associated with future food and biofuel demands.”
 - 7) T. KAWAMOTO, S. MURAKAMI and J. YAMATOMI: Ecobalance 2014, Tsukuba, Japan (2014)
“System dynamics model for sustainability assessment of mineral resource consumption considering both environmental and resource constraints.”
 - 8) 進藤暁俊, 村上進亮: 資源・素材2014, 熊本大学 (2014)
「銅のサプライチェーンに対するリスク分析」
 - 9) S. MURAKAMI, T. TAKASU, A. MASUDA, E. YAMASUE, and T. ADACHI: SDIMI (Sustainable Development in the Minerals Industry) 2015, 7月12~15日、University of British Columbia (2015)
“Environmental Impact Indicators and Mining Method.”
 - 10) 青木渉一郎, 村上進亮: 資源・素材2015(松山), 9月8~10日, 愛媛大学(2015)
「鉄スクラップの国際需給構造に関する研究」
 - 11) 玉置哲也, 中村寛樹, 馬奈木俊介, 藤井秀道: 環境経済・政策学会2015年大会, 9月18日, 京都大学(2015)
「鉱物資源の潜在価値と使用量制限の影響」
 - 12) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDO, K. HARA, M. UWASU, O. TYUNINA: 3rd Annual Sustainable Development Conference, Bangkok, July 2015 (2015)
“What Are the Citizens’ Priorities over Sustainable Development Goals in Thailand? : Evidence from a Questionnaire Survey.”
 - 13) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU, O. TYUNINA: Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference, November 2015 (2015)
“Identification of key sustainable development goals and indicators: results of a questionnaire survey conducted in the US, Japan and Thailand.”
 - 14) 田村賢人, 吉川直樹, 天野耕二, 橋本征二: 日本LCA学会第10回研究発表会、神戸(2015)
「食料・バイオ燃料に関わる将来の農地需要の抑制ポテンシャル」
 - 15) 山口陽平, 田村賢人, 吉川直樹, 天野耕二, 橋本征二: 日本LCA学会第10回研究発表会、神戸(2015)
「食料消費に関わる淡水資源必要量の将来シナリオ評価」
 - 16) TAMURA, K., C. KAYO, N. YOSHIKAWA, K. AMANO, and S. HASHIMOTO: The 8th Conference of International Society for Industrial Ecology, Guildford (2015)
“Global demand for agricultural and forest land and its saving potential”
 - 17) 玉置哲也, 野澤亘, 馬奈木俊介: 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2016年3月18日, 慶應義塾大学(2016)
「生態系変化を考慮した気候変動経済モデルの検討」
 - 18) 田村賢人, 橋本征二: 第11回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、98-99(2016)
「Planetary boundariesの整合性~土地利用の変化と生物多様性の減少について」
 - 19) 村上真理, C.M. LWIN, 橋本征二: 第11回日本LCA学会研究発表会、柏(2016)
「グローバルな農業由来・生活排水由来リンフローのシナリオ分析」
 - 20) 山口陽平, 田村賢人, 吉川直樹, 橋本征二, 天野耕二: 第11回日本LCA学会研究発表会、柏(2016)
「国際貿易を考慮した食料消費に関わる淡水資源必要量の将来シナリオ評価」

7. 研究者略歴

課題代表者: 馬奈木 俊介

ロードアイランド大学大学院経済学博士、東京農工大学大学院助教授、横浜国立大学経営学部准教

授、東北大学大学院環境科学研究科准教授などを経て現在、九州大学大学院工学研究
院環境社会部門主幹教授

研究分担者：

1) 鈴木 政史

慶應義塾大学大学院及びアメリカ・コロンビア大学にて修士号、オランダ・エラスムス大学にて博士号
取得。現在、上智大学大学院地球環境学研究科准教授

2) 橋本 征二

京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)、(独)国立環境研究所主任研究員、
現在、立命館大学理工学部教授

3) 村上 進亮

東京大学大学院工学系研究科修了、博士(工学)、Colorado School of Mines, Dept. of Mineral
Economics, Master of Science (Mineral Economics) 現在、東京大学大学院工学系研究科准教授

S-11-2 資源環境制約の観点からの目標と指標の提示

(1) Beyond GDP目標と指標の提示

九州大学 馬奈木 俊介

<研究協力者>

九州大学 中村 寛樹・玉置 哲也

平成25～27年度累計予算額：83,124千円（うち平成27年度：26,624千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、資源・環境制約の観点から資源環境制約が持続可能な開発に与える影響を総合的に検討し、ポストMDG目標や持続可能性指標のあり方を可能な限り定量的分析を根拠として提示している。はじめに、1)マルチプルインピテーションを用いてデータベース（DB）の構築を行った。この手法を用いることで、データの欠損を、不確実性を考慮して補うことを可能にした。構築されたDBを基に、大きく3つの分析を行なっている。一つ目に2)自然資源の利用効率性や廃棄物排出強度の把握を取り上げた。ここでは、家計部門などからの排出量も考慮した排出強度の分析をした。二つ目に3)資源利用効率に関する数値目標の提示と達成するための経済コストを推計した。そして、三つ目に4)グローバルな視点から見た資源の価値の分析を行った。以上の分析によって、グローバルなレベルでの資源開発による廃棄物・排出物の削減コストや自然資本のシャドープライスを国や地域ごとに求めることにより、目標を実現することで社会に与えるインパクトを示すことが出来た。また、5)新国富と提案する目標の関係を明らかにした。OECD諸国など高所得国において新国富の時系列的な動向は大きく、低所得国や低中所得国においては新国富の増加幅が極めて小さいことが示された。全体を通して、各国の経済状況や資源保有量などを十分に考慮して国際的な枠組みを実施することの重要性を示すことが出来た。

[キーワード]

新国富指標、持続可能性、削減コスト、シャドープライス、自然資本

1. はじめに

2014年7月19日、持続可能な開発目標に関するオープン・ワーキング・グループ（OWG）の提案が発表され、そこに、17個の開発目標と169個のターゲットが提示され、貧困撲滅、持続可能でない生産消費形態の変更および持続可能な生産消費形態の促進、ならびに経済・社会開発の基礎となる天然資源の保護と管理は、持続可能な開発の総体的目標であることが指摘された。そして2015年9月には、国連持続可能な開発サミットにおいて、2030年までに達成すべき持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals：SDGs）を含む「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択された。このSDGsは、途上国の貧困や教育を中心の課題として進められ、2015年を目標としたミレニアム開発目標（Millennium Development Goals：MDGs）に代わる今後の目標として位置づけることが出来る。しかしながら、SDGsおよびその背景にある公文書では、SDGsを達成するために実施される施策が有効かどうか、また、それをどのように判断すべきかについては言及されていない。そこで本研究では、「新国富」という新しい包括的な富の指標について言及し、環境資源制約下での持続可能性の評価とSDGsの今後あり方について検討する。

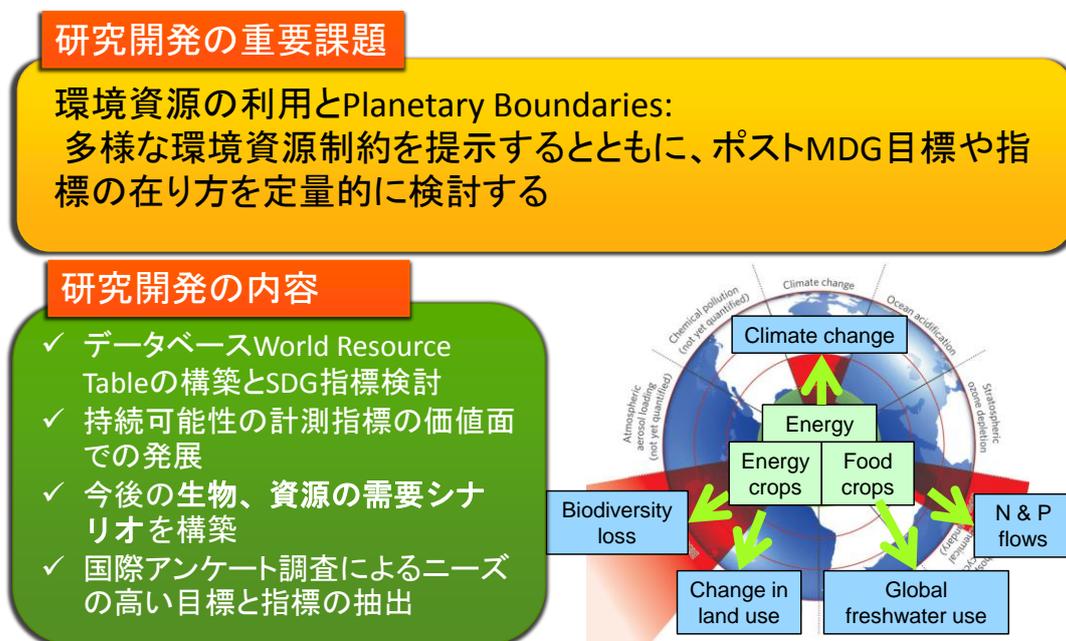
現在、広く用いられている国民経済計算システム（System of National Accounts：SNAs）は、消費や投資、雇用、財政支出など資源のフローを記録するものであり、一定期間の経済規模を表す国内総生産を測定するように設計されている。しかしながら、SDGsの持続可能性を判断するには、ストックである富を包括的に測定する新しいSNAsが必要となる。この包括的な富（Inclusive Wealth）のことを「新国富」と呼び、経済の生産能力を測る手段として、国家の人工資本、人的資源、および自然資本の合計の値で示される。国内総生産では資本の償却が記録されないため、自然資本を使い果たすことで一定期間において国内総生産の増加が可能となった場合、その自然資本の枯渇については記録されないのである。急激な資源の消耗を伴う国内総生産の増加は、同時に「新国富」の減少、つまり、経済の生産能力の縮小を意味しており、やがて持続不可能になることを意味している。つまり、持続可能な成長とは、国内総生産の成長ではなく、「新国富」の成長を意味すべきであると言える。

これまで、経済学者らを中心として、過去の「新国富」の推計が実施されてきた。国連大学および国連環境計画による「包括的『富』報告書2014（新国富報告書）」では、1990年から2010年までの期間における、140ヶ国の「新国富」の変化が測定されている。その結果、サンプル国のうち、ポジティブなレートで「新国富」が成長した国の割合は92%である一方、一人当たりの「新国富」の成長がポジティブであった国の割合は60%であることが分かった。これは、世界全体の人口増加が、SDGsの形成においても懸念すべきポイントであることを示唆している。

また、新国富報告書では、多くの国々において、国内総生産と「新国富」は正反対の方向を向いており、国内総生産は増加傾向、「新国富」は減少傾向にあることが示されている。つまり、人類は、限られた地球資源を消耗して経済活動を行っているということを意味している。これは、「プラネタリーバウンダリー（Planetary Boundaries）」という考えに端的に表されている。この境界内であれば、人類は将来世代に向けて発展と繁栄を継続することが出来る一方で、その境界値を越えると急激な、もしくは取り返しのつかない環境変化が生じる可能性がある。この境界は、9つの領域（気候変動、海洋の酸性化、成層圏のオゾンの破壊、窒素とリンの循環、世界的な淡水利用、土地利用の変化、生物多様性の損失、大気エアロゾルの付加、化学物質による汚染）があるとされ、そのうち窒素とリンの循環、生物の多様性の損失、気候変動の3つの領域で

はずでに限界を越えていると報告されている。つまり、環境資源制約下に人類は直面しており、それを考慮した持続可能性の評価とSDGsが必要である。

図(1)–1に示したように、持続可能な生産消費形態を促進するため、資源利用に関する数値化した候補目標を提示し、目標達成の経済コストを推計する。



図(1)-1 研究開発の重要課題と内容

2. 研究開発目的

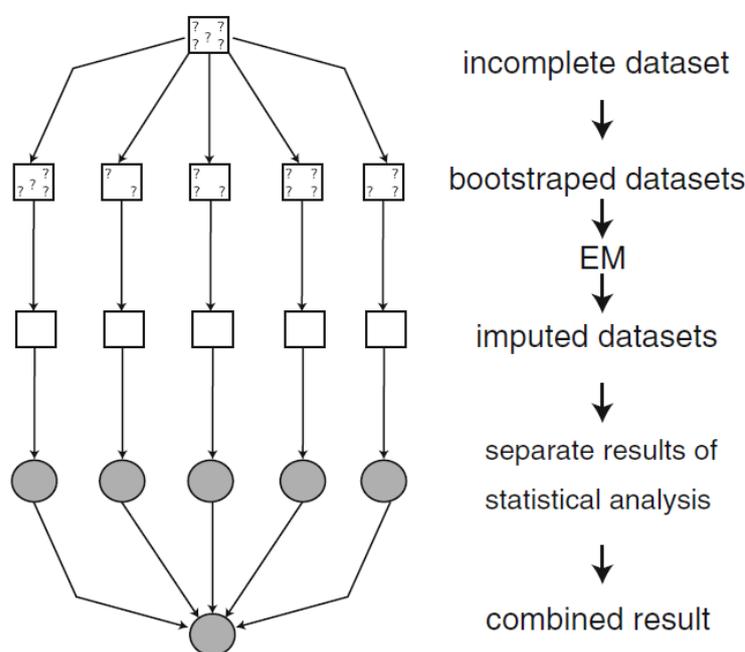
上記の背景と理由を踏まえて、本テーマの目的は、資源環境制約の下での持続可能な成長・開発のためのビジョンや方向性を科学的根拠に基づいて精緻化した数値目標と指標を提示することである。本サブテーマでは、国レベルの環境資源・社会経済データベースを構築し、環境資源利用状況を把握したうえで、実施可能なかつ具体的な数値目標を提示する。また、これらの数値目標を達成するためのコストを計量経済学的手法によって推計を試みる。さらに、推計した新国富を用いて、持続可能な開発目標の中心目標である貧困撲滅や不平等問題との関係性を分析し、統合目標として新国富の正負の影響を明らかにし、それに関連する政策提案を行った。さらに、「新国富」によって地域の持続可能性をどのように評価するか、また、従来の評価手法とどのように異なるか、資本の「量」と「価値」という視点から具体的に研究を実施した。資本の価値を評価するためには限られた地球資源をどのように活用していくかが重要である。環境資源制約下での持続可能な開発目標を考えるにあたっては、将来にわたる資源の需要の推計やそれを基にした評価が必要となるため、グローバルな視点から、鉱物資源を事例として研究した。

持続可能な資源利用のための目標提示及び新国富と持続可能な開発目標との関係性を明示し、新国富および新国富の考え方の基礎となる資本の「量」とその「潜在価値(シャドープライス)」に焦点を当て、資源制約下における持続可能な発展のための目標を明らかにしている。

3. 研究開発方法

(1) マルチプルインピテーションによる DB 構築

本研究ではまず欠損値の不確実性を考慮し、パラメータの推計結果にバイアスが生じにくい多重代入法を用いて欠損値を補完したデータセット(WRT)を構築した。また、多重代入法で欠損値を補完したデータセットとリストワイズ法によるデータセットを比較した。本研究で採用した多重代入法は、欠損値を様々な値で推定し、複数のデータセットをいくつも作ったうえで、それ複数回分析し、算出された値の平均と分散を利用して推定する。これにより一致性を保証しつつ、欠損によるばらつきを推定精度に反映させることができる。本研究で用いた多重代入法のフレームワークは図(1)-2に示す通りである。



図(1)-2 多重代入法のフレームワーク

(2) 自然資源の利用効率性や廃棄物排出強度の把握

持続可能な生産消費を促進するため、効率的な資源利用や廃棄物の最小限排出が必要とされ、本サブテーマでは、まず、構築した国レベルの環境資源・社会経済データベースを用い、国単位の自然資源の利用効率や廃棄物排出強度を把握する。具体的には、資源利用量や廃棄物濃度対GDPを算出する。また、地域間・国家間の利用効率性や排出強度を比較することで、次のステップに数値目標を提示するための根拠となる。

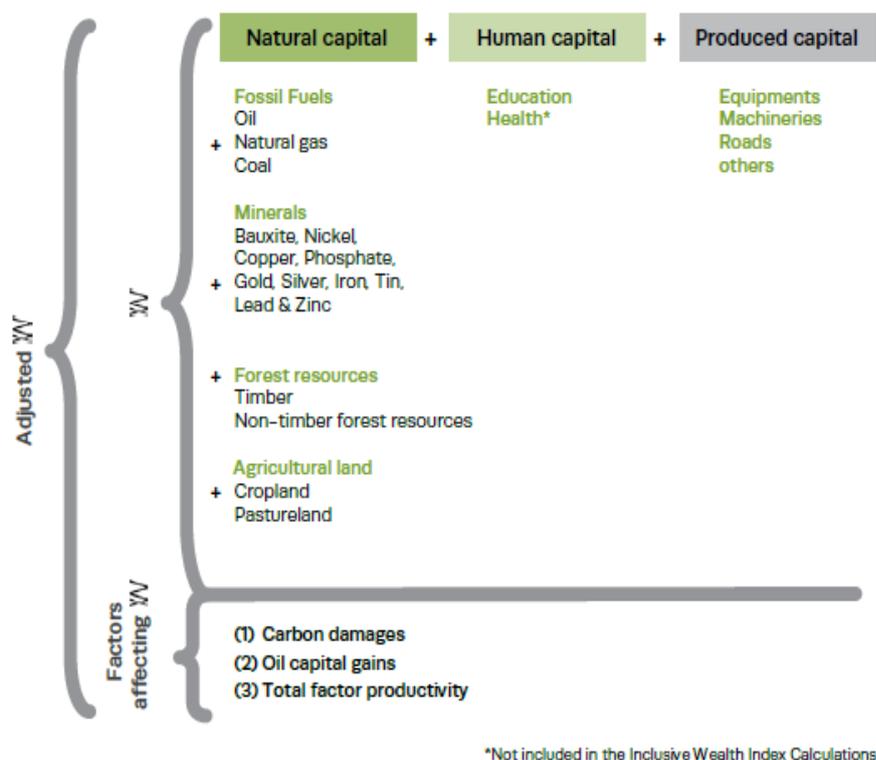
(3) 資源利用効率に関する数値目標の提示と達成するための経済コストの推計

資源の利用効率や環境への負荷をコントロールするための数値目標を設定する。生産関数やパネルモデルを用いて、これらの数値目標を達成するための経済コストを推定する。また、(1)で得られた結果を用い、各地域や所得グループに相応する数値目標の構築を行う。

(4) グローバルな視点から見た資源の価値

鉱物資源を一例として、グローバルな資源のシャドープライスの推計を行う。シャドープライスの値や時系列的な変化の仕方は、国や地域によって異なると考えられる。多くの発展途上国において、鉱物などの資源を活用した経済成長は不可欠であるものの、持続可能な開発を行うためには適切な資源制約が重要である。これには、先進国も含めた世界全体の協力が必要である。また、地域ごとの環境問題に対する住民意識の違いについても明らかにする。

(5) 新国富と中心目標の関係性分析



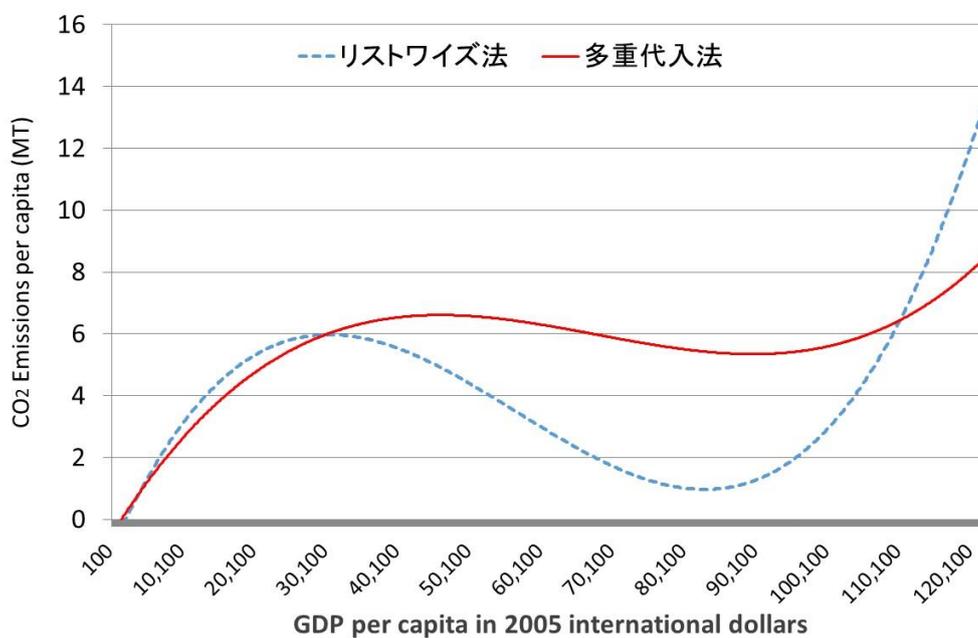
図(1)-3 新国富指標の構成図

新国富指標は図(1)-3に示しているように、自然資本、人的資本、生産資本によって構成されている。サブテーマ(1)では世界各国の新国富指標（包括的富、Inclusive Wealth Index : IWI）を推計し、それをを用いて、国の持続可能性を評価する新国富指標とPOST2015開発目標の中心目標である貧困撲滅や不平等問題との関係性についてパネルモデルなど計量モデルの構築により明らかにする。また、その分析結果に基づき、注目されつつある新国富指標の応用による開発目標である貧困撲滅や不平等問題の解決に政策提言を行う。

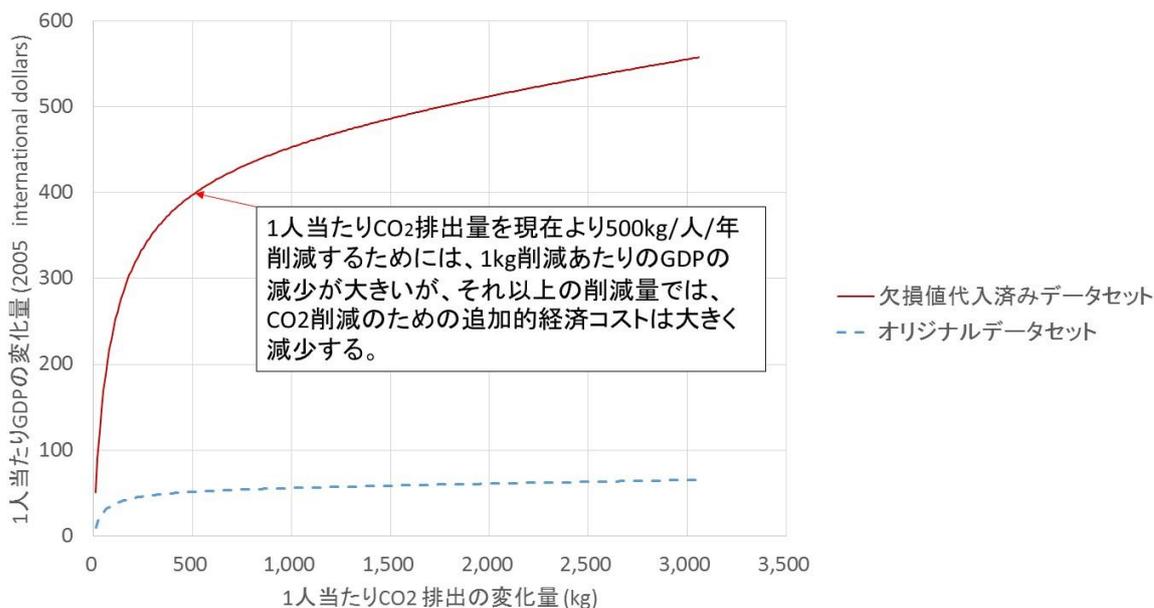
4. 結果及び考察

(1) マルチプルインピテーションによる DB 構築

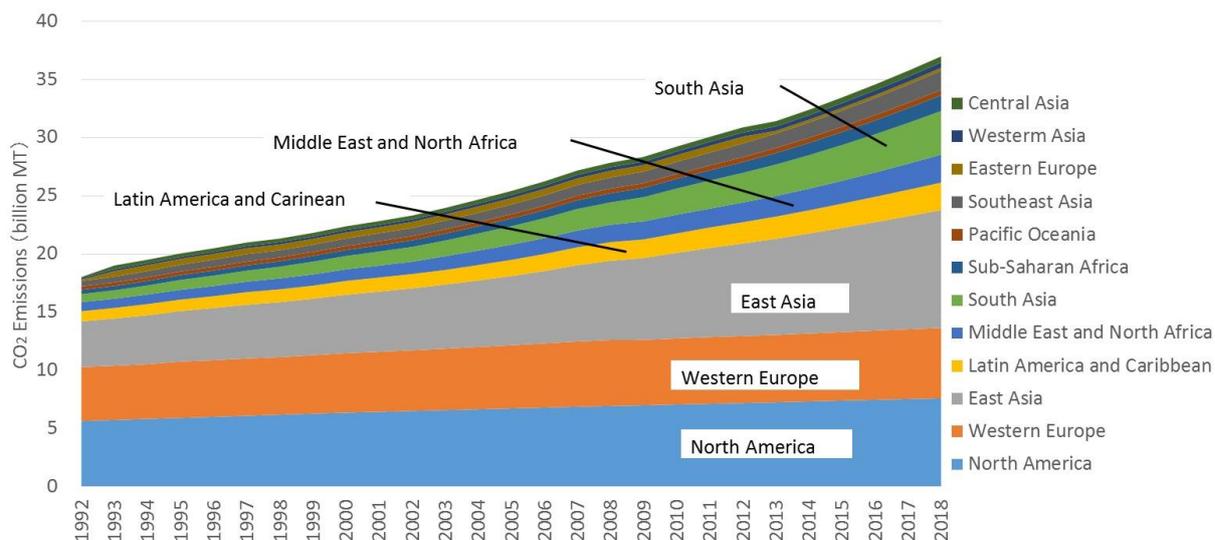
本研究では多重代入法を用いて欠損値を補完したデータセット(WRT)を構築した。また、多重代入法で欠損値を補完したデータセットとリストワイズ法によるデータセットを比較した。その結果、図(1)-4及び図(1)-5に示される通り、リストワイズ法やオリジナルのデータセットよりもより分析に効果的なデータセットを作成することができた。例えば、図(1)-4では、経済と環境負荷の関係を示す環境クズネッツ曲線が、多重代入法で作成したデータセットにより、より理論と整合するものとなっている。また、それらのデータセットを用いて、一人当たり CO₂の削減にかかるコストの推計（図(1)-5）や CO₂排出量の予測を行った（図(1)-6）。



図(1)-4 CO₂の環境クズネッツ曲線



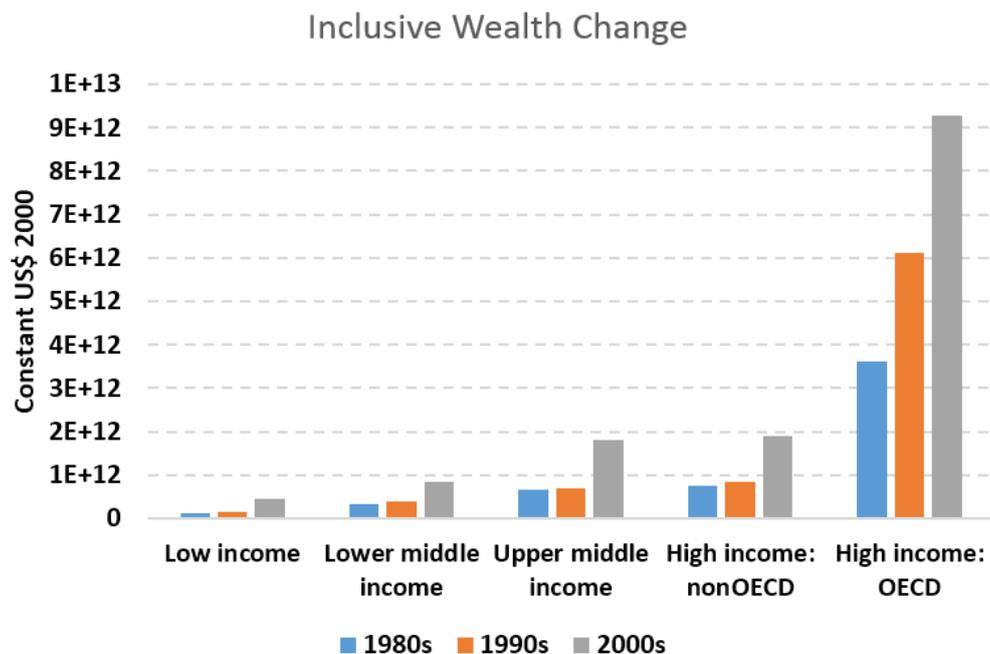
図(1)-5 一人当たり CO₂の削減にかかるコストの推計



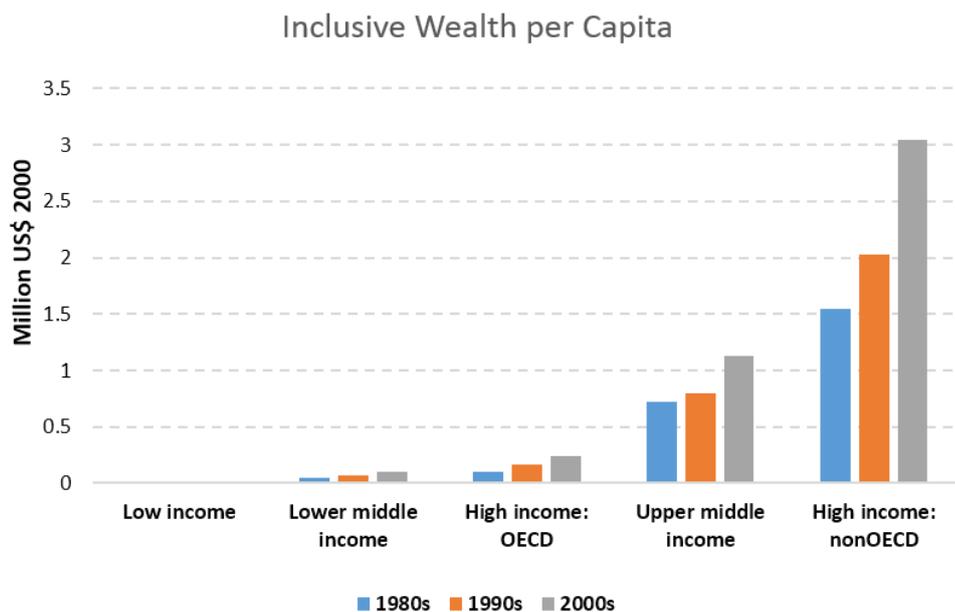
図(1)-6 CO₂排出量の予測

また、YANG et al. (2015) では、多重代入法を用いて190カ国、31年間のデータセットの欠損値を補間し、グローバルおよび国別のIWIを算出した¹⁾。その結果、世界全体のIWIおよび一人当たりIWIの値は1980年代から2000年代にかけて継続的に増加していることが明らかとなった。国の所得水準別に変化を見ると、OECD諸国におけるIWIの増加幅が最も大きく、高所得国がグローバルなIWIの動向に大きな影響を与えていると考えられる(図(1)-7、図(1)-8)。一方、低所得国や低中所得国においてはIWIの増加幅が極めて小さい。所得水準によるこのようなIWIの推移の差異は、それぞれの国における資本の賦存状況によって発生していると考えられる。OECD諸国をはじめとする大国は、人的資源を含む生産資源に比較的恵まれているため、経済成長や教育

支出の増加などによってIWIも大きく増加する傾向にあることが明らかである。しかし、低所得国においては資源を保全し、かつ有効活用するメカニズムがうまく機能していないために資本の蓄積が困難であると考えられる。今後は、より効果的にこのような国家間格差の拡大を抑制する政策提言や指標設定が必要である。



図(1)-7 CO2排出量の予測



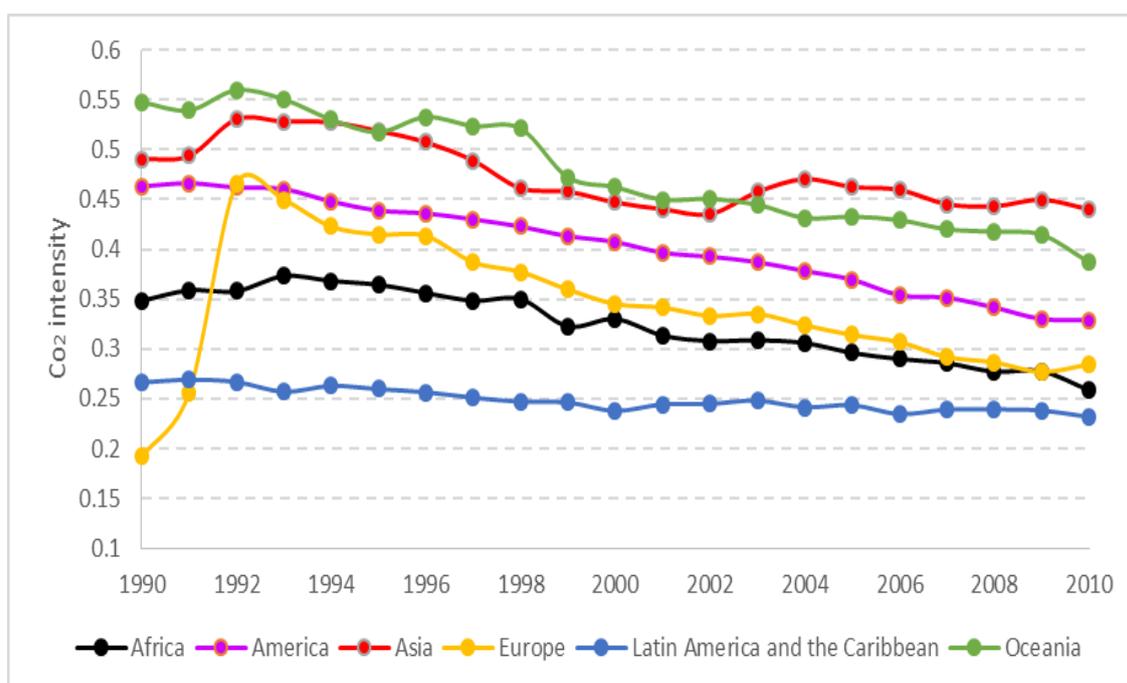
図(1)-8 包括的富の変化

(2) 自然資源の利用効率性や廃棄物排出強度の把握

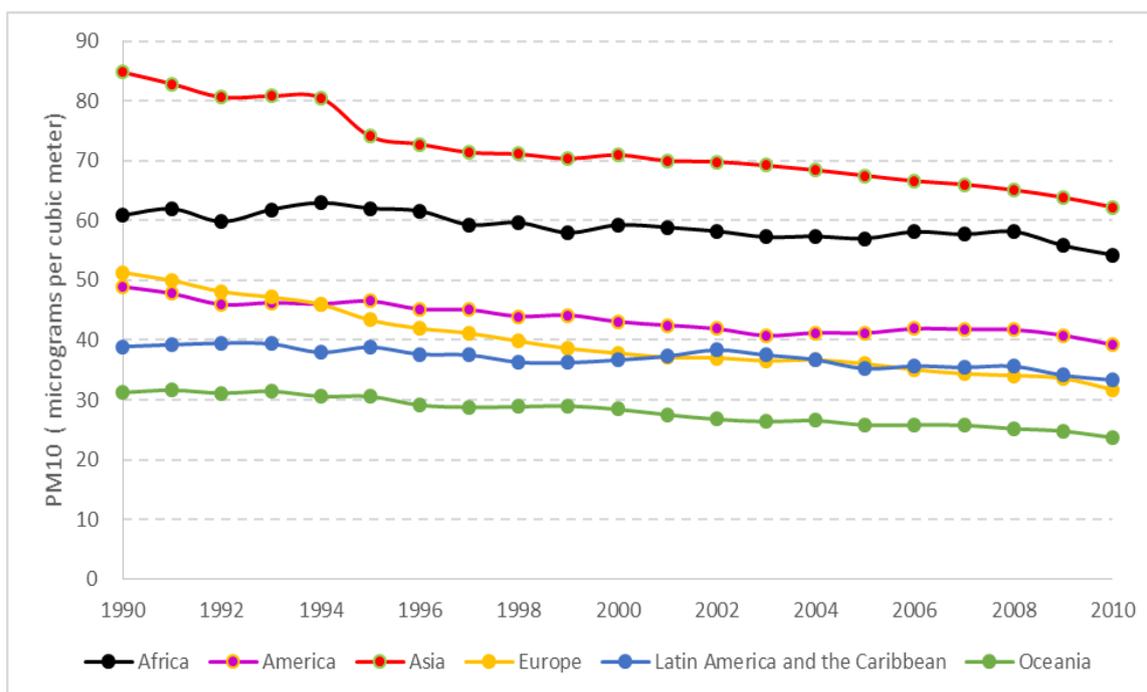
自然資源の利用効率性は向上し、また、廃棄物排出強度も近年減少する傾向が見られた。しかし、資源の分布特徴などにより地域間・国家間の差異が大きい場合もある。

廃棄物の排出強度に関して、今回はCO₂、PM10、SO₂、鉱石鉱物、バイオマスなどの総排出量対GDPに注目した。従来の排出強度は部門毎の計算が多く、各部門の効率性を推計する必要が低かった。しかし、国ベースの資源利用効率性を把握・比較するのに、総合的な効率性の把握が必要となる。そこで、本研究では、総排出量対GDP比を用い、地域間・国家間の比較を行った。たとえば、これまでのCO₂排出強度はエネルギー利用のみを計算してきたが、家計部門などその他の部門のCO₂排出増から、総排出強度が違う変化を捉えられる。

その結果、まず、地域毎の廃棄物排出強度の比較を行った結果をみると、CO₂やPM10の排出強度は各地域において減少していることが分かった（図(1)-9、図(1)-10）。ただ、PM10の排出濃度は都市の人口密度などに基づいた世銀の推定値で、実際の自然状況などの要因を含めた推定ではない。そのため、廃棄物コントロールの実態を反映していない可能性があり、今後数値目標を構築する際に、より精度の高いモニタリングシステムの構築が必要であるといえる。

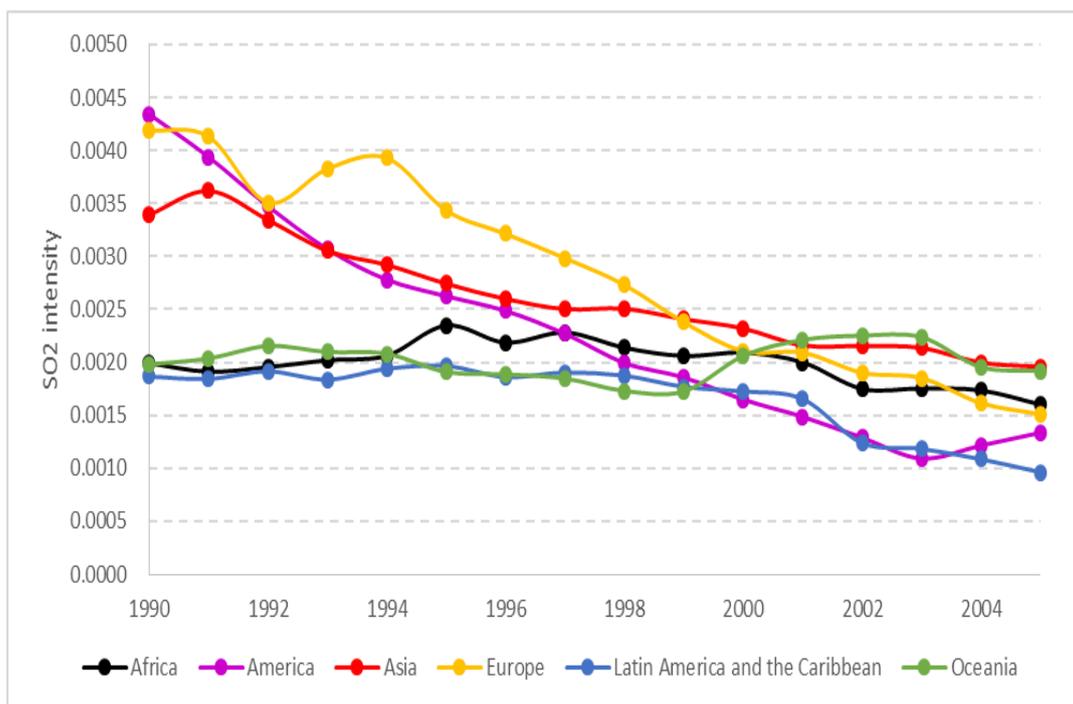


図(1)-9 地域毎のCO₂排出強度（1990～2010）

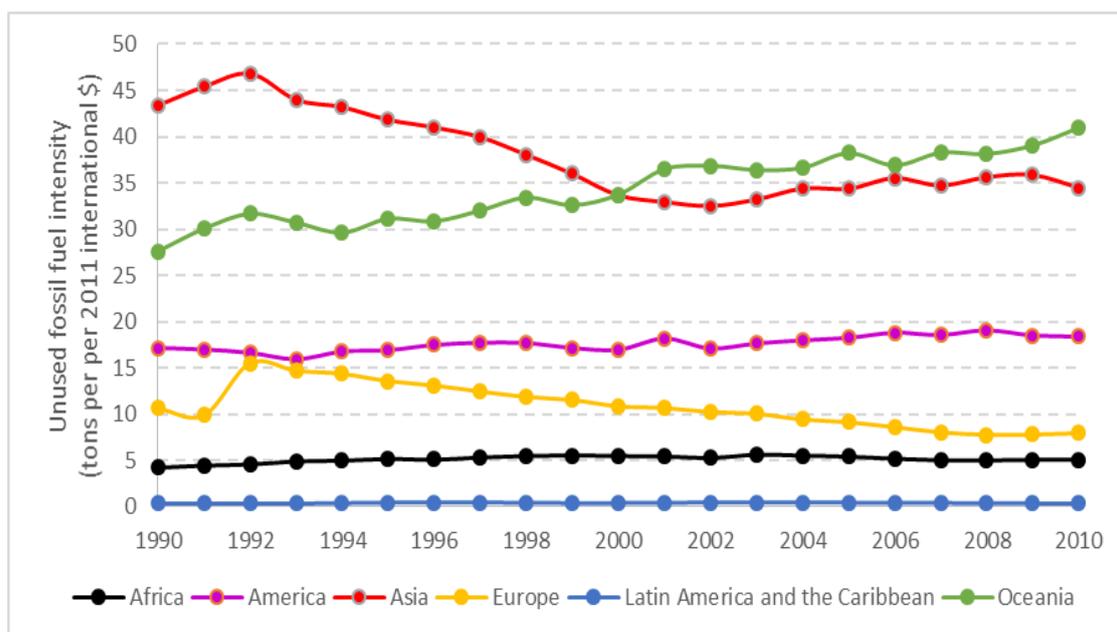


図(1)-10 域毎のPM10排出強度（1990～2010）

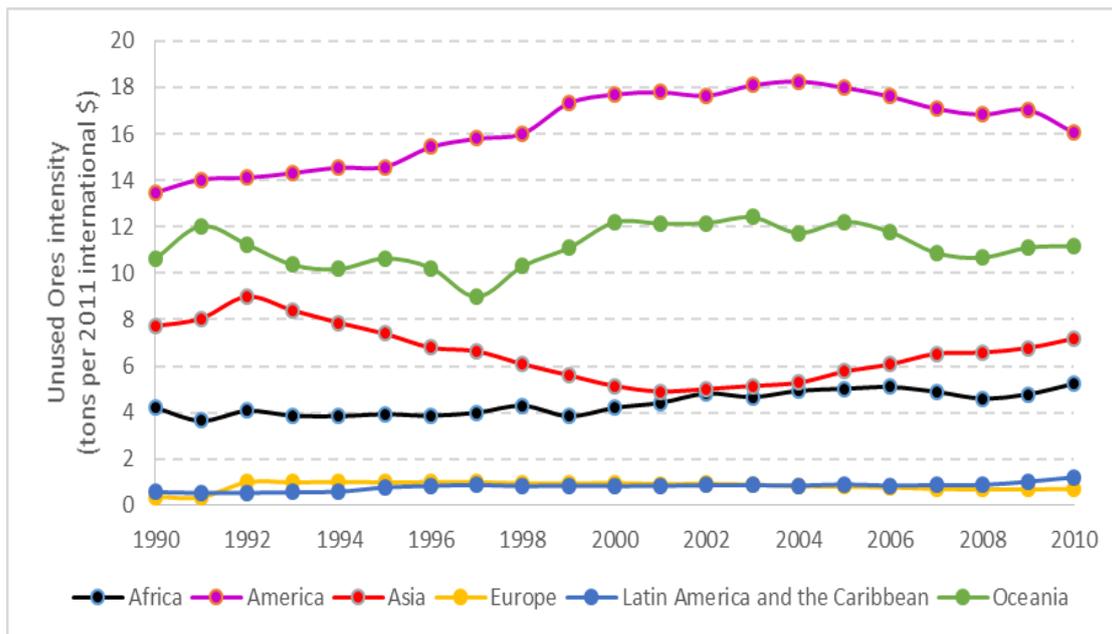
SO₂の排出強度に関して、CO₂と同じく、全体的に減少傾向が見られた（図(1)-11）。特に北アメリカとヨーロッパにおいて、線形に近い単調減少した。しかしながら、1999年以後オセアニアにおいて、輸出の増加およびエネルギー需要の増加などに伴う石炭の利用が増え、SO₂の排出強度が増加している。ただし、SO₂のデータは2005年までしかないので、2005年以後のオセアニアの技術導入状況による改善、また、アジアとアフリカにおいて、経済発展とともにSO₂の排出強度に変化が表れている可能性がある。

図(1)-11 地域毎のSO₂排出強度（1990～2005）

燃料の廃棄強度について、ここでは、**unused fuel**を用いて計算を行った。図(1)-12に示すようにアジア、オセアニアの排出強度は高く、アフリカやラティアメリカが低い。SO₂と共通しているから、エネルギー利用の在り方に大きく影響されていると思われる。また、鉱石に関しては、アメリカの廃棄強度が最も高く、次にはオセアニア、アジア諸国である（図(1)-13）。



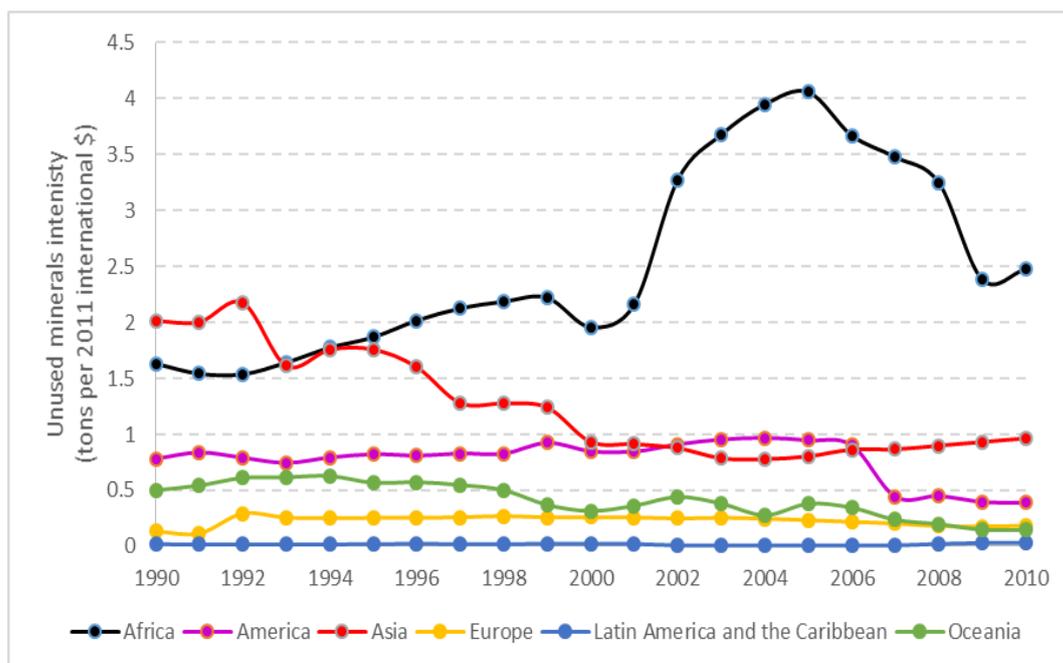
図(1)-12 地域毎の燃料廃棄強度（1990～2010）



図(1)-13 地域毎の鉱石廃棄強度（1990～2010）

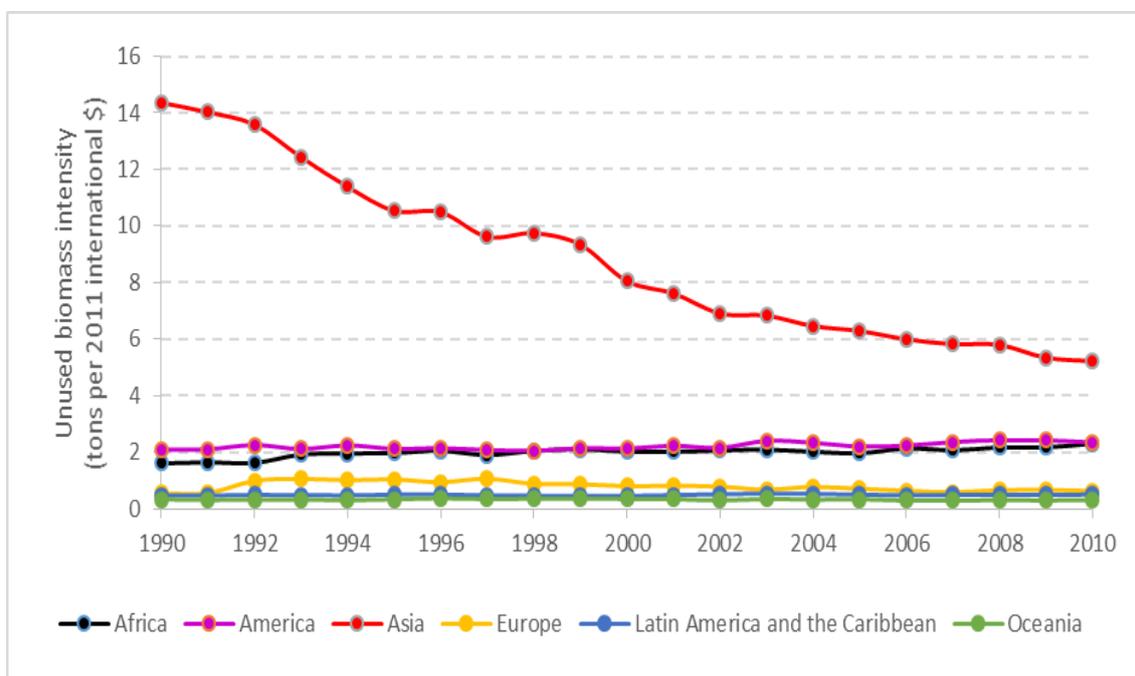
鉱物の場合は、鉱石と違って、アフリカの廃棄強度が最も高い（図(1)-14）。それは鉱物利用技術の差異などによる影響と考えられる。

また、2006年まで北アメリカの廃棄強度もアフリカ、アジアに続き高かったが、近年、大幅に減少した。その原因としては、鉱物輸入増加にあると考えられる。



図(1)-14 地域毎の鉱物廃棄物強度（1990～2010）

バイオマス類廃棄物とは、利用されていない穀物、廃材などである。図(1)-15に示すように、アジアの廃棄強度は圧倒的に高いが、2002年以来、他地域との差が減少傾向にある。



図(1)-15 地域毎のバイオマス廃棄物強度 (1990～2010)

次に、国家間廃棄物排出強度の比較を行った。CO₂の排出に関しては、1990年代には東ヨーロッパ諸国、南アフリカや中国などの排出強度は比較的に高かったが、2000年代に入ると急速に低減している。たとえば、ウズベキスタンのCO₂排出強度は年4%の減少率を達している。一方、アフリカ諸国やベトナムなどの新興国では、近年廃棄物排出強度の増加傾向が見られた。しかし、総排出量を比較すると、CO₂などの場合、OECD諸国の排出量は圧倒的に高い。SO₂の排出強度は、CO₂の排出強度と類似した傾向を見せた。ブルガリアなど東ヨーロッパ諸国やアフリカ諸国の排出強度が比較的に高い。PM10の濃度を比較したところ、モンゴルやボツワナなど内陸国の排出は圧倒的に多い。自然要因と人的要因による排出を区別することができない。

燃料類廃棄物排出強度に関して、インド、中国、南アフリカ、インドネシアなど新興国が非常に高く、OECD諸国の500倍にのぼる。鉱石鉱物の場合は、中国、アメリカ、ザンビア、ペルー、アメリカの排出強度が高い。バイオマスに関しては、中国、インド、バングラデシュ、ブラジル、インドネシアなどが、排出強度が高い上位5カ国であり、世界平均のバイオマス廃棄物排出強度の10倍から200倍にのぼる。このように、新興国やアメリカの廃棄物排出強度が高く、目標設定に敏感に反応することが予想される。

(3) 資源利用効率に関する数値目標の提示

CO₂をはじめ、廃棄物排出削減に関する目標は、これまで総量制限や一人当たり排出量など、国際交渉の場においては様々な議論がされてきた。本テーマでは、異なる目標設定が経済発展に与える影響を比較・考察し、適切な数値目標を提示するため、環境クズネッツ理論に基づきパネ

ルモデルを構築し、国の経済発展レベルや地域毎に分析を行った。まず、CO₂の排出に関しては、一人当たりCO₂排出および排出強度が経済発展に与える影響を比較した。

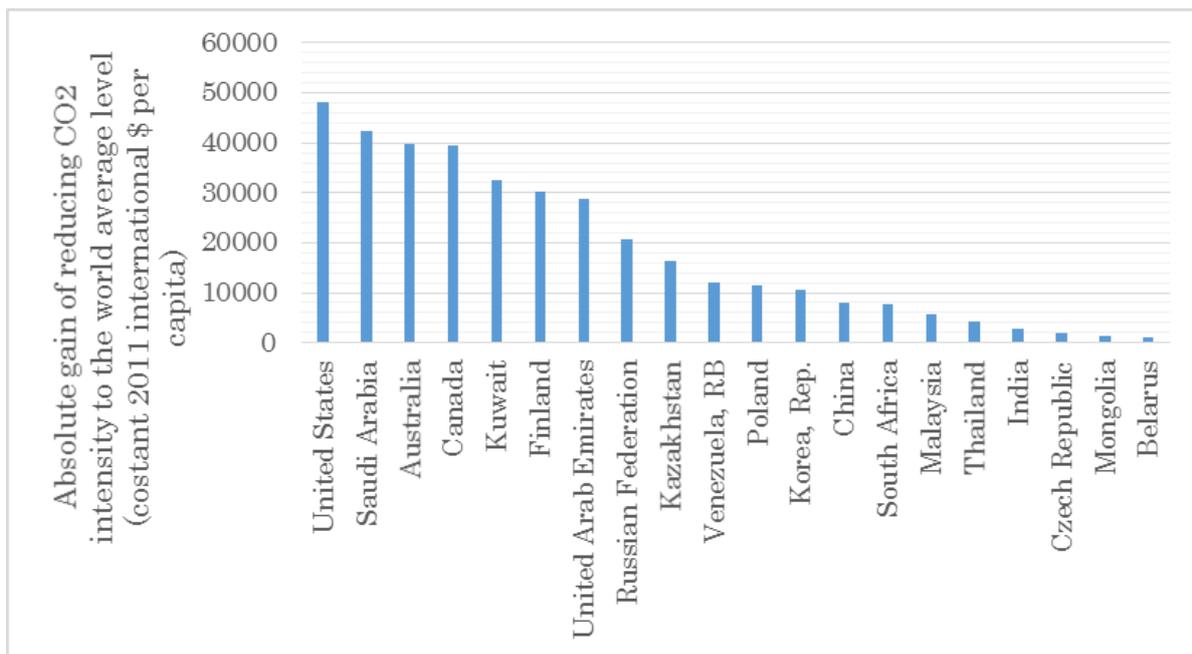
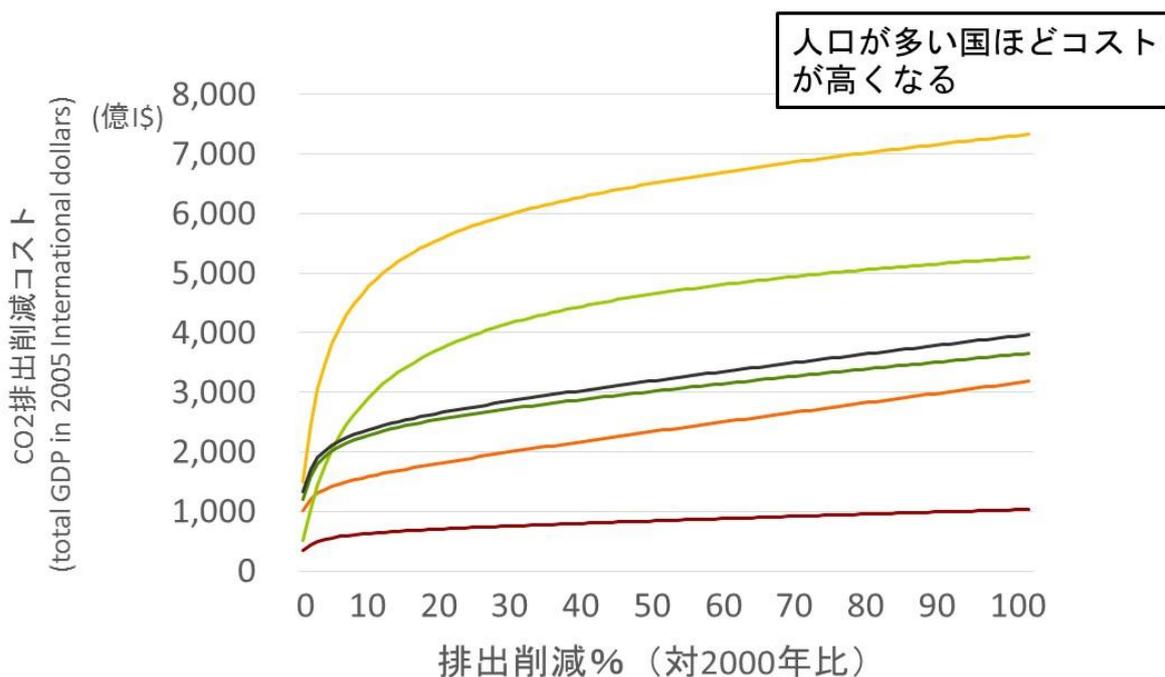
その結果、排出強度の場合はU字型の曲線が観察された。CO₂排出強度の低減が経済発展に有意かつ正の影響を与え、ある程度の削減を超えると経済的なコストが高くなることがわかった。また、途上国にとっては、排出強度削減がもたらす経済効果が比較的に大きいことも分かった。

表(1)-1 CO₂排出に関するパネルモデルの分析結果

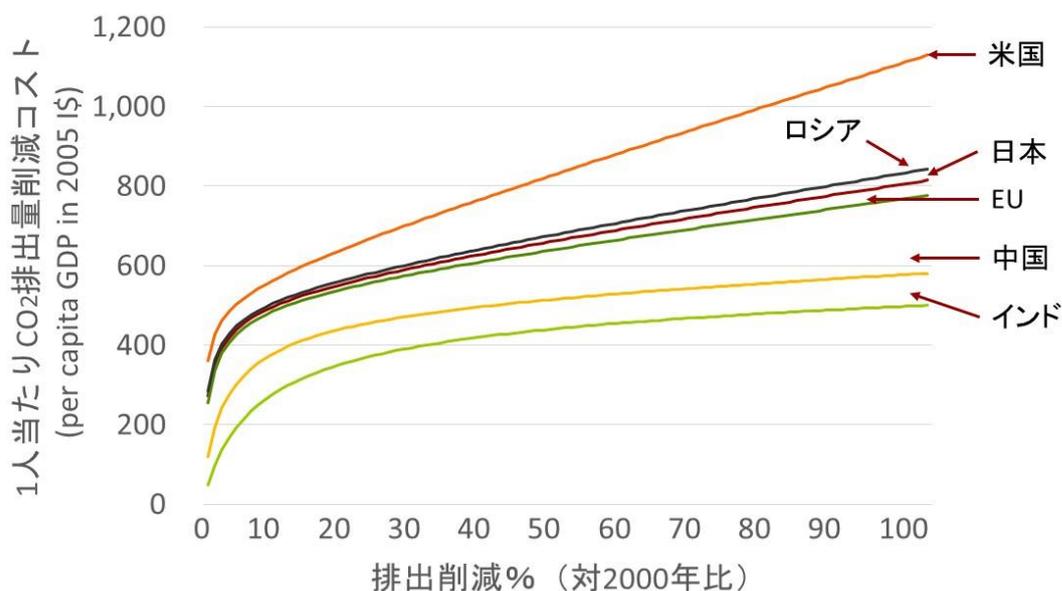
Variables	Model I	Model I-1 (developing)	Model I-2 (developed)	Model II	Model II (developing)	Model II (developed)
CO ₂ intensity	-1.075*** 0.076	-0.681*** 0.079	-2.352*** 0.184			
CO ₂ intensity ²	0.280*** 0.038	0.130*** 0.038	0.951*** 0.132			
ln CO ₂ pc				0.925*** 0.046	0.564** 0.056	1.426*** 0.109
ln CO ₂ pc ²				-0.088*** 0.014	0.014 0.022	-0.223*** 0.025
ln land area	-0.513*** 0.258	-1.192*** 0.321	-0.168 0.337	0.298 0.232	-0.784** 0.296	1.084** 0.34
Openness	0.001+ 0.0003	0.002** 0.001	0.004*** 0.001	-0.0004 0.0003	0.002*** 0.001	0.0001 0.001
Openness ²	-2.41E-06** 7.15E-07	-7.95E-06** 2.53E-06	-7.03E-06*** 1.96E-06	3.04E-06*** 6.53E-07	-8.28E-06*** 2.33E-06	3.75E-06** 1.14E-06
Renewable energy share	-0.009*** 0.0005	-0.004*** 0.0004	-0.033*** 0.001	0.0004 0.0004	0.001* 0.0004	-0.008*** 0.002
Time trend	0.017*** 0.001	0.018*** 0.001	0.014*** 0.001	0.020*** 0.0005	0.018*** 0.001	0.025*** 0.001
Constant	15.232*** 3.038	22.524*** 3.819	12.808*** 3.876	4.14 2.739	16.785*** 3.525	-4.483 3.909
N	3184	2289	895	3184	2289	895
R2	0.504**	0.496**	0.742**	0.598**	0.574**	0.739**
BIC	2906.854	2547.241	997.123	3578.504	2932.173	987.311

そのため、CO₂排出の数値目標の設定に関して、我々は一人当たりCO₂排出量よりはCO₂排出強度を提案する。

CO₂排出強度削減の具体的な数値目標について、国際平均排出強度までの削減やパーセンテージ削減目標など複数のパターンを比較・分析した。その結果、いずれの国は経済効果をもたらすため、単純に経済発展への影響を考慮する場合は大幅な差異がないと言える。

図(1)-16 CO₂排出強度削減のコスト（国ランキング）図(1)-17 CO₂排出量の各国総量を下げるときの費用

一人当たり CO₂排出の場合、逆 U 字型が観察された。それは、経済発展の初期において、経済発展に伴い一人当たり CO₂の排出は増加し、経済発展は一定の規模を達すと、一人当たり CO₂排出増が負の影響を与えることになる。そこで、先進国と途上国の分析結果を比較したところ、一人当たり CO₂の排出削減は先進国にとってコストが非常に高いことが分かった。

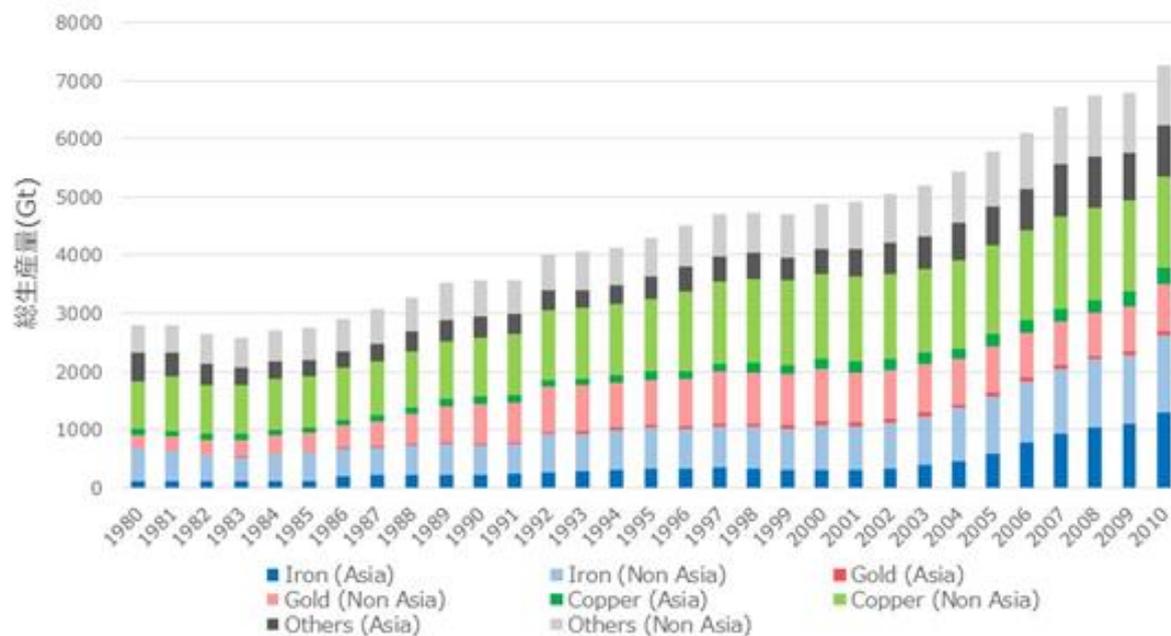


図(1)-18 一人当たり CO₂排出量の削減費用

また、SO₂、PM10、燃料、鉱石鉱物、バイオマス廃棄物排出強度に関しても同じ手法を用いて、分析を行った。その結果、まず、SO₂の排出強度は全世界モデルでは経済発展に有意な影響が見られなかったが、先進国モデルでは、U字型の影響が表れた。また、SO₂の排出量はCO₂よりはるかに低いため、一人当たり排出量基準の設定が難しい。そのため、SO₂に関しても排出強度や総量規制のほうが、効果が高いと考えられる。PM10の削減に関しては、排出強度は非常に低くなるため、総量規制の目標値が望ましい。しかし、自然要因と人的要因が区別できない現段階では、目標値の設定が厳しい。また、燃料、鉱石鉱物、バイオマス廃棄物排出強度が経済成長に有意かつ負の影響を与えていることが分かった。つまり、これらの排出強度の削減目標の設定が、経済成長にも有利であることを示した。しかし、その原因となるのは、産業構造の変化や新技術の導入などにも関連しているため、世界の平均水準を目標値として設定する場合、排出強度の大きい国である中国、インド、アメリカなどにおいては達成することが難しいと予想できる。そこで、それぞれの国においてパーセンテージ削減目標の設定が望ましい。

(4) グローバルな視点から見た資源の価値

鉱物資源は、有限であり、持続可能な発展のためには、将来を見据えた資源制約が必要である。特に近年では、中国をはじめアジアにおける経済発展が目覚しく、それに伴う世界全体での鉱物資源の需要量および生産量は大幅に増加している（図(1)-19）。



図(1)-19 アジア地域およびアジア地域以外の各種鉱物生産量の推移

出所：SERI/WU Global Material Flows Database

シャドープライスを算出するに当たり、本研究では指向性距離関数による分析手法を用いる。この距離関数を用いる分析手法は、従来の分析では、すべての意思決定単位がもっとも効率性の高い生産フロンティア上の技術で生産が行われていると仮定しているが、距離関数を用いた分析では生産技術の変化を考慮できる利点がある。生産技術はインプット $x \in R_+^M$ 、アウトプット

$y \in R_+^N$ および負のアウトプット $b \in R_+^L$ を用いて、

$$P(x) = \{(x, y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\}$$

と表すことができる。また、指向性距離関数は以下のように表すことができる。

$$D(x, y, b; g) = \max_{\beta} \{\beta : (y + \beta \cdot g_y, b - \beta \cdot g_b) \in T\}$$

負のアウトプット b とは、ここではCO2排出量など減少させるべきもののことを指し、この負のアウトプットを減少させつつ、アウトプット y を増大できる最大の β を考える。ベクトル

$g = (g_y, -g_b)$ は、生産集合内のアウトプット $((y, b) \in P(x))$ と生産フロンティアとの距離を定め

るための方向を表し、生産フロンティア上のアウトプットは $(y + \beta \cdot g_y, b - \beta \cdot g_b) \in P(x)$ とな

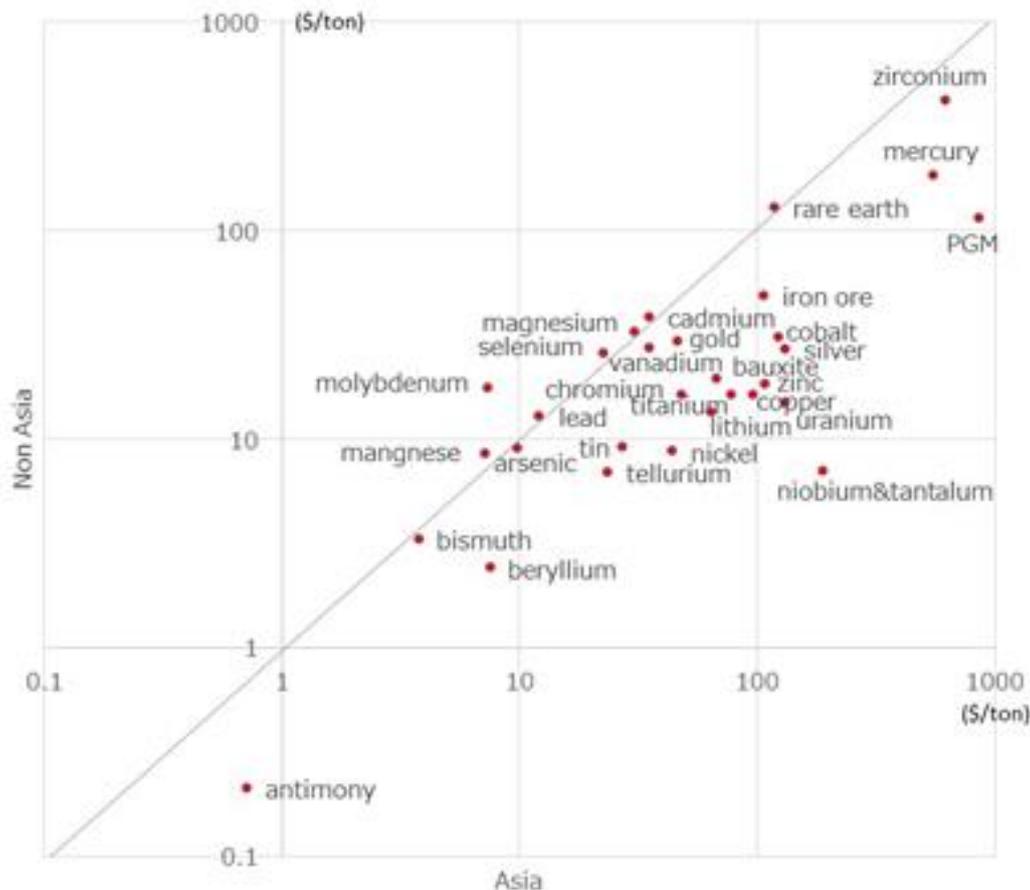
る。

本研究においては、2種類のアウトプット (y, b) 及び3種類のインプット (x_i) を用いて、

$$\begin{aligned}
 D(x, y, b : g) = & a_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + a_1 y + a_2 b + \gamma_1 t + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 \delta_{i1} x_i y \\
 & + \sum_{i=1}^3 \delta_{i2} x_i b + \sum_{i=1}^3 \delta_{i3} x_i t + \frac{1}{2} a_{11} y^2 + a_{12} y b + a_{13} y t + \frac{1}{2} a_{22} b^2 \\
 & + a_{23} b t + \frac{1}{2} \gamma_{11} t^2 + \sum \phi_c C
 \end{aligned}$$

と表すことができる。Cはカントリーダミーである。この距離関数を用いて、鉱物ごとのシャドープライスの推計を行う。

鉱物資源と一言で言っても、その種類や地域で価値は大きく異なる。図(1)-20は、アジア地域とアジア以外地域（Non Asia）の各鉱物のシャドープライスの関係を示している。図中斜線の右下側に各鉱物は集まって居り、それは、全体的にアジアにおけるシャドープライスが高く出ていることを意味する。つまり、アジア地域において鉱物の使用量を制限することは、その他地域で制限をかけるよりもコストがかかることを意味する。実際、アジアにおける鉱物の使用量の増加率は、その他地域の使用量の増加率よりも高く、経済的な成長も著しい。そのため、鉱物の使用量が削減された場合にアジア各国の経済成長にもたらされる影響は大きくなることが予想される。



図(1)-20 アジア地域とアジア以外地域（Non Asia）の各鉱物のシャドープライス

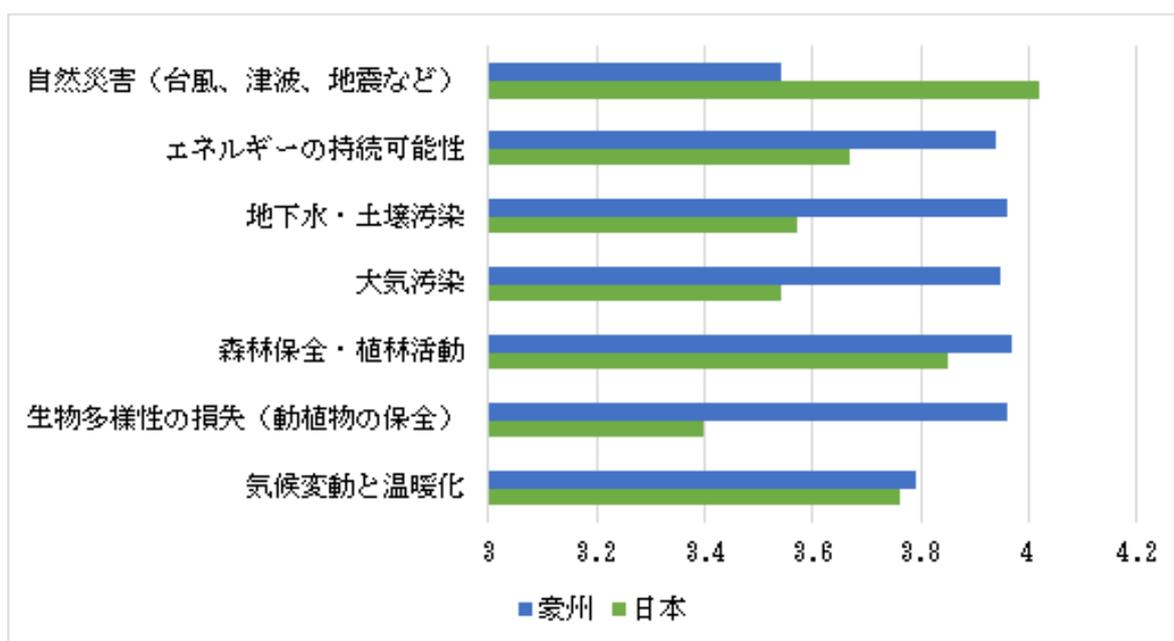
次に、使用量制限を行う場合、どのような効果が得られるか、データの存在する 2010 年までのデータを基準に、今後 10 年間で鉱物の使用量を 10%減少させる場合及び 20%減少させる場合について推計を行った。図(1)-21 は、主要 10 鉱物に対して、10%及び 20%削減の使用量制限を行った場合の 10 年間の削減コストを示している。例えば鉄鉱石の場合、10%削減を行う際に約 1300 億ドル、20%削減を目標とした際には、約 3700 億ドルの削減コストがかかることが示唆されている。これは 10 年間でかかる削減コストであるが、10%削減と 20%削減では 3 倍近いコストの差があることがわかる。つまり、削減量は倍であっても削減コストに関してはそれ以上になる可能性がある。さらに、アジア地域とそれ以外の地域に分けて比較することで削減コストに地域の差が大きく関係していることもわかる。アジア地域における 10%の削減時は約 850 億ドル、20%削減時は約 2750 億ドルと約 3.2 倍あるのに対して、アジア以外の地域では、10%削減時は 450 億ドル、20%削減時は 950 億ドルと約 2.1 倍にしかない。つまり、経済成長の著しい国が多いアジアにおける大幅な使用量制限は、その他地域で行われる使用量制限に比べて大きな負担を強いる可能性を示唆している。

以上で見てきたように、鉱物の使用量制限を行う場合には、地域ごとに鉱物使用制限量を定めることが望ましい。鉱物毎、地域毎によってそのシャドープライスには違いがあり、また、経年変化を見ても大きな違いがある。つまり、単純に全体目標を立てるだけでなく地域毎に使用制限目標を立てていくことが、社会的に望ましい持続可能な発展目標になることを示している。



図(1)-21 主要 10 鉱物の使用量制限時（10%及び 20%削減）の 10 年間の削減コスト

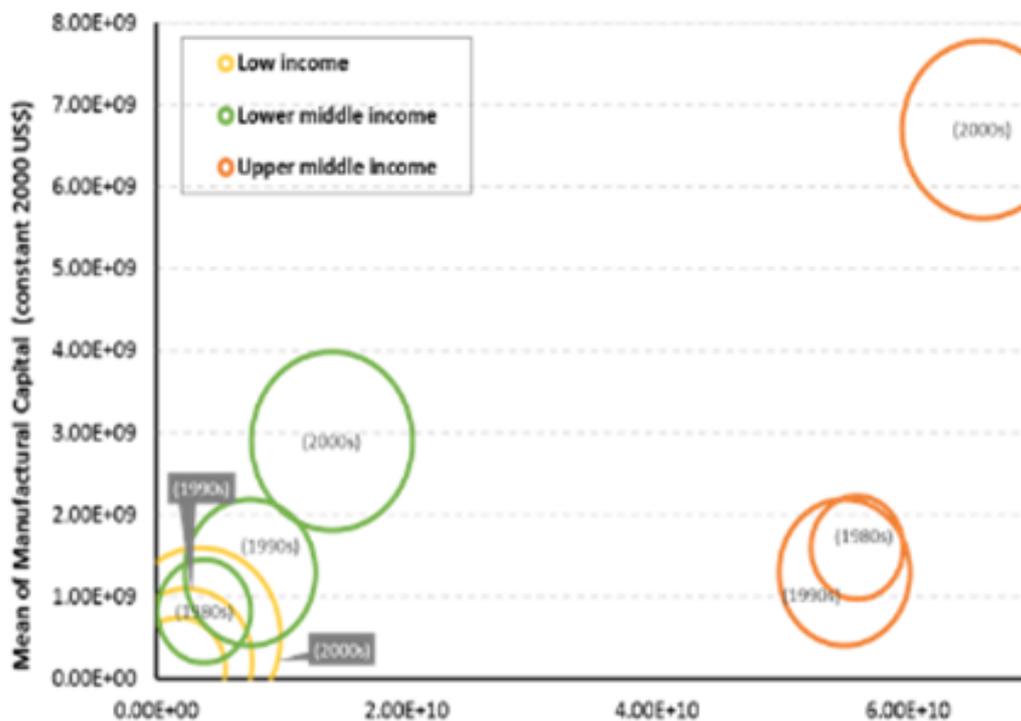
しかしその一方で、地域毎に持続可能な開発目標を立てていく際に重要な事項は、地域ごとに状況や住民意識に大きな違いあり、それを考慮する必要があるということである。詳細な分析はサブテーマ(2)で実施したが、関連して本サブテーマ(1)では、アジア太平洋地域における鉱物資源を有する国とそうでない国を比較（日豪比較）し、アンケート調査も実施した。主要な質問事項は、環境問題に関する様々なトピックに対して、どの程度関心があるかを5段階で評価してもらった。その成果の一部を示すと下記の通りである（図(1)-22）。両国において全てのトピックにわたって「関心がある」が「関心はない」を上まわっており、日本においても豪州においても様々な環境問題に対する関心の高さを表している。一方、概して資源大国である豪州のほうが、日本よりも様々な環境問題に対する関心が高いことが分かる。ただし自然災害に関しては、豪州においてよりも自然災害が多い日本において関心が高いことが伺われる。持続可能な開発目標にはこのような地域ごとの状況や住民意識についても考慮する必要がある。



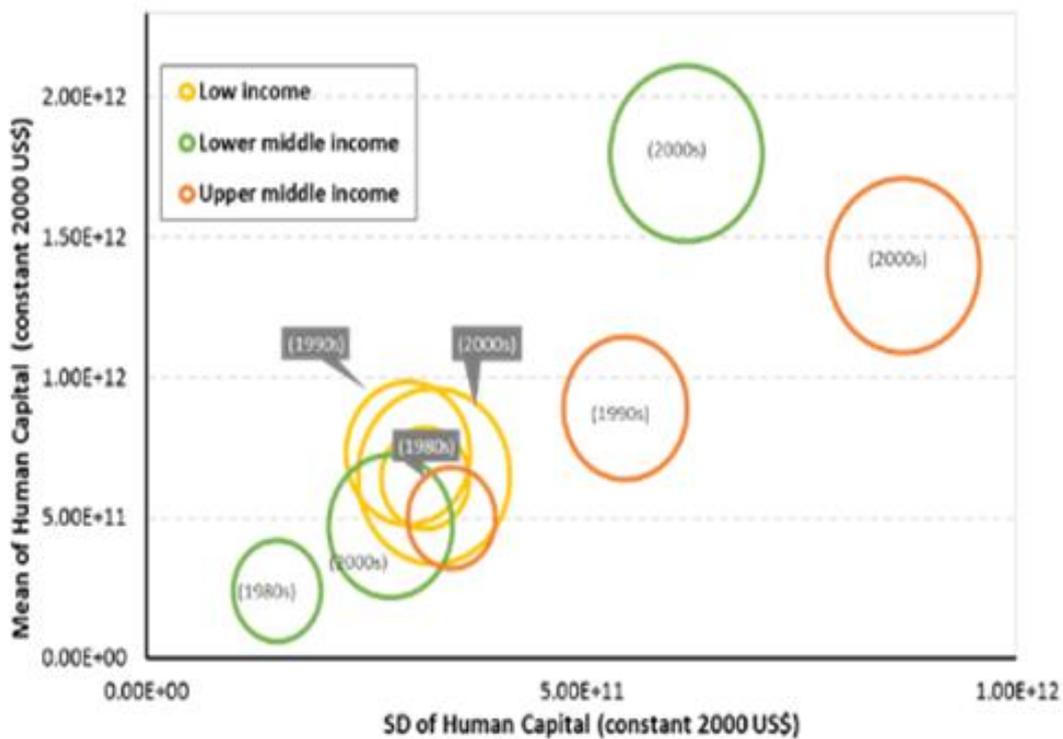
図(1)-22 環境意識の日豪比較

(5) 新国富と中心目標の関係性分析

まず、新国富の変化と地域間・国家間の差異や特徴について分析した。世界全体の新国富および一人当たり新国富の値は1980年代から2000年代にかけて継続的に増加していることが明らかとなった。国の所得水準別にその変化を見ると、OECD諸国における新国富の増加幅が最も大きく、高所得国が国際新国富の動向に大きな影響を与えていると考えられる。一方、低所得国や低中所得国においては新国富の増加幅が極めて小さい。



図(1)-23 低中所得国における人工資本の平均と標準偏差



図(1)-24 低中所得国における人的資本の平均と標準偏差



図(1)-25 低中所得国における自然資本の平均と標準偏差

図(1)-23、24、25は低中所得国における人的資本、人工資本および自然資本の平均値と標準偏差のバブル図である。バブルのサイズは小・中・大それぞれ、1980年代、1990年代、2000年代を表す。高所得国との格差が大きいため、ここでは低中所得国を対象に説明する。また、テーマ2は環境資源制約の下の目標設定を行うため、ここでは自然資本について分析する。図に示すように、自然資本に関しては、低中所得国グループ内の格差が広がる傾向が見られ、特に低所得国グループ間の格差が広がる一方で、平均値も低くなっている。現段階、新国富に含まれる自然資本は利用価値を中心とする農林漁鉱業および石炭、石油と天然ガスである。

次に、パネルモデルを用いて、貧困や格差が新国富とその構成項である自然資本に影響を与える要因を分析した。その結果、国内の貧困度が新国富に有意かつ負の影響が見られた(表(1)-2)。また、その影響は線形であるため、貧困撲滅が持続可能な発展に重要な意義を持つことが定量的に証明できた。

表(1)-2 新国富と貧困、格差の関係

Inclusive wealth index	Model I (Listwise dataset)	Model II (Listwise dataset)	Model III (Listwise dataset)	Model IV (Listwise dataset)	Model V (Imputed dataset)	Model VI (Imputed dataset)	Model VII (Imputed dataset)	Model VIII (Imputed dataset)
Poverty head ratio	-0.377** (0.098)	-0.147** (0.041)			0.013 (0.054)	-0.174** (-2.76)		
Poverty head ratio^2	0.003* (0.001)				-0.002 (0.001)			
Gini coefficient			-0.184 (0.405)	-0.155* (0.075)			0.955 (0.198)	-0.157 (0.118)
Gini ^2			0.001 (0.004)				-0.002 (0.002)	
Growth rate of terms of trade	0.018 (0.012)	0.019 (0.012)			0.033* (0.013)	0.040** (2.75)	0.040*** (0.009)	0.040** (0.009)
Income class	0.698 (0.776)	1.261+ (0.751)			1.045* (0.422)	0.939* (2.15)	1.546** (0.470)	1.549** (0.471)
Corruption	1.225** (0.489)	1.371** (0.49)		0.951** (0.358)	0.505+ (0.234)	0.521* (2.26)	0.495* (0.217)	0.500* (0.215)
Population density	-3.770 (4.854)	-3.646 (4.897)		3.928 (1.858)	-0.540 (0.573)	-0.480 (-0.84)	-0.240 (0.589)	-0.238 (0.590)
定数項	8.904 (8.769)	4.174 (8.652)	11.614** (8.959)	0.279 (4.897)	1.181 (4.101)	4.123 (0.85)	-2.347 (4.889)	0.954 (4.320)
N	401	401	669	592	5859	5859	5859	5859
R2	0.129**	0.111**	0.076**	0.048**				
BIC	2230.243	2232.663	4951.387	RE				

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、構築したデータベースを用いて、環境資源利用の限界や経済成長に与える影響などに基づき廃棄物削減に関する数値目標の設定や既存目標の補充など政策提言を行った。本研究の最も大きな貢献は、資源利用の効率性や廃棄物排出強度などの観点から、ゼロドラフトに挙げられた目標や指標により詳細な目標設計に関する提言ができた。その上で最終的にローカルな生活者の視点を織り込んだポスト2015年開発目標の策定に向けて新しい指標・目標を提案すると共に策定後にどのようにグローバルなレベルとリージョナル、及びナショナルなレベルを結ぶことができるか提案をした。さらに、貧困撲滅など中心目標と統合的な持続可能な発展指標や資源ストックとの関連性を明らかにし、数量的に中心目標の重要性や影響力、並びに具体的な目標設定に有力な根拠の提示ができた。そして、SDGsの今後の在り方の議論の一助として、SDGsを達成するために実施される施策が有効かどうか、また、それをどのように判断すべきかについて、「新国富」という新しい指標を活用し、その指標に必要な資本の量と価値という視点から、環境資源制約下での持続可能性の評価を実施することの必要性について議論した。具体的には、「新国富」によって、従来計測されることのなかった自然資本など新たな資本が計測され、より地域の持続可能性の評価が可能となることを示した。

今後、これらの対策が国や地域の持続可能性にもたらす効果についても「新国富」を用いて評価することが可能となるだろう。国際的な対策や地域レベルでの対策が、自国さらには世界に対してもたらす効果が、「新国富」といった指標で明確に示されれば、適切な資源管理に関する政策への第一歩へとつながることが期待される。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本テーマの研究成果を環境省マクロフレームWG・技術WG合同会合にて紹介し、我が国の発展の方向性について数値的な資料を提供した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

廃棄物や排出物の削減コストや鉱物資源の使用量制限による経済的なインパクトを推計しており、我が国を含めた国際的な枠組み提言に一石を投じるものである。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 観山恵理子、楊珏、馬奈木俊介：環境科学会誌,26, 579-586 (2013), 特集持続可能性評価のためのグローバル・データ分析: 多重代入法を用いた EKC の推計と GS の算出
- 2) N. KANIE, N. ABE, M. IGUCHI, J. YANG, KABIRI N., Y. KITAMURA, S. MANAGI, I. MITAZAWA, S. OLSEN, T. TASAKI, T. YAMAMOTO, T. YOSHIDA, Y. HAYAKAWA: Sustainability 6,1761-1775 (2014), Integration and diffusion in sustainable development goals: learning from the past, looking into the future.
- 3) E. MIYAMA, and S. MANAGI: Environmental Economics and Policy Studies, 16, 2, 115-135 (2014), Global environmental emissions estimate: application of multiple imputation.
- 4) J. YANG, S. MANAGI, and M. SATO: Environmental Economics and Policy Studies, 17,3, 431-453 (2015), The Effect of Institutional Quality on National Wealth: An Examination using Multiple Imputation Method.
- 5) J. YANG and S.MANAGI: Global Environmental Research, 19, 2, 199-206 (2015), The Dematerialization of Natural Resources and Resource Efficiency During 1990 to 2010.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 玉置哲也、中村寛樹、馬奈木俊介：OECC (2015)
環境資源制約下におけるSDGsのあり方と持続可能性

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) J. YANG、馬奈木俊介：環境経済・政策学会2014年大会（2014）
“Inequality and inclusive wealth: measurement of sustainable index by multiple imputations.”
- 2) J. YANG, S. MANAGI: World Congress of Environmental and Resource Economics, Istanbul, Turkey, 2014
“Institutions and national inclusive wealth: an examination using multiple imputation method.”
- 3) 玉置哲也、中村寛樹、馬奈木俊介、藤井秀道：環境経済・政策学会2015年大会，9月18日，京都大学（2015）
「鉱物資源の潜在価値と使用量制限の影響」
- 4) 玉置哲也、野澤亘、馬奈木俊介：日本オペレーションズ・リサーチ学会，2016年3月18日，慶應義塾大学（2016）
「生態系変化を考慮した気候変動経済モデルの検討」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) ワークショップ「大学生で語り合おう～ポストMDGsの課題って何だ？」（平成27年2月11日（水）、グランフロント大阪 大阪ガス都市魅力研究室、参加者約100名）開催
- 2) 馬奈木俊介、SDGsのあり方と持続可能性に関する高校出前授業①（2015年11月17日、福岡県立修猷館高等学校、聴講者48名）
- 3) 馬奈木俊介、SDGsのあり方と持続可能性に関する高校出前授業②（2015年12月17日、福岡県立修猷館高等学校、聴講者46名）
- 4) 環境研究総合推進費S-11・Beyond MDGs Japan一般公開シンポジウム 「2030年持続可能な発展目標：日本と世界の変革へ向けて－資源・環境制約－新国富（地域の豊かさ）提案－」（2016年1月15日（金）、国連大学ウ・タント国際会議場、観客約300名）パネルディスカッションにて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 中央公論（2016年5月号, pp. 62-69. 「『人的資本』の充実が日本の優位性を支える」）
- 2) 日経新聞（2015年3月5日、全国版、「やさしい経済学 環境と向き合う」馬奈木俊介、研究成果を紹介）
- 3) 九州大学プレスリリース（2015年12月7日、「持続可能な持続可能な開発目標(SDGs)は有効か?～「新国富」指標で測る地域の豊かさと持続可能性の評価～」、http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2015/2015_12_07_1.pdf)

- 4) Science Portal 科学技術の最新情報を提供する総合WEBサイト（2015年12月14日、科学技術振興機構「新たな国連開発目標（SDGs）～「新国富」指標で測る豊かさの評価～」、
http://scienceportal.jst.go.jp/columns/opinion/20151214_01.html）
- 5) ハフィントンポスト日本版（2016年2月5日、「国連からの提案！国会議員も注目！健康・幸せも見える化できる新しい指標「新国富」（インタビュー記事）
http://www.huffingtonpost.jp/miyuki-otsuka/new-national-wealth_b_9157400.html）
- 6) Tarzan（2016年2月25日、No.690、鬼トレ「エクササイズの値段も計算可能な新国富論，あなたの健康資本は今いくら？」（インタビュー記事））

（6）その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) J. Yang, S. Managi and M. Sato: Environmental Economics and Policy Studies 17 (3): 431-453 (2015), The Effect of Institutional Quality on National Wealth: An Examination using Multiple Imputation Method.

(2) 資源・環境制約下での開発及び成長実現のための目標や指標の提示に関する研究

上智大学 鈴木政史

<研究協力者>

関西大学 草郷孝好 (平成25年度)

上智大学 池田和弘 (平成26年度)

大阪大学 原圭史郎・上須道徳

平成25～27年度累計予算額：9,658千円（うち平成27年度：3,158千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

2015年以降の新たな国際開発アジェンダとして、持続可能な開発目標（SDGs）が合意された。ミレニアム開発目標(MDGs)が途上国の開発及び貧困削減を主たる目標としていたのに対して、SDGsはすべての国が環境共存と人間開発を両立しながら持続可能な社会の実現を目指すためのユニバーサルな目標となった。

一方、SDGsの議論のプロセスにおいて一般市民の関心・懸念がどの程度汲み取られたのかという点については疑問が残る。SDGsの議論においては、国連のThe World We Wantを通じてグローバルコンサルテーションやMY Worldではオンラインによるグローバルサーベイが実施されたが、こうしたグローバルキャンペーンによる意見収集がどの程度の一般市民に意見をカバーしていたのか不明瞭な点もある。また、SDGs合意後の焦点は、新たに合意されたSDGsをどのように各国の事情を考慮しながら2030年に向けて国レベルで政策として実施していくかという局面に移行したが、SDGsの国内実施に向けた政策策定プロセスにおいて各国が一般市民の関心・懸念を汲み取ることは非常に重要である。

本研究は、海外・日本国内の市民を中心としたステークホルダーを対象としたヒアリング・アンケート調査を通して国際的に議論されている「豊かさや幸福を考慮した開発目標」や「グリーン成長・経済」の概念に対するステークホルダー間の見解及びグローバルなレベルとローカルなレベルの見解の相違点を明らかにした。研究結果をもとにSDGsの国内実施に向けた提言を行なった。

[キーワード]

ミレニアム開発目標、持続可能な開発目標、市民の関心、幸福論、アンケート調査

1. はじめに

2015年以降の新たな国際開発アジェンダとして、持続可能な開発目標（SDGs）が合意された。MDGsが途上国の開発及び貧困削減を主たる目標としていたのに対して、SDGsはすべての国が環境共存と人間開発を両立しながら持続可能な社会の実現を目指すためのユニバーサルな目標である。

一方、SDGsの議論のプロセスにおいて一般市民の関心・懸念がどの程度汲み取られたのかという点については疑問が残る。SDGsの議論においては、国連のThe World We Wantを通じてグローバルコンサルテーションやMY Worldではオンラインによるグローバルサーベイが実施されたが、こうしたグローバルキャンペーンによる意見収集がどの程度の一般市民の意見をカバーしていたのか不明瞭な点もある。また、SDGs合意後の焦点は、新たに合意されたSDGsをどのように各国の事情を考慮しながら2030年に向けて国レベルで政策として実施していくかという局面に移行したが、SDGsの国内実施に向けた政策策定プロセスにおいて各国が一般市民の関心・懸念を汲み取ることは非常に重要である。

2. 研究開発目的

本研究の目的は主に3つある。1つ目の目的は、GDP指標で表せない豊かさ・幸福度を考慮した開発指標・目標及びグリーン成長・経済に沿った国際的な指標・目標を整理することである。2つ目の目的は海外・日本国内の市民を中心としたステークホルダーを対象としたヒアリング・アンケート調査を通して国際的に議論されている「豊かさや幸福を考慮した開発目標」や「グリーン成長・経済」の概念に対するステークホルダー間の見解及びグローバルなレベルとローカルなレベルの見解の相違点を明らかにする点である。日本国内の復興計画策定の中でこれからの経済発展のありかたやグリーン経済の導入などが議論されているが、様々なステークホルダーの間でこれからの概念に対する見解に大きな乖離がないか検討する必要がある。3つ目の目的は、上記2つの目的の達成を通してポスト2015年の開発目標における政策提言を行なうことである。

平成25年度はこの3つの目的の中ではじめの2つの目的に焦点を絞った。まず、国際的に議論されている指標・目標を整理・抽出し、真の社会的な豊かさやグリーン成長・経済の構成として考えられている要素を把握した。さらにこの要素の抽出結果に基づき、一般の市民対象としたアンケート調査票を設計し日本においてアンケート調査を実施した。平成26年度はこのアンケート調査結果の解析を進めると共に、アメリカ及びタイにおいてアンケート調査を実施し日本のアンケート調査の結果と国際比較ができるようにした。また本年度は特定のステークホルダー（「将来世代」の代表として大学生及び大学院生）に焦点を絞って持続可能な開発の課題に関する関心を抽出することも行なった。平成27年度は、平成25年度と平成26年度に実施したアンケート調査の結果のより詳細な解析を進めると共に、「持続可能な開発のための2030アジェンダ」として新しく採択された持続可能な開発目標に向けた提言を行なった。

3. 研究開発方法

平成25年から平成27年の3年間の研究を以下のステップ・方法に基づいて実施した。

- 1) 国際的に関心の高いターゲットまたは専門家の見解による指標・目標をヒアリング調査を通

して抽出。この要素の抽出結果に基づき、以下の項目を含むアンケート調査票を設計しアンケート調査を実施。

- 2) 日本でアンケート調査を実施。日本のアンケート調査の結果を分析。
- 3) 海外（タイ、アメリカ、インドネシア）においてアンケート調査を実施。海外の調査結果を日本の調査結果と比較。
- 4) 特定のステークホルダー（「将来世代」の代表として大学生及び大学院生）に焦点を絞って持続可能な開発の課題に関する関心を抽出。
- 5) 「持続可能な開発のための2030アジェンダ」として新しく採択されたSDGsに向けた提言

各ステップ・方法における詳細な結果と考察について次の項目で説明をする。

4. 結果及び考察

(1) ターゲット及び指標・目標の抽出とアンケート調査の設計

国際的に議論されている指標・目標を整理・抽出に向けて、国際的に関心の高いターゲットまたは専門家の見解による指標・目標（イシュー）の抽出を行なった。またMDGsとSDGsの議論の中心となっている3つの報告書(1.MDGs及びHigh Level Panel報告書, 2. Sustainable Development Solutions Network 報告書, 3.Open Working Group報告書) で現在取り上げられているMDGs/SDGsのイシューを抽出した。またイシューの抽出においては特に以下の点に配慮した。

- 1) 先進国側のイシューを考慮するため OECD の Better Life Index のイシューを採用する。
- 2) MDGs では取り上げられなかったが、High Level Panel (HNP) Report, Sustainable Development Solutions Network(SDSN) Report、Open Working Group(OWG) Reports で新たに取り上げられているイシューに注目する。
- 3) 前回の MDGs のターゲット達成の進捗状況がよくなかったイシューにも注目する。
- 4) SDGs サイドでは Plenary boundaries の boundary value を超えると判断されるイシューに注目する。
- 5) Green growth に関わるイシュー (S-11 他のメンバーから収集した) に着目する。
- 6) Resilience に関わりのあるイシューを採用する。

この要素の抽出結果に基づき、以下の項目を含むアンケート調査票を設計した。アンケート調査票の設計においては研究会を数回開催し様々な知見を織り込んだ。

- 1) 属性（住環境（都市部と農村部）に関する質問、健康状態に関する質問含む。）
- 2) 幸福度・満足度（例：あなたは、現在の生活に満足していますか。あなたは自分が住んでいる地域に満足していますか。）
- 3) それぞれのイシュー（差別・平等、健康、教育、貧困、法と人権、水、環境、エネルギー、国際的な課題、食糧と栄養、雇用）の中で 1)個人にとって、2)社会にとって重要なイシューをランキング。（例：あなたにとって最も大事な環境問題はなにですか。社会にとって最も大事な環境問題はなにですか。一番大事だと思う問題から順に3つ挙げてください。）

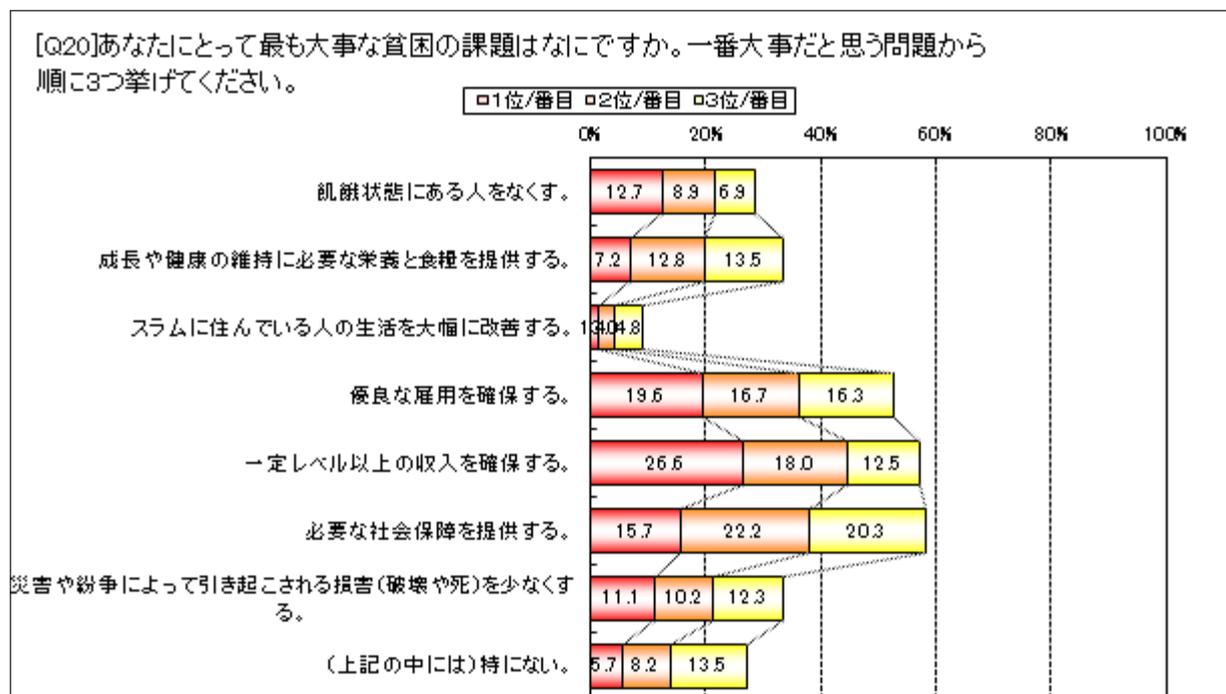
- 4) MDGs/SDGs イシューのランキング：イシュー横断的に重要な課題を5つ挙げてもらおう。
- 5) 価値観：価値観に関する質問（賛成・反対5段階の順位）を含む。（例：自分達の生活が今より多少不便になっても、地球環境を守るためにひとりひとりが努力すべきだ。30年後の世の中は今の世の中よりもよくなっている。自分の幸せにとってモノが豊かであることは大事だ。）

(2) 日本におけるアンケート調査の実施

設計されたアンケート調査票に基づいて、日本において持続可能な開発目標に関するアンケート調査(n=1,855)を実施した。25の社会的課題に対する一般の市民関心を測定すると共に、課題への関心と属性（性別、学歴、収入、既婚、子供、都市移住）及び幸福度との関係などを調査した。属性や幸福度が異なる多様な人々が、新しい目標として提案されている開発目標間の優先度や必要性に関して何らかの共通性や差異性を見出せるかどうかを探った。以下に3つの個別領域における関心の高い課題と低い課題を示す。

1) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：貧困問題

以下に日本における貧困の課題についての関心の分布を示す。



図(2)-1 貧困の課題についての関心の分布（単純集計 複数回答 n=1,855）

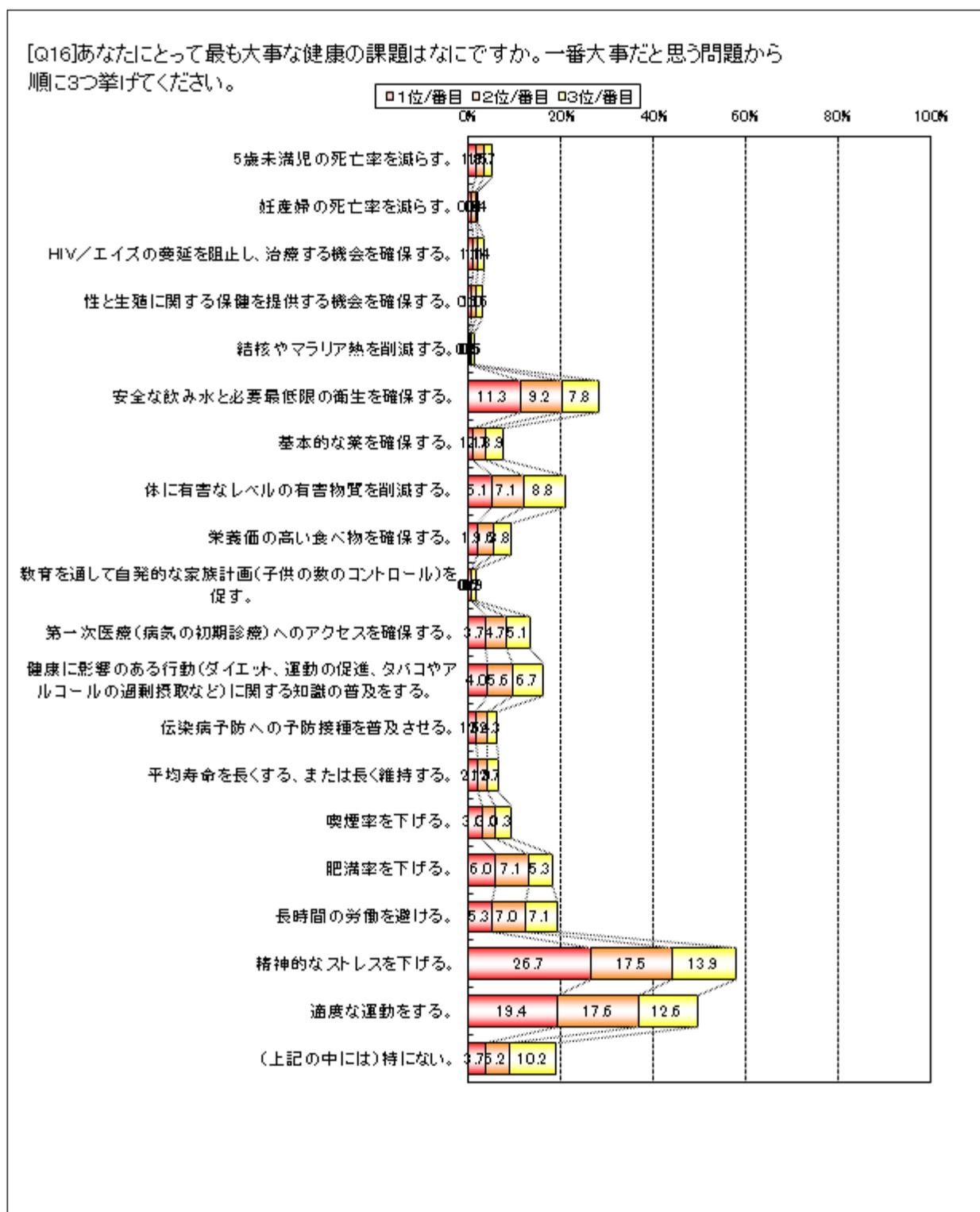
MDGsの最初に掲げられた「目標1 極度の貧困と飢餓の撲滅」は、MDGsの精神を示すものと言える。MDGsが作られた背景には開発や経済活動によるネガティブな影響が人間の生活条件を破壊することへの反省があり、開発の中心に人間を置き直しているからである。この精神は採択された

SDGsにおいても「goal 1. End poverty in all its forms everywhere」「goal 2. End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture」として継承されている。日本のような先進国でも極度の貧困や飢餓は社会問題として存在するが、途上国と比べればその重要度は下がる。上記の図が示すように、貧困の課題として挙げた7つの項目のうち、「成長や健康の維持に必要な栄養と食糧を供給する」は5位（3番目までの合計で33.5%、以下同様）、「飢餓状態にある人をなくす」は6位（28.5%）と優先順位としてはあまり高くはなかった。しかし、次に述べる健康の課題についての調査結果と比べると、順位は5位、6位と決して高いわけではないが、25%を超えて全体の1/4の支持を集めたことは注目に値する。

そうした中で貧困の課題として大きく関心を集めたものは「必要な社会保障を提供する」（1位、58.3%）、「一定レベル以上の収入を確保する」（2位、57.1%）、「優良な雇用を確保する」（3位、52.6%）である。いずれも50%を超えており、どの程度で貧困とみなすかあるいは何が貧困につながるとみるかは、その国、その社会の事情に合わせて数値や目標をローカライズすべきものという議論を裏付ける結果であると考えられる。

2) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：健康問題

以下に日本における健康の課題についての関心の分布を示す。



図(2)-2 健康の課題についての関心の分布 (単純集計 複数回答 n=1,855)

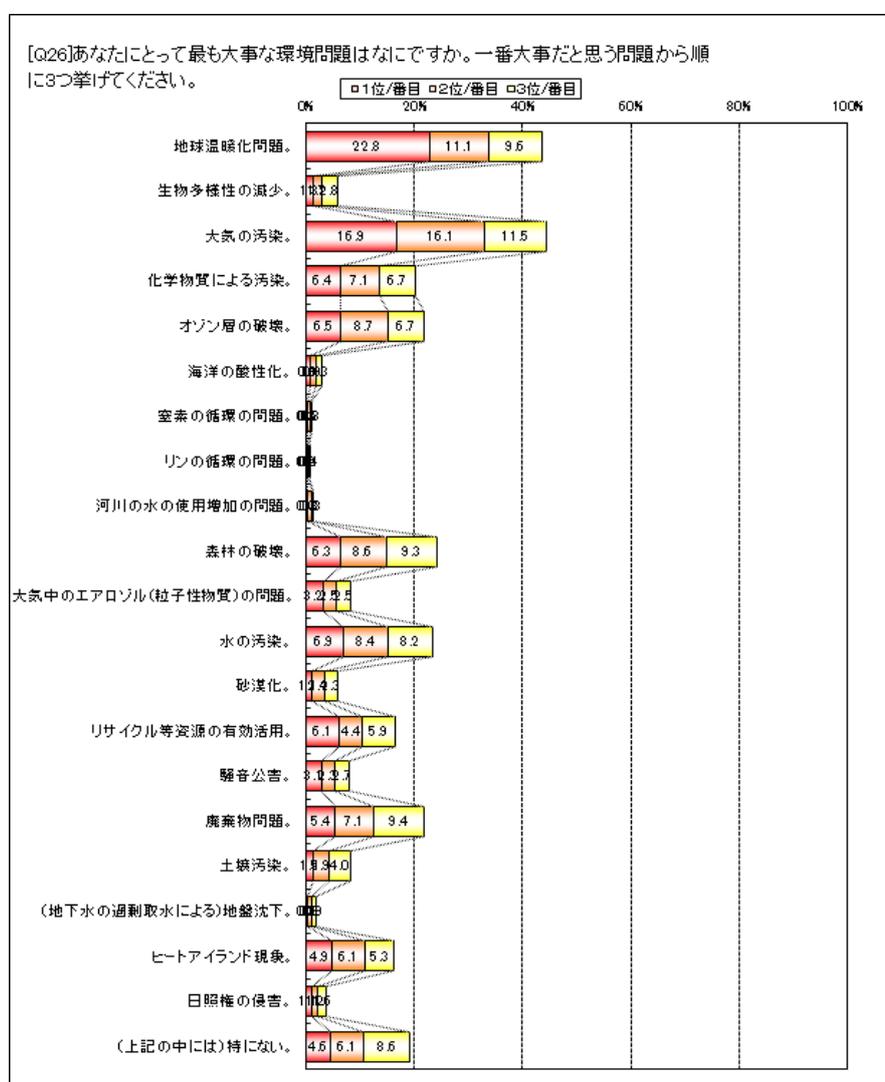
MDGsの項目のうち健康に関係するものは「目標4 乳幼児死亡率の削減」「目標5 妊産婦の健康の改善」「目標6 HIV/エイズ、マラリア、その他の疾病の蔓延の防止」と比較的数が多いが、健康問題についての調査結果によると、「5歳未満児の死亡率を減らす」(14/20位、5.0%)、「妊

産婦の死亡率を減らす」(17位、2.2%)、「HIV/エイズの蔓延を阻止し、治療する機会を確保する」(15位、3.6%)と、これらの項目への日本の市民の関心はきわめて低い。代わって支持を集めているのが「精神的なストレスを下げる」(1位、58.2%)、「適度な運動をする」(2位、49.5%)といった項目であり、運動不足とストレス過多という先進国特有の生活習慣が強く反映される結果となっている。

貧困問題と合わせて考えると、いわゆる途上国型の目標設定とされる極度の貧困や衛生問題の中でも、優先度は高くないが先進国内でも比較的広い関心を集めているものと、ほとんど関心を集められていないものの二つのタイプがあることが分かる。

3) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：環境問題

以下に日本における環境の課題についての関心の分布を示す。



図(2)-3 環境の課題についての関心の分布 (単純集計 複数回答 n=1,855)

先進国型の意見分布という意味では、環境の課題も先進国に特有の傾向をみせている領域であ

る。環境問題についての調査結果（図(2)-3）によると、関係する20項目のうち、「大気の汚染」（1位、44.5%）、「地球温暖化問題」（2位、43.5%）が突出して高い値を示し、「森林の破壊」（3位、24.2%）、「水の汚染」（4位、23.5%）、「オゾン層の破壊」（5位、22.0%）と続いている。特に高い関心が寄せられた大気の汚染と地球温暖化問題は、現時点での日本国内の影響の出方は途上国と比べれば比較的軽微であるにもかかわらず、騒音公害、廃棄物問題、土壌汚染、地盤沈下、ヒートアイランド現象、日照権の侵害のような自らの日常生活に直接関係してくる環境問題よりも幅広い支持を集めている。したがって、特に先進国内部に特化した関心の分布としては、自分の身に直接降り掛かってくる問題（健康の課題における社会保障など）と、中長期的なスパンで見たときにリスク要因になりそうなもの（環境の課題における温暖化など）のこちらも二つのタイプの存在が想定できる。前述した通り「My World 2015」のサーベイ結果においては気候変動問題への取り組みが一番低いという結果になったが、日本においては気候変動問題という中長期的なスパンの課題にも関心が高いという結果になった。このような結果になった理由として様々な理由が考えられるが、1つに理由として、近年、不規則な気温の変化、大気の乱れ、動植物への影響などが顕著になってきておりこの傾向が続いた時の将来への不安が関心度の高さとして出てきているのではないかと考えられる。また大気の汚染を大事な環境問題であると答えた人も多く、PM2.5などの大気汚染の問題が日本では高くなってきていることを示している。

一方、途上国で同じアンケート調査を実施する場合、後述のとおり地域によっては大気の汚染と共に水の汚染、森林破壊、砂漠化という問題への関心が高くなることがある。また、前述のPlenary boundariesのboundary valueを超えると専門家が判断するイシューとして地球温暖化問題と共に生物多様性の減少の問題とリン・窒素の循環の問題が取り上げられているが、今回のアンケート調査ではこれからの問題への一般の人たちの高い関心は見られなかった。ここには専門家と一般の人たちのこれからの環境問題の緊急性の認識に大きな乖離があることが考えられる。

前述のとおり環境問題の他に、他のポストMDGsに関わるそれぞれ問題（差別・平等、健康、教育、貧困、法と人権、水、エネルギー、国際的な課題、食糧と栄養、雇用）に対する日本の一般の人たちの関心度を調査した。健康問題に関しては、精神的なストレスと適度な運動を行なうことへの関心が非常に高い一方、従来のMDGsの目標で取り上げられていた幼児死亡率の削減やHIV/エイズやマライアの蔓延防止という課題への関心は低いという結果になった。このように様々分野において先進国と途上国の関心が異なるケースが多い可能性を示している。

（3）日本におけるアンケート調査の結果分析（一部）

以上、日本における3つの個別領域における関心の高い課題と低い課題を示した。以下、さらにこの3つの課題を超えた教育、食糧、その他の社会的課題を領域横断的に見た場合に優先される課題を示す。また、回答者の属性、幸福度と優先課題の分析結果の一部を示す。

1) 領域横断的に見た場合に優先される課題：今の生活に足りていない問題

「あなたの今の生活に足りていない問題はどれですか」という質問への回答傾向から、領域横断的に見た場合に優先的に関心が寄せられている課題を検討する。この設問は調査者側で予め設定した25の項目について、充足されていないと思う問題から順に5つ挙げてもらった。枚数制限の都合上集計結果を図では示さないが、「優良な雇用を促進する」（1位、33.3%）や「経済成長を持

続する」（4位、27.1%）など、経済や家計に関する項目に回答が集まる中で、「持続可能なエネルギーの導入を進める」（2位、29.5%）が上位につけ、「限りある資源を有効活用する」（6位、26.9%）、「大気汚染を削減する」（7位、25.1%）や「温暖化が進まないように温室効果ガスを削減する」（8位、24.2%）など、環境への関心も根強く存在することが分かる。また、「災害から身を守る社会を構築する」（3位、28.0%）、「犯罪や暴力の少ない安全に暮らせる社会を構築する」（5位、27.0%）のように安心・安全に関わる項目への関心も高く、レジリエンスの問題も反映されているものと推察できる。

一方、「極度な貧困状態にある人をなくす」（12位、12.2%）や「誰もがプライマリーヘルスケアを受けられる」（15位、11.5%）、「安全な飲み水へのアクセスを確保する」（17位、9.2%）、「HIV／エイズの蔓延防止、減少させる」（24位、4.6%）など、従来のMDGsの課題に対する関心はあまり高くなかった。この結果から、従来のMDGsからSDGsに組み替えるにあたって、先進国の課題を盛り込むことが重要であることが見えてくると同時に、先進国内で途上国型の課題への関心をどう維持するかが問題として浮かび上がってくる。

2) 偏りなく関心を集める項目と、特定の属性の人々の意向を反映する項目

次に、「今の生活に足りていない問題」の上位10項目について、各項目への回答を被説明変数（該当あり=1、なし=0の2項変数）としたロジスティック回帰分析を行った。枚数制限の都合上集計結果を図では示さないが、モデル χ^2 値は災害対策、経済成長、犯罪抑制、収賄腐敗の4項目において統計的に有意を示さなかった。これはモデルに各変数を投入しても説明力が向上しなかったことを示しており、より日常的な言葉で言い換えれば、どのような属性（年齢や性別など）をもつ人からも偏りなく関心が集まった項目を示している。したがって、こうした項目は特定の属性をもつ人々の意向を反映しているというよりも、より広く社会的な営みのベースになるような項目、すなわち、広い意味での社会資本だと考えることができる。

それに対して、その他の項目は、雇用促進は収入と幸福度に、再エネ導入は年齢と学歴に、大気汚染は大都市居住に、資源活用と温暖化、有害物質は幸福度に（有害物質は年齢と性別にも）それぞれ統計的に有意な関係が見られた。これは、それぞれの項目が特定の属性をもつ人々から特に関心を集めたことを示している。雇用促進は収入と幸福度が低い人々から重要であると評価され、広く貧しさと関係していることが分かる。再エネ導入は高学歴で比較的年齢の高い人が多く、こちらは知識や社会的立場と関係しているのではないかと解釈できる。また、環境問題との関係では、再エネ導入を除く関係する3項目がすべて幸福度とプラスの関係にあることも重要な知見となると考える。

3) これからの生活に重要な問題

以上の分析は「今の生活に足りていない問題はどれか」という聞き方をした設問への回答に基づいたものである。われわれの調査では同様の選択肢群に対して、「あなたの今の生活、これからの生活に重要な問題はどれですか」として、もう一つ別の聞き方をした設問を用意しておいた。「今の生活に足りていない問題」が現在の自分の生活実感に即して「欠けている」項目に力点があるのに対して、「これからの生活に重要な問題」は現在から将来をみたときの「展望」に関係している。

枚数制限の都合上集計結果を図では示さないが、「犯罪や暴力の少ない安全に暮らせる社会を構

築する」(1位、43.0%)が1位にきていることから分かるように、全体として安全、安心に関わる項目が前面に押し出されている。また、「今の生活に足りていない問題」ではあまり関心を集めていなかった「安全な飲み水へのアクセスを確保する」(8位、26.7%)と「誰もがプライマリーケアを受けられる」(10位、19.6%)が上位に入ってきていることも注目に値する。これらのいわゆる途上国型の課題が比較的上位に入っていることは、現在から将来をみたときの展望が、自分の現在の状況を反映しているだけでなく、この先の社会のあり方や向かうべき方向性といった規範的な価値意識の影響を受けていることを示唆している。

(4) 海外におけるアンケート調査の実施と結果(一部)

日本で使用したアンケート調査をタイ(n=517)、アメリカ(n=1,031)、インドネシア(n=515)においても使用しアンケート調査を実施した。日本同様、25の社会的課題に対する一般の市民関心を測定すると共に、課題への関心と属性(性別、学歴、収入、既婚、子供、都市移住)及び幸福度との関係などを調査した。紙面の枚数制限の関係で、以下、アメリカとタイにおける個別領域における関心の高い課題と低い課題として貧困、健康、環境問題の調査結果、及び、領域横断的に見た場合に優先される課題の調査結果を日本と比較しながら示す。

1) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：貧困問題

日本においては「一定レベル以上の収入を確保する」を26.6%、「優良な雇用を確保する」を19.6%、「必要な社会保障を提供する」を15.7%の回答者が一位として選んだ。タイにおいては「一定レベル以上の収入を確保する」を21.3%、「必要な社会保障を提供する」を19.1%、「飢餓状態にある人をなくす」を18.4%の回答者が一位として選んだ。アメリカにおいては自分にとって「優良な雇用を確保する」を22.1%、「必要な社会保障を提供する」を18.2%、「飢餓状態にある人をなくす」を17.0%の回答者が一位として選んだ。この結果が示すとおり、タイで以前のMDGsで焦点だった「飢餓の撲滅」への関心はそれほど高くなかった。一方、タイ、日本共に「社会保障システムの確保」及び「一定以上の収入を確保」という課題への関心が高かった。一方、アメリカでは「飢餓の撲滅」への関心が高く、国内の大きな貧富の差が影響しているのかもしれない。

2) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：健康問題

一位に選ばれる課題は国によって異なったが、5歳未満児の死亡率を減らすや結核やマラリア熱を削減するなどMDGsの健康の課題への関心は低く、市民の健康の課題が大きく変化していることを示す結果になった。日本においては「精神的なストレスを下げる」を26.7%、「適度な運動をする」を19.4%の回答者が一位として選んだ。タイにおいても同様の傾向で、「適度な運動をする」を11.2%、「精神的なストレスを下げる」を11%の回答者が一位に選んだ。一方、アメリカにおいては「第一次医療(病気の初期診療)へのアクセスを確保する」を17%、「適度な運動をする」を13%の回答者が一位に選んだ。アメリカにおいて第一次医療へのアクセスへの関心が高いのはアメリカの医療、保険事情と関係があると考えられる。

3) 個別領域における関心の高い課題と低い課題：環境問題

日本同様、タイ、アメリカにおいても「地球温暖化問題」と「大気汚染」が多くの回答者によ

って一位に選ばれた。更にアメリカの回答者が「水の汚染」を、タイの回答者が「森林の破壊」を、日本の回答者が（社会にとっての場合は）「オゾン層の破壊」を一位として選択した割合が多かった。日廃棄物や水の汚染などローカルな環境問題への関心も高いが、短期的に自らの生活に影響がでない気候変動への関心がタイでも高いという結果が出た点は特筆に値する。

4) 領域横断的に見た場合に優先される課題：今の生活に足りていない問題

一位に選ばれた問題（5位まで）は国によって大きく異なる結果となった。日本においては「優良な雇用を促進する」を13.3%、「持続可能なエネルギー（再生可能なエネルギーなど）の導入を進める」を7.8%、「災害から身を守る社会を構築する」を7.2%、「経済成長を持続する」を6.8%、「政府の役人の収賄や腐敗を減らす」を6.1%の回答者が一位として選んだ。雇用や経済成長への関心が高いのは停滞する経済状況と関係があると考えられる。災害から身を守る社会の構築に関しては、東日本大震災が大きく影響をしていると考えられる。アメリカにおいては「貧しい国への援助を進める」を10%、「HIV/エイズの蔓延を阻止し、減少させる」を7%、「温暖化が進まないように温室効果ガスを削減する」と「生物多様性を守る」を6%、「政府の役人の収賄や腐敗を減らす」を5%の回答者が一位として選んだ。他の国と比較すると、貧しい国への援助、温暖化、生物多様性などグローバルな課題への関心が高いという結果になった。タイにおいては「犯罪や暴力の少ない安全に暮らせる社会を構築する」を9.1%、「政府の役人の収賄や腐敗を減らす」を8.1%、「優良な雇用を促進する」を7.4%、「経済成長を持続する」を7.2%、「誰もがプライマリー・ヘルスケア（住民に最も身近な根本的な医療）を受けられる」を4.8%の回答者が一位として選んだ。犯罪・暴力や腐敗など途上国を中心に関心の高い課題と優良な雇用や経済成長など発展している国を中心に関心の高い課題が混在しているという結果になった。

(5) 「将来世代」の代表の持続可能な開発の課題に関する関心抽出

以上、日本及び海外で実施されたアンケート調査の結果の一部を示した。一方、平成26年度には特定のステークホルダーに焦点を絞って持続可能な開発の課題に関する関心を抽出することも行なった。特定のステークホルダーとして将来の持続可能な社会の実現を担う次世代である日本の大学生・大学院生を選び、ワークショップを通して、彼らの視点から見たMDGs/SDGsの課題の優先度を議論、提案することを行なった。

ワークショップは大阪ガス都市魅力研究室の協力を得て、2015年2月11日に実施した。大阪、神戸、東京、広島から集まった23名の学生に、自身の生活や社会全体において大事なMDGs/SDGsの課題を抽出してもらった。「個人の幸せ」を起点として、「幸せな社会」とその実現のための方策に関して、グループディスカッションを通じて議論を深めた。個人の幸せから社会全体の豊かさへと議論の範囲をスケールアップしていくことで、持続可能な社会をより身近な課題として捉えてもらえるような工夫をしたところ、それぞれの持つ人生観や問題意識、ライフスタイルが反映されたリアリティ溢れる議論が展開された。複雑化、多様化する諸課題へのソリューションを創出し、持続可能な社会へと変革していく、それを主体的に担う次世代が、理想やビジョンを率直に発し、対話する機会は極めて重要な協働プロセスの一部であった。

以下、ワークショップの形式及び結果を示す。ワークショップ形式で4名から5名の6グループに分かれて決められたテーマを自由に議論してもらった。以下のように3つのセッションを設け、議

論を行なった。

セッション1: 個人の幸せと社会との関連性

『あなたの幸せにとって必要なことって何ですか?』

セッション2: ポストMDGsの課題に関する問題意識

『ポストMDGsの課題（各テーマ別）について話し合おう』

セッション3: 幸せで持続可能な社会のビジョンとその実現方策

『幸せな社会とはどんな社会?その実現のための提案は?』

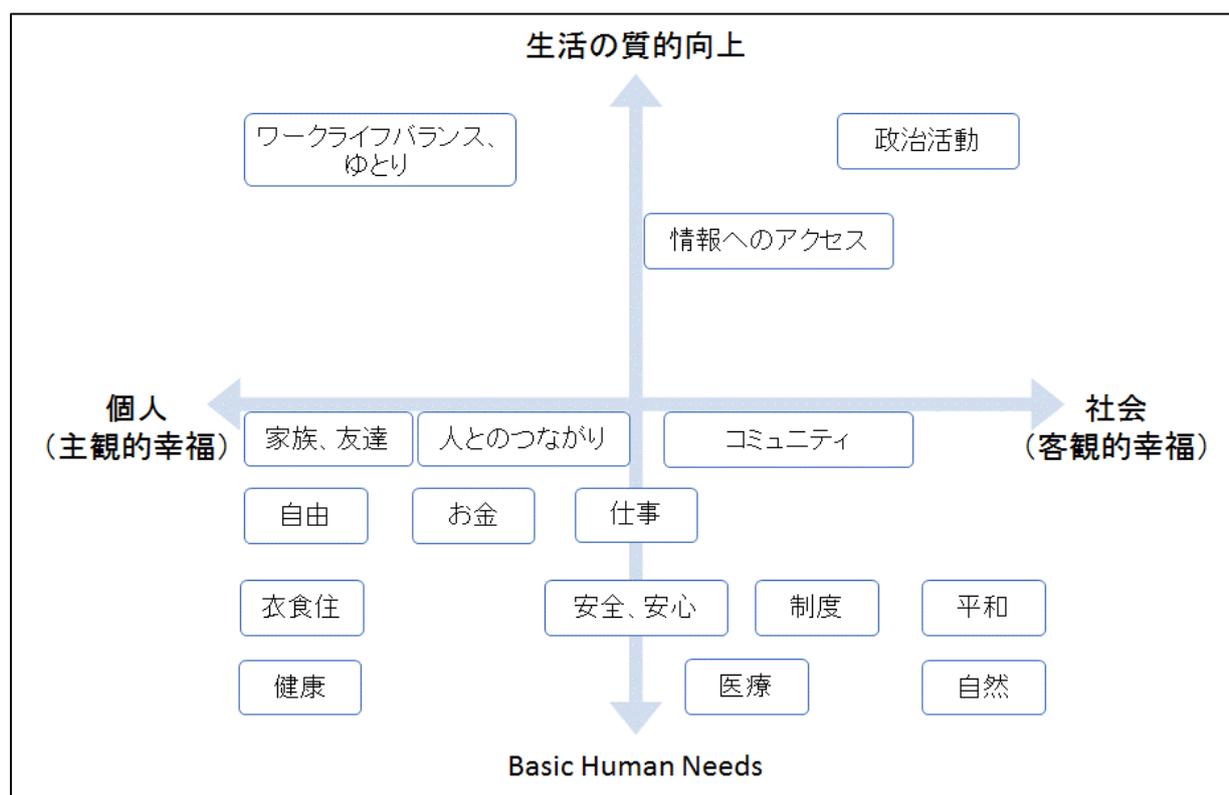
セッション2については、MDGsの8目標に含まれる「貧困」「保健」「人権」「教育」「環境」「エネルギー」をテーマとして、グループディスカッションを実施した。KJ法によりグループ毎に議論の内容を取りまとめ、全体で共有する形式で実施した。

1) 個人の幸せと社会との関連性に関する考察

導入として、コーディネーターより、ワークショップの開催趣旨及びMDGsの概要、達成状況、SDGsに関する国際動向が説明された後、学生によるグループワークを実施した。第一に、「個人の幸せ」を起点として、「幸せな社会」とその実現のための提案に関してグループディスカッションを行った。個人レベルでの多様な価値観やライフスタイルに基づく「幸せ」について意見交換をした後、その実現を可能とする社会のあり方に関して議論した結果をKJ法によりとりまとめ、全体で共有した。その結果、次のような点が明らかとなった。

まず「個人の幸せ」にはいくつかの共通要素が存在することがわかった。最低限の日常生活に必須なものとして、平和、衣食住、お金、健康、家族や友人等とのつながり、それを支えるための仕事、コミュニティ、自然環境、そしてより豊かで充実した生活を送るためのワークライフバランスが挙げられた。これらの主たる共通要素は、図(2)-4のように整理ができる。横軸に個人の幸せ（主観的幸福）及び他者や社会全体の幸せ（客観的幸福）、縦軸にHuman Basic Needs及び生活の質向上の文脈で出されたキーワードを配置したところ、特に個人の最低限の生活に必要な項目（第3象限）、次いでそれを支える社会に必要な項目（第4象限）が多かった。このことから、個人及び社会レベルにおいて最低限必要な条件として、生命の維持やコミュニティの形成等の観点が共有されていることが明らかになった。より質的な幸せの要素（第1、2象限）については、個々人の価値観の基づく部分が大きく、それが意見の多様性となって顕在化したと指摘できる。

幸せの要素として、他者との関係性に重点を置く意見が多数聞かれたことも特筆すべきであろう。「自分の幸せは、他人も幸せかどうかという点に密接に関係している」との意見も挙がり、「社会の一構成員としての個人」というよりも、「自分も他人も含めて個々が充実した生活を送れるか」という点を重視する傾向が読み取れた。



図(2)-4 個人及び社会の幸せに必要な共通要素

幸せを実現する要件として、「機会の確保」に着目した意見も出された。発言者より、機会には「受動的に与えられるべき機会」及び「能動的に得る機会」に分けることができ、前者には食やお金、健康等、後者には学び、モチベーション、人とのつながり等が該当するとの説明があった。人間的な生活を営む権利としての機会が確保されているかどうかを重要視するとともに、生活の質的向上及び成長実現のための機会の獲得へつなげていくことが幸せにつながっていくことが指摘された。一方で、都市と地方での機会の不平等があるという問題にも触れ、日本でも深刻な都市と地方の格差への取組が急務であるとの課題が共有された。

また、ブルントラント委員会以降提唱されてきた持続可能な開発の概念にある「世代間、世代内での平等」という観点についても考慮した意見として、「循環」に関する言及もあった。循環可能な社会経済システムを確立していくことで、将来世代の持続性も確保できるとの意見が出された。さらに、個人の幸せを同定したり、社会との関係性を通じて幸せを捉える特徴的な観点も紹介された。その観点を測る指標として、「笑顔」を幸せの指標としてはどうかとのユニークな提案もなされた。人とのつながりという文脈において、個々人がそれぞれの幸せや生活の充実を追求していくだけではなく、他人も思いやり合える人間関係が広がっていくような社会が理想であるとして、その効果は「笑顔」によって測ることができるのではないかと意見であった。ポストMDGsにおける持続可能な開発に関する課題についての考えを深めるために、MDGsについての現状認識及び問題意識を共有した。前述のとおり、MDGsの8目標に含まれる「貧困」「保健」「人権」「教育」「環境」「エネルギー」をテーマとして、グループディスカッションを実施した。以下、これからのテーマの議論を簡単にまとめる。

2) 貧困問題

そもそもなぜ貧困という概念が生まれたのか、という根本的な点について問題提起がなされた。この点について、グループディスカッションでは、近代化が進む中で、人々が経済的、物質的な豊かさを求める中で、「貧困＝悪」として捉えるようになったのではないかと、との意見が出たという報告があった。貧困には絶対的貧困と相対的貧困が存在するとの認識を前提として、ディスカッションがなされた。最貧国を中心とする多く地域では、日々の生活にも困窮し、明日生き延びられるかもわからない程の絶対的貧困に苦しむ人々がいるにも関わらず、新興国や先進諸国では、あらゆる種類の食品で溢れ、日常的に大量の食品が廃棄されている現状があることに対する矛盾と、その現状に多くの人が無知、無関心であることへの問題が指摘された。こうした現状を打開していくためには、まず現状を周知し関心を喚起すること、そして課題解決に向けた援助を増やしていくことが重要であるとの意見が挙げられた。その一方で、先進国における貧困問題として、相対的貧困についても言及された。日本の大都市においても、ホームレスの集まるエリアや風俗エリアがあることから、貧困に苦しむ人々は確かに存在するという現実についての認識を共有した。こうした異なる貧困が様々な形態で顕在化する中で、共通点として「貧困は悪循環の中で発生する」、「貧困からはなかなか脱出できない」という負のスパイラル構造であるとの指摘がなされた。そうした悪循環を断ち切り、好循環を生み出すための取組として、BOPビジネス等が実施されていることも共有された。

3) 保健問題

保健に関する課題として不衛生、医師不足、栄養失調等が挙げられるとともに、保健を維持するにあたっての自然環境問題や紛争等の阻害要因に関してディスカッションが行われた。健康を脅かす問題はフィジカルヘルス及びメンタルヘルスに大別できる。フィジカルヘルスに関してはすべての国において、メンタルヘルスに関してはとりわけ先進国において深刻であり、関連する保健分野においても課題の顕在化が見られるのが現状ではないかとの意見が出された。日本でも深刻化する課題としては、地域医療における医師不足や高齢者医療への対応に関する課題、添加物等による食の問題が指摘された。途上国では、医療の発達のための医療物資や医師の移動のためのインフラ整備が不可欠である点が強調された。途上国の発展においては、公害問題も保健に影響を及ぼすものとして、産業化・工業化における保健への配慮という点についても注目すべきとの意見があった。さらに、保健における課題の背景として、資本主義の存在が指摘された。たとえば、医療を届けるとき、裕福な患者にサービスした方が医師にはメリットが高いことが医療格差の原因となってしまう。また、医療技術の質を支えるNGOや教育の役割にも注目すべきとの意見があった。保健と他の関連分野とのインターリンクを意識した発言もなされた。たとえば、人権の観点から見ると、保健はすべての人が健康な生活を送る権利を行使するサポート機能を果たすべきであり、医療制度の整備や住居、栄養のある食事、お金等の確保及び国の統治能力の向上がキーとなるとの議論になったとの報告があった。

4) 人権問題

人権問題においては、「選択肢」が鍵になるとの発言がなされた。人権に関する問題は、選択肢はあるが選択できない状況下（紛争等）で起きてしまう人権問題と選択肢がないこと（生まれなが

らの障害等)による人権侵害に分けられるとの意見が挙げられた。人権には、自由、選択、平等という観点が必要であり、宗教の自由や教育を受ける権利の阻害、ジェンダー問題、人種差別等、すべての国において共通する課題が多いことが指摘された。人権を確保する際のジレンマとして、個人レベルの人権をどの程度認め守るべきかについて議論になった。たとえば貧困は人権確保という観点から解決すべき重要な問題であるが、一方で、貧困撲滅への支援により死亡率が低下、寿命が延長されると、人口増加が引き起こされる可能性がある。そうした影響も勘案した上で、包括的な判断をしていく必要があるとの言及があった。そのための人権教育や国民意識の向上が必要不可欠であるとの意見が共有された。また、GDPによって求める人権が変わってくることも指摘された。GDPの高い国は、自由や個人の尊厳に関わる人権を求める傾向があるが、低い国はまず生存に関する人権を獲得する必要がある。現在、人権については一国の憲法の中で考えてしまっているが、グローバル化・ボーダーレス化が進む中で、「世界共通の普遍的な人権」について考えていく必要があるのではないかとの問題提起がなされた。

5) 教育問題

教育に関しては、途上国における教育機会の不平等の解消及び初等教育の完全実施への支援について着目した議論が展開された。途上国では、学校教育の必要性に関する理解が十分に浸透していないという現状を打開するとともに、人が生きていく上での思考や判断基準の養成の場である学校教育、とりわけ初等教育の役割とその重要性に関する認識を普及させることが肝要である。初等教育に共通して重要である内容としては、倫理的なものや文化慣習等が挙げられるが、これらは地域別に考える必要があるとの指摘もなされた。環境教育の整備に関する課題として、収入格差や差別(少数民族や障害者等)、難民の教育へのアクセス等が挙げられた。日本における教育問題として、学習意欲の低さが指摘された。たとえば、小学校教員の労働時間は、授業のみならず放課後の部活動指導等を含めると極めて長い現状がある。こうした多大なる負担が教員の意識の低下につながり、学生の学ぶ意識も低くなる「負のスパイラル」の原因なのではないかとの推察が共有された。その他、教育の質的向上のためには、座学ではなく体験学習等による学びの多様性の確保、教育環境・制度の整備が必要であるとの意見が出された。

6) 環境問題

環境問題として、気候変動や温暖化、それに伴う海面上昇、森林破壊、砂漠化等、様々な問題が挙げられた。その影響に関しては、より人々の日常生活に近い局所的にもたらされる場合と、地域や地球レベルで広範にもたらせる場合があるとの指摘があった。局所的な影響に関しては、ごみの異臭や衛生問題、騒音、土壌汚染による食の安全等の健康被害が挙げられた。また、人口増加により引き起こされる食料危機やエネルギー不足等、他の問題との連関やトレードオフについても議論が及び、環境問題の多様性と複雑性が再認識された。その上で、解決には中長期的な対処が必要であるとともに、環境問題の原因となる社会経済活動を担う企業等も、解決に向けて主体的に取り組むべきであると言及された。持続可能な開発には、環境及び開発問題の双方に対処していかなければならないとの意見が共有された一方で、SDGsにおいて環境と開発が並列にされているのは、混乱を招きやすいとの指摘もなされた。これは、持続可能な開発の概念をめぐる本質的な議論に通じるものであり、課題の優先度を同定する上での重要な課題が指摘されたと言える。さらには、日

本の環境問題の原点とされる公害問題を事例として、公害という形での環境問題の顕在化と市民運動による制度や政策整備等が、課題解決に大きく貢献したことを指摘し、環境問題解決に向けた市民の意識改革が重要な役割を担うとの発言がなされた。

7) エネルギー問題

エネルギーは、あらゆる人間活動の源であり、豊かになるための発展には必要不可欠であるとの認識が共有された。近代化に伴い、電気エネルギーに依存する生活が前提となる中で電気エネルギーが必須となってきたという状況を鑑みると、人間は近代的価値の中で生きることを強要されているとの見方もできるとの指摘があった。現状においても豊かな国については、さらなる経済発展は不要ではないかとの意見も出された。一方、途上国では引き続き経済発展が必要とされている状況の中、世界におけるエネルギー需要の地域差は非常に大きいことが指摘された。エネルギーの生産・供給に関する問題として、エネルギー資源の過剰採掘による環境破壊や化石燃料等の資源枯渇等が挙げられた。原子力発電に関しては、特に安全性という観点から、原子力発電所周辺住民の権利をどう考えるべきかについて、国民一人ひとりの意識を高めて議論していくことが重要であるとの認識が共有された。エネルギー問題は、現代世代のみならず未来世代に渡って快適に暮らせることを追求していくべきであり、その実現のためには国家間の協力や個人の意識向上が必要であるとの考えが表明された。

8) 幸せで持続可能な社会のビジョンとその実現方策

幸せな社会に必要な要素として、衣食住、平和、選択肢や自由の保障等が挙げられた。人がより良く生きていく上では、選択肢の充実が肝要であり、その保障のために人権や保健、教育の整備が必要であるとの理由が述べられた。人権に関しては、その捉え方に差異が存在するとの指摘がなされ、幸せな社会形成においては、すべての市民が納得できる人権のあり方や選択肢について議論、検討していく必要があるとの意見が出された。社会全体での幸せ実現を考える際に、個人の幸せのあり方と結びつけて思考する意見も多く聞かれた。たとえば、個人の精神的な幸せの実現も重要とする立場から、「世間体に囚われずに自由に生活を送ることができる」、「自己の意思が尊重される生き方」、「自己実現のための挑戦ができる」等が具体例として挙げられた。これとは逆の発想で、社会全体での幸せを実現するには、全体最適として諸課題に解決していく視点が不可欠であり、その際に自己実現があるとの意見も表明された。

幸せな社会実現に向けたアプローチとしての特徴もいくつか言及された。第一に、個人及び社会の幸せを実現していくためには、まず不幸せの解消、すなわち絶対的貧困の撲滅が必要である。その上で、幸せな生活へとつなげていくというアプローチが有用なのではないかという議論がなされた。不幸せの解消から幸せの実現につなげていくポイントとして、個々人の取組や人との出会い、教育、資金等が挙げられた。さらに、それらの結び付けを強化するための政策を講じていく必要もあり、たとえば先進国の成功例や発展によって獲得した利益等のノウハウやインセンティブをより広範に広めていくことも有用なアプローチとの発言がなされた。その一方で、先進諸国では選択肢が多すぎるという指摘もあり、適度な選択肢が必要であるとの意見もなされた。また、不幸せでない状態から幸せな状態への動機付けとなることをデータ化することも重要であるとの意見が述べられた。データ化のためのマテリアルに関しては、今後議論が必要であるとされた。このよ

うな個人及び社会の幸せ拡大に向けた動機づけのデータ化は、実施効果や成果を評価するための指標の議論に通じる。

社会の基盤づくりとしての教育の重要性に関しても言及された。初等教育の普及は、貧困層に発展に必要となる知識やスキル養成の機会を提供するものと捉えられる。さらに、教育を通じて、他者と対話し、新しい価値観に出会うことや文化の多様性、相互理解を向上できるとの意見もあった。南北・南南問題も幸せな社会に向けて解決すべき喫緊の課題として挙げられた。先進国と途上国の格差を解消するための具体的な方策として、企業によるBOPビジネスや政府によるODAの強化等の重要性に関しても発言がなされた。また、途上国の開発支援策として、先進国の発展事例の共有や技術・ノウハウの移転等の一層の拡充をし、各国に合わせた持続可能な発展の多様性を認めながら、国家間の経済格差を解消していくことが重要であるとの指摘があった。さらに、あらゆるレベル及び分野での持続可能な発展を推進していくために、SDGsの実施主体として、個人、市民団体、企業、行政等のステークホルダー、そしてマルチステークホルダー・パートナーシップが重要であるとの認識が共有された。国同士のパートナーシップも不可欠であるとの指摘もなされた。

このように、幸せで持続可能な社会のあり方及びその実現に向けた方策やアプローチに関して様々な意見が共有され、具体的な提案も含まれていた。参加者は自由な発想で社会のビジョンを思い描くと同時に、その限界に関しても認識している。特に、主観的な幸せの要素は個人の価値観に大きく依存することから、個人差があること、さらに本提案はユース目線の提案であり、世代や国・地域等の生活環境、個別のバックグラウンドが異なれば、幸せを捉える際にまったく異なる観点が見出される可能性が大いにあることが言及された。

9) ワークショップの議論のまとめ

本ワークショップでは、「個人の幸せ」を起点として、「幸せな社会」とその実現のための提案に関してグループディスカッションを行った。個人の幸せから社会全体の豊かさに、議論の範囲をスケールアップしていくことで、持続可能な社会をより身近な課題として捉えてもらえるような工夫をしたところ、それぞれの持つ人生観や問題意識、ライフスタイルが反映されたリアリティ溢れる議論が展開された。本ワークショップを通じて得られた意見や提案は、データや科学的根拠による裏づけが必ずしもなされているわけではなく、実社会での適用には実現可能性や有用性の検証が別途必要となるが、ワークショップを通じて、持続可能な開発や社会のあり方、その実現に必要なことや考え方といった、諸課題を本質的に捉える議論が多くなされたことは大変有意義であったと評価できる。複雑化、多様化する諸課題へのソリューションを創出し、持続可能な社会へと変革していく、それを主体的に担う次世代が、理想やビジョンを率直に発し、対話する機会は極めて重要な協働プロセスの一部であったと言える。ワークショップの最後に参加した学生を対象にしたアンケート調査にも、このように持続可能な社会のあり方について同世代で対話をする機会は珍しく貴重な機会であったという声が多く寄せられた。

(6) まとめ：新しく採択された持続可能な開発目標の実施に向けた提言

以上、本研究の結果について詳細に示した。結果は、SDGsへの関心は先進国と途上国の間、また、個人の置かれている環境によって大きく異なることを示している。環境問題については日本においては自分の生活に直接的・短期的に影響を与える環境問題よりも国際的な環境問題である温

暖化問題を最も大事な環境問題であると答えた人が多かった。このような結果になった理由として様々な理由が考えられるが、1つに理由として、近年、不規則な気温の変化、大気の乱れ、動植物への影響などが顕著になってきておりこの傾向が続いた時の将来への不安が関心度の高さとして出てきているのではないかと考えられる。また大気の汚染を大事な環境問題であると答えた人も多く、PM2.5などの大気汚染の問題が日本では高くなってきていることを示している。

環境問題の他に、ポストMDGsに関わるそれぞれの問題（差別・平等、健康、教育、貧困、法と人権、水、環境、エネルギー、国際的な課題、食糧と栄養、雇用）に対する日本の一般の人たちの関心度を調査した。例えば健康問題に関しては、精神的なストレスと適度な運動を行なうことへの関心が非常に高い一方、従来のMDGsの目標で取り上げられていた幼児死亡率の削減やHIV/エイズやマラリアの蔓延防止という課題への関心は低いという結果になった。このように様々な分野において先進国と途上国の関心が異なるケースが多い可能性を示している。SDGsの実施段階において、SDGsの恩恵を受ける一般市民の関心の所在をより明らかにしていく必要がある。

SDGs合意後の現在においては、様々な分野をカバーしているSDGsの目標を包括的にモニタリングすることも大事ではあるか、これら一般市民の関心が高いとわかった重点領域・目標についてはそれぞれの国内において実施体制を強化する必要がある。現在、SDGsのモニタリングに活用をする指標の選定に関してInter-agency Expert Group on SDG Indicatorsにおいて議論が行なわれているが、どのような指標を使用し、どのような実施体制で2030年に向けて目標の進捗状況をモニタリングしていくか判断をしていく必要がある。また指標に関しては、特に途上国においては指標で追跡するデータの有無も含めてデータの整備が重要な課題であり、目標のモニタリングにむけた途上国へのキャパシティービルディングを含めた支援が必要である。

一方、将来への課題として専門家の見解と一般市民の関心の間で乖離がある場合はどうすればよいかという問題がある。環境問題については大気の汚染、水の汚染、森林破壊という問題への一般市民の関心が高かったが、プラネタリーバウンダリーのboundary valueを超えると専門家が判断するイシューとして地球温暖化問題と共に生物多様性の減少の問題とリン・窒素の循環の問題への高い関心は見られなかった。環境問題の緊急性に対する専門家の見解と一般市民の認識に大きな乖離がある場合どのように取り組んで行くか検討をする必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

ポスト2015の開発目標の策定に向けた調査票を用いた研究として「The World We Want to Live in」の研究が挙げられるが、「The World We Want to Live in」の調査票はMDGs/SDGsイシューを横断的にランキングした調査にとどまり、幸福度や価値観に踏み込んだ調査ではない。本研究はMDGs/SDGsイシューの選好と幸福度と価値観の関係に踏み込んで研究を行なう点で科学的意義が高いと考える。

(2) 環境政策への貢献

特に記載すべき事項はない。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の最も大きな貢献は、グローバルなレベルで議論及び交渉の進んでいるポスト2015に向けたMDGs/SDGsの 이슈に関してローカルな生活者の見解及び 이슈の選好結果を提供することである。本研究はグローバルなレベルとローカルなレベルの間における「生活者の豊かさ・幸福度」と「グリーン経済・成長」に関する見解の相違点を明らかにした。前述のとおり、SDGs合意後の焦点は、新たに合意されたSDGsをどのように各国の事情を考慮しながら2030年に向けて国レベルで政策として実施していくかという局面に移行した。本局面において、一般市民の関心・懸念を示す本研究結果は国内政策の形成・実施において有用であると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

タイやインドネシアのアンケート調査の調査結果については研究期間終了後も現地の研究機関・専門家と協力してSDGsに関する一般市民の関心の把握に向けて分析を進めることを予定している。また、本研究全体の成果についてはJournal of Sustainable Developmentなど海外の学術誌において成果を海外に発信して行く予定である。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. SUZUKI, K. IKEDA, T. KUSAGO, K. HARA, M. UWASU and O. TYUNINA: Global Environmental Research, Vol.19 No.2 (2015), Analysis of Citizens' Priorities over Sustainable Development Goals in Japan: Evidence from a Questionnaire Survey

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 池田和弘、鈴木政史、草郷孝好、原圭史郎、上須道徳：環境経済政策学会（2014）、日本における持続可能な開発目標に対する市民の関心の計測と分析 アンケート調査結果に基づく関心の規定要因の考察
- 2) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU and O. TYUNINA: 3rd Annual Sustainable Development Conference, Bangkok (2015), What Are the Citizens Priorities over Sustainable Development Goals in Thailand? : Evidence from a Questionnaire Survey, July 2015
- 3) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU and O. TYUNINA: Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference (2015), Identification of key sustainable development goals and indicators: results of a questionnaire survey conducted in the US, Japan and Thailand

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 早川有香、鈴木政史、草郷孝好、蟹江憲史、原圭史郎、上須道徳、池田和弘、井口正彦：地

球環境学 上智大学大学院地球環境学研究科紀要 No.11. (2015)

ユースの視点に基づく持続可能な開発の課題に関する一考察—大学生及び大学院生によるワークショップを事例として

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) M. SUZUKI: Side-event organized by Research Institute for Humanity and Nature at Nexus 2014: Water, Food, Climate and Energy Conference, North Carolina, USA, 2014
“Conducting a Survey on Citizen’s Views and Priorities over Sustainable Development Issues and Agenda for the post-MDGs era.”
- 2) 池田和弘、鈴木政史、草郷孝好、原圭史郎、上須道徳、環境経済政策学会 (2014)
「日本における持続可能な開発目標に対する市民の関心の計測と分析 アンケート調査結果に基づく関心の規定要因の考察」
- 3) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU and O. TYUNINA: 3rd Annual “Sustainable Development Conference, Bangkok, Thailand, 2015
What Are the Citizens’ Priorities over Sustainable Development Goals in Thailand? : Evidence from a Questionnaire Survey.”
- 4) M. SUZUKI, T. KUSAGO, K. IKEDA, K. HARA, M. UWASU and O. TYUNINA: Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference, 2015
“Identification of key sustainable development goals and indicators: results of a questionnaire survey conducted in the US, Japan and Thailand.”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) ワークショップ「大学生で語り合おう～ポストMDGsの課題って何だ？」 (主催：上智大学 平成27年2月11日(水)、グランフロント大阪 大阪ガス都市魅力研究室)開催

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6)

特に記載すべき事項はない。

(7) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(3) 地球システムからの制約の検討（生物資源に焦点を当てた検討）

立命館大学

橋本征二・吉川直樹・天野耕二・島田幸司

平成25～27年度累計予算額：9,658千円（うち平成27年度：3,158千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

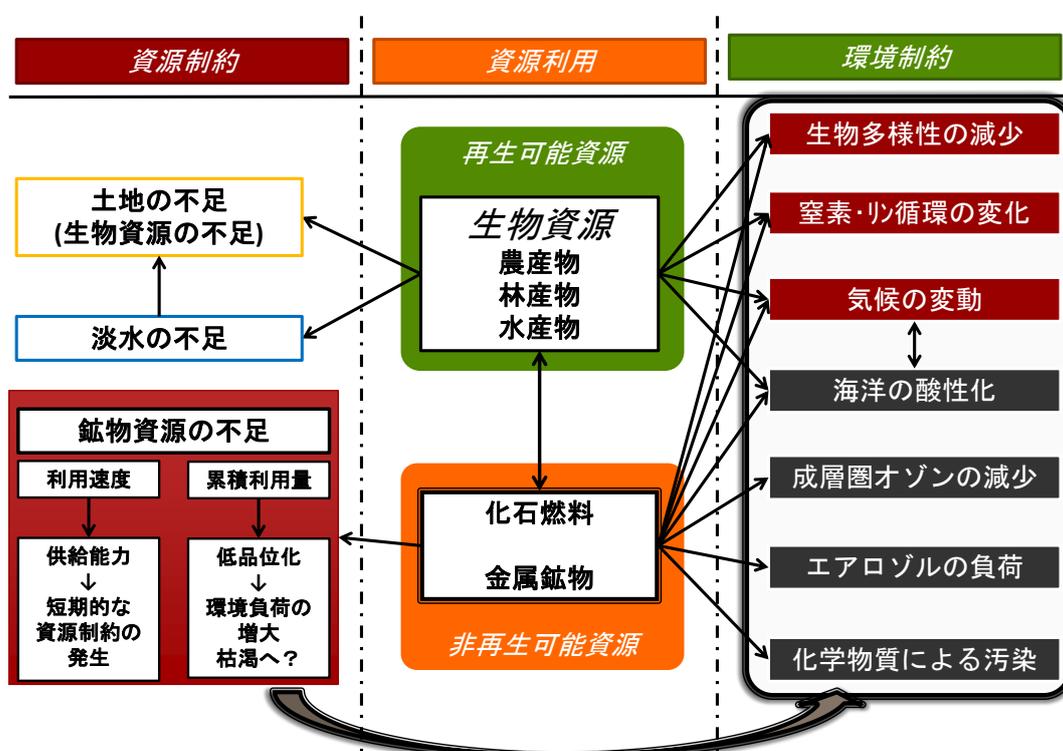
本研究では、生物資源（再生可能資源）の利用に着目して、それに関わる資源制約と環境制約を定量的に分析し、その制約の中でどのような資源利用の在り方が持続可能な社会に必要であるかを検討した。具体的には、1) プラネタリーバウンダリー（planetary boundaries）（Rockström et al.¹⁾ 2) で示されている制約と生物資源利用との関係を整理するとともに、2) 今後の生物資源需要とそれがプラネタリーバウンダリーに与える影響を定量的に分析し、3) プラネタリーバウンダリー内の生物資源利用の在り方と生物資源利用に関わる開発目標を検討した。その結果、1) 食料・バイオ燃料に関わる土地需要、それに関わる土地利用の変化（農地の拡大）、農地拡大による生物多様性の損失への影響、農地利用に関わるリンフロー・淡水消費量への影響を推計できるモデルを構築し、これらの関係を総合的に検討する基礎を確立した。2) 食料・バイオ燃料の需要は今後増加することが見込まれ、それによる土地利用の変化、生物多様性の損失、リンの循環は、Rockström et al.¹⁾²⁾が提案するプラネタリーバウンダリーを超過すると推計された。一方、淡水利用については、プラネタリーバウンダリーを超える可能性が低いことが示唆された。3) 食品廃棄物の半減、肉食の4割減、これまでのトレンドでの単収の増加等の組合せにより、土地利用の変化をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性が示唆された。また、森林の面積が大きい国・地域で農地の開発を行うことにより、生物多様性の損失をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性も示唆された。一方、2015年に策定されたSustainable Development Goalsにおいては、Target 2.3において2030年までの農業生産性の倍増、Target 12.3において2030年までの食品廃棄物の半減、Target 15.2において森林の保全等が掲げられているが、これだけではプラネタリーバウンダリーを越えてしまう可能性がある。肉食の抑制や施肥の管理等も含め、より多面的なアプローチについて検討する必要があると考えられる。

[キーワード]

食料、バイオ燃料、土地利用の変化、生物多様性の損失、リンフロー

1. はじめに

様々な資源の限界と環境への悪影響の根源には我々の「資源利用」がある。環境中から資源を採取し、これを環境中に戻すことで資源の限界と環境への悪影響という問題が発生しているからである。言い換えれば、資源制約と環境制約は、「資源利用」を介して密接に関連している。例えば、土地の不足という資源制約と窒素・リンによる汚染という環境制約は、農作物の生産・利用という資源利用で結びついている。図(3)-1は再生可能資源の利用を中心において、それといくつかの資源制約、環境制約との関係を例示したものである。このように、資源制約と環境制約は「資源利用」というコインの両面として捉えることができる。すなわち、資源利用の上流から下流へのフロー全体を捉えた上で、資源制約と環境制約を統合的に検討することが必要なのである。また、このような制約の中で、どのような発展をしていくかについて検討するにあたっては、資源利用の在り方を考えることが非常に有益と考えられる。我々の資源利用を変化させることによって、資源制約と環境制約の両面を解決できる可能性があるからである。



図(3)-1 資源利用を介した資源制約と環境制約の密接な関係

2. 研究開発目的

このようなことから、本研究では資源利用の中でも「生物資源（再生可能資源）」の利用に着目して、それに関わる資源制約と環境制約を定量的に分析し、その制約の中でどのような資源利用の在り方が持続可能な社会に必要なかを検討することで、持続可能な開発の方向性と目標・指標の設定に有益な知見を提供することを目的とする。具体的には、1) プラネタリーバウンダリー (Rockström et al.^{1) 2)} で示されている制約と生物資源利用との関係を整理するとともに、2) 今後の生物資源需要とそれがプラネタリーバウンダリーに与える影響を定量的に分析し、3) プラネタ

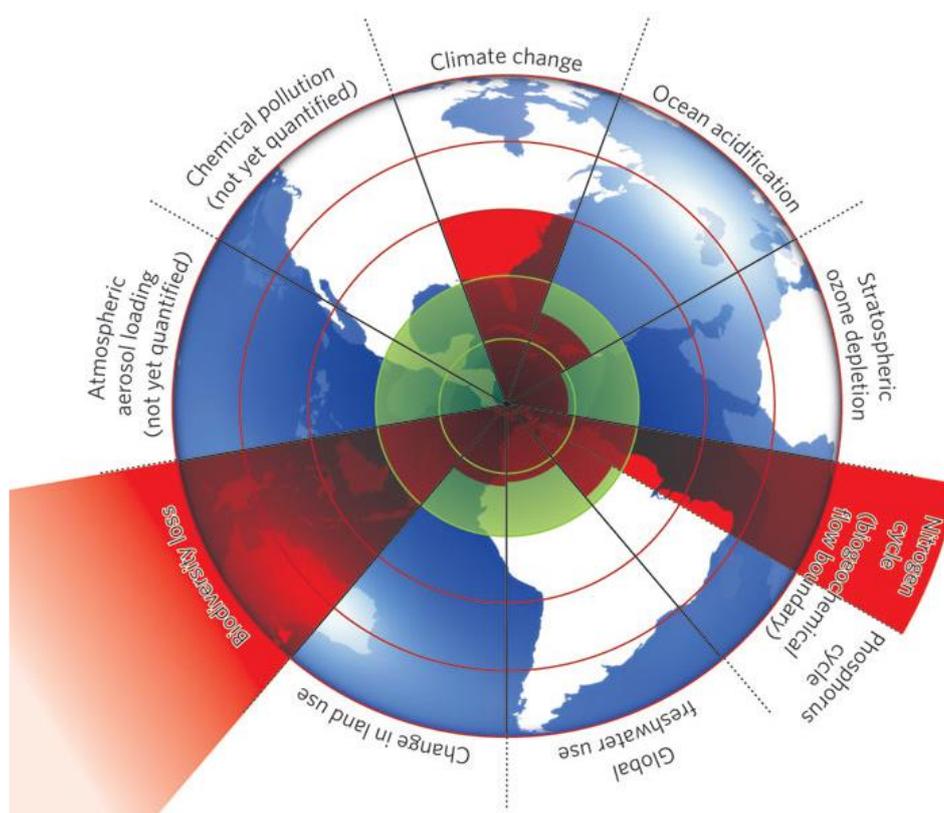
リーバウンダリー内での生物資源利用の在り方と生物資源利用に関わる開発目標を検討する。

なお、本研究（サブテーマ(3)）では生物資源（再生可能資源）を対象とし、サブテーマ(4)では非生物資源（非再生可能資源）を対象とすることで、多様な資源を網羅することとした。

3. 研究開発方法

（1）生物資源利用とプラネタリーバウンダリーの相互関係の検討

Rockström et al.^{1) 2)}が設定したプラネタリーバウンダリー（地球の境界：図(3)-2）は9つの領域（気候変動、海洋の酸性化、成層圏のオゾンの破壊、窒素とリンの循環、世界の淡水利用、土地利用の変化、生物多様性の損失、大気エアロゾルの負荷、化学物質による汚染）で構成されるが、生物資源の利用はこれらのプラネタリーバウンダリーと密接な関わりがある。本研究においてこれらの定量的関係の検討を行うために、生物資源利用と各プラネタリーバウンダリーの定性的関係を整理した。



図(3)-2 プラネタリーバウンダリー (Rockström et al., 2009a, 2009b)

（2）食料・バイオ燃料需要とそれに関わる農地面積需要量の推計

（1）の検討を受け、生物資源利用のうち食料とバイオ燃料に焦点を当て、今後の食料・バイオ燃料の需要とそれに関わる農地面積需要量を推計した。このため、世界の184の国・地域、世界食料農業機関（FAO）の食料需給表（Food Balance Sheets）に記載されている96品目の食料用の作物を対象として、今後の詳細な食料需要を考慮した食料用作物需要量の推計を行うとともに、今後のバイオ燃料政策を考慮したバイオ燃料用作物需要量の推計を行い、これらの作物を生産するため

に必要な耕作地面積を推計した。また、家畜の生産に必要な牧草需要量の推計を行い、これをもとに牧草地面積を推計し、耕作地面積と合計することで農地面積需要量とした。

食料用作物需要量の推計については、棟居・増井¹³⁾の手法を参考に、各食料品目の1人1日あたりエネルギー摂取量が1人あたりGDPの増加とともに、現在の先進工業国の平均、もしくは高所得のイスラム教国の平均に近づくと仮定して、各国の今後の最終消費レベルでの食料需要量を推計した。また、畜産物、食料加工品へ投入された作物については、GTAPにおける産業部門間の取引額とFAOの報告書より投入係数を求め、最終消費レベルでの食料需要量から一次生産レベルでの食料需要量を推計した。

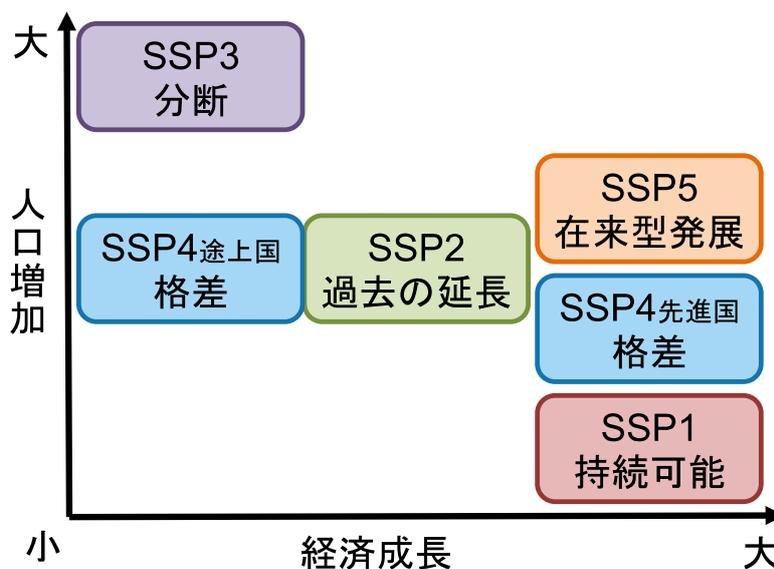
バイオ燃料用作物需要量の推計については、吉本ら¹⁴⁾の手法を参考に、各国の1人あたりGDPと1人あたり自動車保有台数との関係から、今後の自動車保有台数を推計し、自動車の燃費改善率の設定から自動車1台あたり燃料消費量を算出した。これらをもとに自動車の燃料需要量を推計し、設定した各国のバイオ燃料導入目標からバイオ燃料需要量を算出し、バイオ燃料用作物需要量を推計した。

以上、食料用作物需要量とバイオ燃料用作物需要量を足し合わせ、各作物の単収を考慮して世界の農地需要量を推計した。

牧草需要、牧草地面積需要については、Wirsenius¹²⁾の手法を参考に、牛肉、牛乳を生産するのに必要な牧草の量と牧草地の面積を、畜産物1kgあたりの家畜のエネルギー需要量、家畜の飼料のうちの牧草摂取割合、牧草1kgあたりの家畜の摂取エネルギー量、牧草地1haあたりの牧草供給量等のデータをもとに推計した。

最後に、耕作地面積需要量、牧草地面積需要量を合計して農地面積需要量を推計した。

なお、本研究で用いたGDPおよび人口のシナリオは、Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) (IIASA³⁾)である。SSPsでは、緩和策に対する困難度と適応策に対する困難度の組み合わせで5つのシナリオ(SSP1~SSP5)が設定され、SSP1: Sustainability (持続可能)、SSP2: Continuation (過去の延長)、SSP3: Fragmentation (分断)、SSP4: Inequality (格差)、SSP5: Conventional Development (在来型発展)の各シナリオが定義されている。図(3)-3はこれを経済成長と人口増加の大小で整理したものである。SSP1は、緩和策・適応策の導入が容易な世界であり、途上国の教育水準の向上により、人口増加がとまり、経済発展も進み、貧困の解消が進む。それに対して、SSP3は、緩和策・適応策ともに導入には大きな困難が伴う社会であり、教育水準の向上は低く、途上国では人口増加が止まらず、所得は増加しない。SSP2は、過去の延長上にあるシナリオであり、多くの世界では発展が進み、人口増加、所得の増加は中庸的な世界である。SSP4は、緩和策の困難度が小さく適応策の困難度が大きい世界であり、先進国ではますます富を得るが、途上国では経済発展が進まない。また、SSP5は、緩和策の困難度が大きく適応策の困難度が小さい世界であり、先進国、途上国ともに経済発展が進む。SSPsは社会像のシナリオであり、GDPと人口だけのシナリオではないが、本研究ではこの2つのパラメータのみを用い、以下の議論でも簡単のためこれらのシナリオ名SSP1~SSP5を用いることとした。



図(3)-3 本研究で用いたShared Socioeconomic Pathways (IIASA³⁾)
における経済成長と人口増加のシナリオ

(3) 土地利用の変化のシナリオ作成

生物資源利用による土地利用の変化への影響を検討するため、(2)において推計した農地面積需要量をもとに、世界各国の土地利用の変化の推計を行った。本研究において「土地利用の変化」とは、林地面積の減少を指す。林地面積の減少の直接的要因としては、農地面積の拡大、インフラの拡大、木材伐採等が考えられるが、多くの研究において農地面積の拡大による林地面積の減少があることが確認されていることから、本研究においては、農地面積の拡大を林地面積の減少に置き換えて推計を行った。

具体的には、農地面積需要量の2010年からの増加量を要拡大農地面積、すなわち林地面積減少量とした。また、今後の土地利用の変化を、各国の土地利用の変化に配分するシナリオを作成し、生物多様性の損失、リンのフロー、淡水需要の推計に用いることとした。配分のシナリオは、Ⅰ.各国の作物収穫面積の増加量に応じて配分するシナリオ、Ⅱ.各国の作物自給率を一定として配分するシナリオ、Ⅲ.各国の作物収穫面積に応じて配分するシナリオ、の3通りである。

(4) 生物多様性の損失に関する分析

農地面積の拡大による林地面積の減少が生物多様性の損失に与える影響を検討するため、林地面積の減少による各生物種の絶滅確率の合計、すなわち、生物種の絶滅数の期待値を推計するモデルを作成した。生物多様性の損失には様々な要因があるが、Baillie et al.⁶⁾は、鳥類、ほ乳類、両生類が絶滅の危機にさらされている要因のうち、最もよく見られるのが農業や林業による生息地の破壊や劣化であるとしている。

本研究では、1単位の林地面積の減少による各生物種の生息地の減少率、一定の生息地の減少率のもとでの各生物種の絶滅確率などを推計し、これらをもとに生物種の絶滅数の期待値を推計した。各生物種の森林生息地割合は、世界の森林分布図との生物種の生息分布図を重ね合わせ算出し

た。(2)において要農地拡大面積が最大となるシナリオに対して、(3)で示す3つのシナリオごとに生物多様性の損失を推計した。生息分布図が入手でき、林地での生息が確認された約14,000種を対象とした。

(5) リンの循環に関する分析

農地面積の拡大による肥料使用がリンの循環に与える影響を検討するため、水圏へのリンフローを推計するモデルを構築した。具体的には、水圏へのリンフローを農業系由来と生活排水系由来に分け、前者については各作物の収穫面積、収穫面積あたりに散布されるリンの量、散布されたリンのうち水圏に流入するリンの割合等の変数、後者については一人あたりの排泄物量、排泄物に含まれるリン量、排泄物のうち農地に散布される割合、人口、下水道普及率、下水道におけるリン除去率等の変数をもとに推計を行った。

(2)において要農地拡大面積が最大となるシナリオに対して、(3)で示す3つのシナリオを適用するとともに、下水道普及率に関するシナリオを2つ設定して(低普及率、高普及率)、これらを組み合わせた計6つのシナリオについて、水圏へのリンフローを推計した。また、これをもとに、適切な施肥や下水道の整備等による水圏へのリンフローの削減可能性や、下水道におけるリン資源の回収可能性について検討した。比較的データが入手可能な27の国と地域を対象とした。

(6) 淡水利用に関する分析

農地面積の拡大が農業用の淡水利用に与える影響を検討するため、(2)で推計した各国の将来の食料需要をもとに、将来の淡水利用の変化を推計した。食料の生産に伴う淡水需要量は、生産地域により大きく異なることが予想されるため、(3)で示す3つのシナリオに加えて、既存の輸出入構造が変化しない(輸入国からみて輸入相手国別の輸入量の比率が現在と変わらないとする)シナリオについても検討した。

具体的には、将来の各国別・品目別食料需要量から要拡大農地面積の配分シナリオに基づき各国別・品目別生産量を算出し、そこに淡水消費原単位を乗じて国別淡水需要量とし、それらを合計することで将来のグローバルな淡水需要量を推計した。また、消費国と生産国が異なることに鑑み、貿易を考慮した検討もあわせて行った。推計の対象とする水資源はGreen Water(降水に由来する水資源消費)およびBlue Water(河川・湖沼・地下水に由来する水資源消費)とした。

(7) 持続可能な生物資源利用の在り方と生物資源利用に関わる適切なSD指標の検討

土地利用の変化と生物多様性の損失について、これらをプラネタリーバウンダリー内に収めるための対策の検討を行った。まず、生物多様性の損失に関して、生物の生息地の減少をできるだけ回避するように要拡大農地面積を配分するシナリオとして、IV:各国の林地に生息する生物種と世界の林地に生息する生物種数の比の逆数の大きさに応じて配分するシナリオ、V:各国の林地に生息する生物種と世界の林地に生息する生物種数の差分の大きさに応じて配分するシナリオ、VI:各国の現在の林地面積の大きさに応じて配分するシナリオ、の3つを検討した。また、土地利用の変化に関して、要拡大農地面積を削減するための対策として、食品廃棄物の半減と単収の増加の影響を検討し、そのシナリオ下で土地利用の変化と生物多様性の損失の両方をプラネタリーバウンダリー内に収めるための、肉食の削減割合を検討した。

4. 結果及び考察

(1) 生物資源利用とプラネタリーバウンダリーの相互関係の検討

生物資源利用と各プラネタリーバウンダリーの定性的関係を表(3)-1のように整理した。生物資源の用途をエネルギー、食料、木材製品とし、これらを生物資源の需要と対応付け、生物資源需要が4つのプラネタリーバウンダリー（土地利用の変化、生物多様性の損失、窒素とリンの循環、世界の淡水使用）とどのように関係しているかを整理した。

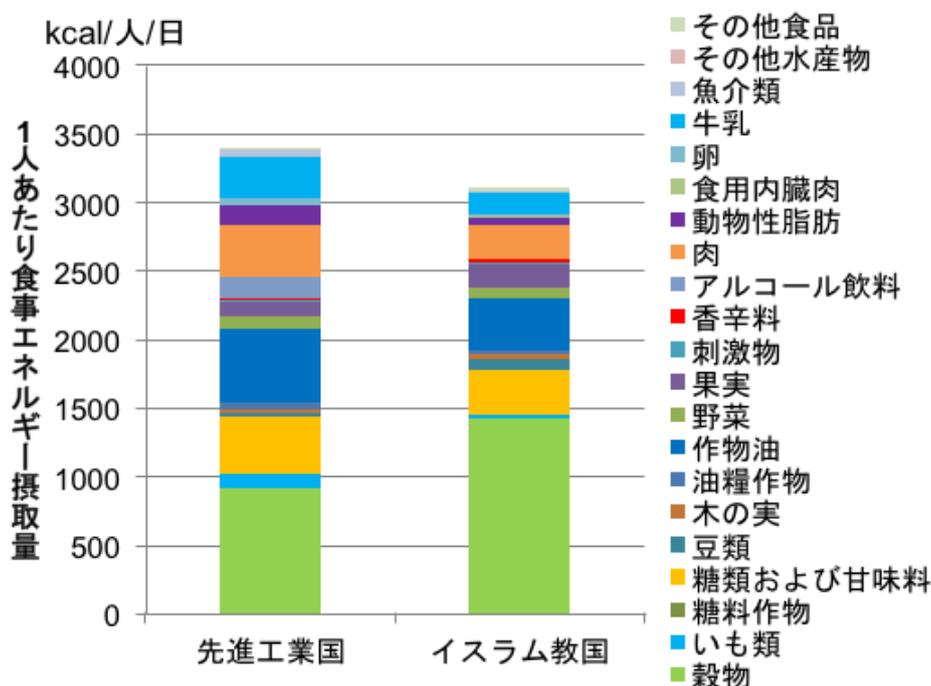
例えば、食料需要や木材需要はその生産のための土地の需要を生み出し土地利用の変化に繋がる。土地利用の変化は、主に林地の減少（森林の減少）を通じて生物多様性の損失をもたらす。農地への土地利用の変化は、肥料の利用（耕作）や生活排水の排出等を通じて窒素・リンの循環を変化させるとともに、農産物の生産は農業水の需要を通じて淡水の利用を変化させる。また、もちろん、生物資源の利用はその他のプラネタリーバウンダリーとも関連がある。例えば、林地の減少（土地利用の変化）は、林地に蓄積されていた炭素の放出を意味することから気候変動とも関連する。また、森林火災はエアロゾルの放出に繋がる。本研究では、生物資源利用と直接的な関連が明白な4つのプラネタリーバウンダリー（土地利用の変化、生物多様性の損失、窒素とリンの循環、世界の淡水使用）に着目して検討を進めることとした。

表(3)-1 生物資源利用と4つのプラネタリーバウンダリーの定性的関係

Biomass Resource Use		プラネタリーバウンダリー			
Resource Use Category	Resource Demand	Change in Land Use	Biodiversity Loss	Nitrogen & Phosphorous Cycles	Global Freshwater Use
Energy	Energy crops	Through demand for cropland	Through deforestation	Through cultivation & wastewater	Through demand for agricultural freshwater
Food	Food crops				
	Livestock	Through demand for grazing land			
	Fish		Through fishing	Through aquaculture	
Wood products	Timber	Through demand for industrial forest land	Through forest degradation		

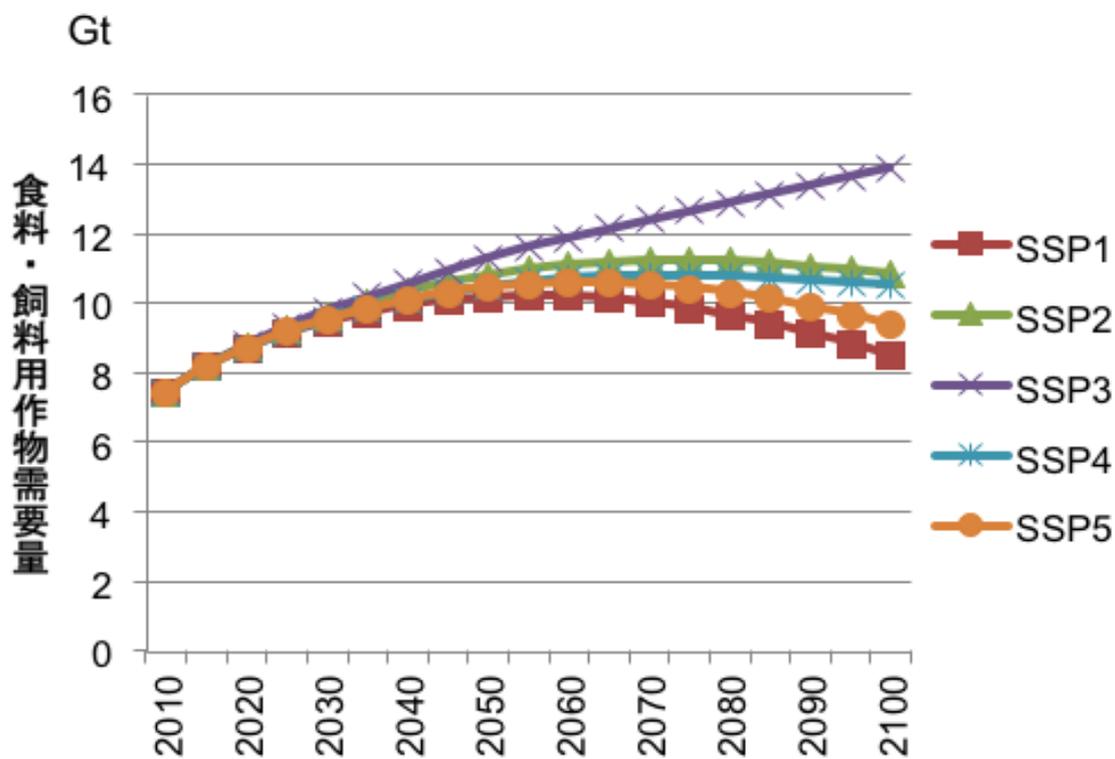
(2) 食料・バイオ燃料需要とそれに関わる農地面積需要量の推計

先進工業国と高所得のイスラム教国の食料消費パターンを推計した結果が図(3)-4である。高所得のイスラム教国の方が、穀物や果実からのエネルギー摂取量が大きく、アルコール飲料や、肉、牛乳、卵等の畜産品からのエネルギー摂取量が小さいことが分かる。

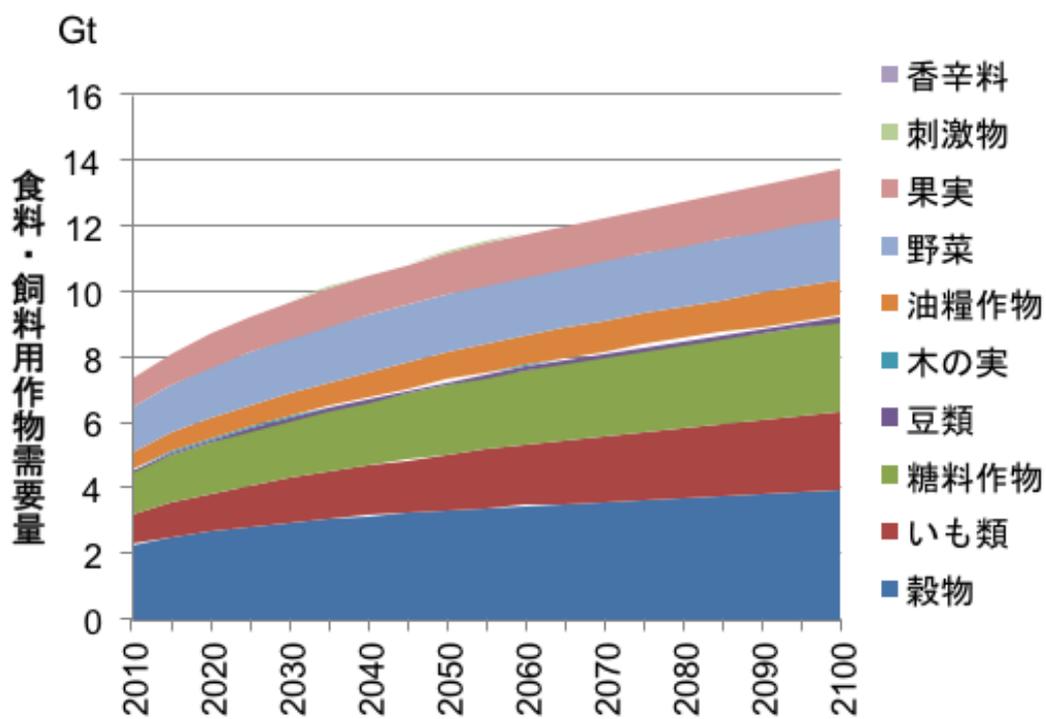


図(3)-4 先進工業国と高所得のイスラム教国の食料消費パターンの推計結果 (2010年)

各国の食料消費パターンが経済成長とともにこれらに近づくとして、一次生産レベルの食料・飼料用の作物需要量を推計した結果が図(3)-5である。一次生産レベルの食料・飼料用作物需要量は最大で13.9Gt (SSP3、2100年)となり、2010年の1.87倍という結果となった。SSP3以外のシナリオにおいては、2050年ごろまでは作物需要量は増加するものの、それ以降は、横ばいもしくは減少する結果となった。次に、将来の食料・飼料用作物需要量が最大となるSSP3について、作物分類別の結果を見たものが図(3)-6である。作物分類別にみると、穀物、糖料作物、いも類の順に需要が多い結果となり、51品目の作物別にみると、さとうきび、その他野菜、キャッサバ、小麦、米の順需要が大きく、最も大きいさとうきびでは、2010年で2.37Gtの需要があると推計された。

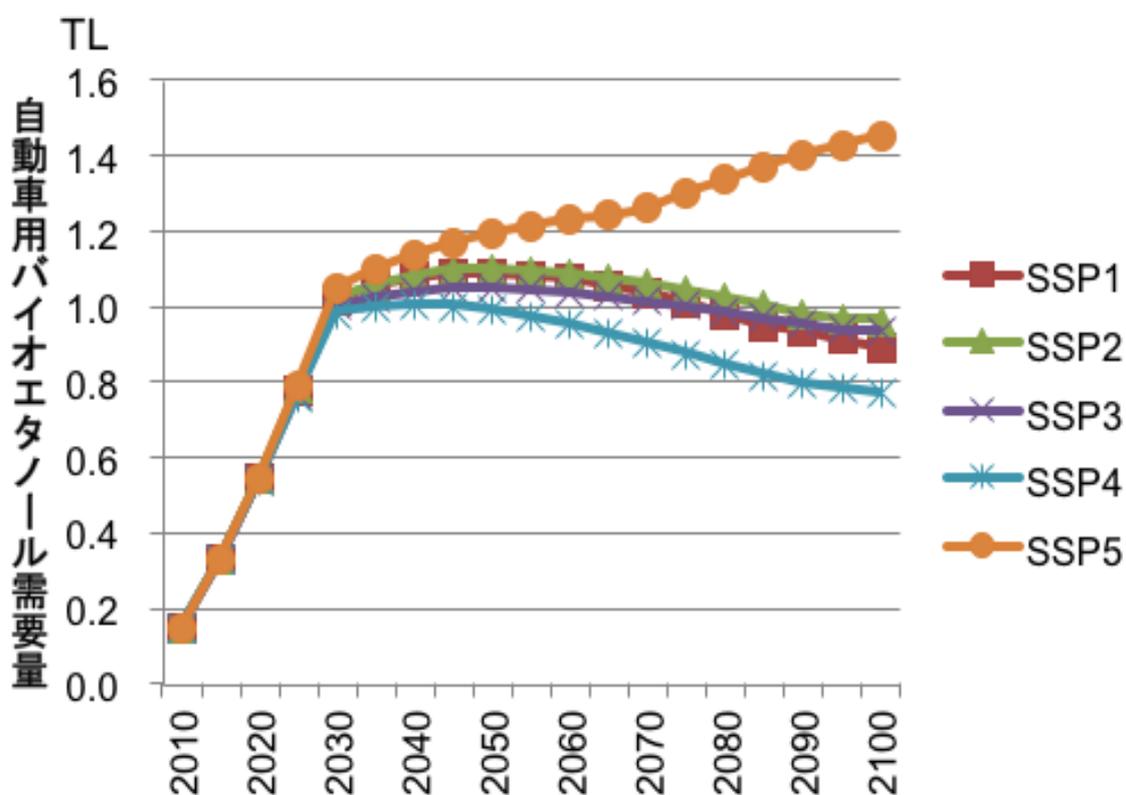


図(3)-5 一次生産レベルの食料・飼料用作物需要量

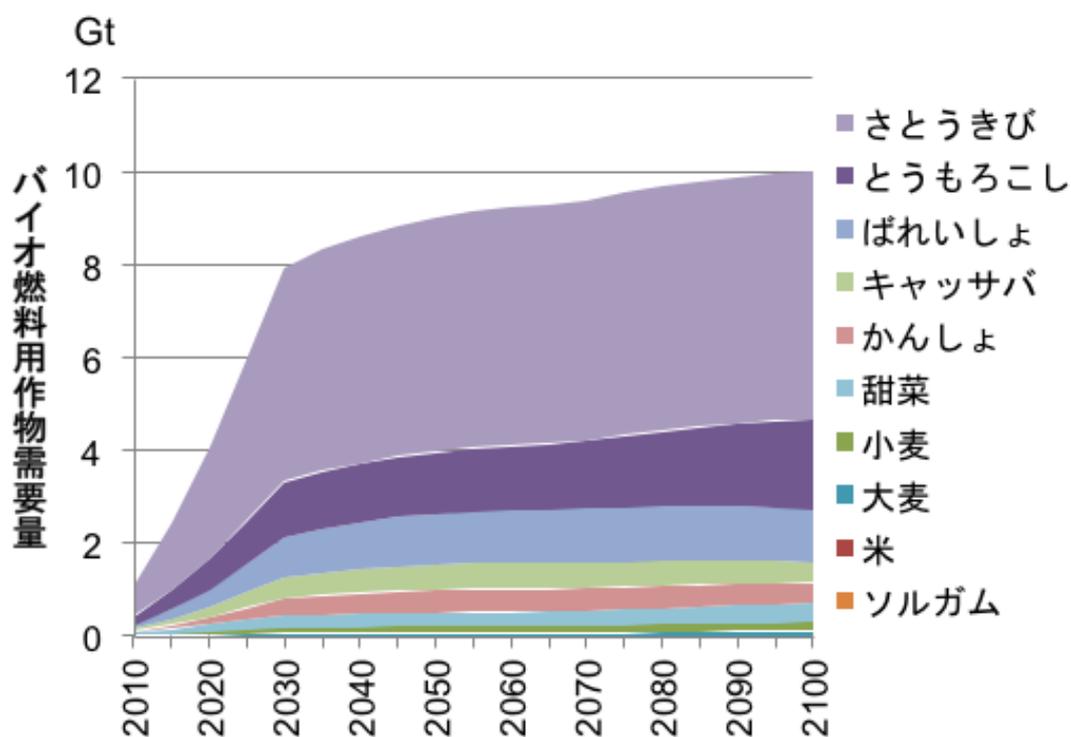


図(3)-6 一次生産レベルの作物分類別食料・飼料用作物需要量 (SSP3)

続いて、自動車用のバイオ燃料（バイオエタノール）需要量を推計した結果が図(3)-7である。経済成長の大きいシナリオであるSSP5の需要量が最も大きくなり、最大で1.46TL（2100年）と推計された。その他のシナリオでは、バイオ燃料導入目標の20%を達成すると設定した2030年以降は、ほぼ横ばいか、減少の傾向となった。自動車用のバイオ燃料需要量に関しては、経済成長とバイオ燃料導入目標の設定が大きく影響することが示唆される。また、バイオ燃料用の作物需要量もSSP5で最も大きくなり、2100年で10.0Gtと推計された。需要が最大のシナリオであるSSP5について、作物別のバイオ燃料用作物需要量を見たものが図(3)-8である。作物別にみると、さとうきびの需要が最も大きく、全体の需要の半分程度を占めた。続いて、とうもろこし、ばれいしょの順に需要量が大きくなった。

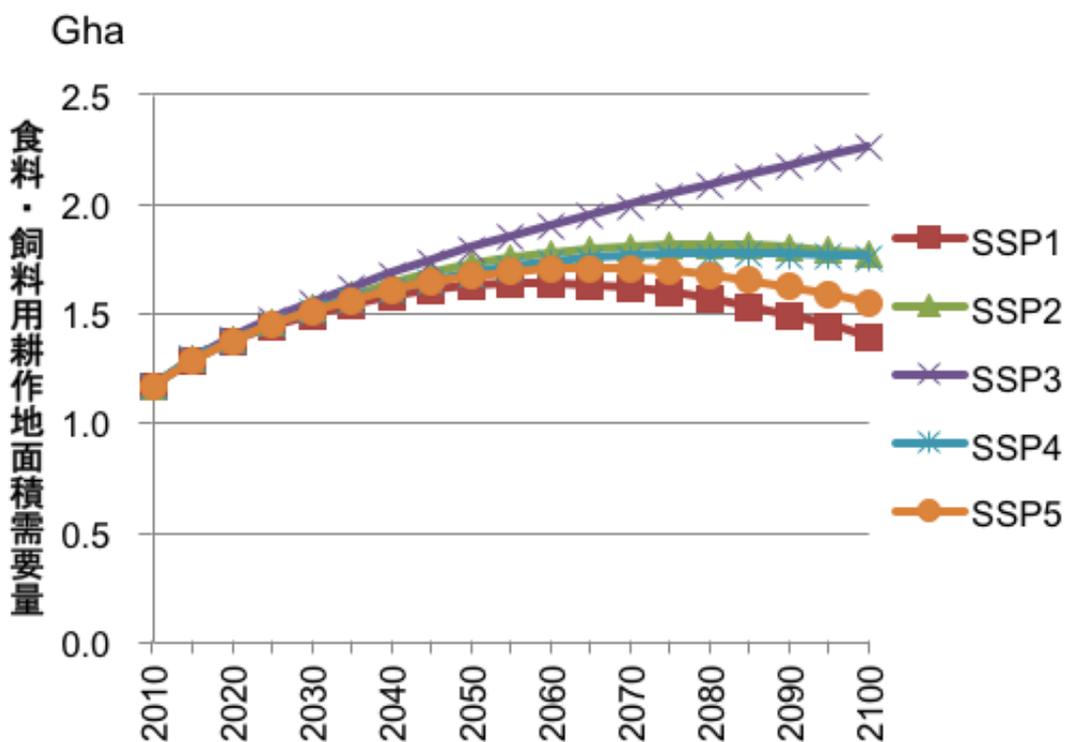


図(3)-7 自動車用バイオ燃料（バイオエタノール）需要量

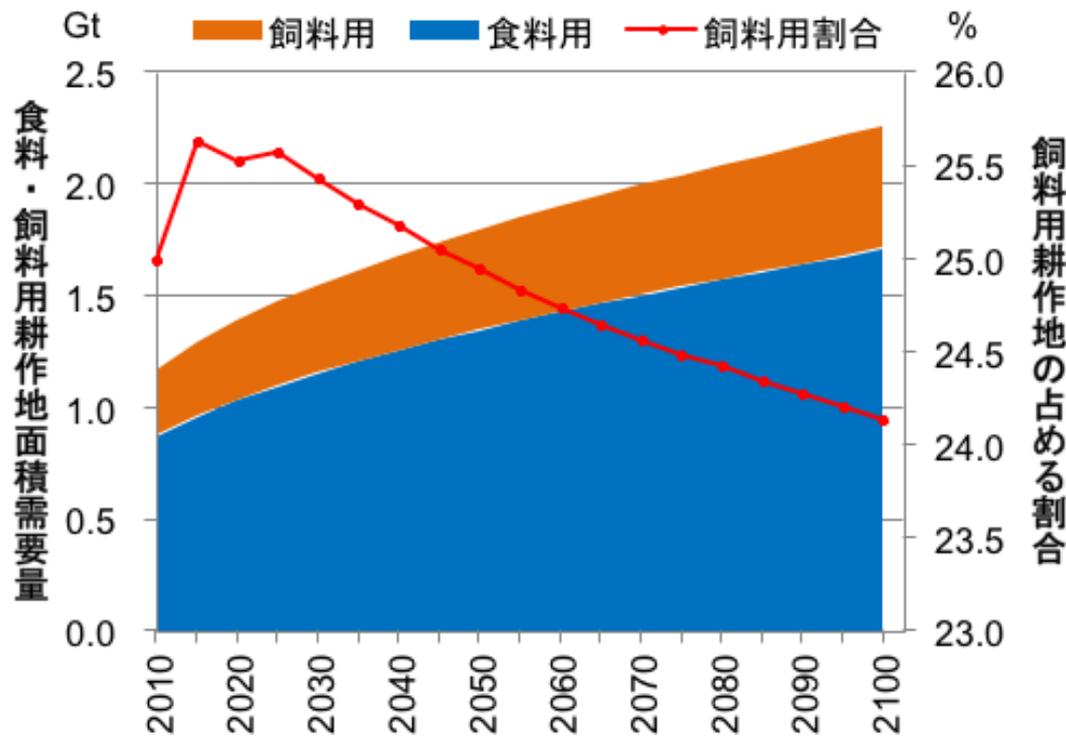


図(3)-8 自動車用バイオ燃料用作物需要量 (SSP5)

続いて、食料・飼料用耕作地面積需要量の推計結果が図(3)-9である。2100年までに最大で、2.26Gha (SSP3) の耕作地面積が必要であると推計された。経済成長の大きいSSP5よりも人口増加の大きいSSP3の結果が大きくなったことから、人口増加が食料・飼料用耕作地面積の需要の増加の主な要因であることが示唆される。また、食料・飼料用耕作地面積の需要量が最大となるSSP3について、食料用と飼料用の内訳と食料・飼料用耕作地に占める飼料用耕作地の割合を示したものが図(3)-10である。2010年において、食料・飼料用耕作地全体に占める飼料用耕作地の割合は25%であるが、SSP3では、この比率が徐々に減少するという結果となった。その他のシナリオでは、SSP2ではほぼ横ばい、世界全体で経済が成長するSSP5では飼料用耕作地の割合が少し増え、SSP1、SSP4ではわずかに増加する結果となった。

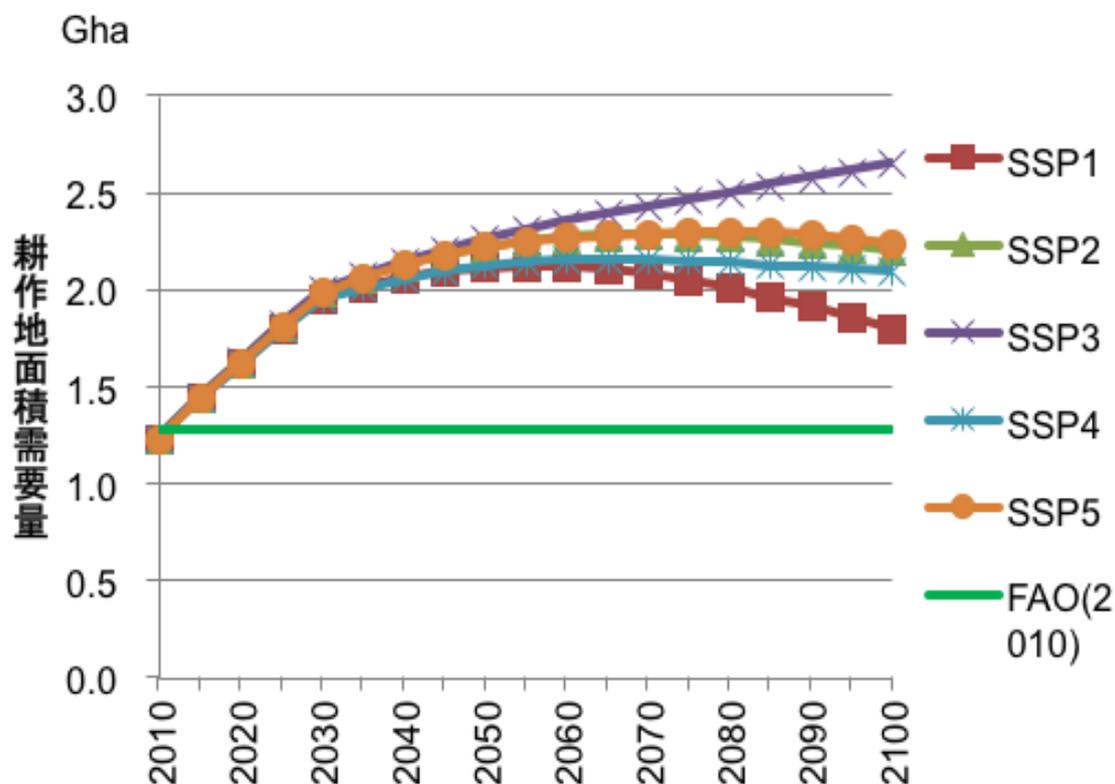


図(3)-9 食料・飼料用耕作地面積需要量

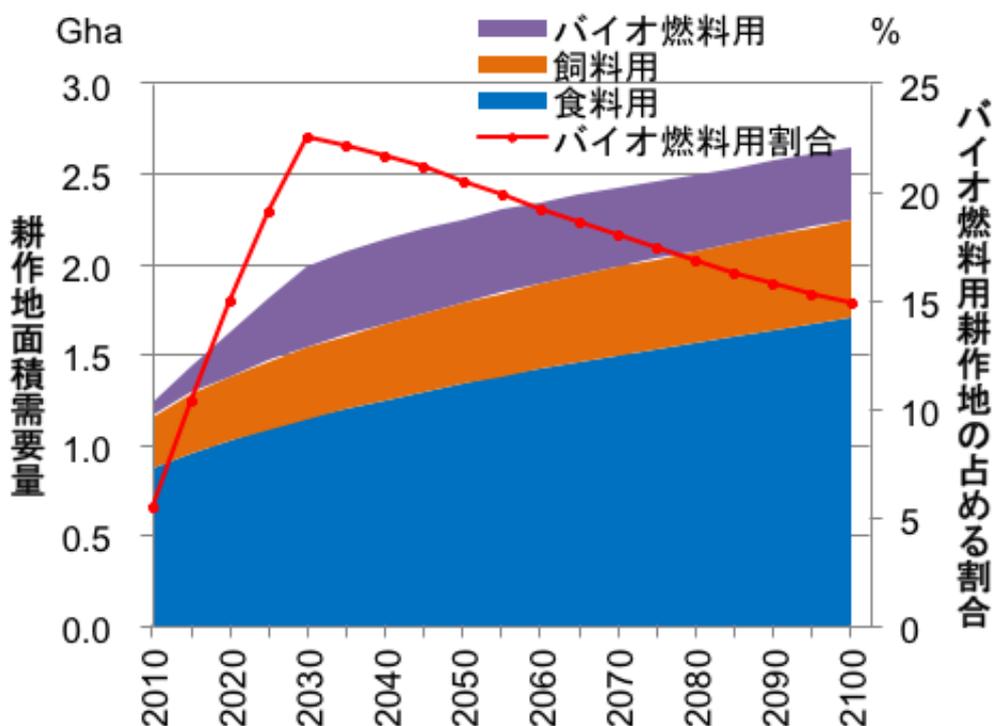


図(3)-10 用途別食料・飼料用耕作地面積需要量 (SSP3) と食料・飼料用耕作地に占める飼料用耕作地の割合

これにバイオ燃料用耕作地需要量を加え、耕作地面積需要量の合計値を示したものが図(3)-11である。図には、FAOSTATによる2010年の対象品目の収穫面積の統計値も示している。2010年において、耕作地面積は世界全体で1.24Ghaと推計され、FAOの統計値である1.28Ghaと比較して、耕作地面積の総量としてはほぼ再現できたといえる。しかし、作物品目別にみると、推計値と統計値が大きく異なる品目があり、改善の余地を残している。将来の耕作地面積は最大で2.65Gha（SSP3、2100年）となり、現在の耕作地面積のおよそ2倍の耕作地が必要となる結果となった。将来の耕作地面積需要量の最大値が最も少ないSSP1でも、2.13Ghaの耕作地が必要となり、世界全体で850Mhaの耕作地の拡大が必要であると推計された。また、耕作地面積需要量が最大のシナリオであるSSP3について、収穫された作物の用途別の耕作地面積需要量と耕作地全体に占めるバイオ燃料用の耕作地の割合を示したものが図(3)-12である。作物需要量は食料・飼料用は最大で13.9Gt（図(3)-6）、バイオ燃料用は最大で10.0Gt（図(3)-8）と推計され、同程度の需要であったが、バイオ燃料用作物の半分程度を占めるさとうきびの単収が大きいため、バイオ燃料用耕作地は食料・飼料用に比べて小さい値となった。SSP3においては、2030年で22.6%を占め、最大となったのち、徐々に減少し、2100年には15.0%となった。その他のシナリオでは、2030年で22%から24%を占めたのち、SSP1ではほぼ横ばいとなり、2100年には22.7%、SSP2とSSP4では減少し2100年でそれぞれ19.5%、16.4%、SSP5では増加し、2100年に30.9%となり、シナリオの違いによって将来の耕作地の用途の構成は異なる結果となった。



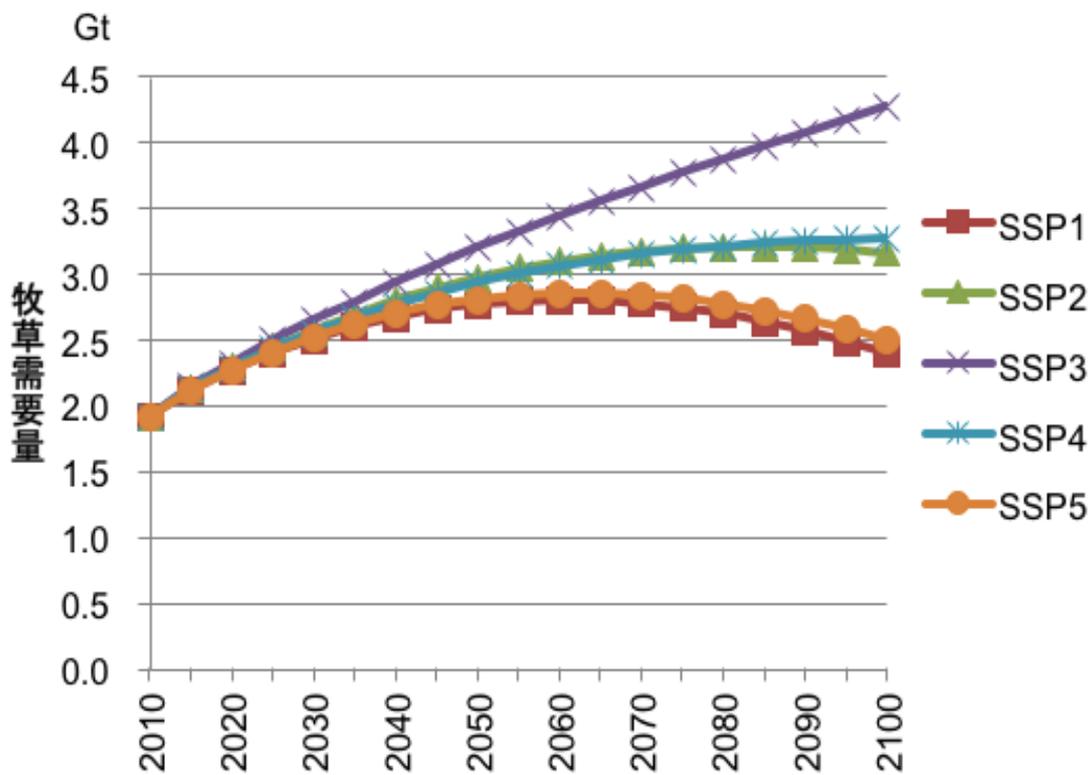
図(3)-11 耕作地面積需要量



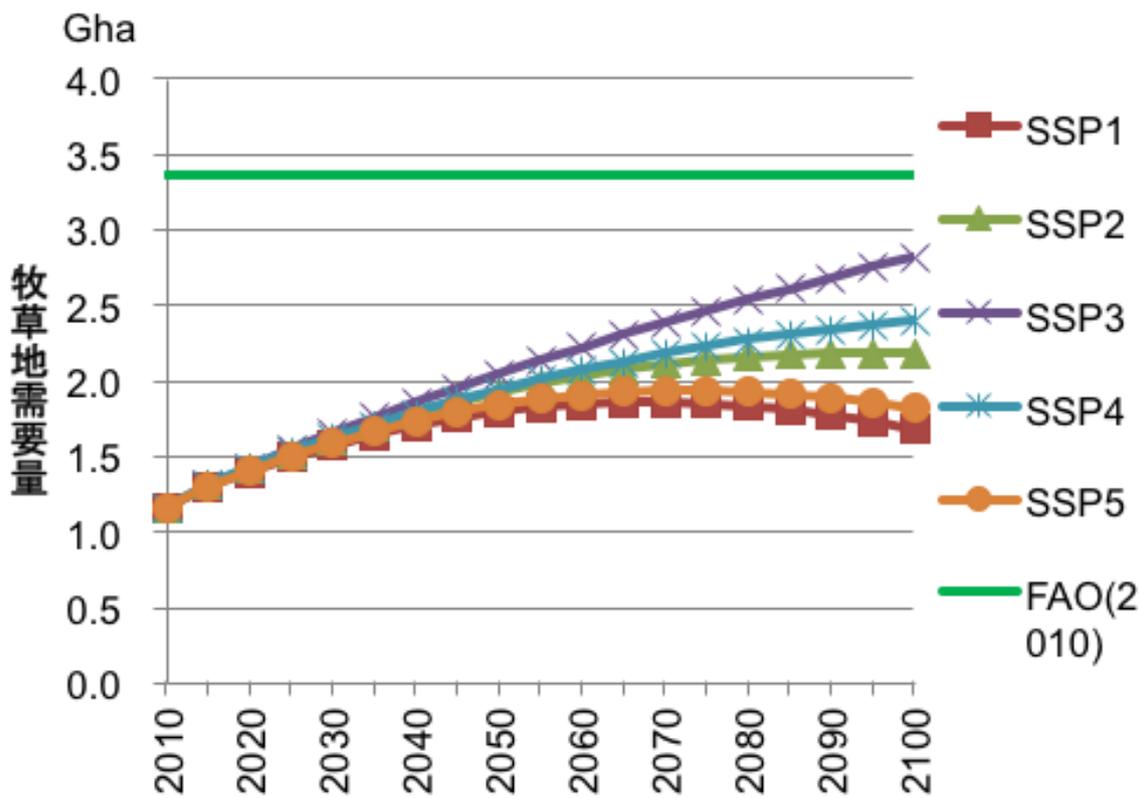
図(3)-12 用途別耕作地面積需要量（SSP3）と耕作地面積需要量に占めるバイオ燃料用耕作地の割合

次に、牧草需要量の推計結果が図(3)-13である。2010年における牧草需要量は1.92Gtと推計され、先行研究（Herrero et al⁴⁾）の2.26Gtと比べると若干小さい値となったが、本研究では羊・山羊による牧草需要を考慮していないため、妥当な範囲と考えられる。将来の牧草需要量は最大で4.28Gt（SSP3、2100年）となり、2010年の2.2倍の需要となった。人口増加が大きいシナリオであるSSP3の需要が大きくなったことから、食料需要と同様に、牧草需要量の増加も人口増加の影響が大きいと考えられる。

また、牧草地需要量の推計結果が図(3)-14である。牧草地需要量は、2010年において約1.2Ghaと推計されたが、これはFAOで報告されている2010年の牧草地面積3.35Ghaの約35%にしか相当しない。本研究では、牧草需要量を面積に変換する際に、牧草地1haあたりの牧草の供給ポテンシャル（最大値）を用いているが、上記の結果は、現時点でさらに効率的な牧草地利用が可能であることを示唆していると考えられる。牧草地面積需要量は最大で2.82 Gha（SSP3、2100年）と推計され、2010年の1.12 Ghaから約2.4倍に増加すると推計された。最大の牧草地面積需要量においても、2100年までの期間で、現在の面積を拡大する必要はない結果となったが、供給ポテンシャル最大限まで牧草を利用した場合の砂漠化や土地の劣化等の環境影響の可能性については留意する必要がある。

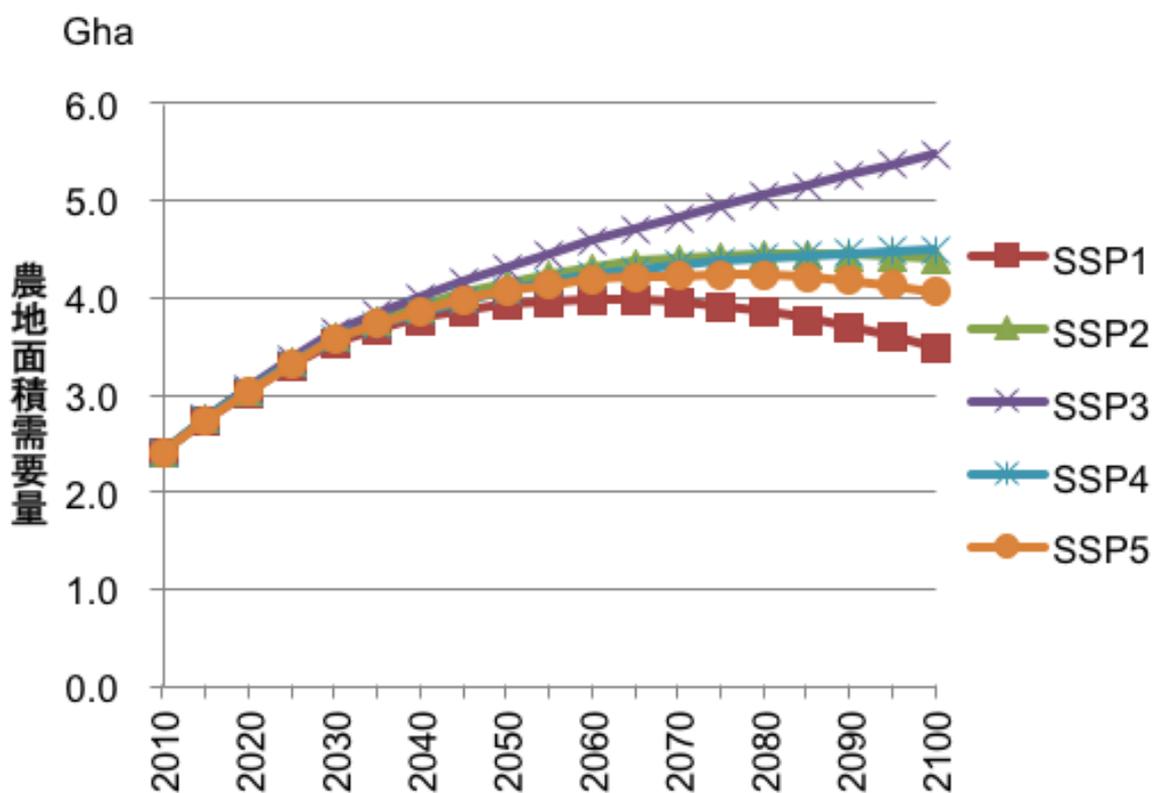


图(3)-13 牧草需要量

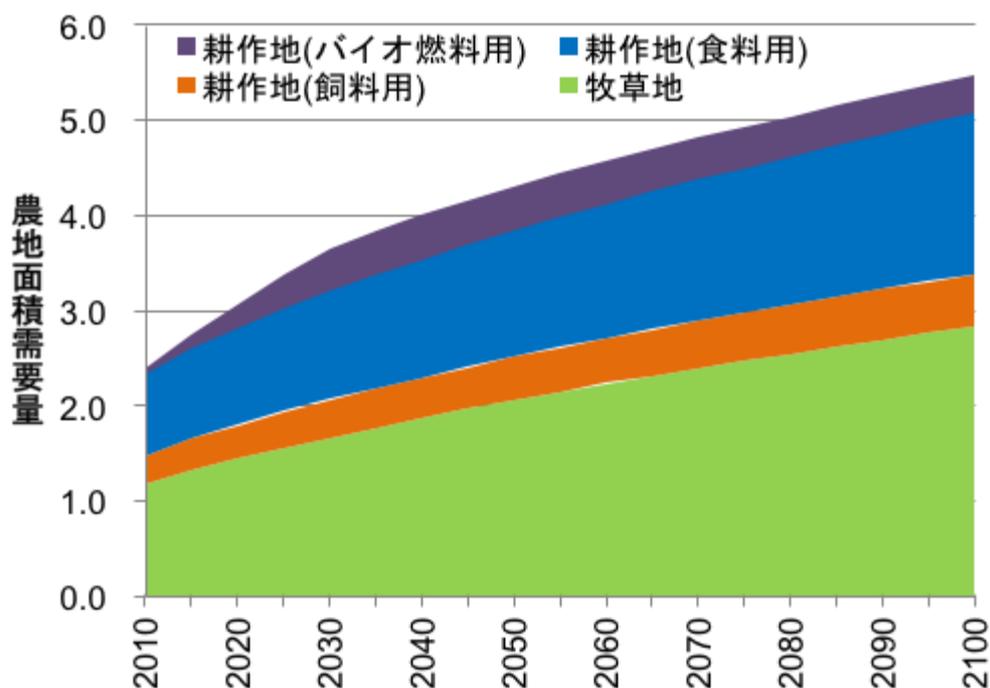


图(3)-14 牧草地面积需要量

最後に、農地面積需要量の推計結果が図(3)-15である。農地面積需要量は2100年までに最大で5.48Gha (SSP3、2100年)になると推計された。最も農地面積需要量が大きくなるのはSSP3であり、農地面積需要量に関しては人口増加が主な因子と考えられる。農地面積需要量が最大となるSSP3について、生産された作物の用途の内訳を見たものが図(3)-16である。2010年において、バイオ燃料用耕作地が全体の3%、食料用耕作地が37%、飼料用耕作地が12%、牧草地が48%を占めた。2100年までの期間を通して、畜産に関わる農地が全体の60%を占める結果となり、飼料・牧草を必要とする畜産物の消費を削減することで、農地面積の需要を抑制できることが示唆された。



図(3)-15 農地面積需要量



図(3)-16 農地面積需要の用途別の内訳 (SSP3)

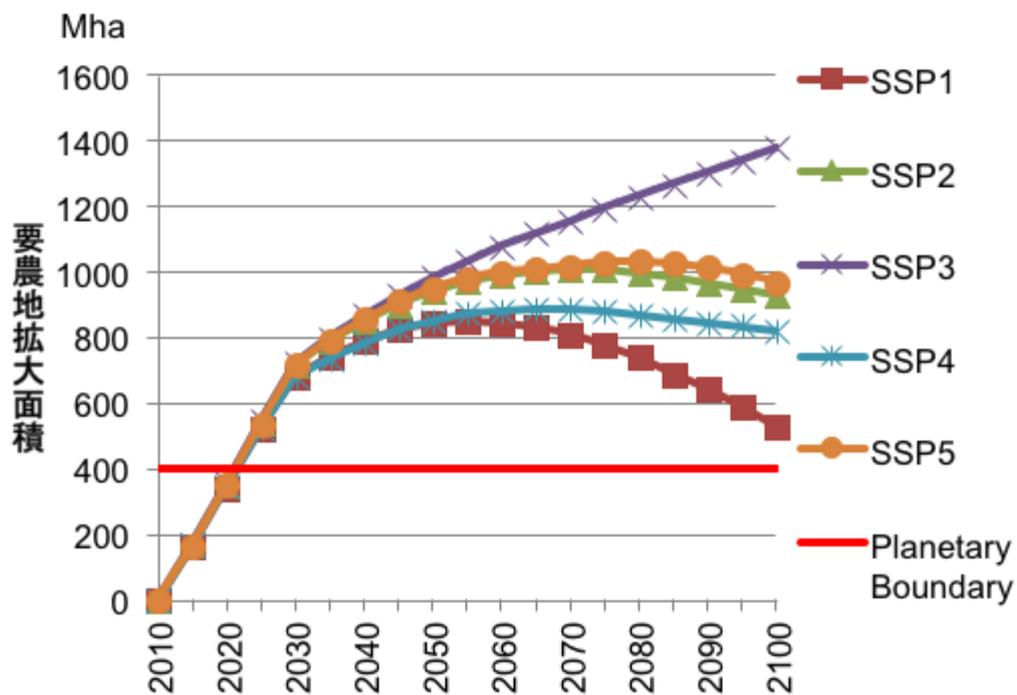
(3) 土地利用の変化のシナリオ作成

要拡大農地面積の推計結果が図(3)-17である。「土地利用の変化」のプラネタリーバウンダリーは、地球上の不凍結の土地が耕作地に転換される限度を15%と設定しており、2005年以降の拡張の余地を約400Mhaとしている (Rockström et al.¹²⁾)。すべてのシナリオで、2025年までにこの400Mhaを超えてしまう結果となり、今後農地面積拡大抑制のための対策が必要であることが示唆された。2010年までの要拡大面積の最大値は1,378Mha (SSP3) となり、プラネタリーバウンダリーを3倍以上上回る結果となった。2050年時点での要拡大農地面積は、SSP3で最大となり、983Mhaであった。UNEP⁵⁾は様々な研究をレビューし、2050年までに新たに必要となる耕作地の面積を320~850M haと見積もっているが、本研究で得られた最大値はそれを上回る結果となった。

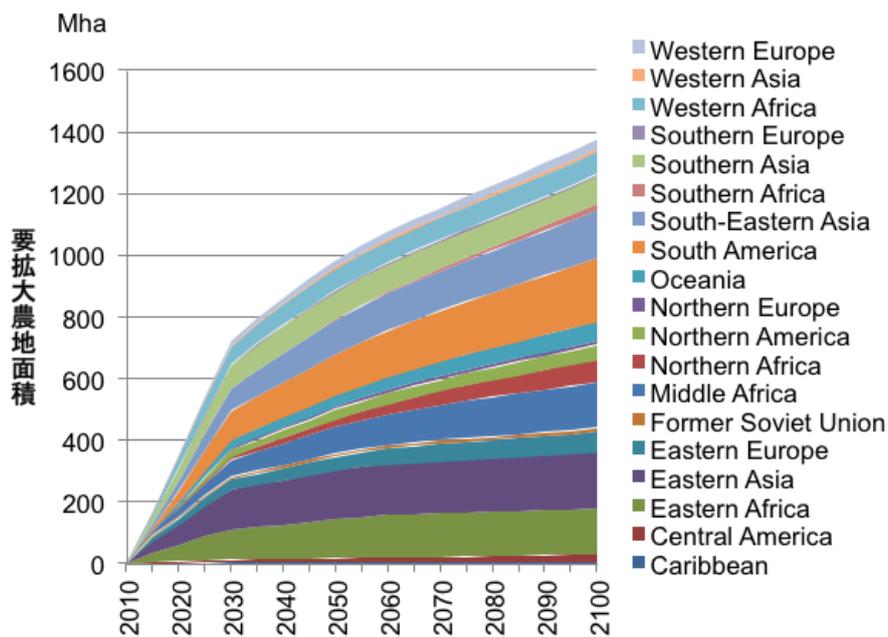
また、将来の要拡大農地面積が最大となるSSP3について、要拡大農地面積を各国に配分した結果が図(3)-18、図(3)-19、図(3)-20である。シナリオⅠにおいては、南アメリカで最も要拡大農地面積が大きくなり、2010年から2100年までに208Mhaと推計された。これに続き、東アジア、東南アジアの順に大きくなった。シナリオⅡでは、北アメリカの値が最も大きくなり360Mhaの農地拡大が必要であるとされ、南アメリカ、東アジアと続いた。シナリオⅢでは、東アジア、南アメリカ、東南アジアの順に大きくなり、東アジアは219Mhaの農地拡大となった。拡大農地面積の配分シナリオにより、要拡大農地面積が大きく異なる地域が存在し、将来の農地の配分方法によって各地域の土地利用の変化が大きく異なることが示唆された。

これをもとに各地域における将来の林地面積と林地面積減少率を推計した。林地面積の減少率は地域によってばらつきがある結果となったが、南アジアについては、すべてのシナリオで近い将来に林地面積減少率が高い値になると推計された。要拡大農地面積がすべてのシナリオで大きくなると推計された東アジアでは、2100年までに、シナリオⅠで73%、シナリオⅡで56%、シナリオ

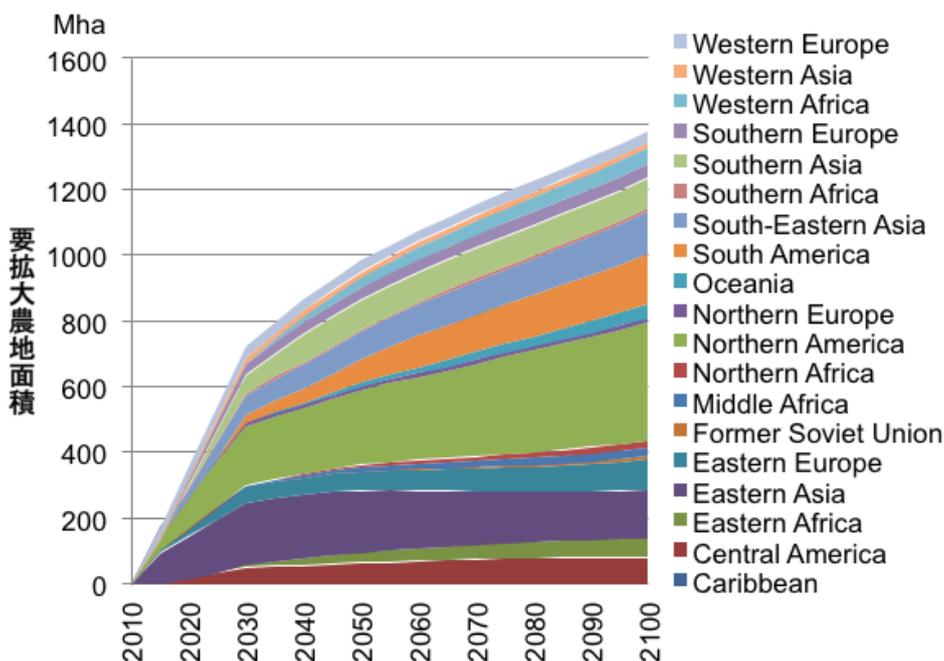
Ⅲで86%の林地が失われるという結果となった。シナリオⅢの北アフリカでは、2095年以降林地面積減少率が100%となり、すべての林地が失われる結果となった。反対に、東ヨーロッパや北ヨーロッパでは、すべてのシナリオで比較的小さな値となった。



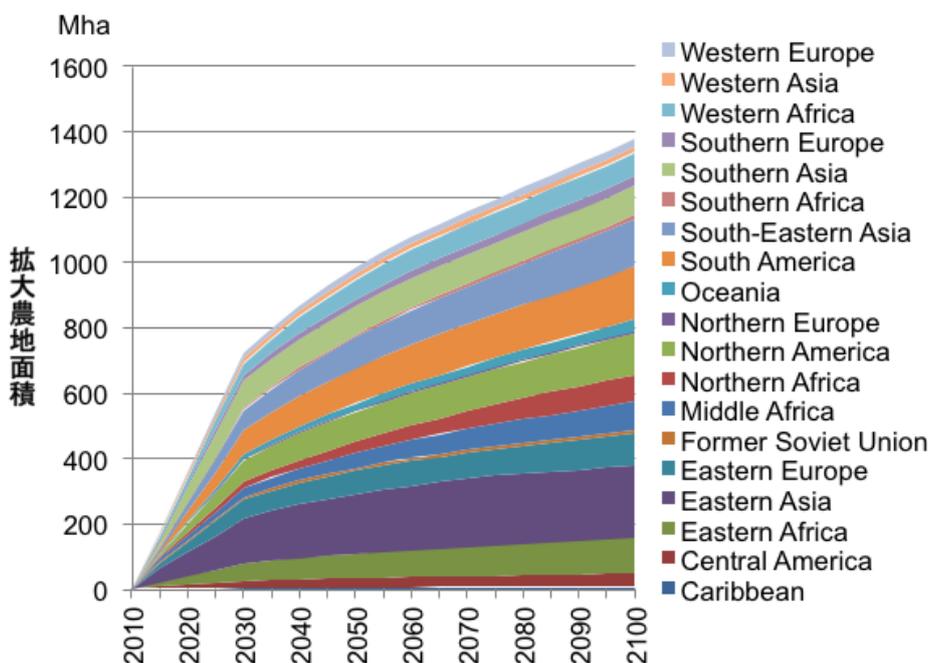
図(3)-17 要拡大農地面積



図(3)-18 各地域の要拡大農地面積 (SSP3、シナリオ I)



図(3)-19 各地域の要拡大農地面積 (SSP3、シナリオII)



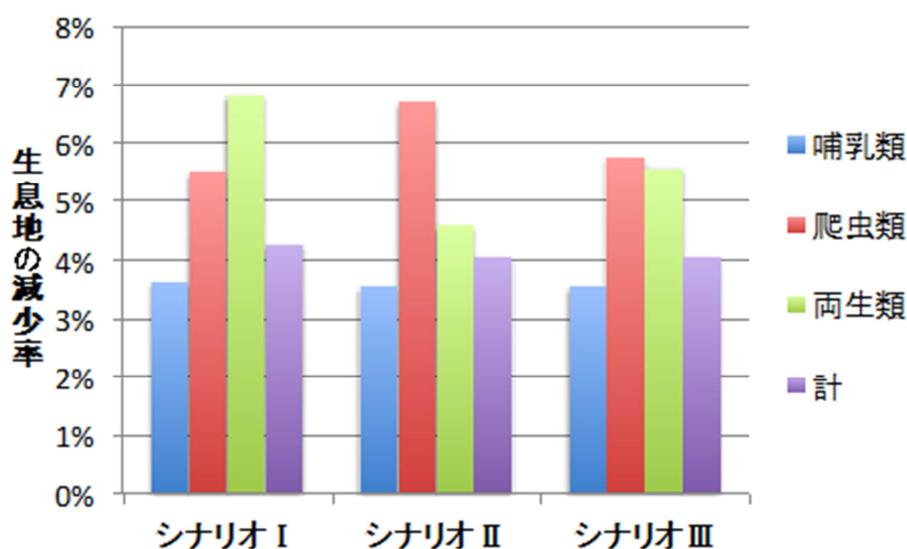
図(3)-20 各地域の要拡大農地面積 (SSP3、シナリオIII)

(4) 生物多様性の損失に関する分析

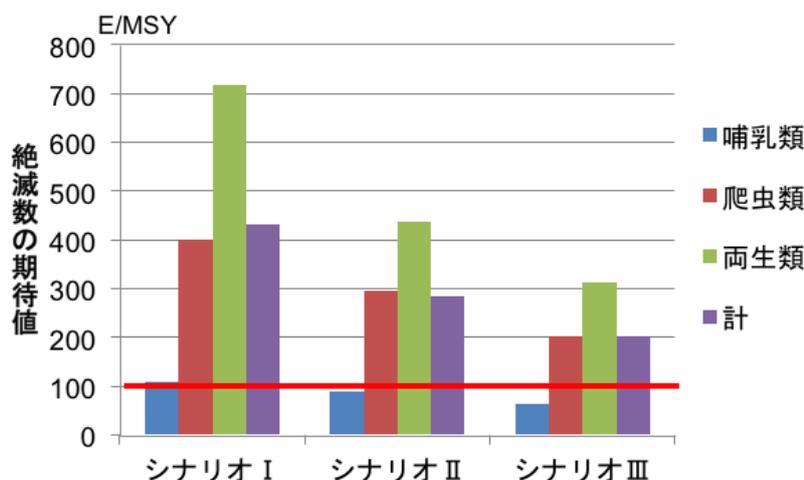
それぞれのシナリオにおける2050年までの生息地減少率の推計結果が図(3)-20である。3つのシナリオのうち、爬虫類はシナリオIでの生息地減少率が最も低かったものの、哺乳類、両生類の生息地減少率が高い結果となり、全体としてはシナリオIの生息地減少率が最も高くなった。哺乳類ではシナリオIで6種、シナリオIIで5種、シナリオIIIで3種の生息地減少率が1となり、生息地が完

全に消失する結果となった。爬虫類では、シナリオⅠで31種、シナリオⅡで19種、シナリオⅢで10種、両生類では、シナリオⅠで19種、シナリオⅡとシナリオⅢで6種の生物種の生息地が完全に失われる結果となった。爬虫類に注目すると、生息地の減少率はシナリオⅠが最も少ないものの、完全に生息地が消失してしまう生物の種数はシナリオⅠが最も大きくなり、土地利用の変化と生物多様性の損失は複雑な関係にあることが示唆された。

また、2050年までの絶滅数の期待値をプラネタリーバウンダリーの単位である100万種1年あたりの絶滅種数に換算した結果を図(3)-21に示す。哺乳類の絶滅種数が最も少なく、64.6～108.8 E/MSY(extinctions per million species per year)と推計された。爬虫類は202.1～399.2 E/MSY、両生類は311.7～717.3 E/MSYと推計され、すべてを合わせた絶滅種数は200.9～432.6 E/MSYとなった。生物多様性の損失に関するプラネタリーバウンダリーの設定も非常に難しいが、化石記録によれば、海洋生物やほ乳類の平均的な絶滅速度は0.1～1E/MSYとされ、Rockström et al.¹⁾²⁾は、10 E/MSY（幅を持たせて～100 E/MSY）をプラネタリーバウンダリーとしている。上記の数値はこれを一桁上回る結果となっており、最も緩い基準（100 E/MSY）と比較しても、哺乳類以外は地球システムの限界を超える結果となった。



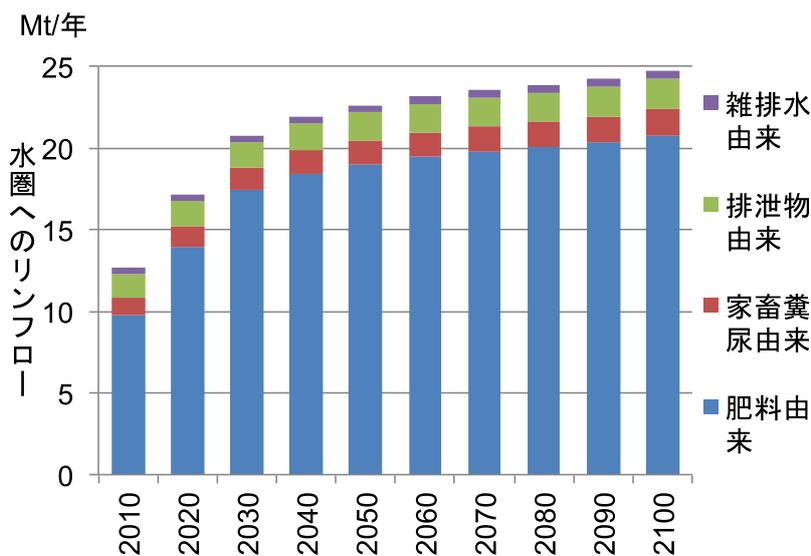
図(3)-21 各シナリオにおける2050年までの生息地減少率



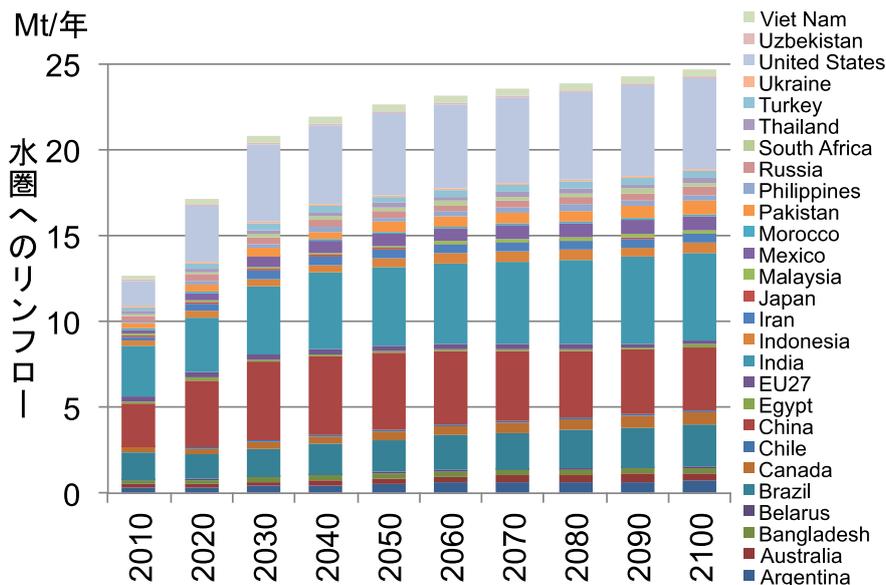
図(3)-22 各シナリオにおける2050年までの絶滅数の期待値

(5) リンの循環に関する分析

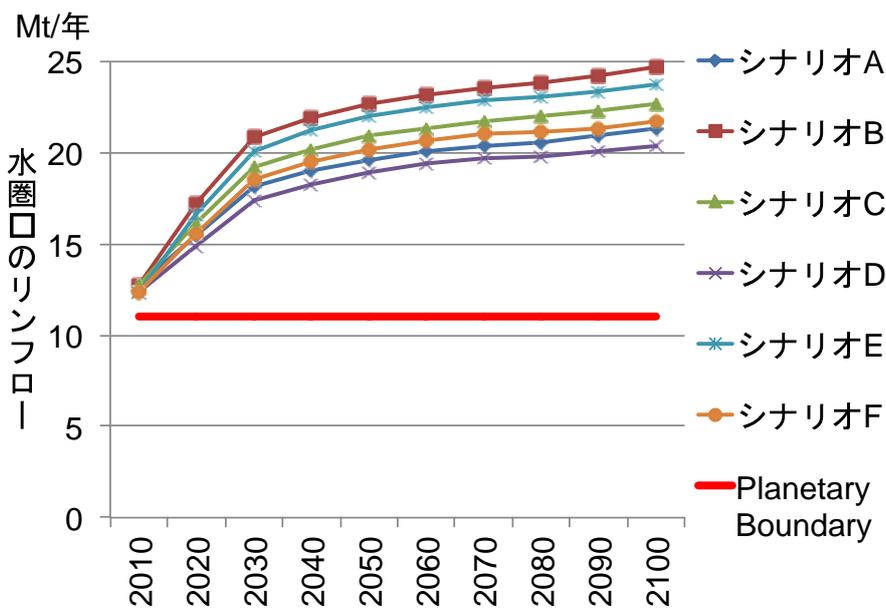
本研究では6つのシナリオ (A~F) について検討したが、その中でもリンフローが最も大きく推計されたシナリオBの結果を図(3)-23に示す。リンフローは2030年頃まで大きく増加し、2040年以降は緩やかな増加傾向となった。肥料由来が全体の80%以上を占めており、肥料からの流出の影響が大きいことが示された。また、国別に内訳を見た結果が図(3)-24である。インド、中国、ブラジル、米国のシェアが大きかったが、これはこれらの国においては農地が多く、肥料が多く使用されるためである。なお、今回対象としている27の国と地域は、2010年時における世界のリン酸肥料使用量の90%以上を占めており、肥料由来のリンフローを議論するには十分と考えられる。しかし、本推計において重要な変数である家畜糞尿中リンの農地還元率や農地(土壌)から水圏へのリン流出率については、研究論文が確認できた特定の国以外はグローバルの値を、同じく研究論文が見つからなかったEU加盟国はEU全体の値を用いたため、国によっては過大・過小推計の可能性はある。



図(3)-23 水圏へのリンフローの由来別内訳 (シナリオB)



図(3)-24 水圏へのリンフローの国別内訳 (シナリオB)



図(3)-25 6つのシナリオの比較

また、6つのシナリオを比較した結果が図(3)-25である。農業による影響が大きい上に将来農地が拡大するシナリオであるため、どのシナリオにおいてもリンフローは増加傾向となったが、農地の配分や下水道普及率のシナリオの違いによって最大4.3百万トンの差が見られた。Rockström et al.¹²⁾ は、リンの海洋への流出を1年あたり11Mt-Pとしてプラネタリーバウンダリーを設定しているが、これは自然のリン流出の10倍の量として設定されたものである。本推計結果のリンフローはプラネタリーバウンダリーの限界値である11Mt-Pを越えてしまっており、この境界に近付けるには肥料の使用量を半分以下にする必要がある。下水道整備の効果としては、下水道普及率の低いシナリオと高いシナリオでは生活排水由来のリンフローに約19~41%の差が見られた。リンの

回収可能性としては、下水道普及率が高いシナリオにおいて2010年に下水処理施設で除去した生活排水中のリンを同年のリン酸肥料として全て使用できると考えると、肥料の使用量を約70万トン（約1.8%）抑えられることが示唆された。

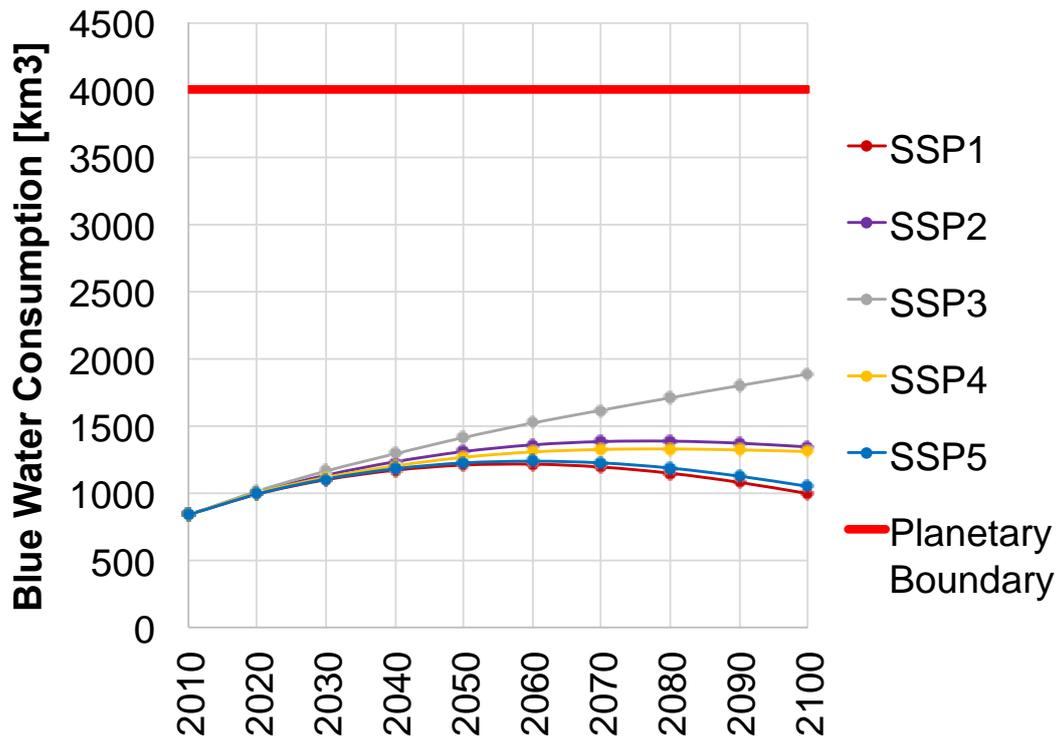
（6）淡水利用に関する分析

淡水需要量について、配分方法Ⅳを用いて推計した結果が図(3)-26である。2010年と比較するといずれのシナリオでも2060年ごろまでは増加を続けるが、それ以降は増加を続けるシナリオと減少に転じるシナリオに分かれた。2030年においては、2010年比31%～39%の増加、2100年においては2010年比19%～126%の増加と推計された。SSP3シナリオで最も大きく、SSP1シナリオで最も小さくなる傾向は、土地資源の推計結果と同様である。Rockström et al.¹⁾²⁾は、世界の水資源利用やその影響をレビューしたうえで、生態系サービスや水資源の利用可能性を確保するためには、年間4000 km³以下のBlue Waterの消費をプラネタリーバウンダリーとして提示している。この値と比較すると、全てのシナリオでプラネタリーバウンダリーを越えることはないという結果となった。

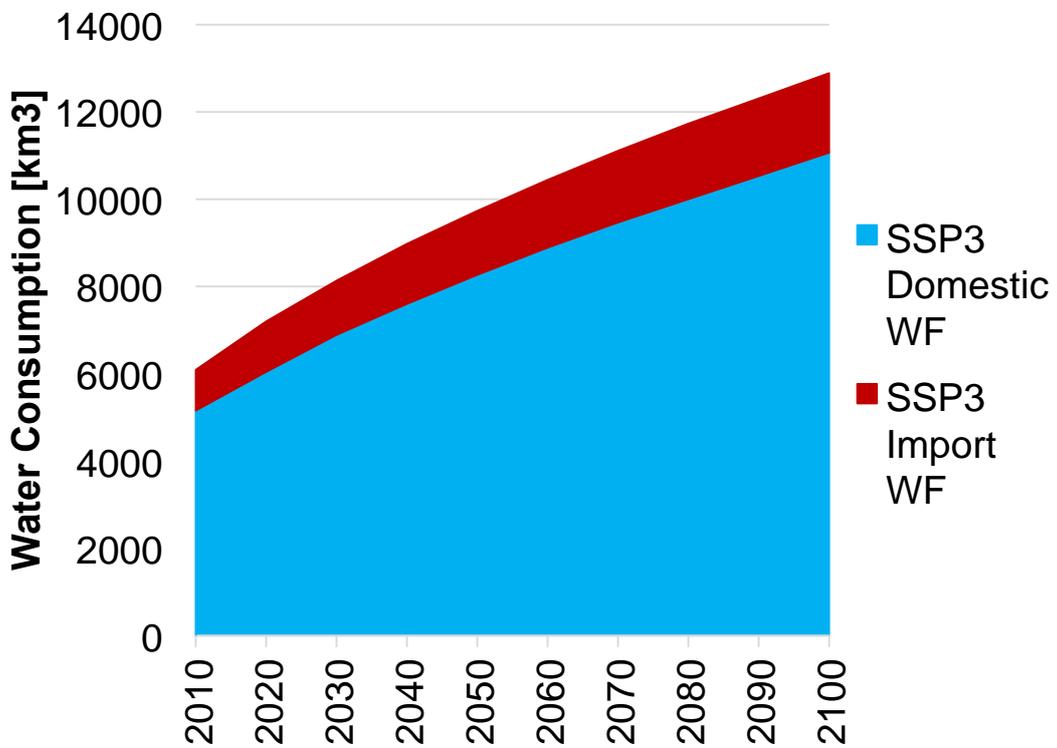
Blue WaterにGreen Waterを加えた淡水消費量の推移を見ると、シナリオごとの増減の傾向はBlue Waterのみの場合と同様であったが、Green Waterの消費はBlue Waterの消費よりも7～10倍大きかった。図(3)-27は、Blue Water+Green Waterの淡水消費の内訳をSSP3の推計結果を例に見たものである。全消費量のうち、輸入された食料に由来する消費量は2割程度であり、この割合は2100年までおおよそ変わらなかった。これは、国別・品目別の輸入比率が将来にわたり変化しないとの仮定による部分が多いが、同時に、将来の食料構成の変化による影響は小さく、淡水需要量の増大がそのまま貿易を通じた間接的な淡水貿易量の増大につながることを示唆している。

本研究でのBlue waterの推計値を既存研究と比較したものが表(3)-2である。用いた水消費原単位の差などから、本推計がやや控えめな値となっていることが示唆されるが、他の推計値と本推計で示された2010年比の増加率を勘案しても、プラネタリーバウンダリーを超える可能性は低いといえる。

一方、水資源の賦存量および需要量については地域偏在性があることに注意が必要である。Pfister et al.⁹⁾では、将来の農業による水需要を地域別に将来推計しているが、これによると北アフリカ、中東、中央アジア、インド、北米南部などにおいて強い水ストレス下に置かれるとされる。また、グローバルな、あるいは地域的な水需給と、生物多様性など他のプラネタリーバウンダリーとの間にはトレードオフが発生する可能性がある。たとえば、生物多様性の高い熱帯地域を避け比較的乾燥した地域に食料の栽培を移した場合、その地域の水需給が逼迫するような場合が想定される。このようなトレードオフ関係にも注意を払わなければならない。



図(3)-26 淡水需要量とプラネタリーバウンダリー



図(3)-27 淡水資源消費量 (Blue water + Green water) の内訳

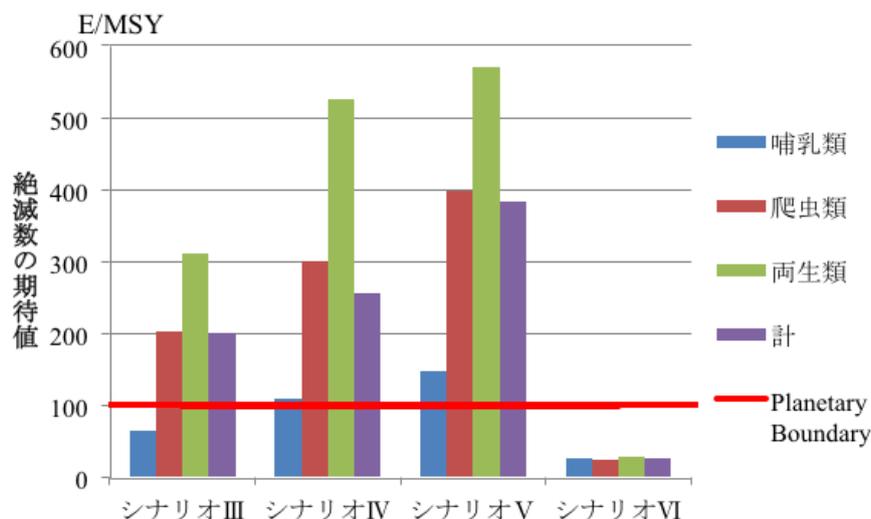
表(3)-2 淡水需要量推計値の比較

	本推計	De Fraiture and Wichelns ¹⁰⁾	Pfister et al. ⁹⁾	Mekonnen and Hoekstra ⁸⁾	Rost S. et al. ¹¹⁾	Shiklomanov and Rodda ⁷⁾
現状 (km ³ /年)	835 (2010年)	1,570 (2000年)	1772 (2000年)	945 (1996-2005年)	636 (最小) 1,364 (最大) (1971-2000年)	2268 (1995年)
2050年 (km ³ /年)	1,207 (最小) 1,413 (最大)	1,650 (最小) 2,255 (最大)	1,914 (最 小) 3,066 (最 大)	-	-	-

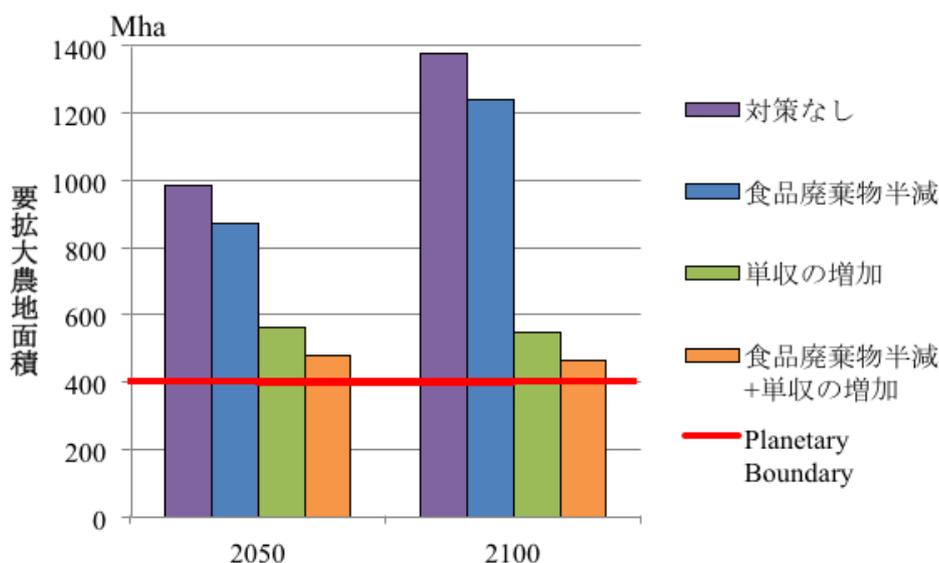
(7) 持続可能な生物資源利用の在り方と生物資源利用に関わる適切なSD指標の検討

生物多様性の損失をできるだけ回避するように、要拡大農地面積を配分したシナリオⅣ～Ⅵの結果が図(3)-28である。各国の林地に生息する生物種数を考慮して配分したシナリオⅣおよびⅤの結果は、各国の現在の作物収穫面積に応じて配分したシナリオⅢよりも生物多様性の損失が大きくなった。一方、各国の現在の林地面積に応じて配分したシナリオⅥでは、対象動物種の絶滅数の期待値が26.7 E/MSYとなり、緩いプラネタリーバウンダリーを下回る結果となった。以上の結果から、生物多様性の損失を回避するには、生息する生物種数を考慮したシナリオよりも、林地の規模を考慮したシナリオの方が効果的であることが示唆された。しかしながら、本研究では、林地の規模を林地群ごとに算出しているわけではなく、国ごとに区切って算出しているため、実際の林地の規模とは異なることに注意が必要である。

また、要拡大農地面積が最大であったシナリオに対して、食品廃棄物の半減、過去と同じ単収の増加、その両方を達成した場合の要拡大農地面積を推計した結果が図(3)-29である。将来の土地利用の変化をプラネタリーバウンダリー内に収めるためには、各作物の現在の単収の増加率を維持したうえで、食品廃棄物を半減させ、さらに現在の先進国の肉食の消費レベルを40%削減することが必要であると推計された。生物多様性の損失に関しては、単収の増加と食料廃棄物の半減により、プラネタリーバウンダリーに収められるという結果となった。



図(3)-28 各シナリオの生物多様性の損失



図(3)-29 各シナリオにおける要拡大農地面積 (SSP3)

食品廃棄物の削減、単収の増加、肉食の削減、施肥の管理等はSD指標の候補となるものであるが、2015年に策定されたSDGs (Sustainable Development Goals) においては、Target 2.3において2030年までの農業生産性の倍増、Target 12.3において2030年までの食品廃棄物の半減、Target 15.2において森林の保全等が掲げられている。しかしながら、これだけではプラネタリーバウンダリーを越えてしまう可能性がある。肉食の抑制や施肥の管理等も含め、より多面的なアプローチについて検討する必要があると考えられる。

(8) まとめ

以上の成果をまとめると以下ようになる。

- 1)食料・バイオ燃料に関わる土地需要、それに関わる土地利用の変化（農地の拡大）、農地拡大による生物多様性の損失への影響、農地利用に関わるリンフロー・淡水消費量への影響を推計できるモデルを構築し、これらの関係を総合的に検討する基礎を確立した。
- 2)食料・バイオ燃料の需要は今後増加することが見込まれ、それによる土地利用の変化、生物多様性の損失、リンの循環は、Rockström et al.^{1) 2)}が提案するプラネタリーバウンダリーを超過すると推計された。一方、淡水利用については、プラネタリーバウンダリーを超える可能性が低いことが示唆された。
- 3)食品廃棄物の半減、肉食の4割減、これまでのトレンドでの単収の増加等の組合せにより、土地利用の変化をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性が示唆された。また、森林の面積が大きい国・地域で農地の開発を行うことにより、生物多様性の損失をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性も示唆された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

既存研究では、食料用作物やバイオ燃料用作物の対象範囲が網羅的ではなかったが、本研究では世界184の国・地域、96品目の作物を対象とした分析が行えるモデルを構築した。さらに、牧草も取り扱うモデルへと拡張した。これにより、食料・バイオ燃料に関わる土地需要をより網羅的に分析することが可能となった。

さらに、農地拡大を中心とした土地利用の変化、農地拡大による生物多様性の損失への影響、農地利用に関わるリンフロー・淡水消費量への影響を推計できるモデルを構築し、これらの関係を総合的に検討する基礎を確立した。これにより、複合的な関係にある複数の資源制約・環境制約を同時かつ統合的に分析することが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、資源利用に着目してそのライフサイクル全体を捉え、資源制約と環境制約を統合的に検討した。これまで我が国や多くの国において、環境政策は資源が利用された後の廃物（廃ガス、廃液、廃固形物）を対象とし、資源利用そのものに足を踏み入れてこなかった。他方で、資源政策の主軸は供給リスクの高い資源の安定的な供給の確保におかれ、その持続可能な利用と言った側面への配慮は相対的に低かった。昨今、循環型社会形成推進基本計画における資源生産性指標の採用や、国連環境計画（UNEP）における国際資源パネル（International Resource Panel）の検討内容などからも分かるように、資源利用の上流から下流へのフロー全体を捉えた上で、統合的な観点から資源利用を管理することの必要性が徐々に注目されるようになってきている。これは、様々な政策を整合させつつ統合していく動きでもあり、この時に有益なアプローチの1つが、資源利用という観点で全体の整合を図っていくことである。本研究のアプローチは、こうした検討の先駆けとして今後の環境政策・資源政策の統合に貢献しうるものであると考えている。

本研究におけるシナリオ分析では、食品廃棄物の半減、肉食の4割減、これまでのトレンドでの単収の増加等の組合せにより、土地利用の変化をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性が示唆された。効果の大きかった単収の増加については、これまでのような改善を今後も期待することは難しい可能性があるが、これらの対策を進めていくことが必要である。また、森林の面積が大きい国・地域で農地の開発を行うことにより、生物多様性の損失をプラネタリーバウンダリー以下にできる可能性も示唆された。これは、大きな森林がある国・地域で農地を開発することにより、生息地の減少率を下げられる種が増えるためである。このような農地開発の配分を国・地域間で行うことは現実的ではないが、そうした方向性を共有することが重要と考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本研究における農産物需要や土地需要の推計について、この分野の研究に蓄積のある Dr. Fridolin Krausmann、Dr. Karlheinz Erb、Dr. Christian Laukら（Institute of Social Ecology, Alpen-Adria-Universität

Klagenfurt、Austria) との共同研究を行った。このため、2014年11月12日から2015年1月18日の約2ヶ月間、本研究グループより田村賢人を派遣した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) C. KAYO, H. OKA, S. HASHIMOTO, M. MIZUKAMI, and S. TAKAGI: Journal of Forest Research, 20, 3, 309-320 (2015), Socioeconomic development and wood consumption.
- 2) S. HASHIMOTO, T. EHARA, K. TAMURA, and T. YAMAMOTO: Global Environmental Research, 19, 2, 165-172 (2015), How can we solve the problems of hunger and obesity simultaneously? An alternative indicator for sustainable development.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 蟹江憲史編：持続可能な世界をめざして～2030年の世界に向けた国連目標、ミネルヴァ書房、in press
「2章 環境資源制約下での持続可能性の評価とSDGs（執筆担当：馬奈木俊介、玉置哲也、中村寛樹、村上進亮、橋本征二、吉川直樹）」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 田村賢人、吉川直樹、天野耕二、橋本征二：日本LCA学会第9回研究発表会、東京(2014)
「将来の食料・バイオエネルギーの需要に関わる土地制約」
- 2) 宮内雄飛、松八重一代、橋本征二：日本LCA学会第9回研究発表会、東京(2014)
「水圏へのリンフローのシナリオ分析」
- 3) 榎原友樹、井口正彦、田崎智宏、橋本征二、山本太郎：環境経済・政策学会2014年大会、町田(2014)
「ポスト2015年開発アジェンダにおける食料関連目標に関する一考察」
- 4) 田村賢人、吉川直樹、天野耕二、橋本征二：第42回環境システム研究論文発表会、つくば(2014)
「食料・バイオ燃料に関わる将来の農地需要とその抑制策」
- 5) K. TAMURA, N. YOSHIKAWA, K. AMANO, and S. HASHIMOTO: The 11th International Conference on EcoBalance, Tsukuba, Japan, 2014
“Land constraints associated with future food and biofuel demands.”
- 6) S. HASHIMOTO, K. TAMURA, N. YOSHIKAWA, and K. AMANO: Joint 11th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, 2014
“Land constraints associated with future food and biofuel demands.”

- 7) C. KAYO, S. HASHIMOTO, M. MIZUKAMI, S. TAKAGI, and H. OKA: Joint 11th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, 2014
“The relationship between socioeconomic development and wood resource consumption.”
- 8) 田村賢人、吉川直樹、天野耕二、橋本征二：日本LCA学会第10回研究発表会、神戸（2015）
「食料・バイオ燃料に関わる将来の農地需要の抑制ポテンシャル」
- 9) 矢野夏美、田村賢人、橋本征二：日本LCA学会第10回研究発表会、神戸（2015）
「農産物需要の増大による今後の土地利用の変化が生物多様性に与える影響」
- 10) 山口陽平、田村賢人、吉川直樹、天野耕二、橋本征二：日本LCA学会第10回研究発表会、神戸（2015）
「食料消費に関わる淡水資源必要量の将来シナリオ評価」
- 11) TAMURA, K., C. KAYO, N. YOSHIKAWA, K. AMANO, and S. HASHIMOTO: The 8th Conference of International Society for Industrial Ecology, Guildford, 2015
“Global demand for agricultural and forest land and its saving potential.”
- 12) 田村賢人、加用千裕、佐藤翼、橋本征二：第43回環境システム研究論文発表会、札幌（2015）
「世界の農地・林地需要とその抑制ポテンシャル」
- 13) 田村賢人、橋本征二：第11回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、pp.98-99（2016.3／柏）
「Planetary boundariesの整合性～土地利用の変化と生物多様性の減少について」
- 14) 村上真理、C.M. LWIN、橋本征二：第11回日本LCA学会研究発表会、柏（2016）
「グローバルな農業由来・生活排水由来リンフローのシナリオ分析」
- 15) 山口陽平、田村賢人、吉川直樹、橋本征二、天野耕二：第11回日本LCA学会研究発表会、柏（2016）
「国際貿易を考慮した食料消費に関わる淡水資源必要量の将来シナリオ評価」
- 16) 中島聡子、橋本征二：第11回日本LCA学会研究発表会、柏（2016）
「放牧による砂漠化危険度マップの作成」
- 17) 長井翔太郎、橋本征二：第11回日本LCA学会研究発表会、柏（2016）
「木質ペレット利用推進による環境保全・地域活性化の評価」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 立命館大学オープンキャンパスにおける学科紹介（主催：立命館大学、2014年8月3日、立命館大学びわこくさつキャンパス、来場者約60名）にて成果紹介
- 2) 立命館大学オープンキャンパスにおける学科紹介（主催：立命館大学、2015年8月1日、立命館大学びわこくさつキャンパス、来場者約60名）にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

下記の発表が、The 11th International Conference on EcoBalance（2014年10月27-30日、つくば）で、Poster Award Bronze を受賞した。125件のポスター発表から Gold 2件、Silver 2件、Bronze 2件が選出された。

K. TAMURA, N. YOSHIKAWA, K. AMANO, and S. HASHIMOTO: Land constraints associated with future food and biofuel demands



図(3)-28 The 11th International Conference on EcoBalanceにて

8. 引用文献

- 1) J. Rockström et al.: Ecology and Society, 14, 2, art.32, (2009a), Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity.
- 2) J. Rockström et al.: Nature, 461, 24, 472-475, (2009b), A safe operating space for humanity.
- 3) Iiasa: SSP Database, (2014), <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>, accessed in Jul 2014
- 4) Herrero et al.: PANS, 110, 52, 20888–20893, (2013), Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems.
- 5) UNEP: A Report of the Working Group on Land and Soil of the International Resource Panel, (2014), Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply, UNEP.
- 6) Baillie et al.: A Global Species Assessment – 2004 IUCN Red List of Threatened Species, (2004), IUCN.
- 7) I.A., Shiklomanov and J.C. Rodda (editors): World Water Resources at the Beginning of the 21st Century, (2003), UNESCO and Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- 8) M. M. Mekonnen and A.Y. Hoekstra: Value of Water Research Report Series No.50, (2011), National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption, , UNESCO-IHE.
- 9) S. Pfister et al.: Science of the Total Environment, 409, 4206–4216, (2011), Projected water

consumption in future global agriculture: Scenarios and related impacts.

- 10) C. De Fraiture and D. Wichelns: *Agricultural Water Management*, 97, 502–511, (2010), Satisfying future water demands for agriculture.
- 11) S. Rost et al.: *Water Resources Research*, 44, W09405, (2008), Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system.
- 12) S. Wirsenius: *Human Use of Land and Organic Materials: Modeling the Turnover of Biomass in Global Food System*, (2000), Chalmers University of Technology and Goteborg University.
- 13) 棟居洋介・増井利彦: *環境科学会誌*, 21, 1, pp.63-88, (2008), IPCC排出シナリオ（SRES）にもとづいた世界の食料必要量の長期推計.
- 14) 吉本皓亮ら: *日本LCA学会誌*, 5, 2, pp.252-261, (2009), バイオエタノール需要増を考慮した地球規模の食料需給構造と土地利用改変に関する研究.

(4) 地球システムからの制約の検討（鉱物資源に焦点をあてた検討）

東京大学 村上 進亮・醍醐 市朗

平成25～27年度累計予算額：9,658千円（うち平成27年度：3,158千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、鉱物資源がSDGsの達成に対して妨げとなるかどうかについての検討を行った。まず、その検討において重要と考えられる鉱種の同定を行った。具体的には銅、白金族、金、そしてそれ以外のエネルギークリティカルメタルと呼ばれるレアメタル類、例えば希土類やインジウム等が重要であると選ばれた。次に、SDGsの中でもエネルギーアクセスに関するシナリオを設定、これを実現するために必要となる銅の需要を推定した。さらにこれを外生的に供給側のシミュレーションモデルに与えることで、検討を行った結果、かなりのリサイクル促進か、銅の使用強度が改善しない限りは、どのようなシナリオにおいてもかなりの供給不足が起きるであろうことが明らかになった。

[キーワード]

鉱物資源、Planetary Boundaries、システムダイナミクス、LCA、資源量

1. はじめに

非再生可能資源である鉱物資源について、その持続可能な発展に対する悪影響は古くから論じられては来た。ただし、その主たる論点は枯渇であり、そしてその現実味の無さから検討対象から外れた時期もあった。しかしながら、昨今の議論においては、多くの見落とされてきた論点が明らかになり、どの鉱物資源がより重要であるかを検討するCritical Mineralsの議論¹⁾⁴⁾、鉱物とエネルギーのネクサスを考えるMinerals-Energy Nexusの議論⁵⁾、その中で急速に注目を集めつつある、天然資源の劣化に関する論点⁶⁾など、様々な議論が起こりつつある。

そうした中、本研究課題が取り上げるSDGsに対して、鉱物資源が何らかの形でその達成を阻む存在とならないかどうかは検討する必要がある。鉱物資源、特に素材系資源である金属鉱物の一部については、その高いCriticalityがかなり深刻な問題として議論されている。この種の議論は主として高い経済レベルを保持する国家において論じられているが、実際にはこれから成長する国々において深刻な問題を引き起こす可能性も否定はできない。にも関わらず問題が複雑すぎるため、SDGsのように、明確に定量的な設定を求められる目標値に含めることは非常に難しい。また、問題は一部専門家の間でのみ共有されており持続可能性の議論と、本当の意味で統合的な議論がなされている研究事例はほぼ無い。

そこで、サブテーマ(4)においては、こうした鉱物資源、特に素材系金属資源に焦点を当て、社会の持続可能性に対して、より具体的にはSDGsの達成に対する制約として機能してしまうことがないかどうかについて検討を行うことを目的とする。

2. 研究開発目的

前節でも述べたとおり、サブテーマ(4)の目的はSDGsの達成に対して鉱物資源からの制約が存在するかどうかを検討することにある。そこでより具体的な検討目的を以下のように設定した。

まず、制約を考える上で重要となる鉱種を同定する必要がある。その検討に際して、どのような視点からの検討を行うべきかを考える。次にそこで選ばれた視点に基づき、実際に検討を要する鉱種を同定する。

そこで同定された要検討鉱種について、SDGsを達成するような社会シナリオを設定、そのために必要となる鉱物資源需要をシナリオとして推定する。これを外生的に与えるシステムダイナミクスモデルを構築、二次資源の発生・実際のリサイクルを陽に含めた需給モデルとして描くことで、供給障害が発生するかどうかを検討する。

ここでもし供給障害が発生するのであれば、その社会シナリオはこの鉱物の需給が制約となり達成不能であるということになる。その有無を検討することをサブテーマ(4)の最終的な目的とした。

限られた時間において効率的に検討を進めるため、最終的な検討は一鉱種のみについて行うこととし、この一鉱種を選ぶために前段階の検討を慎重に進めた。

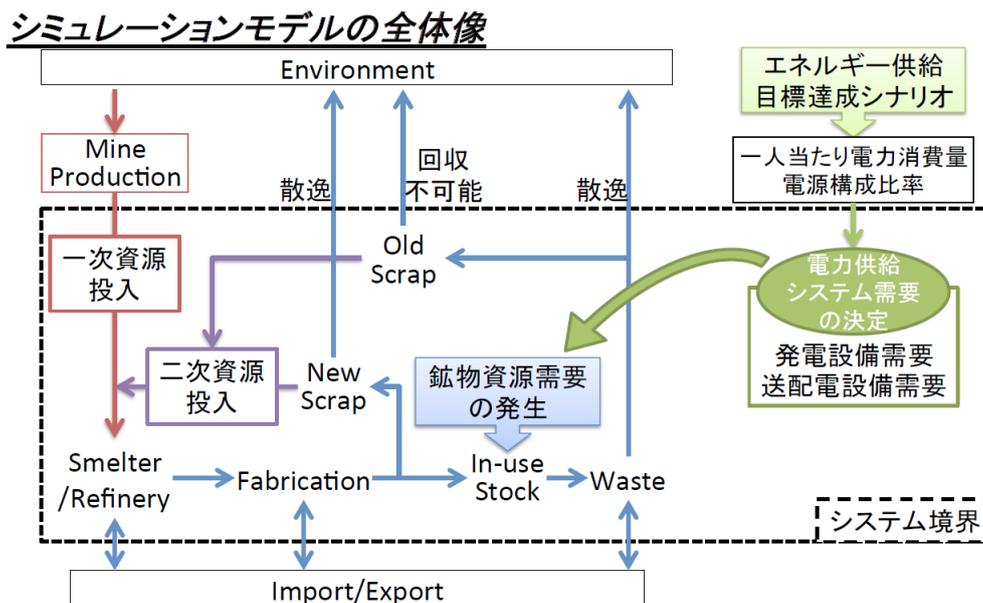
3. 研究開発方法

(1) 要検討鉱種の同定方法の確認、及び同定

サブテーマ(4)は鉱物資源からみた持続可能な発展に対する制約の検討である。しかしながら、鉱物資源と言ってもその種類は多様であり、これが社会の持続可能性に与える影響の在り方も様々である。そこでまず研究の第一段階として、既存文献等から、資源そのものの制約と、それに起因する環境影響による制約の2つの視点から要検討鉱種を抽出する作業を行った。環境影響については、プラネタリーバウンダリーの中で検討されている全ての項目について各種鉱物の利用がどの程度の影響を与えるかを検討し、重要なものについての影響度の高いものが、鉱物として特に注目されるべきであると考え整理を行った。

(2) 要検討鉱種に関するSDGs達成のための将来の需要推定

こうした整理の後、特定の鉱物に対して具体的な需給をシミュレーションするモデルを開発し、SDGsの達成に対して阻害要因となりうるかどうかの検討を行った。まずその第一段階として、エネルギーシナリオをおき、そのために必要なエネルギーインフラ構築のための銅需要を予測した。敢えて極端なシナリオ設定もおくことによって、急速なエネルギーインフラ構築がどのような銅需要を引き起こすのかについて検討を行った。これは、SDGs達成のために基本的な項目だと考えられる、エネルギーアクセスの改善が実施可能なものかどうかを検討するものである。ここで構築した需要推定のためのモデルにおける因果関係の概略図を図(4)-1に示す。なお、モデル構築に際しては、統合開発環境Eclipse 4.4を用い、言語としてはJavaを用いプログラムを構築した。またこれに対して必要な情報の整理に際しては統計処理言語Rを用いて実施した。



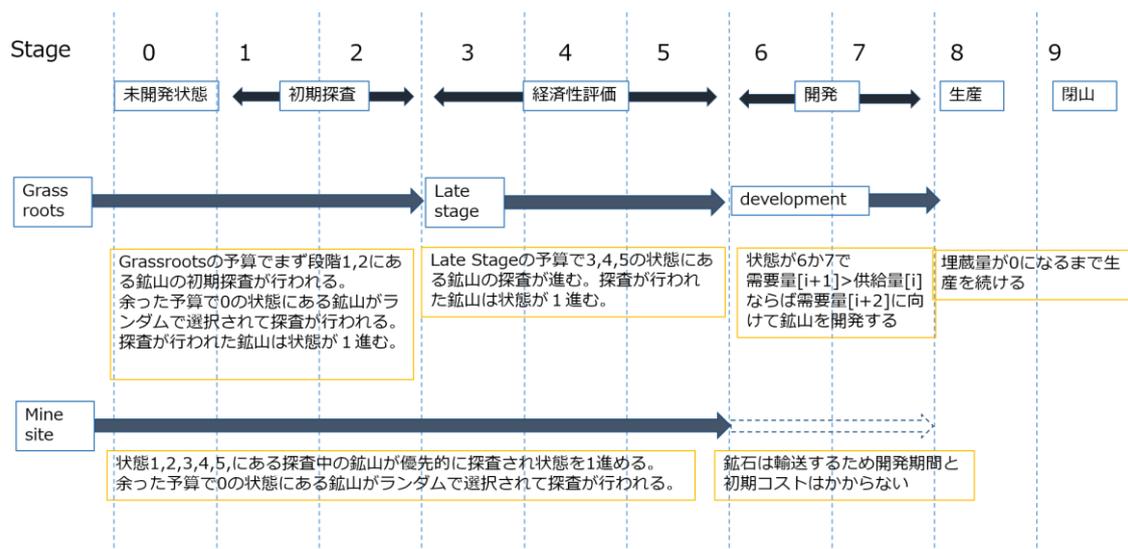
図(4)-1 シミュレーションモデルの全体像

(3) 要検討鉱種に関する供給サイドのモデル化

次にこの需要側からの検討をより意味のあるものとするために、銅供給に関する詳細なモデルの構築を実施した。銅に関しては、Peak Copperの議論が見られるなど、その供給の限界が公に議論されつつある現実がある。そこで、既存の文献等から得られる資源量に関する精緻なデータの中で最も大きな資源量を持つと考えられる（良く言われる埋蔵量よりははるかに大きい）データベースを元に、現状では開発に着手されていないような鉱山の開発までを視野に入れた供給モデルの構築、結果の検討を行った。

この供給サイドのモデルについては、全ての鉱山（これから新規に開発されるものも含め）が、それぞれ独立な生産に関する意志決定を行うような、非常に詳細なボトムアップ的なモデルである点も特徴になる。ここでは、このモデルの大きな特徴である、鉱山の新規開発について、具体的にどのような複数の意志決定段階を経て鉱山が開発に至るかについて、図(4)-2に示す。

各鉱山のstageを0～9に分類する。分類は0を未開発、stage 1、2を初期探査、stage 3、4、5をF/S、stage 6、7を開発、stage 8を生産、stage 9を閉山とする。まず新規鉱山をGrassrootsとMine Siteに分類する。Grassrootsとは探鉱活動の最初期段階から周辺でのボーリング、初期鉱量の定量化までを指す。ここには予備調査および評価のための探査も含まれる。



図(4)-2 モデル内での新規鉱山の開発に至る流れ

Mine site とは開発段階にかかわらず、既存の鉱区周辺における探鉱活動を指す。ただし、採掘中の鉱体についての地質工学・岩盤工学的作業、鉱量評価、品位管理あるいは確認ボーリングなどの開発地質調査は除く。稼行鉱山の経済輸送距離内での付随鉱体の探査および開発が決定したプロジェクトまたはその直近での探鉱で生産前段階のものは含まれる。

Grassroots の場合、Grassroots の探査予算で stage1、2 にある鉱山で初期探査が行われる。余った予算で stage 0 の鉱山をランダムで選択し、探査を行う。1年に1度各鉱山で探査を行うか行わないか決定される。探査が行われた場合 stage を1進める。次に Late Stage の予算で stage 3、4、5 の状態にある鉱山がランダムに選択されて探査が進む。Stage 6、7 の場合今期を i で表すと需要量 $[i] >$ 供給量 $[i]$ ならば需要量 $[i+2]$ を満たすように操業コストが低い鉱山から順に stage が進む。この仮定は今期の需要量を今期の供給量が上回っていた場合、さらに鉱山の開発を進めると常に供給過多になってしまいそのような状況を防ぐことと、開発から生産まで2年という仮定をしているため需要量 $[i+2]$ に供給量を調整するような形で鉱山が開発されることを考慮した。stage 8 にある鉱山は埋蔵量が0になるまで銅の生産を行い stage 9 に移行し閉山する。Mine Site の鉱山も Grassroots の鉱山と同様に stage を変化させるが Mine Site の鉱山は鉱石を近くの選鉱場に輸送するため開発期間はかからないとした。

このような意志決定を各鉱山（これから開発されるものも含め）についてモデル化した先行研究はほぼ存在せず、それ自体がサブテーマ(4)の大きな独自性でもある。なお、ここで用いるデータに関しては、鉱山に関する商用データベース⁷⁾、並びに USGS (米国地質調査所) が提供する鉱床データ⁸⁻¹⁰⁾を用いている。

こうしたデータを用いた上で、鉱山の意思決定に影響を与えるような費用関数等は全て入手可能な実データから統計的に推定された関数を用いた。実際の生産等に係る関数については、創業規模に対する関数として、また探査の予算についてのみ、価格の関数としている。後者については、実際のデータを検討した結果、市況が良い環境下においては、企業の利益が増加し、これを探査予算に回している傾向が明らかに見られたことからこのようなモデル化を行った。

現時点で未開発の鉱床データについては、USGS (米国地質調査所) が提供する鉱床データ⁸⁻¹⁰⁾を

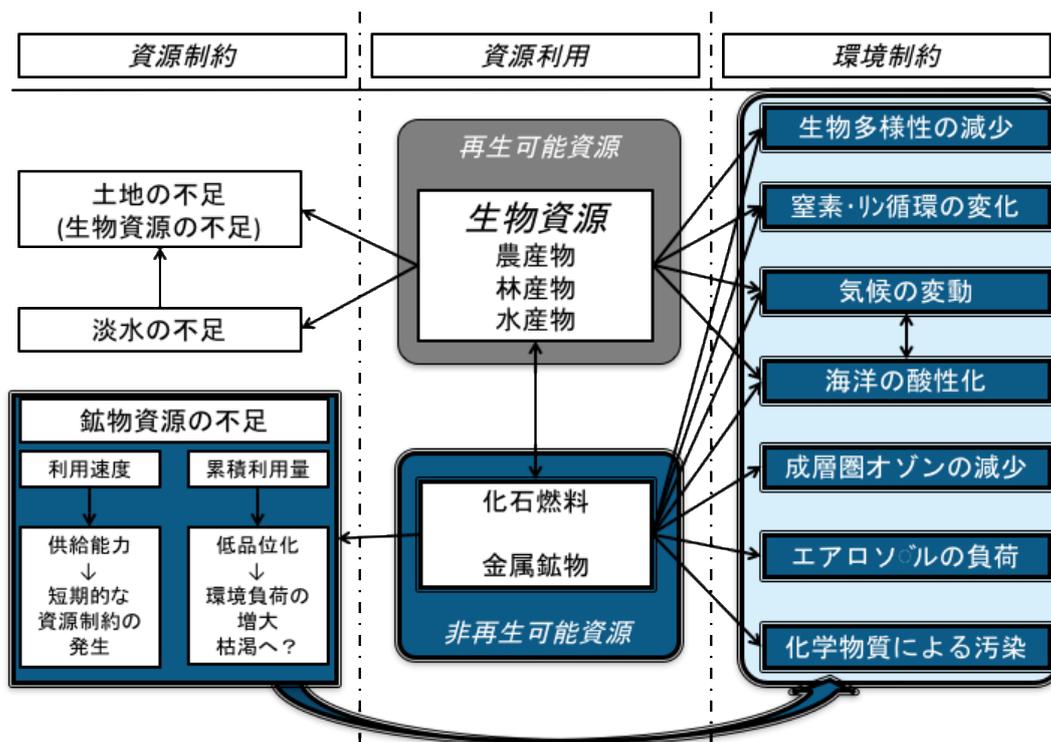
元に、1189 の未開発鉱床のデータを得た。この他に、データベースには含まれるがデータが不完全なものについては、同一地域内の鉱床を参考に保管するなどしてデータを用意している。

また生産中の鉱山についてのデータはSNLのAnnual Production Summaryで入手したものを使用している。

4. 結果及び考察

(1) 要検討鉱種の同定方法の確認、及び同定

要検討鉱種の同定にあたり、プラネタリーバウンダリーの中で言及されている環境制約について改めて検討したところ、サブテーマ(4)が検討するエネルギー資源消費、並びに鉱物資源消費に関連するものは次の7つであることを改めて確認した。すなわち、生物多様性の減少、窒素・リン循環の変化、気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの減少、エアロゾルの負荷、化学物質による汚染である。土地と淡水に関する問題についても全く無関係ではないが、そのインパクトの大きさを鑑み今回は検討の枠組みから外した。



図(4)-3 資源種とプラネタリーバウンダリーの関係 (サブテーマ(4)は非再生可能資源を担当)

そのそれぞれと資源消費の間を既存文献等の情報を整理したところ、一部LCAのインベントリ・インパクトデータとして整備されているものが散見されるものの、その多くは集約されたバックグラウンドデータとしての利用を想定しており、1つの代表的な係数などであることが多い。また、最終的な製品利用による環境負荷、並びにこれによる環境影響については多くのデータが存在するものの、資源採取現場における環境負荷については、公表データは余り多くないこと、さらに生物多様性の減少や、化学物質による汚染など、比較的ローカルな環境影響が大きく懸念されて

いることが改めて明らかになった。

また、資源制約そのもの、すなわち資源供給制約に関しては、おおよそ全ての枯渇性資源についてデータが入手可能であるものは「埋蔵量」であり、「資源量」ではない。埋蔵量とは、現時点での技術・経済環境下で資源として採掘可能である、すなわち利益を生むことの出来る量であり、またその存在がある程度の確度をもって保証されるものである。よって、まだ見つけられていない資源、もしくは価格の高騰などに依存して新たに埋蔵量として勘定されうるものなどについてはまったく分からない。そこで、「探査」とその結果得られる「埋蔵量の増分」については某かの仮定を置いたモデル化が必須である。これらについては、供給側のモデル化においても改めて分析することが必要ではある。

この検討段階においては、資源供給制約については次のような点に気をつけて評価を行った。まずどの程度新規に埋蔵量が増えているか、すなわち資源量から埋蔵量への移行がどの程度起きているかである。資源量の情報自体も収集に努めはしたが、ベースメタル以外の資源量情報は非常に不確実な情報であることから、このような情報を基本とした。その上で、生産量に対してどの程度の埋蔵量を持つか、いわゆるR/P (Reserve / Production: 静的耐用年数)を合わせて検討した。これは言うまでもなく、実際に現在持つ埋蔵量の規模の評価のためのものである。

結果としては、ベースメタルでは銅、貴金属では白金とパラジウム、場合によっては金、その他レアメタルについては、いわゆるエネルギークリティカルメタルの代表格でもあるレアアース、インジウム等が要検討鉱種であることが明らかになった。例えば温暖化のみを考える場合、その生産プロセスのCO₂排出量から、鉄も要検討となる。しかしながら、資源供給制約において、その重要度が下がることから、今回の検討鉱種からは外すこととした。

要検討鉱種の同定結果を受け、需給の検討に際しては、銅を中心にその他のエネルギークリティカルメタルを検討することとした。

(2) 要検討鉱種に関するSDGs達成のための将来の需要推定

先行事例的なケーススタディーとして、電力供給とこれに必要なインフラ向け鉱物資源需要を検討することとした。ここでは銅に関する結果を以下に示す。

これまで、銅に代表されるベースメタルの需要は様々な手法を用いて検討され、予測されてきたが、送電線、配電線などに特化した推計はほぼ見当たらない。発電設備については電源構成のシナリオ等から推計することとし、送・配電線の需要を検討することとした。1人あたり送電線回線延長を、1人あたり電力消費量(表(4)-1中のConsumption)、1人あたり国土面積(Area)、1人あたりGDP(GDP)を用いて重回帰した結果を以下の表(4)-1に示す。

表(4)-1 送電線回線延長の重回帰分析結果

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.2751	0.0692	3.975	0.00027	***
Consumption	0.0301	0.0089	3.392	0.00150	**
Area	0.0323	0.0090	3.599	0.00082	***
GDP	0.0035	0.0025	1.435	0.15854	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3035 on 43 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7033, Adjusted R-squared: 0.6826

F-statistic: 33.97 on 3 and 43 DF, p-value: 2.039e-11

表から分かるように、1人あたりGDPは説明変数として有意ではない。また、そもそも電力消費量とGDPの間にはそれほど強い相関はない。これは、経済成長の比較的早い段階で電力消費量が伸びるために、ある一定水準以上の1人あたりGDPレベルに到達すると電力消費量との相関が見えにくくなることによるものと考えられる。この分析から分かることは、銅需要の少なからぬ部分を占める電力インフラ向け需要について、これまで良く行われてきたような1人あたりGDP等を代理変数とした経済成長との間の相関だけで推計を行うことは極めて危険だということである。

このような推計を、配電線、発電設備などに対して行った上で、方法の項に示したシステムダイナミクスモデルを用い、銅需給バランスについて検討を行った。具体的に推計に用いたモデルの概略をパラメータの値等を含めて以下に示す。

まず電力需要は次のような形で必要な発電容量へ変換される。

$$electricityDemand_{r,i} = ElectricityDemandPerCapita_{r,i} \times Population_{r,i}$$

$$totalGeneration_{r,i,g} = \frac{electricityDemand_{r,i,g}}{(1 - TransmissionLoss_{r,i})}$$

$$generation_{r,i,g} = GenerationMix_{r,i,g} \times totalGeneration_{r,i,g}$$

ただし、*Population*: 人口

こうして必要な発電容量が得られたのち、次に必要なグリッド設備の推定は以下のように進めた。

$$generatorCapacity_{r,i,g} = \frac{generation_{r,i,g}}{OperationRate_{i,g}} \times \frac{1}{24[h/day] \times 365[day/year]}$$

$$totalGeneratorCapacityPerCapita_{r,i} = \frac{\sum_g generatorCapacity_{r,i,g}}{Population_{r,i}}$$

さらにこれを送電線、二次系統、配電線の量へと細分化していく。

$$\begin{aligned} \text{transmissionLengthPerCapita}_{r,i} &= 0.1913 + 0.2547 \times \text{totalGeneratorCapacityPerCapita}_{r,i} + 0.0227 \times \text{AreaPerCapita}_{r,i} \\ &\quad + (-0.0029) \times \text{GDPPerCapita}_{r,i} \end{aligned}$$

$$\text{transmissionLength}_{r,i} = \text{transmissionLengthPerCapita}_{r,i} \times \text{Population}_{r,i}$$

$$\text{subtransmissionLengthPerCapita}_{r,i} = -0.0088 + 2.2091 \times \text{transmissionLengthPerCapita}_{r,i}$$

$$\text{subTransmissionLength}_{r,i} = \text{subTransmissionLengthPerCapita}_{r,i} \times \text{Population}_{r,i}$$

$$\text{distributionLengthPerCapita}_{r,i} = 8.004 \times \ln(1.725 \times \text{totalGeneratorCapacityPerCapita}_{r,i} + 1)$$

$$\text{distributionLength}_{r,i} = \text{distributionLengthPerCapita}_{r,i} \times \text{Population}_{r,i}$$

ここまでで必要な設備量、すなわちストックの量を得ることができた。次にこの値を実際の鉱物資源量へ変換する、すなわちストックからフローへの変換作業を行う。ここでは設備の寿命にワイブル分布関数を用いることとし、以下のように進めた。必要なパラメータは既存文献等から収集している。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$G(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$remainedRatio(t) = \frac{G(t+1)}{G(t)} \quad (0 \leq t \leq T)$$

$$initialCapacityRatio(age) = \frac{G(age)}{\sum_{t=1}^T G(t)}$$

ただし、
F: 故障発生確率
t: 設備使用期間
T: 設備試用期間上限値
η: 尺度係数 (Scale parameter)
β: 形状係数 (Shape parameter)
G: 残存確率

remainedRatio: 残存係数

initialCapacityRatio: 初期設備量の設備比率

$$capacity_{r,i+1,age+1} = capacity_{r,i,age} \times remainedRatio(age)$$

$$newConstruction_{r,i} = totalCapacityDemand_{r,i+1} - \sum_{age} capacity_{r,i+1,age}$$

$$capacity_{r,i+1,age=0} = newConstruction_{r,i}$$

ただし、
capacity: 設備量 (発電設備、送配電設備) [MW], [km]
totalCapacityDemand: 設備量需要 [MW], [km]
newConstruction: 新規設備建設量 [MW], [km]

ここまでで設備量としてのフロー量、すなわち新規設備建設量が求められたことから、これを鉱物資源量へ以下の様に変換する。

$$mineralDemand_{r,i,m} = newConstruction_{r,i} \times MineralComposition_m$$

mineralDemand: 設備への鉱物投入量 [kg]

MineralComposition: 鉱物投入原単位 [kg/kW], [kg/m]

これが総鉱物需要ということになるが、次に二次資源分と一次資源分を分けねばならない。そこでまず加工スクラップ発生量及び実際の投入量を推定する。

$$newScrap_{r,i,m} = \frac{mineralDemand_{r,i,m}}{1 - YieldRate_m}$$

$$replacedCapacity_{r,i} = \sum_{age} capacity_{r,i,age} \times (1 - remainedRatio(age))$$

$$oldScrap_{r,i,m} = replacedCapacity_{r,i} \times MineralComposition_m$$

ただし、
newScrap: 加工スクラップ量 [kg]
YieldRate: 歩留り
oldScrap: 総老廃スクラップ量 [kg]
replacedCapacity: 更新対象設備量 [MW], [km]
 $reinputNewScrap_{r,i+lag,m} = newScrap_{r,i,m} \times newScrapRecoverRatio_{r,i,m}$
 ただし、*reinputNewScrap*: 加工スクラップの再投入量 [kg]
lag: 再投入までのリードタイム [year]
newScrapRecoverRatio: 回収可能な加工スクラップの割合

次に老廃スクラップについては次の様に算出する。

$$recyclableOldScrap_{r,i+lag,m} = oldScrap_{r,i,m} \times RecyclableRatio_{r,i,m}$$

$$reinputOldScrap_{r,i,m} = recyclableOldScrap_{r,i,m} \times OldScrapRecoverRatio_{r,i,m}$$

ただし、*recyclableOldScrap*: リサイクル可能な老廃スクラップ量 [kg]
RecyclableRatio: リサイクル可能な老廃スクラップの割合
reinputOldScrap: 老廃スクラップの再投入量 [kg]
OldScrapRecoverRatio: 回収可能な老廃スクラップの割合

これらの合計が、二次資源の合計投入量である。

$$\begin{aligned} secondaryMinralInput_{r,i,m} \\ = reinputOldScrap_{r,i,m} + reinputNewScrap_{r,i,m} + ScrapFromOthers_{r,i,m} \\ + NetImport_{r,i,m} \end{aligned}$$

secondaryMineralInput: 二次資源投入量 [kg]
ScrapFromOthers: 他部門で発生する老廃スクラップ量 [kg]
NetImport: 老廃スクラップの正味輸入量 [kg]

ここから最終的に一次資源の投入量を得る。

if $mineralDemand_{r,i,m} > secondaryMineralInput_{r,i,m}$
 $primaryMineralInput_{r,i,m} = mineralDemand_{r,i,m} - secondaryMineralInput_{r,i,m}$
 otherwise,

$$primaryMineralInput_{r,i,m} = 0$$

primaryMineralInput: 一次資源投入量（純分） [kg]

なおこれまでの式中に現れる添え字は以下の通りである。

<i>r</i> : 地域	<i>i</i> : 時点	<i>m</i> : 鉱物種
<i>g</i> : 電源種	<i>age</i> : 設備年齢	

こうして得られた需要推定結果を図(4)-4、図(4)-5、図(4)-6示す。

図(4)-4が電力消費量のシナリオである。BAUシナリオをWorld Energy CouncilのBAUシナリオにもとづき設定している。その上で、途上国・新興国におけるグリッドアクセス率がSDGsにおける大きな達成目標になることから、1人あたり電力消費量が先進国並みのレベルに到達する時点を2030, 2060, 2100の3通り設定した結果をあわせて示している。

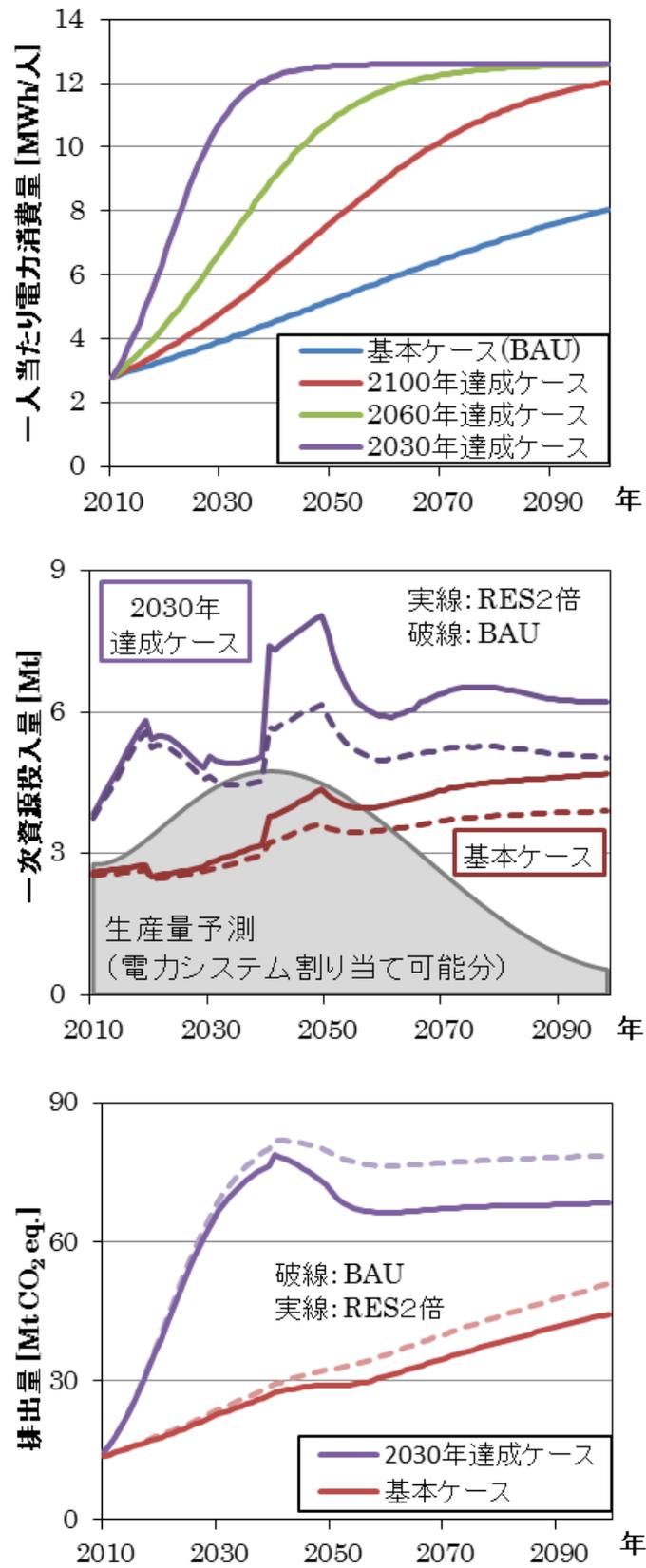
結果については違いを分かりやすく示すためにBAUシナリオと2030年達成シナリオというやや極端なシナリオの結果を示す。更に図中にRES2倍と示しているものについては、太陽光及び風力発電の需要の比率をBAUで用いた比率の2倍とした結果である。

まず図(4)-5に銅の電力システム向け天然資源投入(需要)量を示す。なお図中に灰色に示した部分はこれまでの需要構成比率から、この部門に対して投入することが可能だと考えられる天然資源量を比較のために示した。その結果から分かるように、BaUケースにおいても、2060年頃には資源不足が顕在化することが分かる。これが2030年達成ケースであれば、シミュレーション開始時点から既に不足しておりこれは余り現実的なものではない。シミュレーションのシナリオとして現実的ではないにもかかわらずここに掲げている理由は2030年前後に見られる需要のピークにある。余りに早いグリッド整備を目指した結果、スクラップ発生が需要の伸びに追いつかず、天然資源を大量に投入する必要に迫られていることが分かる。逆にピーク過ぎに1度需要が減少する理由は、一気に投入された送・配電線等が寿命を迎え交換時期に入るために、一気にスクラップが発生・投入された結果である。

もう一点、RES2倍シナリオについて見ると、直接銅消費の増加に結びつく理由のあまりない電源種の変更が銅需要の増加につながってしまっていることが分かる。これは、出力が不安定な電源に対する需要を増加した結果、最大出力が大きめな発電設備を準備せざるをえず、その結果その最大出力に対応可能な送・配電線の設置が必要になったためと考えられる。この変化は決して小さなものではないことが分かる。

その上で、電力由来の温室効果ガス排出量(図(4)-6)を見ると、2030年達成ケースでの大きな増加が分かると共にRES2倍シナリオでシミュレーション初期段階においてそれほど削減されないことも見て取れる。後者については、2倍としても元々の構成比率が少ないため、これが大きな値となる2040年頃になると排出量削減につながる事が分かる。

このように、電力エネルギーのシナリオ設定が銅需要に大きな影響を与えることが分かる。特に急速なグリッド整備は、リサイクルによる供給可能量を大きく超えるために、天然資源需要に与える影響は非常に大きい。逆に電力インフラ向けの電線に関しては、多くの国で良く管理されており、既に非常に高いリサイクル率を持っていることも今回のモデル整備のためのデータ整理から明らかになっている。これはこの種の電線が素材構成等を含め明らかであり、リサイクルしやすいことも貢献している。いずれにせよ、この部門に関してリサイクルにより資源効率を向上させることは余り期待できず、むしろこれからインフラ整備の進む新興国において、先進国同様のリサイクルシステムを整備することが肝要である。



図(4)-4：電力消費量シナリオ(上)、図(4)-5：銅一次資源投入量(中)
 図(4)-6：温室効果ガス排出量(下)の予測結果

銅以外の検討として、化合物系太陽光発電に（より具体的にはCIGS太陽電池）に用いられるインジウムの需要推計を試みた。BaUケースにおける結果のみ示すが、今回のシナリオにおいては、2040年から2050年にかけて、急激に太陽光発電設備の導入が進むことになっている。その結果、2040年頃には1000トン程度であったインジウムの需要はその後10年間で5000トン程度まで拡大する可能性が示唆された。そもそも、インジウムの生産・利用過程においてはその加工歩止まりの悪さがよく知られており、こうした急激な需要変動はインジウムの需給に大きなインパクトを与える可能性がある。

これは、これまででもタンタル、インジウム（ただし液晶ディスプレイ等向け）、希土類磁石などのいわゆるレアメタルブームの中で我々が体験してきた現象でもあるが、急激な需要増に供給サイドが対応できない、また老廃スクラップ経由のリサイクル原料の供給は当然ながら時差があるため全く間に合わないといった状況を引き起こす。こうした場合には、価格が高騰するといった形での供給障害が顕在化することが多い。ただし希土類磁石のケースのように、あまりに寡占的な市場環境にある場合には、物理的な供給不足が懸念される場合も多い。ただし、希土類での供給障害が起きた際、磁石向けの素材については多くの製造業者はかなり多めに保有していた在庫であまり問題を顕在化させずに済んでいる。より正確には、価格高騰の影響は受けているが、物理的な不足は経験していない。また、その際に、磁石向け以外の希土類元素が物理的な供給不足を経験するレベルまで問題が顕在化した。我が国の関連業界は行政の強いイニシアティブの下で、使用量の削減（いわゆる利用強度の改善）や代替を進め問題を乗り切った実績もある。

仮にこうした問題がベースメタルで顕在化した場合は、レアアースの際のような対応は難しいが、このような短期的な劇的な問題の顕在化はそもそもの量の少ないレアメタル特有の現象であるとも言え、ベースメタルで心配すべき現象ではおそくない。にもかかわらず対応の難しさを考えれば、レアメタルよりもベースメタルを中心に検討を進めるべきであるとの結論に至り、次節の一般化された供給サイドのシミュレーションとその結果の検討においてはどうのみを検討対象とすることにした。

（3）要検討鉱種に関する供給サイドのモデル化

前項の検討を踏まえ、供給サイドのモデル化を行う。更に需要のシナリオを与えることで改めて需給のバランスからどのような社会像が与えられたときには、資源の供給障害が発生するのかについて検討を行う。但しここで言う供給障害とは、短期的なインシデント、すなわち事故やストライキなどは含まず、純粋に供給能力が不足することを示す。

具体的には需要を外生的に与えつつも、二次資源は内生的に発生させ、かつ鉱山業の特徴を踏まえた供給モデルを構築し、再度需給バランスの検討を行った。ここで鉱山業の特徴としているものは、1) 仮に既知であるとしても実際に採鉱の対象となるためには探査が必要であること、2) さらに開発に着手したとしても新規鉱山の開発にはリードタイムが必要であること、3) 多くの供給モデルが国を1つの主体として扱っているが、実際には鉱山ごとにその地質条件等に起因し採算も異なるために、その意志決定も異なること、の3点を踏まえ、検討を行っている。また、このモデルに対しては、非常に簡易に、1人あたりGDPと人口、そして資源の利用強度に依存する形での需要を外生的に与えている。これは将来的に持続可能な供給を達成するための利用強度を求めるため

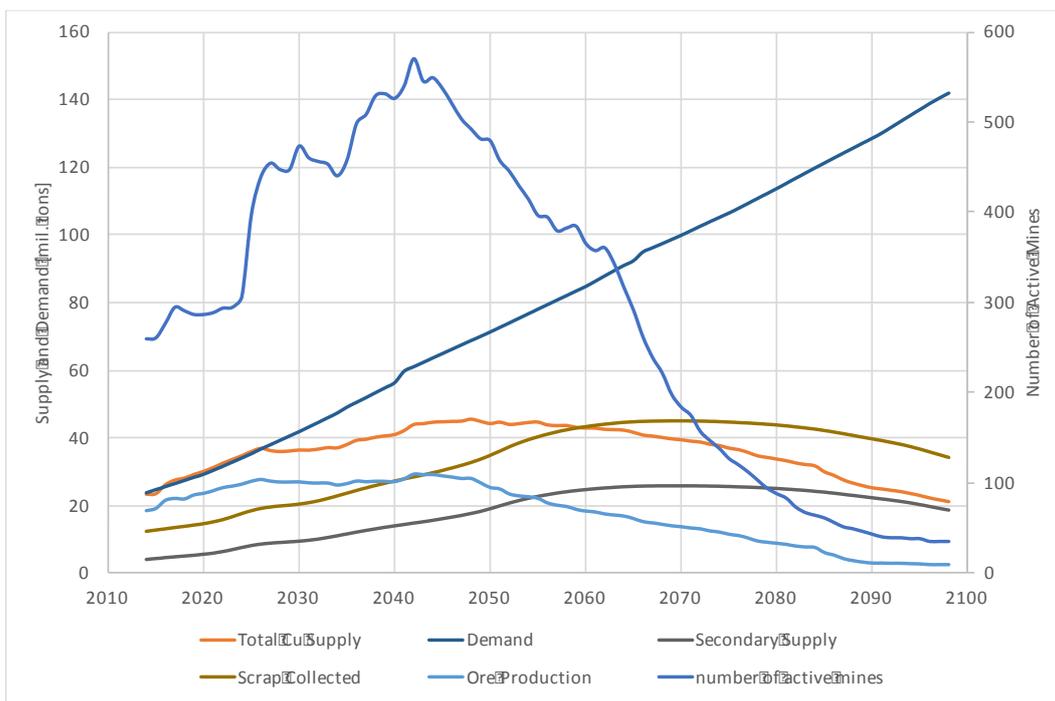
のモデル構造でもある。

基準ケースの需給バランスを図(4)-7に示す。総需要に対する供給量はまったく追いついておらず、2020年代の後半には供給不足となる。ただし、ここでは発生したスクラップに対する回収率（実際に利用された二次資源量／発生したスクラップ）を一定としているためにやや厳しめの結果ではある。但し、より重要な示唆は天然資源側にある。二次資源側が比較的厳しい供給制約を置いているため、天然資源側には非常に大きな需要がある。にも関わらずその生産量は2020年頃には頭打ちとなり、2040年代には低下を始める。Peak Oilの議論¹¹⁾にならったPeak Copperという議論¹²⁾が昨今見られるようになってきているが、今回のシミュレーションにおいてもほぼ全てのシナリオにおいて、何らかの形のピークは顕在化している。

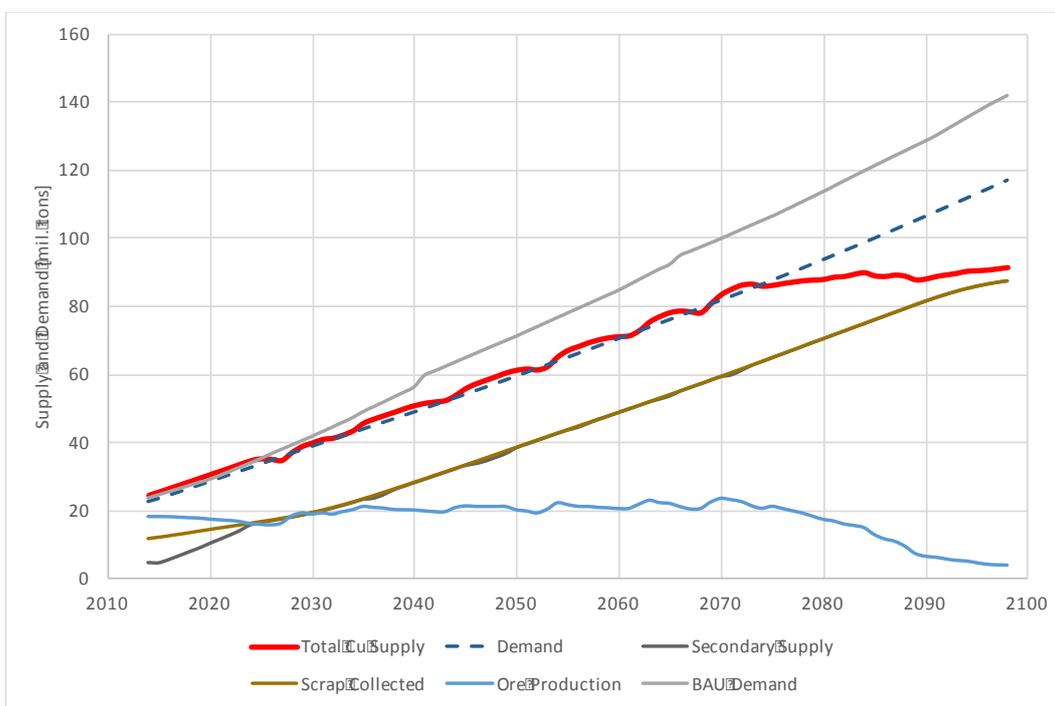
次に、供給不足を遅らせるべく、需要がやや小さく、またスクラップに対する回収率の高いシナリオを用意した結果を図(4)-8に示す。この場合、2070年頃までは供給不足に陥らずにすむことが分かる。このシナリオでは、発生したスクラップの回収率は急激に上昇し、先ほど供給不足が起きた2025年頃にはほぼ全量リサイクルするような仮定を置いているが、にも関わらず2070年頃には供給不足になる。

このように極端にリサイクル率が向上した場合に何が起こるのかを、天然資源側の供給について見ると、実際には年間生産量が極端に下がるわけではなく、やや少なめの数字のままこれを維持し続け、ちょうど供給不足が生じる2070年頃に始めて生産量が低下することが分かる。モデル内部の変数の推移を観察すると、これはシミュレーション期間の早い段階でかなりの二次資源が供給されるために、鉱山業界は余裕を持って探査を行い、その後の供給に備えていることが分かった。実際に2つのシナリオにおいて2100年までに生産される天然資源の量は実は変わらず、ほぼ同量の銅を掘り尽くしており、異なっているのは生産量の異時点間の配分のみであることが分かる。

ここまでの需給双方の検討から言えることは、我々が鉱物資源をより持続可能な形で利用していくためには、天然資源側の供給に過度なプレッシャーとまらない程度の需要規模に需要を抑えることが重要であることが分かる。ただしこれは社会としての資源需要から、二次資源による供給を差し引いた天然資源に対する需要という意味である。非再生可能資源である以上、天然資源の供給はいつか頭を打つものと考えられるが、代替資源や非在来型の資源が現れる前に、供給を途絶させないためにもこうした視点は必要不可欠であり、そのためにどの程度のレベルの資源利用効率の向上が必要になるかをこれからも検討する必要がある。



図(4)-7 基準ケースの需給バランス



図(4)-8 低資源利用強度、リサイクル促進ケース

(4) 検討のまとめ

まず要検討鉱種の同定にあたり、プラネタリーバウンダリーの中で言及されている環境制約について改めて検討したところ、サブテーマ(4)が検討するエネルギー資源消費、並びに鉱物資源消費に関連するものは次の7つであることを改めて確認した。すなわち、生物多様性の減少、窒素・リン循環の変化、気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの減少、エアロゾルの負荷、化学物質による汚染である。土地と淡水に関する問題についても全く無関係ではないが、そのインパクトの大きさを鑑み今回は検討の枠組みから外した。

また、資源制約そのもの、すなわち資源供給制約に関しては、おおよそ全ての枯渇性資源についてデータが入手可能であるものは「埋蔵量」であり、「資源量」ではない。他方で検討しなければならないものは資源量と生産量の関係である。

これらを踏まえ、結果としては、ベースメタルでは銅、貴金属では白金とパラジウム、場合によっては金、その他レアメタルについては、いわゆるエネルギークリティカルメタルの代表格でもあるレアアース、インジウム等が要検討鉱種であることが明らかになった。例えば温暖化のみを考える場合、その生産プロセスのCO₂排出量から、鉄も要検討となる。しかしながら、資源供給制約において、その重要度が下がることから、今回の検討鉱種からは外すこととした。

要検討鉱種の同定結果を受け、需給の検討に際しては、銅を中心にその他のエネルギークリティカルメタルを検討することとした。

次に具体的な需要の検討事例として、SDGsの一つの重要な要素である、エネルギーアクセスに関する目標をシナリオとして設定し、その実現のために必要となる鉱物需要の推定を行った。その結果は、おそらくかなりの確率で供給不足が顕在化するであろうというものであるが、特に二次資源供給に関する示唆は非常に重要ものであるため、再度整理しておく。余りに急激なエネルギーインフラの構築は、急激な銅需要の増加を引き起こす。スクラップ等の二次資源は、基本的には投入された資源がその製品寿命を終え社会に現れるものであり、急激な需要の増加の際にはその増分はほぼ天然資源で賄われることになる。よって、投入原料中の二次資源比率は低下し、想像以上の資源供給上の問題を引き起こすことが予想される。

現時点で予想されている銅の供給サイドのシナリオを踏まえれば、かなり極端にリサイクルが進まない限り2060-70頃には絶対的な供給不足に陥る。これをリサイクルで補うなら現在30%程度のリサイクル率を2100年までに90%までに、利用技術の資源効率で改善するなら2.5倍にあげる必要がある。

最後にこうした状況を踏まえ、より一般化された形ではあるが、銅に関する需給全体のシミュレーションを通してどのような社会シナリオ下でならば、こうした問題が避けられるのかを改めて検討した。これらから得られる本検討の最終的な結論は以下の通りである。

我々が鉱物資源をより持続可能な形で利用していくためには、天然資源側の供給に過度なプレッシャーとならない程度の規模に需要を抑えることが重要であることが分かる。ただしこれは社会としての資源需要から、二次資源による供給を差し引いた天然資源に対する需要という意味である。非再生可能資源である以上、天然資源の供給はいつか頭を打つものと考えられるが、代替資源や非在来型の資源が現れる前に、供給を途絶させないためにもこうした視点は必要不可欠であり、そのためにどの程度のレベルの資源利用効率の向上が必要になるかをこれからも検討する必要がある。

また、サブテーマ(4)が検討した鉱物資源からの持続可能な発展に対する制約という意味において、クリティカルになるだろう鉱物資源はベースメタルであってレアメタルではないというのが本検討の結論でもある。エネルギーを中心に検討したこともあり、今回は銅を中心に見てきた。ここ10年程度レアメタルが注目を集めるケースが非常に多かったが、その問題の多くは短期的な現象であり、超短期的には在庫や備蓄を通して、さらに利用強度の改善や代替を通して乗り越えてきた実績もある。他方で、今回の結果が示唆しているPeak Copperのような問題は、早めにこれを予見しかなりの規模での対応を考えない限りは乗り越えることが難しい問題でもある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

鉱物資源について、これまでに類を見ないような形での需給モデルを構築した。具体的には個別の鉱山について、特に今後新規開発されるようなものも含め、独自に意志決定をし、生産を行うようなボトムアップ的なアプローチによる供給サイドのモデル化を行うと共に、内生的にリサイクルについても検討をした。古くからあるシステムダイナミクスによるアプローチと、ボトムアップ的なシミュレーション手法、さらにはマテリアルフロー分析等からの知見の融合をなしたという点においてサブテーマ(4)が構築した供給モデルは大きな意味を持つ。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

需給の検討の中で、現時点で予想されている銅の供給サイドのシナリオを踏まえれば、かなり極端にリサイクルが進まない限り2060-70頃には絶対的な供給不足に陥る。これをリサイクルで補うなら現在30%程度のリサイクル率を2100年までに90%までに、利用技術の資源効率で改善するなら2.5倍に上げる必要があるなど、銅に関して定量的な資源効率向上の達成目標を示したこと。ただし、当然ながら仮定のある目標数字であるため、その理解は慎重にする必要がある。

また、持続可能な発展に対する制約条件となるかどうかという観点から言えば、銅が非常にクリティカルであることを示したことも重要な成果と言える。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) S. MURAKAMI, T. KAWAMOTO, A. MASUDA, and I. DAIGO: Global Environmental Research, 19, 2, 181–186 (2015), Metal Demand to Meet SDG Energy-related Goals.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) T. KAWAMOTO, S. MURAKAMI and J. YAMATOMI: Ecobalance 2014, Tsukuba, Japan, 2014
“System dynamics model for sustainability assessment of mineral resource consumption considering both environmental and resource constraints.”
- 2) 進藤暁俊, 村上進亮: 資源・素材2014, 熊本大学 (2014)
「銅のサプライチェーンに対するリスク分析」
- 3) S. MURAKAMI, T. TAKASU, A. MASUDA, E. YAMASUE, and T. ADACHI: SDIMI (Sustainable Development in the Minerals Industry) University of British Columbia, 2015
“Environmental Impact Indicators and Mining Method.”
- 4) 青木渉一郎, 村上進亮: 資源・素材2015 (松山), 9月8~10日, 愛媛大学 (2015)
「鉄スクラップの国際需給構造に関する研究」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 村上進亮, 小松孝裕: エネルギー・資源、35, 2, 43-47 (2014), クリティカルメタルとレアメタル
- 2) T.E. Graedel, R. Barr, C. Chandler, T. Chase, J. Choi, L. Christoffersen, E. Friedlander, C. Henly, C. Jun, N.T. Nassar, D. Schechner, S. Warren, M.Y. Yang, C. Zhu: Environmental Science and Technology, 46, 2, 1063-1070 (2012), Methodology of metal criticality determination.
- 3) 橋本征二, 村上進亮: エネルギー・資源、34, 5, (2013), 291-295, 温暖化対策技術とクリティカルメタル
- 4) United States Department Of Energy (DOE): Critical materials strategy, (2010), http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- 5) P. Andrews-Speed, R. Bleischwitz, T. Boersma, C. Johnson, G. Kemp, S.D. Vandever: The global resource nexus: The struggles for land, energy, food, water, and minerals. (2012).
- 6) G.M. Mudd: Ore Geology Reviews, 38, 1-2, 9-26. (2010), Global Trends and Environmental Issues in Nickel Mining: Sulfides Versus Laterites.
- 7) SNL Metal & Mining, <http://www.snl.com/Sectors/metalsmining/Default.aspx>
- 8) USGS (U.S. Geological Survey): Volcanogenic massive sulfide deposits of the world; database and grade and tonnage models, Open-File Report 2009-1034 <http://pubs.usgs.gov/of/2009/1034/>
- 9) USGS (U.S. Geological Survey): Porphyry copper deposits of the world - Database and grade and tonnage models, USGS Open-File Report 2008-1155,

<http://pubs.usgs.gov/of/2008/1155/>

- 10) USGS (U.S. Geological Survey): Sediment-hosted copper deposits of the world: Deposit models and database, USGS Open-File Report 03-107,
<http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-107/>
- 11) M. King Hubbert: Nuclear Energy and the Fossil Fuels 'Drilling and Production Practice' Spring Meeting of the Southern District. Division of Production. American Petroleum Institute. San Antonio, Texas: Shell Development Company, 22-27 (1956)
- 12) R. A. Kerr: Science, 343, 6172, 722-724 (2014), The Coming Copper Peak.

SDGs in terms of planetary well-being

Principal Investigator: Shunsuke MANAGI

Institution: Departments of Urban and Environmental Engineering
Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 JAPAN
Tel: +81-92-802-3401 / Fax: +81-92-802-3401
E-mail: managi@doc.kyushu-u.ac.jp

Cooperated by: Ritsumeikan University, The University of Tokyo, Sophia University, Kansai University, Japan Women's University, Osaka University

[Abstract]

Key Words: Inclusive Wealth, Resource Availability, Happiness study, Biological Resources, Mineral Resources

This study examined the economic impacts in relation to resource and environmental constraints, and indicates the targets, such as the POST-2015 and the SDGs. Subtheme (1) built the database by using multiple imputation method and estimated the abatement costs of emissions and shadow prices of natural capitals, such as minerals, in every countries or regions by applying the database. This study mentioned the impacts of social economics in the case that the targets are achieved, and showed the importance of the international frameworks by considering economic conditions and resource holdings by country.

Subtheme (2) highlighted citizen's needs and interests among four countries (Japan, Thailand, US, Indonesia) among key MDGs/SDGs under discussions at the international level. The study was designed to compare the priorities among citizen upon twenty-five social areas such as the environment, employment, health and safety as well as more specific issues in one particular area of sustainability. The results of the study indicated that the issues of higher priorities are very different among citizens in four countries and it is necessary, therefore, to consider them in the national implementations of SDGs for 2030.

Relationships between biomass resource use and four planetary boundaries (change in land use, biodiversity loss, phosphorous cycle, and global freshwater use) were quantitatively analyzed and potential approaches to sustainable biomass resource use were discussed in subtheme (3). Results show that the first three of the planetary boundaries will not be met because of increased demand for food and bio fuels in this century. However, combination of measures including halving food waste, 40% reduction of meat diet, and increased yields with current trend can make change in land use within the planetary boundary. Also, biodiversity loss can be reduced through the development of agricultural

land in the counties and regions with large area of forests.

In subtheme (4), the impact of mineral resource availability onto the achievement of SDGs was analyzed. Firstly, we identified the critical minerals for our achievement of SDGs. In short, copper, PGMs, gold, and other minor energy critical metals such as REEs, or indium are chosen as critical therefore need further analysis. Then, we set the scenarios for sustainable energy access and estimate the demand for minerals. Then, we developed supply-side model. In short, in most scenarios, we will experience significant shortage of copper, unless significant increase of recycling ratio or reduction of resource use intensity will be achieved.