

論 文

システム・ダイナミックスモデルを用いた 超長期の日本経済将来展望*

野村 裕、権田 直、山本 耀大、高橋 千里**

<要旨>

本稿は、人口変動、地球温暖化など、地球規模で経済社会に大きな影響を及ぼす可能性のある変数の変動が日本の経済社会に及ぼす影響について、2100 年頃までの期間における変化の程度として、システム・ダイナミックスモデルを用いて定量的に分析、考察を試みた結果の報告である。

本試算の特徴は、変数の変動について、一様にランダムに連続的に数万通り程度を生成させることで、将来に生じ得る変動をできるだけ機械的で大量なものとしたことである。あり得る将来像ができるだけ幅広く描かれるモデルとすることによって、試算結果の検討、考察も幅広いものとして、できるだけ多くの可能性のある必要な政策対応を見出したいと考えたことによる。

試算の結果、日本の総人口は、現在の 1 億 2 千万人に対して、2100 年頃には、最大で 1 億 3 千万人程度から最小で 4 千万人程度となった。GDP は、現在の 4.4 兆ドルに対して、2100 年には、最大で 20 兆ドル程度から最小で 3.0 兆ドル程度となった。ウェルビーイングは、現在を 1 とした場合に、2100 年には、最大で 4.0 程度から最小で 0.2 程度となった。人口変動においては、総人口と一人当たり GDP に対して、特に、若年層への所得分配と、外国人の受け入れが、出力結果を特徴付ける変数として重要であることが示唆された。地球温暖化においては、排出源毎の CO2 量と炭素回収量に対して、特に、できるだけ早期の再生可能エネルギーの拡大と、資材等の国産化が重要であることが示唆された。

JEL Classification Code: E27, F6, J110

Keywords: システム・ダイナミックスモデル、シミュレーション分析、政策分析

* 本稿は筆者らが属する内閣府経済社会総合研究所（ESRI）の将来展望の手法に関する研究ユニットによる成果の一環である。第 87 回 ESRI 政策フォーラム「システム・ダイナミックス×AI を用いた将来展望」（令和 6 年 11 月 8 日）において、座長を務めていただいた広井良典教授（京都大学）、パネリストを務めていただいた甲斐沼美紀子研究顧問（公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES））、是川夕部長（国立社会保障・人口問題研究所 国際関係部）、高橋裕教授（専修大学）に感謝申し上げる。なお、本稿に示された見方・考えは筆者個人に属するものであり、内閣府経済社会総合研究所の見解を示すものではない。

** 野村 裕：内閣府経済社会総合研究所長、権田 直：外務省経済協力開発機構日本政府代表部参事官、山本 耀大：内閣府経済社会総合研究所特別研究員、前内閣府政策統括官（経済財政運営担当）付参事官（国際経済担当）係長、高橋 千里：内閣府経済社会総合研究所特別研究員、内閣府政策統括官（経済財政運営担当）付参事官（経済対策・金融担当）付。

Development of a System Dynamics Model for Japan's Long-term Economic and Social Outlook

By Hiroshi NOMURA, Tadashi GONDA, Yota YAMAMOTO and Senri TAKAHASHI

Abstract

This paper reports the results of a quantitative analysis using a system dynamics model to assess the potential impact of factors such as demographic changes, global warming on Japan's economy and society, projecting trends up to around 2100.

A key feature of the analysis is that it provides simulations based on changes in tens of thousands of variables. The estimations suggest that Japan's total population around 2100 will range from a maximum of about 130 million to a minimum of about 40 million, compared to a current population of 120 million. Meanwhile, Japan's GDP will range from a maximum of about \$20 trillion to a minimum of \$3.0 trillion, compared to the current \$4.4 trillion. Further, setting Japan's current level of well-being to 1, the level in 2100 will range from a maximum of about 4.0 to a minimum of about 0.2.

The analysis suggests that the distribution of income to younger generations and immigration policies would have a particularly substantial impact on demographic trends. Further, early expansion of renewable energies and domestic production of materials would have a particularly notable impact on progress in decarbonization efforts.

JEL Classification Codes: E27, F6, J110

Keywords: system dynamics, simulation analysis, policy analysis

1. 概説

1.1 はじめに

本稿は、地球規模で経済社会に大きな影響を及ぼす可能性のある変数 - 人口変動、格差、地球温暖化、AI・テクノロジー、感染症など - が将来的に様々な変動を起こした場合に、どの程度の影響が日本の経済社会に生じ得るかについて、幅を持ちながらも定量的に分析、考察を行うための材料を供するための超長期のモデル開発及び試算結果の報告である。

近年、主要国や国際機関等において、地球規模の課題の影響や政策対応等に関する分析、評価・検討や試算が発表されるようになってきている。International Commission for the President of France (2021) は、フランス大統領の諮問の下に組成された委員会の報告書であり、気候変動、格差、人口変動をテーマとして、課題、展望及び主要な政策対応の方向性を提示している。特に、カーボンプライシングと国境調整措置の徹底、教育訓練機会の提供と就労の促進支援、退職年齢の延長と移民の労働市場への統合が強調されている。USA National Intelligence Council (2021) は、米国の国家情報局による報告書であり、気候変動、環境劣化、人口変動、移民、格差、テクノロジー、感染症などの課題主要について、先進国・中進国・途上国、地域ブロックなどにわけて、2040 年までの展望を定量的に示したうえで、米国としての必要な政策対応等について論ずる。同様な報告書として、European Commission (2019)、World Bank (2023) など挙げられる。

こうした報告書の特徴は、地球規模の複数の課題を同時に取り上げている点である。一つの課題について詳しく検討を加えるタイプの取組みはこれまでも様々な分野でなされてきた。それに対して、一定の枠組みの下で、手法や観点もできる限り統一的しながら、諸課題の影響評価や政策対応の検討を加えようとしている。これは、地球規模で経済社会に影響を及ぼす諸課題が同時並行で進行している以上、こうしたアプローチがどうしても求められるようになってきていること、また、諸変数が同時に変動して相互に複雑に影響を及ぼし合うような複雑系であっても、コンピューターの計算能力の向上等によって、いまや定量的な計算が可能となっていることなどに起因していると言えよう。

こうした世界的な動向及び関連する先行研究や調査分析を参考にしながら、地球規模の課題に係る変数の変動が、日本の経済社会に及ぼす影響について、2100 年頃までの期間における変化の程度として定量的に分析、考察することを試みる。

本分析では、特に、人口変動、地球温暖化に中心的に着目して分析を進める。将来展望を描く分析手法としては、いわゆるシステムダイナミクスを用いる。システムダイナミクスは、1970 年代にマサチューセッツ工科大学の研究グループが開発したシミュレーション手法であり、これを用いたローマクラブによる『成長の限界』(1972 年) という報告書は人口と経済成長のペースは地球の限界を超えているという指摘を行って注目された。ローマクラブはその後も活動を継続しており、直近では“Earth 4All モデル”というグローバルモデルを開発し、「小出し手遅れ (Too Little Too Late)」、「大きな飛躍 (Giant Leap)」という 2

つのシナリオの下での世界の姿を示す『万人のための地球』（2022 年）を発表している。

“Earth 4All モデル” はオープンソースとして公表されている。本分析は、これを参考にしながら、日本のデータに置き換えて日本モデルとするとともに、日本の特徴的な課題、たとえば少子高齢化、エネルギーミックスなどについてシナリオを追加して分析できるように修正を行って、日本の経済社会への影響を分析、評価するためのシミュレーションモデルとする。シミュレーションの実行においては、前提条件や主要な変数の将来的にあり得る変動に関するシナリオの与え方がポイントとなる。本分析では、一定の上下限値の範囲で可能な限りランダムにシナリオを生成してシミュレーションを実行するとともに、AI による情報解析のプロセスを追加して、システムダイナミックモデルによる大量のシミュレーション結果をグループ分けして、それぞれのグループを特徴付ける鍵の要因を解説する。

1.2 モデルの概要

本分析で用いるモデルは、人口、生産、需要、在庫、公共、金融、エネルギー・環境、労働、社会課題、ウェルビーイングなどの計 11 ブロックから構成される。モデル内に存在する因果フローは 767、変数は 1,146 である。変数と変数の間の関係性を規定する係数は、基本的に 2000～2022 年の日本ないし世界の経済社会の実績値の回帰分析によって算出している。モデル内の式は、線形変化の式や、対数関数によって変化する式、遅延を用いた式が多数のフィードバックループをもって接続されている。

人口、エネルギー・環境のブロックは、“Earth 4All モデル” を基に、日本モデルとするための修正を加えている。人口ブロックでは、少子高齢化のスピード、外国人受け入れの抑制、健康寿命の延伸などに関する記述を詳しくしている。エネルギー・環境ブロックでは、エネルギーの海外依存、再生エネルギーへのシフトのスピード、原子力発電の増減などに関する記述を詳しくしている。

シミュレーションの実行方法は、以下の通りである。まず、主要アウトカムに影響を及ぼすすべての変数をモンテカルロ法によって変動させて、幅広いシナリオを発生させる。各課題ごとに 2 万通りのシナリオを発生させる。人口変動の分析では、人口と一人当たり GDP に影響する変数を変動させる。地球温暖化の分析では、排出源毎の CO₂ 量と炭素回収量に影響する変数を変動させる。そして、2 万通りのシミュレーション結果を K-means 法によって、特徴の共通する幾つかにグループ分けする。2 万通りのシナリオを生成するのは、それ以上にシナリオ数を増やしても、その結果として特徴的なグループの数が増えないことが分かったからである。これは、モデル内の因果フローや変数の総数によるものと考えられる。最後に、それぞれのグループを特徴付ける鍵となる要因及び分岐点を AI を用いて解説、抽出する。

幅広いシナリオの生成は、「未来のことは分からない」という前提に立って、最も時間をかけて行った部分である。主要アウトカムに影響を及ぼす変数を上下限値の範囲で、変動幅や誤差項を設定の上、基準値をベースとして毎年一様分布でランダムに数値をとるよう

に変動させることで行う。上下限值や変動幅は実績値や先行研究を参考としつつできるだけ幅広く設定し、変動は一様にランダムに連続的に生成させることで、将来に生じ得る変動をできるだけ機械的で大量なものとする。これによって、あり得る将来像ができるだけ幅広く描かれるものとする。このモデル構造とこの作業プロセスによって、実績値や特定の研究、提言等にひきつけられ過ぎない、客観性の高い将来展望シミュレーションとすることを目指したものである¹。

以下、人口ブロック・人口変動に関するシミュレーション、エネルギー・環境ブロック・地球温暖化に関するシミュレーションについて詳述する。

2. 人口ブロック・人口変動

2.1 先行研究

将来の人口変動に関する試算、先行研究では、①国際人口移動、②出生率、③寿命の3つを人口変動の決定要因と捉え、これらの予測値をもとに将来人口の推移を推計している。ここでは、主要な将来予測として、国立社会保障・人口問題研究所（以下、社人研）、国連及び Wittgenstein Centre²によって行われた予測をもとに、既存のシナリオにおける日本の将来像を確認する。

将来人口の予測は表1の通りである。いずれの試算、先行研究でも、日本の人口は2100年までに現在の5、6割程度に落ち込むことが見込まれている。外国人の移入に関しては、総人口に対して、2050年で2～4%程度、2100年で7～11%程度と予測されている。

外国人の受け入れに依存しない形で人口を維持しようとするならば、出生数が死亡数を下回る自然減を回避する必要がある、そのためには一定以上の水準の出生率を回復する必要があるが、主要な将来予測ではそれは期待できないとみられている。

2.2 モデルの構造、シミュレーション方法

上述のように、人口に関する主要な将来予測は、概ね類似した結果となっている。出生や死亡に関しては、ドラスティックな仮定は置きにくいということであろう。しかしながら、戦後80年の間に、現に日本の総人口はドラスティックに変動した。これから2100年頃までの将来像を描こうとする時、人々の行動が現状とあまり変わらないという前提にしばられ過ぎてしまうと、将来の様々な可能性が視野から除かれてしまうおそれがある。本分析では主要な将来予測よりもできる限り幅広いシナリオを与えてシミュレーションを試みた。

人口ブロックの因果フロー図は、図1の通りである。“Earth4All モデル”はグローバルモデルであるため、国際人口移動は考慮されていなかったが、日本版のモデルを作成する

¹ 本モデルの開発に当たって、デロイト・トーマツコンサルティング合同会社のコンサルティングチームの協力、及び専修大学商学部高橋裕教授の助言を得たことについて、ここに感謝申し上げる。

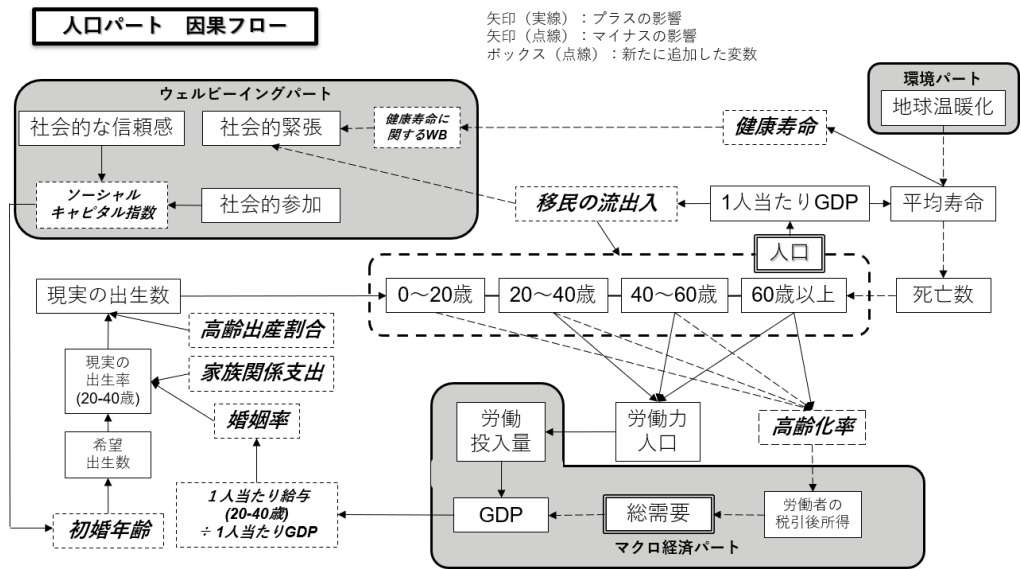
² Austrian Academy of Sciences (ÖAW)、The International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) と The University of Vienna による共同研究機関。

にあたっては、一人当たり GDP の増減によって外国人の移入が増減し、また、外国人の移入の増減が社会的緊張とウェルビーイングに影響する因果フローを追加している。

表 1 先行研究における将来人口の予測³

		2020年	2050年	2100年
人口				
	社人研	12,600万人	10,500万人	6,300万人
	国連		10,500万人	7,700万人
	Wittgenstein Centre		10,600万人	7,500万人
国際人口移動（カッコ内：2020年からの累積数）				
	社人研	16万人(平均値)	11万人(386万人)	5万人(756万人)
	国連		12万人(362万人)	7万人(834万人)
	Wittgenstein Centre		8万人(212万人)	0.1万人(471万人)
出生率				
	社人研	1.33	1.35	1.36
	国連		1.35	1.47
	Wittgenstein Centre		1.37	1.45
寿命				
	社人研	84.7歳	87.5歳	88.9歳
	国連		88.4歳	94.4歳
	Wittgenstein Centre		90.4歳	99.5歳

図 1 人口ブロックの因果フロー



³ 国立社会保障・人口問題研究所『日本の将来推計人口（令和5年推計）』、国連“World Population Prospects 2024”、Wittgenstein Centre “Human Capital Data Explorer”をもとに作成。実績値は総務省『国勢調査』及び『人口推計』に基づく。

2.2.1 人口変動を決定する要因

出生数は主に婚姻率と有配偶出生率によって決定されるが、本モデルでは有配偶出生率がさらに希望する子ども数とその実現率から導かれる因果フローで記述している⁴。そして、それらの主な決定要因として、①若年層への（20歳～40歳）の所得分配率、②家族関係支出、③社会への信頼を設定した。

$$\begin{aligned} & \cdot \text{希望する子ども数}_t \\ & = -0.09 \times \left(-3.2 \times \frac{\text{ソーシャルキャピタル指数}(\text{③社会への信頼度が影響})}{10} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \text{希望する子供数の実現割合}_t \\ & = \{0.037 \times \text{①若年層の労働分配率} + (-1.28) \times \text{20-40歳の就業率}\} \times \\ & \quad \{20.5 \times \text{②家族関係支出の対GDP比}\} \times \text{婚外子割合} \end{aligned}$$

若年層の所得水準が高まると結婚に対する意欲が高まり、子育て支援の拡充などによって家族関係支出が増加すると、子供を育てるためのハードルが低下し、一方で社会的安定性が損なわれると、将来に対する不安が高まり、結婚や出産に対する意欲が低下するという関係を記述したものである。

また、他のブロックとのつながりでは、人口とGDP、ウェルビーイングのつながりのほかに、地球温暖化によって、気温の上昇が食料の不足や自然災害の増加をもたらす可能性を考慮して、死亡数や寿命の決定要因に気温の上昇をつないでいる。

2.2.2 GDP への影響

人口動態の変化は主に①労働力人口と②高齢化率の変化という2つの経路を通して、GDPに影響を与える。まず、高齢化の進展により労働力人口が減少すると、生産に投入可能な労働量も減少するため、GDPにマイナスの影響をもたらす。また、高齢化率が上昇すると現役世代の社会保障負担の増加によって可処分所得が減少し、総需要の低下を通してGDPへの悪影響が生じる。

2.2.3 ウェルビーイングへの影響

なお、本モデルではGDPに加え、ウェルビーイングを主要な目的変数の一つとして位置づけており、人口ブロック内の変数では健康寿命や在留外国人数がウェルビーイングに影響を与えるよう定義されている。

健康寿命は通常の平均寿命と同様に、地球温暖化による影響を受ける。また、外国人を受け入れるための社会的・制度的な準備ができていない状態で在留外国人数が増加すると、

⁴ 婚姻外の出生の影響もモデル内に取り込んでいる。

社会的緊張の高まりを通してウェルビーイングが低下することが想定されている。

2.2.4 シミュレーション方法

人口変動に関するシミュレーションでは、総人口と一人当たり GDP に影響を及ぼす変数について 2 万通りのシナリオを与えてシミュレーションを実行し、出力された総人口と一人当たり GDP の結果をもとに 36 個のグループに分類し、最後に、出力された GDP の推移に基づいて経済成長が実現するグループや停滞するグループ等に分類した。

2.3 シミュレーション結果

上記の方法でシミュレーションを実行し、得られた結果を分類したところ、主に 3 つの特徴的なグループが抽出された。いずれのグループでも現在の人口の維持は実現できていないものの、人口政策や技術開発への取り組みによって結果に大きな差異が生じることが示された。

2.3.1 「人口微減も、GDP 増加シナリオ」

このグループでは、総人口に影響を及ぼす若年層への所得分配率や家族関係支出が上昇・増加する動きのシナリオが与えられている（表 2）。その結果、20～40 歳での出生率は 2100 年時点で 1.10～1.30 程度となり、40 歳以上での出生数が技術変化等によって高まらない場合は、人口置換水準には遠く及ばないものの、出生率の落ち込みを抑えることに成功している。さらに、外国人の受け入れも進み、在留外国人数は 2100 年時点で 700～1,400 万人と、現在の 2.3 倍～4.7 倍程度となっている。また、技術開発投資や設備投資の規模も持続的な増加を見せた。

結果として、2100 年の日本の人口は 1 億人以上となり、GDP は現在の 3 倍以上、労働者一人当たり GDP は 3.5 倍以上に増加した。また、一人当たり GDP が大幅に増加したことで、国内居住者の可処分所得に由来するウェルビーイングは現在の 5 倍程度と、大幅に高まる結果となった。

2.3.2 「人口減少も、GDP 増加シナリオ」

このグループでは、若年層への所得分配や家族関係支出の増加はあまり見られないものの、外国人の受け入れや投資の活発化が進むシナリオが与えられている（表 3）。在留外国人数は 2100 年時点で 500～1,300 万人と現在の 1.7 倍～4.3 倍、年間の技術開発投資額は 3.6 倍～10.9 倍、設備投資額は 4.9 倍～12.2 倍となった。

その結果、2100 年時点での人口は 0.8～1.0 億人と、緩やかな減少にとどまっており、GDP は現在の 3 倍以上となった。また、より技術集約的な形で経済成長が実現した結果、労働者一人当たり GDP は 5 倍以上、一人当たり可処分所得に由来するウェルビーイングは 2100 年時点で 5.0 倍～6.0 倍に増加する結果となった。

2.3.3 「人口減少、経済停滞シナリオ」

このグループでは、前述とは対照的に、経済の長期的な停滞が描かれている（表4）。出生率の維持に寄与するような動きは見られず、外国人の受け入れや投資の拡大も一定程度にとどまるシナリオが与えられている。この場合には、出生率は2100年時点で0.7程度と大幅に落ち込むこととなり、また在留外国人数は現在の1.3倍～2.0倍、技術開発投資額は2.2倍～2.9倍、設備投資額は6.1倍～8.1倍にとどまった。

結果として、2100年時点での人口は0.5億人～0.6億人と大幅に減少し、GDPは現在の0.7～1.1倍にとどまった。他国と比較すると経済成長の速度で大きく後れをとる形になったため、購買力由来のウェルビーイングは大幅に低下した。もっとも、技術集約的な形の経済への移行は他のシナリオと比較すると低水準ではあるものの、緩やかには進んだため、労働者一人当たりGDPは1.7倍～2.9倍、一人当たり可処分所得に由来するウェルビーイングは2.5倍～3.0倍に増加する結果となった。

表2 「人口微減も、GDP増加シナリオ」における主な結果

			2022年	2050年	2100年	
GDP（ドル） ⁵			4.4兆	5.0-8.0兆	12-16兆	
	人口（人）		1.24億	1.1-1.2億	1.0-1.2億	
		出生率	1.24	1.1-1.4	1.1-1.3	
			若年層への所得分配率	11%	11-12%	12-13%
			社会への信頼	0.34	0.30-0.38	0.30-0.38
			家族関係支出（対GDP比）	1.7%	3.0%程度	2.0-3.5%
		平均寿命（歳）		84	86-88	92-94
	在留外国人数（累計、人）		300万	1,000-2,000万	700-1,400万	
	労働者一人当たりGDP（ドル）		5.4万	6-10万	17-25万	
		技術開発投資（ドル/年）	2,750億	4,000億	10,000-30,000億	
		設備投資（ドル/年）	1,230億	2,500億	6,000-15,000億	
ウェルビーイング（2022年=1）						
	購買力（他国比較）由来		1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	
	健康寿命由来		1.0	1.0-1.05	1.0-1.05	
	可処分所得由来		1.0	1.5-2.0	4.5-5.5	

⁵ 為替レートは2022年時点の水準で一定となるように仮定している。

表 3 「人口減少も、GDP 増加シナリオ」における主な結果

				2022年	2050年	2100年	
GDP（ドル）				4.4兆	6.0-8.0兆	12-16兆	
	人口（人）			1.24億	1.1-1.2億	0.8-1.0億	
		出生率		1.24	0.9-1.0	0.8-1.0	
			若年層への所得分配率		11%	10%	8-10%
			社会への信頼		0.34	0.32-0.37	0.32-0.37
			家族関係支出（対GDP比）		1.7%	2.0%	1.5-2.5%
		平均寿命（歳）		84	86-88	90-92	
	在留外国人数（累計、人）		300万	800-1,200万	500-1,300万		
	労働者一人当たりGDP（ドル）			5.4万	8-11万	25-32万	
		技術開発投資（ドル/年）		2,750億	7,000億	30,000-48,000億	
		設備投資（ドル/年）		1,230億	1,250-2,500億	7,500-15,000億	
ウェルビーイング（2022年=1）							
	購買力（他国比較）由来			1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	
	健康寿命由来			1.0	1.0-1.05	1.0-1.05	
	可処分所得由来			1.0	1.5-2.0	5.0-6.0	

表 4 「人口減少、経済停滞シナリオ」における主な結果

			2022年	2050年	2100年	
GDP（ドル）			4.4兆	4.0-6.0兆	3.0-5.0兆	
	人口（人）		1.24億	1.0-1.2億	0.5-0.6億	
		出生率	1.24	0.7-1.0	0.7程度	
			若年層への所得分配率	11%	9-11%	3-7%
			社会への信頼	0.34	0.32-0.37	0.32-0.37
			家族関係支出（対GDP比）	1.7%	0.5-1.5%	0.8-1.5%
	平均寿命（歳）		84	86-88	90-94	
	在留外国人数（累計、人）		300万	300-500万	400-600万	
	労働者一人当たりGDP（ドル）		5.4万	6.0-9.0万	9-15万	
		技術開発投資（ドル/年）	2,750億	4,000億	6,000-8,000億	
		設備投資（ドル/年）	1,230億	2,500億	7,500-10,000億	
ウェルビーイング（2022年=1）						
	購買力（他国比較）由来		1.0	0.60-0.75	0.40-0.60	
	健康寿命由来		1.0	1.0-1.05	1.0-1.05	
	可処分所得由来		1.0	1.25-1.5	2.5-3.0	

2.4 考察

上記の3つのシナリオではいずれも、その程度に差はあるものの、人口の減少が見込まれる点は共通している。近代以降の日本の人口は中長期的に見れば安定的に増加してきたが、今後の日本が再び人口拡大局面に転じる可能性は非常に低い。ただ、そのような中でも、政策的な取り組みによって人口の減少を最小限に食い止める道は残されていることが示される結果となった。

一つ目の要因は、若年層や子育て世代に対する資源の配分である。近年の高齢化率の上昇に伴う社会保障負担の増加や、経済の低迷による所得の伸び悩みによって、多くの若年層は経済的な余裕を持つことができず、容易には結婚や出産といった選択をすることができなくなっている。そのような中で、より若年層に重点を置いた社会保障制度や税制への移行が実現すれば、若年層が感じている経済的な圧迫感を取り除くことが出来る。また、家族関係支出の拡充によって家族手当等の現金給付や保育・教育環境の充実を図れば、子育てに対するハードルを下げることも出来る。

二つ目の要因は、外国人の受け入れである。若年層に対する支援によって出生率の下げ止まりを実現できる可能性はあるが、それでも人口置換水準へと出生率を回復させることは困難である。そのため、将来的に一定の人口規模を保とうとするのであれば、一定程度の外国人の受け入れも必要となってくる。

また、上記のいずれのシナリオにおいても、技術開発投資や設備投資の規模が拡大した結果、労働者一人当たり GDP が増加している。持続的な経済成長を実現するためには、人口問題への取り組みに加えて、投資の充実も重要な要素となる。労働力の大幅な増加が期待できず、一方で技術の高度化が進むなかで、積極的な投資により技術集約的な経済への転換を進めて行くことが求められる。

3. エネルギー・環境ブロック・地球温暖化

地球温暖化や気候変動は、我々の生産活動や消費行動に影響を与え、世界中の経済活動に大きな影響を及ぼす。異常気象や自然災害の増加は、農業や工業生産の減少につながり、経済成長が鈍化することが懸念される。また、気温上昇に伴うエネルギー需要の増加等を通じて、エネルギーの需給構造が変化する可能性もある。さらに、再生可能エネルギーへの転換が進むことで、化石燃料への依存度が低下すると考えられる。こうした変化が予測される中で、地球環境変動が経済に与える影響や将来のリスクを定量的に評価することは、将来的な経済の安定性や成長の可能性を予測する上で有益と考えられる。また、エネルギー政策や貿易戦略に及ぼす影響を把握することで、持続可能な未来を構築するために選択可能な戦略の幅を示し、適切な長期戦略策定のための指針につなぐことが期待される。

3.1 先行研究

地球環境変動が与える経済に与える影響について、すでに多くのレポート・報告書等において、長期的な視点からみたシナリオ分析が行われている。その多くは、地球温暖化対策が実施されなかった場合、一定の対策が実施された場合などにシナリオ分けをし、将来の GDP エネルギー輸入額などに関する試算値を示している。具体的には、仮に対策が実施されなかった場合、気候変動に伴う自然災害の頻発やエネルギー価格の上昇が経済に悪影響を及ぼし、エネルギー輸入額の増加や GDP の減少につながるとされる。一方で、一定の対策が実施された場合、再生可能エネルギーの普及やエネルギー効率の改善が進むことで、エネルギー輸入額は減少し、将来的に GDP は安定的に推移、増加も期待できるとされる。

例えば、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）による「Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability」（2022）では、温暖化対策を実施しなかった場合と一定の対策を実施した場合に分けて、GDP 等への影響を試算し、公表している。仮に対策を実施しなかった場合、現在の温室効果ガスの排出削減ペースが続き、地球の気温上昇幅は約 3.0℃から 5.0℃に達すると予測している。また、温暖化の進展により、極端な気象や自然災害が増加し、農業生産性の低下や水資源の枯渇等を通じて、2050 年までに GDP は▲2～▲5%程度減少する可能性があるとしている。さらに、エネルギー供給の不安定化によりエネルギーコストが上昇し、化石燃料依存国ではさらなる貿易赤字のリスクが高まることが見込まれている。一方で、仮に一定の温暖化対策が実施された場合、2050 年までに温室効果ガスの排出がほぼゼロとなり、気温上昇幅は約 1.5℃に抑えられるとみている。その上で、技術革新や国際協力の進展等が上記のリスクを低減させ、GDP は 2～4%程度の増加に転ずる可能性があるとしている。このように、気候変動への適応策や再生可能エネルギーへの転換が進むことで、長期的にみてエネルギーコストの安定や貿易バランスの改善も期待されることから、気候変動対策の有無が経済に与える影響は大きいと結論づけている。

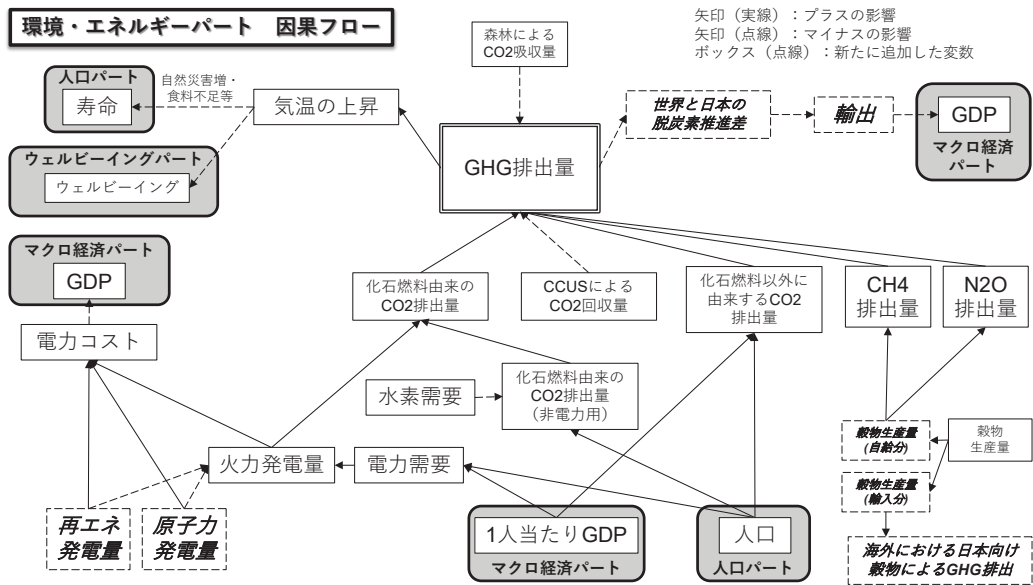
また、2006 年に英国の元財務大臣であるニコラス・スターン氏によって発表された「Stern Review on the Economics of Climate Change」では、気候変動に対する対策を講じない場合、化石燃料への依存が続き、再生可能エネルギーの普及が遅れることで温暖化が進行し、世界の GDP は毎年▲5～▲20%程度減少する可能性があるとしている。一方で、気候変動による最悪の影響を回避するため、温室効果ガスの排出量を削減するという行動をとる場合は、世界の GDP の損失は毎年 1%程度に抑えることができるとしている。

3.2 モデルの構造、シミュレーション方法

これらの試算、先行研究は、日本の経済や環境に関係する複雑な問題を理解し、将来のシナリオを評価するための重要な情報源となる。一方で、今回我々が行った地球環境変動に関する分析は、これまでの人間の主観や仮定に頼ったシナリオ設定にとどまらず、リスクの高い状況や極端なケースも含む様々なシナリオを考慮に入れており、将来予測される変化の幅をより網羅的に示すことを試みている。具体的には、温室効果ガス（GHG）の排

出量や気温の変化、それを受けた気候システムの反応、そして生態系や経済への影響を含む、複数の要素で構成されたモデルを構築することで、2050年及び2100年までの各指標の変化幅を試算している。複雑なシステムの時間的変化をモデル化し、無数のシナリオを検証することで、より包括的な分析が可能となり、日本の将来のエネルギーミックスや環境政策の効果的な策定に寄与することが期待される。

図2 環境・エネルギーパート 因果フロー



$$\begin{aligned} \text{温室効果ガス（GHG）排出量}_t = & \text{CO}_2 \text{ 排出量（化石燃料）}_t + \text{CO}_2 \text{ 排出量（非化石燃料）}_t \\ & + \text{N}_2\text{O 排出量}_t + \text{CH}_4 \text{ 排出量}_t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO2 排出量 (化石燃料)}_t &= \text{CO2 排出量 (火力発電由来)}_t \\ &+ \text{CO2 排出量} \left(\frac{\text{化石燃料}}{\text{非電力由来}} \right)_t + \text{CO2 回収量 (CCUS)}_t \end{aligned}$$

温暖化ガスの排出量が増加すると、地球の気温は上昇し、健康寿命やウェルビーイングに直接的・間接的な影響を及ぼすと考えられる。例えば、極端な気象の発生は、熱中症や感染症のリスクを高め、健康問題を引き起こす可能性がある。また、気候変動による食料供給の不安定化は、栄養不足や経済的変動を引き起こし、健康や生活の質に悪影響を及ぼす可能性がある。このようにして、気温上昇は平均寿命やウェルビーイングを低下させる要因となり得る。

$$\begin{aligned} \text{ウェルビーイング}_t &= a \cdot \dots_t - b \cdot \text{気温上昇}_t + c \cdot \dots_t + d \cdot \dots_t + \dots \\ \text{平均寿命}_t &= \dots_t - \text{気温上昇が平均寿命に与える影響}_t + \dots \end{aligned}$$

また気温上昇は、経済にも大きな影響を与える。主な GDP への影響として、輸出入の増減を考慮しており、仮に脱炭素推進の取組に遅れがみられ、世界との差が広がった結果、輸出は最大 3 % 低下し、GDP を押し下げることになる⁶。一方で、輸入金額に影響を与えるエネルギーコストは、火力発電量、再生可能エネルギー発電量、再生可能エネルギー設備の国内調達率、原子力発電量を通じて変動する形となる。温暖化ガスの排出量を管理していく上で、火力発電から再生エネルギーへのシフトが求められるが、こうした中で予想される電力コストの増減が、GDP に影響を与える形となっている。なお、火力発電量は、人口や一人当たり GDP によって変動する電力需要から、再生可能エネルギー発電量と原子力発電量を減ずることで算出している。

$$\text{輸出}_t = \text{輸出}_{t-1} - \text{世界と日本の脱炭素推進差}_t + \dots$$

このように、今回の環境分析に用いたモデルは、温暖化ガスの排出源ごとの排出量、回収技術、気温上昇が健康やウェルビーイング、経済に与える影響を包括したモデルとなっている。

3.3 シミュレーション結果

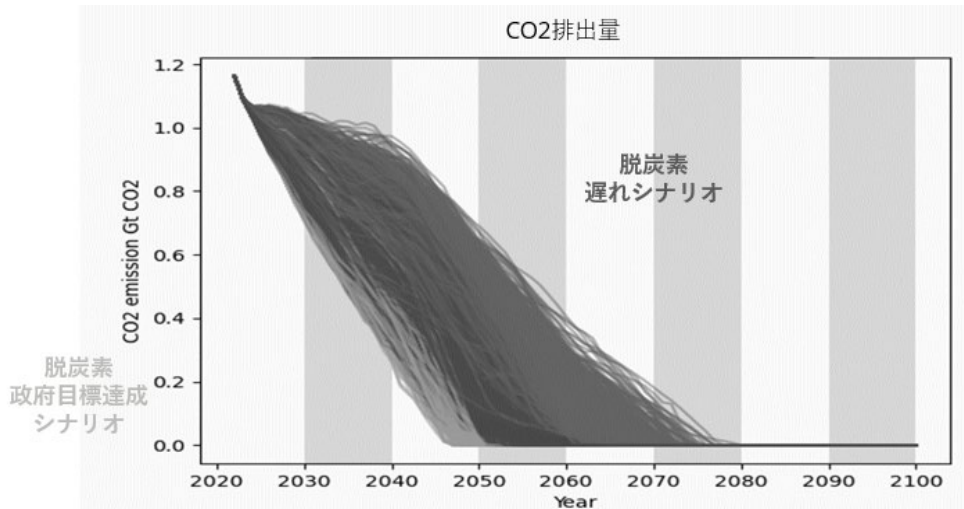
主なシミュレーション結果は、以下の通りである。まず図 3 は、CO2 排出量に関する将来試算結果である。「シナリオ A」(薄いグレー) が 2050 年までにカーボンニュートラルが

⁶ ここでは、欧州連合 (EU) 域外から輸入される特定の製品に対して、その生産過程で排出された温室効果ガスの量に応じた課金を行う「炭素国境調整措置 (Carbon Border Adjustment Mechanism : CBAM)」等による影響も考慮しつつ、専門家の意見も踏まえて弾性値を設定。

実現できたケース、「シナリオB」（濃いグレー）がかなりの遅延が生じたケースを示している。2050年までにカーボンニュートラルが実現した「シナリオA」は、2万通りのうち10%程度にとどまり、2050年までのカーボンニュートラル達成は確率的には高いことを示している。

図3 シナリオごとのCO2排出量

- 「CO2排出量」の説明変数である「電力由来CO2排出量」「非電力燃料由来CO2排出量」「非燃料由来CO2排出量」「CCUSによるCO2吸収量」をK-meansで機械的に分類
- その結果に基づき、CO2排出量を脱炭素政府目標達成シナリオ/脱炭素遅れシナリオに分類



A

脱炭素政府目標達成
シナリオ

脱炭素化が2050年までに達成

政府が掲げた2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルが達成されるシナリオ。次頁からは「脱炭素政府目標達成」シナリオを提示

B

脱炭素遅れ
シナリオ

脱炭素化が2061年以降に達成

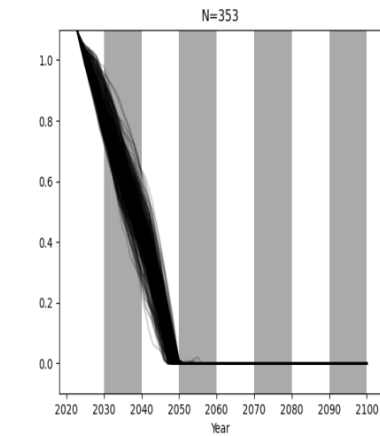
政府目標に大幅に遅れ、2061年以降に脱炭素化がなされるシナリオ。次頁からは「脱炭素遅れ」シナリオを提示

また仮に「シナリオA」が実現し、2050年までにカーボンニュートラルを達成するには、どれくらいのCO2排出量・吸収量が必要であるかを図4でみている。再生可能エネルギー比率は70%以上、電化割合は60%以上まで拡大するとともに、CCUS技術の進展により一定量以上のCO2吸収を実現することで、2050年までの脱炭素化が達成可能となる姿となっている。

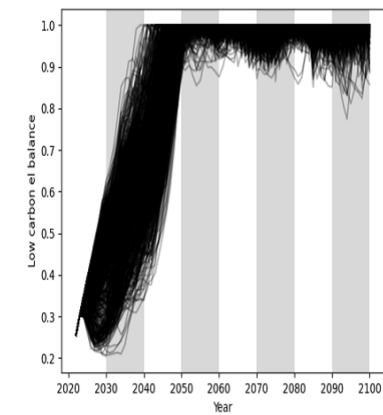
図4 CO2 排出量・吸収量、再生可能エネルギー比率、電化割合（シナリオA）

	CO2排出量	電力由来 CO2排出量	非電力燃料 由来 CO2排出量	非燃料由来 CO2排出量	CCUSによる CO2吸収量	電化割合 (2022年起点)	低炭素 エネルギー 比率
2022年	• 1.16 Gt	• 0.36 Gt	• 0.78 Gt	• 0.06 Gt	• 0.0006 Gt	• 0%	• 25%
2050年	• 0 Gt	• ほぼゼロ(0.05 Gt未満)に	• 0.15 Gt 未満	• 0.05 Gt 程度	• 0.1 Gt以上	• 60%以上	• 90%以上
2100年	• 0 Gt	• 0 Gt	• 0-0.1 Gt	• 0.03-0.05 Gt	• 0.15 Gt	• 70%	• 80-100%

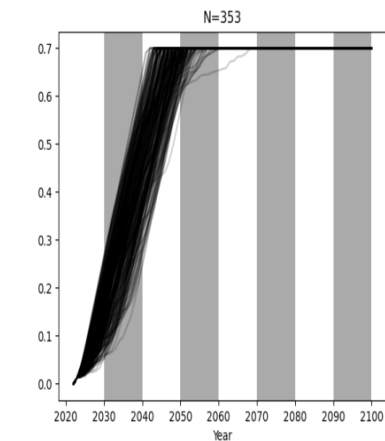
CO2 排出量



低炭素エネルギー比率



電化割合



CCUSによるCO2吸収量

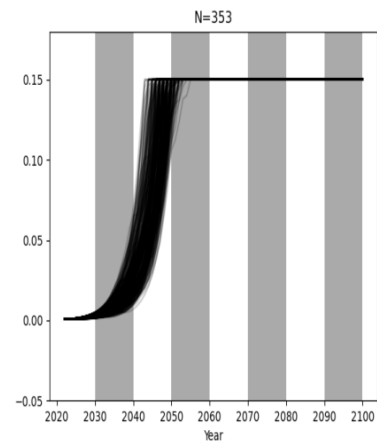
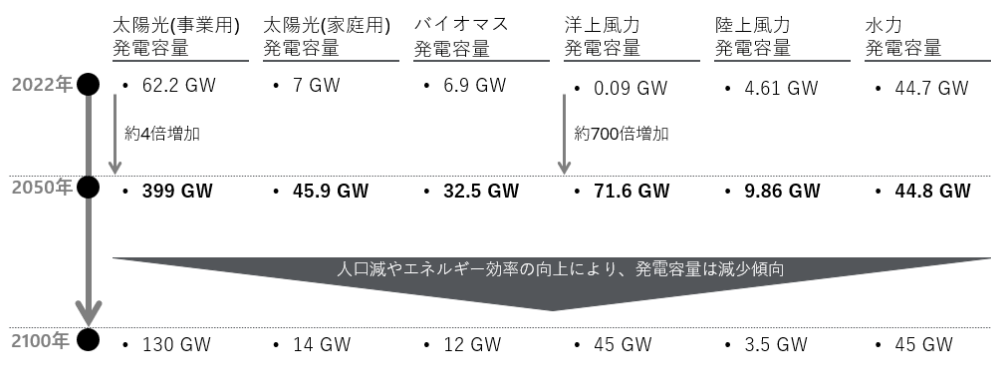
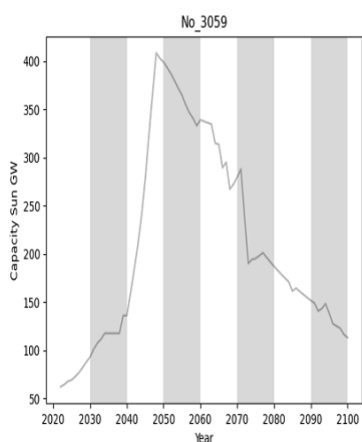


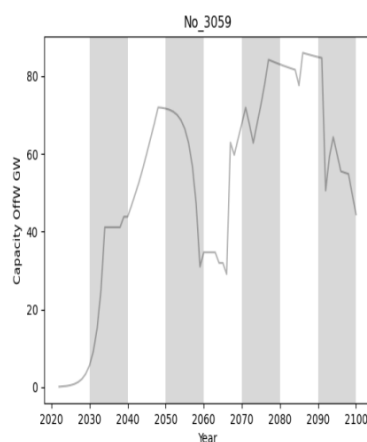
図5 再生可能エネルギーの電力源別にみた発電容量（シナリオ A）



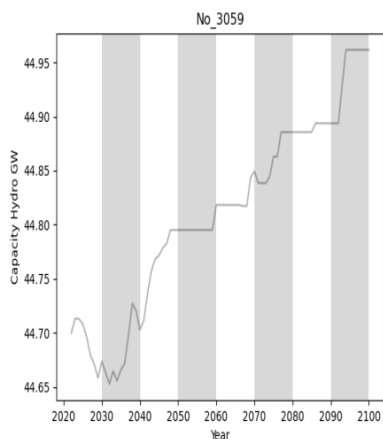
太陽光(事業用)発電容量



洋上風力発電容量



水力発電容量



太陽光(家庭用)発電容量

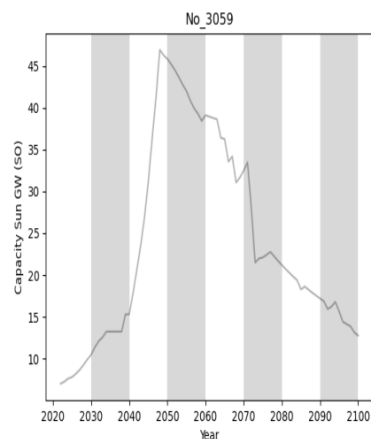
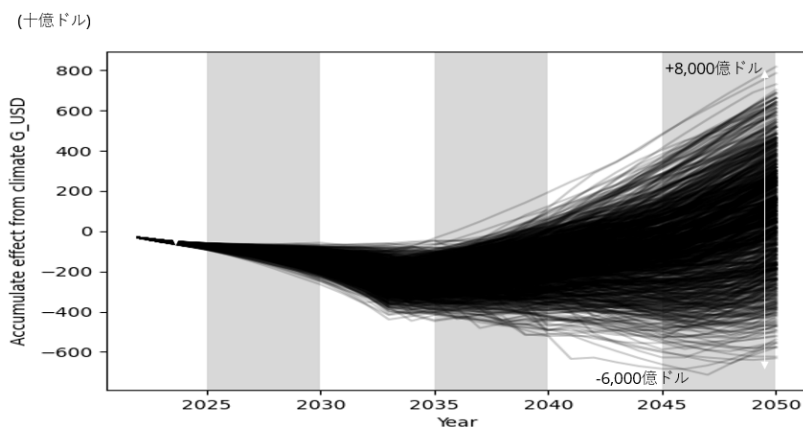


図5は、仮に「シナリオA」が実現し、再生可能エネルギー比率を上昇させるためには、各電力源はどれくらいの容量が必要になるかを示している。2022年と比べた発電容量をみると、太陽光（家庭）は過去のトレンドを踏まえても最大約4倍程度に留まる。一方で、大きな役割を果たすのが洋上風力であり、約700倍の増加と試算される。実際に、洋上風力がどの程度増えるか次第で、全体のカーボンニュートラルのスピードに大きな影響が及ぶことをなると考えられる。

また、カーボンニュートラルを進めていき、2050年にほぼ脱炭素が達成されるときGDPの動きをみたものが図6である。2035年にかけてほぼすべてのケースでGDPがマイナスとなり、最大4,000億ドル程度のマイナスになると試算される。一方で、一定期間を経過するとGDPがプラスになるケースも増えていき、2050年時点で最大8,000億ドル程度まで増加する可能性が示唆されている。脱炭素政府目標の達成には、短期的なGDPへのマイナス影響を許容する必要があるが生じるものの、2050年時点の累積でみると、GDPにプラスの影響を与えるシナリオも多数存在することがわかる。

図6 再生可能エネルギー導入によるGDPへの累積影響



■プロットから言えること

- 脱炭素政府目標を達成するには、一定量のGDPへのマイナス影響(2035年時点で累計最大**-4,000億ドル程度**)を許容する必要がある
- 環境ブロックからのGDP影響は2050年時点の累積で、**-6,000億~+8,000億ドル規模**になる

■プロットの背景

- 再生可能エネルギーの導入にあたり、国内調達率が高い場合にはGDPにプラスに作用し、国内調達率が低い場合、輸入に頼ることになるため、GDPにマイナスに作用する
- エネルギーコストが10%上昇する場合、GDPは0.15%減少**、対してエネルギーコストが低くなる場合、経済活動は活発化しGDPにはプラスに作用する

*：「脱炭素政府目標達成シナリオ」のみではなく、シナリオ全体を示している

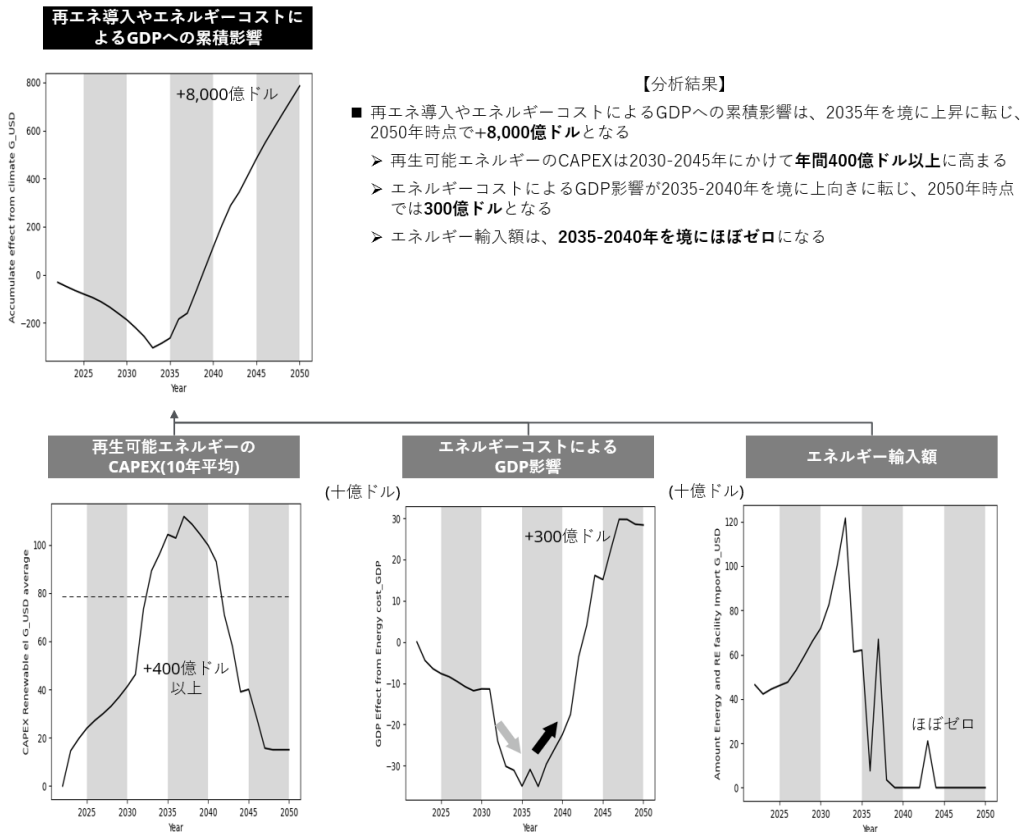
**：(出所)How energy prices shape OECD economic growth: Panel evidence from multiple decades – ScienceDirect
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014098832200247X>, (2024年8月8日参照)

3.4 考察

最後に、今回のシミュレーション結果から得られる示唆について考えたい。図7の左上図は、再生可能エネルギー導入を通じたGDPへの累積影響額をみたものであり、図6の中でGDPを最も押し上げたケースに該当する。2035年を境に影響額は上昇に転じ、2050年時点で8,000億ドル程度のプラスに達する姿となっている。下段はその内訳となるが、累積影響額は、①再生可能エネルギー実現に必要な投資額（CAPEX）、②エネルギーコスト（によるGDP押下げ）、③エネルギー輸入額により構成される。

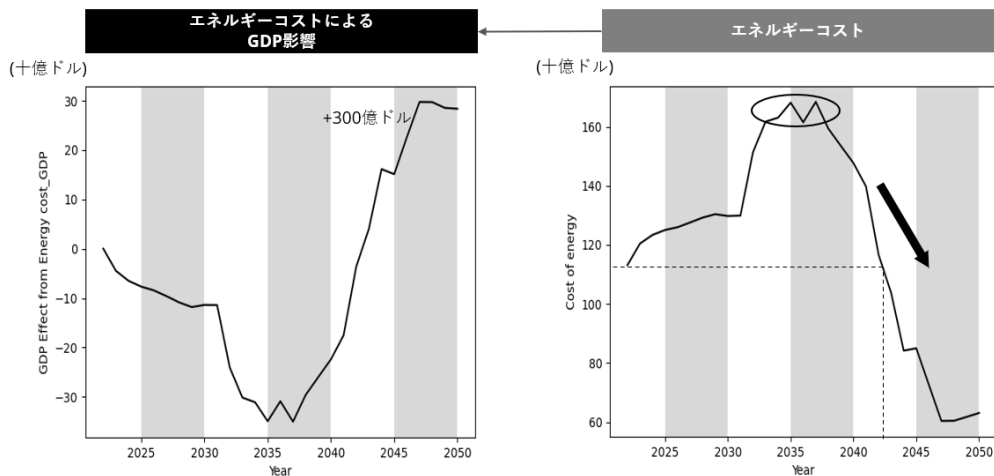
まず2035年にかけて、再生可能エネルギー移行に向けた多額の投資（CAPEX）が必要となるが、こうした投資がCO2排出量削減につながり、太陽光発電設備の国内調達率が高まるまでは、エネルギーコストやエネルギー輸入額の増加が、GDPを押し下げている。一方で、2050年にかけて再生可能エネルギー比率の国内調達率が高まる一方で、化石燃料の輸入量が減ることで、エネルギーコストが低下（GDPの押し上げに転換）に向かい、エネルギー輸入額もほぼゼロに到達するので、最終的にGDPへの累積影響額はプラスに転じる形となっている。

図7 再生可能エネルギー導入を進める中で生じるGDPへの累積影響額



さらに図 8 の左図は、図 7 の下中図のエネルギーコストによる GDP 押下げ額と同じものとなるが、右図はその累積前の推移となる。これをみると、2035 年にかけて 5 割程度増加しており、この増加をいかに抑えるかが、経済への影響を左右することがわかる。このため、2050 年までにカーボンニュートラルを達成し、脱炭素を実現するためには、継続的に再生可能エネルギー関連設備への投資を進めるとともに、投資の成果が実際に CO2 排出量の削減につながるまでの間は、エネルギーコストやエネルギー輸入額の増加を抑える方を同時に進めることが重要となる。

図 8 エネルギーコストを通じた GDP への影響



【分析結果】

- エネルギーコストのピークは、再生可能エネルギー置換が活発化する2035年頃に**1,600億ドル**程度まで上昇
- その後、**2035年を境に再生可能エネルギーへの置換が完了し**、エネルギーコストは押し下げられ、2035-2045の10年間で2022年水準(1,130億ドル)に至る
- 2050年時点で2022年水準の約半分である600億ドル程度までエネルギーコストが減少し、GDP影響は**+300億ドル**となる

4. 結び

人口変動、地球温暖化を中心的に取り上げて、地球規模の課題に係る変数の変動が、日本の経済社会に及ぼす影響について、現時点から 2100 年までの期間における変化の程度として将来展望を描くことを試みた。「未来のことは分からない」という前提に立って、できる限りランダムなかたちで数万通りのシナリオを生成してシミュレーションを行った。

これだけ大量のシミュレーションを実行して得られた結果は、出力結果の幅も、特徴的な出力結果が示す含意も、比較的常識的な範囲での理解、解釈が可能なものがほとんどであった。

日本の総人口は、現在の1億2千万人に対して、2100年頃には、最大で1億3千万人程度から最小で4千万人程度となった。日本のGDPは、現在の4.4兆ドルに対して、2100年には、最大で20兆ドル程度から最小で3.0兆ドル程度となった。日本のウェルビーイングは、現在を1とした場合に、2100年には、最大で4.0程度から最小で0.2程度となった。

人口変動においては、主要アウトカムである総人口と一人当たりGDPに対して、特に、若年層への所得分配と、外国人の受け入れが、出力結果を特徴付ける変数として重要であることが示唆された。地球温暖化においては、主要アウトカムである排出源毎のCO₂量と炭素回収量に対して、特に、できるだけ早期の再生可能エネルギーの拡大と、資材等の国産化が重要であることが示唆された。

本モデルでは、11ブロックの連結を簡易なかたちで行っているなど、開発段階としてはまだ初期段階というべきものである。しかしながら、得られたシミュレーション結果としては、上述のように一定の理解、解釈が可能なものがほとんどであったことは、超長期の将来展望を描くひとつの方法論として、有効、有用であると考えられる。単純な関数から成る因果フロー767本をつないだモデルに過ぎないが、主要アウトカムに影響を及ぼす鍵となる政策変数の抽出を試みたところ、粗い試算ではあるが、若者への所得分配や、再生エネルギーの資材の国産化といった政策変数が分岐点を作る鍵の要因になっているという指摘を導くことができたことから、政策的な含意を導出するためのツールとして活用し得ることも期待される。

本研究成果を基に、更なる精緻化を図ったうえで、“Earth 4Allモデル”の開発者、利用者等との国際交流なども行いながら、政策形成に資する将来展望の在り方について模索を継続していきたい。

参考文献

- 経済企画庁経済審議会（1992），『生活大国5か年計画－地球社会との共存をめざして－』。
 経済企画庁経済審議会長期展望委員会報告（1982），『2000年の日本』。
 国立社会保障・人口問題研究所（2023），『日本の将来推計人口（令和5年推計）』。
 総務省『令和2（2020）年国勢調査』。
 総務省『人口推計』。
 ドネラ H.メドウズ（1972），『成長の限界：ローマ・クラブ「人類の危機」レポート』ダイヤモンド社。
 内閣官房（2000），「21世紀日本の構想」。
 内閣府（2014），「選択する未来－人口推計から見えてくる未来像－」。

<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/sentaku/index.html> (参照 2025-3-12)

Sandrine Dixson-Declève (著)・Owen Gaffney (著)・Jayati Ghosh (著)・Jorgen Randers (著)・Johan Rockstroem (著)・Per Espen Stoknes (著)・武内 和彦 (監修, 翻訳)・ローマクラブ日本 (監修, 翻訳)・森 秀行 (翻訳)・高橋 康夫 (翻訳) (2022), 『Earth for All 万人のための地球: 『成長の限界』から50年 ローマクラブ新レポート』丸善出版.

European Commission (2019). “The European Green Deal.”

Harinder Kohli (2016). “The World in 2050: Striving for a More Just, Prosperous, and Harmonious Global Community.”

Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.” <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (参照 2024-12-10)

International Commission for the President of France (2021). “Major Future Economic Challenges.”

International Energy Agency (2024). “World Energy Outlook 2024.” <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (参照 2024-12-10)

International Monetary Fund (2019). “The Long-term Macroeconomic Effects of Climate Change.” <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2019/wpica2019215-print-pdf.ashx> (参照 2024-12-10)

Jorgen Randers (2013). “2052: A Global Forecast for the Next Forty Years.”

K.C. et al. (2024). “Updating the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) Global Population and Human Capital Projections.”

Organisation for Economic Co-operation and Development (2021). “The Economic Consequences of Climate Change.” https://www.oecd.org/en/publications/the-economic-consequences-of-climate-change_9789264235410-en.html (参照 2024-12-10)

Stern, Nicholas (2006). “The Economics of Climate Change: The Stern Review.”

United Nations (2024). “World Population Prospects 2024.”

United Nations Environment Programme (2022). “Emissions Gap Report.” <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022> (参照 2024-12-10)

USA National Intelligence Council (2021). “Global Trends 2040.”

Wittgenstein Centre “Human Capital Data Explorer.”

World Bank (2023). “Falling Long-Term Growth Prospects, trends, expectations and policies.”

Ziauddin Sardar (2014). “Future: All that Matters.”