インドネシアを対象とした気候変動緩和策と食料消費選好の変更による経済と食料消費への影響評価

奥野　颯太[1]・長谷川　知子[2]・藤森　真一郎[3]・市森　将貴[4]

[1]非会員　立命館大学　理工学部　環境都市工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目 1-1）
[2]正会員　立命館大学　理工学部　環境都市工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目 1-1）
E-mail: thase@fc.ritsumei.ac.jp (Corresponding Author)
[3]正会員　京都大学准教授　京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-3）
[4]非会員　立命館大学大学院　理工学研究科　環境都市専攻（〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目 1-1）

インドネシアは，主要温室効果ガス排出国であり，国の気候中期目標(国が決定する貢献)として 2030 年までに対策を取らない場合と比べて 29~41%の削減目標を掲げると同時に，食料の生産と消費の持続可能性を目標としている．本研究では，インドネシアを対象に経済モデルを用いて 2050 年までの温室効果ガス排出削減や食の内容を変更する消費者側の対策による食料消費の変化が経済と食料システムに与える影響を分析した．その結果，排出削減による経済活動の制限により経済ロスがあったが，食の内容の変更を同時に行うことで経済ロスを軽減する経済的便益が得られることがわかった．一方で，途上国に世界一律の持続可能な健康的な食事(EAT-lancet)を適用すること，また国内一律に食料消費を減らす政策の実施が食料消費の減少と飢餓リスク人口の増加をもたらす可能性があることが示された．

Key Words: *greenhouse gas, dietary change, social economic, food consumption ,Indonesia*

1. はじめに

第 21 回気候変動枠組条約国会議(COP21)において，2020 年以降の気候変動に関する国際的な枠組みとしてパリ協定が採択された．パリ協定では，世界の平均気温上昇を 2℃より十分低く保ち，1.5℃未満に抑える努力を追求することを世界共通の長期目標として設定されている[1]．世界 100 以上の国が排出削減目標を掲げているため，国レベルの温室効果ガス(GHG)排出削減とその経済影響を明らかにすることの社会的ニーズは高い．

特に，インドネシアは GHG 主要排出国の一つで，2005 年の国内 GHG 排出量は 1.8 $GtCO_2eq$ と推定され，その大部分である 63%が土地利用の変化と泥炭や森林火災によるものである．また，群島国家であるインドネシアは，気候変動によって悪化する可能性のある自然災害に対して脆弱であり，食料，水，エネルギーの供給に影響を及ぼす可能性があり，飢餓リスク人口の増加が予想される．インドネシア政府は 2015 年に，2030 年の対策を取らないシナリオに対して，2020 年から 2030 年までに 29%，国際支援下では最大 41%の排出削減目標を掲げている．その全削減量の約 60%を農林業およびその他土地利用部門(Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)により削減することを見込んでいる[2]．そのため，食料・水・エネルギーの生産と消費の持続可能性に野心的な目標を掲げているインドネシアでの排出削減や，健康な食生活と持続可能な食料生産を目指した食料消費選好の変更が重要となっている．

生津ら (2013)[3]は，2050 年に世界 GHG 排出量を 1990 年比で半減する目標の実現可能性と社会経済影響をインドネシアを含む主要アジア 10 カ国を対象に分析した．結果として，日本と韓国を除いた 8 カ国で排出量削減目標は技術的・経済的に達成可能であることが示された．また，排出削減を行うに伴って経済的な損失が生まれるが，その損失を考慮しても GDP は増加し，経済発展が可能であることが示された．

西浦ら (2020)[4]は，アジア 8 カ国を対象に，AIM/Hub モデルを用いて，2050 年における排出削減率を 2005 年比で 20%，60%，80%に設定したときの各国の有効な排出削減策と排出削減に伴う経済的な影響の要因を分析が行われた．結果として，大幅な排出削減には BECCS の利用が有効的であること，また，温室効果ガス排出削減による GDP 損失は，削減率，エネルギーに対する依存度，

経済水準に影響されることが明らかにされた.

和田ら (2021)[5]は，日本・アメリカを対象とし，AIM/HubモデルとAFOLUBモデルを用いて，農畜産業部門の生産側の排出削減対策と栄養・環境面を考慮した食の内容の変更，畜産物の消費の抑制による消費側の対策による，GHG 排出削減可能量を推計した．この研究により，消費側での対策は生産側と同等かそれ以上の削減効果があることが示された．しかし，これらの研究では，インドネシアを対象にした，食料消費選好変更を伴うGHG 排出削減による影響はまだ明らかにされていない.

以上を踏まえ，本研究では，応用一般均衡モデルを用いて，主要な GHG 排出国であるインドネシアを対象に，食料消費選好の変更を実施し，2020 年比 GHG 排出量50%削減の排出削減目標を達成した場合のエネルギー消費の変化，食料消費の変化，経済影響，食料消費選好の変更と排出削減を組み合わせることによる便益について分析することを目的とする.

2. 手法

(1) 手法の概要

手法の概要を図-1に示す．食料消費選好を変更する場合(食料消費選好変更シナリオ)，2050年にGHG排出量を2020 年比で 50%削減した(気候政策を実施)場合(気候政策シナリオ)，食料消費選好変更と気候政策を実施した場合(食料消費選好変更+気候政策シナリオ)，食料消費選好変更と GHG 排出削減(気候政策)を実施しない場合(ベースラインシナリオ)の4つのシナリオを用意した．世界経済モデルを用いて分析を行い，食料消費の変化や経済的影響などについて推計を行い，評価する．本研究では，応用一般均衡モデル(AIM/Hub)(以前は AIM/CGE と呼んでいたもの)[9]を用いてシミュレーションを実施する．応用一般均衡モデル(AIM/Hub)の詳細については次の項で示す．AIM/Hub モデルに社会経済条件として人口やGDP，作物収量，気候政策，食料消費選好変更などを入力し，一人当たり食料消費カロリー，飢餓リスク人口，エネルギー消費量，GDP 変化率などのデータを出力する．飢餓リスク人口の算定にあたり，今回の分析では現在の国内での食料分配の公平性を将来にわたって想定している．そして，対象地域はインドネシア，対象期間は 2005 年から 2050 年とした.

(2) AIM/Hub モデル

本研究では応用一般均衡モデル AIM/Hub モデル(以前はAIM/CGEモデル)を用いて分析を行った．AIM/Hubモデルは市場経済における価格メカニズムを基礎に置いたモデルであり，経済全体の財について社会会計表を用いた数値シミュレーションを行うことによって，社会経済シナリオの定量化や気候変動の緩和による影響を分析できるツールである.



図-1 モデルの入出力

AIM/Hubモデルは応用一般均衡型のモデル[6][7]であり，生産，消費，投資，貿易活動が各種生産要素，財等の価格を入力条件とした関数を用いている．基本的には入れ子構造を持つCES(Constant Elasticity of Substitution)関数で記述している．モデルは1期を1年とし，1期毎に均衡解を求める，1年単位の逐次型動学モデルである．旧資本と新規資本が区別されており，資本の情報が次の年へ更新される．基準年(2005年，計算期間は2005年から2050年)のデータには藤森ら[8]などの手法を用いて統計間の不整合を調整した社会会計表と作物の物量表を用いた．エネルギー部門については，6つのエネルギー関連財と18のエネルギー需要部門が含まれており，エネルギー関連財の価格に応じてその需給がバランスするように決定されている.

土地は6つのAgro-Ecological Regionに分割されており，土地の各部門への分配はロジット関数で記述した[9]．次に，最終需要は家計消費と資本形成，輸出，政府支出で構成されており，家計消費は線形消費支出(Linear Expenditure System)関数として記述している．国内財と輸入財の間にある一定の代替関係を仮定した(アーミントンの仮定)．国内財と輸入財がCES関数を通じて合成されるとし，財の輸出と国内への供給はCET(Constant Elasticity Trans formation)関数で記述し，変形の弾力性は0.8とした[10]．財の国際貿易は単一の国際市場を仮定している．本研究で用いたのはAIM/Hubモデルのバージョン2.0である．これは世界の全ての地域をカバーしている1年ごとの逐次型動学一般均衡モデルであり，世界全体が17地域に区分され，42の産業分類が含まれている．農産物財区分は作物が6種類，畜産物は3種類，漁業産物が1種類である．モデルの詳細については藤森ら[6][8][9]，長谷川ら[7][11]を参照されたい.

(3) シナリオ

本研究では4つのシナリオを準備した．第一に，食料消費選好変更と GHG 排出削減(気候政策)を実施しない「ベースラインシナリオ」，第二に，食料消費選好を変更した「食料消費選好変更シナリオ」．食料消費選好の変更の詳細については以下に示す．さらに，2020年から一定の割合で温室効果ガス排出量を削減し，2050 年に2020年比50%削減を達成するように設定した「気候政策シナリオ」，食料消費選好の変更を伴う気候政策を実施した「食料消費選好変更+気候政策シナリオ」とした．2030 年までに 29~41%削減とするインドネシアの気候中期目標と2070年代にカーボンニュートラルを目指す2℃目標の中間に相当するレベルを設定した．いずれのシナリオでも人口や GDP などの将来の社会経済状況には共通社会経済シナリオ SSP2 を想定した(表-1).

(4) 食料消費カロリーの想定

食料消費選好変更シナリオでは，EAT_lancet 委員会により，健康的な食生活と持続可能な食料生産のために提案された一人一日あたりの財別食料消費カロリー[12]を2050年に達成するように設定した．

表- 2 にオリジナルの EAT-Lancet 推奨値[12]を示し，図-2にはそれを本分析に適用し想定した一人一日当たりの消費カロリーを示す(表-2)．本研究では，食料消費選好の変更による食内容の変化を効用関数の形状の変化させることで表現した．具体的には，まずインドネシアの平均一人一日当たりの消費カロリーを算出し，それを達成するように地域別の所得弾力性を算出し，それをモデルで所与とした(表-3)．所得弾力性の想定を変えると将来の食料消費が変化し，それに対する農業財の価格変化を通じて，世界各国の需給・貿易が変化する仕組みになっている．例えば，食肉需要が低下すると，食肉と飼料の価格が下がり，需要の減少と価格低下に応じて世界各国の生産・消費・貿易が決まる．インドネシアについては，EAT-Lancet 委員会による推奨値は，総消費カロリーが対策なしシナリオの 3538kcal と比べて 1396 kcal 低く，そのうち，作物が 84kcal，畜産物が 107kcal 低い．

3. 結果と考察

(1) GHG 排出量

図- 3 に各シナリオの 2050 年 GHG 排出量を示す．各シナリオの 2050 年での GHG 排出量は，ベースラインシナリオで 1970 $MtCO_2$/年，食料消費選好の変更を想定したシナリオで 1840 $MtCO_2$/年(ベースライン比 6.71%の削減)，気候政策を想定したシナリオで 857 $MtCO_2$/年(ベースライン比 56.5%の削減)，食料消費選好変更+気候政策想定したシナリオで 806 $MtCO_2$/年(ベースライン比 59.1%の削減)となった．CO_2 排出量は，主にエネルギー起源であるため，食料消費選好変更の影響はあまり受けず，気候政策

表-1 SSP2 でのインドネシアの社会経済状況[4]

	人口(100万人)			GDP(10億ドル/年)		
	2005	2030	2050	2005	2030	2050
インドネシア	227	277	288	280	1210	2520

表-2 EAT-lancet による一人1日当たりの食料消費カロリー[12]

食品	1日当たり主栄養素摂取量(可能範囲)(g)	1日当たり摂取カロリー(kcal/人/日)
穀類(米、小麦、トウモロコシ、その他)	232	811
塊茎(ジャガイモ、キャッサバ)	50(0-100)	39
野菜	300(200-600)	78
フルーツ	200(100-300)	126
乳製品	250(0-250)	153
タンパク質源		
牛、羊、豚肉	14(0-28)	30
鶏肉、その他家禽類	29(0-58)	62
卵	13(0-25)	19
魚	28(0-100)	40
豆類	75(0-100)	284
ナッツ	50(0-75)	291
脂質		
不飽和脂肪酸	40(20-80)	354
飽和脂肪酸	11.8(0-11.8)	6
糖類	31(0-31)	120
合計		2413

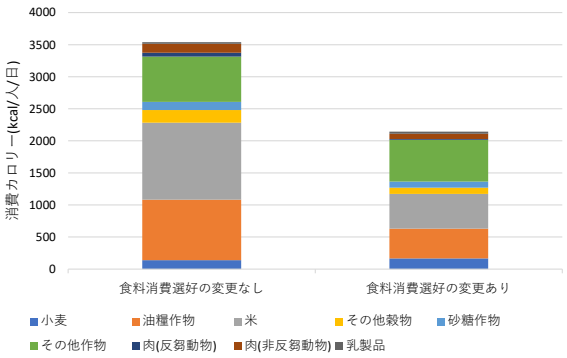


図-2 2050年インドネシアにおける一人一日当たりの食料消費カロリーの想定

表-3 財別所得弾力性

財別所得弾力性	食料消費選好の変更なし		食料消費選好の変更あり	
	2005	2050	2005	2050
小麦	0.0125	0.0094	0.0125	0.0093
米	0.0125	0.0094	0.0125	0.0093
その他穀類	0.0125	0.0094	0.0125	0.0093
佐藤作物	0.1538	0.1152	0.1538	0.1145
油糧作物	0.2907	0.2200	0.2907	0.2185
その他作物	0.0939	0.0708	0.0939	0.0704
肉(反芻動物)	0.7549	0.2639	0.7549	0.0094
肉(非反芻動物)	0.7549	0.2666	0.7549	0.0095
乳製品	0.7549	0.2648	0.7549	0.0094

の実施により大幅に削減された．CH_4，N_2O の排出量は主に農業由来の温室効果ガスであり，食料消費選好変更の実施によって食の消費が減少するため，排出削減効果がある．また，気候政策の実施についても，農業部門での排出削減対策が行われるため大幅な削減があった．

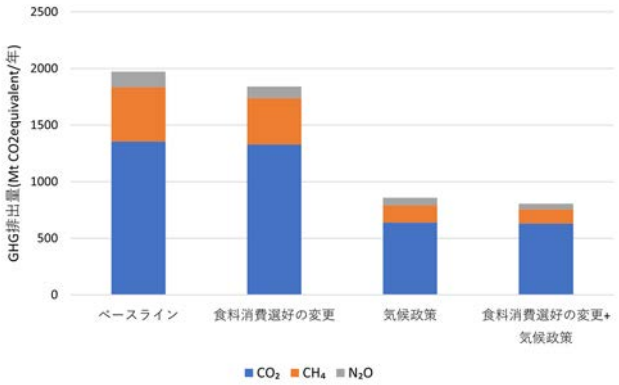


図-3　2050 年インドネシアにおける GHG 排出量

(2)　食料生産

図-4 に各シナリオの 2050 年食料生産を示す．各シナリオの 2050 年での食料生産量は，ベースラインシナリオで 13620 万トン，食料消費選好の変更を想定したシナリオで 7500 万トン(ベースライン比 45%の減少)，気候政策を想定したシナリオで 9620 万トン (ベースライン比 29%減少)，食料消費選好の変更と気候政策の両方を想定したシナリオで 6120 万トン(ベースライン比 55%減少)となった．食料生産について，食料消費選好の変更では，食の内容の変更により需要が減少したため，食料生産量も減少した．気候政策の実施では，農作地を減らすことで農業由来の温室効果ガスである CH_4，N_2O 排出削減をおこなったため食料生産量は減少した．食料消費選好の変更と気候政策の実施では，先に述べた 2 つの影響が重なるため，すべてのシナリオで最も生産量が減少した．

(3)　食料消費カロリー

図-5に各シナリオの2050年食料消費カロリーを示す．各シナリオの2050年での消費カロリーは，ベースラインシナリオで3540kcal/人/日，食料消費選好の変更を想定したシナリオで2140kcal/人/日 (ベースライン比1400kcal/人/日の減少)，気候政策を想定したシナリオで3650kcal/人/日(ベースライン比117kcal/人/日の増加)，食料消費選好の変更と気候政策の両方を想定したシナリオで2250kcal/人/日(ベースライン比1280kcal/人/日の増加)となった．図-2に示す想定した値と異なるのは，外生的に与えた食料消費変化に対し価格変化を通じて市場での需給が均衡するように調整されたためである．消費カロリーについて，食料消費選好の変更の実施では，食の内容の変更，または，生産量の減少により消費カロリーは減少した．気候政策の実施では，排出削減を目的に生産量が大幅に低下したが，需要を満たすために食料輸入が増加した．これにより国内の食料消費は増加している．食料消費選好の変更と気候政策の実施では，食料消費選好の変更による消費カロリーの減少と気候政策での輸入による増加の結果，少しの増加となった．

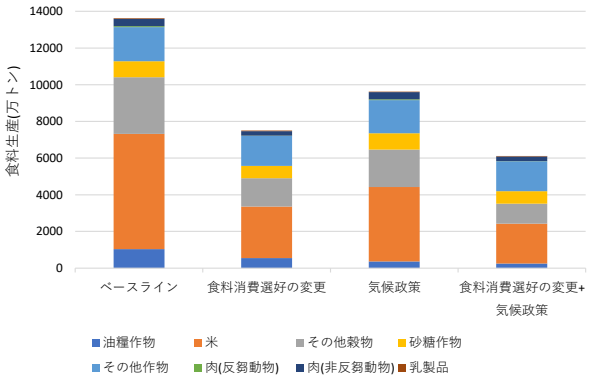


図-4　2050 年インドネシアにおける食料生産

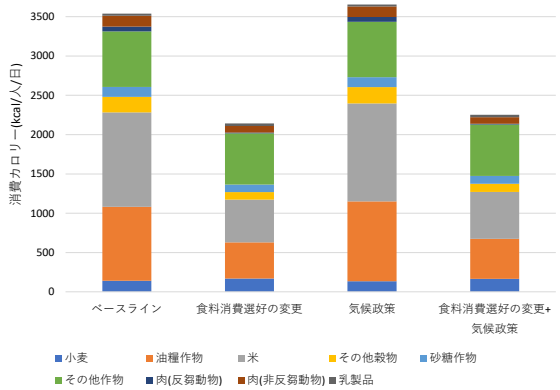


図-5　2050 年インドネシアにおける食料消費カロリー

(4)　飢餓リスク人口

図-6 に各シナリオの 2050 年飢餓リスク人口を示す．各シナリオの 2050 年での飢餓リスク人口は，ベースラインシナリオで 57.9 万人，食料消費選好の変更を想定したシナリオで 2.52 億人(ベースライン比 2.52 億人の増加)，気候政策を想定したシナリオで 39.6 万人(ベースライン比 18.3 万人の減少)，食料消費選好変更+気候政策を想定したシナリオで 1.75 億人(ベースライン比 1.74 億人の増加)となった．飢餓リスク人口について，食料消費選好の変更シナリオでは，食の内容の変更により一人一日当たりの消費カロリーが減少したため，それに伴って飢餓リスク人口が増加している．すなわち，図-2 に示すよう，EAT-Lancet 委員会により推奨された食料消費カロリーが何も対策を施さないベースラインのそれよりも低いため，この推奨値を満たすと食料消費カロリーが低下する．今回の分析では現在の国内での食料分布の公平性を将来

にわたって想定しているため，カロリー低下に伴って飢餓リスクが増加することになる．一方，気候政策の実施では，海外からの輸入量増加に伴い，飢餓リスク人口も減少している．食料消費選好の変更と気候政策の実施では，食料消費選好の変更により飢餓リスク人口は増加したが，気候政策による食料輸入の増加がその影響を軽減している．

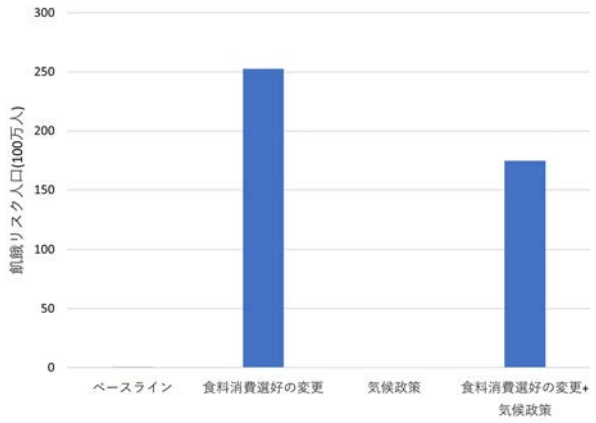


図-6　2050年インドネシアにおける飢餓リスク人口

(5)　GDP

図-7に各シナリオの2050年のGDPを示す．各シナリオの2050年でのGDPは，ベースラインシナリオで2430 (2005年10億米ドル)，食料消費選好の変更を想定したシナリオで2450 (2005年10億米ドル) (ベースライン比0.946%の増加)，気候政策を想定したシナリオで2230 (2005年10億米ドル)(ベースライン比8.0%の損失)，食料消費選好の変更と気候政策を想定したシナリオで2270 (2005年10億米ドル) (ベースライン比6.5%の損失)となった．このことから，食内容の変化によりわずかだがGDPには正の影響があり，これは産業構造全体の経済効率の改善がもたらされたことを意味する．これは，インドネシアでは農畜産業部門は他部門に比べると資本・経済効率が低く，食内容の変化により労働・資本が非農業部門にシフトしたことが要因と言える．また，食料消費選好の変更と気候政策とあわせて実施した場合においても食内容の変化が気候政策のみのシナリオよりもGDPを改善したことは，農業由来の非二酸化炭素の排出削減が増加し，これらはエネルギー分野での排出削減に比べて経済効率がよいことを意味している．一方，気候政策のみの実施では，炭素価格の上昇，エネルギー価格の高騰により経済全体に影響が波及しGDP損失が生じている．

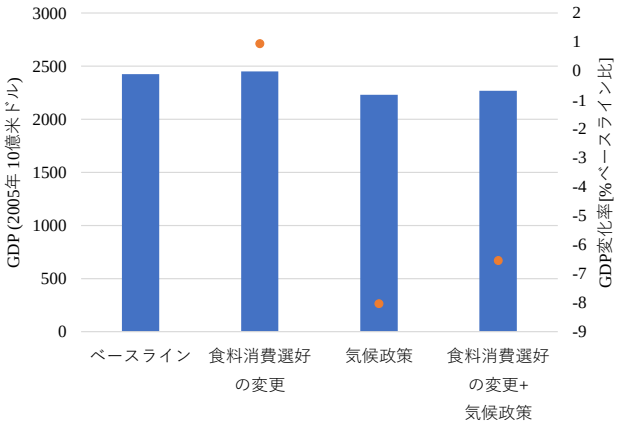


図-7　2050年インドネシアにおけるGDPの変化とベースラインからの変化率

4.　おわりに

以上の結果から，気候政策と食料消費選好の変更を組み合わせて実施することで経済ロスを軽減する結果となった．これは，食の内容を変更することによるCH_4, N_2Oの排出削減が他分野に比べて経済効率がよく，排出削減目標達成に伴う経済影響が緩和されたためであると考えられる．そのことから，食料消費選好の変更と気候政策を組み合わせて実施することで経済的便益を得ることがわかった．食料消費選好の変更を行うことは排出削減を行う手段の一つとして有効であると考えられる．一方で，食料消費選好の変更を実施することで食料消費が減少し飢餓リスク人口が増加する結果となった．今回のような国内全体で一律に食料消費を減らす政策の実施やEAT-lancetを食料消費の少ない途上国に適応することで飢餓リスク人口の増加を招く可能性がある．これは，政策実施によって食料消費の減少を招き，それに伴い食料生産活動が衰退するためであると考えられる．そのため，世界一律の食料消費の推奨値ではなく，各国の農畜産生産状況，食料安全保障，食文化や社会経済状況などの各国固有の状況を反映した食料消費推奨値が必要となろう．また，推奨値達成の実現においても国内一律の食政策の実施，例えば，国内一律の課税や補助金などは貧困層に悪影響がもたらしかねない．国平均だけでとらえることなく，国内の食料分布や家計レベルでの消費内容の違いなどを考慮した慎重な政策の実施，悪影響を受けうる家計・世帯への手当等も同時に考慮する必要がある．

今回，食料関連対策の実施により結果が改善したが，この追加的対策にかかる費用は安価とはいえない．実際にかかる費用を考慮すると波及的な悪影響や実現への障壁などがあるのかもしれない．この点は今後の課題とする．

宗教的背景について，インドネシアで主に信仰されて

いる宗教はイスラム教である．イスラム教では，豚肉を食べることが禁止されており，加工方法によっては鶏，牛肉も禁止されている．このような背景から畜産物のこのような背景から畜産物の消費は比較的少ないが，経済発展による所得の向上，観光客・海外居住者の増加により近年，畜産物の消費量は増加傾向にあり，これら考慮してもインドネシアで食料消費選好の変更を行う必要はあると考えられる．また，食料消費選好の変更の実現可能性について，現在，肉が少なくオリーブ油からの脂肪の摂取量の多い地中海での食事や，インド，中国，西アフリカなどの地域でも，動物性たんぱく質ではなく，植物性たんぱく質をより多く含む食事がなされているため，そのような食事を普及させることで食料消費選好の変更の実現可能性は高まると考えられる．

最後に，インドネシアだけではなく，その他アジア地域についても分析を行うことで，国ごとの影響を比較する．今回設定した気候政策シナリオはモデル内の既存のシナリオであり，インドネシアの排出削減目標に合わせられていないので，排出削減量を設定したシナリオで分析する必要もある．また，気候政策での輸入量の増加について，今回使用したモデルが国単位で計算を行うものであり，海外の影響を考慮できているのかどうかの確認も必要である．

謝辞：本研究の実施において藤森は(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20211001)および住友財団環境研究助成による支援を受けた．長谷川は(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20221002)による支援を受けた．ここに記し感謝の意を表す．

REFERENCES

1) UNFCCC, Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President., 2015.
2) Enhanced nationally determined contribution republic of indonesia 2022.
3) 生津 路子, 藤森 真一郎, 松岡 譲, 応用一般均衡モデルを用いたアジア地域における温室効果ガス排出量削減策の分析, 土木学会論文集G（環境）, Vol.69(6), pp.II_359-II_370, 2013.
4) 西浦 理, 藤森 真一郎, 大城 賢, アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析, 土木学会論文集G（環境）, Vol.76(5), pp.I_97-I_107, 2020.
5) 和田 悠暉, 長谷川 知子, 日米の食の変化を考慮した農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究, 土木学会論文集G（環境）, Vol.77(5), pp.I_177-I_182, 2021.
6) Fujimori, S., Masui, T., & Yuzuru, M., (PDF) AIM/CGE [basic] manual, Tsukuba, Japan: NIES., 2012.
7) 長谷川 知子, 藤森 真一郎, 申 龍熙, 高橋 潔, 増井 利彦, 気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析, 土木学会論文集G（環境）, Vol.68(5), pp.I_227-I_236, 2012.
8) 藤森 真一郎, 松岡 譲, エネルギー統計・経済統計の統合とそれを用いた世界全域における化石燃料起源のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究, 環境システム研究論文集, 36 巻, p. 37-48, 2008.
9) Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., & Takahashi, K., Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions, Food Security, Vol.6(5), pp.685–699, 2014.
10) Hans, L., Rebecca, L. H., Sherman, R., A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS, Microcomputers in Policy Research. Vol. 5: International Food Policy Research Institute, 2002.
11) 長谷川 知子, 藤森 真一郎, 高橋 潔, 増井 利彦, 共通社会経済シナリオSSPを用いた飢餓リスクに関する将来シナリオの開発, 土木学会論文集G（環境）, 2014, 70 巻, 5 号, p. I_1-I_12, 2014.
12) Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet 2019, 393(10170): 447-492.