15.2050年全世界ネットゼロ達成に向けた先進国の役割の評価

筒井　紀希[1]*・藤森　真一郎[2]・大城　賢[2]

[1]非会員　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Cクラスター C-1-367）

[2]正会員　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Cクラスター C-1-361）

＊ E-mail: *tsutsui.toshiki.73s@st.kyoto-u.ac.jp*

近年，今世紀後半の排出削減目標としてネットゼロ目標を示す国が増加している．しかし，NDCやネットゼロ目標を実施した場合，1.5℃目標達成には不十分であることが指摘されており，追加の排出削減が必要となる．追加の排出削減を分担する方法の1つとして，気候変動に対する先進国の責任を考慮し，先進国が排出削減を行うことがあげられる．本研究は全世界を対象とし，2050年全世界ネットゼロ排出達成に向けて，現在各国が示す排出削減目標に加えて先進国が追加で排出削減を行った場合の経済的影響を，応用一般均衡モデルを用いて計算した．結果は，先進国では大規模な負の排出を達成し，家計消費損失の増加を示した．一方で先進国での家計消費損失率は一部の途上国と同程度であり，このような排出削減を先進国が実施できる可能性が示唆された．

Key Words : *Climate change, Mitigation measure, Paris agreement, NDC, Net zero target*

1. はじめに

近年，気候変動に関する問題への関心が高まっている．気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)の第6次評価報告書[1]は，人間の活動が大気，海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地が無いことを報告している．

2015 年の第 21 回気候変動枠組条約締結国会議において採択されたパリ協定では，世界共通の長期目標として，産業革命前からの平均気温の上昇を 2 ℃より十分下方に保持し，1.5 ℃に抑える努力を追求することが掲げられている．同協定の締結国には，2020年以降の削減目標である NDC (Nationally Determined Contribution)を 5 年ごとにより野心的なものに更新することが求められており，NDC の更新期限が 2020 年であったことから，各国が更新された NDC (以下，Updated NDC)を提出した．

Updated NDC は主に 2030 年までの排出削減目標であり，それ以降の排出削減については示されていない国が多い．パリ協定では，2 ℃目標や 1.5 ℃目標を達成するために，今世紀後半に GHG (Greenhouse Gas)の人為的な発生源による排出量と吸収量の均衡を達成することが掲げられている．また，IPCC の 1.5℃特別報告書[2]は，1.5℃目標を達成するシナリオの排出経路では，2050 年頃に人為起源の CO_2 排出量が実質ゼロに達し，2 ℃目標を達成するシナリオでは，2070 年頃に人為起源の CO_2 排出量が実質ゼロに達することを報告している．こうした背景も踏まえ，近年，各国が 2030 年以降の排出削減目標として，ネットゼロ目標やカーボンニュートラル目標を提出・表明している．国際連合環境計画 (United Nations Environment Programme; UNEP)の Emissions Gap Report 2022[3]によれば，2022 年 9 月 23 日時点で，88 の国・地域が法律，LTS (Long Term Strategy)を含む政策文書，政府高官による表明のいずれかでネットゼロ目標を表明しており，これは世界の GHG 排出量の 79%を占める．

しかし，Updated NDC 実施後にネットゼロ目標を実施した場合，1.5 ℃目標の達成には不十分であることが指摘されており[3)-6)]，1.5 ℃目標を達成するためには追加で排出削減を行う必要がある．追加の排出削減を各国で分担する方法について，いくつかの考え方が存在する．1 つは，全世界で一律の炭素価格を導入し，最も経済的に効率良く追加の排出削減を行う考え方である．この考え方は 2 ℃目標や 1.5 ℃目標に沿った排出削減シナリオに関する研究で広く用いられている．しかし，この考え方に基づき排出削減を行う場合，排出削減に伴う費用を世

界全体で最小化できるが，排出削減分担の公平性・衡平性を考慮できない．その他の考え方の 1 つが，これまで多く GHG を排出してきた先進国が排出削減を積極的に行うべきだとするものである．気候変動枠組条約では，気候変動に対する責任は全世界共通であるが，先進国における責任が途上国よりも大きいとする「共通だが差異のある責任」 (Common but Differentiated Responsibilities and Respective Capabilities ; CBDR-RC)が掲げられており，この考え方に基づく場合，先進国は全世界で一律の炭素価格を導入する考え方に基づく排出削減よりも多く排出削減を行う必要があることが示唆されている[7].

先進国が追加の排出削減を行う場合，ネットゼロ目標の達成年として多くの先進国が示している 2050 年頃には，先進国は負の排出を達成する必要があると考えられる．負の排出を達成するためには，CDR (Carbon Dioxide Removal)が重要な役割を果たすと考えられる．CDR としては，植林やバイオマスと二酸化炭素の回収貯留を組み合せて負の排出を実現する技術である BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)が注目されてきた．しかし，これらの技術の過度な利用は，土地利用競合の問題を引き起こし，食糧生産等に影響を与えることが指摘されている[8]．近年，植林や BECCS に加えて，大気中から二酸化炭素を回収する DACCS (Direct Air Capture with Carbon Storage)も注目を集めている．DACCS は，二酸化炭素回収に多くのエネルギーを要する一方で，土地利用のトレードオフを低減させる効果を持ち，植林や BECCS と並び，主要な CDR となることが期待されている[9].

以上の背景を受けて，本研究では，Updated NDC及びネットゼロ目標に加えて，先進国がCDRを多く利用して追加の排出削減を行う場合の経済やエネルギーシステムへの影響を推計することを目的とする．

2. 手法

(1) 全体像

本研究での計算は，大きく分けて2つの段階で構成される．まずネットゼロ目標の情報を集め，各国のネットゼロ目標及びUpdated NDCを基に温室効果ガス排出経路を設定する．次に，設定した温室効果ガス排出経路，将来の社会経済変化の想定を CGE (Computable General Equilibrium)モデルである AIM/Hub (Asia-Pacific Integrated Model/Hub)モデルに組み込み，世界全体を対象として将来のエネルギー需給構成の変化や経済影響などを推計する．計算対象期間は2005年(基準年)から2050年までである． AIM/Hubモデルの推計結果から，先進国による追加の排出削減が可能であるか，もし可能であるならばどのような方策で達成されるかについて考察する．

(2) AIM/Hubモデル

本研究で用いるAIM/HubモデルはFujimori et al. (2017)[10]によって開発された逐次均衡型動学CGEモデルである．モデルは相補性問題として記述され，1期を1年とし1期毎に均衡解を求める．本モデルの特徴は農業，土地，エネルギー供給部門について詳細に記述していることであり，42の産業部門を持つ．部門別に資本ストックを持ち，投資及び年4%の資本減耗を毎期行う．この投資について，その部門配分は資本価格により定められ，一度配備されるとその部門に固定される．世界全体を対象に計算する際は，世界を17地域に分割し，推計を行う．また，2005年から2015年までの期間を，IEAのEnergy Balance Tableでキャリブレーションする期間としている．詳細についてはFujimori et al. (2017)[10]を参照されたい．本モデルでは，植林，BECCS及びDACCSがCDRとして扱われている．AIM/HubモデルにおけるDACCSの扱いについては西浦ら(2022)[11]を参照されたい．

(3) シナリオの全体像

シナリオは Baseline シナリオ，2020NDC_NZE シナリオ，2020NDC_NZE_Dev シナリオの 3 つのシナリオを設定する．Baseline シナリオは排出削減を行わないシナリオである．2020NDC_NZE シナリオは Updated NDC 及びネットゼロ目標に沿った排出削減，2020NDC_NZE_Dev シナリオは，Updated NDC 及びネットゼロ目標に沿った排出削減に加えて，2050 年に全世界でネットゼロを達成するように追加で排出削減を行うシナリオである．追加の排出削減は OECD で 2030 年以降に実施するものとし，OECD の各地域での排出削減分担は，各地域の Baseline シナリオにおける GHG 排出量に基づき以下の式(1)のように決定した．

$$GHGC_{r,y} = GHGtarget_{r,y} - \left(GHGres_y \times \frac{GHG_{r,y}}{\sum_{r \in \mathrm{OECD}} GHG_{r,y}} \right) \quad (1)$$

ただし，$GHGC_{r,y}$は地域r，年yにおける排出制約，$GHGtarget_{r,y}$はUpdated NDC及びネットゼロ目標を実施した際の地域r，年yの GHG 排出量，$GHG_{r,y}$は Baseline シナリオにおける地域r，年yの GHG 排出量，$GHGres_y$は年yにおける 2020NDC_NZE シナリオと，2030 年から 2050 年にかけて全世界でネットゼロを達成するよう線形に排出削減を行うシナリオの排出量の差分である．また，将来の社会経済状況を，気候変動関連の研究で広く用いられている共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathway; SSP)[12),13]から中庸なシナリオである SSP2 シナリオを用いて設定する．

(4) 排出削減目標として用いるデータ

本研究では，各国が提出・表明した Updated NDC 及びネットゼロ目標のデータを収集し，集めたデータをモデル内に導入する．Updated NDC のデータ収集に関しては，筒井ら (2022)[14]を参照されたい．なお，本研究では，Updated NDC で示されている排出削減目標のみを扱っており，再生可能エネルギー導入量に関する目標などは扱っていない．また，ネットゼロ目標のデータは Net Zero Tracker (2022)[15]を参照する．

各国が提出・表明したネットゼロ目標は，国によって NDC や LTS (Long Term Strategy)内に明記されているか，自国の法律に明記されているか，単に国会等で表明しただけかなど表明の形式が異なっている．本研究では，各国が提出・表明したネットゼロ目標は，どのような形式であっても実施されるものとして扱う．

ネットゼロ目標は，国によって対象ガスが GHG か CO_2 か異なり，対象ガスが明記されていない場合も多い．本研究では，ネットゼロ目標は全て GHG を対象とした目標であると仮定し，CO_2 を対象としたネットゼロ目標に関しても GHG ネットゼロを達成するとして扱った．

ネットゼロ目標の実施開始年は国によって異なり，実施開始年が明記されていないため不明である場合も多い．本研究では一律で Updated NDC 実施後の 2030 年からネットゼロ目標を実施するとして扱う．

また，ネットゼロ目標を表明していない国に関しては，2030 年時点での Baseline シナリオからの排出削減率を 2030 年以降も維持するとして扱った．

ネットゼロ目標を表明していないが，2030年以降の排出削減目標を提出・表明している国に関して，本研究では2030年以降の排出削減目標を取り扱わない．UNEP (2022)[3]によると，8つの国・地域がLTSにてネットゼロ目標ではない2030年以降の排出削減目標を表明しているが，これは世界のGHG排出量の2%しか占めない．そのため，このような仮定を置いても結果には大きな影響を与えないと考えられる．

3. 結果

(1) GHG排出量

図-1 は各シナリオにおける GHG 排出量を示す．2050 年の世界全体での GHG 排出量は，2020NDC_NZE シナリオでは 22.9 $GtCO_2eq/yr$，2020NDC_NZE_Dev シナリオでは 3.0 $GtCO_2eq/yr$ である．2020NDC_NZE シナリオにおける 2050 年の GHG 排出量は，OECD では 1.4 $GtCO_2eq/yr$，非 OECD では 21.4 $GtCO_2eq/yr$ である．2020NDC_NZE_Dev シナリオでは，OECD にてより急速な GHG 排出削減が進むため，2040 年頃には排出量が負となり，2050 年には排出量が−18.6 $GtCO_2eq/yr$ となる．

(2) 一次エネルギー供給

図-2 は各シナリオにおける2050年の一次エネルギー供給量を示す．2020NDC_NZE シナリオではOECD，非OECDともに石油・石炭の供給量減少により，一次エネルギー供給量が減少する．また，再生可能エネルギーの導入が拡大する．2020NDC_NZE_Devシナリオでは，天然ガスの供給量が増加するが，これはDACCSで天然ガスを利用しているためである．天然ガスの供給量が増加することで，一次エネルギー供給量も増加し，Baseline シナリオを上回る．

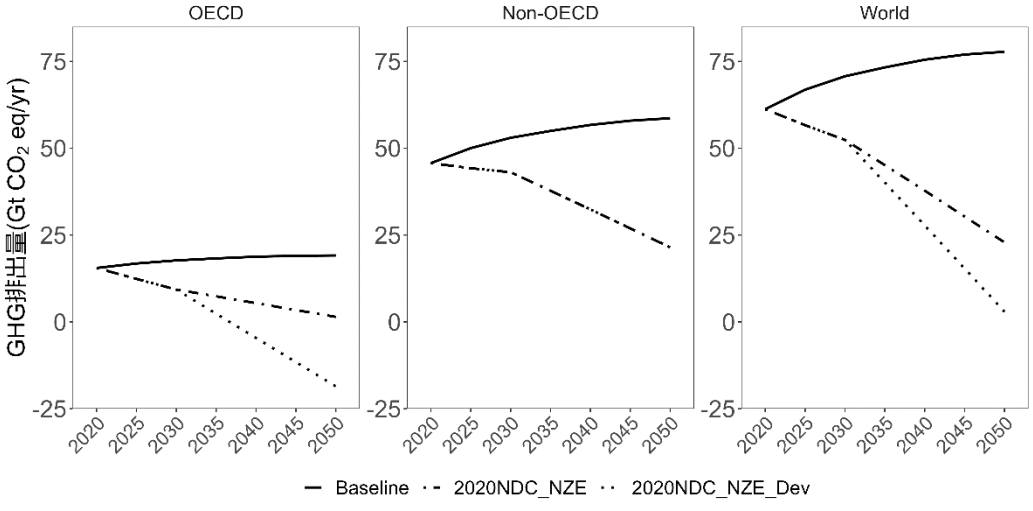


図-1 各地域での GHG 排出量の推移

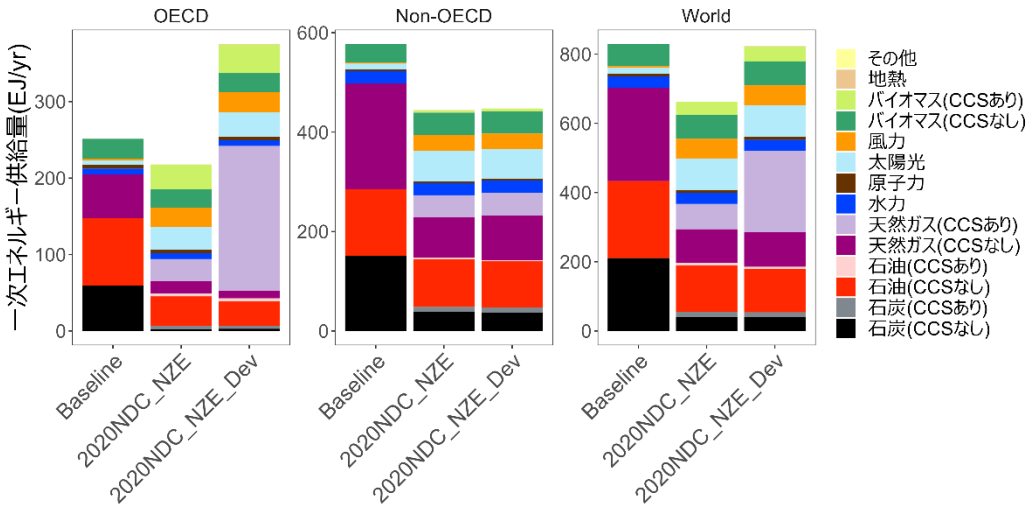


図-2　2050 年の一次エネルギー供給量

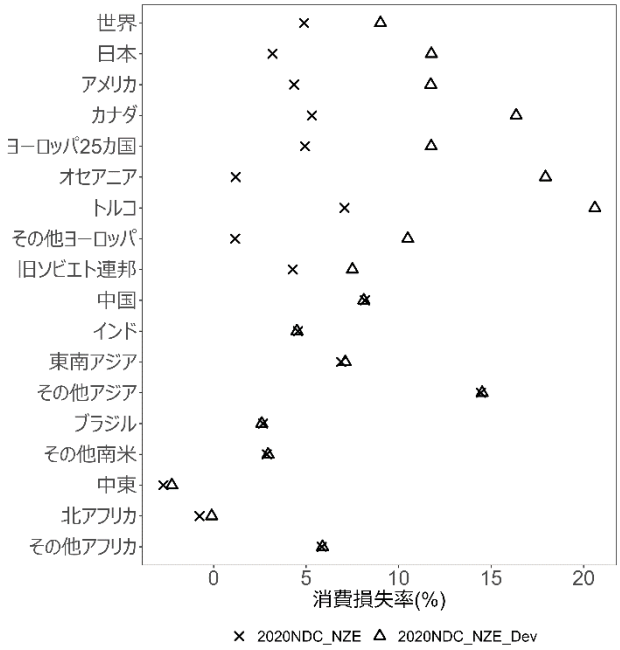


図-3　2050 年の各地域での Baseline シナリオからの消費損失率

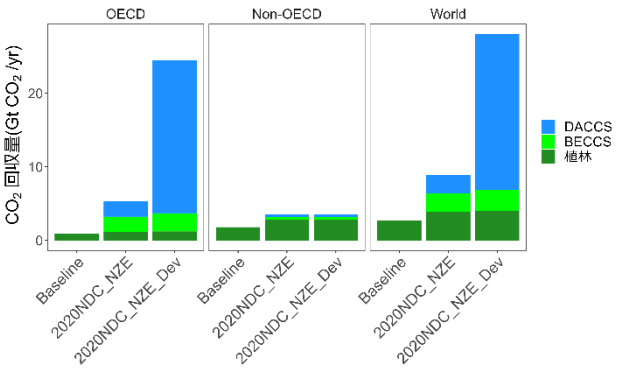


図-4　2050 年の各地域での CDR による二酸化炭素回収量

(3) 経済影響

図-3 は世界 17 地域における 2050 年の Baseline シナリオからの消費損失率を示す．2050 年における世界全体での消費損失率は，2020NDC_NZE シナリオでは 4.9%，2020NDC_NZE_Dev シナリオでは 9.0%である．地域別に見ると，2020NDC_NZE_Dev シナリオにおいて排出削減量が増加した OECD において，消費損失率が 7-17 ポイント程度増加する．非 OECD では，2020NDC_NZE シナリオと 2020NDC_NZE_Dev シナリオにおける消費損失の変化はほとんど見られないが，旧ソ連では 3 ポイント程度の消費損失の増加が見られる．

(4) 二酸化炭素回収量

図-4 は各シナリオにおける 2050 年の CDR による二酸化炭素回収量を示す．2020NDC_NZE シナリオと 2020NDC_NZE_Dev シナリオでは，OECD において二酸化炭素回収量が大幅に増加する．特に OECD では，2020NDC_NZE_Dev シナリオにおいて DACCS による二酸化炭素回収量が増加し，2050 年には DACCS によって 20.7 Gt/yr の二酸化炭素を回収する．また，非 OECD では，OECD と比較して二酸化炭素回収量に占める植林の割合が高く，2050 年には植林によって 2.8 Gt/yr の二酸化炭素を回収する．

4.　考察

2050 年に全世界ネットゼロを達成するよう先進国で追加の排出削減を行った場合，OECD では 2040 年頃に GHG 排出量が負となり，2050 年には大規模な負の排出が達成された．また，大規模な負の排出を達成するため

に，2020NDC_NZE シナリオと比較して CDR の利用量が大きく増加し，特に DACCS の利用量が増加した．OECD では，2020NDC_NZE シナリオにおいて，既に植林や BECCS のポテンシャルを使い切っている，もしくは植林や BECCS の利用量増加に伴い，DACCS よりもこれらの削減コストが高くなっていると考えられる．そのため，2020NDC_NZE_Dev シナリオで生じる追加の排出削減のほとんどを DACCS で達成していると考えられる．また，本研究では西浦ら (2022)[11]に基づき，DACCS で二酸化炭素を回収する際に天然ガスを用いると想定しているため，一次エネルギー供給において天然ガスの利用量が大幅に増加した．

経済影響に注目すると，2020NDC_NZEシナリオと比較して，2020NDC_NZE_DevシナリオではOECDにおいて消費損失が増加した．一方で，非OECDでは旧ソ連を除いて消費損失はほぼ増加しなかった．このことから，先進国が追加の排出削減を行う場合，消費損失の観点では途上国に追加の経済影響はほぼ生じないと言える．旧ソ連での消費損失の増加は，OECDの排出削減により貿易条件等が変化したためであると考えられる．また，2020NDC_NZEシナリオではOECDにおける消費損失率は，非OECDにおける消費損失率より小さい傾向にあったが，2020NDC_NZE_Devシナリオでは，OECDにおける消費損失率が非OECDにおける消費損失率より大きい傾向となった．ただし，2020NDC_NZE_Devシナリオにおける OECDの多くの地域での消費損失率は，非OECDであるその他アジアと同程度であり，このような排出削減をOECDが実施できる可能性が示唆された．

5. まとめ

本研究では，Updated NDC及びネットゼロ目標に加えて，先進国がCDRを多く用いる形で追加の排出削減を行う場合の経済やエネルギーシステムへの影響をAIM/Hubモデルを用いて推計した．

AIM/Hubモデルによる計算の結果，2050年に全世界でネットゼロを達成するよう先進国で追加の排出削減を行った場合，先進国では2050年のGHG排出量が−18.6GtCO$_2$eq/yrとなることが明らかになった．このような大規模な負の排出を達成するために，CDR，特にDACCSの利用が進み，2050年にはDACCSにより20.7 Gt/yrの二酸化炭素を回収すると推計された．また，先進国では追加の排出削減により消費損失率が7-17ポイント程度増加した一方で，途上国ではほぼ増加しなかった．その結果，OECDにおける消費損失率は非OECDより大きい傾向にあると確認できた．一方で，OECDにおける消費損失率は消費損失率の大きい一部の途上国と同程度であった．

本研究の結果から，先進国が追加で排出削減を行う場合，2050年には先進国が大規模な負の排出を達成する必要があり，CDR，特にDACCSが重要な役割を果たすと考えられる．また，先進国におけるマクロ経済への負の影響が増加し，途上国より大きくなる傾向にある．しかし，経済への負の影響は一部の途上国と同程度であり，先進国によるこのような排出削減の可能性が示唆された．本研究から，2050年全世界ネットゼロ達成に向けて，先進国が積極的に排出削減を行う排出経路が新たに示唆された．

今後の課題として以下の2点があげられる．1点目に本研究では先進国が追加の排出削減を行うと想定したが，その他にも途上国が追加の排出削減を行う，先進国が追加の排出削減を行いつつ排出権取引を活用するなどの可能性が考えられる．そのため，このような多様な排出削減分担方法を考慮したシナリオの推計が必要となる．2点目に本研究では先進国におけるCDRの利用量が大幅に増加したが，このような大規模なCDRの利用は，実際には実現困難である可能性が考えられる．そのため，西浦ら (2021)[16]で推計された二酸化炭素の地下貯留容量との比較等，実現可能性の検討が必要である．

謝辞：本研究は(独)環境再生保全機構環境研究総合推進費（JPMEERF20211001），公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金の支援を受けた．

REFERENCES

1) IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. L. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, T. K. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, & B. Z. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, Eds.), 2021.

2) IPCC, Global Warming of 1.5℃: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5℃ above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (1st ed.), Cambridge University Press, 2018. https://doi.org/10.1017/9781009157940

3) United Nations Environment Programme, Emissions Gap Report 2022: The Closing Window—Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies, 2022. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/40874

4) Meinshausen, M., Lewis, J., McGlade, C., Gütschow, J., Nicholls, Z., Burdon, R., Cozzi, L., & Hackmann, B., Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 ℃, Nature, Vol.604(7905),

pp.304–309, 2022. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04553-z

5) Ou, Y. N., Iyer, G., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A. A., Hultman, N., McFarland, J. R., Binsted, M., Cui, R., Fyson, C., Geiges, A., Gonzales-Zuñiga, S., Gidden, M. J., Höhne, N., Jeffery, L., Kuramochi, T., Lewis, J., Meinshausen, M., Nicholls, Z., … McJeon, H., Can updated climate pledges limit warming well below 2°C?; Increased ambition and implementation are essential, Science, Vol.374(6568), pp.693–695, 2021. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABL8976/SUPPL_FILE/SCIENCE.ABL8976_SM.PDF

6) Höhne, N., Gidden, M. J., den Elzen, M., Hans, F., Fyson, C., Geiges, A., Jeffery, M. L., Gonzales-Zuñiga, S., Mooldijk, S., Hare, W., & Rogelj, J., Wave of net zero emission targets opens window to meeting the Paris Agreement, Nature Climate Change, Vol.11(10), pp.820–822, 2021. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01142-2

7) van den Berg, N. J., van Soest, H. L., Hof, A. F., den Elzen, M. G. J., van Vuuren, D. P., Chen, W., Drouet, L., Emmerling, J., Fujimori, S., Höhne, N., Kõberle, A. C., McCollum, D., Schaeffer, R., Shekhar, S., Vishwanathan, S. S., Vrontisi, Z., & Blok, K., Implications of various effort-sharing approaches for national carbon budgets and emission pathways, Climatic Change, Vol.162(4), pp.1805–1822, 2020. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02368-y

8) Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R. B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J. G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., … Yongsung, C., Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions, Nature Climate Change, Vol.6(1), pp.42–50, 2016. https://doi.org/10.1038/nclimate2870

9) Fuhrman, J., McJeon, H., Patel, P., Doney, S. C., Shobe, W. M., & Clarens, A. F., Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5 ℃ future, Nature Climate Change, Vol.10(10), pp.920–927, 2020. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0876-z

10) Fujimori, S., Masui, T., & Matsuoka, Y., AIM/CGE V2.0 Model Formula, Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspectives, pp.201–303, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3869-3_12

11) 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価, 土木学会論文集 G（環境）, Vol.78(5), pp.I_417-I_427, 2022. https://doi.org/10.2208/jscejer.78.5_I_417

12) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P., A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways, Climatic Change, Vol.122(3), pp.387–400, 2014. https://doi.org/10.1007/S10584-013-0905-2/TABLES/2

13) Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., … Tavoni, M., The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, Global Environmental Change, Vol.42, pp.153–168, 2017. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

14) 筒井紀希, 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, 各国の 2030 年温室効果ガス排出目標更新を踏まえた排出量取引の有効性, 土木学会論文集 G（環境）, Vol.78(5), pp.I_405-I_416, 2022. https://doi.org/10.2208/jscejer.78.5_I_405

15) Net Zero Tracker, Net Zero Tracker, 2022. https://zerotracker.net/

16) 西浦理, 藤森真一郎, 大城賢, 世界およびアジアにおける二酸化炭素の地下貯留容量を考慮した気候変動緩和策の評価, 土木学会論文集 G（環境）, Vol.77(5), pp.I_251-I_262, 2021. https://doi.org/10.2208/jscejer.77.5_I_251