

論文の内容の要旨

論文題目 地理的・時間的解像度を詳細化した世界エネルギーシステムモデルによる
低炭素化技術の導入可能性に関する研究
Feasibility Study on Low-carbon Technologies Using a Regionally and
Temporally Disaggregated Global Energy System Model

氏 名 大槻 貴司

本論文は世界エネルギーシステムモデル（世界モデル）の地理的・時間的解像度の適正水準を提案し、更に、地理的・時間的に精緻な世界モデルを開発して気候変動緩和策を評価したものである。緩和策の評価ではエネルギー供給側技術を包括的に取扱い、費用効率的な技術選択を分析すると共に、昨今脚光を浴びる水素や自然変動電源（Variable Renewable Energy = VRE）の大規模導入可能性を検討した。本論文は全7章で構成される。

第1章では本論文の全体背景や既往モデルのレビューを実施し、解像度設定に係る課題を指摘した。即ち、既往モデルの地理的・時間的解像度は簡略化されていること、そのため、低炭素資源の地域偏在やエネルギー・CO₂輸送（水素輸送含む）といった地理的特性、及び、VRE発電出力の時間的特性の両者のモデル化が不十分であることを定性的に論じた。このような背景から研究目的として次の3点を設定した。

- ① 世界モデルの地理的・時間的解像度が技術評価に及ぼす影響を定量評価し、解像度の適正水準（妥当な解析結果を得られる解像度水準）を明らかにすること
- ② 地理的・時間的解像度を精緻化した世界モデルを構築し、低炭素化技術の最適導入量を評価すること
- ③ 昨今脚光を浴びる技術（特に水素やVRE）について、大量導入可能性や経済的導入条件を明らかにすること

第2章ではモデル構築にあたり、低炭素化の技術的方策を俯瞰し、各対策の技術経済的特徴を整理した。その後、本論文で構築したモデル群の全体像、および、それらの中心となる動学最適化型世界モデル（New Earth 5.0 = NE5.0）を詳述した。NE5.0は世界に類を見ない詳細地域分割（世界363地域）に基づき、資源・需要の偏在性やエネルギー・

CO₂輸送を精緻に表現可能な特長がある（図1）．NE5.0モデルの分析対象期間は2015~2050年，発電部門の時間的解像度は年間64時間帯である．

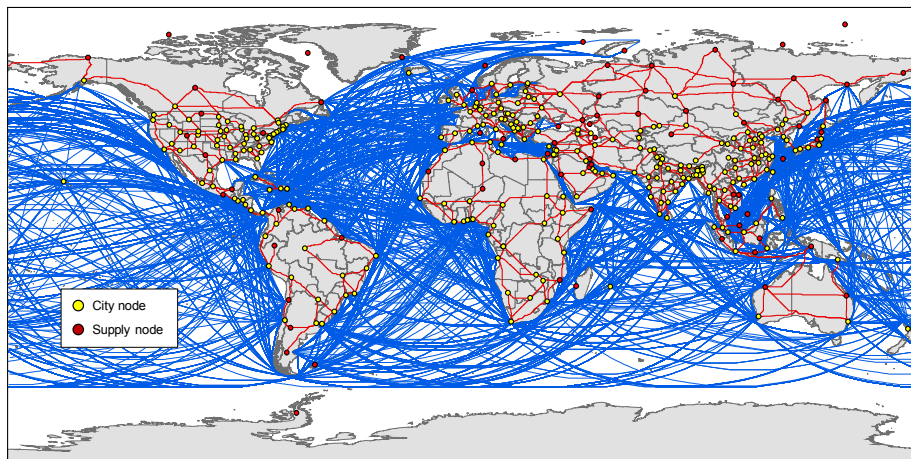


図1 NE5.0モデルの地域分割とエネルギー・CO₂輸送経路の想定

第3章では，世界モデルの地域細分化の効果や，地理的解像度の適正水準を考察した．具体的には，NE5.0を基にして解像度を下げたモデル（14~306地域分割で合計6モデル）を構築し，共通の前提条件における最適解を比較分析した．その結果，高解像度モデルでは輸送システムが明示化されるため，地理的偏在性が強く・輸送費用が高いエネルギーの導入が抑制されることが分かった．特に風力発電が顕著に減少し，電源選択の分析には高解像度化が重要といえる．また，水素輸送等のインフラ最適配置を分析できることも重要な効果の一つとして確認した．

他方で，ある程度の地理的解像度に達すると，世界全体の主要な結果に類似性が見られた．そこで，363地域版モデルとの結果差異を定量化するため，「変化度」という指標を定義し，100地域以上では「変化度」が一定水準に収まることを確認した．本研究では100地域以上を適正水準と判断し，第5章や第6章にて地理的・時間的に精緻なモデルを構築する際には世界100~132地域を選択している．

第4章では，NE5.0（363地域分割）を用いて低炭素化技術の導入可能性評価を行った．

まず，第4.1節では低炭素システムにおける技術選択や輸送システムの役割を分析した．その結果，2℃目標相当の排出削減には需要側の省エネルギーと代替燃料利用（水素等），そして発電部門のネガティブエミッションを組み合わせる姿が費用最適と評価された．CO₂貯留はネガティブエミッションの核となる技術であり，帯水層貯留に利用制約を課すとCO₂限界削減コストが大幅に上昇した．エネルギー・CO₂輸送の観点から興味深い結果としては，水素は「地産地消」が最適解となり，長距離輸送への経済的課題が示唆された．また，帯水層貯留に制約を課したケースでは，その他の貯留適地（枯渇ガ

ス田等)を最大限に利用するため、CO₂排出地域から天然ガス生産国へのCO₂輸送が増加した。エネルギー消費国と天然ガス資源国の新たな協力の可能性が示唆されている。

第4.2節では水素エネルギーシステムに焦点を絞り、水素発電や燃料電池自動車(FCV)、国際水素輸送ネットワークの経済的導入条件を分析した。その結果、水素発電の大規模導入には、強力なCO₂排出削減政策に加え、水素製造・輸送の大幅な低コスト化が必要であることが分かった(図2a)。他方、乗用FCV普及には、水素供給費用よりも車両価格の低減が鍵となることが明らかとなった(図2b)。仮に乗用FCV価格がガソリンハイブリッド車相当に低減した際には、2050年の世界の保有台数で4~6億台規模に達する結果が得られている(図2bのFcv20k\$の行)。国際水素輸送については、液化水素タンカー輸送の拡大には参照コスト比で80~90%程度のコスト削減が必須であり、さもなければ隣接地域間でのパイプライン輸送に留まる可能性が示唆された。

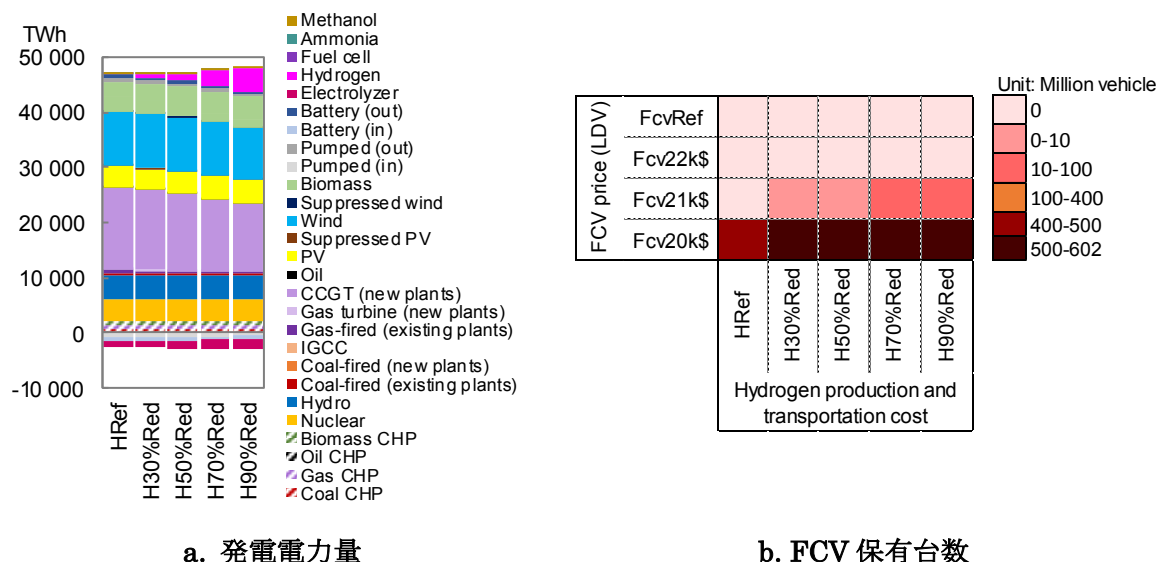


図2 発電・乗用車での水素の経済的導入条件(2050年,世界全体,CO₂制約有)
 注: HRef~H90%Redは水素製造・輸送費の想定(例えば, H90%Redは参照費用比で90%減)。FcvRef~Fcv20k\$は2050年の乗用FCV価格想定(例えば, 20k\$は2万ドル/台)

第5章ではVRE大量導入状況を分析する際に必要な時間的解像度の水準を検討した。具体的には、世界100地域分割の電源構成モデルNE5.0-Eを構築し、7通りの時間的解像度(年間2時間帯~年間8760時間帯)の最適解を比較した。各解像度のモデルで100%VREの電源構成を解析した結果、年間2~64時間帯のモデルではVREや蓄電池、地域間送電の最適導入量が過小評価され、それに伴い、総発電費用も低く見積もられることが分かった。低解像度モデルではVREに楽観的な評価となることが示唆されている。他方で、年間2190時間帯(年間365日×6時間帯/日)や年間2920時間帯(年間365日×8時間帯/日)のモデルでは8760時間帯モデルと類似結果が示された。本研究では年間2190時間帯以上

を適正水準と判断し、次章のモデル構築では年間2920時間帯を選択した。

第6章では、地理的・時間的に詳細な逐次動学最適化型世界モデルNE5.0-Rを構築し、VREを中心とした電力・エネルギー供給の可能性を評価した。NE5.0-Rの解像度は、第3章と第5章の検討を基に、世界132地域分割・年間2920時間帯と設定した。分析期間は2015～2050年である。モデル規模や計算時間を抑制するため、逐次動学的手法を採用した。

モデル内の全技術が利用可能な「AllTech シナリオ」と2050年に100%VREで電力・水素供給を行う「RE100PH シナリオ」を数値解析した。その結果、AllTech シナリオではCO₂貯留が大規模に実施され、コスト最適なVREシェア（世界全体、発電量ベース）は2050年に14%とそれ程大きくない結果が得られた。但し、CO₂貯留については社会的受容性等の課題があることから、その不確実性を加味した分析が今後必要である点には留意されたい。後者のシナリオでは、VREの設備利用率の低さや水素製造のため、VREの新規建設を大幅に加速させる必要があることが分かった。世界の総発電設備容量は2015年から2050年にかけて7.5倍に拡大した（図3）。このような大規模導入は広大な設置面積を必要とし、国によっては土地利用に有意な影響を及ぼす可能性がある。経済性の面では、CO₂限界削減コストは時間経過と共に増加する傾向が窺え、その実現可能性は慎重に判断する必要があると言える。

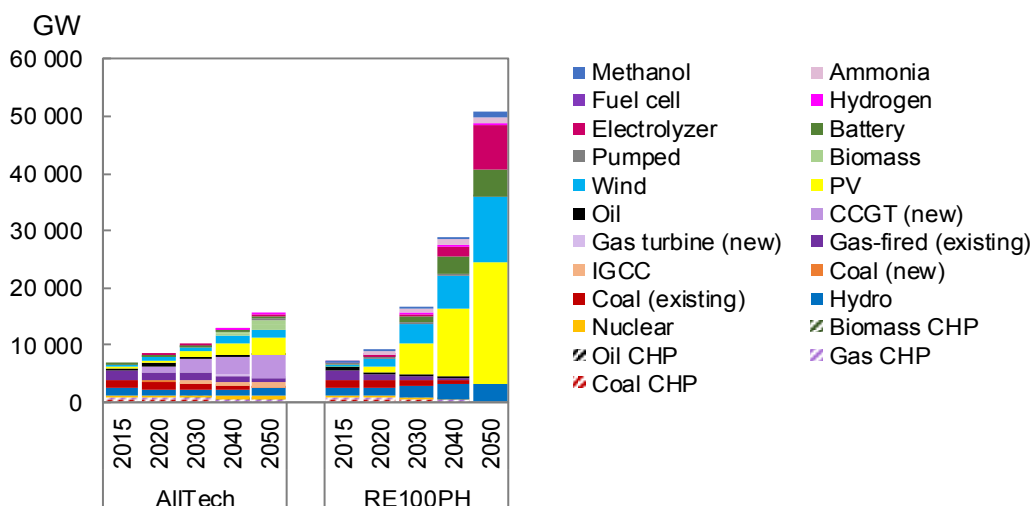


図3 AllTech シナリオと RE100PH シナリオにおける世界の発電設備容量
(第6章のNE5.0-Rモデルによる解析結果)

第7章では、研究成果を総括すると共に、本研究の限界や今後の研究課題を示した。今後の研究課題では、特に重要な点として①需要側技術・インフラの分析と②各種想定（マクロ経済や資源、技術パラメータ）に関する感度分析を挙げた。本研究のモデルや分析を更に精緻化し、より頑健な知見を得ていくことが重要である。