

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870340

研究課題名(和文) マルチスケール対応型バイオマス物質循環プロセスコアモデルの開発

研究課題名(英文) A Development of Multiscale-adaptive Biomass Material Circulation Process Model

## 研究代表者

松井 孝典 (Matsui, Takanori)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30423205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：バイオマスエネルギーと生態系サービスの需要が同時に進展する状況下において、バイオマス資源の全体最適な供給システムを設計するためには、川上の自然生態系から、最下流の最終処分までのバリューチェーン内で、バイオマス物質循環を基本構成要素である炭素・窒素・水がどのプロセスでどのように循環しているかを記述できるモデルで表現し、外圧への応答や技術システム更新、制度設計による利得を評価可能なモデルの設計が求められている。そこで本研究ではバイオマス生産から最終処分に係る一連のバイオマス物質循環プロセスを表現可能なモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：Recently biomass energy demands as a provisioning service from ecosystems increase rapidly and it is needed to establish global optimal system for using biomass resources sustainably through demand-supply chain. In order to evaluate the sustainability of the social-ecological systems (SESSs), it is an important issue to develop a process model which can describe the carbon, nitrogen and water flows through the SESSs under different future scenarios, that contains social, environmental and technological aspects and evaluate the sustainability of the biomass resource circulation system. So as to solve the significant challenge, we tried to develop a Multiscale-adaptive Biomass Material Circulation Process Model and applied it to the forest biomass case in regional scale. After the development we found the utility of the model successfully and obtained the future perspectives to be solved.

研究分野：環境システム工学

キーワード：バイオマス プロセスモデル 社会・自然生態システム 最適化 再生可能エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の緩和と気候変動への適応が求められる中で、今後、再生可能エネルギーの導入に対する期待はますます高まる。そのうちバイオエネルギーについては、炭素中立であること、電熱需要の両方に対応できること、地産地消の循環型エネルギーであること、備蓄可能なことなどの様々な利点を有しているため、これまでに木質燃料化だけでなくガス化・オイル化も含めた多様な技術開発が進められている。その一方でバイオマテリアルの観点からは、木材・紙などの木質資源、穀物・畜産物などの食糧資源を代表として、人間社会の生存基盤の根幹となる資材を供給する中で、その生産過程において生態系機能の維持・促進や生物多様性の保全にも同時に寄与する自然共生型のバイオマス利用が求められている。

これら持続可能エネルギーとしての需要、また生態系サービスとしての需要が同時に進展する状況下においては、スマートなバイオマス物質循環システムをデザインできれば低炭素促進と生態系サービスの持続的な利用でシナジー効果が期待できるが、逆に個別最適化に埋没すると収奪的なバイオ燃料生産が見せた生態系の劣化と炭素リーケージのようなトレードオフ構造が生じる。これらを見据えた持続可能で全体最適なバイオマス資源の需給システムを設計するためには、川上の自然生態系から、食糧生産とエネルギー生産、バイオマテリアル生産、消費者によるエンドユース、各段階での未利用・副産物、最下流の最終処分までを一貫通のプロセスとして統合した上で、そのシステム内でのバイオマス物質循環を基本構成要素である炭素(C)・窒素(N)・水(H<sub>2</sub>O)がどのプロセスでどのように循環しているかを記述できるモデルで表現し、様々な外圧への応答や技術システム更新、制度設計による利得を評価可能なモデルの設計が求められている。

この背景から現在、我々の研究チームでは日本国を対象空間としてバイオマス物質循環モデルの開発を継続してきた。このモデルでは、穀物地・林地・牧草地をバイオマス資源として、そこから生み出される丸太や家畜などの原料バイオマス、そこから加工された用材、紙・パルプ、食料品などの製品バイオマスおよび副産物・残さ、実際のエンドユーザーによる民生バイオマス消費、そこから出力される廃棄物系バイオマスおよびバイオマス由来サーマル・マテリアルリサイクル、最終処分に係る一連のプロセスを含む、150程度のコンパートメントと200程度のサブモデルで重量ベースで推定可能に表現している。これに加えて、上記のそれぞれのサブプロセスの執行に伴う水消費量も同時に推定するモデルであり、また域外である海外との

輸出入をコンパートメントレベルで推計するモジュールも実装している。さらに国内総生産や人口動態、都市構造、ライフスタイルといったバイオマス物質循環システムに影響を与える駆動力の変化に応じた動的なモデルで実装しており、1973年から2010年までの駆動力の変化に応じた推定される物量レベルでの予測精度は、木材・食糧関連のバイオマス総量とそれに伴う水資源消費で誤差10%未満となっている。このモデルにより、国内総生産や人口動態、都市構造、ライフスタイルといった駆動力が現状のトレンドで推移する条件下で食料・木材自給率を上昇させたシナリオを評価させた場合には、水資源は枯渇を起こさないが、動物性カロリーの需要増によって牧草地開拓を経由して土地資源が枯渇する可能性を示した。

## 2. 研究の目的

前述のプロトタイプモデルの拡張によって、本研究で構築をめざすバイオマス物質循環プロセスモデルに対する要求仕様は以下のとおりである。

### (1) 【物質の表現単位の厳密化】

プロトタイプでは重量ベースで表現するモデルであったが、これをバイオマス物質の基本構成要素である炭素(C)・窒素(N)・水(H<sub>2</sub>O)に変換して記述する。

### (2) 【生態系プロセスモデルとの連携】

先行研究では、バイオマス資源の供給元である生態系のコンパートメント表現は生態系ごとの反収が技術レベルのみによって牽引されるトレンドモデルとなっているが、これを生態系生物地球化学モデルに置換することで、気候の挙動への応答と技術レベルの革新への応答の部分に分解して精密化する。

### (3) 【経済・経営パラメータの導入】

先行研究は技術モデルを指向して構築されているため、現在は装置やシステムの更新によって効率性が上昇することを表現できるレベルであり、これに加えて様々なバイオマス財の価格パラメータといったミクロ経済の要素を実装することで、たとえば、炭素クレジットや生態系サービスへの支払い(PES)システムといった制度設計に対して応答するモデルに拡張する。

### (4) 【適用可能な空間サイズの拡張】

第1段階で開発してきたプロトタイプモデルのシステム境界は日本国であったが、これを道州レベルのリージョナルスケール、市区町村レベルのローカルスケールといった意思決定主体が異なる複数のスケールにもパラメータチューニングのみで適用可能となるように、マルチスケール対応型のモデル設計に汎化する。

### (5) 【モデルの可読性・操作性の向上】

スケーラビリティを考慮する上では、極端に高度な解析環境、精緻なデータを必要とするモデルでは適用段階で問題が生じるため、モデルの精度に十分に注意した上で、excel などの標準的なスプレッドシート型ソフトウェアや、ホワイトボックスの解析モジュールが充実している R などのフリーウェアのデータサイエンス用ソフトウェアでモデル実装を行う。

### 3. 研究の方法

現在重量ベースで数値表現されているプロトタイプモデルを、化学・物理過程モデルや統計モデルを利用して物質収支を分析することで、炭素(C)・窒素(N)・水(H<sub>2</sub>O)で表現される物質循環モデルに改良する。これによって生態系プロセスモデルと同じプロトコルで入出力が表示可能となるため、生態系プロセスモデルの設計を行った。木材を生産するための森林生態系には BGC-ES のプレーンモデルをチューニングして植生別の生体資源量や生長量を表現する。このモデルは気候データに応じて針葉樹・広葉樹などの木本の成長をプロセスレベルで記述可能であり、モデルの内部構造がホワイトボックスであるため、プログラムのチューンにより施業パラメータを設定した。

構築した炭素・窒素・水ベースの物質循環モデルに対して、施業パラメータをドライバーへ実装することでシナリオ分析を行った。またバイオマスエネルギー・用材などの需要トレンドに対して応答する社会生態系のサブモデルを組み込み、これを各種の財・サービスの需要量モデルを実装した。

上記の一連の改良プロセスを経た結果の修正モデルに対して、ダウンスケーリングを行うために、和歌山県有田川町・日高町の関係者との協議によって関連データを入手し、グリッドサーチによるパラメータセットの最適化などのモデル検証を行い、社会・技術シナリオの入力と応答の解析を行った。

モデル開発期間全体を通じて、可能な限りモデル構造およびデータベースの保守・運用・改良が容易になるように、ソフトウェア開発の専門家との協議を行い、可読性および操作性の向上を図ることで、モデルの汎用性とユーティリティを確保した。

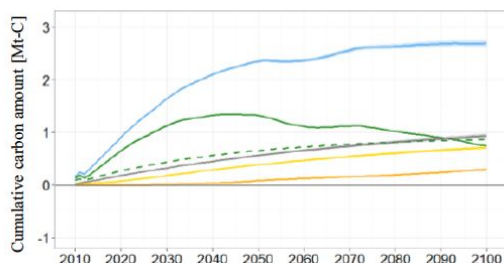


図 1: 最適炭素収支の動態モデリング

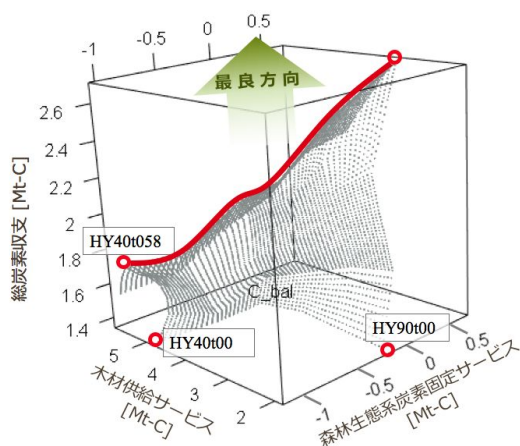


図 2: 木材供給・森林炭素固定・炭素収支のパレートフロンティアの特定

### 4. 研究成果

学術的な成果については、第 1 に低炭素と生態系サービスの境界領域における融合型の研究であり、個別の領域にある知見に対して、本モデルをプラットフォームとしてシステム統合することで、従前には発見しえなかった相乗効果や副便益、あるいは二律背反の構造を導き出すことができる可能性を示した。第 2 に、こうした課題は応用一般均衡分析といったマクロ経済モデルで財やサービスの価格と量を中心に評価されることが多く、これらとの比較や検証を行うことができるとともに、それらを超えて生態系などの生物地球化学過程も含めた動態が同時に解明される方針を示した。加えて、操作性を十分に考慮して開発したモデルは、様々な研究者がシナリオ解析等で利用可能となっている。

また社会的意義については、特に本研究で開発するモデルのモジュールには、気候、人口動態、土地利用、ライフスタイルといった要素を意図的に含んでいる点である。農林業やバイオマス利用、国土計画を通じて生態系と社会の自然共生に大きく影響を与えるであろう、気候変動の進展、自由貿易の強化による自給率変動、国土強靱化によるレジリエンス設計、長寿社会による超高齢化と集住計画といった環境・社会的に重要な現象について、科学的に構築されたモデルでホワイトボックスに検証が可能となる点は十分な社会的意義を有する点であると考え。特に、DPSIR モデルを基礎としてモデル開発をめざすため、技術開発・制度設計・ライフスタイル転換の様々な対策を各ステージごとに多段階で評価できるなど政策的なインプリケーションが可能となるように設計されており、本公募で得られた成果を活用するべく、環境省の環境研究総合推進費等、特に社会実装を志向する研究開発の枠組みへ展開するなどの研究開発への継承も予定している。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

舘林香菜, 松井孝典, 大場真, 町村尚, 谷佑亮, 中尾彰文, 山本祐吾: 低炭素化のための木材生産・利用システムの最適化モデルの開発, 土木学会論文集G(環境), Vol. 71, No. 6, pp. 11\_297-308, 2015.

〔学会発表〕(計2件)

Tatebayashi K., Matsui T., Ooba M., Machimura T., Tani U., Nakao A., Yamamoto Y.: A Simulation of the Carbon Circulation between Forest and Social Ecosystem in Arida and Hidaka river basin, 日本生態学会第63回全国大会要旨集, E1-08, 2016.

K. Tatebayashi, T. Matsui, M. Ooba, T. Machimura, Y. Tani, A. Nakao, Y. Yamamoto : Optimizing the Timber Production and Utilization System for Low Carbon Regions, International Symposium on EcoTopia Science 2015 proceedings, P-7-10, 2015.

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

松井 孝典 (MATSUI, Takanori)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30423205