

1 森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価

(1 a) 荒漠地でのシステムの植林による炭素固定量増大技術の開発に関する研究

(3) 荒漠地植林技術のプラットフォーム構築に関する研究

大阪大学 大学院基礎工学研究科

江頭靖幸

信州大学 繊維学部

高橋伸英

成蹊大学 理工学部

山田興一

平成15～19年度合計予算額 20,951千円
 (うち、平成19年度予算額 2,000千円)
 上記の合計予算額には、間接経費 4,836千円を含む

[要旨]

荒漠地植林技術のプラットフォーム構築のため、樹木の生長・炭素固定シミュレータを開発した。荒漠地における疎林を想定し、水の制限を明示的に扱える様に土壌での水移動モデルと土壌水分の影響を含んだ光合成モデルを中心とし、樹木のフロメトリ関係を満たす様に成長するとした。樹木から発生する枯死・脱落がDebrisとなり、分解しつつ土壌炭素となってさらに分解が進む過程については既存のモデルを流用した。これらのシミュレーションモデルを統合するため、炭素アカウンティングシステムとして利用されている炭素収支モデルを枠組みとし、各炭素プールの間のフローを個々のシミュレーションモデルによって計算する事とした。統合したシミュレーションによって樹木の成長過程を長期に渡って予測することができる様になった。

また、荒漠地での植林の具体的な事業を想定し、そのプロジェクトでの炭素固定効率・コスト・土地面積当たりの固定ポテンシャルを推計した。さらに、西オーストラリアや全球レベルで事業の実施可能な面積を概算し、それぞれのレベルでの固定ポテンシャルを評価した。

プラットフォームを構成するシミュレータを効率的に作成するためにシミュレーションフレームワークを作成した。これは、シミュレータのデータ入出力の方法を統一的な方法で行い、データの一元的な管理と複数のシミュレータ間のデータの交換を補助するものである。また、シミュレーションの結果の検証を自動的に実行し、プログラム上の問題や入力条件によってモデルの矛盾が発生した場合などに警告を発する機能も付加している。前述の樹木の生長・炭素固定シミュレータは、このシミュレーションフレームワークを利用して作成した。

[キーワード] 水移動シミュレーション、樹木成長シミュレーション、炭素アカウンティングシステム、ポテンシャル評価、シミュレーションフレームワーク

1. はじめに

荒漠地植林技術のプラットフォームとは、具体的な植林計画の立案とその計画の評価を補助するためのツールの組み合わせである。

植林計画の立案のためには荒漠地における水の確保、確保された水による植生の成長の程度などを記述するための物理的・植物生理学的な過程のプロセスシミュレーションが主要なツールとなる。一方、計画の評価は、具体的には固定量とそれに付随するCO₂発生量の見積もりにより、計画された事業が全体として真の固定となっていること、またその具体的な固定量の見積もりを行うことが主要な課題となる。

ここでは、まず植林計画立案のためのツールとしての植生シミュレータによる炭素固定量の見積もりの可能性について、これまでの研究の結果を取り入れた成長モデルをシミュレータとして実装して検証した。また、計画評価の手法について、植林計画の具体的な内容を想定し、それに対する試算を実施した。ここで植林による炭素固定量の増加の予想については、上記のプロセスシミュレータの結果に対応するものである。一方、植林に必要な作業から生じるCO₂量の見積もりには、必要作業項目のリストアップ、それぞれの作業に必要な各種資材・燃料の必要量の見積もり、それぞれのCO₂原単位などのデータ必要となる。必要作業のリストアップと必要な資材・燃料の見積もりには実地試験の結果が重要になる。一方CO₂原単位は独自に開発する部分は少なく、一般的に知られているデータを整理して使用する。

また、上記プロセスシミュレータの構築のためのソフトウェア的な仕組みを提供するフレームワークの作成を試みた。フレームワークとはソフトウェアの部品を組み入れるための枠組みのことで、個々のシミュレータや計算を部品として作成し、それを組み込むことで複数のシミュレーションを連携させるためのものである。フレームワークは結果を静的に表示するのではなく、各パラメータに対し、最終的な結果がどの様に応答するのかをインタラクティブに確認できるように、WEBなどのインターフェイスをシミュレータの部品に提供する。また、シミュレーションを対象に、その結果がモデルの数学的内容と合致しているかのチェックを自動的に行う機能を加えた。これは解法上の問題点の有無を検査するための仕組みであるが、同時にモデルの数学的な健全性に対するチェックとしても機能する。

2. 研究目的

プラットフォームの構成要素であるプロセスベースの森林シミュレータを実装する。今回は荒漠地植林を念頭に水条件の制限を含めた光合成モデルを起点として樹木の生長速度を予測し、実測との比較により検証を試みた。

また、プラットフォームのもう一つの構成要素となる計画評価のための計算に必要な要素の洗い出しをおこなう。今回は荒漠地植林や半乾燥地の部分植林を対象として、CO₂固定量と発生量の比較による純固定量の見積もりの試算を実施した。

最後に、シミュレーションや試算の結果をWEB上でインタラクティブに操作可能なシミュレータとして実装することを目的に、シミュレータのWEBへの実装と、シミュレータ間のデータ連携、モデルとの整合性および自動的な検証を行うためのフレームワーク（プログラム作成時の規約と、その規約を利用した専用プログラム）を作成した。

3. 研究方法

（1） 荒漠地の特徴を考慮した樹木の生長・炭素固定シミュレータの開発

樹木の生長シミュレーションは通常、土地の全体が樹木で覆われている状況を想定して作成さ

れている。しかし、今回対象とした荒漠地、具体的には乾燥地や半乾燥地における農耕地内の部分的な植林などでは樹木が地表の一部を占める様な疎林になっている。そこで、地表での水の移動を含めて、樹木にどのように水が供給するかをモデル化し、同時に水の多寡が樹木の生長に影響するプロセスをもモデル化する必要がある。

樹木の成長に対する乾燥の影響を含めたモデル化のために、樹木の乾燥の効果を考慮した光合成シミュレータの作成を行った。光合成プロセスに対する標準的なモデルをベースとし、乾燥の影響は葉と大気とのガス交換に際しての抵抗の変化、主に気孔抵抗の変化として現れる、と考えた。気孔抵抗は植物の生理学的な反応によって調整されるもので、その詳細なメカニズムは分かっていない。ここでは、乾燥に従って光合成の促進よりも水の蒸散の抑制をより重視する様な応答をする、と仮定してガス交換実験のデータをベースに気孔抵抗の応答を定式化する。さらに樹木全体を考えると、一定期間の光合成速度からDebrisの発生、幹呼吸を減じると樹木への寄与を算出できる。葉、幹・枝、根の成長のバランスについては既存のアロメトリー関係を再現するように分配される事として、樹木の成長速度を予測する。

次に、疎林の間の裸地の水移動を表現する地表水の流出のシミュレータを作成する。同時に、地表水の土壌へのしみ込みと蒸散の過程を表現する土壌水分移動シミュレータも作成する。地表水のシミュレーションには土壌へのしみ込みをサブモデルとして組み入れる必要があるが、作成した土壌水分移動の計算負荷が比較的大きい事を考慮し、土壌水分移動を表現する簡便な式を考案し、この式中のパラメータをあらかじめ実施した土壌水分移動シミュレーションの結果を整理して決定する、という手法で土壌の特性を反映させつつ妥当な計算負荷で地表水・土壌水の移動をシミュレーションできる様にする。

上記の樹木成長のシミュレーションと水移動のシミュレーションに基づいて炭素蓄積量の予測を行う。樹木以外の炭素のプールとして地表に存在するDebrisと土壌中の炭素を考慮するが、これらについては既存シミュレータのベースとなったモデルを流用する。これら複数のシミュレータの統合に際しては、森林の炭素アカウンティング様に開発されたシミュレーションモデルを枠組みとして利用する。各炭素プール間の流れを個別のシミュレータを使って計算する。

(2) 荒漠地での植林事業の炭素固定効率・コスト・ポテンシャル評価

荒漠地での植林の具体的な事業を想定し、そのプロジェクトでの固定可能な炭素量を実際の植栽実験の結果や、上記の樹木成長シミュレーションの結果等を参考にしつつ、推定する。同時に植林プロジェクトで必要となる作業をリストアップし、全ての作業で発生するCO₂量とコストを概算して積算する。こうして求めたプロジェクト全体でのCO₂発生量と固定量からCO₂の固定効率を求め、またプロジェクト全体でのコストからCO₂の固定コストを算出する。

さらに、上記で想定したプロジェクトでの面積当たりの炭素固定量を前提に、西オーストラリアや全球レベルで事業の実施可能な条件に合致する土地の面積を既存のデータベースを利用して概算し、それぞれのレベルでの固定ポテンシャルを評価する。

(3) プラットフォームのためのシミュレーションフレームワークの作成

上記の作業の基礎として、シミュレータを効率的に作成するためのフレームワークを作成した。シミュレーションモデルに含まれる変数の一覧表からデータ入出力用のプログラムのソースコー

ドを自動生成する補助的なプログラムを作成し、シミュレータのデータ入出力を統一的に管理できる様にする。同時に、複数のシミュレータ間のデータの交換の補助にも利用する。さらに、シミュレーションプログラムを実行したとき、モデルに含まれる変数が満たすべき相互関係の検証も自動的に実行する様なプログラムを作成する。

4. 結果・考察

(1) 荒漠地の特徴を考慮した樹木の生長・炭素固定シミュレータの開発

1) 光合成と樹木成長のシミュレーション

① 光合成シミュレーションによる生産量の評価

図1にプロセスシミュレータの全体像を示す。光合成速度は、主に光量に依存する電子伝達系反応と、酵素による生化学反応のいずれかに決定されと考えられ、それらを定式化したFarquhar *et al.* (1980¹⁾) のモデルを光合成サブモデルに実装した。その際、クロロフィル内のCO₂分圧は、気孔の開度に応じて変化するようにになっている。また生化学反応において、葉温が光合成速度に大きく影響を与える。葉温を決定するため、蒸発潜熱、顕熱移動、光による放射伝熱を考慮した葉の熱収支サブモデルを実装した。その際、蒸散による潜熱移動もまた気孔開閉によって支配される。

このように、CO₂や水が入り出る気孔の開閉が光合成において非常に重要である。そこで、気孔のコンダクタンス (G_s) を次式で表現した。

$$G_s = m \frac{A_{net}}{C_s \times VPD_L} + G_{s_{min}} \quad (1)$$

G_s は気孔コンダクタンス、 m は土壤乾燥の寄与係数、 $VPDL$ は葉と大気飽差、 A_{net} は純光合成速度、 C_s は大気CO₂分圧である。気孔開閉は植物生理学的過程なので、 G_s は実験式で表現した。

また乾燥地の植物は、特に乾季において土壤の乾燥に気孔が鋭敏に応答することが知られている。土壤乾燥が、気孔応答に影響するようなモデルを検討した。一般に早朝の葉の水ポテンシャル (Ψ_{pd}) は土壤の水ポテンシャルと近似すると考えられることから、 Ψ_{pd} を土壤乾燥の指標とした。蒸散速度と Ψ_{pd} の関係より上記式内の土壤乾燥の寄与因子 (m) は以下のような関数型で表現することができた。

$$m = A \times \exp(-B \cdot \Psi_{pd}) \quad (2)$$

ここで A , B は定数である。

図2は光合成速度の日変化のシミュレーションモデルによる再現結果である。計算値 (×) は実測値 (□) を再現しており、現地で取得されたデータによるシミュレーション計算が可

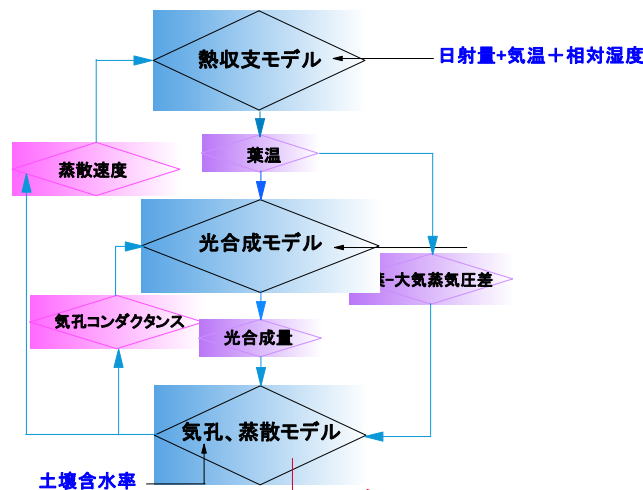


図1 乾燥地樹木光合成シミュレータのアウトライン

能であることが分かる。

② 成長量の実測値による生産量の評価

上記のシミュレーションに基づき、
土壌水分分率、日照等から樹木の生長
速度を予測した。図3に示すようにシミ
ュレーションから求めた生産量は

（光合成）－（葉の呼吸）

であるが、これは

（樹木の生長）＋（枯死脱落）

＋（幹・根の呼吸）

と一致しているはずであり、
この関係から樹木の生長を予
測した。

以下に、実測の樹木サイズ
（胸高直径）からの樹木成長
の算出の手順を示す。

[1] 実測データの地上高
0.3mでの幹直径（ $D_{0.3}$ ）
から、アロメトリー式
を用いて、樹冠の重量
（ $W1$ ）を算出する。

[2] [1]で算出した樹冠全
体の葉量を比葉重量で
割り木1本当たりの葉
面積を算出する。

[3] 気温、相対湿度、日射

量、土壌含水率、水分特性曲線を用いて、シミュレータで単位葉面積あたりの単位葉面積あたりの光合成速度（光合成量から葉の呼吸量を引いたもの）を計算する。

[4] [3]で算出した単位葉面積あたりの光合成量に[2]で算出した葉面積をかけ、木1本分の純光合成速度を算出する。

[5] 同様に、アロメトリー式を用いて、幹、枝の重量を算出し、その和（地上部重量）から、根の重量を算出する。

[6] 相関式を用いて呼吸・枯死脱落を算出する。

[7] 樹冠、枝、幹、根のすべての重量を足すことで全重量（Total Biomass）を算出。

[8] [4]で求めた光合成速度から[6]の呼吸・枯死脱落を減算しそのタイムステップでの樹木の全重量増加を算出。全重量に加算して次のタイムステップでの全重量を求める。

[9] 全重量から幹直径（ $D_{0.3}$ ）を逆算する。

上記の[1]-[9]を適切なタイムステップで繰り返し、樹木の生長を予測することができる。

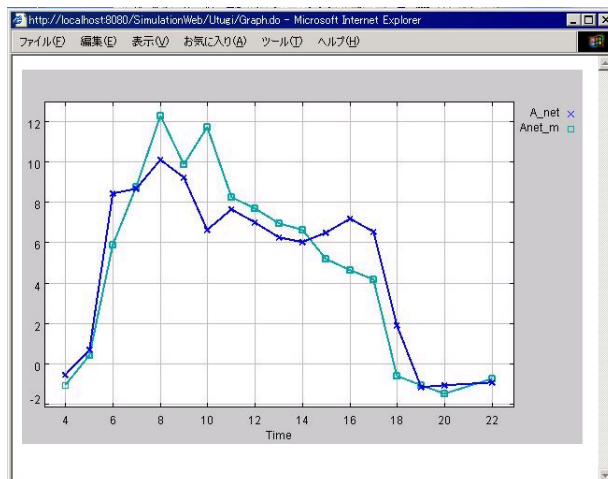


図2 光合成日変化の再現

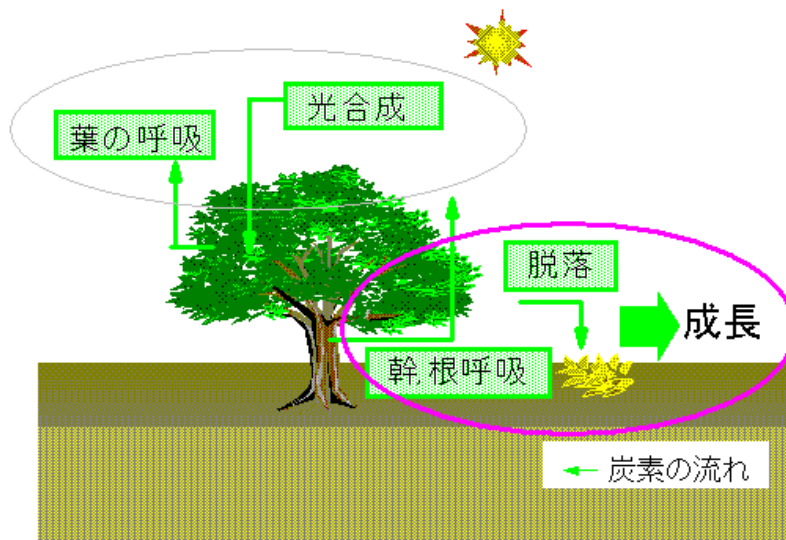


図3 樹木の生産速度

2) 土壌水分・表面流出水のシミュレーション

① 土壌水分の移動のシミュレーション

一般的な樹木成長のシミュレーションと比較して、荒漠地での植物の成長に対するモデル化のポイントは水の制限による植物成長への影響である。先に述べた光合成モデルでは土壌の水ポテンシャルを通じて光合成速度が変化するようにモデル化されているので、土壌水分を通じて水の制限をモデル化することができる。

森林、特に樹冠が閉塞した状態の森林では土壌水分のアウトプットは主に植物の体を通過する蒸散であり、土壌表面からの蒸発はそれに比較すると無視できるほどである。一方、乾燥地では一般に疎林になっており、蒸発による水の放出の寄与は大きいと考えられる。

そこで、土壌の表面蒸発と土壌中の水分分布を計算するシミュレーションを作成し、現地データとの比較を行った。疎林では日照に応じた地表面温度の変化も大きいと考えられるので、土壌の温度分布も、水分分布と同時にシミュレートするものとした。

② 土壌水分移動のシミュレーション結果

上記のシミュレーションの

実施例として、図4に西豪州 Leonora に設置した SiteC Pond5 における計算結果を示す。実測は土壌改良のための爆破孔から外れた測定点でのものであり、自然状態に近い条件と考えられる。入力として土壌の水分特性曲線データ、飽和透水係数の他に、気象データとして降雨速度、短波放射フラックス、大気相対湿度、風速、気温の実測値を入力して計算した。

ここでは、SiteCでは表面流

出（ランオフ）が生じることを考慮し、もとの降雨速度を調整し（実測の降雨量から表面流出した量を減じた）、計算の実測とのフィッティングを試みた。各降雨に対して適切な表面流出量を設定することで土壌水分を良好に再現できる。このフィッティングは見方を変えれば各降雨での表面流出水量を推定しているとも理解できるので、結果から表面流出率（表面流出水量と降雨量との比率）を求めることもでき、0.35～1.0の値が得られた。一般には降雨量が大きい場合、大きなランオフ率となると予想されるが、この計算期間の範囲では明確な相関は見られなかった。

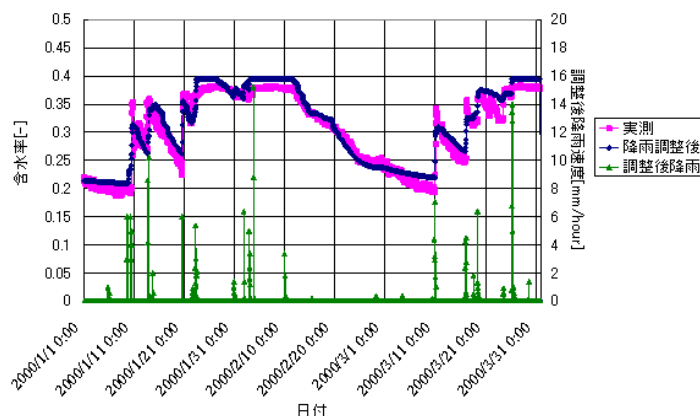


図4 土壌含水率の経時変化のシミュレーションと実測の比較。降雨の一部が表面流出で失われるとして計算。

3) 炭素アカウンティングシステムを利用したシミュレータの統合

① 炭素アカウンティングシステム

今回、出発点となる炭素固定量アカウンティングシステムを、オーストラリア政府の機関であ

るAustralian Greenhouse Officeで作成された CAMFor (Gary、2000²⁾)を参考にして実装した。CAMForは植林に関連する炭素プールを列挙し、その炭素プール間での炭素の流れを考慮した炭素収支を計算することで炭素固定量を算出するシステムである。CAMForではさらに、各炭素プールからの炭素の流れがそのプールの炭素量に比例するとした、簡単なモデル式が考えられていて、一般的な森林（非乾燥地）に対する比例係数のセットが与えられている。CAMForで用いられている炭素プールは大きく分けると植物体、そこから発生するDebris、とその分解に由来する土壤炭素、という三つに分類できるが、それぞれが数個から十数個のプールに細分化されている。

また、今回対象とした西オーストラリア・レオノラ地区の乾燥地では、樹木の間隔が開いた疎林となっている事を考慮して、通常的面積当たりの炭素量計算に替わって樹木当たりの炭素量を基準とした計算を行った。CAMForにおける炭素プールは、本来は土壤の面積を基準としているが、今回は樹木を基準とした。このように基準を変更しても、炭素プール間の流れを計算する簡易モデルに含まれる係数は流用できる。

② プロセスベースモデル

樹木の生長と枯死脱落の速度に関しては前述のモデルを用いる。枯死脱落より生じるDebrisの分解と土壤炭素の分解についてのモデルについては以下の既存のモデルを流用している。

i. Debrisの分解モデル

Debrisの分解モデルとしては、GENDECモデル (Moorhead and Reynolds、1991³⁾)を用いた。これは乾燥地・半乾燥地でのDebris分解モデルであり、5つの炭素プール（水溶性化合物、セルロース類、リグニン等難分解化合物、微生物体、微生物の死骸）と同様の窒素プールを考慮している。ここで、Debris中の窒素含有量は実測データが無かったため *Eucalyptus globulus*種に対する実測値を用いた。現地ではリターバック法によるリター分解速度の実測も行われているが、本モデルによって、パラメータの調整などを行わなくても実験結果をよく再現できる事が分かっている。

ii. 土壤炭素の分解モデル

Debrisから土壤に移動した炭素の分解過程については、すでに報告されているRothCモデル (Jenkinson *et al.*、1987⁴⁾)を流用した。このモデルでは土壤有機炭素を4つの活性なプール

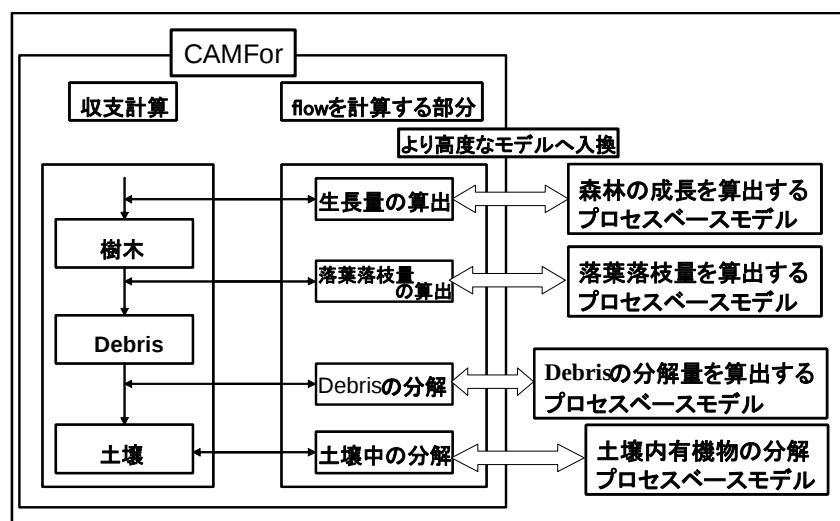


図5 炭素アカウンティングシステム(CAMFor)へのプロセスベースモデルの統合。収支掲載に用いられる炭素プールは残し、flow計算部分を入れ換える。

（易分解性物質、難分解性物質、微生物バイオマス、腐食有機物）と少量の不活性有機物に分け、それぞれの区分は各々の固有の分解速度により1次過程で分解すると仮定している。本モデルの実測との比較は行われていない。

③ 統合の手法

アカウンティングシステムとして選択したCAMForはスプレッドシート上で作動するモデルであり、また、Gendec、RothCはプログラム言語で記述されたシミュレータである。したがって、各モデルを統合するために、まず、全てのモデルをjava言語で構築し直す作業を行った。本プロジェクトによって開発されているフレームワークを用い、各シミュレーションモデルを個別に実装したのち、それらを連携させるシミュレータを作成した。

アカウンティングシステム（CAMFor）は、各炭素プールと、そのプール間のタイムステップ当たりの移動量（flow）を計算する部分からできている。そこで、各モデルの統合は図5の様に炭素プール間のflowの計算部分をプロセスベースモデルも結果によって入れ替える形で行った。

このとき、各プロセスベースモデルが仮定している炭素プールとアカウンティングシステムが仮定している炭素プールとは必ずしも一致していない場合もあった。そのような場合、幾つかの炭素プールをひとまとめにしたフローをプロセスベースモデルから計算し、その結果を比例配分してアカウンティングシステムの各炭素プールに配分した。

④ シミュレーションの具体例

図6に西オーストラリア、レオノラ地区の乾燥地を念頭に、CAMForに上記の測定結果とそれに基づくプロセスベースモデルを統合したシミュレータによる計算結果を一部の実測とともに示す。計算には初期条件として計算開始時の樹木のサイズが必要であるほか、日照、気温、湿度などの

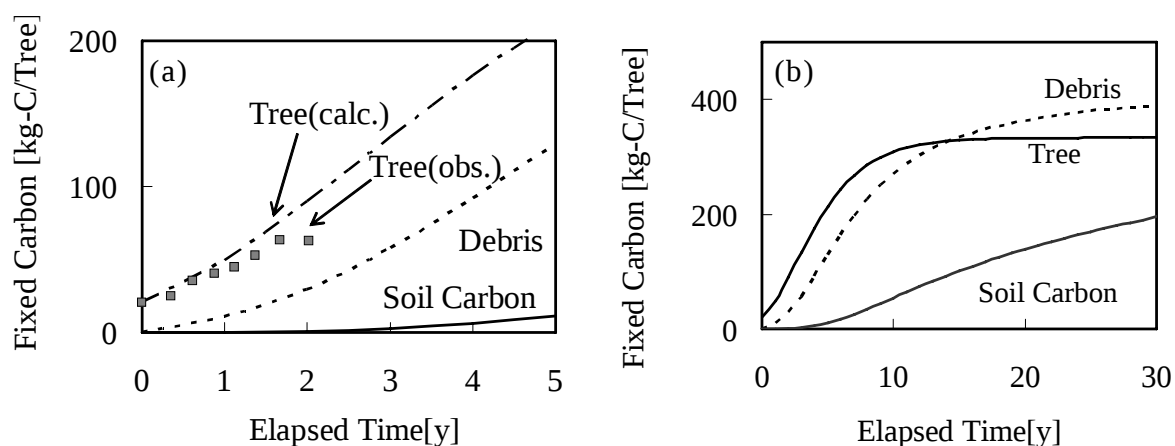


図6 アカウンティングシステムにプロセスベースモデルを組み込んだシミュレーションによる計算結果。(a) 最初の5年間の計算。樹木の成長に関しては実測（2年）との比較を行った。シミュレーション結果Tree(calc.)と対比されるTree(obs.)は地表0.3mでの幹径の実測値からアロメトリーによって推算した樹木一本当たりの総炭素量。(b)30年間の炭素固定量変化の予測。

気象データ、水ポテンシャルや地温といった土壌データが必要となる。これらについては、最初の2年間については実測値を用いているが、それ以降については、この2年間の状況が繰り返す、として計算を行っている。

図6(a)には最初の5年間についての計算結果を示した。樹木に蓄積される炭素量については、最初の2年間分の実測値を同時に示している。実測値と計算値は良好に一致しているが、計算値の方がやや大きめになる傾向が見られる。Debrisは比較的大きな値を示しているが、ここでのDebrisの量は一本の樹木当たりの値となっている。対象となる土地は疎林であり、一つの樹木に対して樹冠よりも広い面積の土地が対応しているので、この結果は、必ずしも樹木の下に大量のDebrisが蓄積していることを意味するものではない。また、土壌炭素の蓄積量は、最初の5年程度度ではあまり大きな割合とならないことが分かる。

図6(b)には、30年間の成長予測を示した。樹木の炭素量に注目すると、初期には増加を続けているが、10年後ころから安定してくることがわかる。この最終的な安定値は、植林によって固定可能な炭素量を求める場合、その上限値を与える重要な情報となる。これは光合成速度と非同化器官の呼吸とのバランスによって決まっており、光合成モデル、幹呼吸の実験式、アロメトリー式など、いずれも短い期間（～1年）で得られたデータに基づいて求める事ができている。

また、今回のシミュレーションでは土壌水分をインプットデータとして与えている。バンクの利用や土壌改良によって効果的な灌水が行われた場合、土壌水分が上昇することで、その効果が計算に反映されることになる。一部、実測によって計算を行うこともできるが、今後土壌水分モデルを植物の生長モデルと組み合わせることにより、より広範囲への予測ができる様になると考えられる。

（２） 荒漠地での植林事業の炭素固定効率・コスト・ポテンシャル評価

1) 炭素固定効率・コスト・ポテンシャル評価

研究方法で述べたように試験サイトにおける植林実験の結果をベースに、具体的な植林プロジェクトを想定して評価を行った。以下、乾燥地での植林と半乾燥地での植林の二つのケースについて、想定したプロジェクトの概要とその評価のまとめを示す。

2) 「西オーストラリア・レオノラ地区における不透水層破碎による土壌改良と荒漠地植林」について

推定の概要は以下のようなものである。

- ・ 年間降雨量200 mm～300 mmの地域への植林を行うことによってCO₂を固定する
- ・ ベースラインケース
 - － 「裸地」 → 「裸地」
- ・ プロジェクトケース
 - － 「裸地」 → 「植林地」（全域の22.7%の裸地の半分を利用）
- ・ 実施対象域
 - － 西豪州レオノラ付近 25 km×25 km

試算された625 km²当たりのまとめは、以下の表に示した。

	プロジェクトケース	ベースラインケース	リーケージ	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 Kg-CO ₂ (t-C ha ⁻¹)	1.51×10 ⁹ (6.59)	0	22.6×10 ⁶ (0.099)	1.49×10 ⁹ (6.50)
継続する吸収 kg-CO ₂ km ⁻² y ⁻¹ (t-C ha ⁻¹ y ⁻¹)	0	0	0	0

()内の数値は1ha当たりの値に換算したもの。

固定ポテンシャルに対する推計は西オーストラリアを対象としたもので、対象面積を1,120,000 km² としている。（算定根拠：西豪州、年間降雨量200-300 mmの地域の面積）

固定量は以下ようになる。

	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 Kg-CO ₂ (Mt-C)	2.66×10 ¹² (725)
継続する吸収 kg-CO ₂ y ⁻¹ (Mt-C y ⁻¹)	0 (0)

3) 「西オーストラリア・小麦ベルト地区における部分植林による、炭素固定および農業生産量増大の複合化」 について

炭素の固定は小麦ベルト地区の畑への樹木の植林によるものである。植林は単に炭素固定のためのものではなく、主な目的は塩害防止のためのである。

推定の概要は以下のようなものである。

- ・ 農耕地内への部分植林による湛水・塩害防止とCO₂固定
- ・ ベースラインケース
 - － 「農耕地（小麦）」 → 「農耕地（小麦）」
- ・ プロジェクトケース
 - － 「農耕地（小麦）」 → 「植林地」（全体の20%程度）

1km²当たりのまとめは、以下の表に示した。

	プロジェクトケース	ベースラインケース	リーケージ	純吸収量
土地利用形態の変化にともなう吸収 kg-CO ₂ km ⁻² (t-C ha ⁻¹)	2.5×10 ⁷ (68.2)	0	0	2.5×10 ⁷ (68.2)
継続する吸収	0	0	0	0

kg-CO ₂ ha ⁻¹ y ⁻¹ (t-C ha ⁻¹ y ⁻¹)				
---	--	--	--	--

()内の数値は1ha当たりの値に換算したもの。

固定ポテンシャルに対する推計は西オーストラリアを対象としたもので、対象面積を1,120,000km²としている。(算定根拠：西豪州、年間降雨量300-600 mmの55万km²はほとんどが小麦農地。その全面積の2割。)

固定量は以下ようになる。

	純吸収量
土地利用形態の変化に ともなう吸収 kg-CO ₂ (Mt-C)	2.7×10 ¹² (736)
継続する吸収 kg-CO ₂ y ⁻¹ (Mt-C y ⁻¹)	0 (0)

(3) 荒漠地植林技術のプラットフォームのためのシミュレーションフレームワーク

1) フレームワークの概要

シミュレーション用のプログラムコードの開発では、はじめのうちはプログラムの作成者の思いつくままにデータを定義し、計算の実行時に、その都度インプットされたりするが、やがてそのような気まぐれなデータ管理には限界がくる。単純にデータの数が増えることや、担当者の交代、新メンバーの参加によって、それまでのコードのどこに何があるのかを把握することが難しくなる。変更時のミスを防ぎ、効率的なデバッグをおこなうためにはデータを規則正しくプログラム内に配置することが必要となってくるのである。

このように、シミュレーションで用いるデータの入出力の方法、書式やシミュレーションの実行方法などに一定のルールを設けて共通化し、専用のプログラムを用意して道具(ツール)として利用することでシミュレーションプログラムの利用や開発を補助し簡略化する仕組み(システム)を、ここではシミュレーションのフレームワークと呼ぶことにする。今回は

- [1] 入出力をひとまとめにして、データ交換を容易にすること
- [2] シミュレーション結果の検証を自動化すること
- [3] WEBを利用したプログラム実行環境を用意すること

の三つを念頭にフレームワークを作成し、前述のシミュレータの構築に際して使用し、プラットフォームの基礎とした。

2) シミュレーションプログラム間のデータ交換

陸生生態系の活動に伴う温暖化ガス、特に荒漠地における森林成長にともなう二酸化炭素ガスの吸収に対してプロセスベースのシミュレーションを試みようとする場合、現地に存在する複数の要素とプロセスが関与するため、複数のシミュレーションプログラムを連携させる必要がある

と考えられる。

この際、複数のプログラム間の入出力の対応関係を見つけ出し、適切な処理を行ってデータをやりとりするという作業全体を完全に自動化する、といえかなり空想的である。ただ、結局のところ対応関係を見つけ出すのは人間の目であるとしても、その作業を補助するための自動化プログラムは可能である。

具体的には

- 各プログラムの入出力を漏れのない様にリストアップする

- 入出力の物理的な意味や正確な定義、単位系などの文書を整備する

といった人間が行う必要のある作業に基づいて、後段の処理を自動化する、以下の様なシステムを設計した（図7）。

各シミュレーションプログラムに対して、シミュレーションに関するデータのリストを作成する。これを元にデータ保存用のプログラムのソースコードを自動生成する。ソースコード生成は専用のプログラムを作成して自動的に行えるようにした。実用に際してはデータリストに対して変更や修正が行われることがあるが、生成の自動化によってデータリストと実際のプログラムとの内容が不一致のまま放置されることを防ぎ、実質的にデータリストで入出力を一元管理することができる。

3) シミュレーション結果の検証の自動化

シミュレータの開発時、プログラムの検証はテストデータなどを使って、個別に人手によって行われてきた。この段階での検証をパスしていても、実際のデータをつかった計算をはじめると問題がおこるのではないかと、という可能性を確認するためには、シミュレーションから得られた計算結果に対する検証を常に行う必要がある。

幸い、上記のデータ交換の目的で準備したデータ保存用のプログラムには、シミュレーションで利用され、算出されたすべてのデータが納められている。シミュレータに実装されているプロセスモデルの実態は、極言すればこれらデータの間の関係式であるから、データ保存用のプログラムの内容をチェックすることでモデルの関係式が成立しているかどうかのテストを行うことができる。

今回、Java言語用のプログラム単体テスト用のフレームワークである JUnit (<http://www.junit.org>) の仕組みを流用することでこのようなテストの自動化を行った。テスト用のプログラムはシミュレータプログラムとは別個に作成する。シミュレーションが実行され、その計算条件・計算結果をデータ保存用プログラムに書き込むと、テスト用プログラムはここから情報を読み出し、その数値の間の関係を検証する。検証に際して間違いが見つからない場合は、とくに何も示さないが、間違いが見つかった場合はモデルのどの式が不成立であるかを示す警告メッセージを発生する。

4) WEBへのシミュレータの実装とデータ連携

フレームワークの機能の一部としてWEBを実行環境としたシミュレータの実装を行った。ここではフレームワークの利用例として立木モデルでの光合成シミュレータのWEBへの実装の実例を示す。

図8に画面遷移の様子を示す（上図は単一データを計算する場合、下図はシリーズデータを計算する場合）。単一データについてはWEBの画面上から変数の値を入力できる。計算結果はWEBの画面上で確認する他に、データを整理したテキストファイル（CSVファイル形式なので、通常の表計算ソフトで解析が可能）としてダウンロードすることができる。また、ダウンロードしたファイルを部分的に変更したものをアップロードすることで入力値を設定することも可能となる。

時間変化など、連続したデータを計算する場合は、与える変数の値をテキストファイルのかたちでアップロードする。このファイルも先に示した単一データに対する入力ファイルと同じ形式なので、時間に依存する変数のみを書き換えることで時間依存の計算の入力設定ファイルとして利用することができる。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

- ・ 荒漠地での植物成長を予測するためのシミュレータを開発した。地表水の流出と浸潤、浸潤した土壌の水移動、土壌の乾燥状況を反映した光合成シミュレーションを連携させた。光合成による炭素固定と呼吸・枯死脱落の収支から樹木の生長量を求め、それがアロメトリー関係を満たすように各器官に分配されるとして計算した。これにより表面流出の起こる環境での疎林の成長を予測することができるようになった。
- ・ 炭素アカウンティングシステムに、樹木の生長シミュレーション、Debrisの分解、土壌炭素の分解を組み入れて、荒漠地植林による炭素固定量を予測できるようにした。
- ・ 実地的な植林事業を想定し、その事業に係わる作業項目毎に発生するCO₂、コストを概算し、植林事業全体にわたって積算し事業全体で発生するCO₂量、総コストを算出した。これにと炭素固定量から固定効率、固定コストを求めた。
- ・ プラットフォームでの利用を念頭に、シミュレータの開発、実行、複数のシミュレータの連携を目的としたソフトウェアフレームワークを作成した。このフレームワークを利用する事によって、利用する変数の変数名、デフォルト値、説明文書等の情報が一つのファイルにまとめられ、データの一元的管理が可能となる。フレームワークでの統一されたデータ構造とシミュレーションプログラムの組み合わせを利用して、複数のシミュレータ間のデータ連携が容易となる。

（2）地球環境政策への貢献

- ・ 荒漠地への植林（乾燥地植林での水管理・土壌改良を用いた植林、半乾燥地での塩害対策としての部分植林）について、1以上の炭素固定効率が期待でき、CO₂固定の手法として有効である事を示した。さらに固定コスト、テンシタルについても評価し、GHG固定・削減技術としての特徴を明らかにした。
- ・ 荒漠地における植林について、その固定効率、コストなどを試算した結果は他のサブテーマで検討されたCO₂固定・削減技術とともに、サブテーマ4の横断的評価の基礎資料として用いられている。

6. 引用文献

- (1) G.D. Farquhar, S. vonCaemmerer and J.A. Berry: *planta*, 149, 78-90 (1980) "A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species"
- (2) R. Gary: National Carbon Accounting System Technical Report No.26, Australian Greenhouse Office. (2000) "Carbon Accounting Model For Forests (CAMFor) User Manual Version3.35"
- (3) D.L. Moorhead, and J.F. Reynolds: *Ecological Modelling*, 56, 197-219 (1991) "A general model of litter decomposition in the northern Chihuahuan Desert"
- (4) D.S. Jenkinson, P.B. Hart, J.H. Rayner and L.C. Parry: *INTELCOL Bulletin*, 15, 1-8 (1987) "Modelling the turnover of organic matter in longterm experiments at Rothamsted"

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. Egashira, D. Tomii, K. Ueyama, N. Takahashi, T. Kojima, Y. Abe, M. Saito and K. Yamada: *J. Chem. Eng. Japan*, 36, 383-390 (2003) "Development of Integrated Simulator of Water Transport and Plant Growth as an Evaluation Tool of Arid Land Afforestation for CO₂ Fixation"
- 2) N. Takahashi, K. Tahara, H., Utsugi, T. Kojima, Y. Egashira, Y. Abe, M. Saito and K. Yamada: *J. Chem. Eng. Jpn.*, 36-4, 391-400 (2003) "Water Use Efficiency of *Eucalyptus camaldulensis* Growing in Arid Regions in Western Australia"
- 3) 高橋伸英, 小林亮, 新井親夫, 小島紀徳, 山田興一: 化学工学論文集, 30-4, 537-540, (2004) 「焼成ボーキサイト混入による土壌の保水改善効果」
- 4) N. Takahashi, H. Hamano, Y. Abe, T. Kojima and K. Yamada: *J. Arid Land Studies*, 15-4, 275-278 (2006) "Effect of Calcined Bauxite as a Water-holding Material and a Way of Mixing it with Soil on Tree Growth"
- 5) Y. Egashira, M. Shibata, K. Ueyama, H. Utsugi, N. Takahashi, S. Kawarasaki, T. Kojima and K. Yamada: *J. Arid Land Studies*, 15-4, 263-266 (2006) "Development of tree growth simulator based on a process model of photosynthesis for *Eucalyptus camaldulensis* in arid land"
- 6) 江頭靖幸: 「水学への誘い」大垣 一成, 江頭 靖幸, 渡會 仁, 松村 道雄, 中辻 啓二 編著, 大阪大学出版会, 230-239 (2008) 「降水の有効利用による乾燥地植林と植林による塩害防止」
- 7) 高橋伸英, 藤原 尚, 小林 敦, 福長 博, 岩崎 博, 小島紀徳, 山田興一: 沙漠研究, 17-4, 157-165 (2008) 「*Eucalyptus camaldulensis*の生育限界水分条件」

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会）

- 1) 柴田 美由紀, 江頭 靖幸, 上山 惟一, 宇都木 玄, 河原 崎里子, 小島 紀徳, 山田 興一 : 第64回化学工学会年会, 大阪 (2004)「乾燥地緑化によるCO₂固定のための樹木光合成プロセスシミュレータの開発」
- 2) 龍井 英之, 山岸 甫, 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 第16回日本沙漠学会学術大会, 鳥取 (2004)「長期乾燥条件に対応した土壌水分蒸発モデルの開発」
- 3) 小西 賢則, 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 化学工学会第37回秋季大会, 岡山 (2005)「環境シミュレータ開発のためのソフトウェアフレームワーク」
- 4) 中山 崇弘, 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 化学工学会第37回秋季大会, 岡山 (2005)「乾燥地植生モデルのための土壌水分蒸発モデルの開発」
- 5) 橋本 寛敦, 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 化学工学会第37回秋季大会, 岡山 (2005)「炭素アカウンティングシステムをベースとした乾燥地緑化プロセスの評価」
- 6) Y. Egashira, M. Shibata, K. Ueyama, H. Utsugi, N. Takahashi, S. Kawarasaki, T. Kojima and K. Yamada: 8th International Conference on Desert Technology, Nasu, Japan (2005) "Development of tree growth simulator based on a process model of photosynthesis for *Eucalyptus camaldulensis* in arid land"
- 7) 山岸 甫, 中山 崇弘, 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 化学工学会第71年会, 東京, (2006)「炭素固定を目的とした乾燥地緑化プロセスシミュレータの開発 -大規模計算に対応した地表面水移動シミュレーション-」
- 8) 橋本 敦, 小西 賢則, 江頭 靖幸, 上山 惟一, 小島 紀徳, 山田 興一 : 第17回日本沙漠学会学術大会, 前橋, (2006)「炭素アカウンティングシステムへのプロセスベースモデルの統合による乾燥地植林シミュレータの開発」
- 9) Y. Egashira, M. Shibata, K. Ueyama and K. Yamada: iEMSs Third Biennial Meeting, "Summit on Environmental Modelling and Software", Burlington, USA (2006) "Application of Test-Driven Development Framework for Environmental Software: A Case Study in Long-Term Photosynthetic Process Simulation"
- 10) Y. Egashira, H. Hashimoto, K. Ueyama, H. Utsugi, H. Tanouchi, S. Kawarasaki, H. Hamano, T. Kojima and K. Yamada: International Conference on Ecological Modelling 2006, Yamaguchi, Japan (2006) "Development of Simulator for Tree Growth and for Carbon Fixation in Arid Conditions by Integration of Process Based Models into Carbon Accounting System"
- 11) 江頭 靖幸, 上山 惟一 : 化学工学会第38回秋季大会, 福岡 (2006)「炭素アカウンティングシステムをベースとした乾燥地植林シミュレータ」
- 12) Y. Egashira, T. Kojima, H. Hamano, Y. Abe, H. Tanouchi, H. Utsugi, M. Saito, J. Law, N. Takahashi and K. Yamada: The fourth Joint China/Japan Chemical Engineering

Symposium (CJCES), Chengdu, China (2007) “Research Project on Large Scale
Afforestation of Arid Land for Carbon Fixation near Leonora in Western Australia”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。