

佐藤永¹、伊藤昭彦¹、甲山隆司^{1,2}

¹ 海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

² 北海道大学大学院 地球環境科学研究科

モデル構造

概要

SEIB-DGVM におけるシミュレーションの基本単位は、空間構造を明示的にあつかった 30m × 30m の仮想林分であり(この大きさは、パラメーターファイルの設定を変えることで改変可能)、個々の木本は、この仮想林分に定着、競争、死亡する。また、木本の樹冠層の下には、草本層が存在する。Appendix B1 にモデル全体の入出力を、Appendix B2 に SEIB-DGVM を構成する諸過程(物理・生理・動態の3つのモジュール群から構成される)をまとめた。土壌分解と木の成長を除く全ての植物生理過程と全ての物理過程は1日間隔で、土壌分解と木の成長は1ヶ月間隔で、全ての植物動態過程と攪乱は1年間隔で演算が行われる。Appendix B3 に、本モデルにおける記号の定義を載せた。大文字から始まるものについてはパラメーター、小文字から始まるものについては変数を示す。またこれらはプログラム中のパラメーターや変数名とも基本的に対応している。全球グリッドにおいて植生動態を扱うためには、陸上高等植物種を少数の植物機能型(Plant functional types、以下 PFTs)に要約する必要がある。本 DGVM では LPJ-DGVM (Sitch et al., 2003)の分類法に準じ、Table 1 にまとめる 10 種類の PFTs を仮定した。

植物の扱い

木本 PFT は個体ベースで扱い、各個体は樹冠、幹、根の3器官から構成されるとした。各器官は次の変数で表現される。また、樹冠と幹の形状は円柱を仮定し、細根については形を明示的に扱わない(図1)。また、幹のバイオマスは、枝と主根のバイオマスも含むと定義した。

葉群: バイオマス ($mass_{leaf}$)、葉面積 (la)、直径 ($crown_{diameter}$)、深さ ($crown_{depth}$)

幹 : バイオマス ($mass_{trunc}$)、高さ ($height$)、辺材と心材の直径 ($dbh_{sapwood}$, $dbh_{heartwood}$)

細根: バイオマス ($mass_{root}$)

上記の変数に加えて、各個体は貯蔵資源 ($mass_{stock}$) を有するとした。これは休眠期から展葉期に移る際、または森林火災によって葉群が焼失された後で、葉の生産に用いられる資源である。

草本 PFT の扱いは、より簡便である。草本は葉と根からのみ構成され、それぞれ単位面積あたりの重量 ($gmass_{leaf}$, $gmass_{root}$) によって表現される。また木本と同様に貯蔵資源 ($gmass_{stock}$) を持ち、休眠期から展葉期に移る際の葉の生産に用いられる。

炭素循環の概要

モデル全体の炭素の流れを図 2 に示す。光合成によって大気中より取り込まれ同化された CO_2 は、植物の各器官へ配分される。各器官における維持呼吸や成長呼吸に伴って、ある割合の同化産物は、再び CO_2 として大気中に放出される。各器官の Turnover、落葉、そして木本の死に伴って生成されるリターは、土壌中のリタープールへと追加される。リターが分解されると、その一部は CO_2 として大気中に放出され、残りが土壌有機炭素として残留する。この土壌有機炭素は、分解速度の速い画分と遅い画分とが存在する。土壌有機炭素は分解されると CO_2 として大気中に放出される。

水環境

図 3 に、水循環の概要を示す。土壌は 3 層から構成され、それぞれの深さは $Depth^{(1)}$, $Depth^{(2)}$, $Depth^{(3)}$ で定義される (初期設定では、それぞれ 500、1000、1500mm としている)。各グリッドにおける土壌の水文的・放射的な特徴は、 $ALBEDO \cdot W_{sat} \cdot W_{fi} \cdot W_{mat} \cdot W_{wilt}$ の 5 種類のパラメーターによって与えられる。それぞれのパラメーターは、それぞれアルベド・飽和容水量・圃場容水量・基質ポテンシャル容水量・萎れ点容水量を示している。このモデルでは降水が唯一の水の供給源であり、そして降水は積雪・土壌上層貯留水・土壌下層貯留水・土壌基底層貯留水の 4 ヶ所にプールされる ($pool_{snow}$, $pool_{w(1)}$, $pool_{w(2)}$, and $pool_{w(3)}$)。以下、これらの貯留水の移り変わりを演算順に記す。なお、第 3 層から浸透した水は、ただちに runoff されるとした。

以下は、1 日毎に計算される水循環。まず、Ito & Oikawa (2002) の経験式を用いて、降水 ($prec$) を降雪 ($prec_{snow}$) と降雨 ($prec_{rain}$) とに分かれる。

$$prec_{snow} = prec / (1 + \exp[0.75 tmp_{air} - 1.5]) \quad (1)$$

$$prec_{rain} = prec - prec_{snow} \quad (2)$$

降雪は雪ストック ($pool_{snow}$) に組み入れられ、この雪ストックは土壌温度 (tmp_{soil}) の関数として融解する (式 4 には特に根拠があるわけではありません、適宜調整して下さい)。

$$\Delta pool_{snow} = prec_{snow} - tw \quad (3)$$

$$tw = pool_{snow} / (1 + \exp[-0.3 (tmp_{soil} - 10)]) \quad (4)$$

降雨 ($prec_{rain}$) の一部は樹冠により遮断され、その量は lai (葉面積指数、 m^2/m^2) に比例するとして次式で与えた(式 5 には特に根拠があるわけではありません、適宜調整して下さい)。

$$ic = 0.03 \times lai \times prec_{rain} \quad (5)$$

これらより、地表面に降り注ぐ液体状の水は $prec_{rain} + tw - ic$ で与えられる。このうちの、 $pn_{(0)}$ が土壌 1 層に浸透し、その余り ($prec_{rain} + tw - ic$) - $pn_{(0)}$ は流出水として取り除かれる。

土壌各層における貯水量の変化は以下のようにモデル化した。なお、ここで $pn_{(n)}$ は土壌 n 層からの重力による下方向への土壌水移動速度、 ev は地表面からの蒸発速度、そして $tr_{(n)}$ は土壌 n 層からの蒸散速度である。

$$\Delta pool_{w(1)} = pn_{(0)} - ev - tr_{(1)} - pn_{(1)} \quad (6)$$

$$\Delta pool_{w(2)} = pn_{(1)} - tr_{(2)} - pn_{(2)} \quad (7)$$

$$\Delta pool_{w(3)} = pn_{(2)} - pn_{(3)} \quad (8)$$

本モデルでは毛細管現象による上方向への水の移動は考えなかった。土壌水の浸透過程と蒸発散過程の詳細は、それぞれ Appendix A5 と A6 とに記した。

本モデルでは、光合成速度やフェノロジーを土壌水分含量に応じて制御する。そこで、PFT 毎の水分条件を記述する変数 $stat_{water}$ (0.0-1.0) を定義した。これは根バイオマスの垂直方向の分布で重み付け平均した土壌水分の可能吸水割合であり、1 日間隔で更新される。

$$stat_{water} = P_{root} \times \frac{pool_{w(1)} / Depth_{(1)} - Wwilt}{Wfi - Wwilt} + (1.0 - P_{root}) \times \frac{pool_{w(2)} / Depth_{(2)} - Wwilt}{Wfi - Wwilt} \quad (9)$$

ここで P_{root} は、地上 50cm 以内にふくまれる根バイオマスの比率であり、Jackson et al. (1996, Appendix B4) より PFT 毎の実測値を得た。

定着（木本の場合）

木本の定着は毎年 12 月 31 日に行われるとした。この定着過程は昨年一年間の降水量(mm)が「 $20 \times$ 昨年一年間の平均気温()」を超えている場合にのみ生じるとした (Köppen 1936)。定着可能な PFT を決定する基準については次の 2 つのパラメーターが与えられており、各グリッドの最近 20 年間の移動平均がこれらの範囲に収まる場合に定着可能であるとした。(1)maximum coldest-month temperature (TC_{max})、(2)minimum growth degree day (GDD_{min})。これらの値はいずれも LPJ-DGVM (Sitch et al. 2003)より得た(Appendix B5)。寒帯性落葉広葉樹 (BoBS) の場合には、南中時の光合成有効放射量 (以下、PAR) が、草本層上端の年平均で $700 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ をこえている場合のみ定着可能であると仮定した。

全ての新規定着木本は、胸高直径が 0.01m であるとし、定着の際には、この胸高直径サイズを満たす樹高・樹冠径を算出した (計算内容は後述の「木本の成長」に準じる)。また、新規定着個体の幹は全て辺材部から構成され (i.e. $dbh_{heartwood} = 0.0$)、また $height = crown_{depth}$ であるとした。この新規定着個体は葉と細根はつけておらず、その代わりに貯蔵資源 $mass_{stock}$ を 500g 有するとした。なお、森林における総炭素貯留量を保つため、新たに定着する個体のバイオマスはリターから得ている。

木本は $1\text{m} \times 1\text{m}$ のメッシュに 1 個体のみが生育できるとした。本モデルでは、樹冠が木本個体間で重ならないことを仮定する。したがって、新たに稚樹が定着できるメッシュとは、既存の樹木が生育していないだけでなく、稚樹が定着する際にその樹冠が既存個体の樹冠と重ならないことを条件となる。定着可能メッシュにおいては、PFT 毎に与えた固定確率 ($P_{establish}$) で木本が定着する。

どの定着可能 PFT がどのような割合で定着するのかについては、プログラムの設定を変えることにより、次の 3 つのシナリオから選択できる。実際のシミュレーションではシナリオ 2 と 3 を用いて、それぞれから植生変動速度の最大推定と最小推定を得る。もしこの両者の差が大きければ、それは植生変動における種子拡散の効果を無視できないことを意味する。

Scenario 1 (one specific PFT establish): 予め指定した 1 種類の woody PFT のみが定着する。パラメーター推定用。

Scenario 2 (infinite seed dispersal mode): 現在どのような woody PFT が分布しているのかわけず、その環境条件で定着可能な全ての woody PFT が等確率で定着する。

Scenario 3 (no seed dispersal mode): 各 woody PFT の定着比率を、それぞれのバイオマスに比例させる。なお、火災後の 50 年間とスピンアップには Scenario 2 を適用する。

定着（草本の場合）

草本 PFT の場合は定着過程を明示的に扱わず、常に全グリッドに少なくとも設定された最低バイオマスが存在していると仮定した。すなわち、 $g_{massleaf} \cdot g_{massroot} \cdot g_{massstock}$ は、 0.1 g m^{-2} を下回らないとした。草本は、C3 経路を有する温帯草本 (TeH) と C4 経路を有する熱帯草本 (TrH) の 2 種類の PFT から構成され、これら 2 つの草本 PFT も常に共存し、どちらかが片方が優占すると仮定した。そして、優占型が林床面積の 9 割を被覆し、優占しないタイプが残り 1 割の林床面積を被覆すると仮定した。優占タイプの更新は毎年 12 月 31 日に行われ、その 1 年間の単位面積当たり NPP が高かった方の草本タイプが、次の 1 年間の優占タイプと切り替わると仮定した。この切り替えがおきる際には、仮想林分全体で草バイオマスの増減が生じないように、2 種類の草本 PFT の間で単位面積当バイオマスを示すプロパティ ($g_{massleaf}$, $g_{massroot}$, and $g_{massstock}$) を交換した。

PAR の分配

本モデルでは、生物圏へ入射される南中時の光合成有効放射量を、直接光成分 (par_{direct}) と拡散光成分 ($par_{diffuse}$) 別に 1 日間隔で算出する (Appendix A2)。これらをいかに各木本個体や草本層へ配分するかは、それぞれの成長速度に最も強く影響を与え、生産と競争とを強く制御する。

木本

木本 PFT では、各個体の樹冠を鉛直方向 10cm 間隔の薄い 'disk' に分解し (図 1) これらを光合成の単位とした。個体 n の葉群層 l に入射される南中時の光合成有効光量 $par_{wood(l,n)}$ ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は、下式により与える。なお、 $fpar_{direct(n,l)}$ は個体 n の葉群層 l における、群落上空と比較した直接光相対強度 (0.0-1.0)、 $fpar_{diffuse(l)}$ は葉群層 l における、群落上空と比較した拡散光相対強度である (0.0-1.0)。

$$par_{wood(l,n)} = fpar_{direct(l,n)} \times par_{direct} + fpar_{diffuse(l)} \times par_{diffuse} \quad (10)$$

$fpar_{direct(n,l)}$ は、各 disk から南中時の太陽の方向に向かって、その disk と同じ太さの持つパイプを伸ばし、このパイプ内に入った葉群面積を用いて算出する (図 4)。

$$fpar_{direct(l,n)} = \exp \left[\frac{-1.0 \times \sum_{p=1}^{woody_pft} (EKO_p \times la_p)}{crown_{area}(n)} \right] \quad (11)$$

ここで、 $la_p(\text{m}^2)$ はパイプの中に入った PFT p の葉群面積、 $crown_{area}(n)$ はパイプを伸ばしている

個体 n の樹冠水平断面面積(m^2)、 EK_{Op} は PFT p の垂直方向光減衰係数であり、全ての PFT について 0.5 を仮定した。なお、このパイプは仮想林分の南側を突き抜けるが、もしその突き抜ける位置の高さが林分の最大樹高に満たない場合、同じ高さ、同じ東西位置の北側から再び仮想林分内に入るとした。これは、同じ仮想林分が繰り返し存在していることを仮定することで、仮想林分の南北方向の光環境にバイアスを与えないためである。なお、この算出方法は計算力を要するため、 $fpar_{direct(n,l)}$ は 5 日毎に更新される（この設定は簡単に変更可能）。

散乱光は全天の様々な方向から入射されるので、簡単のため水平方向の葉群分布は無視して計算し、同じ高さに位置する葉群層には同じ強度の散乱光が入射されるとした。葉群層 l に入射される拡散光相対強度 $fpar_{diffuse(l)}$ は、次の手順で毎日で算出される。ここで $lai_{(p,l)}$ は、葉群層 l より上方向のみについて求めた PFT p の葉面積指数である。

$$fpar_{diffuse(l)} = \exp\left\{-1.0 \times \sum_{p=1}^{woody-pft} (EK_p \times lai_{(p,l)})\right\} \quad (12)$$

草本

木本 PFT の樹冠を通過した太陽光は草本層に入射される。草本層へ入射される光合成有効放射量（ par_{grass} in $\mu mol \text{ photon } m^{-2} s^{-1}$ ）は、下式に従い 1 日間隔で算出した。

$$par_{grass} = (par_{direct} + par_{diffuse}) \times \exp\left(-1.0 \times \sum_{p=1}^{woody-pft} (eK_{(p)} \times lai_{(p)})\right) \quad (13)$$

ここで lai_p は、この林分における木本 PFT p の葉面積指数(m^2/m^2)である。 eK_p は、鉛直方向の光減衰係数 EK_{Op} を南中時の太陽高度 (sl_{hgt} , 計算方法は Appendix A2 を参照のこと) に合わせて 1 日間隔で調整したパラメーターであり下式で与えられる。

$$eK_{(p)} = EK_{(p)} / \sin(sl_{hgt}) \quad (14)$$

上式では、木本の葉群が草本層の上に均一に広がることを仮定しているが、実際には場所毎に葉群の濃淡があり、しかも光強度は葉群量に対して指数関数的に減少するため、この式による推定値は過小となることを指摘しておく。

光合成

光合成量に関わる生理パラメーターの算出に際しては、PAR 強度以外の環境要因(e.g. 気温・CO2 濃度・水ポテンシャル)が仮想林分のどの位置でも同じであると仮定した。個葉の単位面積当た

り個葉光合成速度(p_{single} in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)は、葉に入射される光合成有効放射量(par in $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)のミカエリス式型関数として与えた。ここで、 p_{sat} は PFT 毎の光飽和時光合成速度($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、そして lue は光合成光利用効率 ($\text{mol CO}_2 \text{ mol photon}^{-1}$)であり、Appendix A4 に従い 1 日間隔で更新した。

$$p_{single} = \frac{p_{sat} \times lue \times par}{p_{sat} + lue \times par} \quad (15)$$

木本

時刻 t (hour from sunrise) に葉群レイヤー l へ入射される光合成有効放射量 (x in $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は、Kuroiwa (1979) に従って日間隔で近似した。ここで $dlen$ は昼の長さ(hour)、 par_l は南中時に葉群レイヤー l へ入射される光合成有効放射量である。

$$x = par_l \times \sin^2\left(\pi \times \frac{t}{dlen}\right) \quad (16)$$

式 16 を式 15 へ代入し、1 日の積分を行うことによって、葉群レイヤー l の 1 日当たり光合成量 (gpp_l in g DM day^{-1}) が算出される。係数 0.090936 は ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) から ($\text{g DM m}^{-2} \text{ hour}^{-1}$) への単位変換係数であり、 μ を外すための 10^{-6} 、 $\text{mol carbon g carbon}$ の 12 、 g carbon g DM の 2.105 、秒 時の 3600 を掛け合わせたものである。また、 la_l は葉群レイヤー l 内の葉面積 (m^2) である。

$$\begin{aligned} gpp_l &= 12 \times 10^{-6} \times 3600 \times \frac{1}{0.41505} \times la_l \times \int_0^{dlen} p_{single} dt \\ &= 0.090936 \times la_l \times dlen \times p_{sat} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + lue \times par_l / p_{sat}}}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

式 17 に基づいて各葉群レイヤーの 1 日当たり GPP を毎日算出し、これを個体毎に合計し、各個体の 1 日当たり GPP とした。毎日の光合成産物は $mass_{available}$ へ加えられる。

草本

草本層内で葉群は均一に分布することを仮定している。したがって、時刻 t (hour from sunrise) における草本レイヤー上端からの積算 LAI が y (m^2/m^2) の位置の光合成有効放射量 (x in μmol

photon $m^{-2} s^{-1}$) は下式で与えられる。ここで par_{grass} は、草本レイヤーに入射される南中時の光合成有効放射量 (par in μmol photon $m^{-2} s^{-1}$) である。

$$x = par_{grass} \times \text{Sin}^2\left(\pi \frac{t}{dlen}\right) \times e^{-eK \times y} \quad (18)$$

式 18 と式 15 とを合わせ、葉群 y と日 t との重積分を行うことで、草本レイヤーの単位面積当たり GPP (gpp_g in g DM $m^{-2} day^{-1}$) が得られる (Kuroiwa 1979)。ここで lai_g は草本レイヤーにおける葉面積指数 ($m^2 m^{-2}$) である。

$$\begin{aligned} gpp_g &= 0.090936 \times \int_{y=0}^{lai_g} \int_{t=0}^{dlen} p_{single} dt dy \\ &= 0.090936 \times \frac{2 \times dlen \times p_{sat}}{eK} \times \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{par_{grass} \times eK \times lue}{p_{sat}}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{par_{grass} \times eK \times lue}{p_{sat}} e^{-eK \times lai_g}}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

毎日の gpp_g は $gmass_{available}$ へ加えられる。

キャノピーコンダクタンス

個葉単位面積当たり気孔コンダクタンス (gs in mol H_2O $m^{-2} s^{-1}$) の算出に際しては、SEIB-DGVM では Ball et al. (1987) の半経験的モデルへ Leuning (1990) が変更を加えた式を使用した。ここで $co2_{atm}$ は大気中の二酸化炭素濃度 (in ppmv)、 $co2_{cmp}$ は二酸化炭素濃度飽和点 (in ppmv)、 vpd は飽差 (in hPa) である。

$$gs = GS_{b1} + \frac{GS_{b2} \times p_{single}}{(co2_{atm} - co2_{cmp})(1 + vpd / GS_{b3})} \quad (20)$$

ここで GS_{b1} 、 GS_{b2} 、 GS_{b3} は、PFT ごとに与えられるパラメーターである。 $vpd \cdot co2_{atm} \cdot co2_{cmp}$ は、Appendix A1 と A4 の手法によって、日間隔で更新される。この式 20 へ、式 15 と式 16 を代入し、時間についての積分を行うことによって、個体 n 葉群レイヤー l の昼間平均気孔コンダクタンス ($gs_{mean(l,n)}$ in mol H_2O $m^{-2} s^{-1}$) が算出される

$$gs_{mean(l,n)} = GS_{b1} + \frac{GS_{b2} \times p_{sat}}{(co2_{atm} - co2_{cmp})(1 + vpd / GS_{b3})} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + lue \times par_{(l,n)} / p_{sat}}} \right) \quad (21)$$

従って、この林分全体における木本 PFT による日平均気孔コンダクタンス($ccon_{wood}$ in mol H₂O m⁻² s⁻¹)は、次の式で与えられる。なお $AREA$ はシミュレーションを行う林分の面積である(m²)。

$$ccon_{wood} = \sum_n \sum_l (gs_{mean(l,n)} \times la_{(l,n)}) / AREA \quad (22)$$

草本 PFT による昼間平均気孔コンダクタンス($ccon_{grass}$ in mol H₂O m⁻² s⁻¹)は、式 15、式 18、そして式 20 を合わせて、時間と LAI についての重積分を行うことで次の通り得られる。

$$ccon_{grass} = GS_{b1} \times lai_g + \frac{GS_{b2} \times p_{sat}}{(co2_{atm} - co2_{cmp})(1 + vpd / GS_{b3})} \times \frac{2}{eK} \times \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{par_{grass} \times eK \times lue}{p_{sat}}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{par_{grass} \times eK \times lue}{p_{sat}} e^{-eK \times lai_g}}} \right) \quad (23)$$

これら $ccon_{wood}$ と $ccon_{grass}$ の合計を、この林分の昼間平均気孔コンダクタンス ($ccon$ in mol H₂O m⁻² s⁻¹) とした。

成長呼吸

植物組織の生産には、その産物を構成する物質量と、これを構成するための代謝エネルギーの両者が必要とされる。本モデルでは、「必要とされる資源量 / 各器官の成長量」の乾燥重量比を成長コスト(g DM g DM⁻¹)として定義した。したがって、器官 o における成長呼吸量は($RGo - 1.0$) $\cdot \Delta mass_o$ で与えられる。ここで RGo は器官 o の成長コスト、 $\Delta mass_o$ は器官 o のバイオマス増加量である。成長コストは、各組織の化学組成比(タンパク質、炭水化物、リグニン、脂質、有機酸)に、各化学成分を合成するために必要なグルコース量を乗算する事により推定できる(Lambers et al., 1998)。この方法を用いて、Poorter(1994)は、文献より収集した植物の組織毎の化学組成データから各器官の単位重量あたりの構成コストを、葉 1.56 (123 種の平均)、茎 1.44 (38 種の平均)、根 1.34 (35 種の平均)と推定した。本モデルではこれらの数値を各器官の成長コストとして仮定したが、草本の地上部については葉と茎とを区別していないため、その成長コストを 1.50 とした。また、これら Poorter(1994)の推定値は主に草本の測定値に基づくため、リ

グニン含有量の高い木本の幹の成長呼吸量は、Penning de Vries (1975)の表を元に 1.68 と推定した。これは、Poorter(1994)に合わせて、窒素源を NO_3^- とするように調整を行った値である。なお、成長に伴って減少する乾燥重量は全て成長呼吸に用いられ、 CO_2 として直ちに排出されるとした。

貯蔵資源の生産と貯蔵に際しては、直接的なコストのみに着目しても、貯蔵場所からの転流、貯蔵化合物への転換、貯蔵細胞、組織、器官の構築などによる成長呼吸が必要とされ、貯蔵資源を利用可能な資源に転化させるためにも同様の呼吸が生じる(Lambers et al., 1998)。本モデルでは、貯蔵資源を生産する為にはバイオマスの 10%が消費され、また貯蔵資源を利用可能な資源に転化させるにもバイオマスの 10%が消費されると仮定した ($RG_{stockin} = 1.1$; $RG_{stockout} = 1.1$)。

維持呼吸

バイオマスを維持するためには維持呼吸が必要である。本モデルでは葉群フェノロジーに関わらず維持呼吸が生じるとした。維持呼吸に必要な資源は、利用可能資源プールを優先的に使い、それが必要量に満たない場合には貯蔵資源を利用し、それでも足りない場合には、木本・草本とも葉・根・辺材の各バイオマスの 3%/day が脱落するとした(辺材の場合は芯材へと変わる)。これによって、維持呼吸資源の不足が続くと、呼吸組織は 1 ヶ月で元の約 40%程度に減少する。なお、芯材と貯蔵資源は維持呼吸しないとした。

維持呼吸速度は、一般に組織の窒素含量比と強く相関している(Ryan 1991)。そこで、本モデルでは、維持呼吸速度を、各組織に含まれる窒素量の関数として扱った。下式で、footnote の o は器官の種類を示し、木本の場合には葉群(f)・辺材(s)・細根(r)の 3 種類が、草本の場合には地上部(f)・地下部(r)の 2 種類が入力される。そして各器官における呼吸量の合計値が、各木本個体と草本層の維持呼吸速度である。 RM は 15 ベース呼吸速度で、全ての PFT について 0.10 ($\text{gDM gN}^{-1} \text{day}^{-1}$)を仮定した。また、 PN_n は器官 n におけるバイオマス当たりの窒素含量比(gN gDM^{-1})、 tmp は地上部器官については気温、地下器官については土壌温度が代入される (in Celsius)。

$$RM \times (mass_o \times PN_o) \times \exp\left[\frac{\ln(qt)}{10}(tmp - 15.0)\right] \quad (24)$$

qt は呼吸速度における温度感受性を決める値であり、Yokota and Hagiwara (1996)に基づき次のように定義した。

$$qt = 2.0 \exp[-0.009(tmp - 15.0)] \quad (25)$$

葉の窒素含有量 (PN_f in proportion) は、Write et al (2004)のデータセットより PFT 毎の値を

得た (Appendix B6)。但し、このデータセットには寒帯性落葉針葉樹(BoND)の測定値が含まれていなかったため、葉の寿命を3ヶ月と仮定し、これを Reich et al (1997)の経験式に代入し推定した。そして、辺材と根における窒素含有比は、この葉の窒素含有比と一定比にあると仮定して次式で与えた。これらの係数は、Friend et al.(1997)より得た。

$$PN_s = 0.145 \times PN_f \quad (26)$$

$$PN_r = 0.86 \times PN_f \quad (27)$$

Turnover

葉群、辺材、細根にはそれぞれに PFT 特有の Turnover rate (TO_l , TO_s , and TO_r in year⁻¹)が与えられ、毎日、一定重量比の葉群と細根がリッターへと変わり、一定重量比の辺材が芯材へ変わるとした。落葉性 PFT の場合、展葉期間の葉のターンオーバーは生じない(但し、最後の展葉開始日から一年間落葉期間に移行せず、事実上の常緑性と機能している場合は例外)。これらではフェノロジーの最後に、現在展葉している葉を全て落とす。なお、落葉の際の、資源回収は起きないとした。各 PFT 毎の turnover rate は Appendix B6 に載せた。これらは基本的には、Write et al (2004)のデータセットより算出した各 PFT の平均値であるが、このデータセットには寒帯性落葉針葉樹(BoND)の測定値が含まれていなかったため、これを3ヶ月と仮定した。また、辺材の Turnover rate は全ての木本 PFT について 0.05 と仮定した。細根の turnover rate は、Gill and Jackson (2000)より次の値を得た：寒帯木本 0.42、温帯木本 0.64、熱帯木本 0.76。C3 草本 0.4 (高緯度と温帯域の草原における fine root の turnover rate の平均)、C4 草本 0.9 (熱帯域の草原における fine root の turnover rate の平均)。

フェノロジーの決定

落葉性 PFT は活動期と休眠期との切り替えが生じ、休眠期間には一切の葉を保持せず、また成長も行われなかったとした。このフェノロジー状態の切り替え基準、そして切り替えが生じた時のイベントは次の通りである。

休眠期 活動期

各 PFT は、以下の5つのフェノロジータイプに分類し(パラメーター: *Phenology_type*)、それぞれに異なるモデルを適用する事により1日間隔で展葉開始日を算出した。これらのうち木本 PFT における展葉開始日の算出には、Botta et al. (2000)のモデルシステムを採用した。これは、衛星データから展葉開始日の全球分布を推定し、これを説明するためにバイオーム毎に最適なフェノロジーモデルとそのパラメーターを与えたものである。

Deciduous broad-leaved-woods (TeBS, BoBS)

1月1日(南半球の場合は7月1日)から加算させた5ベースGDDが、 $-68 + 638 \exp[-0.01 i]$ を超えた日に展葉開始。フェノロジーを制御する変数は $gdd5_{Jan}$ である。ここで i は、11月1日(南半球の場合は5月1日)より加算させた日平均気温が5を下回った日数である。従って、このタイプの葉群フェノロジーにおいては、冬の厳しさも影響を与えることになる。

Boreal deciduous needle-leaved-woods (BoNS)

直前60日間において、日平均気温が5以上であった日数(ngd)が15日を超えた日に展葉開始。

Raingreen woody PFT (TrBR)

北半球は1月1日から、南半球は7月1日から、展葉日を決める計算を行う。 $stat_{water}$ (PFT毎の値)の最近5日の平均と、5日前~10日前の平均を比較し、前者が後者を上回った日を d 日とする。 d 日後からの25日間において $stat_{water}$ が上昇した日が下降した日よりも多ければ、 $d+50$ 日を展葉開始日とする。

Grass PFT (TeH, TrH)

最適葉面積指数の2週間 running mean が0.1を上回った日を展葉開始日とした。なお、このみ Botta et al. (2000)とは異なる計算方法である。

結果を安定させるため、展葉開始時期に関して次の制約を追加した：草本PFTと土壌水分依存型フェノロジーを持つPFTを除き、展葉開始 Day of the Year (doy)は、北半球の場合は30+緯度から130+緯度まで、南半球の場合は212-緯度から312-緯度まで(但し、この条件は Raingreen woody PFT と草本PFTには適用されない)。さらに、休眠期に入ってから最低60日経過以降に展葉期に入ることが出来るとした。

活動期に入ってから、草本木本とも、14日間にわたり毎日同量の貯蔵資源を利用可能資源に転換させることで、全貯蔵資源を消費させた。但し、草本PFTにおいては、展葉量が最適展葉量(lai_{opt} , 定義は後述)に達している日については、この転化は生じさせなかった。

活動期 休眠期

全ての落葉性PFTについて、展葉開始から60日を経過以降、休眠期への切り替えタイミングを1日間隔で計算する。休眠期に入ると直ちに、木本PFTの場合は全ての葉が、草本PFTの場合は全ての地上部のバイオマスが、リターへ組み込まれる。そして、もし休眠期に入る時点での貯蔵資源が、 $100 \text{ g DM / individual}$ (木本PFT) または 50 g DM / m^2 (草本PFT) の最低基準に満たない場合には、この最低基準に達するまで貯蔵資源を水増しさせる。活動期から休眠期への切り替えの基準は、次の3種類である。

Temperature-controlling leaf shedding woody PFT (TeBS, BoNS, BoBS)

日平均気温の 10 日間 running mean が 9 以下（但し、寒帯性落葉針葉樹の場合は 2 以下）、または日平均気温の 10 日間 running mean が coldest month temperature（最近 20 年間の running mean）よりも 5 以内に近づいた日。

Raingreen woody PFT (TrBR)

NPP（PFT 毎の平均）の 10 日間 running mean が負になった日。

Grass PFT (TeH, TrH)

最適葉面積指数の 2 週間 running mean が 0.1 を下回った日。

これらの条件が満たされない限りは休眠期への移行はおきず、したがって落葉性と定義されている PFT も実際には常緑性として振る舞う。

木本の成長

殆どのギャップモデルでは、光合成生産物のアロケーションを一定の比率で行わせている。しかし、本モデルでは必要なパラメーターを減らす為に、各木本個体は与えられた条件の下で光合成生産量を最大化するという動的最適化スキームを適用した。木本 PFT の成長過程は、日間隔・月間隔・年間隔で計算されるモジュール群によって制御される。

Daily computation

利用可能な資源（ $mass_{available}$ ）が 0 以上の全個体について、次のプロセスが順次実行される。但し休眠期間には、これら全ての手順が省かれる。

(1) もし現在の細根バイオマス（ $mass_{root}$ ）が機能的バランスからの要求量（ $mass_{leaf} \div FRratio$ ）を下回れば、その不足分を利用可能資源が無くならない限り補充させる。なお、 $FRratio$ は木本 PFT の場合は 1.50、草本 PFT の場合は 0.50 を仮定している

(2) 貯蔵資源の補充：もし貯蔵資源量（ $mass_{stock}$ ）が現在展葉している葉バイオマス（ $mass_{leaf}$ ）を下回るようであれば、この両者が一致するまで貯蔵資源量を増大させる。但し、展葉期に入ってから 30 日以内の場合には、この手順は省かれる。

(3) Daily computation の最終ステップは、展葉である。各個体の展葉量には、1.樹冠サイズ、2.辺材による水輸送量、3.利用可能な資源量、の 3 つの制約が課せられ、それぞれの制約が許す最大展葉量 max_1, max_2, max_3 （全て g DM）を以下のように定義する。

$$max_1 = (crown_{area} + \pi \times crown_{diameter} \times crown_{depth}) \times LA_{max}/SLA \quad (28)$$

$$max_2 = ALM_1 \times \left[\pi \left(\frac{dbh_{heartwood}}{2} + \frac{dbh_{sapwood}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{dbh_{heartwood}}{2} \right)^2 \right] / SLA \quad (29)$$

$$max_3 = mass_{available} / RG_f. \quad (30)$$

ここで SLA は PFT 毎に与えられる単位葉バイオマスあたりの葉面積であり、Wright *et al.* (2004) のデータセットより値を得た (Appendix B4)。ただし、このデータセットは寒帯性落葉針葉樹 (BoND) を含まないため、その葉寿命 3 ヶ月と仮定し、Reich *et al.* (1997) の回帰式より SLA を推定した。

ここで LA_{max} は、樹冠の単位表面積 (但し、下面は除く) あたりに展葉可能な最大葉面積であり、各 PFT 与えられる。 ALM_1 は定数であり、葉面積あたりに必要な辺材断面積を定義する (Shinozaki *et al.* 1964a, b)。展葉量可能な葉群バイオマスを $\min(max_1, max_2, max_3)$ とし、この値に現在の葉群バイオマスが満たなければ、その不足分の葉群を $mass_{available}$ を用いて生産させる。

Monthly computation

月に 1 度、次のプロセスが順に実行される。但し落葉性 woody PFTs については、休眠期間、および休眠解除から 3 週間以内は、これら全ての手順が省かれる。

(1) 繁殖：バイオマスが 10 kg DM を超える全ての個体について、この時点における利用可能資源 ($mass_{available}$) の 10% は、繁殖に用いられると仮定し、リッターに組み入れられる。

(2) 幹の成長：この時点で残存する全ての利用可能資源は、辺材バイオマス ($mass_{sapwood}$) の成長に用いられる。芯材は、辺材から徐々に形成されるとしているので、直接的なアロケーションは行われない。辺材バイオマスの増大は、辺材直径 ($dbh_{sapwood}$) と幹長 ($height$) の伸長を伴うが、それぞれの伸長幅 ($\Delta dbh_{sapwood}$ と $\Delta height$) は、以下に説明する 2 つの Trunc mechanics を満たすように数値的に求められる。

Trunc mechanics の 1 つめは、幹におけるバイオマスと幾何学的特徴との関係である。幹バイオマスは、胸高直径と木の高さの関数として次式によって与えられる。

$$mass_{trunk} = ALM_3 \times \pi \left(\frac{dbh_{sapwood} + dbh_{heartwood}}{2} \right)^2 \times height \quad (31)$$

ここで ALM_3 は材密度であり、BoNS は Schulze *et al.* (1995) より値を得た。それ以外の木本 PFT の場合は、針葉樹は 374×10^3 (g/m³)、広葉樹は 492×10^3 (g/m³) とした。これらの値は、木材工業ハンドブック (1982) に掲載されている日本産主要樹種の容積密度を、針葉樹 (n=24) と広葉樹 (n=46) 毎に平均した値である。但し、これらは主に有用樹種から得られた数値であり、低い材密

度を有するパイオニア種の数字が殆ど含まれていない点に留意する必要がある。なお、上の式では、幹の形状を円柱と仮定しており、幹そのもののバイオマスは過大推定となるが、このモデルの定義では幹に主根と枝のバイオマスも含まれているため、それほど大きな偏りは生じないと考えた。

Trunc mechanics の 2 つめは、次式で示す樹高と幹の太さとの関係である

$$height \leq \left[\frac{1}{HGTs \times (dbh_{sapwood} + dbh_{heartwood})} + \frac{1}{HGTmax} \right]^{-1} \quad (32)$$

ここで $HGTmax$ と $HGTs$ は、それぞれ各木本 PFT 毎に与えられた最大樹高と初期成長速度である。Appendix B4 に記したように、 $HGTmax$ と $HGTs$ は、熱帯林と温帯性広葉樹は Kohyama et al. (1999)、温帯性針葉樹は Nishimura (personal communication)、寒帯林は Takahashi et al. (2001) より値を得た。但し、本モデルでは個体間で樹冠が同じ空間を占める事ができないとしているため、樹高の伸長に対しては空間的な制約が課せられる場合がある。そのような場合には、DBH がどれほど大きな値となっても、その制約以上には樹高は伸長できないとした (i.e. この場合は、太くて短い幹が生じる)。

(3) 樹冠断面積の増大：続いて、幹の成長量に応じて樹冠断面積を増大させる。樹冠径の最大可能値は、Reinecke's rule (Zeide, 1993) に基づき、次の関係で与えられる。ここで ALM_2 は定数であり、針葉樹には 100.0、広葉樹は 200.0 を与えた。

$$crown_{area} \leq ALM_2 \times (dbh_{sapwood} + dbh_{heartwood})^{1.6} \quad (33)$$

なお樹冠断面積の増大には、個体間で樹冠が同じ空間を占めないという仮定に基づく空間的制約が与えられる。また、樹冠の直径が、各 PFT に設定された最大値 (CD_{max}) を超えないという制約もかかる。

Annually computation :

樹冠下端から順に crown disk を落下させ樹冠の枯れ上げを行うことで、 $crown_{depth}$ を調整する。この処理は、毎年 12 月 31 日に葉群フェノロジーに関わりなく実行される。年間最大で 10disk が落下し、各 crown disk の高さは 10cm であるので、年間最大で 1 m 高の樹幹が枯れあがる。落下させる crown disk の数は次のように求めた。まず、樹冠下端から 10 枚までの crown disk のそれぞれについて、昨年一年間の $stat_{leaf}$ 合計を算出する。ここで $stat_{leaf}$ は葉の 1 g 当 1 日当の利益 (in g DM g DM day⁻¹) の期待値であり、次式で定義される。

$$stat_{leaf} = gpp_l - cost \times \frac{la}{SLA} \times \frac{1}{10 \times crown_{depth}} \quad (34)$$

gpp_l は crown disk l における単位葉重あたり光合成量(in g DM g DM day⁻¹)、 $cost$ は単位葉重を維持するのに必要な資源量であり (in g DM g DM day⁻¹)、次の式で定義した。ここで $r1$ と $r2$ は、それぞれ葉と細根の維持呼吸速度であり(g g⁻¹ day⁻¹)、式 24 から PFT 毎に算出される。

$$cost = \left(r1 + RG_f \times \frac{TO_f}{365} \right) + \left(r2 + RG_r \times \frac{TO_r}{365} \right) \frac{1}{FRratio}. \quad (35)$$

この $stat_{leaf}$ の昨年一年間の合計を、樹冠最上レイヤーとの間で比較し、その比が ALM_4 以下であり、なおかつ最も深さの大きな葉群が枯れ上げられるとした。ただし、 $crown_{depth}$ が 1 m以下となるようには枯れ上げないとした。また、一度枯れ上げた樹冠レイヤーは、たとえ光環境が改善されたとしても、再び葉をつけることは出来ないとした。

また、同じく年に一度、樹冠位置を周囲の最も空いている方向へ水平移動させた。これは、樹木が光や空間のある方向へ枝を伸ばしていくことで樹冠形態が変化することを表現したものである。このような過程を含めたのは、SEIB-DGVM は個体の樹冠同士が同じ空間を占めないことを仮定しており、この可塑性を導入しない限り、樹冠同士の干渉によって高木の数が極端に制限され、たとえ熱帯林であっても樹冠層が疎らとなってしまったのが理由である。なお、幹と樹冠の中央の位置が樹冠半径の半分に達するまで樹冠は移動可能とし、樹冠の最大移動速度は 20cm/year と仮定した。

草本の成長 (daily computation)

草本の成長ルーチンは、成長期間にのみ 1 日間隔で呼び出される。このルーチンでは以下の手順が順に実行されるが、利用可能な資源が尽きたところで停止される。

- (1) 根のバイオマス現存量が、必要量 ($gmass_f \div FRratio$) に達していなければ、その付属分を生産する。
- (2) もし貯蔵資源量が現在展葉している葉重を下回るようであれば、この両者が一致するまで貯蔵資源量を増大させる。但し、展葉期に入って 30 日以内の場合には、このステップは省かれる。
- (3) 葉の現存量が、最適 LAI (lai_{opt} in m² m⁻²) の一週間 running mean に達していないときには、それに達するまで葉を成長させる。ここで最適 LAI とは npp_g を最大にする LAI であり、以下の黒岩(1966)の式に従って 1 日ごとに算出される。なお、 npp_g は $gpp_g - cost \times lai_g / SLA$ と定義され、式 19 と式 34 より算出される。

$$lai_{opt} = \frac{\ln par_{grass} - \ln \left\{ \frac{p_{sat}}{lue} \left[\left(1 - \frac{cost / SLA}{0.09093 \times dlen \times p_{sat}} \right)^{-2} - 1 \right] \right\}}{eK} \quad (36)$$

(4) この時点で残存している利用可能な資源 ($gmass_{available}$) は、全て繁殖に用いられると仮定し、リターに組み入れる。ただし、この繁殖過程は成長期間に入って 30 日以内、また貯蔵資源が 100g DM m⁻² を下回る時には生じない。

死亡（攪乱以外の要因による）

死亡は、木本 PFT でのみ明示的に扱い、草本 PFT では高い Turnover rate によって間接的に表現される。木本 PFT の死亡ルーチンは年に一度、年末に実行される。その死亡率は、Background mortality、Heat stress、Bioclimitic limit mortality の 3 種類の死亡率の合計であり (Sitch et al., 2003)、個体毎に算出される。なお、年間の NPP が 10 DM g 以下の個体、幹の直径が 1m を超えた個体は、すぐに死亡するとした。また、最近一年以内に定着した木本は死なないとした。以下、それぞれの死亡率の定義について述べる。

Background mortality は、成長効率に応じ死亡率である。成長効率は環境ストレスへの耐性の良い指標として知られている (Warning, 1983)。Background mortality に関する標準的な関数は存在しないため、SEIB-DGVM では、次式のように定義した。ここで $anpp$ はその個体の 1 年間の純生産量 (g DM)、 la_{mean} は過去一年間における平均日展葉面積 (m²)、そして M_1 (≤ 1.0) と M_2 (≥ 1.0) は、各木本 PFT に与えられているパラメーターである。

$$\frac{M_1}{M_2 \frac{anpp}{la_{mean}}} \quad (37)$$

Heat stress による死亡率は、寒帯性木本 PFT の 3 種 (BoNE, BoNS, BoBS) についてのみ下式に従って算出さる。これは、モデル、パラメーター共に LPJ-DGVM (Sitch et al 2003) より得た。なお、 $tmp_{air}(d)$ は d 日における気温である。

$$\min \left[1.0, \sum_{d=1}^{365} \max(0.0, tmp_{air}(d) - 23.0) / 300 \right] \quad (38)$$

Bioclimitic limit による死亡は、各 PFT 毎に定義された生存可能な環境範囲であり、モデル、パラメーター共に Prentice et al (1992) より得た。その与え方は単純で、過去 20 年間における最も寒い月の平均気温が、woody PFT 毎に定められた値 (パラメーター: TC_{min}) を下回れば、その

PFT は存続できないというものである。また、寒帯性落葉針葉樹(BoNE)のみについては、最も寒い月と最も暖かい月との平均気温の差が、20年間の平均で 43 を下回った場合にも、存続できないとした。死亡した個体は、その全てのバイオマスがリターに組み込まれる。

攪乱 (火災)

攪乱要因としては火災のみを仮定した。火災モデルには、Thonicke et al. (2001)が LPJ-DGVM への組込用に開発したモデルを採用した。このモデルにおいて、火災は biomass と litter の合計が 200 g C m^{-2} 以上蓄積している場合にのみ発生し、その場合の1年間の火災発生確率は、下式より土壌第1層含水率の関数として与えられる。

$$s \times \exp\left(\frac{s-1}{0.45(s-1)^3 + 2.83(s-1)^2 + 2.96(s-1) + 1.04}\right) \quad (39)$$

但し、変数 s は

$$s = \sum_{day=1}^{365} \exp\left[-\pi\left(\frac{pool_{w(l)}}{W_{sat} \times Depth_{(l)}} \times \frac{1}{m_e}\right)^2\right] / 365 \quad (40)$$

ここで m_e は木本と草本に対する発火率の違いを補正する項であり、(地上部木本バイオマス/地上部全バイオマス) \times 0.3 + (地上部草本バイオマス/地上部全バイオマス) \times 0.2 と定義した。なお、火災は同じプロットで2年続いて起きないと仮定した。

火災時における木本の生存率には、PFT 毎に特有の値が与えられる (M_3 , Appendix B5)。この値も、火災発生モデルと同じく Thonicke et al. (2001)より得た。火災の生じた区画では、草本の地上部バイオマス、全木本個体の葉群バイオマス、焼死した木本の幹バイオマスの半分、リタープールの半部分が CO_2 として放出されると仮定した。死亡した木本個体の上記以外のバイオマスは、全てリタープールへと組み入れられるとした。全ての落葉性 PFT の葉群フェノロジーはオフとされる。もし火災後に、草本 PFT の貯蔵資源量 ($gmass_{stock}$) が最低値 (50 g DM m^{-2}) を下回るようであれば、その不足分をリターから補充させた。

土壌呼吸

月一度の間隔で、リターと土壌有機炭素の分解が行われる。SEIB-DGVM では、土壌呼吸過程に陸面炭素循環モデル DEMETER-1 (Foley, 1995) のリター・土壌有機炭素分解モデルを、一部のパラメーターを単純化して使用した。リターの月間分解率 k_l (month^{-1}) は下式で与えられる。ここで aet は昨年一年間の蒸発散量 (in mm year^{-1}) である。

$$k_f = \min\left(1.0, \frac{10^{(-1.4553+0.0014175 \times aet)}}{12}\right) \quad (41)$$

分解されたリターのうち 70%は大気中に CO₂として放出され、残る 30%が土壤有機炭素に組み込まれる。そのうち 98.5%は中間の分解速度を持つ土壤有機炭素プール ($pool_{som1}$ in g C m⁻²) に、1.5%が遅い分解速度を持つ土壤有機炭素プール ($pool_{som2}$ in g C m⁻²) へ追加される。

Foley(1995)に従い、地温 20 における土壤有機炭素の平均 turnover 時間(TO_{int} , TO_{slow} in year⁻¹) を、それぞれ 1/15、1/750 year⁻¹と定義した。土壤からの呼吸量は、これら 3 成分の呼吸量の合計として、月一回計算される。全成分の月間分解率 (k_n in month⁻¹) は次式で与えた。

$$k_n = \left[\frac{TO_n}{12} \times g(tmp_{soil}) \times f(pool_{w(l)}) \right] \quad (42)$$

ここで g と f は、呼吸速度における温度と土壤含水量の影響を定義する関数であり、それぞれ次式で定義される。なお、 tmp_{soil} には直前 1 ヶ月の移動平均を入力する (in Celsius)。

$$g(tmp_{soil}) = \exp\left(308.56 \times \left(\frac{1}{66.02} - \frac{1}{tmp_{soil} + 46.02}\right)\right) \quad (43)$$

$$f(pool_{w(l)}) = 0.25 + 0.75 \left(\frac{pool_{w(l)}}{W_{sat} \times Depth_{(l)}}\right) \quad (44)$$

なお、Foley(1995)は、 $g(tmp_{soil})$ に Q_{10} を用いた指数型関数を仮定しているが、これは低温域における土壤分解速度を過小に評価してしまうので、SEIB-DGVMではLloyd and Taylor (1994)の温度感受性式を用いた。なお、分解された土壤炭素は全て CO₂として放出される。

パラメーター調整の一例

草本 PFT

草原生態系において、植物生産を最も強く規定するのは年降水量である。地上部年間 NPP を $ANPP$ (g DM m⁻² year⁻¹)、年間降水量を $APPT$ (mm year⁻¹)で表すと、アメリカ中央平原において両者は $ANPP = -34 + 0.60 APPT$ 、アジア域の草原において $ANPP = -30 + 0.59 APPT$ と直線回帰することができる事を Sala (2001)は示した。両式は互いによく似ており、異なる大陸間や草本フロラ間で、この傾向に大きな差がないことが分かる。そこで、この関係が本モデルで再現できるように、モデルを調整した。アメリカ中央平原の 2 ヶ所 Osage Prairie (Oklahoma, N36.95,

W96.55)と Central plains experimental range (Colorado, N40.82, W104.77)において、定数倍に加工した日平均降雨量を入力データに用いて 100 年間のシミュレーションを行い、 $APPT$ と 100 年目の年間 $ANPP$ との間の関係を得た。そして、C3 草本と C4 草本それぞれの P_{MAX} と式 A6-8 の係数 k_{ev} (ポテンシャル蒸発量と実蒸発量との関係を決定する係数) を調整することによって、この関係を Sala (2001)の回帰式に近づけた。なお、このシミュレーションでは木本の定着は生じないことを仮定している。調整の結果を図 5 に示す。いずれの場所でも、年降水量が 400mm year^{-1} 以下では、 $ANPP$ は年降水量に関わらず一定に近づいてしまったものの、総じて全体の傾向を再現することができた。

木本 PFT

木本 PFT の動態や整理に関する幾つかのパラメーター (P_{MAX} , ALM_1 , ALM_4 , L_{Amax} , $P_{establish}$, M_1 , and M_2) を調整し、シミュレーション出力間と実測値との間で (1) 幹径毎の個体頻度分布、そして (2) 幹径毎の成長速度、の両者を近づけた。この手順により、森林の動態と生産における最も基本的な特徴が再現されるはずである。なぜならば、前者は森林のサイズ構造と現存木本バイオマスとを、後者は木本サイズ間の競争と森林の生産性とを、直接に反映した結果であるからである。

この調整は各木本 PFT 毎に行い、それぞれの木本 PFT を exclusive な優占種とする林分の動態データを利用して行った。調整作業におけるシミュレーションでは、調整対象の木本 PFT のみが定着できるとした。また各サイトにおいて年平均気温と年降水量とが測定されている場合には、それらに合わせてモデル入力用データを加工した。すなわち、気温データには一定値を足し合わせることで年平均気温を実測に合わせ、降雨量は定数倍することで年降水量を実測に合わせた。年平均気温を加工した場合には、同じ値を地温にも足した。また、標高の入力値も調査値に合わせて入力した。この調整の結果を図 6 に示す。なお、優占種が TrBR, TeNE, BoNS から構成される森林の動態データを入手することが出来なかったため、これらのパラメーター (ALM_1 , ALM_4 , EK_0 , $P_{establish}$, $Kmort_1$, and $Kmort_2$) は、それぞれ TrBE, TeBS, BoNE のものを利用した。

Appendix A

A1. Atmospheric environments (computed daily)

Atmospheric conditions were calculated daily based on input climate data. Air pressure (ap in hPa) was approximated by site altitude (ALT in m) and air temperature (tmp_{air} in $^{\circ}\text{C}$):

$$ap = 1013.25 \times \exp\left(\frac{-0.2838472 \times ALT}{8.3144(tmp_{air} + 273.15)}\right), \quad (A1)$$

where the multiplier 1013.25 is the control air pressure (in hPa) at sea level at 15°C, and the multiplier 8.3144 is the universal gas constant (in J mol⁻¹ K⁻¹). Actual vapor pressure (*vp* in hPa) was a function of air pressure *ap* and humidity *humid* (g g⁻¹):

$$vp = \frac{ap \times humid}{0.622 + 0.378 \times humid}, \quad (A2)$$

The saturated vapor pressure *vp_{sat}* (hPa) was given by Tetens' equation:

$$vp_{sat} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5tmp_{air}}{237.3+tmp_{air}}} \quad (tmp_{air} > 0.0) \quad (A3)$$

$$vp_{sat} = 6.1078 \times 10^{\frac{9.5tmp_{air}}{265.3+tmp_{air}}} \quad (tmp_{air} \leq 0.0). \quad (A4)$$

The vapor pressure deficit *vpd* (hPa) is the difference between saturated and actual vapor pressures:

$$vpd = vp_{sat} - vp. \quad (A5)$$

The slope of saturated vapor pressure *slope_{vps}* (hPa °C⁻¹) is:

$$slope_{vps} = \frac{6.1078 \times (2500 - 2.4tmp_{air})}{0.4615(tmp_{air} + 273.15)^2} \times 10^{\frac{7.5tmp_{air}}{237.3+tmp_{air}}} \quad (tmp_{air} > 0.0) \quad (A6)$$

$$slope_{vps} = \frac{6.1078 \times 2834.0}{0.4615(tmp_{air} + 273.15)^2} \times 10^{\frac{9.5tmp_{air}}{265.3+tmp_{air}}} \quad (tmp_{air} \leq 0.0). \quad (A7)$$

The density of air *dn_{sa}* (kg m⁻³) is:

$$dn_{sa} = 1.293 \frac{ZAT}{tmp_{air} + ZAT} \times \frac{ap}{1013.25} \times \left(1 - 0.378 \frac{vp}{ap} \right). \quad (A8)$$

A2. Solar radiation (computed daily)

Angular solar elevation above the horizontal at midday (sl_{hgt}) was calculated by the following equations:

$$\sin(sl_{hgt}) = \sin(LAT) \times \sin(sl_{dec}) + \cos(LAT) \times \cos(sl_{dec}), \quad (A9)$$

where LAT is the site latitude ($-90 \leq LAT \leq 90$ in degree) and sl_{dec} is the solar declination of the earth's orbit in degrees. sl_{dec} has a maximum value of 23.4 on the summer solstice, and a minimum value of -23.4 on the winter solstice, and a value of 0 on equinox days; thus, it can be approximated by the following equation:

$$sl_{dec} = 23.4 \sin(360 \times (doy - 81) / 365), \quad (A10)$$

where doy is the days of the year (1–365, ignoring leap years). Using sl_{dec} , the hourly angle of the sun from sunrise to midday can be calculated as $\arccos(-\tan(LAT) \times \tan(sl_{dec}))$; thus, the day length in hours ($dlen$) will be:

$$dlen = 2 [\arccos(-\tan(LAT) \times \tan(sl_{dec})) / 15]. \quad (A11)$$

Shortwave radiation at the top of the atmosphere at midday (rad_{intact} in $W m^{-2}$) is a function of sl_{hgt} :

$$rad_{intact} = 1367 \times \sin(sl_{hgt}) \times (ESD_{mean}/ESD)^2, \quad (A12)$$

where the multiplier 1367 is a solar constant (in $W m^{-2}$), ESD is the distance between the sun and the earth (in km), and ESD_{mean} represents the annual mean ESD ($=1.46 \cdot 10^8$ km). $(ESD_{mean}/ESD)^2$ can be approximated by:

$$(ESD_{mean}/ESD)^2 = 1.000111 + 0.034221 \cos(x) + 0.00128 \sin(x) + 0.000719 \cos(2x) + 0.000077 \sin(2x), \quad (A13)$$

where x is the seasonal angle of the earth's orbit ($x = 360 \times doym/365$). In the troposphere, the

incident solar radiation rad_{intact} (W m^{-2}) is attenuated by clouds and airborne particles. This effect has been empirically formulated as a function of cloud cover ($0.0 \leq cloud \leq 0.8$) by Iqbal (1983), as follows:

$$rad = rad_{intact} \times (0.803 \times 0.34 \text{ cloud} \times 0.458 \text{ cloud}^2), \quad (\text{A14})$$

where rad is the amount of solar radiation that reaches to the biosphere (in W m^{-2}).

In addition to this attenuation effect on irradiance, scattering in the atmosphere optically alters the ratio between direct and diffuse radiation:

$$rad_{diffuse} = rad \times [0.958 - 0.982 (rad/rad_{intact})] \quad (\text{A15})$$

$$rad_{direct} = rad - rad_{diffuse}, \quad (\text{A16})$$

where $rad_{diffuse}$ and rad_{direct} are diffuse radiation and direct radiation within rad , respectively. Diffuse and direct radiation differ in their fractional content of photosynthetically active radiation (PAR: 400–700 nm) in the total spectrum; diffuse radiation contains 57%, while direct radiation contains 43%. Thus, photosynthetic photon flux density of PAR is given by the following:

$$par_{diffuse} = 4.2 \times 0.57 \times rad_{diffuse} \quad (\text{A17})$$

$$par_{direct} = 4.6 \times 0.43 \times rad_{direct} \quad (\text{A18})$$

$$par = par_{diffuse} + par_{direct} \quad (\text{A19})$$

where par is photosynthetically active radiation at midday (in $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and $par_{diffuse}$ and par_{direct} are the diffused and direct radiation components of par . The multipliers 4.2 and 4.6 are for unit conversion from $[\text{W m}^{-2}]$ to $[\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$ for diffuse and direct radiation, respectively (Larcher, 1995).

A3. Net Radiation (Computed Daily)

To estimate the transpiration rate of leaves and the evaporation rate of soil, the net radiation at vegetation ($rad_{net_{veg}}$ in W m^{-2}) and at the soil surface ($rad_{net_{soil}}$ in W m^{-2}) were calculated as:

$$radnet_{veg} = [rad \times (1 - albedo_{veg}) + radnet_{long}] \times (1 - ir) \quad (A20)$$

$$radnet_{soil} = [rad \times (1 - albedo_{soil}) + radnet_{long}] \times ir, \quad (A21)$$

where ir is the shortwave interception by leaves:

$$ir = \exp\left(\sum_p^{pft} (-eK_p \times lai_p)\right) \quad (A22)$$

and $albedo_{veg}$ and $albedo_{soil}$ are the albedo of vegetation and the soil surface, respectively; $albedo_{veg}$ was assumed to be 0.20, while $albedo_{soil}$ was assumed to be a function of soil albedo ($ALBEDO$) and the amount of snow on the ground:

$$albedo_{soil} = ALBEDO + (0.7 - ALBEDO) / [1 + \exp(-0.05(pool_{snow} - 70.0))]. \quad (A23)$$

The $radnet_{long}$ is net long-wave radiation, which is estimated by the following empirical formula:

$$radnet_{long} = 5.67 \times 10^{-8} \times (tmp_{air} + 273.15)^4 \times (1 - 0.65 \text{ cloud}) \times [0.39 + 0.058/(vp + 1.0)], \quad (A24)$$

where the constant 5.67×10^{-8} is Stefan–Boltzmann's constant (in $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

A4. Parameters of Photosynthesis and Stomatal Conductance (Computed Daily)

Appendix B7 shows the definition of PFT-specific photosynthesis parameters. To estimate photosynthesis and stomatal conductance, midday photosynthetic rates at the top of the leaf layer (p_{top} in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) were calculated for each PFT every simulation day, using equation (15):

$$p_{top} = \frac{p_{sat} \times lue \times x}{p_{sat} + lue \times x}, \quad (A25)$$

where p_{sat} is single-leaf photosynthetic rate under light saturation (in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). x is the PAR at the top of the leaf layer (in $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). In woody PFTs, we substituted

the PAR above tree canopies for x ; in grass PFTs, we substituted the PAR below tree canopies for x . lue is the light-use efficiency of photosynthesis (in mol CO₂ mol photon⁻¹), which is formulated to conform to the data in Osmond et al. (1980) as follows:

$$lue = LUE \times \frac{52 - tmp_{air}}{3.5 + 0.75(52 - tmp_{air})} \times \frac{co2_{cell}}{90 + 0.6 \times co2_{cell}} \quad (\text{for } C_3 \text{ PFTs}) \quad (A26)$$

$$lue = LUE \quad (\text{for } C_4 \text{ PFTs}), \quad (A27)$$

where LUE is the potential maximum value, and $co2_{cell}$ is the intercellular CO₂ concentration (in μmol mol⁻¹). The single-leaf photosynthetic rate, p_{sat} , under light saturation (in μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), is calculated by multiplying its potential maximum of photosynthetic rate ($PMAX$) by the coefficients of temperature, CO₂ level, and soil water effects (ce_{tmp} , ce_{co2} , and ce_{water} , respectively):

$$p_{sat} = PMAX \times ce_{tmp} \times ce_{co2} \times ce_{water}. \quad (A28)$$

ce_{tmp} , the temperature-dependent function of p_{sat} , is a bell-shaped curve that reaches the maximum (1.0) at the optimum temperature and tapers off in warmer or cooler temperatures (Raich et al., 1991):

$$ce_{tmp} = \frac{(tmp_{air} - T_{max})(tmp_{air} - T_{min})}{(tmp_{air} - T_{max})(tmp_{air} - T_{min}) - (tmp_{air} - t_{opt})^2}, \quad (A29)$$

where T_{max} , T_{min} , and t_{opt} are the PFT-specific maximum, minimum, and optimum temperature for photosynthesis, respectively (in °C). For C₃ PFTs, t_{opt} increases with the intercellular CO₂ concentration because of photorespiration:

$$t_{opt} = T_{opt0} + 0.01 co2_{cell} \quad (\text{for } C_3 \text{ PFTs}) \quad (A30)$$

$$t_{opt} = T_{opt0} \quad (\text{for } C_4 \text{ PFTs}), \quad (A31)$$

where T_{opt0} is the minimum value of t_{opt} at a very low $co2_{cell}$. For TeH (C₃ grass), t_{opt} is assumed to be a 20-year running mean of air temperature in the growth phase (maximum range 10°C–30°C). This is because TeH includes a varieties of species adapted to a wide range

of climatic zones.

The ce_{co2} , the CO₂-dependent function of p_{sat} , is expressed by a Michaelis-type function:

$$ce_{co2} = 0.30 + 0.70 \times \frac{co2_{cell} - co2_{cmp}}{KM + co2_{cell}} \quad (\text{for C}_3 \text{ PFTs}) \quad (\text{A32})$$

$$ce_{co2} = 0.50 + 0.50 \times \frac{co2_{cell} - co2_{cmp}}{KM + co2_{cell}} \quad (\text{for C}_4 \text{ PFTs}), \quad (\text{A33})$$

where KM is the coefficient of CO₂ concentration sensitivity; $co2_{cmp}$ is the CO₂ compensation point, which is adjusted by temperature for C₃ species (Brooks and Farquhar, 1985).

$$co2_{cmp} = CO2cmp \left[1 + 0.0451(tmp_{air} - 20) + 0.000347(tmp_{air} - 20)^2 \right] \quad (\text{for C}_3 \text{ PFTs}) \quad (\text{A34})$$

$$co2_{cmp} = CO2cmp \quad (\text{for C}_4 \text{ PFTs}), \quad (\text{A35})$$

where $CO2cmp$ is the control value of $co2_{cmp}$ at 20°C; ce_{water} , the water availability effect coefficient of p_{sat} , is calculated as follows:

$$ce_{water} = \sqrt{stat_{water}}. \quad (\text{A36})$$

The midday leaf stomatal conductance of H₂O at the top of the leaf layer gs_{top} (mol H₂O m⁻² s⁻¹), is obtained by equation 20:

$$gs_{top} = GS_{b1} + \frac{GS_{b2} \times p_{top}}{(co2_{am} - co2_{cmp})(1 + vpd / GS_{b3})}, \quad (\text{A37})$$

where GS_{b1} , GS_{b2} , and GS_{b3} are PFT-specific parameters; gs_{top} affects the intercellular CO₂ concentration ($co2_{cell}$ in $\mu\text{mol mol}^{-1}$) following Leuning (1990):

$$co2_{cell} = co2_{atm} - \frac{P_{top}}{gs_{top}/1.56}, \quad (A38)$$

where 1.56 is a factor to convert gs into CO_2 conductance. Using equations A25 through A38, we calculated p_{top} , lue , and gs_{top} of each PFT every simulation day.

A5. Soil water percolation (daily computation)

Water infiltration, percolation and runoff were simulated daily with a modified version of a submodel of MAPPS (Neilson, 1995), which is based on Darcy's law (Hillel, 1982). Calculations were made in the following order: (1) infiltration, (2) percolation from soil layer 1 to 2, (3) percolation from soil layer 2 to 3.

Daily infiltrated water to soil layer 1, $pn_{(0)}$, is:

$$pn_{(0)} = prec_{rain} - ic + tw, \quad \frac{pool_{w(1)}}{Depth_{(1)}} \leq W_{mat} \quad (A39)$$

$$pn_{(0)} = (prec_{rain} - ic + tw) \left\{ 1 - \left[\frac{(pool_{w(1)}/Depth_{(1)}) - W_{mat}}{W_{sat} - W_{mat}} \right]^{1.4} \right\}, \quad W_{mat} < \frac{pool_{w(1)}}{Depth_{(1)}} \leq W_{fi} \quad (A40)$$

$$pn_{(0)} = 0.0, \quad W_{fi} < \frac{pool_{w(1)}}{Depth_{(1)}}, \quad (A41)$$

where W_{mat} , W_{sat} and W_{fi} are the soil moisture at matrix potential, saturation point, and field capacity, respectively. These are location-specific parameters. $Depth_{(n)}$ is the depth of soil layer n , which is assumed to be constant irrespective of location ($Depth_{(1)} = 500$ mm, $Depth_{(2)} = 1000$ mm, and $Depth_{(3)} = 1500$ mm). The constant 1.4 is an infiltration parameter, which is adjusted daily (unpublished data of Conklin and Neilson, 2005). All daily excess water at the soil surface is removed as runoff water.

Water in soil layer n is percolated to the next layer according to the following:

$$pn_{(n)} = K_{s1(n)} (pool_{w(n)} - W_{fi} \times Depth_{(n)}) \left(\frac{pool_{w(n)}/Depth_{(n)} - W_{fi}}{W_{sat} - W_{fi}} \right)^{K_{s2(n)}}, \quad W_{fi} < \frac{pool_{w(n)}}{Depth_{(n)}}$$

(A42)

$$pn_{(n)} = K_{u1(n)}(pool_{w(n)} - W_{mat} \times Depth_{(n)}) \left(\frac{pool_{w(n)} / Depth_{(n)} - W_{mat}}{W_{sat} - W_{mat}} \right)^{K_{u2(n)}}, \quad W_{mat} < \frac{pool_{w(n)}}{Depth_{(n)}} \leq W_{fi}$$
(A43)

$$pn_{(n)} = 0.0, \quad \frac{pool_{w(n)}}{Depth_{(n)}} \leq W_{mat}.$$
(A44)

The coefficients $K_{u1(n)}$, $K_{u2(n)}$, $K_{s1(n)}$, and $K_{s2(n)}$ are adjusted daily (Appendix B8; unpublished data of Conklin and Neilson, 2005). The actual amount of water allowed to percolate is the lesser of the calculated flux from a given layer (layer 1 or 2) or the available water-holding capacity ($W_{fi} \times Depth_{(n)} - pool_{w(n)}$) in the layer below (layer 2 or 3). Percolated water from soil layer 3 is immediately removed as runoff.

A6. Evapotranspiration (Computed daily)

The potential evaporation (ev_{pm}) and transpiration (tr_{pm}) are estimated by the Penman–Monteith method (Monteith and Unsworth, 1990), assuming an abundant water supply:

$$ev_{pm} = dlen \times \frac{slope_{vps} \times radnet_{soil} + 0.2813 \times dnsa \times vpd \times c_{aero}}{695 \{slope_{vps} + 0.667(1.0 + c_{aero} / c_{soil})\}},$$
(A45)

$$tr_{pm} = dlen \times \frac{slope_{vps} \times radnet_{veg} + 0.2813 \times dnsa \times vpd \times c_{aero}}{695 \{slope_{vps} + 0.667(1.0 + c_{aero} / c_{leaf})\}} - ic,$$
(A46)

where the constant 0.2813 is the specific heat of air (in Wh kg⁻¹ K⁻¹), 695 is the latent heat of vaporization (in Wh kg⁻¹ H₂O), and 0.667 is the psychrometer constant (in hPa K⁻¹); c_{aero} , c_{soil} , and c_{leaf} are aerodynamic conductance, soil surface conductance, and canopy conductance, respectively; c_{aero} , aerodynamic conductance is proportional to wind velocity:

$$c_{aero} = \frac{0.41^2 \times wind}{[\log(\alpha)]^2}, \quad (A47)$$

where 0.41 is Von Karman's constant and *wind* is the wind velocity (m/s) at height α (m). We assigned α a value of 10 because we used wind data at 10 m for simulation experiments in this study. c_{soil} , soil surface conductance, is in proportion to the fraction of soil layer 1 that is saturated with water:

$$c_{soil} = 0.0224 \times \frac{pool_{w(1)}}{Wsat \times Depth_{(1)}}, \quad (A48)$$

where the multiplier 0.0224 is water-saturation conductance. Finally, c_{leaf} is

$$c_{leaf} = 0.0224 \times ccon, \quad (A49)$$

where the multiplier 0.0224 is the unit converter from $[\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ to $[\text{m}^3 \text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}]$.

Due to the limited water availability, evapotranspiration rates were reduced from their potential values, ev_{pm} and tr_{pm} , to their actual values, ev and tr , as approximated by the quadratic functions:

$$0.85 (3.0 \times ev)^2 - (a + ev_{pm}) (3.0 \times ev) + a \times ev_{pm} = 0, \quad (A50)$$

$$0.85 tr^2 - (b + tr_{pm}) tr + b \times tr_{pm} = 0, \quad (A51)$$

where 0.85 and 3.0 are the empirical convexity of the available water to the actual evapotranspiration curves; a and b are available water for evaporation and transpiration, respectively; $a = pool_{w(1)}$, $b = \max(0, pool_{w(1)} - Depth_{(1)} \times Wwilt) + \max(0, pool_{w(2)} - Depth_{(2)} \times Wwilt)$. Actual evaporation and transpiration rates are as follows:

$$ev = \frac{(a + ev_{pm}) - \sqrt{(a + ev_{pm})^2 - 4 \times 0.85 \times a \times ev_{pm}}}{2 \times 0.85} \times K_{ev}, \quad (A52)$$

$$tr = \frac{(b + tr_{pm}) - \sqrt{(b + tr_{pm})^2 - 4 \times 0.85 \times b \times tr_{pm}}}{2 \times 0.85}, \quad (A53)$$

where the coefficient K_{ev} is 1/3. Actual evaporation, ev , is charged only for soil layer 1. Actual transpiration, tr , is charged for soil layers 1 and 2 in proportion to the fine root biomass distribution in the virtual forest.

Appendix B

B1. Inputs and outputs of the SEIB–DGVM

Input

(1) Location

latitude, altitude

(2) Soil (fixed in time)

soil moisture at saturation point, field capacity, matrix potential, wilting point, albedo

(3) Climatic data (daily)

air temperature, soil temperature, fraction of cloud cover, precipitation, humidity, wind velocity

Outputs

(1) Carbon dynamics (daily–yearly)

terrestrial carbon pool (woody biomass, grass biomass, litter, soil organic matter), CO₂ absorption and emission rates

(2) Water dynamics (daily)

soil moisture content (three layers), interception rate, evaporation rate, transpiration rate, interception rate, runoff rate

(3) Radiation (daily)

albedo from terrestrial surface

(4) Properties of vegetation (daily–yearly)

vegetation type, dominant plant functional type, leaf area index, tree density, size distribution of trees, age distribution of trees, woody biomass for each tree, grass biomass per unit area

B2. Processes in the SEIB–DGVM, and the approaches used to represent each process

Process	Approach	Source
<i>Physical process</i>		
Radiation	Beer's Law within spatially explicit virtual forest	
Evapotranspiration	Penman–Monteith evapotranspiration	Monteith and Unsworth (1990)
Soil water process	Empirical analogs of Darcy's law: saturated and unsaturated percolation in three soil layers	Neilson (1995)
<i>Physiology</i>		
Photosynthesis	Michaelis-type function	
Maintenance respiration	The respiration rate is in proportion to the nitrate content of each organ.	Ryan (1991)
Growth respiration	The respiration rate is based on the chemical composition of each organ.	Poorter (1994)
Stomatal conductance	A semiempirical model	Ball et al. (1987) modified by Leuning (1995)
Phenology	A set of semiempirical models; parameters were estimated from satellite NDVI data.	Botta et al. (2000)
Decomposition	Three carbon sources: litter and soil organic carbon with slow and fast decomposition rates	Foley (1995) and Lloyd and Taylor (1994)
<i>Vegetation dynamics</i>		
Establishment	Climatically favored PFTs establish as small individuals.	
Mortality	Annual NPP per leaf area, heat stress, bioclimatic limit, and fire	Sitch et al. (2003)
Disturbance	Fire as an empirical function of soil moisture and aboveground biomass	Kistler et al. (2001)

B3. Parameters and constants in the model's equations

Fixed parameters (begins with a capital letter)

Soil properties (Grid specific)

W_{sat}	: soil moisture at saturation point ($m\ m^{-1}$)
W_{fi}	: soil moisture at field capacity ($m\ m^{-1}$)
W_{mat}	: soil moisture at matrix potential ($m\ m^{-1}$)
W_{wilt}	: soil moisture at wilting point ($m\ m^{-1}$)
$ALBEDO$: soil albedo (fraction)
$Depth\ (n)$: depth of soil layer n (mm)

Soil properties (Global value)

$K_{u1(n)}, K_{u2(n)}$: percolation coefficients of unsaturated soil of soil layer n (dimensionless)
$K_{s1(n)}, K_{s2(n)}$: percolation coefficients of saturated soil of soil layer n (dimensionless)

Location

LAT	: latitude (degree)
ALT	: altitude (m)

Allocation and Allometry (PFT-specific)

$HGTmax$: maximum tree height (m)
$HGTs$: initial value of relative growth rate, height to diameter ($m\ m^{-1}$)
LAm_{ax}	: maximum leaf area per canopy surface ($m^2\ m^{-2}$)
$CDmax$: maximum crown diameter (m)
SLA	: specific leaf area ($m^2\ g\ DM^{-1}$)
P_{root}	: proportion of root mass in soil layer 1 (varying 0.0–1.0)
$ALM_{1, 2, 4}$: allometric parameter 1, 2, 4 (dimensionless)
ALM_3	: allometric parameter 3 ($g\ DM\ m^{-3}$)
$FRratio$: ratio of foliage mass to fine root mass (ratio)

Respiration and turnover (PFT-specific)

$PN_{f, s, r}$: nitrogen mass per biomass for foliage, sapwood, root ($g\ N\ g\ DM^{-1}$)
RM	: maintenance respiration rate at 15°C for unit nitrogen mass ($g\ C\ g\ N^{-1}\ day^{-1}$)
$RG_{f, s, r}$: specific growth respiration rate for foliage, sapwood, and root ($g\ DM\ g\ DM^{-1}$)
$RG_{stockin}$: growth respiration rate for stock resource ($g\ DM\ g\ DM^{-1}$)

RG_{stockout} : growth respiration rate from stock resource to available resource (g DM g DM⁻¹)
TO_{f, s, r} : turnover rate for foliage, sapeood, and root (DM⁻¹ year⁻¹)
TO_{fast, slow} : turnover rates for fast and slow soil organic matter (SOM) (DM⁻¹ yr⁻¹)

Photosynthesis (PFT-specific)

P_{MAX} : maximum photosynthesis rate (μmol mol⁻¹ CO₂ m⁻² s⁻¹)
E_K : light attenuation coefficient for vertical direction (dimensionless)
L_{UE} : control value of light-use efficiency for photosynthesis (mol CO₂ mol photon⁻¹)
T_{opt0} : optimum temperature for photosynthesis at very low intercellular CO₂ concentration (°C)
T_{min} : minimum temperature for photosynthesis (°C)
T_{max} : maximum temperature for photosynthesis (°C)
GS_{b1} : parameters for stomatal conductance (mol H₂O m⁻² s⁻¹)
GS_{b2} : parameters for stomatal conductance (dimensionless)
GS_{b3} : parameters for stomatal conductance (hPa)
K_M : dependence of photosynthesis on intercellular CO₂ concentration (μmol mol⁻¹)
CO₂cmp : CO₂ compensation point at 20°C (μmol CO₂ mol⁻¹ air)

Establishment (PFT-specific)

P_{establish} : establishment probability at vacant patch (m⁻² year⁻¹)
GDD_{min} : minimum growth-degree-day sum (5 °C base)
TC_{max} : maximum coldest-month temperature (°C)

Mortality (PFT-specific)

M₁ : a parameter for background mortality (dimensionless)
M₂ : a parameter for background mortality (dimensionless)
M₃ : probability of survival after fire (varying 0.0–1.0)
TC_{min} : minimum coldest-month temperature for survival (°C)

Other fixed parameters

ESD : distance between sun and earth (km)
ESD_{mean} : annual mean of *ESD* (km)

Variables (Begins with a lowercase letter)

Daily climatic data

<i>tmp_{air}</i>	: air temperature (°C)
<i>tmp_{soil}</i>	: soil temperature at 10 cm depth (°C)
<i>cloud</i>	: total cloud cover (fraction)
<i>prec</i>	: daily precipitation (mm day ⁻¹)
<i>humid</i>	: air humidity (g g ⁻¹)
<i>wind</i>	: wind velocity (m s ⁻¹)

Woody biomass (for each individual tree)

<i>mass_{leaf}</i>	: leaf biomass (g DM)
<i>mass_{trunk}</i>	: trunk biomass (g DM)
<i>mass_{root}</i>	: fine root biomass (g DM)
<i>mass_{stock}</i>	: stock biomass (g DM)
<i>mass_{available}</i>	: available biomass (g DM)

Grass biomass

<i>gmass_{leaf}</i>	: leaf biomass density of grass (g DM m ⁻²)
<i>gmass_{root}</i>	: root biomass density of grass (g DM m ⁻²)
<i>gmass_{stock}</i>	: stock biomass density of grass (g DM m ⁻²)
<i>gmass_{available}</i>	: available biomass density of grass (g DM m ⁻²)

Morphology and characteristics for woody PFTs (for each individual tree)

<i>height</i>	: tree height (m)
<i>crown_{diameter}</i>	: crown diameter (m)
<i>crown_{depth}</i>	: crown depth (m)
<i>crown_{area}</i>	: cross sectional crown area (m ²)
<i>dbh_{sapwood}</i>	: sapwood diameter (m)
<i>dbh_{heartwood}</i>	: heartwood diameter (m)
<i>la</i>	: leaf area (m ²)
<i>la_{mean}</i>	: annual mean leaf area in the previous year (m ²)

Photosynthesis conditions

<i>p_{top}</i>	: midday photosynthetic rates at top of the leaf layer (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
<i>p_{sat}</i>	: light saturated photosynthetic rate (μCO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
<i>lue</i>	: light-use efficiency of photosynthesis (mol CO ₂ mol photon ⁻¹)
<i>co₂emp</i>	: CO ₂ compensation point (μmol CO ₂ mol air ⁻¹)
<i>co₂cell</i>	: intercellular CO ₂ concentration (μmol CO ₂ mol air ⁻¹)

<i>t_{opt}</i>	: optimum temperature for photosynthesis (°C)
<i>g_{Stop}</i>	: midday leaf stomatal conductance of H ₂ O on top of the leaf layer (mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
<i>gs</i>	: midday leaf stomatal conductance of H ₂ O (mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
<i>g_{Stop}</i>	: midday leaf stomatal conductance of H ₂ O on top of the leaf-layer (mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
<i>ccon_{wood}</i>	: stomatal conductance of H ₂ O of tree canopy, day time mean (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
<i>ccon_{grass}</i>	: stomatal conductance of H ₂ O of grass leaves, day time mean (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
<i>ccon</i>	: stomatal conductance of H ₂ O, day time mean (=ccon _{wood} + ccon _{grass} , mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)

Production

<i>gpp</i>	: gross primary production of each tree (g DM day ⁻¹)
<i>gppi</i>	: gross primary production of each crown layer (g DM day ⁻¹)
<i>gpp_g</i>	: gross primary production of grass layer (g DM day ⁻¹ m ⁻²)
<i>anpp</i>	: annual net primary production of the previous year (kg DM)
<i>stat_{leaf}</i>	: benefit per cost of maintaining leaf mass (g g ⁻¹)

Other metabolic variables

<i>lai</i>	: leaf area index of each PFT (m ² m ⁻²)
<i>lai_g</i>	: leaf area index of grass layer (m ² m ⁻²)
<i>stat_{water}</i>	: state of water availability for each PFT (varying 0.0–1.0)
<i>qt</i>	: temperature sensitivity of respiration (dimensionless)

Soil water cycle

<i>prec_{rain}</i>	: precipitation, rain (mm day ⁻¹)
<i>prec_{snow}</i>	: precipitation, snow (mm day ⁻¹)
<i>pool_{w(n)}</i>	: water content at soil layer <i>n</i> (mm)
<i>pool_{snow}</i>	: water-equivalent snow depth (mm)
<i>tw</i>	: snowmelt rate (mm day ⁻¹)
<i>pn_(n)</i>	: penetration rate for soil layer <i>n</i> (mm day ⁻¹)
<i>ev</i>	: actual evaporation rate from soil layer 1 (mm day ⁻¹)
<i>ev_{pm}</i>	: potential evaporation rate from soil layer 1 (mm day ⁻¹)
<i>tr_(n)</i>	: actual transpiration rate from soil layer <i>n</i> (<i>n</i> = 1 or 2) (mm day ⁻¹)

tr_{pm}	: potential transpiration rate (mm day ⁻¹)
ic	: intercepted precipitation by plants (mm day ⁻¹)
aet	: actual evapotranspiration of the previous year (mm year ⁻¹)
c_{aero}	: aerodynamic conductance of evaporation (dimensionless)
c_{soil}	: soil conductance of evapotranspiration (dimensionless)
c_{leaf}	: canopy conductance of transpiration (dimensionless)

Radiation conditions at midday

rad_{intact}	: shortwave radiation at top of atmosphere (W m ⁻²)
rad	: shortwave radiation entering biosphere (W m ⁻²)
rad_{direct}	: direct radiation within rad (W m ⁻²)
$rad_{diffuse}$: diffused radiation within rad (W m ⁻²)
$rad_{net_{veg}}$: net radiation at vegetation surface (W m ⁻²)
$rad_{net_{soil}}$: net radiation at soil surface (W m ⁻²)
$rad_{net_{long}}$: net longwave radiation (W m ⁻²)
par	: midday PAR ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
par_{direct}	: direct radiation component of par ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$par_{diffuse}$: diffused radiation component of par ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$par_{wood}(l, n)$: midday PAR on crown layer l of individual tree n ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
par_{grass}	: midday PAR at the grass layer ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
$fpar_{direct}(l, n)$: relative intensity of direct PAR of crown disk l of tree n at midday compared to the forest top (dimensionless)
$fpar_{diffuse}(l)$: relative intensity of diffused of forest layer l at midday compared to the forest top (dimensionless)
$fpar_{direct}$: relative intensity of direct PAR of crown disk l of tree n at midday compared to the forest top (dimensionless)
sl_{hgt}	: solar angle at midday (degree)
sl_{dec}	: solar declination of the Earth's orbit (degree)
$dlen$: day length (hour)
eK	: light attenuation coefficient at midday (dimensionless)
ir	: shortwave interception by leaves (fraction)
$albedo_{veg}$: albedo of vegetation surface (fraction)
$albedo_{soil}$: albedo of soil surface (fraction)

Air characteristics

ap	: air pressure (hPa)
------	----------------------

<i>vp</i>	: actual vapor pressure (hPa)
<i>vp_{sat}</i>	: saturated vapor pressure (hPa)
<i>vpd</i>	: vapor pressure deficit between saturated and actual vapor pressures (hPa)
<i>co2atm</i>	: ambient (canopy) CO ₂ concentration (μmol CO ₂ mol ⁻¹ air)
<i>slope_{vps}</i>	: slope of saturated vapour pressure (hPa °C ⁻¹)
<i>dnsa</i>	: density of air (kg m ⁻³)

B4. PFT-specific allocation and allometric parameters

PFT	ALM_1	ALM_2	ALM_3	ALM_4	HGT_{max}	HGT_s	FR_{ratio}	P_{root}	SLA	LA_{max}	CD_{max}
	-	-	(g DM m^{-3})	-	(m)	(m m^{-1})	(ratio)	(fraction)	(m^2 g^{-1})	(m^2 m^{-2})	(m)
TrBE	12000	200	492000	0.20	76.5	165.0	1.50	0.79	0.010	1.0	30.0
TrBR	12000	200	492000	0.20	35.0	150.0	1.50	0.88	0.013	1.0	15.0
TeNE	9000	100	374000	0.20	43.0	65.0	1.50	0.70	0.004	1.5	15.0
TeBE	9000	200	492000	0.20	17.0	154.3	1.50	0.86	0.007	1.5	15.0
TeBS	18000	200	492000	0.25	37.0	159.0	1.50	0.86	0.015	1.5	15.0
BoNE	11000	100	374000	0.15	35.0	130.0	1.50	0.96	0.004	1.5	10.0
BoNS	11000	100	287700	0.15	28.3	164.3	1.50	0.96	0.015	1.5	10.0
BoBS	15000	200	492000	0.15	35.0	200.0	1.50	0.96	0.016	1.5	10.0
TeH	-	-	-	-	-	-	0.50	0.96	0.020	-	-
TrH	-	-	-	-	-	-	0.50	0.88	0.015	-	-

B5. PFT-specific dynamic parameters

PFT	M_1 (no dimension)	M_2 (no dimension)	M_3 (no dimension)	$P_{establish}$ (m^{-2} year $^{-1}$)	TC_{min} (°C)	TC_{max} (°C)	GDD_{min} (5 °C base)
TrBE	0.010	2.0	0.12	0.040	15.5	-	-
TrBR	0.010	2.0	0.50	0.040	15.5	-	-
TeNE	0.020	2.0	0.12	0.040	-2.0	22.0	900
TeBE	0.020	2.0	0.50	0.040	3.0	18.8	1200
TeBS	0.010	2.0	0.12	0.012	-17.0	15.5	1200
BoNE	0.013	1.2	0.12	0.005	-32.5	-2.0	600
BoNS	0.013	1.2	0.12	0.005	-	-2.0	350
BoBS	0.010	2.0	0.12	0.010	-	-2.0	350

B6. PFT-specific respiration and turnover parameters

PFT	RM	PN_f	RG_f	RG_s	RG_r	$RG_{stockin}$	$RG_{stockout}$	TO_f	TO_s	TO_r
	(gC gN ⁻¹ day ⁻¹)	(gN gDM ⁻¹)	(gDM gDM ⁻¹)	(year ⁻¹)	(year ⁻¹)	(year ⁻¹)				
TrBE	0.1	0.016	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	0.59	0.05	0.76
TrBR	0.1	0.022	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	1.59	0.05	0.76
TeNE	0.1	0.012	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	0.22	0.05	0.64
TeBE	0.1	0.012	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	0.38	0.05	0.64
TeBS	0.1	0.022	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	2.17	0.05	0.64
BoNE	0.1	0.012	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	0.22	0.05	0.42
BoNS	0.1	0.026	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	4.00	0.05	0.42
BoBS	0.1	0.025	1.56	1.68	1.34	1.10	1.10	3.33	0.05	0.42
TeH	0.1	0.027	1.50	-	1.34	1.10	1.10	3.19	-	0.40
TrH	0.1	0.018	1.50	-	1.34	1.10	1.10	6.70	-	0.90

B7. PFT-specific photosynthesis parameters

PFT	P_{MAX} ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	EK no dimension	LUE ($\text{mol CO}_2 \text{ mol photon}^{-1}$)	T_{opt0} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{min} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	GS_{b1} ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	GS_{b2} no dimension	GS_{b3} (hPa)	KM ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	$CO2_{cmp}$ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)
TrBE	7.0	0.50	0.05	27.5	2.0	47.5	0.01	10.0	100.0	33.0	50.0
TrBR	7.0	0.50	0.05	27.5	2.0	47.5	0.01	10.0	100.0	30.0	50.0
TeNE	5.0	0.50	0.05	25.0	0.0	45.0	0.01	10.0	100.0	30.0	50.0
TeBE	5.0	0.50	0.05	25.0	0.0	45.0	0.01	10.0	100.0	30.0	50.0
TeBS	9.0	0.50	0.05	22.5	-2.0	42.5	0.01	10.0	100.0	30.0	50.0
BoNE	5.0	0.50	0.05	18.0	-4.0	38.5	0.01	10.0	100.0	30.0	50.0
BoNS	5.0	0.50	0.05	18.0	-4.0	38.5	0.01	10.0	100.0	35.0	50.0
BoBS	6.0	0.50	0.05	18.0	-4.0	38.5	0.01	10.0	100.0	35.0	50.0
TeH	9.0	0.50	0.05	-	-1.0	45.0	0.01	10.0	100.0	37.0	50.0
TrH	12.0	0.50	0.05	35.0	2.5	55.0	0.01	10.0	100.0	10.0	5.0

B8. Soil percolation parameters for each soil layer (dimensionless)

Soil layer	K_{1u}	K_{2u}	K_{1s}	K_{2s}
1	0.80	2.5	0.30	2.0
2	0.15	3.0	0.30	3.0
3	0.01	10.0	0.30	10.0

B9. Classification scheme of vegetation type, taken from Haxeltine and Prentice (1996) with some simplifications.

Vegetation type conditions	Dominant PFT	Other
Group 1		
Desert (polar)	any	$GDD_0 < 150$
Group 2		
Arctic / Alpine-tundra	any	$GDD_5 < 350$
Group 3		
Tropical forest	TrBE	$2.5 \leq LAI_{max}$
Tropical deciduous forest	TrBR	$2.5 \leq LAI_{max}$
Temperate evergreen forest	TeNE	$1.5 \leq LAI_{max}$
Temperate evergreen forest	TeBE	$3.0 \leq LAI_{max}$
Temperate deciduous forest	TeBS	$2.5 \leq LAI_{max}$
Boreal evergreen forest	BoNE	
Boreal deciduous forest	BoNS or BoBS	
Group 4		
Xeric wood-land / scrub	Tropical woody or TeBE	$1.0 \leq LAI_{max}$
	Boreal woody or TeNE or TeBS	$1.5 \leq LAI_{max}$
Group 5		
Grass land / Savannass / Steppe	any	$0.2 \leq LAI_{max}$
Desert (arid)	any	$LAI_{max} < 0.2$

Priority of classification: Goup 1 > Goup 2 > Goup 3 > Goup 4 > Goup 5

GDD_0 : growing-degree-day at 0 °C base

GDD_5 : growing-degree-day at 5 °C base

LAI_{max} : maximum leaf area index of the previous year ($m^2 m^{-2}$)

引用文献

Arora, V., 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Rev. Geophys.* 40, 1006, doi:10.1029/2001RG000103.

Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggens, J. (Eds.), *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 221–224.

Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P., Monfray, P., 2000. A global prognostic scheme of leaf onset using satellite. *Global Change Biol.* 6, 709–725.

Brooks, A., Farquhar, G.D., 1985. Effect of temperature on the CO₂/O₂ specificity of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light, Estimates from gas-exchange measurements on spinach. *Planta* 165, 397–406.

Bugmann, H., 2001. A review of forest gap models. *Clim. Change* 51, 259–305.

Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., Totterdell, I.J., 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184–187.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F.I., Prentice, I.C., Betts, R.A., Brovkin, V., Cox, P.M., Fisher, V., Foley, J.A., Friend, A.D., Kucharik, C., Lomas, M.R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C., 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biol* 7, 357–373.

FFPRI (Forestry and Forest Products Research Institute), 1982. Properties of timber. In: *The handbook of wood industries*, 3rd eds (in Japanese). Maruzen Publishers, Tokyo, pp. 62–63.

FFPRI (Forestry and Forest Products Research Institute), Viewed October 27 2004, 2003. Forest Dynamics Database (<http://fdadb.ffpri-108.affrc.go.jp/>).

Foley, J.A., 1995. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus, Ser. B* 47, 310–319.

Foley, J.A., Costa, M.H., Delire, C., Ramankutty, N., Snyder, P., 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontier Ecol. Environ.* 1, 38–44.

Friend, A.D., Stevens, A.K., Knox, R.G., Cannell, M.G.R., 1997. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecol. Modell.* 95, 249–287.

Gill, R.A., Jackson, R.B., 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol.* 147, 13–31.

Greene, D.F., Zasada, J.C., Sirois, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Charron, I., Simard, M.-J., 1999. A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. *Can. J. For. Res.* 29, 824–839.

Haxeltine, A., Prentice, I.C., 1996. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochem. Cycles* 10, 693–709.

Hillel, D., 1982. *Introduction to soil physics*. Academic Press, New York, USA.

Ito, A., Oikawa, T., 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecol. Modell.* 151, 143–176.

Iqbal, M., 1983. *An introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Toronto, p. 390.

Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E.D., 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, 389–411.

Joos, F., Prentice, I.C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G., Gerber, S., Hasselmann, K., 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emission scenarios. *Global Biogeochem. Cycles* 15, 891–907.

Kawamiya, M., Yoshikawa, C., Sato, H., Sudo, K., Watanabe, S., Matsuno, T., 2005. Development of an Integrated Earth System Model on the Earth Simulator. *Journal of Earth Simulator* (submitted).

Kira, T., Shidei, T., 1967. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western Pacific. *Jpn. J. Ecol.* 17, 70–87.

Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., Fiorino, M., 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82, 247–267.

Kohyama, T., Shigesada, N., 1995. A size-distribution-based model of forest dynamics along a latitudinal environmental gradient. *Vegetatio* 121, 117–126.

Kohyama, T., Suzuki, E., Aiba, S., Seino, T., 1999. Functional differentiation and positive feedback enhancing plant biodiversity. In: Kato, M. (Eds.), *Biology of Biodiversity*. Springer, Tokyo, pp. 179–191.

Kohyama, T., 2005. Scaling up from shifting-gap mosaic to geographic distribution in the modeling of forest dynamics. *Ecol. Res.* 20, 305–312.

Köppen, W., 1936. Das Geographische System der Klimate. In: Köppen, W. and Geiger, R. (Eds.), *Handbuch der Klimatologie*. Gebruder Borntraeger, Berlin, pp. C1–C44.

Kuroiwa, S., 1979. Population photosynthesis. In: Iwajyo, H. (Eds.), *Function and productivity of plant population (in Japanese)*. Asakura-shoten, Tokyo, pp. 84–141.

Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L., 1998. *Plant Physiological Ecology*. Springer, New-York.

Larcher, W., 1995. Ecophysiology and stress physiology of functional groups. In: *Physical plant ecology*. Springer, Berlin, p. 506.

Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C₃ plants. *Plant Cell Environ.* 18, 339–355.

Lloyd, J., Taylor, J.A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Func. Ecol.* 8, 315–323.

Neilson, R.P., 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecol. Appl.* 5, 362–385.

Osmond, C.B., Björkman, O., Anderson, D.J., 1980. Photosynthesis. In: *Physiological Processes in Plant Ecology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 291–377.

Pacala, S.W., Deutschman, D.H., 1995. Details that matter: The spatial distribution of individual trees maintains forest ecosystem function. *Oikos* 74, 357–365.

Peng, C.H., 2000. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecol. Modell.* 135, 33–54.

Penning de Vries, F.W.T., 1975. Use of assimilates in higher plants. In: Cooper, J.P. (Eds.), *Photosynthesis and productivity in different environments*. Cambridge Univ. Press, pp. 459–480.

Pitman, A.J., 2003. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology* 23, 479–510.

Poorter, H., 1994. Construction costs and payback time of biomass: A whole plant perspective. In: Roy, J., Garnier, E. (Eds.), *A whole plant perspective on carbon-nitrogen interactions*. SPB Academic Publishing, Hague, Netherlands, pp. 111–127.

Pregitzer, K.S., Euskirchen, E.S., 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biol.* 10, 2052–2077.

Raich, J.W., Rastetter, E.B., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Steudler, P.A., Peterson, B.J., Grace, A.L., Moore III, B., Vörösmarty, C.J., 1991. Potential net primary productivity in South America: application of a global model. *Ecol. Appl.* 1, 399–429.

Reich, P.B., Walters, M.B., Ellsworth, D.S., 1997. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 94, 13730–13734.

Ryan, M.G., 1991. Effects of climate change on plant respiration. *Ecol. Appl.* 1, 157–167.

Sala, O.E., 2001, Productivity of temperate grasslands. In: Roy, J., Saugier, B., Mooney, H.A. (Eds.), *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 285–300.

Schulze, E.-D., Schulze, W., Kelliher, F.M., Vygodskaya, N.N., Ziegler, W., Kobak, K.I., Koch, H., Arneeth, A., Kusnetsova, W.A., Sogatchev, A., Issajev, A., Bauer, G., Hollinger, D.Y., 1995. Aboveground biomass and nitrogen nutrition in a chronosequence of pristine Dahurian *Larix* stands in eastern Siberia. *Can. J. For. Res.* 25, 943–960.

Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T., 1964a. A quantitative analysis of plant form — The pipe model theory I. *Jpn. J. Ecol.* 14, 97–105.

Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T., 1964b. A quantitative analysis of plant form — The pipe model theory II: Further evidence of the theory and its application in forest ecology, *Jpn. J. Ecol.* 14, 133–139.

Shugart, H.H., 1998. The mosaic theory of natural landscapes. In: *Terrestrial ecosystems in changing environments*. Cambridge University Press, pp. 178–204.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I.C., Arneeth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J.O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M.T., Thonicke, K., Venevski, S., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.* 9, 161–185.

Starfield, A.M., Chapin III, F.S., 1996. Model of transient changes in arctic and boreal vegetation in response to climate and land use change. *Ecol. Appl.* 6, 842–864.

Takahashi, K., Homma, K., Vetrova, V.P., Florenzev, S., Hara, T., 2001. Stand structure and regeneration in a Kamchatka mixed boreal forest. *Journal of vegetation science* 12, 627–634.

Takenaka, A., 2005. Local coexistence of tree species and the dynamics of global distribution pattern along an environmental gradient: a simulation study. *Ecol. Res.* 20, 297–304.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., Cramer, W., 2001. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography* 10, 661–677.

Warning, R.H., 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv. Ecol. Res.* 13, 327–354.

Woodward, F.I., Lomas, M.R., Betts, R.A., 1998. Vegetation-climate feedbacks in a greenhouse world. *Phil. Trans. R. Soc. Land. B* 353, 29–39.

Woodward, F.I., Smith, T.M., Emanuel, W.R., 1995. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochem. Cycles* 9, 471–490.

Wright, I.J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackerly, D.D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J.H.C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P.K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B.B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Midgley, J.J., Navas, M., Niinemets, U., Oleksyn, J., Osada, N., Poorter, H., Poot, P., Prior, L., Pyankov, V.I., Roumet, C., Thomas, S.C., Tjoelker, M.G., Veneklaas, E.J., Villar, R., 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 428, 821–827.

Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H., Hozumi, K., 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI). *Journal of Biology, Osaka City University* 14, 107–129.

Yokota, T., Hagihara, A., 1996. Seasonal change in the temperature coefficient Q_{10} for respiration of field-grown hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) trees. *Journal of Forest Research* 1, 165–168.

Zeide, B., 1993. Primary unit of the tree crown. *Ecology* 74, 1598–1602.

図の説明

図 1

Representation of individual trees in the SEIB–DGVM. Each tree is composed of a crown, trunk, and fine roots. The trunk is composed of heartwood and sapwood. Trunk biomass includes branches and coarse/tap roots. The crown consists of 10-cm-deep ‘disks’. The trunk and the crown both have cylindrical shapes, while the fine roots are formless (i.e., represented only by biomass).

図 2

The carbon flow through a terrestrial ecosystem as simulated by the SEIB–DGVM.

図 3

The water flow through the terrestrial ecosystem as simulated by the SEIB–DGVM.

図 4

Schematic diagram of how to allocate direct radiation in the SEIB–DGVM.

図 5

Relationships between mean annual precipitation and aboveground net-primary-production. The broken line represents the regression from field observations in the U.S. central plains, while solid lines are the simulated results in Osage Prairie (Oklahoma, USA) and the Central Plains Experimental Range (Colorado, USA).

図 6

Observed (left array) versus simulated (right array) tree size distributions (histograms, left scale in tree density per ha) and size dependent growth rate (line chart, right scale in mm/year). DBH class definitions are in 5-cm intervals starting from 5 cm (i.e., 5–10 cm, 10–15 cm, ... , and above 50 cm). For the each simulation site, only one woody PFT that corresponded with the dominant trees of the observation site was allowed to establish.