

修士論文

環境傾度バイオームチャンバーにおける  
植生動態に関する研究

*Modeling of vegetation dynamics in GRADIENT BIOME*

指導教員

影本 浩 教授

阿久津 好明 助教授

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻

環境システムコース 地球環境工学研究室

46756 寺田一美

平成 17 年 2 月 2 日

# 目次

## 第1章 結言

1.1	背景	1
1.1.1	地球温暖化概論	
1.1.2	生態系の脆弱性把握研究の最前線	
1.2	環境傾度バイオーム	8
1.2.1	環境傾度バイオームの特徴	
1.2.2	環境傾度バイオームの概要	
1.2.3	環境傾度バイオームチャンバー内の環境制御	
1.2.4	環境傾度バイオームに関する既往の研究	
1.2.5	本研究の着眼点と課題	
1.3	研究目的	11
1.4	研究概要	11

## 第2章 研究方法 ～森林シミュレーションについて～

2.1	森林シミュレーションの基礎	13
2.1.1	森林シミュレーションの基礎	
2.1.2	樹の生長と光	
2.1.3	森林の中での木々の競争	
2.1.4	森林の動態	
2.1.5	木々の相互作用のモデル化	
2.2	森林シミュレーションの軌跡	16
2.2.1	JABOWA モデル	
2.2.2	SORTIE モデル	
2.2.3	サイズ構造モデル	
2.3	SEIB-DGVM	17
2.3.1	モデル特徴	
2.3.2	モデル詳細	
2.3.3	モデルの検証	

## 第3章 環境傾度バイオームチャンバー内の空間設計に関する検討

3.1	はじめに	28
3.2	区画面積の大きさ	28
3.3	考察	29

## 第4章 環境傾度バイオームチャンパー内の導入植生に関する検討

4.1	はじめに	30
4.2	世界の植生と東アジアの植生	30
4.2.1	陸上生態系の特性	
4.2.2	大生態系の分布	
4.2.3	分布を制約する気候条件	
4.3	本研究でとりあげる主な地域	38
4.3.1	計算地点の基礎情報	
4.3.2	計算結果—各地点における森林の変遷—	
4.3.3	20地点における計算結果の検証と考察	
4.3.4	まとめ	
4.4	環境傾度バイオームチャンパー内に植える植生選択	57
4.4.1	バイオーム植生選択	
4.4.2	東アジアに限定(仮想環境傾度バイオームモデルⅠの検証)	
4.4.3	日本に限定(仮想環境傾度バイオームモデルⅡの検証)	
4.5	シミュレーションの際の留意点	61
4.6	まとめ	62

## 第5章 環境傾度バイオーム利用法に関する研究

5.1	はじめに	64
5.2	地球温暖化詳細	64
5.2.1	IPCC 第3次評価報告書の概要	
5.2.2	データ元	
5.3	温暖化を起こさせたときの環境傾度バイオーム植生の変化	68
5.3.1	温暖化の起こし方	
5.3.2	気温のみを温暖化させた場合	
5.3.3	気温と降水量を温暖化変化させた場合	
5.4	温暖化を加速させて起こさせたときの变化	79
5.4.1	仮想環境傾度バイオームモデルⅠ(アジア ver.) トランセクト	
5.4.2	仮想環境傾度バイオームモデルⅡ(日本 ver.) トランセクト	
5.5	まとめ	81

## 第6章 結言

### Table 集 & Fig 集

### 謝辞

# 本章



# 第1章 緒言

## 1.1 背景

### 1.1.1 地球温暖化概論<sup>[1][2]</sup>

#### 1.1.1.1 異常気象と地球温暖化

近年、地球温暖化問題は、地球環境の観点から、国際的にも国内的にも大きな関心・懸念をもって議論されている。特に1990年代以降は、世界的に平年よりかなり高温な年が多い<sup>[2]</sup>。暖冬はほとんど恒常的ともいえるほどであり、一時的、あるいは地域的には、冷夏なども見られるものの、猛暑とよばれるような最高気温が35度を超える日が、以前よりかなり多くなり、温暖化が現実の気象にあらわれていると感じられるまでになっている。

一方、1997～98年にかけては、20世紀最大とみられるエルニーニョが発生し、それに関連したと思われる少雨・干ばつ、高温、大洪水など、異常気象あるいは極端な現象が世界の規模で起きた。Fig.1-1は、そのような異常気象の分布を示したものである。

このような異常気象と地球温暖化がどのように関連しているのかについては、議論がしばしば混乱している場合がある。エルニーニョの影響あるいはその他の原因による異常気象では、原因となる現象自体は自然変動であって、地球温暖化が原因ではない。<sup>[2]</sup>

問題は、地球温暖化が、自然変動の結果として現れる異常気象にどのように影響を与えるかである。この観点に立った上で、地球温暖化およびそれによる異常気象の頻度や程度に対する影響の予測を考える必要がある。

#### 1.1.1.2 検証された大気中二酸化炭素濃度の増加傾向

地球温暖化、あるいはより一般的には、気候変化に関して言えば、そもそも問題の発端は、地球規模の、地道で継続的な観測の蓄積によるものだった。地球をめぐる環境に異常な変化が生じつつあることについて、学説ではなくデータによる検証が行われるようになり、それが気候モデルの開発に伴い、定量的に明らかにすることに展開してきたといえる<sup>[2]</sup>。

Fig.1-2は、南極点（1957年より）、マウナロア（1958年より）、綾里（1987年より）で観測された、二酸化炭素濃度の変動を示したものである。南極点ではわずかであるが、マウナロア、さらには綾里で、より明確な季節変動を示している。これは、夏季には植生の光合成作用が活発になり、呼吸作用を上回って二酸化炭素を多く吸収することの反映であり、

夏季に極小、冬季に極大を示している。変動は植生の多い地点ほど顕著に現れる。

ところがこの季節変化を除いてみると、年々増加する変化傾向（年率的 0.4%の増加率）が明白であることや、またそれが化石燃料の燃焼など人為的な原因によることは、現在から見れば極めて自明になっているが、この顕著な増加傾向は、観測が開始されて数年でもすでに定量的に確認されていた。

化石燃料の燃焼の増大や、それによる大気中二酸化炭素濃度の増加、さらには、それによる地球温暖化の可能性についてすら、以前から学説として指摘されてはいたが、地球規模の観測により、はじめて現実で大気中二酸化炭素濃度の確実な増加が地球規模で検証されたわけである。あらためて、このまま増加しつづけると、大気の放射平衡、ひいては気候にどのような影響が生じるのかということが議論されるようになった。

### 1.1.1.3 地球寒冷化説

一方、気温の観測は 1860 年頃から世界規模で行われており、そのデータによれば、20 世紀前半には上昇し続けてきた気温が、第二次大戦頃を境に減少に転じ、1970 年代まで減少傾向が続いた。この寒冷化傾向はそのまま統計的に将来に延長予測すれば、地球寒冷化が進行中ということになる。

また、この時期は戦後の復興期にあたり、世界的に産業活動が活発になり、二酸化硫黄などをはじめとする汚染物質の排出増大による大気汚染が、工業地帯とその周辺に健康を害する公害問題を発生させていた。大気中には地表の土壌粒子、海面の飛沫、火山噴火の灰など自然起源の半径で  $10\mu\text{m}$  以下の微粒子がもともと存在しており、エアロゾルと呼ばれている。上記のように産業活動が活発化したため、煤煙などにより、人為起源のエアロゾルが急増した。

一般にエアロゾルは、雲を作る凝結核となる一方、太陽光線を散乱させるため、地球が吸収する放射量を減少させる作用がある。（例外もあり、スス（ブラック・カーボン）は、逆に温暖化作用があることが知られている。）

だが、地球規模の気候系は複雑であり、定量的な予測を行うには、関連する諸物理過程、とくに放射バランスに関する理解とそれに基づく気候モデルの開発を待つ必要があった。人為起源のエアロゾルの増加がどの程度寒冷化に寄与するかは、現在もなお不確実な要素がぬぐえない。

### 1.1.1.4 気候モデルによる地球温暖化の示唆と反響

1970 年代にはすでに、数値予報モデルの開発により、大気の運動には、流体である地球大気にニュートン力学に基づく流体力学の方程式を適用し、また、水蒸気の蒸発・凝結などの熱変化をともなう物理過程には、熱力学の方程式を適用するなど、力学的な手法で数

日先を予測することが、コンピュータの急速な発展とともに、かなり進展していた。その発展として、大気のバランス状態を研究するための大気大循環モデルの開発研究も進められていた。やがて、大気大循環モデルと、はじめは簡単な海洋モデルとを統合した気候モデル（大気・海洋結合モデル）の開発も始まった。

このようなモデルの進展に伴い、当時までの観測事実による、全地球上気温の低温化傾向や、地球寒冷化説の出ているときに、すでに検証されていた全球規模の二酸化炭素濃度増加のもとで、長期的な気候変化がどうなるのか、この気候モデルにより実験を行おうという研究がなされるようになった。

そして、1988年11月、地球温暖化に対するこのような世界的関心の高まりを背景に、WMO（世界気象機関）とUNEP（国連環境計画）が協力しあい、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設立された。以来IPCCは、気候変動問題に関し、自然科学の最新研究成果を基盤とした、観測からの知見、温暖化の原因特定、気候変化予測などの科学的評価に加えて、社会・経済的な研究成果を取り込んで、気候変化の影響や対応策等の評価を、全世界的な規模で行うことにより、政策決定者に判断材料や根拠を提供する、歴史的にもユニークな国際的枠組みとして機能してきている。

IPCCは、ジュネーブでの第一回会合において、気候変動に関する評価報告書を作成することを決め、世界中の第一線の研究者に成果の寄与を求めて活動を開始した。研究界はこれに応え、数多くの研究者によって、気候変動に関する最先端の研究成果を持ち寄り、その時点での知見をまとめるという膨大な作業に積極的に取り組んできている<sup>[2]</sup>。

この結果、1990年の第一次評価報告書、1995年の第二次評価報告書に続いて、2001年には、国際的に確立した最新の知見としての研究成果をまとめた第三次評価報告書が発表されるに至った。これらの報告書は、その時々々に政策決定者による国際的な政策の策定の判断材料として生かされてきた。

以上のことをふまえ本研究では、2001年にIPCCによってまとめられた第三次評価報告書を、最新の温暖化予測研究成果として用いる。その詳細は第五章で詳しく述べる。

### 1.1.1.5 IPCCによる第三次評価報告書(TAR)

IPCCはこれまで若干の変動があったが、基本的には以下のような三つの作業部会（WG）を儲け、それぞれの対応する任務のもとに、評価報告の活動を行っている。

第1作業部会（WGⅠ）：気候変動の科学的評価

第2作業部会（WGⅡ）：気候変動による、環境・社会・経済への影響評価

第3作業部会（WGⅢ）：排出シナリオ、対応策・緩和策

1990年にまとめられた第一次評価報告書（FAR）では、人為起源の温室効果気体がこの

まま大気中に排出され続けると、生態系や人類に重大な影響を及ぼす気候変化が生じるおそれがあるという警告を発した。そこでは、21世紀末までに、全球平均の地上気温は約1～3℃上昇し、また海面水位は35～65cm上昇と予測した。

第二次評価報告書（SAR、1995）においては、「観測結果から、識別可能な人為的影響が全球の気候に現れている。」として、地球温暖化が現実のものとなっていることを指摘した。また、二酸化炭素換算で年率約1%増にあたる温室効果気体濃度の増加が生じているという仮定での二酸化炭素漸増実験に関する国際比較実験の結果がまとめられた。SARの21世紀末までの予測は、「地上気温が約2℃（1～3.5℃）上昇する、海面水位が約50cm（15～95cm）上昇する」などである。

このような背景の下、2001年にまとめられた第三次報告書の特徴は以下のようになる。

- ・ はじめて各作業部会にまたがる統合報告書が作成された。
- ・ 北半球に関しては、年輪・サンゴ・氷床などから推定される代替データの導入により、過去1000年前までの気候が詳細に調べられた。
- ・ 20世紀の気候の再現実験を通して、地球温暖化の原因が人為起源であることを特定するとともに、気候モデルの予測能力について確認した。
- ・ 政策決定者への要約などで、表現がより定量的で厳密になっている。

TARによれば、観測機器による観測値が全球規模で得られる1861年から、2000年までの140年間に、全球で平均した地上気温の変動は、Fig.1-3で示されるようになる。ただしこのグラフは、30年平均からの偏差（WMOの統計基準。この場合、1961～1990年の30年平均からの偏差）で示したものである。これは、IPCCの依拠する研究の統計基準に基づいている。

各年の偏差は棒線で、またその値の95%の信頼区間を縦線と短いバーで示してある。黒い太線の曲線は、10年以下の変動を除いてみるために、10年平均で平滑化したものである。

1910～1945年、および1976～2000年の二つの期間に上昇傾向が著しい。逆に1945～1970年頃には下降傾向が目立つ。当時、この傾向に基づいて、第二次大戦後の工業の活発化に伴うエアロゾル生成の増加などを根拠に、地球寒冷化説も出た。放射強制力の観点からは、ほとんどのエアロゾルが散乱作用により寒冷化に寄与するが、火山噴火や太陽活動の変動や、人為起源の温室効果気体など、ほかの要素も総合的に気候モデルの中で考慮する必要がある。

この測器に基づく観測期間の過去140年間でみても、20世紀（過去100年間）に限ってみても、気温の上昇は、 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ である（この期間のはじめから19世紀末までは変化は見

られない) [2]。

この見積もりは、1989年までの観測データに基づいた第一次評価報告書や、1994年までのデータに基づいた第二次評価報告書(1995)での見積もり(0.3~0.6℃)より、明らかに大きくなっている(約0.15℃の差がある)。

これは新たに加わった観測期間(1995~2000年)が比較的高温傾向であったことと、データ処理の手法が改良されたことを合わせた結果である。たとえば、大都市が周辺部より暖かい局地気候となるヒートアイランド効果などの補正がなされている。それでも90年代後半の高温傾向の方がまさって大きくなっている。さらにTARの新たな特徴であるが、政策決定者向けの要約(SPM)でも上記のように、誤差範囲を付し、厳密な表現を期している。

1990年代は過去140年間で最も暖かい10年間であり、特に1998年は最も暖かい年であった可能性がかなり高い(very likely\*)。

\* SPM および専門要約(Technical Summary)においては、信頼度を判断する見積もりを示すのが適当な部分において、定量的意味をもった表現をとっている。

---

「ほぼ確実(virtually certain)」	: 実現性が99%以上
「可能性が(は)かなり高い(very likely)」	: 実現性が90~99%
「可能性が(は)高い(likely)」	: 実現性が66~90%
「どちらともいえない(medium likelihood)」	: 実現性が33~66%
「可能性が(は)低い(unlikely)」	: 実現性が10~33%
「可能性が(は)かなり低い(very unlikely)」	: 実現性が1~10%
「可能性が(は)極めて低い(exceptionally unlikely)」	: 実現性が1%未満

---

陸上に関しては、日最低気温(ふつう夜間に生じる)は、1950年~1993年において、10年あたり約0.2℃上昇している。一方、日最高気温(日中に生じる)も同時期にその半分の上昇率がある。このため、中高緯度の陸上で、凍結していない期間(非凍結期間)が長くなった。

また、1950年以降、極端な低温の発現頻度は減少し、極端な高温の発生頻度は小幅に増加した可能性が高い。一方、同時期、海面水温の上昇は陸上における平均気温の上昇量の半分である。

### 1.1.1.6 温暖化と植物生態系

2002年6月4日に日本政府は、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書を受諾（批准）することを決定し、日本は京都議定書の締約国となった。これにより、1990年を基準年として、二酸化炭素換算で6%の温室効果ガスの排出削減に、議定書発効後、法的拘束力を持った義務を負うことになった。

そして2005年2月に京都議定書が発効されたことにより、地球温暖化防止に向けた国際的な取り組みがますます必要とされている。地球規模で起こる温暖化は、降水量の変化などといった気候だけでなく、動植物にも多大な影響を及ぼすと考えられている。

温暖化は等温線の移動速度で1.5~5.0km/yearに相当すると試算されているが、一方で木本植物の移動可能速度は比較的寿命が短い種でも0.1~2.0km/year程度で、植生の移動は実際の温暖化に追いつけず多くの種が死滅すると考えられている。だが現在のところ、植物がこの急速な環境変化に対してどのように応答し、植生帯の分布や生物種の構成などがどのような影響を受けるかについては、ほとんど明らかになっていない。

次の節では、地球温暖化が生態系に与える影響の研究が、現在どこまで進んでいるかについて述べる。

### 1.1.2 生態系の脆弱性把握研究の最前線

人間活動が原因となって引き起こされた気候変化は、長期的には気温上昇、降水の量や降り方の変化、海面上昇などをもたらし、短期的には異常気象の発生頻度や強度を変化させるなど、自然生態系や人間社会に深刻な影響を与えると考えられている（IPCC、2001；環境省、2001）。

気候変化の影響の現れ方は、自然生態系と人間社会では異なる。その影響を推定するためには、気温、降水量、異常気象などの外力と、自然生態系や人間社会の持つ影響に対する抵抗力や適応力の相互関係を見積もる必要がある。

影響、適応、脆弱性を扱うIPCCの第2作業部会では、こうした将来予測の予測値（一般に気候シナリオと呼ばれる）を用いて影響の予測や評価を行うが、予測された気温の高い範囲（5~6℃）を用いた研究事例はまだ行われていない。今後早急に、このような高い気温上昇や海面上昇をベースとした研究が必要である

IPCCの報告書では、「ここ50年間の温暖化のほとんどが人間活動に起因するという、新たな、かつより強力な証拠がある」と結論づけられている。具体的に確認された変化の例としては、氷河の後退・縮小、永久凍土の融解、河川や湖沼の結氷の遅れや融解の早まり、中~高緯度における植物の成長期間の長期化、動植物の極方向や高々度方向への移動、動

植物群落の縮小、樹木の開花・昆虫の出現・鳥類の孵化の早期化が挙げられている。その詳細を Table1-1 に示す。

森林と植生への影響としては、日本全体の潜在植生変化では、2050年には高山植生・赤高山針葉樹林の分布が大幅に減少すること、北部の針葉樹林が落葉広葉樹林に、南西部では落葉広葉樹林が常緑広葉樹林に変化する危険性が予測されている。Fig.1-7 に現在と2050年における潜在植生分布の変化の予測結果を示す。この図は、温暖化によって山岳生態系は著しく縮小し、同時に植生帯が全体的に日本列島を北上することを示している。

また、松井(2004)<sup>[6][8]</sup>らは、植物種の分布情報とそれに対応する環境情報を使った統計モデル解析により、温暖化後の種の分布可能域の予測を、ブナ林について行った。彼らはブナ林の分布の分類樹解析により、4つの気候指数(暖かさの指数、最寒月の日最低気温の平均、暖候期と寒候期の降水量)がブナ林の分布を規定していることを示し、分布可能域を地図化した(Matsui *et al.* 2004)。さらに気候シナリオCCSR/NIES(2090年)を当てはめて温暖化後のブナ林の分布可能域と比較することで、脆弱地図と感受性地図を作成した(Matsui *et al.* 2004)。Fig.1-8 と Fig.1-9 にそれぞれの結果を示す。

一方、石神(2003)<sup>[7]</sup>らは、プロセスモデルとよばれる植生モデルを用いて温暖化が日本の植生に与える影響を予測した。具体的には温暖化時のNPPと潜在的な自然植生分布の予測を行った。【NPP(純一次生産量):ある期間に植物が作った幹や葉などの有機物の総量、GPP(総一次生産量)=NPP+呼吸量】

気候変動に伴う植物生態系の応答の解析は、このようにいくつかの手法で試みられているが、いずれも全体的な脆弱性の傾向やNPP、GPPの広範囲での変化量を検討するに留まっており、より具体的にどのような植生の変化が起きるのか、異なる気候帯間の移動がどのくらい起こるのか、などはわかっていない。

現状の植生を平行移動して将来予測とすることは容易かもしれないが、本当に平行移動するのか、可能な移動速度はどのくらいか、平衡に達するまで何が起こるか、といった問題の解決のためには、種の分布の決定要因や分散プロセスに関するメカニズム研究が必要である<sup>[11]</sup>。けれども、個々の種の分布がどのように決まっているかどうかという問題は、生態学の基本的な問題のひとつであるにもかかわらず、きちんとした答えは出していない。生態学の重要課題として、これからも中心的な課題として研究されつづけるような課題である。そのような現状であるから、当然、気候が変わったら云々という設問に対しても、本質的には平行移動による見積もりを越える答えは出せていないし、5年、10年のうちにだせるものではない、との意見すらある。(国立環境研究所 竹中明夫氏のHP<sup>[11]</sup>を参考)

## 1.2 環境傾度バイオーム<sup>[3] [4] [5]</sup>

地球環境とくに生物圏における自然環境の持続性が失われてしまい、人間存在そのものの持続が不可能になるのではないかと懸念されている中、複雑で多様な生態系の維持と環境との相互作用の正確な理解は地球環境問題の解決にとって不可欠である。特に地球温暖化における炭素循環、酸性雨に対する動植物の応答、有害物質の土壌における変換過程などは早急な解析と対策が求められている。

これまでの生態学研究は、フィールドでの観察結果を記述、考察することにより大きく発展してきたが、こうした野外観測手法によっては現象をひきおこす仕組みを明らかにすることに限界を感じる分野も多くなってきた。

特に多数の種が環境変動に対して応答、変化する仕組みを定量的に把握し、それを地域規模、地球規模の現象として再構築できる研究状況にはなく、地球規模で進行している環境変動に有効に対応できない事態になっている。今後ますます深刻化するであろう環境問題を解決するための生態系の研究は、これまで行われてきた野外での観察や測定に加え、十分制御された環境における自然の再現実験、多様な要素仮定を系統的に吟味できる数値シミュレーション技術などを総合的に動員できるものでなければならないといえる。

以上のような背景のもと、東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻では、上記のような生態圏における物質循環の把握や環境変動に伴う生態系の応答とそのメカニズムなどについての研究、すなわち生態系の持続性と多様性および制御性の仕組みを解明する研究を行うため、閉鎖型の大型環境制御実験施設（環境傾度バイオーム：Gradient Biome）の建設を計画している。Fig.1-4 にその施設の概観予想図を示す。

### 1.2.1 環境傾度バイオームの特徴

環境傾度バイオームは、実験室としてのバイオーム群、環境評価施設、環境制御・情報処理施設で構成される。バイオーム群は光合成を起点とする生態系諸要素の挙動を実験室において再現するためのもので、長さ 200m、幅 50m、高さ 40m ほどの環境傾度を持った大型バイオームから小規模のバイオームまでの規模の異なるバイオーム群からなり、生態系の挙動を支配する基本因子である気温、地温、光、水分、CO<sub>2</sub>などの物質の濃度、降水、土壌水の流れなどを制御し、特にライシメータを設置することにより、地中を含めた物質循環を量的にも把握することができる。

大型バイオームは熱帯から寒帯にいたる各地の生態系を再現し、物質循環系の正確と変



動を解明するための施設であり、熱帯・亜熱帯・暖温帯の常緑広葉樹林、冷温帯の落葉広葉樹林、亜寒帯の針葉樹林にいたる各植生帯における土壌および生物群集全体、すなわち生態系（＝バイオーム）をそのまま再現し、地球上の熱帯から寒帯までの気候帯を間に隔壁を設けることなく連続的にチャンバー内に収めようという計画である。本実験施設は広く一般にも公開して、生態系の理解と環境保全のための市民教育にも資する予定である。Fig.1-5 に環境傾度バイオーム内の計画図を示す。

### 1.2.2 環境傾度バイオームの概要

環境傾度バイオームには、前述のように大型バイオームと小型バイオームが建設されるが、ここからは大型バイオームに関して記述する。大型バイオームは、閉鎖された巨大なチャンバーの中に、熱帯から寒帯までの地球環境を間仕切りなく連続的に再現し、樹木など動植物が移入されて実験が行われる。またこのほか、人工照明、空調、散水器などの環境制御機器や各種センサーやライシメータ等の環境測定機器が設置され、チャンバー内の環境制御や環境モニタリングが行われる。

### 1.2.3 環境傾度バイオームチャンバー内の環境制御

環境傾度バイオームは巨大なチャンバーの中に熱帯から寒帯までの気候地帯を間に隔壁を設けず連続的に再現するという世界でも類例のない施設であり、そのためこれを実際に実現するには多くの技術的課題および問題点が存在し、これらを克服するために幅広い分野にわたって様々な基礎的研究が必要とされている。たとえば、気流や温度、湿度などといった各気候帯における気象条件の環境制御に関する問題やライシメータの大型化に関する問題などが挙げられ、今後、環境傾度バイオームの計画を推進していく上でこのような問題点を解決していくことが必須である。

### 1.2.4 環境傾度バイオームに関する既往の研究<sup>[3]</sup>

これまで、バイオーム研究会において、環境変動に対する生態系への影響や大型温室の建設や管理などといった、環境傾度バイオームに関する講演が様々に行われている。バイオーム研究会は、バイオームの設置に向けて、建物のデザイン、強度、内部構造や気流系、土壌、移植樹種など、山積する課題に対して勉強・検討・研究することを目的として平成12年4月21日に発足された<sup>[4]</sup>。

矢野（2004）は、環境傾度バイオームチャンバー内での環境制御について実現性を評価し、所要の設計条件を満足するような手段を見出すことを目的に、チャンバー内の熱・水分環境について検討した。計画しているチャンバースケールの 1/100 模型を用いた実験と数値解析により、熱帯から寒帯までの気温勾配を模擬した温度環境が再現できるかどうかを評価した。さらにチャンバー内の気流や湿度（水蒸気量）や土壌温度、土壌内水分も考慮した環境制御法について検討を行うために、チャンバー内環境を再現できる大気-土壌-植生モデルを構築し、模型実験の結果により検証を行った後、数値解析を行いこれら気象条件の環境制御法を検討した。

だが矢野のモデルでの植生は、空気抵抗としての振る舞いや、根からの吸収、蒸散などに着目して施設内の熱・水分移動に与える負荷を考慮したものであり、具体的な植物種の構成や、光合成などの生理過程、樹木の死亡、誕生などの遷移過程までの議論は行われていない。

### 1. 2. 5 本研究の着眼点と研究課題

前述のようにバイオームチャンバー内の熱・水分環境については既往の研究<sup>[1]</sup>により、対流や熱移動を計算することによって検討されている。だがチャンバー内の植生については、対流の抵抗としての扱いのみで留まっており、どのような植生を導入するのか、それによりどのような現象が引き起こされるのかといった検討は行われていない。

チャンバー内に生きた植生があると、植物の蒸発散、光合成、呼吸、リター、土壌分解によるCO<sub>2</sub>放射、土壌含水量の変化とそれに伴うアルベドの変化などを通じて、チャンバー内の気候環境に影響を与える<sup>[2]</sup>。従ってチャンバー内環境の解析には植生の影響を加味した検討が不可欠であり、導入植生の考察が必要とされている。

だが、環境傾度バイオームチャンバーは世界でも例を見ない特殊な空間であるため、そのサイズや空間構成すらもいまだわかっていない。またその特殊性により、既存の観測結果などから内部植生の変化、環境変化への応答などを推測することは難しく、植生の生理過程・動態過程などを詳細にモデル化したシミュレーションが必要である。

### 1.3 研究目的

環境傾度バイオームは、前述のように、熱帯から寒帯までの植生帯を間に隔壁を設けず連続的に閉鎖空間内に再現するという特殊な施設である。よってチャンバー内にどのような植物生態系を導入すればよいのか、またそこに再現した植物生態系をどのように利用すれば、どのようなことがわかるのか、などを従来の観測結果や文献値から推測するには限界がある。また、私達人間よりもはるかに長い時間をかけて成長、変遷する森林生態系を扱うにあたって、トライアル&エラーで実験を行ってみるわけにはいかない。

よって本研究では、数値シミュレーションの手法を用いて植生を詳細に扱った環境傾度バイオームモデルを PC 上に仮想構築し、バイオームチャンバー内の植物生態系の動態を解析し、チャンバー内に再現する植物生態系を検討する。

さらに、それらの植物生態系が地球温暖化に対してどのような反応を示すのかをシミュレーション実験し、環境傾度バイオームの利用法に関して議論する。また、温暖化を加速させた場合のシミュレーション実験も行うことにより、環境傾度バイオームの大きな目的のひとつである、温暖化に対する植物生態系の応答を予測する、ということがどれほど可能であるかを検討する。ここで Fig.1-6 に環境傾度バイオームチャンバーの利用法の一例と、仮想環境傾度バイオームで行うシミュレーションの位置づけを示した図を掲載しておく。

### 1.4 研究概要

まずは森林シミュレーションを用いて、仮想環境傾度バイオームを構築した。手法としては、樹木一本一本についての成長を追える個体ベースモデルに基づいた森林シミュレーション SEIB-DGVM (Spatial-Explicit Individual-Base Dynamic Global Vegetation Model) [佐藤永氏 (地球環境フロンティア研究センター) 開発]モデルを用いた。このモデルはある気象情報を入力すると、その気候に適した植生を三次元構築し、光をめぐる樹木同士が競争し、それに伴う植生の変遷を再現できる。

本研究では環境傾度バイオームチャンバー内に設ける植物生態系の選定を、各気候帯を網羅できるよう世界中から選び出した 20 地点について、シミュレーションを行うことで検討した。さらに連続した環境傾度のもとでの植物生態系の分布が再現できるよう、バイオームチャンバー内での植物生態系の配置も検討した。

以上の議論から仮想環境傾度バイオームモデルを2つ提案し、それぞれについて温暖化を起こさせると各植生帯がどのような反応を示すかをシミュレーション実験し、検証した。さらに、温暖化を加速してシミュレーション実験し、仮想環境傾度バイオームモデルの反応を解析し、実際の環境傾度バイオームが温暖化予測にどの部分で寄与できるかを議論した。

## 参考文献

- [1]総合科学技術会議環境担当議員、内閣府政策統括官（科学技術政策担当）共編：総合科学技術会議 地球温暖化研究イニシャティブ 気候変動研究分野報告書 地球温暖化研究の最前線—環境の世紀の知と技術 2002—
- [2]近藤洋輝：地球温暖化予測がわかる本—スーパーコンピュータの挑戦—、(2004)、成山堂書店
- [3]矢野順也：環境傾度バイオームにおける熱・水分環境の制御法に関する研究、(2004)、東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士論文
- [4]東京大学大学院新領域創成科学研究科 大型環境制御実験施設ワーキンググループ：バイオーム研究 No.1、(2001)
- [5]東京大学大学院新領域創成科学研究科 大型環境制御実験施設ワーキンググループ：バイオーム研究 No.2、(2004)
- [6]Matsui, T., et al., (2004):Climate controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan.,*Journal of Vegetation Sciences* 15,57-66
- [7]石神靖弘・清水庸・大政謙次：日本の潜在的な自然植生分布に対する気候変化の影響予測、(2003)、農業気象、59(4),269-276
- [8]Matsui, T., et al., (2004):Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *Journal of Vegetation Sciences* 15,605-614
- [9]Matsui,T., et al., (2004):Comparing the accuracy of predictive distribution models for *Fagus crenata* forests in Japan. *Japanese Journal of Forest Environment* 46(2)
- [10]Tanaka, N., et al., in press :Constructing vegetation database useful for assessing impact of climate changes in Japan. *J.Agri.Meteorol.*
- [11]<http://takenaka-akio.cool.ne.jp/doc/science/warming.html>
- [12]Wolfgang cramer, et al.,(2001)Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models.

## 第2章 研究方法 ～森林シミュレーションについて～

本章では、本研究の主な手法として採用した森林シミュレーションについて概説する。森林の動態をモデル化し、その変遷をシミュレーションで捉えようとする試みは、Botkin et al. が 1972 年に発表した JABOWA モデルをはじめとし、昔から多くの研究者たちによって行われてきた。本研究で採用した SEIB-DGVM モデルは 2005 年に海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センターの佐藤永氏らによって開発された新しいモデルである。このモデルの特徴を理解するためにも、まずは森林をモデル化するアルゴリズムの基本の考え方と、これまでに開発されてきた森林シミュレーションをいくつか紹介する。その後採用した SEIB-DGVM モデルの詳細について概説する。

### 2.1 森林シミュレーションの基礎

#### 2.1.1 森林シミュレーションの基礎<sup>[1]</sup>

森の木々の一生は長い。数十年から数百年も生きる。しかし、私達は常に十分な時間をもっているわけではない。限られた時空間の観察でかいまみえた様子から、森林全体の姿を推し量らなければならないことも多い。また、森林というシステムの仕組みを調べるために実験的に環境条件を変えて調べようにも、対象が大きいだけに実験操作が大変であった。乾燥化が森林に及ぼす影響をどうやって実験するのか。あるいは、年間を通じて平均気温が 2℃ 上昇した状態をどう作り出すのか。高さ数十 m の森林全体を乾燥させたり暖めたりして、それ以外の環境条件は変えないなどという実験は、そう簡単にできるものではなかった。

長い時間がかかる継続観察や、さまざまな技術的困難がつきまとう実験を補うものとして、モデルによるシミュレーション実験がある。われわれが森林について持っている知識と限られた期間の観察の結果をもとにして森林のモデルをつくり、これを使って仮想実験するのである。コンピューターの中の仮想の森林ならば、実際の観察よりも短い時間で森林の構造が時間とともに変化する様子を見ることができ、木を切り倒したり、環境条件を変えたりといった実験操作も容易である。

モデル化に伴い、現実の問題に対応する時には、モデルから何らかの具体的な予測を得ることが期待される。根拠のはっきりしない予測ではなく、依って立つ仮定とそこから結

論に至るまでのアルゴリズムを明らかにしたモデルによる予測は、その当否を科学的に論じることができる。この意味で、そのような予測は「科学的な予測」と呼べるであろう。

## 2.1.2 木の成長と光

木などの多年生植物の場合は、誕生からの経過時間よりもサイズ（個体全体の質量、あるいは高さや幹の太さなどで表す）の方が個体の状態を表すのに適当なことが多い。成長の速度が一定ならばサイズと年齢はそのまま対応するのでどちらで記述しても同じことだが、実際には植物の成長速度はさまざまな環境条件の影響を強く受ける。エネルギー源としての光の量、土壤中の水や栄養塩の量、温度環境などにより、成長速度は1桁も2桁も違ってくる。

森林の中では、特に光資源の量の空間的なバラツキが大きい。森林の上層部の枝や葉が茂っている層である林冠部 (forest canopy) では空からの光を100%受けているのに対し、密生した木々の下の地面、すなわち林床 (forest floor) にはその数%、ときには1%以下の光しか到達しない。一般に、光資源がたくなればそれだけ木の成長もよい。しかし、どんな光環境条件のもとでどのように成長するのかは木の種類によって違う。

## 2.1.3 森林の中での木々の競争

資源の量が限られているとき、その資源を利用したい生き物たちの間で競争が起こる。光、水、栄養塩などが植物にとっての資源である。光をめぐる競争と、水、栄養塩をめぐる競争は少々性質が違う。土壤中の資源は大きな木も小さな木も吸収することができる。大きな木はたくさん吸収し、小さな木は少ししか吸収しないが、互いに相手の存在は多かれ少なかれ邪魔となる。一方、光の場合は、上の葉が光を吸収したら下の葉の吸収できる光はわずかになってしまいが、下の葉の存在は上の葉にとって何の影響もない。このようなタイプの競争は一方向性の競争 (one-sided competition) と呼ばれることがある。

多くの森林では、地中での水や栄養塩をめぐる競争よりも地上での光をめぐる競争の方が熾烈であり、光が豊富な林冠の場所の取り合いが展開されている。一度林冠に到達して十分に光を受けられるようになった木は、下層で日陰に甘んじている木に追い抜かれることはない。他の木々の下になってしまった個体は林冠部の10%なり数%なりの光しか受けることができず、その成長もゆっくりにならざるを得ないからである。

日陰の身になってしまった下層の木が林冠に場を得る唯一のチャンスは、上層の木が死亡したときである。林冠木が死亡してできた隙間は林冠ギャップ (canopy gap) と呼ばれ

る。ギャップが形成されてより多くの光を受けられるようになった下層の木は成長を速め、しだいに林冠ギャップを埋めていく。こうして林冠に座を占める木が交代するプロセスはギャップ更新 (gap regeneration)と呼ばれる。

#### 2.1.4 森林の動態

森の木々を詳細に見渡せばいつも何らかの変化が起こっている。構成メンバーの成長や入れ替わりのプロセスをひっくるめて森林の動態 (forest dynamics)と呼ぶ。

高木が死んで林冠ギャップが形成され、これを他の木が埋めることで世代の交替が進んでいく。山火事や台風のような大きな攪乱 (disturbance)によって多数の高木が死ねば、大規模な世代交替が起こる。そうした攪乱の後に再生した森林では、攪乱の前とは異なる樹種が優占することがある。それらの木々もギャップ更新のプロセスを経てまた別の種類に取って代わられることがしばしばある。このような構成種の移り変わりは遷移 (succession)と呼ばれる。木々の成長、死亡、種子の生産などのプロセスが、森林全体の動的な振る舞いの基礎となる。ギャップ更新にしろ遷移にしろ、個々の木々の振る舞いを基礎とした森林の動態の1つの側面である。Fig.2-1に森林のギャップ更新の模式図を示す。

林冠層がすべて埋まった状態では林内はとても暗く、樹木の成長には不適である。林冠を埋めている高木が死亡して林冠ギャップが形成されると、その下には多くの光が差し込むようになる。暗い環境に耐えていた背の低い個体や、明るくなってから新たに発芽して生じた実生個体は、多くの光を受けて成長する。それらの個体のうち背伸び競争に勝ったものが林冠に到達してギャップを埋める。

#### 2.1.5 木々の相互作用のモデル化

森林の動態をシステムの仕組みを踏まえてモデル化するには、個体ないしはそれ以下のレベルの現象を基礎にすることが必要である。個体性を考慮しないモデルは森林の物質循環の研究などには適しているが、森林の動態を表現するのには向かない。かといって、1枚1枚の葉のレベルにまで立ち入ったモデルでは、複雑なばかりでわけがわからなくなる危険がある。ここでは個体レベルのプロセスを踏まえたモデルに着目する。

モデルの基本要素を個体にしたとして、次に考えるべきことは、集団を構成する数多くの個体の相互作用をどのように表現するかである。森林を構成する木々の間には、種特異的な食う食われるなどの関係はない。個体間の相互作用はもっぱら資源の奪い合いという形をとる。そのようなシステムでは以下の2つに注目することで、個体間の相互作用をモデル化することができる。

- ① 個体が利用可能な資源量とその個体の挙動との関係
- ② ある個体の存在による資源の分布パターンの変化

森林の場合には、木の成長が光環境にどのように依存するか、そして個々の木はどれだけ周囲を日陰にするかを押さえれば、光をめぐる競争を介した相互作用を再現できる。

## 2.2 森林シミュレーションの軌跡

### 2.2.1 JABOWA モデル<sup>[2]</sup>

個体性を考慮したモデルにも色々なタイプのものがある。その中に、1個体1個体をはっきりと区別してそれぞれの特性の時間変化を追っていく 個体ベースモデル (individual-based model) と呼ばれるものがある。森林の個体ベースモデルでは、1本1本の木が生まれ、成長し、やがて死亡する様子をコンピューターの中に再現する。そのようなモデルの先がけが JABOWA モデルである。

#### JABOWA モデルの構造 —ギャップモデル—

Botkin et al. (1972)が発表した JABOWA モデルは、北アメリカ東部の落葉広葉樹と常緑針葉樹からなる森林の動態を再現するために開発された。JABOWA は、限られた面積の森林（プロットと呼ぶ）の中での木々の光をめぐる競争関係を評価し、これに基づいて個々の木の成長を決めていく。プロットの面積は、1本の成木が死んでできる林冠のギャップの面積にほぼ対応した大きさに設定する。おおよそ 100~300m<sup>2</sup>ほどである。ギャップが形成され、その中で旺盛に成長する木々がしだいにギャップを埋めていき、やがてまた高木が死んでギャップができるというプロセスを再現するこのタイプのモデルは、ギャップモデル (gap model) と総称される。

Botkin らは、研究対象の森林の主な構成樹種 13種のそれぞれに成長や死亡のプロセスにかかわるパラメータを与えて、樹種ごとの個性を表現した。

### 2.2.2 SORTIE モデル<sup>[3]</sup>

JABOWA モデルは、小面積の森林（プロット）の中の高さ方向の構造のみを考慮した1次元モデルである。プロット内の光は水平方向には均一であり、隣り合うプロット間の相



相互作用は考えない。大面積の森林は相互に無関係な多数のプロットの和として表現する。

SORTIE モデルは水平方向の構造も考慮した 3 次元空間モデルである。プリンストン大学の Pacala et al. (1996) は、コネチカット州の冷温帯の調査に基づいて森林の個体ベースモデルを構築した。3 次元モデルの中にはギャップモデルの単位であるプロットを 2 次元平面に配列したモデルもあるが、SORTIE モデルではプロットという概念はなく、3 次元の連続空間を想定する。この木々はそれぞれ  $x-y$  座標系で特定される地点を占める。

### SORTIE モデルの構造

シミュレーションの基本的な流れは JABOWA を同様である。個体ごとの光環境を評価しながら、成長、死亡、新個体の加入を逐次計算していく。3 次元モデルとすることで種子の空間散布のパターンを考慮したり、樹種ごとの空間分布パターンを再現したりすることが可能になる。また、プロットに区切らない連続空間とすることで、個々の木の光環境の計算値を実際の測定データとの対応がより直接的になるというメリットもある。

### 2. 2. 3 サイズ構造モデル

森林の動態を表現するには森林が多数の木々からなっていることを何らかの形で踏まえたモデルが必要だが、個体ベースモデルのように 1 本 1 本の個体を常に区別することは絶対的な条件ではない。たとえば、どの種類のどのサイズの木が何本あるのかを時間を追って計算していく森林動態モデルがある。このタイプのモデルは サイズ構造モデル (size-structured model) と呼ばれる。例として Kohyama (1992) のモデルが挙げられる。

## 2. 3 SEIB-DGVM

このセクションでは、本研究で用いた SEIB-DGVM モデルについてその詳細を紹介する。これまでに述べてきた森林生態系をモデル化しようとするさまざまな試みの中で、SEIB-DGVM は例えば以下の点において、他のモデルよりも優れている。個体の空間構造を把握しつつ森林動態を扱えること、生理過程や動態が実際のフィールド調査での傾向と一致する結果を得ていること、さらにそれを 3 次元動画として視覚的にも認知することができることなどが挙げられ、よって本研究に採用した。

気候と植物は互いに影響しあっており、そのフィードバック系を植生の動態に基礎を置いて表現する。このモデルは、地球環境フロンティア研究センターで進められている地球

統合モデル KISSME(Kyousei2-Integrated-Synergistic-System-Model for the Earth simulator)プロジェクトの一環として、全地球上の気象予測、なかでも地球温暖化の予測をより詳細に行うため、陸上生態系からの寄与をモデリングすることを目的として開発された。個体から森林動態、そして地球全体へと上手にスケールアップする手法の開発に成功したのが、このモデルである。

また、以下で説明するモデル特徴については、佐藤永氏による SEIB-DGVM 1.0 ver.、1.1 ver.モデル仕様書を参考にした。(http://sato.jfast1.net/seib/index.html)

### 2.3.1 モデル特徴

SEIB-DGVM (Spatial-Explicit Individual-Base Dynamic Global Vegetation Model) モデルは、海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センターの佐藤永らによって開発された、個体ベースモデルに基づいた森林シミュレーションである。このモデルは、ある気象条件を入力するとその地域に潜在的に分布可能な植生を再現し、さらに森林内での光をめぐる競争を加味した計算を行うことで、森林動態の時間変化を追うことができる。Fig.2-2 に植生動態モデルの構造を表す。

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扱った数十 m 平方の仮想林分であり、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。Table2-1 にモデル全体の入出力を、Table2-2 に SEIB-DGVM を構成する諸過程をまとめる。

SEIB-DGVM はそもそも、地球規模での気象環境変化をより詳細に把握するため、陸上生態系から気象への寄与を予測するために開発されたモデルである。

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ヵ月間隔で、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。また、全球グリッドにおいて植物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。SEIB-DGVM では LPJ-DGVM<sup>[4]</sup>の分類法に順し、Table2-3 にまとめる 10 種類の PFTs を仮定した。

## 2.3.2 モデル詳細

### 2.3.2.1 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 (Fig.2-3)。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、根については形を明示的に扱わない。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 ( $g_{mass_{leaf}}$ ,  $g_{mass_{root}}$ ) によって表現される。また木本と同様に貯蔵資源 ( $g_{mass_{stock}}$ ) 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。

### 2.3.2.2 炭素循環の概要

モデル全体の炭素の流れを Fig.2-4 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。

### 2.3.2.3 水循環

Fig.2-5 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 (現在、それぞれ 500、1000、1500mm と与えられている)。各グリッドにおける土壌の水文的・放射的な特徴は、ALBEDO・ $W_{sat}$ ・ $W_{fi}$ ・ $W_{mat}$ ・ $W_{wilt}$  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・土壤上層貯留水・土壤下層貯留水・土壤基底層貯留水の4ヶ所にプールされる (pool<sub>snow</sub>, poolw(1), poolw(2), and poolw(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<sub>snow</sub>) と降雨 (prec<sub>rain</sub>) とに分かれる。

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

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

降雪は雪ストック (pool<sub>snow</sub>) に組み入れられ、この雪ストックは土壤温度 (tmp<sub>soil</sub>) の関数として融解する (Ito and Oikawa 2002)。

### 2.3.2.4 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×昨年一年間の平均気温(°C)」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<sub>max</sub>)、(2)minimum growth degree day (GDD<sub>min</sub>)。これらの値はいずれも LPJ-DGVM (Sitch et al. 2003)より得た (Table 2-4 参照)。これらに加えて、熱帯性常緑広葉樹 (TrBE) の場合には、stat<sub>water</sub> (ただし、stat<sub>water</sub> は PFT 毎の水分条件を記述する変数 (0.0-1.0) であり、根バイオマスの垂直方向の分布で重み付け平均した土壤水分の可能吸水割合である) が2ヶ月以上連続で続いた年には定着できないと仮定し、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 μmol photon m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> を超えている場合のみ定着可能であると仮定した。

全ての新规定着木本は、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、新规定着個体の幹は全て辺材部から構成され (i.e. dbh<sub>heartwood</sub> = 0.0)、また height = crown<sub>depth</sub> であるとした。この新规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 maS<sub>stock</sub> 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 1m×1m 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が条件となる。定着可能メッシュにおいては、PFT 毎に与えた固定確率 ( $P_{\text{establish}}$ ) 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に関わらず、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。

### 2.3.2.5 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、 $g_{\text{massLeaf}} \cdot g_{\text{massRoot}} \cdot g_{\text{massStock}}$  は、 $0.1[\text{g m}^{-2}]$ を下回らないとした。草本は、C3 経路を有する温帯草本と C4 経路を有する熱帯草本の 2 種類の PFT から構成され、いずれの PFT についても全プロットでシミュレーションを行うが、各プロット毎でいずれか片方の優占型があるとした。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。切り替えがおきる際には、プロット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 ( $g_{\text{massLeaf}}$ ,  $g_{\text{massRoot}}$ , and  $g_{\text{massStock}}$ ) を交換した。

### 2.3.2.6 成長(木本の場合)

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経験的に得られた一定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 dynamic allocation scheme 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 ( $mass_{leaf} \cdot FRratio$ ) 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 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。

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

$$max_2 = ALM_3 \times [\pi(dbh_{heartwood}/2 + dbh_{sapwood}/2)^2 - \pi(dbh_{heartwood}/2)^2] / SLA$$

$$max_3 = mass_{available}/RGf.$$

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。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 (Shinozakiet 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ぬ。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。

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

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  $374 \times 10^3$  (g/m<sup>3</sup>)、広葉樹は  $492 \times 10^3$  (g/m<sup>3</sup>)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

$$Height \leq [ 1 / (HGTs \times (dbh_{sapwood} + dbh_{heartwood})) + 1/HGTmax ]^{-1}$$

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。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。

$$\text{crownarea} \leq ALM_2 \times (\text{dbh}_{\text{sapwood}} + \text{dbh}_{\text{heartwood}})^{1.6}$$

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 (CDmax) 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、 $\text{crown}_{\text{depth}}$  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  $\text{stat}_{\text{leaf}}$  合計を算出する。ここで  $\text{stat}_{\text{leaf}}$  は葉の 1 g 当 1 日当の利益 (in g DM g DM / day) の期待値であり、次式で定義される。

$$\text{stat}_{\text{leaf}} = \text{gpp}_1 - \text{cost} \times \text{la} / \text{SLA} \times 1/10 \times \text{crown}_{\text{depth}}$$

$\text{gpp}_1$  は crown disk 1 における単位葉重あたり光合成量 (in g DM g DM day<sup>-1</sup>)、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<sup>-1</sup>)、次の式で定義した。ここで  $r_1$  と  $r_2$  は、それぞれ葉と細根の維持呼吸速度であり (g g<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)、式 24 から PFT 毎に算出される。

$$\text{cost} = (r_1 + \text{RG}_f \times \text{TO}_f / 365) + (r_2 + \text{RG}_r \times \text{TO}_r / 365) / \text{FRratio}$$

この  $\text{stat}_{\text{leaf}}$  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、 $\text{crown}_{\text{depth}}$  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。

### 2.3.2.7 死亡

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、Backgroundmortality、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 に関して、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)、 $lamean$  は過去一年間における平均日展葉面積 ( $m^2$ )、そして  $M_1$  ( $\leq 1.0$ ) と  $M_2$  ( $\geq 1.0$ ) は、各木本 PFT に与えられているパラメーターである。

$$\frac{M_1}{M_2^{\frac{anpp}{lamean}}}$$

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。

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

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: TCmin) 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。

また死亡要因は上記に加えて、火災による攪乱パラメーターも用意している。

### 2.3.3 モデルの検証

Fig.2-6 から Fig.2-9 に、実際の観測結果や傾向と、シミュレーション結果との比較検証を地球環境フロンティア研究センターの佐藤永氏によって行われた結果を掲載する。

Fig.2-6 には、シミュレーションのパラメーターを調整した結果が掲載されている。これは寒帯性針葉常緑樹林の成長速度と木本密度を実測と比較したもので、その傾向はほぼ一致している。

次に Fig.2-7 には葉面積指数の時系列変化を示したものを表す。これは火災後200年間の軌跡を表しているが、火災後すぐに草本層が発達し、それが徐々に木本の葉群に置き換わっている様子がわかる。そしてその置き換わりの速度は、温暖な気候区ほど速やかであった。これは実際の傾向と一致している。

Fig.2-8 は炭素蓄積量の変化を火災後200年間の軌跡で表している。平衡状態にて、生物量が 熱帯>温帯>寒帯 となり、土壤炭素量が 寒帯>温帯>熱帯 となる。バイオマスの蓄積は、温暖な気候区ほど速やかであったことがわかる。これも実際の傾向と一致している。炭素フラックスの変化を表したものが Fig.2-9 であり、それぞれの値のレンジは、各気候区における観測値の分布範囲に収まった。

これらの検証により、SEIB-DGVM は、樹木を個体ベースで空間構造を明示的に扱え、かつその生理過程、森林動態過程も実際の傾向に沿ったシミュレーションができていることがわかる。

ただしこのモデルはそもそも地球全体の植生を網羅することを目的に作られた。本研究では閉鎖系に押し込めた森林の議論を行うので、その点は注意したい。閉鎖系、すなわち狭い空間に森林を押し込めたことの、森林の成長、動態へ与える影響は第3章で議論する。

## 参考文献

- [1] 楠田哲也,竹中明夫,その他,(2002),陸上生態系のモデル化,生態系とシミュレーション,62-77,
- [2] Botkin,D. B.,Janak, J.F. and Wallis, J.R. (1972) Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *J.Ecol.*, 60, 849-872
- [3] Pacala,S.W., Canham,C.D. and Saponara,J. (1996) Forest models defined by field measurements: estimation,error analysis and dynamicd. *Ecol.Monogr.*, 66, 1-43
- [4]佐藤永氏作成 SEIB-DGVM ホームページ : <http://sato.jfast1.net/seib/index.html>
- [5] Botta A., N. Viovy, P.Ciais, P.Friedlingstein, and P.Monfray, (2000) A global prognostic scheme of leaf onset using satellite, *Global Change Biology*, 6, 709-725,
- [6] Foley J.A., (1995) An equilibrium model of the terrestrial carbon budget, *Tellus*, 47B,310-319,
- [7] Joos,F., I.C.Prentice, S.Sitch, R.Meyer, G.Hooss, G.Plattener, S.Gerber, and K.Hasselmann, (2001) Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) emission scenarios, *Global Biogeochemical Cycles*, 15,891-907,
- [8] Leuning R., (1995) A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants, *Plant,Cell and Environment*,18,339-355,
- [9] Lloyd J. and J.A.Taylor, (1994) On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*,8,315-323,
- [10] Monteith J.L. and Unsworth M.H., (1990) Steady state heat balance (1)water surfaces and vegetation, In:Principles of environmental physics,pp.177-198,
- [11] 生物環境物理学の基礎 第二版 (2003) G.S.Campbell, J.M.Norman ,森北出版株式会社
- [12] S.Sitch, B.Smith, et al. (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, *Global Change Biology*, 9,161-185
- [13]Daniel B.Botkin,(1993)FOREST DYNAMICS An Ecological Model,Oxford University Press.
- [14]Changhui Peng,(2000)From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modeling vegetation dynamics,*EcologicalModeling* 135,33-54

## 第3章 環境傾度バイオームチャンバー内の空間設計に関する検討

### 3.1 はじめに

環境傾度バイオームチャンバー内には、少なくとも4つの異なる気候帯の植生帯を導入する。だが生きた植生を再現するのに、どのくらいの面積があれば実際の森林の傾向をきちんと再現できるのだろうか。このような閉鎖空間に多様な植物生態系を導入することが、どれほど森林に影響を与えるかという空間設計の問題はいまだ未解決である。

よって本章では、森林シミュレーションを用いて、森林を植える区画の大きさの検討を行った。

### 3.2 区画面積の大きさ

環境傾度バイオームチャンバー内の空間設計は Fig.3-1 のように暫定されている。つまり、植生を導入する区画と、人が通れるような通路とを分けて建設する予定である。植生区画には植生全体の重量、水循環などを把握するため、ライシメーターをつける予定であり、通路は観客を入れることを想定している。

森林区画をどの程度の大きさに設定するかを議論するため、植生が区画の大きさによってどのような制限を受けるのかの検討を行った。

具体的には、植生を導入する区画の大きさを、10m、20m、30m 四方に変えた5ケースで、それぞれ5回ずつ計25回、200年間の森林の変遷を計算した。ここでは生産量が多い熱帯地域の Pasoh を代表にとりあげ、そこでの検討を行った。その結果を Fig.3-2 に示す。

植生動態モジュールでは、樹木の死亡・新規個体加入の際に乱数を引いており、計算させるたびに違う結果が出る。これは現実の植生動態を考えれば当たり前のことである。そこで今回はその影響を加味した上での議論を行うべく、各計算5回ずつ繰り返し傾向を見た。

### 3.3 考察

結果を比較してみると、区画が大きいほどバラツキが小さくなることがわかる。これは区画があまりに小さいと一本の樹木が倒れる際のイベント的な影響が大きく出てしまうことを反映している。この結果から、安定した環境でバイオーム実験を行うためには、区画の大きさは少なくとも一辺 20m 以上必要であることが明らかになった。

よってこの結果より、森林を閉鎖系に導入する場合は、20m 以上の区画を用意する必要があることがわかった。環境傾度バイオームでは、端から端まで気温では 40°C 近くの傾度をつける計画である。そこに 4 つの気候帯を導入するとすると、幅は約 200m を想定しているチャンパーでは、ひとつの気候帯にあてられる区画の長さは、単純計算で 50 m となる。

また一方、200m の幅のチャンパー内で、仮に 40°C の温度傾度を連続的につけるということは、約 5m の幅の中で 1°C もの傾度がつく計算になり、極端に言えば、一本の樹木の樹冠の端と端で温度差が 1°C 以上もついてしまうことになりかねない。しかし、現実の植生帯ではそのような現象が起こることは考えにくく、またそれ以上に、そのような現象をモデル化することは現段階では不可能である。

従って、以上のことをふまえ、本研究での仮想環境傾度バイオームモデルの空間設計では、ひとつの気候帯に 4 つ（横二つ、奥行き二つ、Fig.4-17 参考）の区画を用意し、それぞれの区画内は一定の気候状態が保たれ、隣り合う区画が異なる気候を再現することで環境傾度をつける、ということを暫定する。

## 第4章 環境傾度バイオームチャンバー内の導入植生に関する検討

### 4.1 はじめに

環境傾度バイオームには、熱帯から寒帯までの気候帯と、そこに特有な植生を導入する予定であるが、具体的にどのような植物生態系を導入するかの議論は、いまだ行われていない。一言にある気候帯の植生と言っても、その地域や微気候の差によって、その森林の構造はおろか、遷移過程や成長過程、生理過程も全く違う。そこで本章では、環境傾度バイオームに導入する植生の選定案とその詳細について述べる。

まずは、陸上植物生態系の一般的な特徴とその判別法についておさえ、その後本研究でピックアップした20地点の気象、植生再現地点の詳細について議論する。またそれらの情報をもとに、どのような地域のどのような植生を、どういった配置で導入すると、どのような一連の植生帯が再現できるかを検討する。

### 4.2 世界の植生と東アジアの植生

ここでは、陸上生態系の一般的な特性と世界の植生分布の概略を紹介する。また、気候帯の判別法、植生帯の分類法もここで整理しておく。

#### 4.2.1 陸上生態系の特性<sup>[1]</sup>

##### 植物空間と群落構造 —概論—

大型化した陸上植物の群落は、自由大気と地表との間の接地気層を群落空間のなかにつつみこむ。この植物空間は、表面を葉層によっておおわれ、太陽放射からなかば遮断されているので、裸地上の接地気層にくらべていちじるしく緩衝された微気候をもっている。光は下方ほどしだいに弱くなるが、CO<sub>2</sub>濃度は逆に地表に向かって急増する。裸地上の同じ高さくらべると、最高気温は低まり、最低気温は高くなり、平均気温はやや低下する傾向がある。湿度は平均して高くなり、風力が小さいのも大きな特徴である。

群落の高さが大きくなると、最上層の葉群をかたちづくる植物の下に、この微気象条件に適応した陰地性植物がすみついて、上下の成層構造ができる。最上層の木が、平均

30～60mもある熱帯多雨林では、高木層そのものが巨木高木層・大高木層・小高木層の三つに分化しており、さらにその下に低木層・草本層があって、全体として5層という複雑な構造をもつ。これを頂点に、たいていの密生した陸上植物群落は、地表のコケ層までを含めると、複雑構造を示す。

多種多様な形の植物体がつくる複雑な構造と特有の微気象条件とが結びつくと、群落空間のなかにはじつにさまざまな動物のすみかができる。光を直接に必要としない動物にとって、保護された群落空間はすみかとして貴重である。陸上の動物で、少なくとも生活環の一部分を群落空間のなかですごさない種はまれであろう。

植物が動物に対して食物を供給するばかりでなく、すみかとしても不可欠なのは、陸上生態系の特性といってよい。陸上生態系の類別が結局は植生の類別に一致してしまうのは、そのためである。

## 4. 2. 2 大生態系の分布

### 4. 2. 2. 1 群系レベルでの植生型の分類

動・植・微生物すべての構成生物を考慮に入れ、システムとしての構造を基本にした生態系の分類は、まだほとんど試みられたことがない。とくに陸上生態系では、植物群落の特性がきわめて強く生態系の性格を規定するので、事実上、植物群落（植生）の分類がそのまま生態系の類別に利用されている。

植物分類にはいろいろなスケールがあり、とくに大陸ヨーロッパ系の植物群落学では種類組成に基づいてきわめて細かく群落を類別する。しかし、生態系についてのわれわれの知識の現状では、そのような群落型の細別に対応させてシステムの性質を論じることは、できそうもない。いまのところ、陸上生態系の比較にもっとも適当な植生の単位は、いわゆる群系（formation）のレベルでの類別であろう<sup>[1]</sup>。

群系というのは、優先する植物の生活系によって類別した植生の単位である。相観（physiognomy）にもとづく分類としかけてもよい。古くからいいならわされている常緑針葉樹林・落葉広葉樹林・高茎イネ科草原・マングローブ高木林などといった単位が、群系に相当する。

しかし、現実の世界の植生を分類するとなると、生活系をどの程度に細分するかの問題がからんで、すべての人が同意できるような群系分類の体系をつくることは容易でない。そのような試みの一例として、Table4-1 に、国際自然保護連合（IUCN）の生態学部会が提案し、目下各方面で検討中の分類試案をかかげる。

この表で、4連番号のついているのが個々の群系で、3連番号で表されているのは群系群 (formation group) とよばれるカテゴリーである。この群系分類はかなりの細分体系で、高木林 (forest)・高木疎開林 (woodland)・低木林 (scrub)・矮小低木群落 (dwarf scrub)・草本群落などの区分と、常緑・落葉、タケ・ヤシ・シダ、イネ科草本・広葉草本などの区分とをかなり機械的に組み合わせているので、実際に見られる群落面積の大小に関係なく、多数の群系のタイプが同列にならんでいる点や、分類の基準が生活系一本でなく、立地による分類が混じっている点に問題がある<sup>[1]</sup>。

しかしこの案は、実用的にはかなり便利な案である。少なくとも世界にどのような違った相観をもった植生が実在するかを知るためには、十分役立つ。以下の陸上生態系の比較には、なるべくこの分類にしたがった群系の区分を使うことにする。

また植物群系を生態系区分として使うときには、一般用語としての“生態系”と区別するために、かりに大生態系 (major ecosystems) という用語を用いることにする。

#### 4.2.2.2 大生態系での分布

##### A. 温帯・亜寒帯生態系の乾湿度系列

気候の乾湿の程度に応じて、森林・イネ科草原・砂漠の三大区分がみられることは常識となっているが、これは熱帯・亜熱帯には必ずしもあてはまらない。Fig.4-8 は、温帯・亜寒帯での主な植物の生活系の乾湿度の勾配に沿った分布と、それにもとづく群系の区分とを、模式的に描いたものである。

連続した葉層をもつ森林 (密集林、forest) と、高木 (tree) を欠きイネ科草本 (grass) の密生する典型的なステップ (steppe) との間には、ふたつの生活系が混在する推移帯がある。そこでは、草本層を下生えにもつ疎林 (woodland) とイネ科を主体とする草原とが入り混じっており、forest steppe、parkland、savanna などいろいろな名でよばれる景観がひろがる。ここでは Table4-1 の区分にしたがって、ウッドランド帯とよぶ。(注：woodland を疎林にあてるのは米語の習慣で、イギリスでは forest とほぼ同じ意味に使うことがある)

##### B. 熱帯・亜熱帯生態系の乾湿度系列

湿潤な気候をもつ森林地帯のなかでも、乾湿度の勾配は存在するから、森林もまたいくつかの乾湿度に応じた群系に分化する。

温帯・亜寒帯にもその例は多く、たとえばヨーロッパの冷温帯では、より湿潤な西ヨーロッパにはブナ林が、乾燥した東ヨーロッパにはナラ林が分布する。また東アジアの暖温帯では、湿潤な南西日本や揚子江下流では常緑の照葉樹林がみられるのに対して、より乾燥した韓国や揚子江中流の自然植生は、落葉樹の優勢な森林であったと考えられている。しかし温帯では、大陸内部の乾燥度の高い地方では同時に冬が寒くなるので、



両者の影響を区別しにくい。

たとえば、韓国の暖温帯落葉樹林の落葉性は、乾燥落葉性 (drought-deciduous) というよりは寒冷落葉性 (cold-deciduous) だから、照葉樹林との関係を乾湿度の勾配に対応させてよいかどうか問題がある。

ところが、年中暖かい熱帯・亜熱帯の森林では、気候が乾くにつれて明瞭な乾燥落葉性の高木が増えるので、はっきりとした乾湿度成帯構造があらわれる。

熱帯の場合には、より乾燥した気候に向かって一般に

- a) 熱帯多雨林 (tropical rain forest)
- b) 熱帯季節林 (tropical seasonal forest)
- c) 熱帯落葉～半落葉林 (tropical deciduous/semi-deciduous forest)

の3帯が区別される。a)は、樹高30～40mを超える巨大高木層をもつ複雑な多層林で、その上層木にはごく短期間落葉するものもかなりあるが、落葉に季節的な同調はなく、森林そのものはつねに常緑である。しかしb)→c)とすすむにつれて、1年のうちの乾燥季が長く、よりきびしくなるとともに、上層木に同時落葉する個体がふえ、c)は上層木に関するかぎり、ほぼ完全な乾燥落葉林となる。これに平行して、巨大高木層の高さと密度が低くなり、c)では完全に消失してしまう。

Fig.4-9に、温帯の場合 (Fig.4-8) と対応した形で、熱帯・亜熱帯群系の乾湿度系列の模式図を示す。

熱帯・亜熱帯の乾湿度植生帯の大きな特徴のひとつは、温帯のステップに相当するゾーンが、必ずしもイネ科植物でなく、多くの場合、多種多様な低木群落 (scrub) で占められていることである。低木には、落葉性で枝にとげをそなえたものが多いので、とげ低木林 (thorn scrub) とよぶ。中・南米ではサボテン類 (Cactaceae)、南アフリカではそのほかの多肉植物が、とげ低木に混じって重要な生活形要素となっている。とげをもつ種類が多いことは、家畜ないし野生動物によるグレイジングの影響を思わせるが、Walter (1964, 1973) などは、とげ低木林は人間による過放牧の産物で、本来の植生は低木を交えたサバナ草原 (shrub savanna) だったろうと考えている<sup>[1]</sup>。

木本植物の優勢は半砂漠帯の植生にもあてはまるが、乾燥度が高まるにつれてとくに小形の矮小低木 (dwarf shrub、高さ50cm以下) がふえる (これは多肉植物にもあてはまる) 傾向がある。

### C. 北半球の森林生態系の温度系列

北氷洋沿岸の森林のないツンドラ帯 (tundra) から南に向かって、亜寒帯針葉樹林 (subpolar or boreal needle-leaved forest)、冷温帯落葉広葉樹林 (cool-temperate deciduous broad-leaved forest) とつづく群系の配列は、北半球の大部分に共通である。

ただし、北方針葉樹林帯とツンドラとの間には、ウッドランド上の針葉樹やカンバ (*Betula*) の林とツンドラ植生との入り混じった広い推移帯があつて、ソビエトでは森林ツンドラ (forest tundra) とよばれる。同様に冷温帯落葉樹林帯との間にも、針・広混合林の推移帯があり、渡島半島をのぞく北海道の平地の大部分、モスコウ付近のヨーロッパ・ロシア中部平原、ミシガン以東のアメリカ・カナダ国境地帯などに大きな面積を占める。

暖温帯では、海洋性気候で冬に雨季のある大陸西岸と、夏雨でずっと大陸的な気候をもつ大陸東岸とで、ちがった森林群系がみられることはよく知られている。西岸の暖温帯林はいわゆる硬葉樹林 (broad-sclerophyll forest) で、地中海沿岸でもカリフォルニアの山地部でも、夏の乾燥に耐える小型の常緑樹をもつ、硬葉カシ類 (*Quercus* 属のうちコナラ亜属 (*Quercus*) に属するが常緑性のもの) を主とする硬葉樹からなる。これに対して、南西日本・韓国の南端部沿岸・揚子江下流域などの東アジア沿岸部の暖温帯常緑樹林の構成種は、硬葉樹林のそれよりはるかに多様で、照葉カシ類 (アカガシ亜属 (*Cyclobalanopsis*) に分類される常緑の *Quercus*)、シイ (*Castanopsis* または *Shiia*)、マテバシイ (*Lithocarpus*)、クス (*Cinnamomum*)、タブ (*Machilus*)、モチノキ (*Ilex*) など多数を含む。葉は硬葉樹の葉より平均して大きく光沢があり、冬の寒さに適応した形態をもつ。

前にも述べたように、亜熱帯はおおむね乾燥帯で、とくに大陸の西岸では、暖温帯の硬葉樹林と赤道付近の熱帯多雨林との間に、砂漠を含む大乾燥気候帯がはさまって、湿润気候のもとでの森林群系の温度系列は中断されている。しかし、大陸東岸とくにアジア東岸の沿海地方では、この系列がとぎれることなく続いている。東アジアでのもっとも完全な系列は、ツンドラ (寒帯)・亜寒帯針葉樹林・冷温帯落葉広葉樹林・暖温帯照葉樹林・亜熱帯多雨林・熱帯多雨林の6つの群系からなり、これが北半球の温度植生帯の基本構造と考えられる。

#### 4. 2. 3 分布を制約する気候条件

以上に述べたような大生態系の分布をきめる第一義的な要因は、明らかに気候、とくに温度と乾湿度の地理的勾配である。各生態系のもつ特性を相互に比較するための座標軸を設定する目的で、その分布と気候要因との相関関係を概観しておく。

##### 4. 2. 3. 1 乾湿度要因

気候の乾湿度、とくに植生の分布を支配する乾湿度が、たんなる雨量の大小では表現

できないものであって、雨量と蒸発量とのバランスできまることは、古くから気づかれていた。その内容を、植物にとってほとんど唯一の水の給源である土壌水の収支としてとらえ、いくつかの仮定にもとづいて、気象観測値から収支計算ができることを示したのは、Thorntwaite(1948)の功績であった。

彼は、密生した植物群落からの蒸散量プラス地面蒸発量を蒸発散量と名づけ、最適土壌水含量を維持した状態での蒸発散量の最大値－最大蒸発散量（potential evapotranspiration, PE）－は、同じ土地では、植物の種類に関係なくほぼ一定であることを、経験的に見出した。だが Thorntwaite (1948) の土壌水分収支モデルは、原理的には正しく、わかりやすいが、そのままでは現実の気候の乾湿度の合理的な表現にはつながらなかった。

一方、降水量と蒸発量のバランスから経験的にはあるが、乾湿度の適切な量的表現を得ようとする試みは、ずっと以前から多数の学者によって続けられてきた。もっとも古いのは、おそらく自然地理学者 Penck (1910) の業績で、年降水量 ( $P$  mm) と年蒸発量 ( $E$  mm) との比  $P/E$  で乾湿度を定義し、 $P/E = 1.25$  をもって乾燥気候と湿潤気候の境界（乾燥限界）とした。また第一近似的には蒸発量は気温の関数とみなしうるから、観測点数の少ない  $E$  の代わりに、年平均気温 ( $T$  °C) を使う着想が生まれた。よく知られた土壌学者 Lang (1920) の雨量因子 (Regenfaktor)  $P/T$  がそれである。Lang は、その値によって、気候的な大土壌群の分布を説明した。

$P/T$  型指数の欠点は、夏雨気候と冬雨気候とで表現力がちがうことである。低温の冬に雨が降ると、高温季に降るとでは、同量の雨でも効率がちがうからである。

その欠点を補ったのが、有名な Köppen の気候区分である。降水量の季節配分の違いに応じて、降水効率式を変える。

一年中多雨の場合	$K = P/2(T + 7)$	
夏多雨の場合	$K = P/2(T + 14)$	(1)
冬多雨の場合	$K = P/2T$	

ただしここで、

夏多雨型	冬 (12・1・2月) の最少月降水量 ×	10 <	夏の最少月降水量
冬多雨型	夏 (6・7・8月) の最少月降水量 ×	3 <	冬の最少月降水量

と定義する。

この示数値 K の読みは以下のようなになる。(さらに細かい区分は 4.2.3.2 で述べる)

5 以下のとき	砂漠気候 (BW)
5~10 のとき	ステップ気候 (BS)
10 以上	森林 (ウッドランド含む) 気候

この手法以外にも、乾湿度の示数は、多くの人々によって提案され、違った目的、違った地域に対して、大同小異のさまざまなものが使われてきた。だが、他のものに比べ、適用性が広いため<sup>[1]</sup>、本研究ではこの示数を乾湿度を判断する指標として用いる。

#### 4.2.3.2 温度要因

植物群系の地理分布と温度気候との相関関係についても、古くからきわめて多くの研究が行われてきた。それらを統合してみると、植物の分布に対する温度の作用には、3つの重要な面があるように思われる。すなわち、

- a) ある植物の種が、年間を通じて正常な栄養および生殖生長を完成するためには、種に固有なある限界値 (閾値) 以上の温度の一定量の持続 (積分値) と必要とする。
- b) 植物がただちに枯死するほどの低い温度でなくても、この閾値以下の温度の持続がある限度を超えると、その種の分布は制限される。
- c) 一般に温度が高まると、光合成による同化量は最適温度までは増加するが、それ以上の温度ではしだいに低下する。しかし、呼吸作用が最高に達するのは、光合成の最適温度よりずっと高いので、高温のため増加した呼吸量が低下しつつある同化量を上回る限界温度—高温補償点—が必ず存在する。したがって、その種の高温補償点をこえるような気温が相当期間つづくとき、やはり分布は制限される。

川喜多二郎が発案した温量指数 (または暖かさの示数、warm index、吉良、1945) は、これまでおおむね日平均気温の積算値であった積算温度を、思い切って月平均気温の積算値として簡略化した点に意義がある。暖かさの示数 (WI) は、

$$WI = \sum^n (t - 5) \quad (2)$$

$t$ : 月平均気温 [°C]     $n$ :  $t > 5^\circ\text{C}$  である月の数

であたえられ、純経験的に 5°C を閾値と定めている。

月採算方法を採用しても、群系程度の大きさの植生型の大地域での分布との相観を調べる範囲内では、日積算温度にくらべて遜色はなく、暖かさの示数が、日本を含む世界の広い地域の植生分布によく一致した分布をもつことは、吉良 (1945,1949)、今西・吉良 (1953) など述べてられている。その一例として、USA 東部の植生型の分布と暖かさの示数の分布の対応を、Fig.4-10 にあげる。

#### 4. 2. 3. 3 気候条件による大生態分布の座標づけ

温度と乾湿度を両軸にとった座標上に、世界の大生態系を位置づける試みを、吉良 (1976) [1]で行われており、そこで提案されたシステムを本研究でも採用する。

温度軸の測度としては、植物や動物の生活活動に対する温度の作用のポジティブな面に重点をおいて暖かさの示数 (WI) を採用する。WI を用いた気候・植生帯の区分法は以下のようなになる。

WI = 0	極氷雪帯	Polar frost zone
WI : 0~15	寒帯	Polar (tundra) zone
WI : 15~45	亜寒帯	Subpolar zone
WI : 45~85	冷温帯	Cool temperate zone
WI : 85~180	暖温帯	Warm temperate zone
WI : 180~240	亜熱帯	Subtropical zone
WI > 240	熱帯	Tropical zone

ただし、各帯の呼び方については、国際的にかなり混乱があるので注意を要する。

乾湿度気候帯の区分は、乾湿度をあらわす気候示数に完全なものはないが、一番適用範囲が広いと考えられている K 値 ((1) 式、P.9) を採用する。詳細は以下に示す。

K < 5	強乾燥帯	Perarid zone
K : 5~10	乾燥帯	Arid zone
K : 10~18	半乾燥帯	Semiarid zone
K > 18	湿潤帯	Humid zone
K > 28	過湿潤帯	Perhumid zone

以上のような両軸の区分の組み合わせと、大生態系との対応関係を、Fig.4-11 に示す。図の太い線の外側にある部分は、水平分布ではほとんど存在しない組み合わせを示す。

ただしチベットの高地やアンデス高山帯のブナには、低温と強い乾燥との共存する特殊な生態系がある。

## 4.3 本研究でとりあげる主な地域

以上で整理してきた示標をもとに、環境傾度バイオームに導入する植生を選び、その詳細について以下で議論する。

### 4.3.1 計算地点の基礎情報

この節では、これまで述べてきた気候と植生の区分法を用いて、本研究で取り上げたバイオーム植生候補地の詳細を述べる。

まずここで、世界の植生区分を群系によって区別した図を Fig.4-12 に示す。また、植生帯の構成を垂直分布で表したものを Fig.4-13 に、分布面積と緯度、経度で表したものを Fig.4-14 に示す。

#### 4.3.1.1 計算地点の入力気象、土地情報

Fig.4-12～Fig.4-14 を参考に、各気候帯の情報が網羅できるような場所を計 20 地点ピックアップした。その位置を地図上で示したものを、Fig.4-15 と Fig.4-16 にかかげる。

ただし、環境傾度バイオームの建設予定地は東京大学柏キャンパスであるため、建設の際の物理的な利便性を考え、植生再現地点は日本列島から、より多く選び出している。

森林シミュレーションには土地データと気象データを入力するが、具体的に必要なデータの詳細は以下のようにになっている。

#### 土地データ

- 土壌のアルベド
- 平均高度 (m)
- 覆面 (海なら 0、陸地なら 1)
- 土壌の圃場容水量 (field capacity)
- 土壌の最大保水量 (saturation point)
- 土壌の基質吸引力 (matrix potential)
- 土壌の萎れ点 (wilting point)

上の表に示すような土地データは、Global Soil Wetness Project 2 (<http://grads.iges.org/gswp/>) の入力用データをダウンロードして、整形した。元のデータは全地球 1 度グリッドメッシュのデータが、北緯 90 度西経 180 度を起点に東方向に順に並べられ、東経 180 度に達したら次は北緯 89 度西経 180 度よりデータが始まる。つまり、あらかじめ  $(90 \text{ (北緯)} + 90 \text{ (南緯)}) \times (180 \text{ (西経)} + 180 \text{ (東経)}) = 6480000$  グリッド分のデータを用意しておき、計算を行う地点のポイントデータを随時読み取っている。

#### 気象データ

- ・ 日平均気温 [Celsius]
- ・ 地下 10cm における日平均地温 [Celsius]
- ・ 降雨量 [mm/day]
- ・ 湿度 [kg/kg]
- ・ 雲量 [fraction]
- ・ 風速 [m/s]

気象データはこれらの情報を 1 地点ごとに日平均、単精度データで入力する。データ元は、NCEP/NCAR 再解析プロジェクトの 1990～1999 年の daily データを平均し、1 年分の daily データとしたものを用いた。

引用文献： 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., and Fiorino M. (2001) The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(2), 247-267.

製造元 : <http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/>

入手元 : <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>

ただし、土地データは経度 1 度、緯度 1 度メッシュのデータであり、気象データはおよそ 200km のメッシュで計算された結果である。よって、その大きな範囲での平均値としての扱いであり、これ以降で計算地点につけた地名はあくまでそこを代表する地点として名付けているにすぎない。

それは、環境傾度バイオームチャンバーに実際に各気候帯の気象、植生を再現実験する際に、汎用性の高い結果を得るために、ある特定の地域に限ったデータではなく、各気候帯の代表地の平均的な環境を再現することを想定して行った。

本研究でピックアップした 20 地点の日平均気温と日平均降水量をそれぞれプロットしたものを、Fig.4-1 に示す。さらに、それらのデータを整理し、各地点の緯度、経度、年平均気温などの基本データをまとめたものを Table4-2 に示す。ここで便宜上区別しやすくするため、順に forest ID を名づけた。

また、これらの地点において、前節で述べた温量示数（式（2））と、乾湿度示数 K 値（式（1））を計算し、4.2.3.3 であげた区分法に基づいて判別した各地点の気候区分、植生分布を示したものを Table4-3 にのせる。ただし、ID=19 の Siberia larch area 1 では、式（1）での計算値がマイナスになってしまうため、この手法での気候区分は特定しないでおく。

#### 4. 3. 2 計算結果 —各計算地点における森林の変遷—

以上計 20 地点における森林の変遷を以下の条件で計算した。

計算区画面積	25m × 25m = 625m <sup>2</sup>
定着シナリオ	3
計算年数	200 年
入力気象情報	Fig.4-1 のデータを毎年

その結果をまずは、以下の三つの観点から解析する。

- A. 森林の年純生産量 [tC/ha/year]
- B. バイオマス蓄積量 [tC/ha]と区画内の本数 [/625m<sup>2</sup>]
- C. 区画内の PFT 組成率 [%/625m<sup>2</sup>]

ただし、それぞれの結果の forest ID は Table4-2 のものを用い、結果はその順番で並べる。

#### A.森林の年純生産量 & B.バイオマス蓄積量[tC/ha]と区画内の本数[/625m<sup>2</sup>] について

上に述べたようなシミュレーションを行った森林の年純生産量を、時系列にプロットさせた計算結果を Fig.4-2 に示す。これは横軸が年数、縦軸が年総生産量（GPP）と年純生産量（NPP）（どちらも単位は[tC/ha]）を示し、それを各森林区画ごとに forest ID の順で並べた。



それぞれの計算結果が妥当なものであるかを検証する材料として、フィールドでの観測値や一般に用いられている推測法による文献値をいくつか紹介する。

森林の平均純生産量は、冷温帯の落葉広葉樹林の年間純生産量が最も低く、約 4.3 tC/ha、ついで亜寒帯の常緑針葉樹林が約 6.7tC/ha、暖温帯の常緑硬葉樹林やスギ林が約 8.9 tC/ha くらいで最も多いといわれている<sup>[3]</sup> (ただし、文献には乾物量で掲載されていたものを、本研究で用いた炭素換算率  $C = 0.475$  で換算した値をここで紹介した)。

**Table4-4** に日本の森林タイプごとの純生産量を、**Table4-5** に西太平洋地域の主要な森林の年純生産量を示す。また、いままで測られた純生産量の最大値で見ると、熱帯多雨林で 14.3 tC/ha、落葉広葉樹林が 9.5 tC/ha と低い、そのほかの森林タイプではおおよそ 14.3 tC/ha くらいで著しい差は認められない (Kira&Shidei 1967) (同じく炭素換算率に直したデータを載せた)。

さらに他の測定例として<sup>[2]</sup>、**Table4-6** に植物群落の総生産量および純生産量を示す。ただし、ここでの総生産とは、純生産に暗呼吸量を加えたもので、測定の際に光呼吸は考慮していない。光呼吸の速度はその性質上、光合成速度に比例的だと思われるので、それを除外して考えても、以下の結論の定性的な大筋には影響はないだろう<sup>[4]</sup>。また、群落の呼吸量の測定は、技術的な困難が大きいため、信頼度の高い値はなかなか得られないし、また違った方法による測定値の比較にも問題があるが、**Table4-6** には、測定法の比較的無難なものだけが集められている。

また一方、水の供給不足が一次生産に対してあまり制限的に働かないような、湿潤な気候のもとでのおもな植生型はもちろん森林であるが、そのような条件下での気温と一次生産との関係を調べるには、日本の森林で得られたデータが役に立つ。**Table4-7** は、日本で調べられた 316 林分の地上部純生産量のデータを、5 つのグループに分けて平均値を求め、北半球のほかの地域での測定値と比べたものである。地下部の生産量は直接測定されていない場合が多いので、信頼度の高い地上部の数値だけを扱った。

日本の森林では、冷温帯の落葉広葉樹林の生産力が低く、温帯の針葉樹林はもちろん、より寒冷な気候下にある亜寒帯針葉樹林よりもかえって平均値が小さい。外国のデータではこの傾向が明らかでないが、同じ土地にある落葉樹林と常緑針葉樹林を比べると、常に後者の方が生産力が高いことは、広く認められている事実である<sup>[1]</sup>。これは落葉樹の着葉期間が短く、常緑樹のように生育期間をフルに利用できないからだと考えられる。この点をのぞけば、温度の高い地方の森林ほど純生産力が高くなる傾向は明らかである。ただし、同一林型内でのバラツキが非常に大きいので、森林型相互間の生産力の平均値

の差は、統計的には有意でない場合が多い。

これまではフィールドでの観測値をいくつか紹介したが、次に経験や実測に基づいた生産量の推定法について紹介する。

Lieth(1972)は、世界を多数のメッシュに区分して、各区画のなかの平均気温と平均雨量を求め、年純生産速度と年平均気温の関係式、年雨量との関係式の両式から純生産量を計算し、二つの計算地のうち低い方をその区画の生産量とみなして、電算機によって世界の生産力分布図を描いている。

また別の手法として、植生図をベースにして陸地上をいくつかの大生態系群に区分して、それぞれの面積を求め、それに各区画ごとの平均生産力をかけて、総量を計算する方法がある。この方法で得られた最も新しい<sup>11)</sup>結果を Table4-8 に示す。この方法では、各生態系群の平均生産力をいくらかと見積もるかという問題のほかに、生態系群の区分のしかた（とくに南半球で）や各群の面積の見積もり方によって、結果が著しく変わる可能性がある。

またこの推定に使われている各森林型の平均純生産速度を Table4-6、Table4-7 の値と比較してみると、一般にかなり低い。しかし、表にあらわれている面積の中には、人間による植生破壊の著しい部分も当然含まれているし、また生産力研究の場所として選ばれる群落は、同じタイプの植生の中では発達のよいものが選ばれる傾向が強いであろう。したがって、この表の推定値が一概に過小評価だとは言いきれない<sup>11)</sup>。余談になるが、この表に従えば、全地球の純一次生産量のうち、およそ 2/3 を陸上植生が担っており、さらにその 2/3 が森林によって生産されていることになる。農耕地を作り出すことによって直接人間が支配しているのは、陸上の一次生産量のおよそ 8.5%である。

これらのいくつかの文献値をあげてみると、生産量を観測で見積もったり、経験則に基づき推測する方法はいくつもある。また、同じ地域（同じ大生態系）での結果であってもその観測した状況、場所、研究者によって値はバラつきが見られる。

よって本研究では、シミュレーションの計算結果と観測値との比較を、これらの全てのデータを随時用以て行い、場合によってはその定性的な傾向を検証することにする。

### C.区画内のPFT組成率 [%/625m<sup>2</sup>] について

各地点のバイオマスは、草本バイオマスと木本バイオマスで構成されている。さらに、木本バイオマスは各PFT (Table2-3) の本数、成長量に比例する。よって、Fig.4-3 で示したバイオマス蓄積量が、どのような種によって保持されているのか? という疑問に答えるため、PFT 組成率に着目して計算結果を整理した。

各計算区画内での構成種の推移を見るため、Fig.4-4 に各PFTの本数を各年数の区画内総本数で割った割合 (PFT Compositon) を表示する。これは横軸が年数を表し縦軸が

[ 各木本PFTの各年における本数 (総8種) / 各年の総本数 ]

を%表示で表している。この解析から、各地域の森林の優占種と、優占するまでにかかる年数などがわかる。(ただし本研究では、優占種を区画内の総本数のうち約70%以上を占める単一種、もしくは明らかに同じ割合で構成されている2つ、もしくは3つの種のことを指す。)

これらの結果を見ると、PhnomPenh (ID=1)、Pasoh(ID=2)、Serimbu(ID=4)の優占種は熱帯性広葉常緑樹 (PFT=1) であることがわかる。また、その優占するまでの期間も森林の誕生から約30~40年と、他の地域に比べて早いことがわかる。これは、熱帯の植物が他よりも成長がはやいこと、高木をたくさん有することが反映されたのではないかと思われる。

また、HongKong (ID=3)、Toyama (ID=7)、Ohsaka (ID=8)、Kashiwa (ID=9)、Ogawa (ID=12)、Osage (ID=20) の優占種は温帯性針葉常緑樹 (PFT=3) であることがわかる。ただし、それぞれが優占するまでにかかると思われる期間は地域によって大きな差がある。HongKong (ID=3) では約100年を越えたあたりから、温帯性針葉常緑樹が優占するようになるが、その後170年あたりから温帯性広葉常緑樹 (PFT=4) が勢力を増してきている。同様に、Ohsaka (ID=8) やKashiwa (ID=9) でも温帯性針葉常緑樹以外に、温帯性広葉常緑樹 (PFT=4) や温帯性広葉夏緑樹 (PFT=5) も増してきており、200年間では単一の優占種を限定することができないことが示唆された。

他の地域でも同様に、Tomakomai (ID=5)、Yamagata(ID=6)、HBEF (ID=10)、CentralPlain (ID=13) の優占種は温帯性広葉夏緑樹 (PFT=5) と見られ、Sakhalin (ID=15)、Wakkanai(ID=16)、Rossia Evergreen Forest Area(ID=17)、FairBanks (ID=18) の優占種は寒帯性針葉常緑樹 (PFT=6)、Siberia larch area 2 (ID=14)、Siberia larch area 1 (ID=19) の優占種は寒帯性針葉夏緑樹 (PFT=7) と見られるが、Wakkanai(ID=16)では温帯性広葉夏緑樹 (PFT=5) の存在も大きくなりつつあり、確固たる優占種を判断することは難しい。

だが、熱帯以外、優占種を正確に把握できない地域以外では、たいてい約 50～60 年程度でそこでの第一次優占種が決まるということが示唆された。

#### 4.3.3 20 地点における計算結果の検証と考察

以上のように整理した 3 パターンの計算結果と、文献値との比較、検証を行う。

##### PhnomPenh (forest ID=1)について

PhnomPenh に代表される (forest ID=1) の地域は、その気象情報、位置情報と Fig.4-12、Fig.4-15 で示される植生分布とを照らし合わせ推測するところ、熱帯過湿潤性の気候にあり、Fig.4-11 によるとその優占種はおもに熱帯多雨林である。

Fig.4-4-①に示した PhnomPenh のデータを見ると、森林誕生から約 50～60 年あたりから明らかに PFT=1 の熱帯性広葉常緑樹が優占していることがわかり、これはその地域の気象条件をきちんと反映している結果だと見て取れる。

Table4-6 に示した観測値は、熱帯多雨林の成熟林での GPP は約 36.9[tC/ha/year]、NPP は約 12.9[tC/ha/year]となっている。Fig.4-2-①に示した PhnomPenh でのシミュレーション結果をみると、GPP が約 27[tC/ha/year]前後、NPP が約 10[tC/ha/year]前後に落ち着いていることがわかる。これは、Table4-6 の測定結果とほぼ一致し、PhnomPenh 地域の気象と、そこに特有の森林の NPP、GPP が妥当な値で再現されていることがわかる。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、熱帯多雨林での現存量は約 210.9[tC/ha]である。Fig.4-3-①の PhnomPenh でのシミュレーション結果を見ると、樹木の本数とともにバイオマス蓄積量も多少の変動はあるものの、森林誕生から 150 年あたりから飽和傾向にあり、その蓄積量は約 300[tC/ha]であることが見てとれる。多少シミュレーション結果の方が多く見積もっているものの、森林のバイオマス量も妥当な範囲でシミュレーションできているといえる。

##### Pasoh (forest ID=2)について

Pasoh に代表される (forest ID=2) の地域は、熱帯過湿潤性の気候にあり、その優占種はおもに熱帯多雨林である。

Fig.4-4-①に示した Pasoh のデータを見ると、森林誕生から約 50~60 年あたりから PhnomPenh と同様、PFT=1 の熱帯性広葉常緑樹が優占している。

Table4-6 に示した観測値は、熱帯多雨林の成熟林での GPP は約 36.9[tC/ha/year]、NPP は約 12.9[tC/ha/year]となっている。Fig.4-2-①に示した Pasoh でのシミュレーション結果を見ると GPP が約 30[tC/ha/year]前後、NPP が約 10[tC/ha/year]前後に落ち着いていることがわかる。これは、Table4-6 の測定結果とほぼ一致し、PhnomPenh 地域の気象と、そこに特有の森林の NPP、GPP が妥当な値で再現されていることがわかる。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値は、熱帯多雨林で約 210.9[tC/ha]、Fig.4-3-①の Pasoh のシミュレーション結果は、約 300[tC/ha]前後であることが見てとれる。このことから、森林のバイオマス量も妥当な値でシミュレーションできていることがわかった。

ただし、PhnomPenh や他の熱帯 (forest ID=1,3,4) のバイオマス蓄積量と比べて Pasoh は変動の幅や頻度がともに大きい。

#### **HongKong (forest ID=3)について**

HongKong に代表される (forest ID=3) の地域は、温暖湿潤気候となり、Table4-3 のケッペンの K 値で区分した気候区分では、熱帯湿潤気候となる。これらを照らし合わせ推測するところ、HongKong は温帯と熱帯の中間、つまり移行帯の部分にあたり、その優占種はおもに熱帯林から暖温帯林であると思われる。

Fig.4-4-①に示した HongKong のデータを見ると、森林誕生から約 50~60 年あたりまでは PFT=4 の温帯性広葉常緑樹が一番多く、その後 PFT=3 の温帯性針葉常緑樹が優占してきていることが見てとれる。だがまた 160 年目あたりから温帯性広葉常緑樹が増してきていることを見ると、この段階で優占種をどちらかに限定することは難しいようである。よって、HongKong に関しては、200 年では単一の優占種が存在できず、森林の構成種としては、温帯性広葉常緑樹もしくは、温帯性針葉常緑樹であることがわかった。

Table4-6 に示した観測値を見ると、熱帯季節林の成熟林での GPP は約 24.9[tC/ha/year]、NPP は約 6.4[tC/ha/year]。また、Table4-7 の暖温帯常緑広葉樹林の日本での NPP の観測結果は約 9.8[tC/ha/year]、温帯針葉樹林では約 6.8[tC/ha/year]となっている。Fig.4-2-①に示した HongKong でのシミュレーション値は、GPP が約 23[tC/ha/year]前後、NPP が約 8[tC/ha/year]前後に落ち着いている。明らかな優占種が限定できない HongKong では、上記にあげたいくつかの値と比較してみると、実際の傾向が示す値の範疇におさまっているといえるだろう。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、熱帯季節林、温帯常緑林での現存量は約 169.1[tC/ha]、温帯落葉林では約 142.5[tC/ha]である。HongKong のバイオマス蓄積量と樹木の本数の時系列変化を Fig.4-3-①の HongKong 部分から見ると、そのバイオマス蓄積量はおわり 100 年でみると、ほぼ 200[tC/ha]前後に収まっている。このことから、計算結果が上記の観測値の範囲に入っており、森林のバイオマス量も妥当な値でシミュレーションできていることがわかった。

#### **Serimbu (forest ID=4)について**

Serimbu に代表される (forest ID=4) の地域は、熱帯湿潤性の気候にあり、その優占種はおもに熱帯多雨林であると思われる。

Fig.4-4-①に示した Serimbu のデータを見ると、森林誕生から約 50~60 年あたりから PhnomPenh や Pasoh と同様、PFT=1 の熱帯性広葉常緑樹が優占していることがわかり、これはその地域の気象条件をきちんと反映している。

Table4-6 に示した測定例を見ると、熱帯多雨林の成熟林での GPP は約 36.9[tC/ha/year]、NPP は約 12.9[tC/ha/year]となっている。Fig.4-2-①に示したシミュレーション結果は、森林が誕生して約 60 年あたりから飽和傾向にあり、その値は GPP が約 30[tC/ha/year]前後、NPP が約 10[tC/ha/year]前後に落ち着いていることがわかる。これは、Table4-6 の測定結果とほぼ一致し、他の熱帯の地点と同様、Serimbu 地域の気象と、そこに特有の森林の NPP、GPP が妥当な値で再現されていることがわかる。

また、Table4-8 に示した植物現存量の観測値によると、熱帯多雨林での現存量は約 210.9[tC/ha]である。バイオマス蓄積量のシミュレーション結果は Fig.4-3-①の Serimbu のデータを見ると、ほぼ右肩上がりですり上昇しており、200 年あたりの結果で約 550[tC/ha]となっている。これは PhnomPenh や Pasoh などのほかの熱帯地域と比べても格段に大きい。200 年以上計算を行うと、ますます上昇していく可能性があるので一概には言えないが、熱帯多雨林での測定値は超えているため、その傾向は 200 年間の計算のうちである程度はおさえられているとみなす。

#### **熱帯の4地点(forest ID=1~4)について**

forest ID=1~4 までは熱帯から暖温帯の気候帯である。だが、これまで述べてきたように、一言で熱帯の植物、森林といっても、その成長量や傾向は地域性が大きく影響する。

たとえば、Fig.4-1-①に示した PhnomPenh と Pasoh の気象データを比べてみると、PhnomPenh は夏に雨が多く、冬に少ないのに対し、Pasoh は夏に雨が少なくどちらかといえば冬に雨がが多い。また Table4-2 に示した年平均気温と年降水量とを両地点で比較してみると、平均気温はそう変わらないものの、降水量が明らかに PhnomPenh の方が多い。これらのデータを総合的に検証してみると、最終的な優占種は PhnomPenh も Pasoh も PFT=1 の熱帯性広葉常緑樹であるが、雨季と乾季のはっきりしている PhnomPenh は Pasoh や Serimbu と比べて、PFT=2 の熱帯性広葉雨緑樹が 100 年以上たったあとでも残っていることが実証される。

#### Tomakomai (forest ID=5)について

Tomakomai に代表される (forest ID=5) の地域は、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに夏緑広葉樹林 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-②に示した Tomakomai のデータを見ると、森林誕生から約 60 年あたりから PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹が優占していることがわかる。

Table4-6 に示した GPP と NPP の測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year]となっている。これらの値と、Fig.4-2-②に示した Tomakomai でのシミュレーション結果を比較してみると、Fig.4-2-②での GPP が約 13[tC/ha/year]前後、NPP が約 6[tC/ha/year]前後に落ち着いており、暖温帯常緑広葉樹林やブナ林での文献値よりも少なめの傾向を示している。だが、Table4-7 の温帯針葉樹林の NPP は 6.8[tC/ha/year]とあり、Fig.4-4-②の PFT 占有率の傾向をもう一度確認すると PFT=3 の温帯性針葉常緑樹が 200 年目でも 20%前後残っていることがわかる。よって、そのことを考慮に入れれば、この計算結果もまた、妥当ではないかと思われる。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 143[tC/ha]である。Fig.4-3-②に示した Tomakomai のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 200[tC/ha] に達することが見て取れる。計算値の方が少し多くはあるが、ある程度の傾向は追えていると思われた。

#### Yamagata (forest ID=6)について

Yamagata に代表される (forest ID=6) の地域は、その地域情報や計算結果が Tomakomai (forest ID=5) とほとんど変わらない。よって、簡単に Yamagata での計算結果のみをここで記述しておく。

Yamagata での PFT 優占率は Tomakomai と同様、温帯性広葉夏緑樹である。だが、Tomakomai に比べてその優占率は低く、PFT=3 の温帯性針葉常緑樹も 40% 近くを占めている。Yamagata の GPP 計算値は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]、バイオマス蓄積量は 200 年目で約 200[tC/ha] 前後であった。これらのことを総合的にみて、PFT 優占率は多少異なるものの、その定量的な傾向は Tomakomai と変わらず、現実の植生が持つ傾向とほぼ一致する結果が得られている。

#### Toyama (forest ID=7)について

Toyama に代表される (forest ID=7) の地域は、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに夏緑広葉樹林もしくは常緑広葉樹林帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-②に示した Toyama のデータを見ると、森林誕生から約 60 年あたりから PFT=3 の温帯性針葉常緑樹が優占していることがわかる。これは上記の傾向をあまり反映できていない。その背後には、このモデルにおいて樹木を 8 パターンにしか分類できていない課題があると思われる。特に PFT=3 の温帯性針葉常緑樹の扱いについては、その分類中に含まれる主な種として、マツ・ヒノキ・スギの三つが挙げられるが、これらは同じ分類で分けられていても、その特徴が大きく異なる。用いているアルゴリズムやパラメーターを種ごとに改良しなければ、この Toyama 地域のような気象条件の森林はあまり正確な議論ができないことが浮き彫りとなった。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-②に示した Toyama での値を見ると、GPP は約 17[tC/ha/year]、NPP は約 8[tC/ha/year] となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year] となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year] である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year] となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 142[tC/ha] である。Fig.4-3-②に示した Toyama のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 200[tC/ha] に達することが見て取れる。上述しているように、Table4-8 は推測値であり、少なめに



見積もられている可能性がある。よって、計算値の方が少し多くはあるが、ある程度の傾向は追えていると思われた。

#### **Ohsaka (forest ID=8)について**

Ohsaka に代表される (forest ID=8) の地域は、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに常緑広葉樹林帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-②に示した Ohsaka のデータを見ると、森林誕生から約 50 年あたりまで PFT=4 の温帯性広葉常緑樹が多く、その後 PFT=3 の温帯性針葉常緑樹が優占していることがわかる。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-②に示した Ohsaka での値を見ると、GPP は約 18[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year]となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 142[tC/ha]である。Fig.4-3-②に示した Ohsaka のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 150[tC/ha]に達することが見て取れる。よって、ある程度の傾向は追えていると思われた。

#### **Kashiwa (forest ID=9)について**

Kashiwa に代表される (forest ID=9) の地域は、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに常緑広葉樹林帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-③に示した Kashiwa のデータを見ると、森林誕生から約 50 年あたりまで PFT=4 の温帯性広葉常緑樹が多く、その後 PFT=3 の温帯性針葉常緑樹が優占していることがわかる。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-③に示した Kashiwa での値を見ると、GPP は約 18[tC/ha/year]、NPP は約 8[tC/ha/year]となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year]

となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 142[tC/ha]である。Fig.4-3-③に示した Kashiwa のバイオマス蓄積量は、200 年目の値で約 300[tC/ha] に達することが見て取れる。Kashiwa でのバイオマス蓄積量はほぼ同緯度、同経度、同じような気象情報をもつ Ogawa (forest ID=12) と比較しても多い。

#### **HBEF (forest ID=10)について**

HBEF に代表される (forest ID=10) 地域は、その気象情報、位置情報と Fig.4-12、Fig.4-15 で示される植生分布では亜寒帯気候に区分され、本研究で分析した結果である Table4-3 とを照らし合わせ推測すると、暖温帯湿潤性の気候にある。

Fig.4-4-③に示した HBEF のデータを見ると、森林誕生から約 50 年あたりから、PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹が優占しはじめる。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-③に示した HBEF での値を見ると、GPP は約 15[tC/ha/year]、NPP は約 6[tC/ha/year]となっている。Table4-8 に示した測定例を見ると、温帯落葉林の NPP は約 5.7[tC/ha/year]となっている。よって Fig.4-12、Fig.4-15 で示される気候区分とは合わないが、森林として再現された温帯性広葉夏緑樹としての傾向は実測と合っていることが確認された。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯落葉林での現存量は約 143[tC/ha]である。Fig.4-3-③に示した HBEF のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 170[tC/ha] に達することが見て取れる。上述のように Table4-8 は推測値であり、少なめに見積もられている可能性があり、計算値の方が若干多めに見積もられているがその傾向は追えている。

#### **Oasa (forest ID=11)について**

Oasa に代表される (forest ID=11) 地域は、その気象情報、位置情報と Fig.4-12、Fig.4-15 で示される植生分布や、本研究で分析した結果である Table4-3 とを照らし合わせ推測するところ、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに常緑広葉樹林帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-③に示した Oasa のデータを見ると、PFT=4 の温帯性広葉常緑樹が優占している。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-③に示した Oasa での値を見ると、GPP は約 18[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year]となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 143[tC/ha]である。Fig.4-3-③に示した Oasa のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 170[tC/ha]に達することが見て取れる。

以上のことから、Oasa ではその観測値や傾向と一致するような森林が再現できていることがわかった。

#### **Ogawa (forest ID=12)について**

Ogawa に代表される (forest ID=12) 地域は、温暖湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに常緑広葉樹林帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-③に示した Ogawa のデータを見ると、はじめは PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹が多いが、徐々に PFT=3 の温帯性広葉常緑樹が優占してきている。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-③に示した Ogawa での値を見ると、GPP は約 17[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の調査結果では、暖温帯常緑広葉樹林の NPP は 9.8[tC/ha/year]となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯常緑林での現存量は約 169[tC/ha]、温帯落葉林では約 143[tC/ha]である。Fig.4-3-③に示した Ogawa のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 190[tC/ha]に達することが見て取れる。

以上のことから、バイオマス蓄積量は計算値の方が若干多く見積もっているものの、Ogawa では、その一帯の観測値や傾向と一致するような森林が再現できていることがわかった。

#### Central Plain (forest ID=13)について

Central Plain に代表される (forest ID=13) 地域は、その気象情報、位置情報と Fig.4-12、Fig.4-15 で示される植生分布から判断すると亜寒帯気候と温暖湿潤気候の境に位置し、本研究で分析した結果である Table4-3 を見ると、温暖半乾燥の気候にある。

Fig.4-4-④に示した Central Plain のデータを見ると、おおよそ 50 年目あたりから PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹が優占する。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-④に示した Central Plain での値を見ると、GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]となっている。Table4-8 の生産量の推定値をみると、温帯落葉林での NPP は 5.7[tC/ha/year]である。また、Table4-6 のブナ林（注：ブナ林は夏緑広葉樹林の代表種。またここでは Central Plain を議論しているのでヨーロッパブナ人工林の観測値も含む）の観測値は GPP が約 6.6~21[tC/ha/year]、NPP が約 3.6~9.2[tC/ha/year]となっている。よって、観測値と傾向が一致する計算結果が確認された。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯落葉林での現存量は約 143[tC/ha]である。Fig.4-3-④に示した Central Plain のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 45[tC/ha] となり、文献値と比べだいぶ小さな見積もりの結果になっている。

#### Siberia larch area 2 (forest ID=14)について

Siberia larch area2 に代表される (forest ID=14) 地域は亜寒帯（冷帯）気候にある。

Fig.4-4-④に示した Siberia larch area 2 のデータを見ると、はじめは PFT=8 の寒帯性広葉夏緑樹が多いが、だんだんと PFT=7 の寒帯性針葉夏緑樹が優占する。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-④に示した値を見ると、GPP は約 7.5[tC/ha/year]、NPP は約 4.5[tC/ha/year]となっている。Table4-4 の観測値を見ると、落葉針葉樹林の NPP は約 4.8[tC/ha/year]である。また Table4-7 の観測値を見ると、日本の冷温帯落葉広葉樹林の NPP は約 4.2[tC/ha/year]であり、Table4-6 の観測値を見ると、シラベ・オオシラビソ林（林齢 15）の GPP は約 9.5[tC/ha/year]、NPP は約 3.5[tC/ha/year]である。よってこれらの文献値を反映することができている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、亜寒帯林での現存量は約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-④に示した Siberia larch area 2 のバイオマス蓄積量を見ると、200 年目の値で約 80[tC/ha] となり、この文献値を再現できている。

#### Sakhalin (forest ID=15)について

Sakhalin に代表される (forest ID=15) 地域は、亜寒帯 (冷帯) 気候にある。

Fig.4-4-④に示した Sakhalin のデータを見ると、はじめは PFT=8 の寒帯性広葉夏緑樹が多いが、だんだんと PFT=6 の寒帯性針葉常緑樹が優占する。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-④に示した値を見ると、GPP は約 10.5[tC/ha/year]、NPP は約 6[tC/ha/year]となっている。Table4-4 の観測値を見ると、常緑針葉樹林の NPP は約 6.4[tC/ha/year]である。また Table4-7 の観測値を見ると、日本の亜寒帯針葉樹林の NPP は約 5.3[tC/ha/year]であり、Table4-6 の観測値を見ると、シラベ・オオシラビソ林 (林齢 15) の GPP は約 9.5[tC/ha/year]、NPP は約 3.5[tC/ha/year]である。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、亜寒帯林での現存量は約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-④に示した Sakhalin のバイオマス蓄積量を見ると、200 年目の値で約 140[tC/ha] となり、この文献値よりもやや大きな値を見積もっている。

#### Wakkanai (forest ID=16)について

Wakkanai に代表される (forest ID=16) 地域は、冷温帯湿潤性の気候にあり、その自然植生はおもに亜高山帯 (Fig.4-16、文献[2]参照) である。

Fig.4-4-④に示した Wakkanai のデータを見ると、はじめは PFT=8 の寒帯性広葉夏緑樹が多いが、徐々に PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹、PFT=6 の寒帯性針葉常緑樹が優占してきている。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-④に示した Wakkanai での値を見ると、GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7[tC/ha/year]となっている。Table4-6 に示した測定例を見ると、ブナ二次林での GPP は約 13[tC/ha/year]、NPP は約 7.3[tC/ha/year]となっている。また、ブナ人工林では GPP が 19.4~21[tC/ha/year]、NPP が 8.27~9.17[tC/ha/year]である。また Table4-7 の日本での調査結果では、亜寒帯針葉樹林の NPP は 5.3[tC/ha/year]、冷温帯落葉広葉樹林の NPP は 4.2[tC/ha/year]、温帯針葉樹林で 6.8[tC/ha/year]となっている。よって生産量の観点からは、文献値の示す傾向を再現できている。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、温帯落葉林での現存量は約 143[tC/ha]、亜寒帯林では約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-④に示した Wakkanai のバイオマス蓄積量の変化を見ると、右肩上がりの傾向を保ちつつ、200 年目には約 200[tC/ha]

に達することが見て取れる。

以上のことから、バイオマス蓄積量は計算値の方が若干多く見積もっているものの、Wakkanai の森林シミュレーションでは、その一帯の観測値や傾向と一致するような森林が再現できていることがわかった。

#### **Russia Evergreen forest area (forest ID=17)について**

Russia Evergreen forest area に代表される (forest ID=17) 地域は、亜寒帯 (冷帯) 気候にある。

Fig.4-4-⑤に示した Russia Evergreen forest area のデータを見ると、はじめは PFT=8 の寒帯性広葉夏緑樹が多いが、だんだんと PFT=6 の寒帯性針葉常緑樹が優占する。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-⑤に示した値を見ると、GPP は約 11[tC/ha/year]、NPP は約 6.5[tC/ha/year]となっている。Table4-4 の観測値を見ると、常緑針葉樹林の NPP は約 6.4[tC/ha/year]である。また Table4-7 の観測値を見ると、日本の亜寒帯針葉樹林の NPP は約 5.3[tC/ha/year]であり、Table4-6 の観測値を見ると、シラベ・オオシラビソ林 (林齢 15) の GPP は約 9.5[tC/ha/year]、NPP は約 3.5[tC/ha/year]である。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、亜寒帯林での現存量は約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-⑤に示した Russia Evergreen forest area のバイオマス蓄積量を見ると、200 年目の値で約 140[tC/ha] となり、この文献値よりもやや大きな値を見積もっている。

#### **Fair banks (forest ID=18)について**

Fair banks に代表される (forest ID=18) 地域は、亜寒帯 (冷帯) 気候にある。冬の気温が多少低いものの、その気象や森林動態の傾向も forest ID=17 の Russia Evergreen forest area と変わらないため、Fair banks での計算結果のみを簡単に述べる。

Fig.4-4-⑤より、Fair banks の森林構成は、はじめは PFT=8 の寒帯性広葉夏緑樹が多いが、だんだんと PFT=6 の寒帯性針葉常緑樹が優占する。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-⑤に示した値を見ると、GPP は約 9[tC/ha/year]、NPP は約 5.5[tC/ha/year]となっている。

バイオマス蓄積量の計算結果は Fig.4-3-⑤を見ると、200 年目の値で約 120[tC/ha] となっている。

#### Siberia larch area 1 (forest ID=19)について

Siberia larch area 1 に代表される (forest ID=18) 地域は、亜寒帯 (冷帯) 気候にある。

Fig.4-4-⑤に示した Siberia larch area 1 のデータを見ると、その優占種ははじめからおわりまで PFT=7 の寒帯性針葉夏緑樹である。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-⑤に示した値を見ると、GPP は約 8[tC/ha/year]、NPP は約 4.5[tC/ha/year]となっている。Table4-7 の観測値を見ると、日本の亜寒帯針葉樹林の NPP は約 5.3[tC/ha/year]であり、Table4-6 の観測値を見ると、シラベ・オオシラビソ林 (林齢 15) の GPP は約 9.5[tC/ha/year]、NPP は約 3.5[tC/ha/year]である。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、亜寒帯林での現存量は約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-⑤に示した Siberia larch area 1 のバイオマス蓄積量を見ると、200 年目の値で約 100[tC/ha] となり、この文献値とほぼ同じ値を見積もっている。

#### Osage (forest ID=20)について

Osage に代表される (forest ID=20) 地域は、その気象情報、位置情報と Fig.4-12、Fig.4-15 で示される植生分布から判断すると、亜寒帯と温暖湿潤気候帯の境に位置している。さらに、本研究で分析した結果である Table4-3 から判断すると亜寒帯 (冷帯) 半乾燥気候にある。

Fig.4-4-⑤に示した Osage のデータを見ると、その優占種ははじめは PFT=5 の温帯性広葉夏緑樹のように思われるが、60 年目あたりから PFT=3 の温帯性針葉常緑樹となっている。これは Osage が半乾燥帯であることを反映した結果であると思われる。

また GPP、NPP の計算結果は Fig.4-2-⑤に示した値を見ると、GPP は約 14.5[tC/ha/year]、NPP は約 5[tC/ha/year]となっている。Table4-7 の観測値を見ると、日本の亜寒帯針葉樹林の NPP は約 5.3[tC/ha/year]であり、Table4-6 の観測値を見ると、シラベ・オオシラビソ林 (林齢 15) の GPP は約 9.5[tC/ha/year]、NPP は約 3.5[tC/ha/year]、シラベ・オオシラビソ林 (成熟林) の GPP は約 19[tC/ha/year]、NPP は約 5.3[tC/ha/year]である。

また、Table4-8 に示した植物現存量の推定値を見ると、亜寒帯林での現存量は約 95[tC/ha]である。Fig.4-3-⑤に示した Osage でのバイオマス蓄積量の計算結果を見ると、200 年目の値で約 100[tC/ha]前後 となり、この文献値とほぼ同じ値を見積もっている。

#### 4.3.4 まとめ

以上20地点での検証の結果をグラフにしたものを、Fig.4-20に示す。これは横軸に熱帯から亜寒帯までの各地点を並べ、縦軸に各地点でのGPP、NPP、バイオマスの計算値と観測値を示したものである。

ここまでは計算した20地点のGPP、NPP、バイオマス蓄積量とPFT組成率を整理してきた。バイオマスに関しては文献値や観測値と多少ずれている地点もあるが、それでもオーダーや傾向を大きくはずれる結果ではなかった。

よってそれぞれの地点での植生は現実の植生を反映したものが再現できていると結論づけることができる。従って、これらの結果をデフォルトとして後の章で環境変動に対する変化を検証することにする。



## 4.4 環境傾度バイオームチャンバー内に植える植生選択

ここまでは、候補となる地域の気象情報や森林変遷の基礎データを整理してきた。以下の節ではそれらの結果を用いて、どのような植生分布をチャンバー内に再現すればよいかを議論する。

環境傾度バイオームチャンバー建設の最大の目的は、地球温暖化による植物生態系の変化を実験観測することである。またその特徴は、異なる気候帯間の植生の移動が観測できるように、各気候帯の間にしきいを設けず、植物が移動しやすいように設計されている点にある。すなわちチャンバー内には物理環境（気温、湿度など）の傾度がついているばかりでなく、植生帯にも一定かつ連続の傾度がついていなければならない。一般に現実の植物生態系はそう急な傾度がついた環境にあるとは考えにくく、実際に植生帯の移動が起こるとしてもある程度ゆるやかな変化のもとだと想像できる。

このような観点を頭におきつつ、各気候情報の中から一定の傾斜がつくパターンや、地域を東アジアや日本に限定した場合のバイオームチャンバー内の変化を推測する。

### 4.4.1 バイオーム植生候補地

まずは各地域間を比較するため、バイオマスの変化量を各地域ごとに、また各 PFT の占有率がわかるように計算結果をプロットした。その結果を Fig.4-5 に示す。これらの図は横軸が Table4-2 の forest ID を表し、縦軸がバイオマス蓄積量[tC/ha]を表す。それらの時系列変化を見るため、10年ごとに初年度から200年目まで順に掲示する。またこの図では草本 PFT（PFT=9、PFT=10）の結果もともに載せている。

この結果からまず、大生態系分布（Table4-3 参照）が同じでも、バイオマス量、構成種、成長パターンが大きく異なることがわかる。たとえば PhnomPenh(ID=1)と Serimbu (ID=4) は同じ熱帯であり、優占種も同じ熱帯性広葉常緑樹であるが、そのバイオマス量は Serimbu (ID=4) が大きく優っている。こういった現象は、気温や日射、降水量などにその成長を大きく左右される植物生態系では当然のことであり、このことからバイオームチャンバー内に導入する植生を厳選する必要があることが示唆される。

この結果を参考に次の節からは、バイオームチャンバー内に導入する植生パターンをふたつ提案する。

#### 4.4.2 東アジアに限定（仮想環境傾度バイオームモデルⅠの検証）

これまでにピックアップしてきた気象情報は、Fig.4-15 を見てもわかるように、異なる地域・気象における植生帯の動向をつかむため、世界の植生を網羅し、アメリカなどの地域も含んでいた。だが植生間の遷移を把握する際に、経度が大きく異なる地点同士を比較することはあまり意味がない。たとえばアメリカと日本などのアジアとでは、日射の違いだけでなく、内陸性、海洋性の違いまで出てきてしまい、植物の置かれる環境が大きく異なる。そのため実際の森林でも、その間を森林が移行することは考えにくい。

よって、環境傾度バイオームでは、その地域的な便利さなども考え、“東アジア、もしくはその経度上の異なる気候帯で、一定の環境傾度がつくような植生帯を選定すること”をここで提案する。

##### 4.4.2.1 計算結果

一定の傾度がつき、森林の移行が現実的にも起こりうるような植生の配置を考えるため、環境傾度バイオームチャンバー内に導入する植生帯の選別と、チャンバー内におけるそれらの位置を検討した。具体的には環境傾度バイオーム中の植生をいくつかのパターンで配置し、その傾向を Fig.4-5 と同様のグラフで、横軸を環境傾度バイオームチャンバー内の位置 (Fig.4-17 参照)、縦軸をバイオマス蓄積量[tC/ha]で表した。

環境傾度バイオームチャンバーは植生の区画とその間に人が通れるような区画を設置する計画である。その計画図を Fig.4-17 に示す。上図がチャンバー側面図を、下図がチャンバー底面図をあらわす。

ここで植生区画の総数は、建設計画であるチャンバーの大きさが 200m×50m×40m であることと第三章での結果を意識し、25m 区画が 8 つ横に並びそれが二列に並ぶ系 16 区画を想定した。

この構想に基づいて、各区画に導入する植生帯を、これまで取り上げてきた 20 地点の中から選び出し、その傾向を検討する。まずこの節では東アジア全体から各気候帯の代表地点を選び出し、チャンバー内に Table4-9 に示すような配置で設置した場合のバイオマス蓄積量の時系列変化を Fig.4-6 に示した。また便宜上、Table4-9 に示すような配置で設置した環境傾度バイオームを「仮想環境傾度バイオームⅠ」と呼ぶことにする。

#### 4.4.2.2 仮想環境傾度バイオームモデル I の考察

東・東南アジアは湿潤森林気候が熱帯から北方まで連続しており、温度による森林帯の変化を知るのに最適の地域である<sup>8)</sup>。その上、山地が連続しているので、標高による森林帯の変化も同時に見ることができ、植生帯の分化を決定する温度条件を解明できる。東・東南アジアの森林群系の分布パターンとそれを決めている温度条件を図化したものを、Fig.4-19 に示す。これは温度条件が森林分布を決める東アジアで、熱帯から温帯までの森林の水平・垂直分布を示すテンプレートに湿潤山岳のプロファイルを重ねて示してある。

森林限界は熱帯から温帯、北方森林限界まで同じ条件（温量指数 WI、 $15^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ ）が支配している。熱帯山岳では温量指数で表されるようなエネルギー量が森林帯の分化を起こしている。温帯域では温度の季節性による低温条件が植生帯の分布を決めている。両者が移行するのは北緯 20~30 度で、これが熱帯型、温帯型垂直分布の境界となっている。

Fig.4-19 を見ると、北緯 20~30 度より北では温帯域の植生の標高分布と緯度分布の境界とその傾向が一致していることがわかる。

Fig.4-18 に東ネパール地域で 1968 年に調査された、森林バイオマスの高度変化の様子を紹介する。これは横軸が高度を表し、縦軸が樹木の総バイオマス[t/ha]と、葉のバイオマス[t/ha]を表す。高度が上がっていくにつれ、その気候帯は熱帯から高山帯へと移動していく。それに沿ってバイオマス量がどう変化するかを調査した結果である。

Fig.4-18 の A 図を見ると、I の熱帯・亜熱帯地域のバイオマス量が約 600[t/ha]となっており、これを本研究で用いた炭素換算率で換算すると、約 285[tC/ha]となる。また、IV 区の冷温帯域のバイオマス量が最も高く、約 650[t/ha]、換算すると約 308.8[tC/ha]となっている。同様にして II 区はデータを約 400[t/ha]と読むと、約 190[tC/ha]、III 区はデータを約 540[t/ha]と読むと、約 256.5[tC/ha]、V 区と VI 区に関してはほぼ線形的に減少しており、ピックアップする地点によってその値は違うため、定量的な明示はここでは行わない。

これと本研究の仮想環境傾度バイオーム I（アジア ver.）での計算結果（Fig.4-6）とを比較すると、森林誕生から約 130 年あたりから、Fig.4-18 の A 図が示す曲線とほぼ同様の形状をたどっていることが確認できる。

つまり熱帯地域のバイオマス量が高く、緯度が上がっていくにつれ一度減少し、その後温帯と冷温帯の境界あたりで最高値に達し、その後減衰していく傾向が再現できている。