

B-12 地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究

（1）植物生態系への影響予測に関する研究

研究代表者 環境庁国立環境研究所 甲斐 啓子

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ
生物圏環境部
水圏環境部
（委託先）

温暖化影響・対策チーム
環境植物研究室
土壌環境研究室
宮崎公立大学
東京大学
愛知大学
東京農工大学

甲斐啓子・甲斐沼美紀子
大政謙次・戸部和夫
恒川篤史
内嶋善兵衛
大場 秀章
吉野 正敏
細見 正明

平成5～7年度合計予算額 38,788千円
（平成7年度予算額 13,104千円）

〔要旨〕

IPCCなどの温暖化防止に向けた国内外の取り組みが本格化する中で、温暖化にともなう植物への影響、特に自然植生や森林、希少植物、農作物などへの影響の解明とその予測手法の開発が急務とされている。このため、我が国を含めた東アジア地域を対象として、地理情報システムや気候シナリオを用いた影響予測モデルを開発し、東アジア地域における植生シフトや生物季節への影響を予測するために以下の研究を行った。

1) 我が国における数種の植物季節の温暖化による影響予測図の作成、植物季節と緯度・経度・海拔高度との関係を明らかにした。2) エル・ニーニョ・イベントとラ・ニーニャ・イベントの場合について、サクラの開花日の遅速、乾季と干ばつによる作物の量の増減、自然災害の多少についての比較研究、3) わが国及び中国における植生分布の影響の予測、4) 東アジアにおける植物生産への土地利用の影響評価研究、5) 南西諸島の植物相への影響についての考察、6) 湖沼における鉛直一次水温予測モデルと水界生態系モデルとを連結させ、湖水温の温暖化した場合の将来予測及び植物プランクトン量、無機態栄養塩量、溶存酸素濃度の季節変化のパターンの再現を行った。

〔キーワード〕 温暖化、生物季節、植生シフト、湖沼エコシステム、NPP

1. 序

「地球温暖化」は、植物の光合成、呼吸、代謝、植物ホルモンの生成などの整理生態反応に影響を及ぼし、植生の分布域の変化や、多くの植物の絶滅を招く恐れがある。植生の衰退や破壊は植物に依存する昆虫や鳥類、動物類に影響を与え、生態系のバランスを崩し、ひいては人間の生存基盤をおびやかすことにもなりかねない。したがって、植物の生理・生態と気候条件とのかかわりに関する基礎的な研究を進め、さらに地球温暖化の植物に及ぼす影響を的確に予測すること

が必要である。この一連の研究によって得られた成果は、植物の被害を未然に見積もる根拠となるとともに、植物やそれを取りまく生態系の保全のために必要な対策を施す上で基礎となる。

2. 研究目的

上記に述べたような研究の必要性に鑑み、(1) 開花・発芽・紅葉・落葉などの生物季節の変化に関する予測、(2) 植物群落の気候条件との対応関係の解明および分布シフトの予測、(3) 自然植生の純一次生産力に対する影響予測、(4) 陸水生生態系への影響予測手法の開発の研究に取り組んだ。研究の主な対象地域としては、地球温暖化により土壌水分不足などの影響が懸念されている東アジア地域に焦点をあてて研究を行った。

3. 研究方法

3.1 気候変化が日本の植生分布に及ぼす影響の予測

地球規模の気候変化によって生じる日本の自然植生のポテンシャルシフトを直接転移関数アプローチによって推測した。残存自然植生の植生分類と気候条件とのあいだの関係を説明するために、ふたつのファジーモデルと多項ロジットモデルの植生分布モデルを検討した。植生分類と気候条件のデータに基づき各条件のもとでの選択確率を計算し、さらに最ゆう法によって線形関数のパラメータを求めた。データは日本全体を約 1km 四方のグリッドでおおうラスタ型の数値地理情報を用いた。植生データは環境庁によって作成されたものを用いた。自然群落を抽出し、オーダーから群団レベルに対応する八つのグループに分類した(表 1)¹⁾。気候データは気象庁によって提供されているデータファイルをもとにして作成した。データベースは 386,950 個のグリッドセルを含み、そのうち 59,786 グリッドセルが残存自然植生であり、残りは代償植生および欠損値である。本研究は残存自然植生のデータにもとづきモデルを作成し、次にこのモデルを用いて日本全体の植生分類を推定した。

3.2 気候変化が中国植生分布に及ぼす影響の予測

次に中国の植生に焦点をあて、判別分析モデルと線形ロジットモデルで試みた。

データは、「Global Historical Climatology Network (GHCN) data」を用いた²⁾。解析の手順は以下の通りである。1) 中国の国コード(230)を用いて中国全体の気温と降水量のデータを抽出した。気温と降水量データは、1961 年から 1991 年の平均値を計算するために、気温と降水量の両方のデータをもつ 123 ステーションとした。2) 「Vegetation of China(1980)」などを参照して、これらの 123 のステーションから 11 の代表的なステーションを抽出し気温と降水量の平年値を計算した。この

表 1 自然植生の分類とグリッドセルの数

コード	植物社会的分類	特徴	グリッドセルの数
a	<i>Vaccino-Pinetalia pumilae</i>	高山草原群落	1,158
b	<i>Abieti-Piceetalia Jazoensis</i>	亜高山針葉樹林	15,345
c	<i>Saso-Fagion crenatae(1)</i>	冷温帯植生 (北海道)	24,541
d	<i>Saso-Fagion crenatae(2)</i>	冷温帯植生 (日本海側)	13,542
e	<i>Sasomoropho-Fagion crenatae</i>	冷温帯植生 (太平洋側)	1,920
f	<i>Illicio-Quercetalia acutae</i>	冷温帯植生 (丘陵地)	1,726
g	<i>Maeso japonicae-Castanopsis Sieboldii</i>	冷温帯植生 (低地)	657
h	<i>Psychotrio-Castanopsis Sieboldii</i>	亜熱帯植生	897

結果は気候ダイアグラムとしてまとめた。3)次に古いデータの存在するステーションをサーチした。その結果、少なくとも1911年以降について気温と降水量の両者が存在するステーションが17あることがわかり、その中で4ステーションはさらに1901年までデータをさかのぼることができた。観測ステーションは中国東部に集中した。各年、各ステーションの年平均気温と年降水量を計算し、1カ月でもデータの欠損する年については欠損値として処理した。4)各ステーションについて気温と降水量データに対して線形回帰分析を行い、10年毎の気温と降水量の変動を計算した。

気候条件が植物に及ぼす影響を理解するためには、Walterらによって考案された気候ダイアグラムを利用するのが便利である^{3,4)}。中国の気候帯を代表する11のステーションの中で、年平均気温がもっとも低いのはSuihenfe(北緯44.38度、東経131.15度)で摂氏2.7度、最も高いのはGuangzhou(北緯23.13、東経113.32度)で21.8度だった。年降水量については最高はGuangzhouで1,700mm、最低はUrumqi(北緯43.78、東経87.62度)で235mmだった。温度の南北の勾配(北が寒冷、南が温暖)と降水量の東西の勾配(東が湿潤、西が乾燥)を概観することができる。

表2に示すように、傾き0.01(100年間で1℃の上昇)、5%水準有意のステーションはMudanjiang(2.3℃/century)、Shenyang(1.9℃/c)、Hailar(1.4℃/c)、Harbin(1.1℃/c)およびChangchun(1.0℃/c)である。傾き-0.01(100年間で1℃の減少)、5%水準有意のただ一つのステーションはFuzhou(-1.5℃/century)だった。気温の上昇傾向は中国北部で顕著であり、南部では減少傾向がみられた。10年ごとの変動をみると、気温は1911~1940年で上昇し、1941~1950年に落ち込み、ふたたび1951年以降上昇している。降水量では線形回帰分析が5%水準有意のステーションはFuzhou(-361mm/century)およびChangchun(-128mm/c)の2カ所だった。降水量は気温よりも複雑なトレンドを示している。すなわち1921~1930年の落ち込みと1951~1960年のピークが見られる。

表2 今世紀の中国東部における気候トレンド

	緯度 (N)	経度 (E)	気 温			降 水 量		
			平均 (°C)	回帰直線の傾き (°C/100年)	信頼度水 準	平均 (mm)	回帰直線の傾き (°C/100年)年)	信頼度 水準
Hailar	49.22	119.75	-2.1	1.4	0.000	315	37	0.318
Qiqihar	47.38	123.92	3.3	0.2	0.608	370	130	0.070
Harbin	45.75	126.77	3.5	1.1	0.000	555	-45	0.396
Mudanjiang	44.57	129.60	3.2	2.3	0.000	516	-3	0.955
Changchun	43.90	125.22	4.8	1.0	0.001	631	-128	0.045
Shenyang	41.77	123.43	7.6	1.9	0.000	685	70	0.333
Beijing	39.93	116.28	11.8	-0.0	0.827	606	18	0.876
Tianjin	39.10	117.17	12.4	-0.0	0.935	527	103	0.154
Dalian	38.90	121.63	10.3	0.4	0.084	592	45	0.598
Yantai	37.53	121.40	12.4	0.6	0.004	661	121	0.088
Qingdao	36.07	120.33	12.1	0.3	0.205	701	171	0.130
Nanjing	32.00	118.80	15.4	-0.0	0.702	1003	70	0.547
Shanghai	31.17	121.43	15.5	0.9	0.000	1158	-29	0.745
Wuhan	30.62	114.13	16.6	-0.8	0.000	1194	88	0.464
Hangzhou	30.23	120.17	16.3	-0.1	0.589	1458	-191	0.118
Changsha	28.23	112.87	17.3	-0.9	0.000	1356	-67	0.613
Fuzhou	26.08	119.28	20.0	-1.5	0.000	1409	-361	0.018

3.3 東アジアの植物生産への気候温暖化と土地利用変化の影響

既刊の植生図⁵⁻⁹⁾によると、この地域の自然植生は、暖かさ指数¹⁰⁾の増加につれて、中国北東部の最北域のボレアル林から、中国北部の落葉広葉樹林と中国中部・南部の常緑広葉樹林を経て、

東アジア・南アジア地域の熱帯雨林および熱帯季節林へと連続的に変化している。しかし、この地域の内陸部には、温帯草地（内蒙古）と半乾燥地や砂漠地（新疆・ウイグル地区）が広がっている。これらの地区の乾燥植生は非常に貧弱である。それは大洋から遠く隔離されていて降水が極端に低く、かつ寒冷なためである。いくつかの予備的研究¹¹⁻¹⁴⁾によると、東アジアの自然植生の純一次生産力（NPP）は、乾燥内陸域での1 t 乾物 / (ha・年) またはそれ以下から、熱帯閉鎖林をもつインドネシア島嶼域の25 t / (ha・年) またはそれ以下まで、きわめて広い範囲に変化している。植物生産力のこのような地理的变化は、対象地域の植生タイプにしたがって気候資源の地域的な変化を反映している。植生と接地気層とにおける二酸化炭素・水蒸気との交換過程を同時期に考慮することで、気候データから自然植生の純一次生産力を推定する筑後モデルをえた¹⁵⁾。このモデルの確度は他の方法で求めた植物生産力と比較することによって、十分確かめられている^{13-14,16-18)}。これらの方法は6グループに分類できた²¹⁾。地球環境問題とくに地球的な炭素サイクルが重要になるにつれ、多くの関心が気候学的モデルの開発および利用にむけられてきた^{11,19)}。

平年気候データ・各県の土地利用データ・上の生産効率値を用いて、全純生産量の式から各県のTNP値を推計した。一方、岩城²⁰⁾は、環境庁の行った日本の『緑の国勢調査』に関する資料を用いて、各県のTNP値を推計した。二つの方法で求めたTNP値の比較が図1(a)に示した。筑後モデルから計算したNPP値を用いて作成した東アジア・東南アジアのNPP分布図を、著者の提出した植生分布図⁵⁻⁷⁾に重ねて、この地域の主要な植生タイプの平均NPP値を推定した。ここで求めた植生タイプの平均NPP値をWhittaker and Likens²¹⁾の提出した各植生タイプの平均NPP値と比較した結果を図1(b)に示した。図1(a)と(b)は全く異なる方法で求めた植生の生産力でよく一致しており、筑後モデルが地域および大陸スケールでの自然植生のNPPとTNPの推定に十分利用できることを示している。

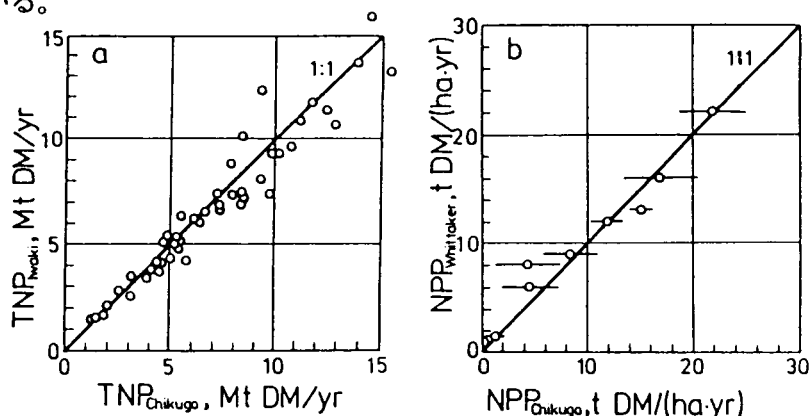


図1 二つの方法で推定したTNP(a)およびNPP(b)の比較

3.4 温暖化が日本の植物季節分布に及ぼす影響の予測

植物季節と気象条件と非常に密接な関係があるとされているが、なかでも月平均気温との関係が最も相関が良いとされている。そこで、温暖化による開花・発芽日などの植物季節の状況を予測することによって、季節の遅れ進みの指標・環境の変化を推定する指標・気象観測資料のない地点の推定・歴史時代への気候の研究・農業への利用・生活への利用として役立つものと考えられる。季節によって変化する生物現象観測が、昭和28年に「生物季節観測指針」として制定され、観測方法や観測種目が全国的に統一されて現在に至っている²²⁾。最近この生物季節観測をめぐっ

てこのデータの必要性の有無が問われ、一応植物季節はこれまで通り行うこととなったが、動物季節は外部委託業務となった。そこで、そのデータを使用して、それぞれの植物（ツバキ、ウメ、タンポポ、ソメイヨシノ、ヤマツツジ、ノダフジ、ヤマハギ、アジサイ、サルスベリ、ススキ、イチヨウ、イロハカエデ）の開花日・発芽日・紅葉日・黄葉日・落葉日と月平均気象条件（月平均気温・降水量・日照時間・月最高気温・月最低気温・湿度など）との相関関係を調べた²³⁾。その結果、これらの生物季節にあつてはほとんどの種類が、月平均気温の相関が最も高いため、月平均気温を用いて温暖化による予想を試みた。それぞれ生物季節観測地点（約 102 地点）における生物季節データ（1953-1990 年）と月平均気温との相関関係を調べ、相関の良い月平均気温を使って、回帰、重回帰式を求めた。月平均気温 1℃が上昇すると、開花日が何日早くなるか、紅葉日が何日遅くなるかを、それぞれの地点ごとに求めることができた。それを、日本地図上にプロットするために、気象庁 1951-1980 年の 30 年の 1×1km の気温気候値メッシュファイルを利用した。まず、それぞれの測定地点の年平均気温を用いて 1℃の温度幅で分類した。次に、メッシュ気温気候値から 5×5km の月平均気温・年平均気温を求めた。各メッシュ地点の年平均気温に対応する生物季節観測地点を求めて、その観測点の回帰式にメッシュ地点の月平均気温を代入して予想値を求めた。年平均気温が同じ値のメッシュ地点は、年平均気温が同じ観測地点の予想値の平均値をメッシュ地点の予測値として 5 日毎に分布図として作成した。また、今後広い地域における植物季節の影響を見るために緯度・経度・海拔高度と平均気温との関係をみた。

3.5 植物季節に及ぼす地球温暖化の影響—エル・ニーニョが植物季節・農作物収量・自然災害に及ぼす諸例—

エル・ニーニョとサーザンオシレーション（エル・ニーニョ）は赤道太平洋域を中心にした現象ではあるが、モンスーンアジアにおける異常気候に影響を及ぼし、それが原因となって、植物季節現象の異常や、農作物の減収・増収、さらに自然災害の異常という結果をもたらす。このような異常現象がどのように現れるかの事実を収集し、今後の体系的な研究の基礎資料を整えた。

エル・ニーニョ・イベント、ラ・ニーニャ・イベントの顕著な年を何年か選びだし、それぞれの合成値をまたは集計値か平均値を求めて比較するという方法をとった。その場合、地域により、現象により、選びだす年が多少異なる。それは、赤道地方の海面水温の異常が低緯度と中緯度の循環系を通じて乾湿・寒暖の異常に至る過程にそれぞれ遅れがあり、また、海面水温の偏差の程度に差があり、さらにその偏差が発生する月に差があるため、結果として生じる季節現象の異常・農作物生育の異常・災害の発生に差が生じる。従って、現象により、地域により、また年（場合）により、異なった年を選び出した理由である。また、言うまでもなく、必要とするデータが得られる年が場合によって異なることも理由である。エル・ニーニョ (ENSO) とはエル・ニーニョ (El Niño) とサーザンオシレーション (南方振動) をつなげた呼び名である。ペルー沖の湧昇地域で、海底から冷たい海水が表層に昇ってくる。毎年クリスマス前後と赤道太平洋域で南東貿易風が一時的に弱まり、沿岸の湧昇流が弱まり、赤道反流系の暖かい南下流で海水温が 2~3℃上昇する。しかし、最近では、この本来の意味よりも、数年に一度の異常な高水温現象をさすことが多い。この大規模な現象を本来のものと区別するために、エル・ニーニョ・イベントと呼ぶ。エル・ニーニョ・イベントと毎年起こるエル・ニーニョとは発生機構が異なる。その機構は次の通りである。(1)熱帯の中央太平洋上における強い貿易風によって大量の暖水が西部太平洋へ集積する。(2)次いで貿易風が弱まり暖水層が東へ移動する。(3)引き続いて暖水が補給され、そのため湧昇流があっても平年より高水温で、長期間にわたって高い水温偏差が続く。

エンソの経年変化を1975年から1994年の20年間についてみると、海面水温偏差(°C)の20年間の変動は1982-3年の場合が最高で+4°Cを越す。1982年のわが国に及ぼした影響はすでに論じた²⁴⁾。次いで、1976、1987、1992年などが約+2°Cの高偏差である。モンスーンアジアと近いニーニョ4の海域では、偏差は+1.5°Cまであり、1976年のピークがはっきりせず、1991年前後もまたピークが顕著でなく、高偏差が継続している。

3.6 南西諸島の植物相の温帯要素：その分類地理学的考察と地球温暖化が及ぼす影響

南西諸島の植物相と植物地理は複雑で、過去の気候変動ならびに大気中のCO₂の濃度の増加に伴う地球温暖化にとって興味深い対象といえる。ところが、南西諸島の植物相の研究は日本本土の植物相よりは遅れている。南西諸島には屋久島の山頂部を除くと、現在は冷温帯とみなせる気候帯、植生帯としての冷温帯がみられない。しかし、屋久島以南の南西諸島でも標高の高い山の山頂部分を中心に温帯性あるいは温帯起源と考えられる植物がみられる。その多くは寒冷期に南西諸島に移住し、その後も残存し続けてきた種あるいはそのような種から派生した種であると考えられる。ここでは、前者を温帯性、後者を温帯起源の種と呼ぶことにする。南西諸島は、温帯性あるいは温帯起源と考えられる種が、気候変動の影響を他地域よりも強く受ける地域であり、この諸島の温帯性または温帯起源の植物に焦点を置き、植物相ならびにそれへの温暖化が及ぼす影響について多角的考察を試みたものである。この中、植物相あるいは植物地理学的に特に興味深い、西表島、沖繩島、奄美大島、徳之島、トカラ列島及び屋久島で現地調査を行い、温帯性あるいは温帯起源と推定される植物を中心にその探索を行い、生育地を含め観察を行った。標本を作成し、それらを、東京大学、京都大学、国立科学博物館などの植物標本室に保管される標本と比較を行った。

3.7 陸水生態系の将来予測手法の開発に関する研究

比較的水深の深い湖沼あるいは貯水池などの成層型湖沼を対象に、地球温暖化が水界生態系に及ぼす影響の評価を行う。このため、湖沼の水温(密度)分布を予測する鉛直一次元水温予測モデルとこのモデルに対応した水界生態系モデルを作成し、複数の湖沼に対してその適合性を検討する。さらに、このモデルを用い、気温が上昇した場合の将来予測を行い、水界生態系への地球温暖化に対する影響を評価した。本研究で開発した生態系モデルでも、依然として陸水生態系の基本構成要素である植物プランクトンの種構成の予測は困難である。そこで、新たなモデルとして、ニューラルネットワークを用いた植物プランクトンの種ごとの予測を行った。

一般に成層化した湖沼の水温分布は、水平方向にほぼ一様であり、鉛直方向のみに変化を持つと見なせる場合が多い。ゆえに、成層を形成する場合には、水温を一次元として解析することが可能である。本研究における鉛直一次元水温予測モデルはこの考えに基づき、水温成層を作る湖沼(特にダム湖)における水温の季節変化をシミュレートすることを仮定し作成した。また、この鉛直一次元水温予測モデルはMITモデル²⁵⁾を基礎にしているが、これらのモデルおよび従来これらを元に作成されたモデルは渦動拡散係数を一定値として与えているものが多く、循環期・成層期の両時期を連続的に計算するには困難であった²⁶⁾。そのため、これらの鉛直一次元水温予測モデルに湖沼の凍結も考慮し、Energy Balanceモデル²⁷⁾と連結させ、冬季に凍結する湖沼においても年間通して計算できるようにした。また、将来予測を仮定し、異なる湖沼および環境(季節変動)へ適応させるために、風や鉛直密度分布(成層強度)を元に渦動拡散係数(乱流拡散係数)の決定を行うサブモデルを組み込んだ。ここで作成した鉛直一次元水温予測モデルでは、渦動粘

性係数を成層の安定度と湖水面上の風速の関数とした。水面摩擦係数 C_f の導出は Deacon, Webb により提案された評価式を用いる²⁸⁻²⁹。鉛直一次元水温予測モデルから計算される鉛直水温分布および湖水の流動（各層の流入量，流出量，鉛直移流量，および拡散量）を元に湖沼生態系を計算・予測する水界生態系モデルを作成した（図 2）。このモデルは植物プランクトン（クロロフィル-a），動物プランクトン，溶存無機態リンおよび窒素，懸濁態リンおよび窒素，そして溶存酸素濃度を計算・予測し，各濃度の鉛直分布を導き出している。この中でも，温暖化による生物層の変化を予測するために，植物プランクトンは複数の種の優占度を同時に計算できるように考慮している。また，底泥からの栄養塩溶出量を求めるため，底泥間隙水中の溶存無機態リンおよび窒素，底泥中の懸濁態あるいは吸着態のリンおよび窒素を考慮した，底泥サブモデルを結合させている。霞ヶ浦を対象として，ニューラルネットワークの多層モデルを構築した。本モデルでは，入力層として，水温，日照時間，リン酸態リン，無機態窒素，降水量，ケイ酸，*Rotifera*，*Copepoda*，*Diaphanosoma brachyurum*，*Bosmina fatalis*，隠れ層は 30 素子，また出力層として，藍藻類の *Microcystis spp.* の個体数を取り上げた。

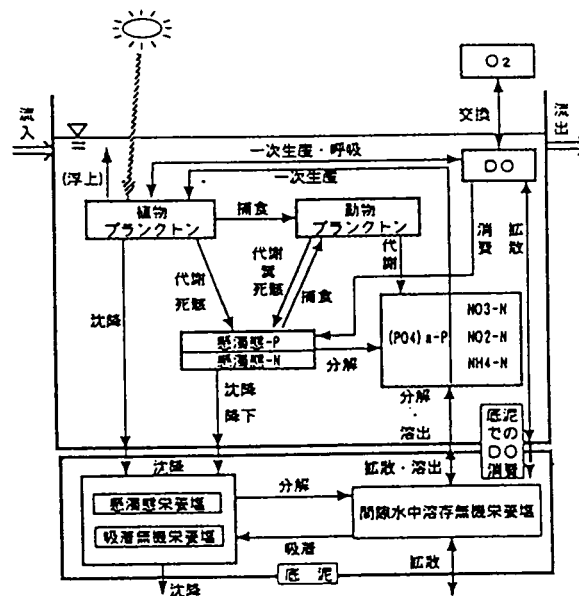


図 2 生態系モデルの構造

4. 結果および考察

4.1 気候変化が日本の植生分布に及ぼす影響の予測

ファジーモデルの的中率は約 70.3% (42,002/59,786)であった。現存植生図とファジーモデルにより推定された自然植生図（図 3(b)）を比較すると冷温帯植生と暖温帯植生との境界線が推定図において現存図よりも南に位置していることがわかる。ロジットモデルの的中率は約 75.8% (45,320/59,786)であった。現存植生図とロジットモデルにより推定された自然植生図を比較すると太平洋側の冷温帯植生が推定図において過小評価されていることがわかる（図 3(c)）。

ロジットモデルの気候パラメータを変化させることにより，温暖化した気候条件のもとにおけるポテンシャルシフトを予測した。年平均気温 1℃、2℃、3℃上昇という三つのシナリオを用いた。その結果，日本全体のグリッドセルのうち現在の分類と異なる分類に推定されるのは気温 1℃

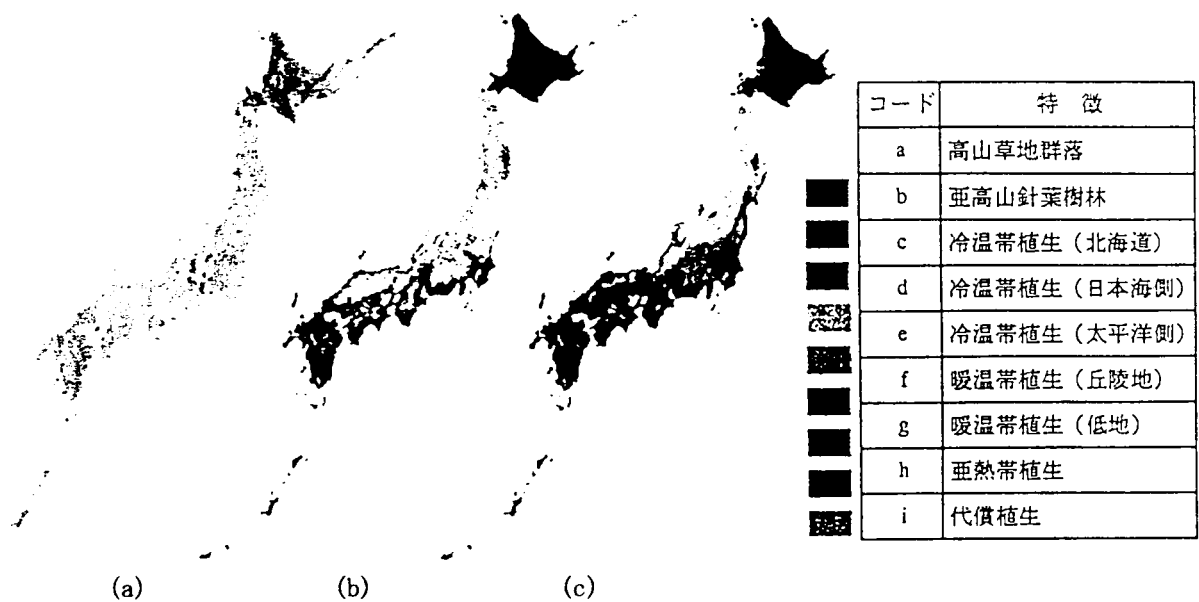


図3 (a)日本の現存植生図, (b)ファジーモデルにより推定された自然植生図, (c)ロジットモデルにより推定された自然植生図.

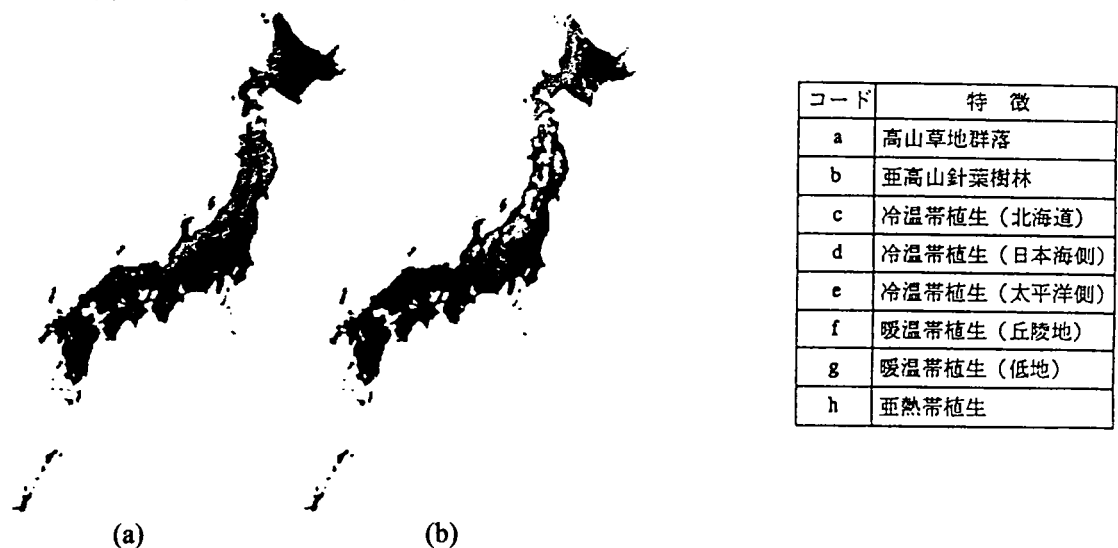


図4 ロジットモデルにより推定された潜在的な植生図
(a)年平均気温1℃上昇, (b)年平均気温3℃上昇.

上昇に対して23%、2℃上昇に対して44%、3℃上昇に対して62%であった。さらに現在、山岳地に分布している高山・亜高山植生はその適したハビタットを奪われる可能性がある（図4）。

4.2 気候変化が中国の植生分布に及ぼす影響の予測

判別分析は多変量解析手法の一つであり、その属するグループが未知な個体を、ひとつまたは複数の量的変数にもとづき、名義尺度によってあらわされるグループに割り当てる手法である²⁸⁾。本研究では「Statistical Analysis System (SAS release 5.18 at Tokyo University)」のDISCRIM プロシジャを用いた。グループ内共分散行列の同質性の検定を行い、検定値が有意のときにはグループ内行列を用い、そうでないときにはプールされた共分散行列を用いた。データはラスタ型の数値地理情報であり、中国全体、すなわち北緯18度から52度、東経73度から135度の範囲をカバーす

る。各グリッドセルは緯度方向に 150 分、経度方向に 225 分、中国中央部でおよそ 5km×5km の大きさに相当する。すべてのデータは中国科学院植物研究所によって作成された。植生データは、植物研究所によって 1979 年に作成された現存植生図(scale 1:4,000,000)をデジタル化したものである。植物群落は相観レベルに対応する 9 つのグループに分類した (表 3)。

二酸化炭素倍増気候シナリオについて、GCM アウトプットの利用を地域レベルの影響評価に用いる場合には問題点が指摘されているため、Robock らは地域レベルの気候変化シナリオを、地域的な気候情報と GCM アウトプットを結合する新しい手順を開発した²⁹⁾。中国におけるケーススタディの結果、等価二酸化炭素量倍増の結果として、2~4℃の気温上昇、約 20%の降水量の増加がもっとも確からしいとして、われわれは二つのシナリオ、すなわちシナリオ A: 気温 2℃上昇、降水量 20%増加と、シナリオ B: 気温 4℃上昇、降水量 20%増加を仮定することにする。

判別分析モデルの的中率は約 66.1%、ロジットモデルの的中率は約 68.7%だった。ロジットモデルにより推定された自然植生図と現存植生図を比較すると、植生(a)と(b)の境界がチベット高原の南東部で大きく単純化されており、この地域では多くの谷が刻まれ、現存植生図では植生が交互に入り組んだモザイク状の分布を示した。また植生(d)は過小評価され、特に Tashinganling 西部周辺の分布は十分に推定されなかった。ロジットモデルの気候パラメータを変化させることにより、気候変化下におけるポテンシャルシフトを予測した。始めに年平均気温 2℃上昇、年降水量 20%

表 3 植生分類とそれぞれの特徴

植生コード	各植生の相観	優占種	ケッペンの気候分類による気候型	分布	年平均気温 (°C)	年降水量 (mm)
a	針葉樹 / ステップ	<i>Larix</i> spp., <i>Pinus</i> spp., <i>Arenaria musiformis</i>	Dw/H	中国北東部 (Daxinganling)/ Xizang(Tibet)	-2.9 ± 3.4	248 ± 179
b	溼原 / 落葉広葉樹林	<i>Carex</i> spp., <i>Kobresia</i> spp.	Dw/H	Xizang(Tibet)/中国北東部(Heilongjiang)	2.1 ± 3.3	510 ± 180
c	ステップ / 砂漠	<i>Stipa</i> spp., <i>Carex</i> spp.	BS	Nei Mongol (Chilin, Heilongjiang) / Xinjiang	3.6 ± 2.6	193 ± 106
d	ステップ / 低木林	<i>Corylus heterophylla</i> , <i>Ostryopsis davidiana</i> , <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> , <i>Tamarix</i> spp.	BS	中国北部(Gansu, Hebei)	5.7 ± 2.7	415 ± 126
e	砂漠	<i>Sympegma regelii</i> , <i>Anabasis salsa</i>	BW	Xinjiang (Takelamagan Desert)	7.4 ± 2.3	77 ± 58
f	落葉広葉樹林 / 作物の 2 毛作・3 毛作	<i>Quercus</i> spp., <i>Acer</i> spp., <i>Ulmus</i> spp.	Cw	中国北部(Shandong) / 中国中央部(Anhui, Henan)	11.2 ± 2.7	720 ± 322
g	常緑・落葉低木 / リクチワタと米の二毛作	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Melastoma</i> spp., <i>Pinus</i> spp.	Cfa	中国中央部(Hubei) / 中国南西部(Guizhou)	15.8 ± 1.9	1090 ± 227
h	落葉広葉樹林 / 常緑針葉樹林 / 米の 1・2 期作	<i>Cyclobalanopsis</i> spp., <i>Castanopsis</i> spp., <i>Lauraceae</i> spp.	Cfa	中国南部(Fujian) / 中国中央部(Jiangxi)	17.5 ± 2.7	1486 ± 299
i	常緑広葉樹林 / 米の 2 期作	<i>Vatica astrotricha</i> , <i>Dipterocarpus davidiana</i>	Cfa	中国南部(Guangdong) / 中国南西部(Yunnan)	19.8 ± 2.0	1588 ± 382

増加のシナリオ A を用いた。その結果、中国全体のグリッドセルの中で、現在の植生とずれるものは約 33% だった。地理的分布の観点からは (図 5(a))、現在中国北東部に分布する針葉樹林が、中国の国境内からその生息地を奪われるかもしれない。中国東部に分布する広葉樹林 (植生 f, g, h, i) は緯度方向に約 3 度北方にシフトするだろう。次に年平均気温 4℃ 上昇、年降水量 20% 増加のシナリオ B を用いた。その結果、現在と異なる植生に推定されるグリッドセルの比率は中国全体で約 53% であった。地理的分布の観点からは (図 5(b))、中国東部に分布する広葉樹林 (植生 f, g, h, i) は緯度方向に約 5 度北方にシフトする。さらに砂漠地域の植生 (e) はその面積を拡大し、ステップ植生の (c) は減少する。両者の予測を比較すると、もっとも顕著な特徴は、砂漠地域の植生 (e) がその地域を拡大し、ステップの植生 (c) が減少することである。このことは 4℃ の気温上昇を仮定するシナリオ B の場合、たとえ降水量が 20% 増加したとしても植物にとって環境の乾燥化が生じることを示唆する。植物生理の観点からは植物の生長を阻害する最大の要因は低温と乾燥である。気温の上昇は両者の現象に関与するが、前者に対してはポジティブな影響を、後者に対してはネガティブな影響を与える。シナリオ B では乾燥化を通じて植物にとってネガティブな影響を与えうると推定される。また、中国東部の広葉樹林 (植生 f, g, h, i) はシナリオ A では北方に約 3 度 (約 350 km)、シナリオ B では約 5 度 (約 600 km) シフトすると予測された。もし二酸化炭素倍増が IPCC による Business as usual scenario に示されるように 2030 年頃までに生じるとすれば、これは今から 50 年程度の間には生じることになる。従って潜在的なハビタットはシナリオ A では年 7km、シナリオ B では年 12km の速度で北方に移動する。中国東部における主要樹種として落葉カシ属の *Quercus* を例にとれば、その潜在的ハビタットの移動速度は過去 1 万 3 千年のヨーロッパで記録された移動速度に対して³⁰⁾、シナリオ A で約 14 倍、シナリオ B で約 24 倍となる。同時に移動の速度が種ごとに異なるという点にも注意を払う必要がある。この分析の結果から、気候変化が与える影響として、現在とは異なる植生へのシフトがシナリオ A では中国の約 33% で、シナリオ B では約 53% のグリッドセルでそれぞれ予測されることが示された。

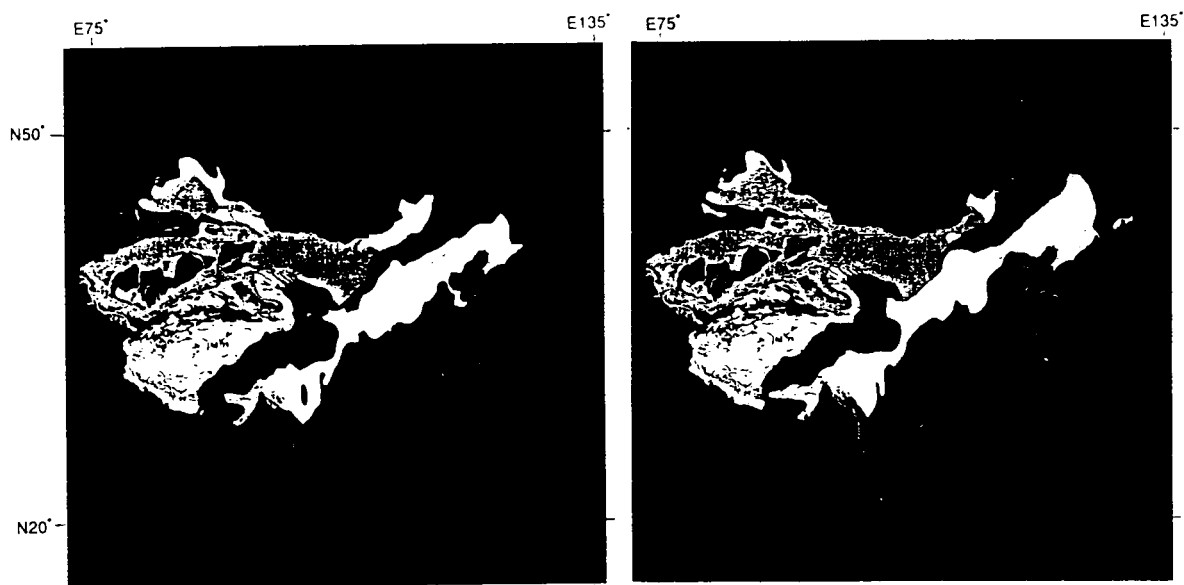


図 6 潜在的な植生分布図。

- (a)シナリオ A (年平均気温 2℃ 上昇、年降水量 20% 増加) のもとでロジットモデルにより推定。
- (b)シナリオ B (年平均気温 4℃ 上昇、年降水量 20% 増加) のもとでロジットモデルにより推定。

4.3 東アジアの植物生産への気候温暖化と土地利用変化の影響

全ての計算は緯度方向1度と経度方向1度のメッシュグリッドについて行った。その結果、研究対象地域上のグリッド化した平均気候データは、計算機器上各グリッドのNPP値に変換した。それらの資料を用いて、東アジア・東南アジア全域のNPP分布図を作成した。この研究対象地域の南部・東部の沿岸地域およびインドネシア島嶼域は、乾燥・寒冷気候の卓越する内陸域に比べて、生産力がかなり高い。このことは、1年を通じて高温・多湿なことに関係している。特に、熱帯雨林に密に覆われているインドネシア島嶼域のNPPは20~25 t 乾物/(ha・年)以上であり、アマゾン流域及び熱帯中央アフリカとならんで、世界で最も生産力の高い地域の一つである。一方、乾いて寒冷な気候をもつ内陸域及び高山・高原地域は、沿岸地域及びインドネシア島嶼域に比べて生産力が著しく低いのは、内陸域・高山域の気候要素の組合せが植生の成育にあまり好適でないため、夏季には暑くて乾いた天候が、冬季には低温で乾いた天候が卓越する。また、この地域が各地区の気候条件と土壌条件に適した自然植生によって完全に被覆されているという仮定で、研究対象地域の自然植生のポテンシャル全純生産量(TNP₀, t 乾物/年)を計算するためにNPP分布図を利用した。TNP₀の計算は、表4に示すように四つの亜領域I, II, III, IVについて行った。それぞれ乾燥砂漠域、冷/暖温帯域、亜熱帯/熱帯域および熱帯海洋域にほぼ対応している。

以上のような方法で得た結果が、2×CO₂温暖気候下でのTNP₀の値と一緒に表4に示す。平年気候下でのこの地域のポテンシャル全純生産量(TNP_{0,n})は世界大陸のTNP_{0,n}の約17%で、23.26×10⁹t 乾物/年になる³¹⁾。亜地域-Iは研究対象地域の面積の約22%を占めているが、対象地域の総バイオマス生産量への寄与はわずか約2%にすぎない。このことは、この亜地域の気候が非常に乾いていて植物生産力が低いためである。一方、亜地域-IIIとIVは亜熱帯森林と熱帯林に覆われているので生産力が高く、研究対象地域のバイオマス生産量の約82%を担っている。植物の成長は気候の変化に敏感である。それゆえ、大気中のCO₂濃度の上昇によって生ずる気候変化は陸上植生に著しい影響を及ぼすものと思われる。このため植生の純一次生産力および植生の分布に変化が生ずるだろう。GISS-, GFDL-, UKMO-気候モデルから求めた温暖化気候シナリオからNPPとTNPへの2×CO₂温暖化気候の影響の次の結論が得られる：

- (1)NPPの高い地域は、気候変化に対応して現在の分布より、より北の方へ移動する。
- (2)等NPP地域の緯度方向への移動と高さ方向への移動は、現気候下での高生産力地帯より、現気候下で生産力の低い地帯でより著しい。各亜地域および全研究対象地域の全純生産量(TNP₀)への気候温暖化の影響を定量的に評価するため、相対全純生産量(RTNP)を求めた。ここで、TNP_{0,n}

表4 平年・温暖化気候下における研究対象地域のポテンシャルな全純生産量(TNP₀)

地区	面積 10 ⁹ ha	平年気温 TNP _{0,n} 10 ⁹ t 乾物/年	温暖化気候 TNP _{0,w} , 10 ⁹ t 乾物/年		
			GISS	GFDL	UKMO
I	0.433	0.474	0.662	0.689	0.721
II	0.500	3.750	4.360	4.140	4.510
III	0.733	11.22	11.90	12.60	12.40
IV	0.292	7.760	9.380	9.060	8.370
計	1.958	23.26	26.30	26.50	26.10

添字 n と w は平年気候下と温暖化気候下の TNP₀ を示す。

と $TNP_{0,w}$ は平年気候条件下、および各温暖化気候シナリオ下での全純生産量である。図 6 の分布曲線上に示されているように、RTNP の値は GISS シナリオ下での III-亜地域のための 1.060 から UKMO シナリオ下での I-亜地帯のための 1.142 まで広がっている。しかしながら、研究対象地域全体についてみると、RTNP の変化は左程大きくなく、UKMO シナリオ下での 1.125 から GFDL シナリオでの 1.142 までの間にあった。もしも自然植生が急速な移動を通じて気候帯の急激な移行に適応しうるならば、この研究対象地域の自然植生のポテンシャルな全純生産量は、平年気候条件下でのそれより約 10% 増加すると思われる。しかしながら、もしも CO_2 濃度の倍増が 2050 年に生ずると、種々な樹種にとっての気候的適域の移動速度は、約 10 km/年になる。この移動速度は後氷期間の花粉分析から得られた主要な樹種の移動速度よりいちじるしく大きい²⁸⁾。それゆえに、気候適域の移動への陸上植生の適応はかなり遅れ、いくつかの植物は衰退し、そしてバイオマス生産は低下するものと思われる。

インドネシア共和国の TNP への土地利用の影響について、植物生産に対する人類の土地利用の影響が、現時点ではあまり大きくないことが分かった。しかしながら、この国の相対全純生産量は近い将来かなり急速に減少することが予想される。このため、この国のバイオマスおよび全純生産量は急減するものと思われる。同様な結果が、東南アジア全域についても起こるものと予想された³²⁾。

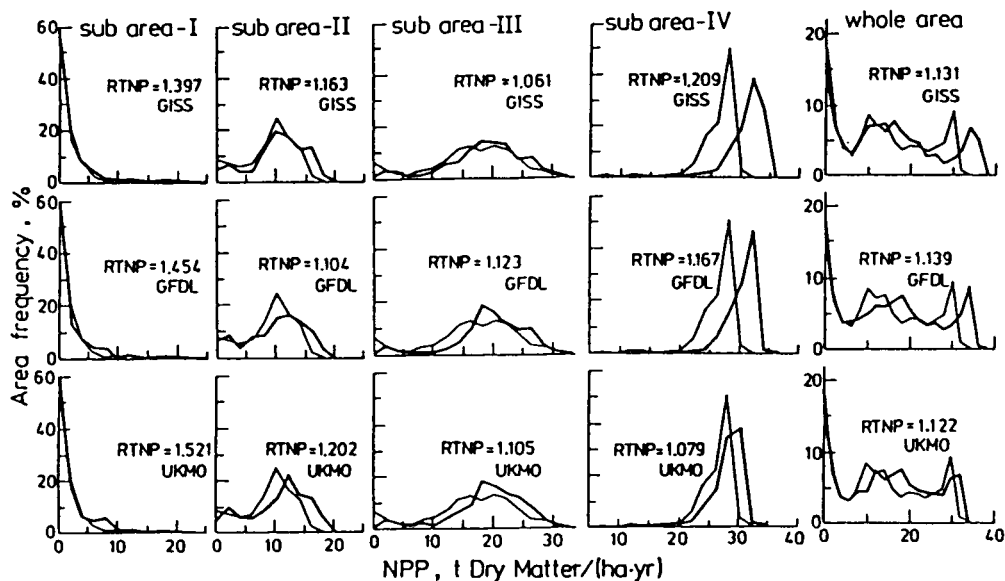


図 6 NPP 値別の土地面積分布への気候温暖化の影響

4.4 温暖化が日本の植物季節分布に及ぶ影響の予測

1953 年から 1990 年までの 38 年間の毎年のソメイヨシノ、ウメ・ツバキ・タンポポ・ソメイヨシノ・ヤマツツジ・ノダフジ・ヤマハギ・アジサイ・サルスベリ・ススキ・イチョウ・イロハカエデの植物季節データと年平均気温と月平均気温データを使用して温暖化による植物季節の開花・発芽日について 1℃、2℃および 3℃上昇した場合の影響予測マップを作成した²³⁾。

植物季節の種は日本におけるそれぞれの測定点での植物季節と月平均気温との関係式を用いて予測図を作成したが、それぞれの地点の年平均気温、月平均気温及び植物季節との回帰式が分か

らないと予想しがたい。そこで、これらの植物季節（開花・発芽・紅葉・黄葉・落葉日）と緯度・経度・海拔高度・年平均気温などとの関係式を求めた。1951-80年の30年間の年平均気温と緯度の関係を見ると相関は高く、相関係数は $r^2=0.837$ である。緯度1度北へ移動すると年平均気温0.9℃上昇するが緯度・経度・海拔高度の3要素の回帰式を用いて年平均気温と植物季節を表すと、

$$y = a + b\phi + c\lambda + dh$$

ϕ : 緯度 (°N), λ : 経度, h : 海拔高度

これによると、表6に示すように、年平均気温と緯度・経度・海拔高度の3要素の重相関係数は高く、 $r^2=0.976$ と高くなり、北に緯度1度シフトすると気温は0.967℃下がり、東に経度1度で0.076℃上がり、海拔1m上がる毎に0.06℃下がる。つまり、年平均気温が1℃上昇すると緯度は約1度北へシフトすることになる。植物季節（35年平均）と緯度との関係は高く、緯度1度シフトする速度は種によって異なる。最も相関係数が高いソメイヨシノの開花日で見ると緯度が北へ1度シフトすると4.6日遅くなり、東に1度シフトすると0.56日早くなり、海拔高度1mで0.012日遅くなる。ウメは北に1度で13.123日遅くなり、東に1度で2.076日早くなり、海拔高度1mで0.055日遅くなる。タンポポ、アジサイ（装飾花）の開花、イチョウの発芽が緯度・経度・海拔高度と相関が高い。アジサイ（真花）、ノダフジ、サルスベリは緯度のみの相関が高く、ツバキ、ススキ、ヤマハギは緯度・海拔高度と相関が高く現れた。イチョウ、イロハカエデの紅葉・黄葉・落葉日は緯度・経度・海拔高度との関係は深く、早遅の関係が開花・発芽日とは逆になる。イチョウの黄葉・落葉は北から1度で4日早く、東1度で約2日遅く、海拔高度1mで0.04日早くなる。このように緯度・経度・海拔高度・平均気温から各々の生物季節の関係式で表すことが出来た。

表6 日本における植物季節と緯度・経度・海拔高度の関係。 $y=a+b\phi+c\lambda+dh$

y	a	b	c	$d(m)$	r^2
平均気温 (平年値)	38.494	-0.967	0.076	-0.060	0.976
ウメ開花	-135.576	13.123	-2.076	0.055	0.863
タンポポ開花	85.572	11.843	-3.153	0.033	0.739
ツバキ開花	-266.371	8.765	-	0.085	0.564
アジサイ (装飾花) 開花	127.499	6.181	-1.376	0.029	0.889
アジサイ (真花) 開花	-20.414	5.364	-	-	0.843
ノダフジ開花	77.588	5.481	-	-	0.924
ソメイヨシノ開花	3.201	4.746	-0.572	0.012	0.929
ソメイヨシノ満開	13.711	4.121	-0.438	0.01	0.910
ヤマツツジ開花	91.825	4.405	-0.977	-	0.565
イチョウ発芽	27.864	3.908	-0.469	0.012	0.835
サルスベリ開花	84.349	3.649	-	-	0.719
ススキ開花	353.870	-2.814	-	-0.042	0.638
ヤマハギ開花	337.350	-2.717	-	-0.036	0.370
イチョウ黄葉	303.126	-4.263	1.210	-0.022	0.667
イチョウ落葉	322.879	-4.417	1.123	-0.023	0.770
イロハカエデ紅葉	278.166	-5.571	1.777	-0.039	0.721
イロハカエデ落葉	337.627	-5.847	1.545	-0.037	0.787

4.5 植物季節に及ぼす地球温暖化の影響—エル・ニーニョが植物季節・農作物収量・自然災害に及ぼす諸例—

日本のサクラの開花日、南大東島におけるサトウキビの収穫面積、インドネシアの乾季と雨季、インドネシアの農作物収穫と生産、について、エル・ニーニョ・イベント年（エル・ニーニョ・イベント年）と、ラ・ニーニャ・イベント年との差を明らかにした。表7によると、差は極めて明らかである。エル・ニーニョ・イベント（エル・ニーニョ・イベント）年には早春の気温の高いことがラ・ニーニャ・イベント年には早春の気温の低いことが、その原因であると考えられる。

次に南大東島のサトウキビの収穫面積の年による偏差をエル・ニーニョ・イベント年とラ・ニーニャ・イベント年で比較した。表8では明らかに両者の間では偏差の正負に対照的な差がある。すなわち、エル・ニーニョ・イベント年には夏植えは負、春植えは正、株出しは負の偏差がみられる。これは、夏、北太平洋高気圧がエル・ニーニョ・イベント年には強化され干ばつとなるので、植付け時の干ばつが夏植えには敏感に影響されるためである。春植えはすでに充分成長しているため夏の干ばつは影響ない。次に、例外的な場合を述べると、a)は1978年春の低温のため、ラ・ニーニャ・イベント年と似た状態となった。b)は1981年にすでに干ばつが発生し、その影響があり1982年は低温、すなわち、1982/83年のように長期間にまたがり極めて厳しい干ばつの場合には春植えから、その前年の影響が大きく負の偏差となっている。c)1982/83年は春植え・夏植えともに不作であったからこれを補充する農民の耕作対策のため、株出しの収穫面積が異常に高い正偏差となった。これは、いわゆる気候変動に対する適応(adjustment)の例として興味のある例であろう。IPCC1995で「適応」の研究が重要と指摘されているが、今後、このような事例をたくさん集める必要がある。d)1977年の春は南大東島ではラ・ニーニャ年にもかかわらず高温であった。また、夏植えの補てん現象と理解することもできよう。e)1988年と1989年の春はラ・ニーニャ年にもかかわらず高温であった。このためエル・ニーニョ年に似た効果が弱いながら現れたと考えられる。気温はエル・ニーニョ・イベント年には高く、降水量は少ない。すなわち干ばつの傾向が強い。これに反し、ラ・ニーニャ・イベント年には気温は低く、降水は多い。そのコントラストは極めて明らかである。それに対応して、収穫面積はエル・ニーニョ・イベント年には春植えのみ正、夏植えも株出しも負の偏差となり、ラ・ニーニャ・イベント年には春植えのみ負、夏植えも株出しも正の偏差となる。南大東島では夏植えと株出しで栽培面積のほぼ80%を占めているので、このエル・ニーニョ・イベント年とラ・ニーニャ・イベント年の差は重大である。

南大東島のサトウキビの収穫面積の変動は、いわゆる温帯の植物季節の変動とは違う現象ではあるが、乾燥・湿潤、高温・低温は亜熱帯高気圧である北太平洋高気圧の活動、すなわちその範

表9 エル・ニーニョ・イベント年と、ラ・ニーニャ・イベント年におけるサクラの開花日の遅速

開花日	エル・ニーニョ・イベント年*	ラ・ニーニャ・イベント年**
非常に早い	18	0
早い	30	5
やや早い	9	5
やや遅い	5	18
遅い	3	23
非常に遅い	0	14
合計***	65	65

* 1972,1976,1977,1982,1987年の集計。

** 1965,1970,1974,1975,1988年の集計。

*** 日本は気象庁により15の生物季節予想区に区分されている。沖縄と南九州をデータの不均一性のため省いたので、13区×5年=65となる。

表 10 南大東島のエル・ニーニョ・イベント年とラ・ニーニャ・イベント年のサトウキビの収穫面積の偏差(ha)

イベント	年	夏植え	春植え	株出し
エ	1972/73*	-20	+27	33 ha
ル	1977/78	+23 ^{a)}	-6	-7
・イ	1982/83	-34	-38 ^{b)}	+77 ^{c)}
ニベ	1987/88	-15	+58	-16
丨ン	1991/92	-89	+26	-23
ニト	平均	-27	+26	-1
ヨ年			[+25]****	[-20]****
ラ	1971/72	+22	-3	-31 ha
・イ	1973/74	+11	-35	+23
ニベ	1976/77**	+33	-5	-25 ^{d)}
丨ン	1988/89	-1 ^{e)}	-51	+53
ニト	1992/93***	-80	-47	-6
ヤ年	平均	+29	-28	+16

* 例えば、1972/1973 は 1972/73 年の冬と 1973 年の春を意味する。

** ラ・ニーニャ・イベントは 1975/76 年。

*** 1992/93 年は典型的なラ・ニーニャ・イベント年ではないが、数年継続したエル・ニーニョ・イベント年の中ではラ・ニーニャの傾向が強かった。

**** 1982/83 年の値を除いた平均値。

困（覆う地域の広さ）や位置や強弱の年による変動によって、南大東島における乾季・雨季の差異を生じるといふ亜熱帯の季節現象の一つと考えられる。栽培季節別の作物分析は、影響を受ける例を季節別にとらえて研究を進める必要がある。その影響は、季節によって正負、全く逆の影響となる場合が少なくないからである。自然災害については、台風・梅雨・秋霖などによって発生する豪雨による風水害、または前線活動や雷雨による大雨や集中豪雨などによる水害、および崖崩れ、地滑りなどを含む災害と、冬季の大雪・豪雪などによる災害である。風水害はエル・ニーニョ・イベント年に著しく多く、6~8 倍もラ・ニーニャ・イベント年より多い。これは、わが国としては無視できない状況であろう。特に住家の一部破壊では 10 倍以上も多い。一方、冬の豪雨・大雪による災害は、ラ・ニーニャ・イベント年に著しく多く、5~10 倍も多い。住家の 1 部破損は 2 桁も多いことは驚くべき事実と言えよう。暖冬となるエル・ニーニョ・イベント年には雪による災害は少ないが、ラ・ニーニャ・イベント年には厳重な注意を要する。また、災害を自然界における突然現象とみれば、豪雨・大雨は暖候季の季節現象のひとつであり、雪害は寒候季の季節現象のひとつと考えることも可能である。これが今後のより詳しい研究が必要と思われる理由である。

4.6 南西諸島の植物相の温帯要素—その分類地理学的考察と地球温暖化が及ぼす影響—

南西諸島は、過去の気候変動ならびに大気中の CO₂ の濃度の増加にともなう地球温暖化の影響を他地域よりも強く受ける地域である。本研究では南西諸島の植物相ならびにそれへの温暖化が及ぼす影響について多角的に考察を行った結果、以下のことが判明した。

- 1) 南西諸島の植物相は熱帯と亜熱帯の要素が主体であり、熱帯要素は島弧にそって南から北へと侵入したと考えられている。植物相構成種の約半数の 700 種はトカラ海峡以北の日本には分布しない。
- 2) 屋久島には、1170 種以上の維管束植物がこの島に自生するが、多数の固有種および固有種内分類群がある。そのうち約 200 種がここを分布の南限とする温帯種である。
- 3) 南西諸島の唯一の固有属であるヤエヤマヤシは、小笠原にも分布するノヤシ属の分布域の西の縁で分化したと考えられる。
- 4) 南西諸島の温帯性と温帯起源の種は、過去の寒冷気候下に九州などから移住し、

その後の温暖化では島の高所で生き延びたか、亜熱帯性気候に適応していったと考えられる。5) 南西諸島で見出された温帯性の種の一部に九州以北の集団と異なる変異が見出されるが、その分類学的に区別の妥当性は今後の検討課題である。6) 南西諸島ではウツギ属に固有種、アマミウツギ *D. naseana*、ヤエヤマウツギ *D. yaeyamensis* がある。ヤエヤマウツギの染色体数は $2n=36$ 、アマミウツギは $2n=52$ で、前者は2倍体、後者は4倍体であった。7) アジサイ属では、ヤエヤマコンテリギが西表島では $2n=144$ 、石垣島では $2n=180$ 、それぞれ8倍体と10倍体である。ヤクシマアジサイとトカラアジサイは $2n=36$ であり、2倍体である。リュウキュウコンテリギには $2n=36$ の2倍体と $2n=72$ の4倍体の2つのサイトレースがあった。8) ヤクシマアジサイの集団間の遺伝的距離とトカラアジサイの集団間の遺伝的距離は0.16以下と小さいが、それらとリュウキュウコンテリギの距離は0.32と離れている。トカラアジサイとヤクシマアジサイの間の遺伝的距離は同種内の集団間でみられる値より低い、リュウキュウコンテリギとトカラアジサイ（ヤクシマアジサイを含む）の間の距離はかなり大きいことが判明した。9) 南西諸島の温帯性あるいは一部の温帯起源は、現況下での分布域も生育環境も限定され、予測される気候変化によって生じる新たな環境の中で、従来の生育環境と同質の生育場所を確保しえる可能性はきわめて低く、新たな環境への適応がない限り、絶滅を余儀なくされるであろう。10) 大気中の二酸化炭素の増加による地球規模の気候変動のシナリオに対する反応を評価するためには、それぞれの種の詳細な分布域を明らかにすることが急務である。

4.7 陸水生態系の将来予測手法の開発に関する研究

作成した鉛直一次元水温予測モデルは、従来ほとんどのモデルで一定値として与えていた渦動拡散係数を成層の強度及び風速に応じて連続的に変化させることで、年間を通して湯の湖の循環期・成層期の水温分布を再現を可能にし、本水温モデルの検証のため、同一のパラメータを用いて、諏訪湖、野尻湖、長柄ダムに適用した結果、いずれも水温の鉛直分布の季節変化をよく再現できた。以上の結果から、本鉛直一次元水温予測モデルの計算によって気象等の環境が変化した場合での湖水水温の将来予測が可能であると考えられる。湯の湖において鉛直一次元水温予測モデルと水界生態系モデルとを連結させた結果、植物プランクトン量、無機態栄養塩量、溶存酸素濃度の季節変化のパターンを再現することができた。次に、鉛直一次元水温予測モデルおよび水界生態系モデルを用い、湯の湖において気温および流入水温が上昇したと仮定し、その時の将来予測計算を行った結果、気温が1℃上昇するにあたり、表層は0.5～1℃、底層は0～0.5℃上昇している。特に、表層は夏季の成層期に、底層は循環期に最も水温の上昇度が高く、成層期はより成層が安定化する傾向を示した。

生態系においては、地球温暖化による気温上昇により、成層化が促進されるため、秋口の循環開始時期により高い植物プランクトンの増殖が見られ、循環開始時期の植物プランクトンによる水質悪化がより促進される可能性が示唆された（図7）。

5. まとめ及び本研究により得られた成果

5.1 気候変化が日本の植生分布に及ぼす影響の予測

年平均気温1℃の上昇によっても現在とは別の植生分類へシフトすることが推定される割合は全グリッドセルの約23%に及ぶことが示された。第一に、精度の問題であるが、このモデル的中率は76%であるので、それに対応した誤判別が見込まれることに注意しなければならない。つぎにポテンシャルシフトの生態学的な意味であるが、多くの生態学者が指摘するように植物種の可能な移動速度は地球温暖化による潜在的なハビタットの移動速度よりも遅いかもしい。さらに植物種の移動速度は種ごとに異なる。従ってすべての植物群落が同じ構成、同じ構造で別

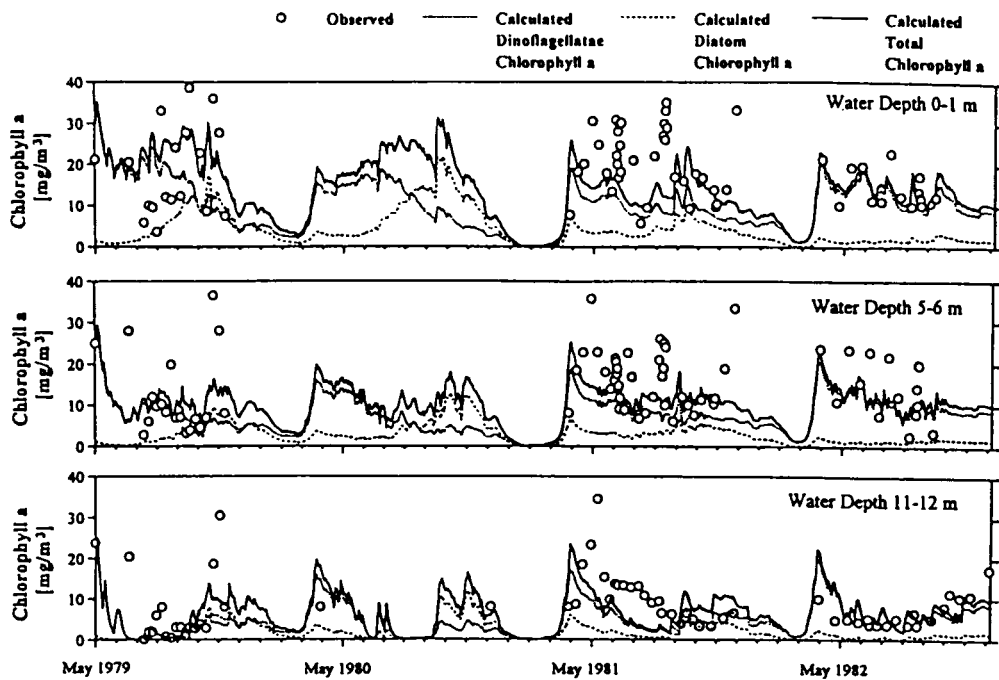


図7 湯の湖における植物プランクトン濃度の予測結果 (1979年～1982年)

の生息地に移動しようとは考えにくい。植物種の移動が潜在的なハビタットの移動に追いつかない地域では、生態系に何らかの変化が生じるだろう。しかし、本研究で用いられた方法論はこのような変化が比較的緩やかな種の「競争による置き換わり」なのか、あるいは植生の崩壊とも言うべき「破滅的な減少」なのかを予測することは困難である。さらに、このモデルは将来生じうるすべての環境変化を含んでいない。特に大気中の二酸化炭素濃度の増加によって直接的に引き起こされる肥料効果は、気温、降水量および他の気候変化に対する植物の反応を変えてしまう可能性がある。

5.2 気候変化が中国の植生分布に及ぼす影響の予測

中国の生態系は、1) 気温の3℃上昇が見込まれる来世紀には今世紀よりも大きな変化が生じる可能性がある。2) 現存植生の分布を年平均気温と年降水量とで説明するために、判別分析モデルと多項ロジットモデルを試みたところ、ロジットモデルの方が判別分析モデルよりも的中率と推定された植生図の地理的パターンの点ですぐれていた。3) ロジットモデルの的中率は68.7%であり、植生を九つに分類した場合、約7割が年平均気温と年降水量で説明されることが示された。その残差は、本研究で用いられた気候データの空間精度が十分でないことによって生じたり、あるいは植生分布が部分的に太陽放射、風、雪、土壌特性、傾斜などの他の環境要因に依存しているためと考えられた。4) 気候変化によるポテンシャルシフトをロジットモデルにより予測した。Robock et al.によって提示された二つのシナリオ、すなわちシナリオA、シナリオBを用いた結果、(1) 現在、中国北東部に分布する針葉樹林はその国境内の生息地を失うかもしれない、(2) 中国東部に分布する広葉樹林はシナリオAでは北方に約3度、シナリオBでは約5度シフトする、(3) 砂漠地域が面積を広げ、とくにシナリオBの場合、ステップおよびサバンナが減少する。気候変化が

植生に及ぼす影響は、東部では森林の潜在的なハビタットが急速に北方にシフトし、西部では乾燥化によりステップや湿地が砂漠に置き換わると予測される。

5.3 東アジアの植物生産への気候温暖化と土地利用変化の影響

東アジア・東南アジアの自然植生のバイオマス生産を計算し、バイオマス生産への $2\times\text{CO}_2$ 気候変化の影響を評価した。また、インドネシア共和国の全純生産量への土地利用の影響の計算も行った結果、1) 筑後モデルを用いての計算によると、この研究対象地域のポテンシャル全純生産量(TNP_0)は232.6億t乾物/年と推計された。亜熱帯林および熱帯雨林のよく茂っているⅢ-およびⅣ-亜地域は、全生産量のほぼ80%を担うことがわかった。2) Ⅰ-亜地域は研究対象地域の土地面積の22%を占めているけれども、全純生産量へのこの亜地域の寄与は非常に低く、わずか2%にすぎなかった。これは、この亜地域の自然条件が寒冷かつ乾燥で、植物の成長にまったく不適当なためである。3) $2\times\text{CO}_2$ レベルのために三つの地球気候モデル(GISS, GFLD, UKMO)でえた気候シナリオを用いて、研究対象地域の全純生産量への気候温暖化の影響を評価した。もしも、自然植生が気候的な適域に移動に従って十分早くシフトすると仮定するならば、この対象地域の全純一次生産量は $2\times\text{CO}_2$ 気候条件下では、約10%増加すると予想された。4) 全純一次生産量への土地利用による環境劣化の影響を評価するために、インドネシア共和国の土地利用データを用いて計算を行った。インドネシア共和国の現在の全純一次生産量はポテンシャル値の約88%になることが分かった。この値は日本および世界全体についての値より大きいけれども、この国の人口爆発と経済発展を考えると、近い将来急激に低下するものと思われる。

5.4 温暖化が日本の植物季節分布に及ぼす影響の予測

生物季節観測データを使用して、温暖化現象に伴う生物季節の影響予測分布図を作成することによって、 1°C 、 2°C 、 3°C の平均気温が上昇した場合の開花日予測をすることができた。21世紀末を迎えると、地球の温度は3度上昇するとも最近では 2°C 上昇するともいわれており、植物季節と気温のシュミレーションによると、例えば4月5日の桜前線は現在の関東北部から、東北・北陸まで緯度で約3度北上する。1) 温暖化における開花・満開・発芽・黄葉・紅葉・落葉日のシフトの程度は、月平均気温が低い季節は 1°C 上昇するとシフトの割合は大きくあらわれ、冬から春にかけては温暖化すると植物季節は早くなり、サルスベリの種を境にヤマハギ、ススキはシフトがある地点から早遅が逆転する。その他の植物季節も暖冬による春に開花する種、夏から秋にかけて高温による紅葉や落葉する種により気温 1°C 上昇すると開花や発芽・紅葉・落葉日のシフトする程度が異なるが、一般には同じ季節に開花や紅葉日を迎える種は温度によるシフトの幅が近似値を示し、2) その植物季節と月平均気温との相関関係は北ほど相関係数が高い傾向があった。3) それぞれの種の植物季節と緯度・経度・海拔高度との関係を明らかにした。

5.5 植物季節に及ぼす地球温暖化の影響

—エンソが植物季節・農作物収量・自然災害に及ぼす諸例—

エンソ(エル・ニーニョ)イベントの植物季節・農業生産・自然災害に及ぼす影響をまとめた。1) 気温を反映しているソメイヨシノの開花はエル・ニーニョ・イベント年には早い。また、自然災害のうち初夏の梅雨・台風・秋霖季を代表している風水害はエル・ニーニョ・イベント年には明らかに多い。これは活発な前線活動・熱帯低気圧の来襲などわが国の位置と寒帯前線帯の位置とが関連していると思われる。一方、冬には暖冬で雪害は極めて少ない。2) 南大東島は亜熱帯高気圧圏内にあって、エル・ニーニョ・イベント年には高温、少雨傾向なのでサトウキビは夏植え・

株出しの収穫面積は負の偏差となる。量は少ないが春植えは正偏差となる。3) インドネシアではエル・ニーニョ・イベント年には東モンスーン季は長く強く、従って干ばつとなり水稲の収穫は少ない。以上の結果は、ラ・ニーニャ・イベント年にはまったく正負、高低、遅速、多少、増減が逆になる。これは極めて明確である。従って季節別にまた対象別にさらに季節学的詳細な検討を種々の現象について行うことが必要である。

5.6 南西諸島の植物相の温帯要素：その分類地理学的考察と地理温暖化が及ぼす影響

本研究は南西諸島に見られる温帯性または温帯起源の植物に焦点を置き、植物相並びにそれへの影響についてについて結論の章で多角的考察を試みた。

5.7 陸水生態系の従来予測手法の開発に関する研究

研究で開発した鉛直一次元水温予測モデルは、従来一定として与えていた渦動拡散係数を成層強度と風速から変動させることで、年間を通して連続的に水温分布を再現可能にし、また他の湖沼についても再現が可能であった。また結氷モデルにより結氷期間の再現もできた。本研究で開発した水界生態系モデルでは植物プランクトン、溶存無機態栄養塩濃度、および溶存酸素濃度の季節変化のパターンおよびレベルにおいて再現性を得た。また底泥サブモデルにおいても底泥中の懸濁態栄養塩量をほぼ再現できた。ニューラルネットワークモデルを用いて、霞ヶ浦の *Microcystis* spp. の個体数の季節変化を再現することが出来た。温暖化が陸水生態系の影響予測として、気温を1℃から4℃まで上昇させたときのシミュレーションを水温モデル、生態系モデル、ニューラルネットワークモデルを用いて行った。湯の湖において気温が上昇した場合の将来予測を行なった結果、夏場の水温成層がより安定化し、これにより秋の循環開始時期により植物プランクトンが増え、この時期に水質がより悪化する可能性があることが示唆された。また、霞ヶ浦では、気温が上昇することにより *Microcystis* spp. の個体数が増加することが予想された。

引用文献

- 1) Miyawaki, A. (ed.) (1983): Handbook of Japanese Vegetation (revised edition). Shibundo, Tokyo, 872p. (in Japanese).
- 2) Vose, R.S., Heim, R., Schmoyer, R.L., Karl, T.R., Steurer, P.M., Eischeid, J.K. and Peterson, T.C. (1992): The Global Historical Climatology Network - Long-term Monthly Temperature, Precipitation, Sea Level Pressure and Station Level Pressure Data. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA, 311p.
- 3) Walter, H. and Lieth, H. (1960-67): Klimadiagramm - Weltatlas (in 3 Lief.), G. Fischer, Jena.
- 4) Walker, E. (1976): Flora of Okinawa and the Southern Ryukyu Islands. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.
- 5) Neilson, R. P. and King, G. A. (1991): Continental Scale Biome Responses to Climatic Change. The EPA Environmental Research Laboratory in Corvallis, Oregon, 31p.
- 6) Walter, H. (1964): Die Vegetation der Erde 1. Gustav Fischer, 592p.
- 7) Walter, H. (1968): Die Vegetation der Erde 2. Gustav Fischer, 1001p.
- 8) Fang, J. Y. and Yoda, K. (1988): Climate and Vegetation in China(1). Ecol. Res., 3, 37-51.
- 9) Publication Committee of Vegetation Map of China (1980): Vegetation Map of China. Sci. Publishing Office, 1375p. (in Chinese).
- 10) Kira, T. (1945): New Method for Classifying Climate in East Asia. Kyoto Univ., Laboratory of Horticulture, 23p. (in Japanese).
- 11) Efimova, N. A. (1977): Solar Energy and Plant Productivity (translated into Japanese by Z. Uchijima, 1994). Association for International Cooperation of Agr. and Forestry, No.14, 132p. (in Japanese).
- 12) Uchijima, Z. and Seino, H. (1987): Maps of Net Primary Productivity of Natural Vegetation on Continents. Special Report of NIAES and Kyushu Agr. Exp. Stat., 121p. (in Japanese with English summary).

- 13)Seino, H. and Uchijima, Z. (1992): Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation. *J. Agr. Met.*, **48**, 38-48.
- 14)Ohta, S., Uchijima, Z. and Oshima, Y. (1993): Probable effects of CO₂ induced climatic change on net primary productivity of natural vegetation in East Asia. *Ecol. Res.*, **8**, 199-213.
- 15)Uchijima, Z. and Seino, H. (1985): Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation. (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *J. Agr. Meteorol.*, **40**, 343-352.
- 16)Uchijima, Z. and Seino, H. (1985) Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo model. *J. Agr. Met.*, **40**, 343-352.
- 17)Uchijima, Z. and Seino, H. (1988b): Probable effects of CO₂-induced climatic change on agroclimatic resources and net primary productivity in Japan. *Bull. Natl. Inst. Agro- Environ. Sci.*, No.4, 67-83.
- 18)Uchijima, Z., Seino, H. and Nogami, M. (1992): Probable shifts of natural vegetation in Japan due to CO₂-climatic warming. NIAES Series No. 1 (Ecological Processes in Agro-ecosystems), National Institute of Agro-Environmental Sciences, 189-201.
- 19)Lieth, H. (1978): Vegetation and CO₂ changes. In: *Environ. Carbon Dioxide, Climate and Society* (ed. by Williams). Pergamon Press, 103-109.
- 20)Iwaki, H. (1981): Geographical distribution of phytomass on Japan. *Environ. Inform. Sci.*, **40**, 54-60. (in Japanese).
- 21)Whittaker, R. H. and Likens, G. E. (1975): The biosphere and man. In: *Productivity of the Biosphere* (eds.) H. Lieth and R.H. Whittaker, Springer Verlag, 305-328.
- 22)気象庁 (1988): 生物季節観測30年報. 気象庁技術報告, 第110号, 233p.
- 23)Kai, K., Kainuma, M. and Murakoshi, N. (1996): Effects global warming on the phenological observation in Japan. In: *Climate Change and Plants in East Asia*, (eds.) Omasa, et al., Springer-Verlag, Tokyo, 85-92.
- 24)Yoshino, M. and Yasunari, T. (1987): Climatic anomalies of El Nino and Anti-El Nino years and their socio-economic impacts in Japan. In: *The Societal Impacts associated with the 1982-83 World-wide Climate Anomalies*. Ed. by M. Glantz et al., NCAR and UNEP, 105p.
- 25)Huber, W.C., Harleman, D.R.F. and Ryan, P.J. (1972): Temperature predication in stararified reservoirs. *Proceedings of American Society of Civil Engineers, Jour. Hydraulics Div.*, Paper 8839, 654-666.
- 26)Hosomi, M., Okada, M. and Sudo, R. (1991): Assessment of eutrophication control programs using an ecological model for a dimictic lake. *Wat. Sci. Tech.*, **24**(6), 339-348.
- 27)Greens, G.M. (1981): Simulation of ice-cover groth and decay in one dimension on th eupper St. Lawrence River. NOAA Technical Memorandum ERL CLERL-36, PB82-114208.
- 30)Dillon, W. R. and Goldstein, M. (1984): *Multivariate Analysis - Methods and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 587p.
- 28)Huntley, B. and Birks, H. J. B. (1983): *An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe: 0-13000 Years Ago*. Cambridge University Press, Cambridge, 667p.
- 29)Robock, A., Turco, R. P., Harwell, M. A., Ackerman, T. P., Andressen, R., Chang, H.-S. and Sivakumar, M. V. K. (1993): Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis. *Clim. Change*, **23**, 293-335.
- 31)Uchijima, Z., Ohta, S. and Ohbuchi, Y. (1994): Climatological Estimation of Dry Matter Production and Carbon Absorption of Natural Vegetation in the Indonesian Archipelago. *JIFPRO*, 40p.
- 32)Uchijima, Z. and Seino, H. (1988a): An agroclimatic method of estimating net primary productivity of natural vegetation. *JARQ*, **21**, 244-249.

6. 参考文献

- Omasa, K., et al. (1996): *Climate Change and Plants in East Asia*. Springer-Verlag, Tokyo, pp.215. with 61 Color.
- 国立環境研究所他(1996): 地球温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究. 平成5年度～平成7年度. 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, pp.169.
- Uchijima, Z. (1993): Climate and vegetation. *J. Geography*, **102**, 745-762..