

B-52 アジア太平洋地域における地球温暖化の局地植生への影響とその保全に関する研究  
(2) 中国の森林/草原植生に及ぼす地球温暖化の影響とその保全に関する研究

研究代表者 国立環境研究所地球環境研究センター 清水 英幸

環境庁国立環境研究所

地球環境研究センター

清水英幸・鄭 有斌

生物圏環境部

環境植物研究室

大政謙次

(委託先)

宮崎公立大学

内嶋善兵衛

平成8～10年度合計予算額 16,399千円

(平成10年度予算額 5,413千円)

**[要旨]**

中国の森林/草原植生に対する地球温暖化影響を予測するために、現地諸研究機関との研究協力体制を整備し、現地の植生・気候関連の諸資料の収集・実験用樹木の種子採取などを行った。

中国本土の植生気候・農業気候への地球温暖化の影響を予測するため、中国の気象資料および大気大循環モデル(MRI-CGCM)のシナリオ(年率1%で大気中の二酸化炭素濃度が暫時上昇、100年経過した場合)を用いて、中国本土の格子点群の予想気象値を解析し、以下の結果を得た。①温暖化期間100年では、年平均気温の上昇は北部の4～5℃から南部沿海地域の約2～3℃へと減少したが、全域においてIPCC報告(1995)の予想値(約2℃)より上回った。②「暖かさ指数」は北部の約50%から南部の10%弱へと変化するが、その絶対値は20～30℃・月の範囲にあった。③「有効積算気温」の増加は北部の約900℃・日から南部の約1000℃・日まで増加した。④中国の東部季節風地域では、暖かさ指数および有効積算気温の緯度に伴う変化は簡単な指数関数で近似でき、温暖化によるこれら温度資源の等量線の移動を予測できた。⑤有効積算温度分布では、東部では緯度と平行な等量線図が得られたが、西部地域(四川省中部以西：青藏高原地域や西北乾燥砂漠地域)では複雑であった。⑥雨量や純放射量から計算した「放射乾燥度」分布から、中国西部地域の放射乾燥度域や乾燥・砂漠気候域の存在を確認した。⑦100年後の各格子点の「乾湿係数」から、温暖化によって砂漠気候や草原気候が増加し、若干乾燥化が促進されることが推定された。

また、中国森林地域の主要樹木である、馬尾松、油松、千頭柏、杉木の4種に関して人工光型植物環境制御室を用い、地球温暖化に伴う環境変動に対する生育反応実験を行い、以下の結果を得た。①温度(25～37℃)－生長反応実験から、これら4種とも30℃程度から温度上昇による生育抑制が認められたが、特に杉木の生長は顕著に抑制された。②生長解析を行った結果、温度上昇による相対生長率(RGR)の抑制影響は、全種において純同化率(NAR)が影響を受けたことに関っており、光合成産物の分配はほとんど影響を受けていなかった。③湿度(RH40～70%)－生長実験から、乾燥化によって馬尾松が顕著な生育抑制を受けたが、他の種はほとんど影響を受けなかった。④生長解析の結果、馬尾松のRGRの変化は、NARの変化に関っており、また全種において光合成産物の分配には顕著な変化は認められなかった。⑤野外でこれらの樹木種は混在しているが、地球温暖化の進行により樹木種の分布や種組成が変化する可能性が示唆された。

[キーワード] 環境変動、森林／草原植生、生長、地球温暖化、中国

## 1. 序

IPCC報告(1995)にも指摘されているように、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などの地球温暖化ガスの濃度増加は、それ自体が植生に多大な影響を及ぼすが、また、植物の生育にとって重要な環境である気温の上昇や降水量の変化を引き起こす。地域によっては乾燥化の促進も予想されており、植生の脆弱化を促進することが懸念される。

中国には従来広大な森林／草原植生が存在するが、既に人為的な開発などによる土地利用変化や、多量の化石燃料の使用による環境汚染などによって、森林植生の劣化・衰退が問題となっている。地球温暖化による環境変動は、今後さらに大きなストレスとして、これらの地域植生の脆弱化に影響を及ぼすことが予想される。特にこれらの地域で現存植生が入り組んでいる境界域では、温暖化などの環境変動の影響が複雑に現れることが予想される。そこで、局地植生の生産力や分布の変化に及ぼす地球温暖化の影響を解明し、植生保全に資するために、資料や調査、実験などによる基礎的なデータの集積とその解析、またシミュレーションなどによる予測研究を推進する必要があると思われる。

## 2. 研究目的

本研究では、中国の森林／草原などの局地植生を対象にして、地球温暖化に伴う環境変動の植生の脆弱化に及ぼす影響予測を行うと共に、局地の植生保全に資する知見の集積を計ることを目的とする。このため、中国の諸研究機関との研究協力体制の整備を行うと共に、現地の植生分布や気象などに関する諸資料を収集、整理し、大気大循環モデルなどを用いて植生気候に対する地球温暖化の影響予測を行う。また、現地で主要植生調査などを実施し、現地に生育する主要樹木などの種子採取を行う。さらに、植物環境制御室などを用いて、これらの現地植物の種間競争や環境適応性などに関係するモデル実験を行う。これらの結果から、局地の植生生産力や植生の移動・遷移に及ぼす地球温暖化の影響について解析・予測する。

## 3. 中国の植生気候に及ぼす地球温暖化の影響予測

IPCC報告(1995)によると、来世紀半ばと来世紀末における人為的な気候温暖化は、それぞれ約1.0-1.5℃と約2.0-3.0℃になる。しかし、多くの大気大循環モデルから知られているように、温暖化の程度は緯度および経度によってかなり変化する。それゆえ、より実際的な研究を行うにはより実際的なモデルの出力を使用する必要がある。本研究では日本の気象庁・気象研究所で開発された大気大循環モデル(MRI-CGCM)の温暖化気候シナリオを使用した。この温暖化気候シナリオから北緯18～50度、東経90～130度域内に分布する格子点のシナリオ値(対照および1%CO<sub>2</sub>増加/年で100年後の月平均気温、月間降水量、地表面での月平均日別蒸発散量、下向き短波放射量)を用いて、中国本土の植生気候に及ぼす地球温暖化の影響予測を行った。

## 研究方法

### 大気大循環モデル

本研究で用いた大気大循環モデル(MRI-CGCM)の詳細はTokio et al (1995)に説明されている。

また、モデルからの出力結果のシナリオはCD-ROM (Vol.1、2)として公表されている。このモデルから、大気中のCO<sub>2</sub>濃度が年率1%で上昇した条件では、全球平均気温は傾向的に上昇し、50年後に約1.5℃、100年後には約2.5℃、現在より温暖化する可能性が予想される。また、気温上昇による大気の水蒸気包容能力の増加を反映して、降水量も年間量で約70mm増加する可能性がある。

このような気象変化は、当然各地域の気象条件を変化させ、自然植生、管理植生(農作物)そして人間社会へ影響を及ぼす。本研究では、中国本土をほぼ網羅する格子点を選び(図1)、各格子点の月別気象値を利用した。格子点網は東経90度から同130度まで、そして、北緯18度から同50度までを範囲としており、西部の乾燥・砂漠域と高山域を除いて中国本土のほとんどの地域を含んでいる。

本研究で用いた大気大循環モデルからの気候シナリオは次のような構成になっている。

- A<sub>1</sub> : CO<sub>2</sub>濃度の傾向的上昇(1%/年)
  - a : 濃度上昇開始から50年後
  - b : 濃度上昇開始から100年後
- A<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub>濃度一定(対照: 現在レベル)
- B : 気象要素(月別値)
  - a : 気温(℃)
  - b : 蒸発散量(mm/day)
  - c : 降水量(mm/day)
  - d : 正味全天日射量(W/m<sup>2</sup>)

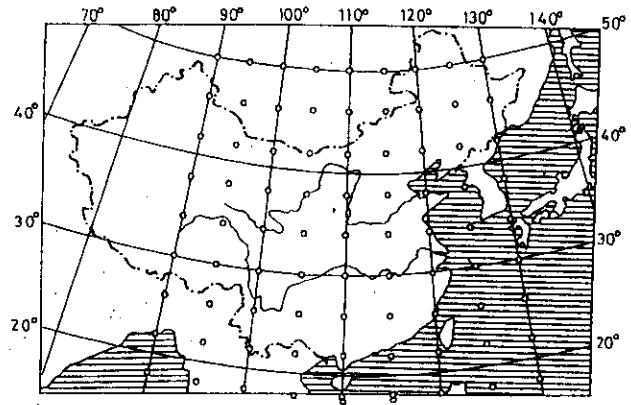


図1. 温暖化気候の予想に用いた中国本土上の格子点網

### 植生気候の評価

自然植生および管理植生の分布と生産力は、各地域の気候-植生気候資源の豊かさに密接に関係する。植生気候資源の豊かさは、「温度資源」と「水分供給度」の二つによって評価できる。

本研究では、地球温暖化の地域温度資源への影響の観点から、植生気候の変化を評価する温度資源の定量的評価のため、植物生態学および農業生態学の分野で広く利用される次の二つの気候指標を用いた。

$$\text{○暖かさ指数 (WI : } ^\circ\text{C}\cdot\text{月)} = \sum (T_i - 5), \quad T_i \geq 5^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\text{○有効積算気温 (}\sum T_{i0} : ^\circ\text{C}\cdot\text{日)} = \sum (T_j), \quad T_j \geq 10^\circ\text{C} \quad (2)$$

ここで、 $T_i$  : 月平均気温が5℃以上の期間の月平均気温(℃)、 $T_j$  : 日平均気温が10℃以上の期間の日平均気温(℃)である。

暖かさ指数(WI)は、古く吉良(1945a、b)が東アジアの気候区分のため提出して以来、日本および韓国、中国の研究者(Yim・Kira: 1975、1976、Fang・Yoda: 1988、1989、1990a、b、野上・大場: 1991、Uchijima et al: 1992)によって自然植生の分布やそれへの気候温暖化の影響評価のために利用されている。また、有効積算気温は、主として旧ソ連の農業気象・気候学者によって作物帯の配置の研究に利用され、中国でも作物カレンダーの設定、栽培適地・適期の解明のために広く利用されている(農林作物気候区画協作組編: 1987、李ら: 1988)。

水分供給度の指標としては、次の二つの気候指標を用いた。

$$\text{○放射乾燥度 (RDI)} = R_n / l r \quad (3)$$

$$\text{○乾湿係数 (K)} = P / (WI + 20), \quad 0 \leq WI \leq 100 \quad (4)$$

$$= 2P / (WI + 140), \quad 100 \leq WI \leq 200 \quad (4')$$

ここで、 $R_n$ ：年間純放射量(kcal/cm<sup>2</sup>)、 $l$ ：水の蒸発潜熱(0.581kcal/gH<sub>2</sub>O)、 $r$ ：年間降水量(cm)、であり、 $P$ ：年間降水量(mm)、 $WI$ ：暖かさ指数である。

放射乾燥度(RDI)は自然植生の分布とその純一次生産力を決定する重要な気候指標であり、多くの研究者が今日使用している(Budyko: 1973, Hare: 1983, Uchijima & Seino: 1985, Ohta et al.: 1993)。一方、乾湿係数は古く吉良(1945a, b)が提唱した気候指標であり、簡便な方法として現在でも使用されている。

各気候指標を計算するため、中国の現在気候データとして、1961-1990年間の平均を示す平年気象資料を解析した。また、「中華人民共和国気候図集(1978)：地図出版社(226pp.)」、「中華人民共和国気候図集(1979)：地図出版社(75図)」を参考にした。

### 結果・考察

本研究で用いた温暖化気候シナリオ(年率1%で大気中のCO<sub>2</sub>濃度が暫時上昇、100年経過した場合)を(1)式と(2)式および(4)式で処理した結果を中心に以下に記す。

#### 地球温暖化が中国における年平均気温の上昇に及ぼす影響

IPCC報告(1995)によると、現在の経済活動・世界人口の拡大傾向が続くと、地球気候は21世紀半ばに1~1.5℃、21世紀末には現在より2~3℃温暖化する。上記、大気大循環モデルを年率1%の二酸化炭素濃度上昇を仮定して50年および100年間動かした結果、全球気温の上昇は、各々約1.0℃および2.0~2.5℃であり、IPCC報告(1995)にほぼ相当している。

しかし、地球気候の温暖化は地域で大幅に変化すると予想される。とくに高中緯度帯以北では、温度上昇は全球平均温度上昇度より著しく大きくなると予想される。そこで、まず気候シナリオ(温暖化気候と対照気候)を用いて、各温度域したがって各緯度帯における年平均気温の上昇度を調べた。各格子点の月平均気温を用いて求めた年平均気温の100年後の上昇予想値が図2aに示されている。点の散らばりは若干あるが、中国本土域で、年平均気温は明らかに系統的に上昇する。

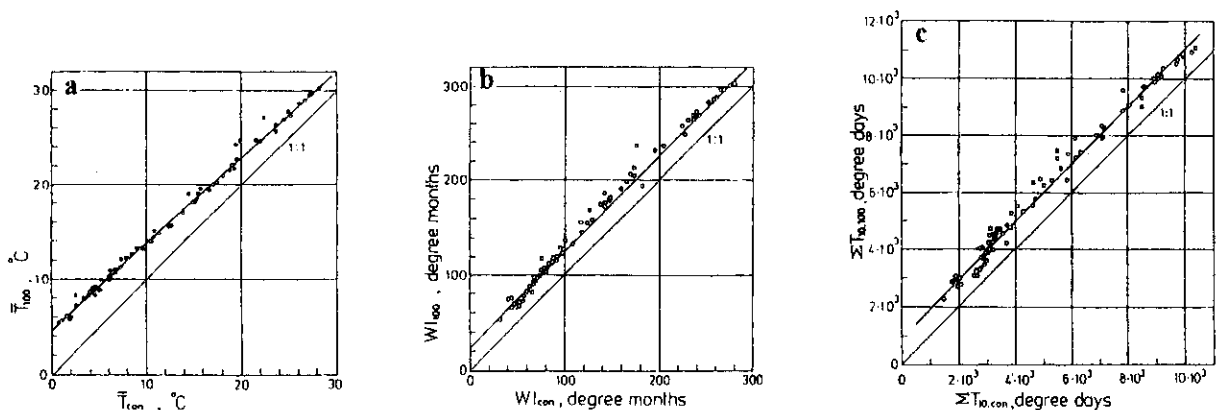


図2. 温暖化期間100年での、a: 年平均気温, b: 暖かさ指数, c: 有効積算気温( $\sum T_{10}$ )の増加予測。

特に気温の低い中国の北部と西部の山岳・高原地域で上層度は大きく、4～5℃にも達する。亜熱帯気候の南部沿海地域では、年平均気温の上昇は約2～3℃と、北部寒冷地域の約1/2にすぎない。このような温度上昇の地域的变化は次式で近似できた。

$$T_{100} = 4.6 + 0.935 T_{con} \quad (5)$$

ここで、 $T_{100}$ ：温暖化開始後100年時の各格子点の年平均気温(℃)、 $T_{con}$ ：対照気候シナリオでの各格子点の年平均気温(℃)である。

地球温暖化100年後に予想される気温上昇度は、中国全域においてIPCC報告(1995)の予想全球温暖化程度(約2℃)より大きい。特に北部の寒冷地域・西部の山岳高原地域では、予想全球温度上昇度の2倍以上の温暖化が来世紀末には予想される。

### 地球温暖化が中国における「暖かさ指数」に及ぼす影響

経過時間100年の地球温暖化シナリオを用いて植生気候・農業気候資源の変化を研究した。まず、温暖化程度の地域的变化を考慮した条件で、植生気候条件がどのように温暖化へ応答するかを明らかにするため、自然植生の地理的分布を左右している温度資源の変化を暖かさ指数の変化で評価した(図2b)。点の散らばりは年平均気温の時より若干大きい、各格子点の暖かさ指数は大幅に増加している。

温暖化による暖かさ指数の増加は次式で近似できた。

$$WI_{100} = 23.0 + 1.015 WI_{con} \quad (6)$$

ここで、 $WI_{100}$ ：温暖化開始後100年時の各格子点の暖かさ指数(℃・月)、 $WI_{con}$ ：対照気候シナリオでの各格子点の暖かさ指数(℃・月)である。

年率1%でCO<sub>2</sub>濃度上昇後100年経過時の暖かさ指数の分布予測と現行気候下での暖かさ指数の分布を図3に示す。温暖化に伴う暖かさ指数の増大も温暖地と寒冷地とでは若干違う。温暖化による暖かさ指数の増加率は、寒冷地域での約50%から亜熱帯地域での約10%へと減少するが、増加量は逆に約24℃・月から約28℃・月へと大きくなる。特に、 $WI_{con} = 100$ ℃・月以下の地域である中国北部の寒冷域では、温暖化の進みにつれて自然植生帯が大幅に北へ移動する可能性が示された。しかし、後氷期1.0～1.5万年間の化石花粉分析から、樹木の自然的な移動速度は気候帯の移動速度よりかなり小さいことが知られており、今後100年間に人為的にもたらされる気候帯の移動に自然植生帯が十分追従できるか疑問視されている。

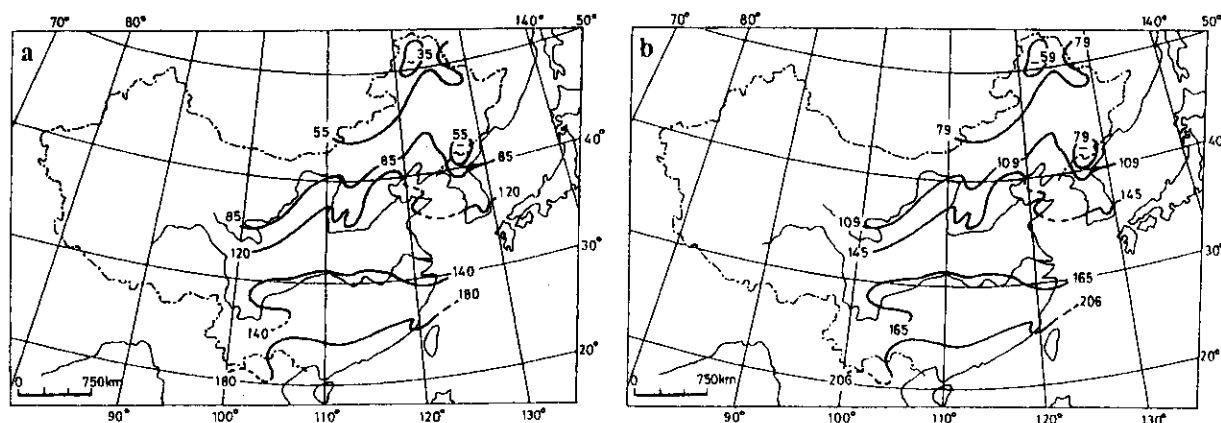


図3. 暖かさ指数の分布, a: 現行気候下, b: 年率1%でCO<sub>2</sub>濃度上昇後100年経過時の予測。

Fang・Yoda(1989)は中国の東部季節風地帯の自然植生帯の地理的分布の研究に暖かさ指数を利用して次のような結果を得た。各植生帯の北限を暖かさ指数(WI)で示すと、ボREAL林北限：WI=15、冷温帯林北限：WI=50~55、暖温帯林北限：WI=80~90、亜熱帯林北限：WI=170~180、であった。この結果を参照すると、温暖化期間100年後には各種生帯とくにボREAL林と冷温帯林の北上が気候温暖化によって加速されると結論できる。

### 地球温暖化が中国における「有効積算気温」に及ぼす影響

地球上の主要作物の栽培帯は有効積算気温( $\Sigma T_{10}$ : $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ )の変化に応じて、高中緯度のムギ栽培帯から中中緯度のダイズ・トウモロコシ・イネなどの栽培帯をへて、低中緯度・亜熱帯・熱帯のイネや熱帯作物群の栽培帯へと変化している。故に、気候温暖化による有効積算気温の増加は局地的のみならず、亜大陸・大陸スケールでの作物栽培大きな変化をもたらす可能性がある。

本研究では、50年および100年の温暖化(年率1%で大気中の $\text{CO}_2$ 濃度が上昇)シナリオと対照シナリオを用い、中国本土の格子点の温度データを用いて各格子点での月平均気温の年変化を求め、有効積算気温を計算した。

温暖化により中国の全域で有効積算気温はかなり増加する(図2c)。点の散らばりは若干大きいものの、温暖化期間100年後、有効積算気温は大きく増加することが予測された。それは次の近似式で表された。

$$\Sigma T_{10, 100} = 840 + 1.017 \Sigma T_{10, \text{con}} \quad (7)$$

ここで、 $\Sigma T_{10, 100}$ と $\Sigma T_{10, \text{con}}$ は各々温暖化期間100年後シナリオと対照シナリオでの各格子点の有効積算気温( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ )である。

年率1%で $\text{CO}_2$ 濃度上昇後100年経過時の有効積算気温の分布予測と現行気候下での有効積算気温の分布を図4に示す。暖かさ指数の時と同様に、有効積算気温の増加率は中国北部・西部高原地域での30~40%から南部沿岸の亜熱帯地域での10~12%へと南に移動するにつれ減少する。しかし、増加の絶対値は逆に北部の900から南部の約1000へと大きくなっている。この結果は、5000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以下の有効積算気温をもつ中国北部~東北地域で温暖化期間100年後の来世紀末には有効積算気温が20~40%も増加し、作物栽培帯の大幅な北上が予想される。また、現在頻繁に冷害気象に見舞われる中国東北地方では、その頻度は大幅に小さくなることを予測される。

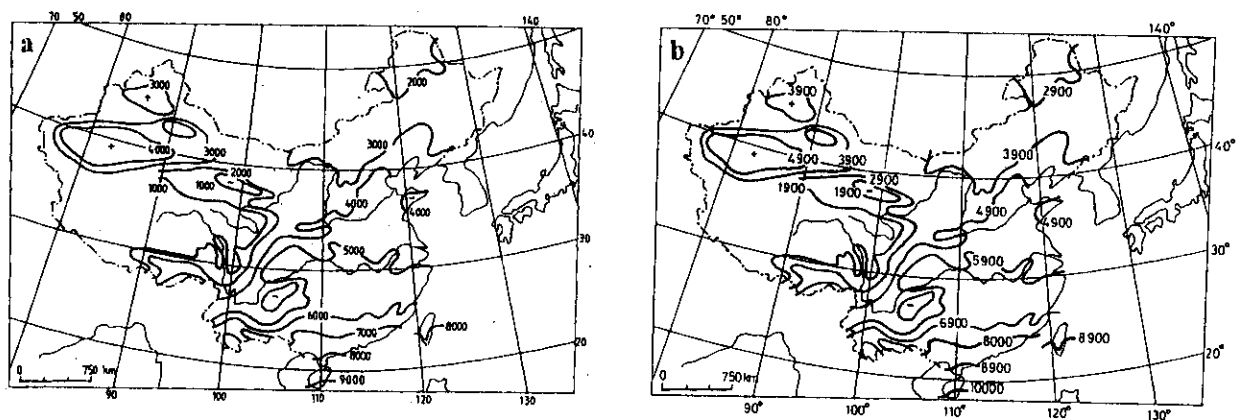


図4. 有効積算気温の分布, a: 現行気候下, b: 年率1%で $\text{CO}_2$ 濃度上昇後100年経過時の予測。

### 東部季節風地域での温度資源の緯度分布への温暖化の影響

東経105-110度より東の東部季節風地域では温度資源が緯度の増加につれて指数関数的に減少する。本研究における大気大循環モデルからの温暖化シナリオおよび対照シナリオを用いて、温度資源の緯度による指数関数的変化に温暖化期間がどのように影響するかを研究した。

自然植生の分布を決めている暖かさ指数の緯度変化を、東部季節風地域について調べた。温暖化期間が50年と100年の場合の緯度-暖かさ指数関係の温暖化による変化が、図5aに示されている。暖かさ指数は緯度の増加につれて指数関数的に減少し、そのパターンは温暖化に伴い上方へ平行的に移動する。この関係は、次の指数関数で近似できた。

$$\begin{aligned}
 \text{対照} & \quad WI_{\text{con}} = 220 \exp[-0.049(X-18)] \\
 \text{温暖化期間50年} & \quad WI_{50} = 240 \exp[-0.046(X-18)] \\
 \text{温暖化期間100年} & \quad WI_{100} = 270 \exp[-0.043(X-18)]
 \end{aligned} \tag{8}$$

一方、有効積算気温の緯度変化について図5bに示す。点の散らばりはあるが、各温暖化期間の有効積算気温は緯度につれて指数関数的に減少する。暖かさ指数と同様に、温暖化に伴いそれらは対照シナリオでの曲線に平行的に上方へ移動しており、下記のような指数関数で近似できた。

$$\begin{aligned}
 \text{対照} & \quad \Sigma T_{10, \text{con}} = 8000 \exp[-0.044(X-18)] \\
 \text{温暖化期間50年} & \quad \Sigma T_{10, 50} = 9000 \exp[-0.044(X-18)] \\
 \text{温暖化期間100年} & \quad \Sigma T_{10, 100} = 10000 \exp[-0.044(X-18)]
 \end{aligned} \tag{9}$$

温暖化に伴う等有効積算気温線の移動は、低緯度より高緯度でより顕著になる。温暖化期間100年における等有効積算気温線の移動を評価すると、かなり大きな移動(北上)が予測される。特に来世紀末には南部沿海地域で約600kmの、そして東北地方の平原地域では900kmに達する移動が推定された。これは中国の東部季節風地域での農業帯の著しい移動・変化をもたらすと考えられる。

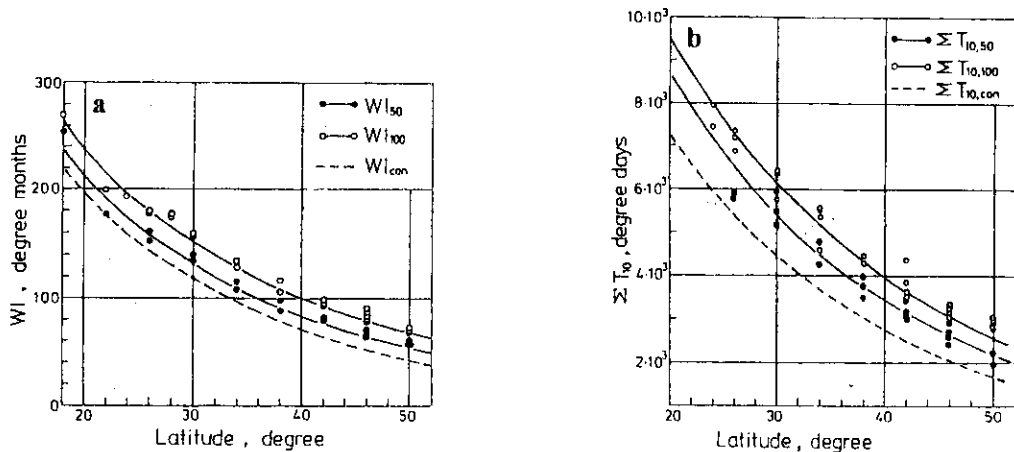


図5. 東部季節風地域の、a: 緯度-暖かさ指数関係、b: 緯度-有効積算気温関係、への温暖化影響

### 中国における乾燥度の地理的分布と温暖化影響

平年気候データから作成した東アジアの放射乾燥度(RDI)メッシュ分布図を用いて、中国大陸のRDI分布図を作成した(図6)。東経105度境界線の東部域は、内モンゴルをのぞいて東部季節風地域に属する。黄河以南には、 $0.3 < RDI < 1.2$ の湿潤～適湿状態の地域が広く分布し、その一部

は中国東北地域まで伸びる。ここでは、海岸から内陸へ移動するにつれて、乾燥度は次第に増加し、内モンゴルには乾燥気候域 ( $2.0 < RDI < 7.0$ ) が帯状に南北に走る。森林植生は湿潤-適湿域に分布し、温度資源の豊かさに従って、華南・華中の照葉樹林帯から華北の落葉広葉樹林帯そして東北地域の針葉樹林帯と並ぶ。この南部、長江以南の大部分は中部亜熱帯である。東経105度線の西部には負の放射乾燥度域と乾燥気候域 ( $2.0 < RDI < 7.0$ )、砂漠気候域 ( $RDI > 7.0$ ) が広く分布する。負の放射乾燥度域は青藏高原地域に対応し、乾燥気候域と砂漠気候域は、西北旱干気候域に対応する。この地域では温度資源と水分資源が極度に不足し、自然植生は極めて貧弱である。

本研究で用いた大気大循環モデルからの気候シナリオには、純放射量データがなかったため、気候温暖化時の中国大陸の乾燥度分布の変化に関しては、暖かさ指数と年間降水量から乾湿係数を算出し(吉良: 1945a, b)、対照シナリオと比較した(図7)。各格子点の乾湿係数を植生気候区分に当てはめたところ、それほど顕著ではなかったものの、対照シナリオに対して、温暖化気候シナリオでは、砂漠気候 ( $K \leq 3$ ) と草原気候 ( $3 \leq K \leq 5$ ) の割合が増加し、サバンナ気候 ( $5 \leq K \leq 7$ ) や準湿潤気候 ( $7 \leq K \leq 10$ ) の割合が減少することが予測された。地球温暖化の進行によって全球的には降水量が増加するものの、中国大陸では、比較的乾燥化が促進される可能性があることが示された。

植物の生育にとって水環境は最も重要な要因の一つであり、地球温暖化に伴う乾燥化が促進される地域を予測するためには、さらに詳細な地域モデルの開発と、より細かな地域ごとの気象・環境データの収集・整理が必要であると思われる。

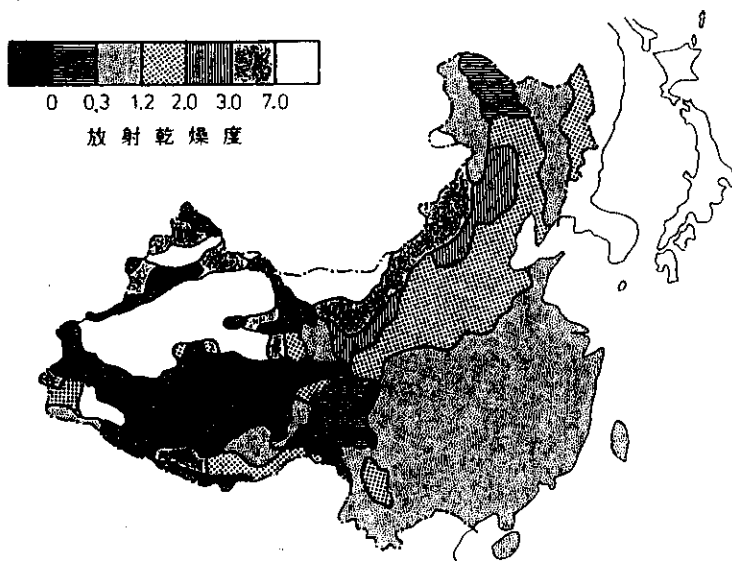


図6. 中国の放射乾燥度(RDI)の地理的分布.

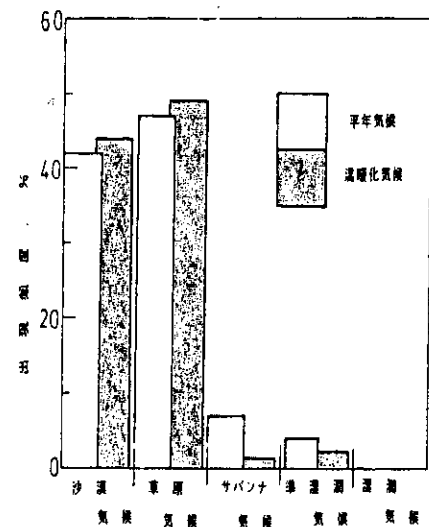


図7. 乾湿係数(K)を用いた植生気候区分への温暖化気候の影響

#### 4. 中国産樹木の生長に及ぼす地球温暖化環境変動の影響解析

植物は動物と異なり、自らの生育場所から移動できないため、急激な環境変動に対して影響を受け易いと考えられる。IPCC報告(1995)にもあるように、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)など地球温暖化ガスの濃度増加は植物の生育に多大な影響を及ぼすが、また植物の生育にとって重要な環境である、気温の上昇や降水量の変化を引き起こし、地域によっては乾燥化の促進なども予想される(Smith



and Tirpak: 1989, Hansen: 1990)。地球温暖化の植物・植生影響の定量的予測には、これらの環境要因の単独および複合影響を評価することが不可欠であり、実験的な基礎データの集積が必要とされている。

ところで、中国には従来広大な森林／草原植生が存在するが、人為的な開発や環境汚染などによって、森林植生の劣化・衰退が問題となっている。近年行われている環境保全のための植林活動なども(国際善隣協会: 1996, 1997, 1998)、地球温暖化による環境変動の影響を受けると考えられ、今後さらに大きなストレスとして、地域植生の脆弱化を促進することが予想される。最近、地球環境問題への関心の高まりから、温暖化に関連する環境変動が植物の生育に及ぼす影響に関する報告がなされているが、主として作物などを用いた研究が多く、樹木に関する知見は限られている(内嶋: 1990, Wong: 1993, Gallaway et al: 1994, 清野: 1995, Imai and Kanda: 1995, Eamus et al: 1995)。特に、中国産の樹木の生育と環境要因との関係に関する詳細な実験的研究はほとんど報告がない(張ら: 1996)。そこで、中国の植生保全に資するために、森林樹木の生産力や分布の変化に及ぼす地球温暖化の影響に関する基礎的データを得る目的で、植物環境制御室を用いた実験的検討を行った。

## 研究方法

### 現地研究機関との協力および実験試資料の収集

本研究では、中国の森林／草原などの局地植生保全に資する知見の集積を計るため、中国科学院の植物研究所や成都生物研究所、四川省環境保護局などの諸研究機関と連絡を取り、研究協力体制の整備を行った。特に成都生物研究所の諸研究者と密接な研究打ち合わせを行い、現地の植生分布や気象などに関する諸資料(四川省国土資源地図集など)の収集・整理を行った。

表 1. 中国四川省における植林に利用可能な主要な樹木種

ノウゼンカズラ科	<i>Paulownia fargesii</i> Franch. (川泡桐)
ヌマミズキ科	<i>Camptotheca acuminata</i> Decne. (喜樹)
センダン科	<i>Melia toosendan</i> Sieb. et Zucc. (川楝)
クスノキ科	<i>Cinnamomum longepaniculatum</i> (Gamble) N. Chao ex H. W. Li (油樟)
	<i>Sassafras tsumu</i> Hemsley (樟木)
カバノキ科	<i>Alnus cremastogye</i> Burk. (杞木)
ブナ科	<i>Quercus variabilis</i> Blume. (栓皮櫟)
	<i>Q. liaotungensis</i> Koedz (遼東櫟)
	<i>Q. acutissima</i> Carr. (麻櫟)
クルミ科	<i>Pterocarya stenoptera</i> C. DC. I (楓楊)
ヒノキ科	<i>Cupressus funebris</i> Endl. (柏木)
スギ科	<i>Cryptomeria fortunei</i> Hooibrenk ex Otto et Dietr. (柳杉)
	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook. (杉木)
マツ科	<i>Pinus massoniana</i> Lamb. (馬尾松)
	<i>P. yunnanensis</i> Franch. (雲南松)
	<i>P. armandi</i> Franch. (華山松)
	<i>P. tabulaeformis</i> Carr. (油松)
	<i>Picea asperata</i> Mast. (雲杉)
	<i>P. likiangensis</i> (Franch.) E. Pritz.
	var. <i>likiangensis</i> (麗江雲杉)
	var. <i>balfouriana</i> (Rehd. et Wils.) Hillier ex Slavin (川西雲杉)

四川省において植林にも利用される主要な樹木種について表1に示す。四川省の岷江(長江の一支流)流域やその上流の茂県の成都生物研究所茂文生態観測モデルステーション周辺地域などの植生調査を行い、上記樹木種を含む樹木などの植物種子を採取した。これらは現地で風乾した後、日本に持ち帰り、低温室(4℃)に保存した。国立環境研究所の環境制御温室内で播種後、発芽した幼樹を同温室内で育成し、発芽率及び生長が良好であった樹木種を本研究の実験材料とした。本研究で用いた樹木種は、馬尾松：*Pinus massoniana* Lamb. var. *massoniana*、油松：*Pinus tabulaeformis* Carr var. *tabulaeformis*、側柏(千頭柏)：*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco cv. *Sieboldii*、杉木：*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hookの4種である。これらは四川省内に分布するが、そればかりでなく、広く中国各地域に分布しており(中国科学院中国植物誌編集委員会：1978)、中国の全森林面積の13.2%(馬尾松)、2.5%(油松)、1.7%(側柏)、8.4%(杉木)を占める、主要な森林構成樹木種である(李・李：1996)。

### 中国産樹木の生長に及ぼす高温ストレス・水ストレス実験

実験に供試した上記の中国産樹木4種の種子は洗浄後、気温：25℃、相対湿度：70%に制御された自然光型環境制御温室で、人工培土に播種した。発芽後、高さ5～10cmの幼樹を、国立環境研究所標準培土を詰めたポットに移植し、ホーグランドのNo.2微量要素と142 $\mu$ MのFe(III)EDTAを含むハイボネックス1000培液を適宜与え、同温室内で育成した。高さ10～20cmに育成した後、これらの幼樹を4台の人工光型環境制御室(KG-50HLA-D; 小糸工業)に移し、生長実験を行った。

光照射は、各室14本の96W昼白色蛍光灯(ツインIFPR96EX-N/A; 松下)と、4個の100W白熱球(ソフトシリカ; 日立)を用いて行い、大型ジャッキに乗せた液耕装置を上下させることにより、植物上の光強度を調節した。実験の最初と最後に、光量子センサーの付いた測光メータ(LI-189; ライカー)を用いて光強度測定を行った。温湿度計測は、乾湿球式温湿度検出器(E-765; 横川ウエザック)を用い、PID制御のデジタルプログラム調節計(DCP216; 山武ハネウエル)を用いたシステムで制御した。CO<sub>2</sub>濃度は、非分散型赤外線ガス分析計(ZRH1DZY1-0AZY; 富士電気)を用いて計測し、CO<sub>2</sub>ガスコンテナからのガスの供給をマスフローコントローラで制御する自動制御システムにより、一定濃度に制御した。

実験終了後、植物を葉、茎、根の各器官に分け、80℃で3日以上乾燥した後、乾重を測定した。これらのデータから、生長解析法(清水：1988)により、以下の式(表2)を用い、相対生長率(RGR)、純同化率(NAR)、葉重比(LWR)、茎重比(SWR)、根重比(RWR)などの生長パラメータを算出し、それらに対する影響を比較した。なお、今回実験に使用した4種とも針葉樹だったので、葉面積は算出せず、NARも葉乾重あたりの個体乾重の増加量として計算した。

#### 実験1：温度－生長反応実験

中国産樹木の温度－生長反応実験(温度ストレス影響実験)における4台の環境制御室の環境条件は、明期/暗期：14時間/10時間、光強度：600 $\mu$ E $\cdot$ m<sup>-2</sup>sec<sup>-1</sup>、相対湿度(明期/暗期)：70/80%、CO<sub>2</sub>濃度：400ppm一定であり、気温(明期/暗期)のみを、25/18、29/22、33/26、37/30℃の4段階に設定した。4週間、制御環境下で育成後、各植物を収穫し、各器官の乾重量を測定し、生長解析を行った。

#### 実験2：湿度－生長反応実験

中国産樹木の相対湿度－生長反応実験(水ストレス影響実験)における4台の環境制御室の環境

条件は、明期/暗期：14時間/10時間、光強度：600 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 、気温(明期/暗期)：29/22 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{CO}_2$ 濃度：400ppm一定であり、相対湿度(明期/暗期)のみを、40/50%、50/60%、60/70%、70/80%の4段階に設定した。4週間、制御環境下で育成後、各植物を収穫し、各器官の乾重量を測定し、生長解析を行った。

表2. 本実験の生長解析法で用いる生長パラメータ

パラメータ	記号	定義 <sup>a)</sup>	計算式 <sup>b)</sup>	単位
相対生長率	RGR	$\frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt}$	$\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$	$\text{day}^{-1}$
純同化率	NAR	$\frac{1}{L} \cdot \frac{dW}{dt}$	$\frac{(W_2 - W_1)(\ln L_2 - \ln L_1)}{(t_2 - t_1)(L_2 - L_1)}$	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$
葉重比	LWR	$\frac{L}{W}$	$\frac{(L_2 - L_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(\ln L_2 - \ln L_1)(W_2 - W_1)}$	—
茎重比	SWR	$\frac{S}{W}$	$\frac{(S_2 - S_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(\ln S_2 - \ln S_1)(W_2 - W_1)}$	—
根重比	RWR	$\frac{R}{W}$	$\frac{(R_2 - R_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(\ln R_2 - \ln R_1)(W_2 - W_1)}$	—

a) W:個体乾重, L:葉乾重, S:茎乾重, R:根乾重, t:時間.

b) 添字の1と2は収穫の順番を示す.

## 結果・考察

本実験では中国四川省産の樹木4種を用いたが、ここで、四川省の植生気候等について簡単に触れる。四川省は長江の上流域にあり、東部に広大な四川盆地を有し、西部は青蔵高原に連なる高原・山地から成る。東経98～110度に位置し、前述の植生気候資源の指標：有効積算温度や放射乾燥度の分布が複雑に変化する地域である(図4, 6)。四川省の諸資料によると、その地形の複雑さの故に、気象条件も複雑である。東部の四川盆地では有効積算温度の値は高く、5300 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上を示す地域が広がる。若干複雑ではあるが、ほぼ西方向に進むにつれ有効積算温度は急激に減少し、西部域においては500 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以下となる。一方、盆地周辺の山地への降水量は大きく、年間1600mmを越える地域もある。しかし、東経104度付近では、この地域の地形の複雑さを反映して、年間降水量は1600mm以上から400～600mmまでと急激に変化する。このような気候資源の豊かさにより、四川盆地では古くから農業が発達した。しかし、人口密度も高い同地域では、現在の森林植生は極めて貧弱である。一方、その周辺地域および西部高原地域には自然林や植林による森林地域が発達する。主要な植林樹木は松柏類を中心とした針葉樹である。気象条件が急激に変化する地域にこれらの樹種の分布境界が存在しており、地球温暖化による気温上昇や水環境の変化はこれらの樹木の生産力そしてその分布に多大な影響をもたらすことが予想される。

## 中国産樹木の生育に及ぼす温度上昇の影響

中国に生育する主要樹木(馬尾松、油松、千頭柏、杉木)の生育温度に対する反応性について環境制御室を用いた生長実験を行った。明期の気温を、25、29、33、37 $^{\circ}\text{C}$ の4段階に設定し、4週間生長させた植物の個体(各器官)乾重量を図8に示す。これらの樹木の気温に対する反応はほぼ同様であり、29 $^{\circ}\text{C}$ で最も生長が良く、気温の上昇に伴って生長は抑制された。しかし、気温上昇に対する生長抑制の程度は種によって異なり、馬尾松、油松、千頭柏に比べると杉木で最も影響が

顯著であった。

本データを基にして、相対生長率(RGR)や純同化率(NAR)、また葉重比(LWR)、莖重比(SWR)、根重比(RWR)などの光合成産物の分配に関するパラメータを比較した(図9)。29℃処理区と比較して、37℃処理区のRGRは、馬尾松、油松、千頭柏の場合は約50%前後に抑制された。一方、杉木の場合は、約15%にまで抑制されており、温度上昇によって顕著な影響が認められた。NARへの温度影響に関しては、ほぼRGRへの影響と同様であった。LWRなどを比較した結果、全種においてこれらの数値に大きな変化は認められなかった。全種共に温度上昇によるRGRの抑制は、主としてNARが温度によって影響を受けることに起因することが示唆された。一般に温度上昇は、暗呼吸速度の増加(Gallaway et al: 1994)を引き起こし、また明記の光呼吸速度を増加することにより純光合成速度を低下させる(Long: 1991)。その結果はNARの減少、そしてRGRの減少へと結びつくことが考えられる。一方、温度上昇が同化産物の分配に影響するという報告もあるが(Farrar & Williams: 1991)、本実験では、LWRなどの変化は顕著ではなく、温度上昇がこれらの樹木の光合成産物の分配には際だった影響を及ぼさないとされた。

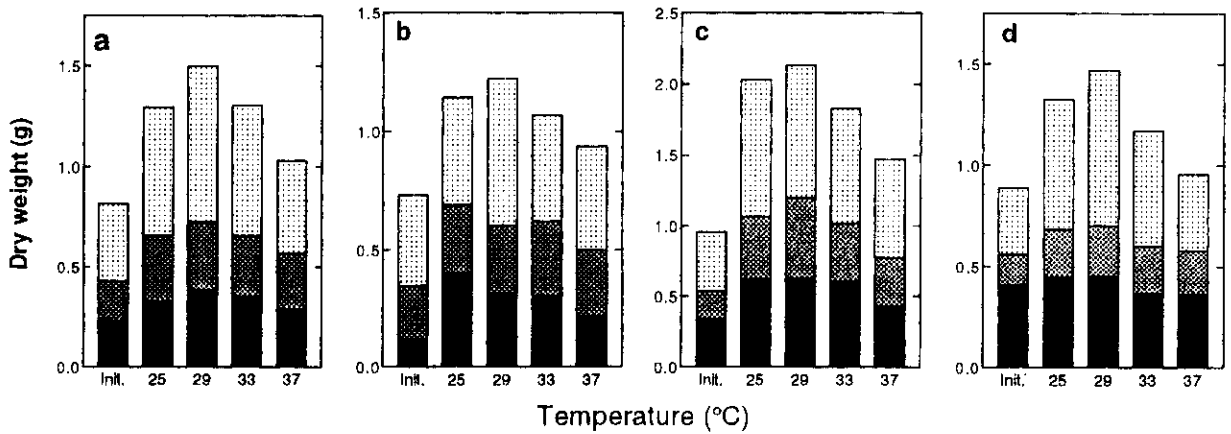


図8. 中国産樹木の乾重生長に及ぼす気温上昇の影響, a: 馬尾松, b: 油松, c: 千頭柏, d: 杉木  
( : 葉乾重, : 莖乾重, : 根乾重)

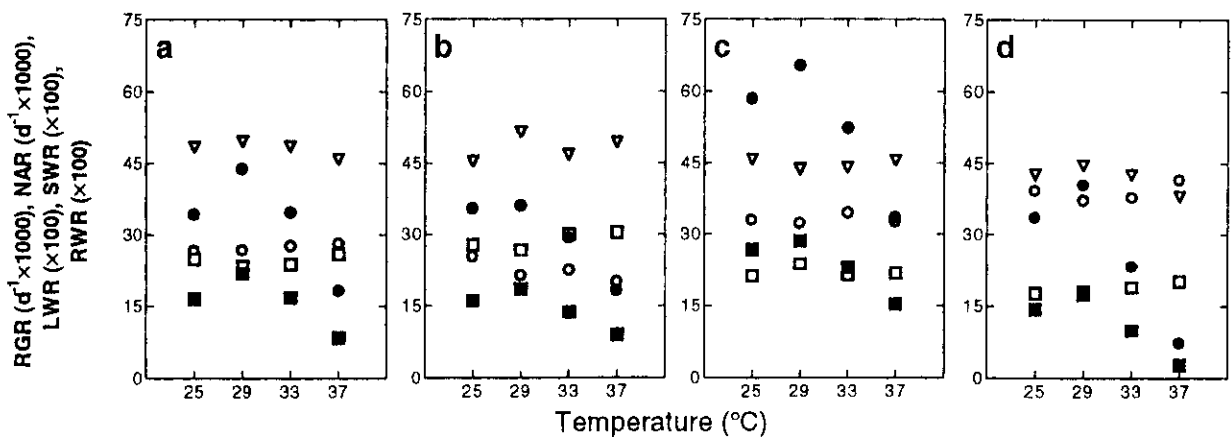


図9. 中国産樹木の生長パラメータに及ぼす気温上昇の影響, a: 馬尾松, b: 油松, c: 千頭柏, d: 杉木  
( : RGR, : NAR, : LWR, : SWR, : RWR)

### 中国産樹木の生育に及ぼす乾燥化の影響

中国に生育する主要樹木(馬尾松、油松、千頭柏、杉木)の生育時の相対湿度に対する反応性について環境制御室を用いた生長実験を行った。明期の相対湿度(RH)を、70、60、50、40%の4段階に設定し、4週間生長させた植物の個体(各器官)乾重量を図10に示す。馬尾松の相対湿度に対する反応は、RH70%の時が最大であり、相対湿度の低下に伴って生長は抑制された。しかし、馬尾松以外の3種、千頭柏、油松、杉木に関しては、多少相対湿度の低下で生長が抑制される傾向は認められる種もあるが、総じて本実験範囲の相対湿度では生長に差が認められなかった。

本データを基にして、相対生長率(RGR)や純同化率(NAR)、また葉重比(LWR)、莖重比(SWR)、根重比(RWR)などの光合成産物の分配に関するパラメータを比較した(図11)。RH70%処理区と比較して、RH40%処理区のRGRは、馬尾松の場合は約50%前後に抑制された。一方、千頭柏と油松では約85%、杉木の場合は約95%の値を示しており、相対湿度の影響は馬尾松のみに顕著に認められた。相対湿度のNARへの影響に関しては、ほぼRGRへの影響と同様であった。また、LWRなどを比較した結果、全種においてこれらの数値に大きな変化は認められなかった。

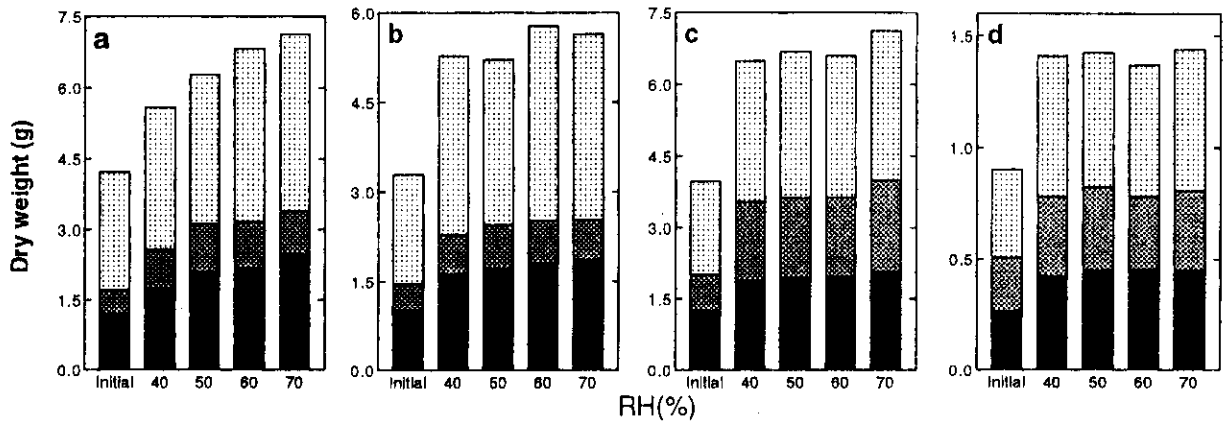


図10. 中国産樹木の乾重生長に及ぼす相対湿度の影響, a: 馬尾松, b: 油松, c: 千頭柏, d: 杉木  
 ( stippled : 葉乾重, dotted : 莖乾重, solid black : 根乾重)

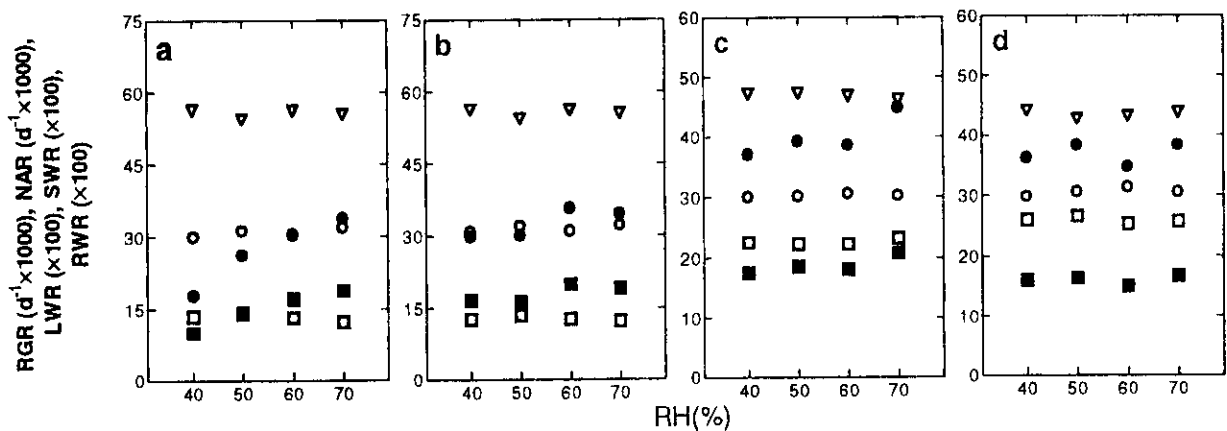


図11. 中国産樹木の生長パラメータに及ぼす相対湿度の影響, a: 馬尾松, b: 油松, c: 千頭柏, d: 杉木  
 ( solid black square : RGR, solid black circle : NAR, solid black inverted triangle : LWR, solid black square : SWR, solid black circle : RWR)

馬尾松では相対湿度低下によるRGRの抑制は、主としてNARが影響を受けることに起因することが示唆された。相対湿度の低下は飽差を拡大することになり、水ストレスを受けやすくするが(Shimizu et al: 1996)、一般に蒸散速度の高い植物は低い植物と比較して水ストレスの影響を受けやすい。本実験に用いた樹木は総じて蒸散速度が低かったが、馬尾松は比較的他の3種よりも蒸散速度が高い可能性がある。いずれにせよ馬尾松は中国の全森林面積の13.2%を占めており(李・李: 1996)、地球温暖化に伴う乾燥度の変化による影響は中国の環境保全にも大きな影響があると思われる。本実験では、LWRなどの変化は顕著ではなく、相対湿度の変化はこれらの樹木の光合成産物の分配には際だった影響を及ぼさないとされた。

本研究において、中国産の主要樹木の温度ストレスや水ストレスに対する反応が明らかになったが、樹種によってその影響は異なった。本実験に用いた4種の樹木のうちでは、杉木が温度上昇の影響を受けやすく、一方、馬尾松は乾燥化の影響を受けやすかった。これらの樹木は自然状態で混在しているが、地球温暖化による環境変動は、直接的にあるいは競争を介して間接的に、これらの種の将来の分布に影響を与えるかもしれない(Patterson & Flint: 1980, Bradshwa & McNeilly: 1991)。また、今後の植林を考える場合には、将来の環境変動を予測しながら、樹木の持つ生長特性/生理生態的特性を考慮して、樹種選定などを行った方が良いと思われる。

地球温暖化の森林樹木に対する影響予測を行うには、さらにこれらの樹木がCO<sub>2</sub>濃度増加に対してどのような反応を示すか、また温度上昇や乾燥化などの環境要因との複合的な影響が認められるかなどについて、今後実験的検討を進める必要がある。また、中国の森林/草原植生に及ぼす地球温暖化の影響をより広範に解析するためには、今回調べた樹木4種以外の植物についても温度や乾燥度に対する反応性について実験を行い、その生長反応を明らかにする必要がある。

一方、本研究から、これらの樹木については30℃程度から生育が抑制されることが判明したが、地球温暖化の進行により、比較的暖かい地域では、気温30℃以上の積算気温によって、主要樹木などの生長が抑制されることが予想される。これまで、温暖化指数や有効積算気温など、一定の温度以上の積算を植生に良い指標として、植生生産力などを考えてきたが、現在および温暖化時における生育地域の高温ストレスによる植生生産力の抑制程度を予測するのに、例えば、30℃以上の積算気温を考えても良いのではないと思われる。

最後に、これらの樹木が生育する現地の野外環境に関して長期的な計測、環境モニタリングを実施し、大気大循環モデルから推定される環境変動がどの程度起きつつあるか、また実験研究から得られた樹木の生育特性がどの程度野外の生育に当てはめられるかなど、検証していく場が必要であると思われる。

## 5. 本研究により得られた成果

中国の森林/草原植生に対する地球温暖化影響を予測するために、中国科学院の植物研究所や成都生物研究所、四川省環境保護局などの現地研究機関との研究協力体制が整備され、現地の植生や気象などに関する諸資料や現地の森林地域に生育する主要樹木の種子が収集できた。中国の気象資料を基に、大気大循環モデルのシナリオを用いて、植生生産力に重要な暖かさ指数や有効積算気温、また乾燥度の分布などを示し、約100年後に想定される温暖化の影響を予測し、提示できた。さらに、植物環境制御室を用いた実験から、中国の主要樹木では、30℃程度からの温度

上昇による生育抑制が認められるが、その程度は樹種によって異なり、杉木では影響が特に顕著であること、乾燥に対しても馬尾松のようにかなり影響を受けやすい樹種が存在することなどが判明した。将来の地球温暖化は樹種によっては生育抑制を引き起こし、生産力ひいてはその分布にまで影響を及ぼす可能性が示された。

## 6. 参考文献

- Bradshwa, A. D., McNeilly, T. (1991): Evolutionary response to climatic change. *Annals of Botany* 67, 5-14.
- Budyko, M. I. (1973): 気候と生命(内嶋善兵衛訳). 東大出版会, (400 pp).
- 中国科学院中国植物誌編集委員会 (1978): 中国植物誌. 科学出版社.
- Eamus, D., Duff, G. A. Berryman, C. A. (1995): Photosynthetic responses to temperature, light flux-density, CO<sub>2</sub> concentration and vapour pressure deficit in *Eucalyptus tetrodonta* grown under CO<sub>2</sub> enrichment. *Environ. Pollut.*, 90, 41-49.
- Fan, Jing-Yun, Yoda, K. (1988): Climate and Vegetation in China (1) Changes in the altitudinal lapse rate of temperature and distribution of sea level temperature. *Ecol. Pes.*, 3, 37-51
- Fan, Jing-Yun, Yoda, K. (1989): Climate and Vegetation in China (2) Distribution of main vegetation types and thermal climate. *Ecol. Pes.*, 4, 71-83.
- Fan, Jing-Yun, Yoda, K. (1990a): Climate and Vegetation in China (3) Water balance and distribution of vegetation. *Ecol. Pes.*, 5, 9-23.
- Fan, Jing-Yun, Yoda, K. (1990b): Climate and Vegetation in China (4) distribution of tree species along thermal gradient. *Ecol. Pes.*, 5, 291-302.
- Farrar, J. F., Williams, M. L. (1991): The effects of increased atmospheric carbon dioxide and temperature on carbon partitioning, source-sink relations and respiration. *Plant, Cell and Environment* 14, 819-830.
- Gallaway, R. M., DeLucia, E. H., Thomas, E. M. Schlesinger, W. H. (1994): Compensatory responses of CO<sub>2</sub> exchange and biomass allocation and their effects on the relative growth rate of ponderosa pine in different CO<sub>2</sub> and temperature regimes. *Oecologia* 98, 159-166.
- Hansen, J. (1990): The greenhouse effect. In: McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology (eds Biderman A, Weil J & Richman B). 176-178. McGraw-Hill.
- Hare, F. K. (1983): Climate and Desertification—a revised analysis. WCP-44, (149 pp).
- Imai, K., Kanda, A. (1995): CO<sub>2</sub> dependence of gas exchanges in rice leaves as affected by temperature, light and vapor saturation deficit. *Environ. Control Biol.*, 33, 285-291.
- 吉良竜夫 (1945a): 農業, 地理学の基礎としての東亜の新気候区分, 京都帝国大学農学部園芸教室, (23pp).
- 吉良竜夫 (1945b): 東亜南方圏の新気候区分, 京都帝国大学農学部園芸教室, (24pp).
- (社)国際善隣協会 (1996): 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究 (I) 研究成果報告書, (110pp).
- (社)国際善隣協会 (1997): 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究 (II) 研究成果報告書, (97pp).
- (社)国際善隣協会 (1998): 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全プロジェクト成果総合報告書, (78pp).
- 李文華, 李飛 (1996): 中国森林資源研究, (336pp). 中国林業出版社.
- Long, S. P. (1991): Modification of h response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment* 14, 729-739.
- 農林作物気候区画協作組編 (1987): 中国農林作物気候区画. 213. 気候出版局.
- 野上道男・大場秀章 (1991): 暖かさ指数からみた日本の植生. *科学*, 61, 36-49.
- Ohta, S., Uchijima, Z., Oshima, Y. (1993): Probable effects of CO<sub>2</sub>-induced climatic changes on net primary productivity of terrestrial vegetation in East Asia. *Ecol. Res.*, 8, 199-213.
- Patterson, D. T., Flint, E. P. (1980): Potential effects of global atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the growth and competitiveness of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> weed and crop plants. *Weed Sci.*, 28, 71-75.
- 清野裕 (1995): 気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. *農業気象*, 51, 131-138.
- 清水英幸 (1988): 生長速度の計測. 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編, 植物の計測と診断, 124-130. 朝倉書店.
- Shimizu, H., Fujinuma, Y., Omasa, K. (1996): Effects of carbon dioxides and/or relative humidity on

- the growth and the transpiration of several plants. *Acta Hort.* 440, 175-180.
- Smith, J. B., Tirpak, D. (1989): The potential effects of global climate change on the United States. (409pp). United States Environmental Protection Agency.
- Tokioka, T., Noda, A., Nikaidou, Y., Nakagawa, S., Motoi, T., Yukimoto, S., Takata, K. (1995): a transient CO<sub>2</sub> experiment with the MRI-CGCM. *J. met. Soc. Japan*, 73, 817-826.
- Uchijima, Z., Seino, H. (1985): Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo model. *J. Agr. Meteorol.*, 40, 343-352.
- Uchiyama, Z., Seino, H., Nogami, M. (1992): Probable shift of natural vegetation in Japan due to CO<sub>2</sub> climatic warming. In: Shiyomi, M., E. Yano, H. Koizumi, A. Andow, and N. Hokyo (eds.), *Ecological processes in Agro-ecosystems*, NIAES, 1, 189-201.
- 内嶋善兵衛 (1990): 地球温暖化の影響評価. *地学雑誌*, 99, 186-193.
- Wong, S. C. (1993): Interaction between elevated atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> and humidity on plant growth: Comparison between cotton and radish. *Vegetatio*, 104/105, 211-221.
- Yim, Y., Kira, T. (1975): Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula (1) Distribution of some indices of thermal climate. *Jpn. J. Ecol.*, 25, 77-88.
- Yim, Y., Kira, T. (1976): Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula (2) Distribution of climatic humidity/aridity. *Jpn. J. Ecol.*, 26, 157-164
- 張新時, 周広勝, 高瑛, 倪健, 唐海萍 (1978): 植皮数量生態学開放研究実験室, 19-25. 中国科学院研究所.

### [国際共同研究等の状況]

国際的研究である、CEのDr. J. F. Reynolds (Phytotron, Duke University, NSF Ecosystem, USA)、IGBP-GCTE-NECTの張新時所長(植物研究所, 中国)や、四川省の劉照光所長(成都生物研究所)らと、地球温暖化の植生影響に関する情報交換・共同研究に関して継続的に検討している。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 口頭発表

- ①野村幹雄, 今井勝, 大政謙次 (1996): 水稻の生長と光合成に及ぼす空気中CO<sub>2</sub>濃度およびリン栄養の影響. 日本作物学会第201回講演会. 宇都宮.
- ②大政謙次, 国府田正樹, 大谷義彦 (1996): 実生の成長の3次元計測に関する研究. 日本植物学会第60回大会. 福岡.
- ③大政謙次, 平沢亮二, 星野秀大 (1996): サーモグラフィによる樹木の診断—日変化や季節変化の影響—. 日本農業気象学会1996年度全国大会・日本生物環境調節学会第34回集合同大会. 宇都宮.
- ④清水英幸, 菅邦子, 大橋毅 (1996): 指標植物評価和観測大気質量. 大気汚染観測評価方法研修班. 中国重慶.
- ⑤Shimizu, H., Kai, K., Omasa, K. (1996): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> singly or in mixture on the growth of several herbaceous plants. *Int. Symp. Food Production and Environ. Imprv. Under Global Climate Change (FPEI) Soc. Agricultural Meteorology of Japan*. Yamaguchi, Ube.
- ⑥Shimizu, H., Fujinuma, Y., Omasa, K. (1996): Effects of carbon dioxides and/or relative humidity on the growth and the transpiration of several plants. *Int. Symp. on Plant Production in Closed Ecosystems*. Autom. Cult. Environ. Narita.
- ⑦大政謙次 (1997): 植物による大気環境の改善. 日本学術振興会地球環境変動に対応する植物バイオテクノロジー第160回委員会. 横浜.
- ⑧大政謙次, 吉田舞奈, 細見正明 (1997): 緑地のオゾン吸収能力についての実験的研究. 第38回(社)大気環境学会年会. つくば.
- ⑨Gao, S., Sakamoto, K., Zhao, D., Zhan, D., Shimizu, H., Wang, Q. (1997): The changes of ion contents in precipitation through the forest canopy at Simian Mountain, Chongqing China. *Jpn.-China Symp. Environ. Sci. (11th Jpn.-China Symp. JCSTE Ser.)*. Chiba.
- ⑩Omasa, K. (1998): Image instrumentation of chlorophyll a fluorescence. *SPIE's 12th Annu. Int. Symp. Aerosp./Def. Sensing, Simulation, & Controls*. Orlando, USA.
- ⑪大政謙次 (1998): 環境モニタリングのための植物の画像診断. 第11回バイオエンジニアリング講演会.



つくば.

- ⑫Zheng, Y., Last, F. T., Barnes, J. D., Shimizu, H. (1998): Air pollution and its effects on crops in Chongqing, China. 39<sup>th</sup> Annual Meeting of the Japanese Society for Atmospheric Environment. Sapporo.
- ⑬内嶋善兵衛, 太田俊二 (1998): 土地利用パターンと人工密度・気候. 1998年度農業気象学会全国大会.
- ⑭Zheng, Y., Shimizu, H. (1999): Air pollution and its effects on vegetation in China. 31<sup>st</sup> Air Pollution Workshop. Oregon State University, USA.
- ⑮Zheng, Y., Shimizu, H., Barnes, J. D. (1999): Mechanisms underlying the impact of ozone on photosynthesis of *Plantago Major* L. 31<sup>st</sup> Air Pollution Workshop. Oregon State University, USA.

## (2) 論文発表

- ①Omasa K., Kai K., Taoda H., Uchijima Z., Yoshino M. (1996): *Climate Change and Plants in East-Asia* (215pp.), Springer-Verlag.
- ②大政謙次, 船田良 (1996): 植物の生体画像計測. バイオサイエンスとインダストリー. 545-546, 569-571.
- ③大政謙次 (1996): 生態情報の広域リモートセンシング技術. 生態系情報による環境バイオエコセンシング技術に関する調査 (平成7年度調査報告書 NED-GET-9511). 67-72.
- ④清水英幸 (1996): 日本における自然環境保全研究—実験研究と野外調査—. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究(I)研究成果報告書. (110pp.), 21-36. (社)国際善隣協会.
- ⑤清水英幸, 王飛躍, 樋口正信, 沖津進, 須田隆一, 楊良 (1996): 中国四川省の予備的現地調査報告. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究(I)研究成果報告書. (110pp.), 75-80. (社)国際善隣協会.
- ⑥清水英幸, 喬永康 (1996): 中国産数種樹木の種子発芽特性に関する研究. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全に関する研究(I)研究成果報告書. (110pp.), 83-87. (社)国際善隣協会.
- ⑦内嶋善兵衛 (1996): 地球温暖化とその影響. (202pp.), 裳華房.
- ⑧Shimizu, H., Fujinuma, Y., Omasa, K. (1996): Effects of carbon dioxides and/or relative humidity on the growth and the transpiration of several plants. *Acta. Hort.* 440, 175-180.
- ⑨大政謙次 (1997): 農業における情報技術・生体画像情報の植物診断への利用. *農業*50(6), 2-7.
- ⑩Matsui, T., Omasa, K., Horie, T. (1997): High Temperature-Induced Spikelet Sterility of Japonica Rice at Flowering in Relation to Air Temperature, Humidity and Wind Velocity Conditions. *Jpn. J. Crop Sci.* 66(3), 449-455.
- ⑪Shimizu, H., Kai, K., Omasa, K. (1997): Effects of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> singly or in mixture on the growth of several herbaceous wild plant species. *J. Agric. Meteorol.* 52(5), 801-806.
- ⑫Omasa, K. (1998): Effects of Climate Change on Plants in East Asia. *Global Environ. Res.* 1, 59-69.
- ⑬Tanaka, N., Taoda, H., Omasa, K. (1998): Field Studies on the Effects of Global Warming on Mountain. *Global Environ. Res.* 1, 71-74.
- ⑭Omasa, K. (1998): Image instrumentation of chlorophyll fluorescence. *Prpc. Spie.* 3382, 91-99.
- ⑮王青躍, 清水英幸, 劉照光, 張雨成 (1998): 岷江上流地域生態現状及び評価. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全プロジェクト成果報告書 (78pp.), 26-39. (社)国際善隣協会.
- ⑯劉照光, 張雨成, 陳慶恒, 王青躍, 清水英幸 (1998): 植林手法. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全プロジェクト成果報告書(78pp.), 47-56. (社)国際善隣協会.
- ⑰清水英幸, 王青躍, 張雨成 (1998): 中国樹木の生育に及ぼす温度環境の影響解析. 中国長江三峡ダム建設事業支援のための水源涵養林造成と環境保全プロジェクト成果総合報告書(78pp.), 61-64. (社)国際善隣協会.
- ⑱内嶋善兵衛 (1998): 地球温暖化と森林植生へのその影響. *林業政策*10. 1-21.
- ⑲内嶋善兵衛 (1999): 気候変動と植生の変化. *科学*69. 632-638.
- ⑳Zheng, Y., Shimizu, H. (1999): Air Pollution Impacts on Vegetation in China. In: *Air Pollution Impacts on Vegetation in Developing Countries*, (eds: Ashmore, M & Murray, F.). In press.