

大気組成の人為的变化と気候暖化

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	内嶋, 善兵衛
巻/号	12巻8号
掲載ページ	p. 7-13
発行年月	1989年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



大気組成の人為的变化と気候暖化

内嶋 善兵衛

大意 地球をうすく覆っている大気は、海洋と同様にマントルや地殻の脱ガス現象から生まれた。その組成は地球の歴史46億年を通じて最初は地球物理的過程によって、次に植物の光合成活動によって、最近では人間の活動によって変化してきたし、また変化しようとしている。それに応じて、地球大気の主要な働きの一つ、温室効果したがって地球上の気候も大きく変化したり、変化しようとしている。

1. はしがき

爆発する人口と豊かな生活のために、人類は地球上のすべての現象・物質・生物を自らのためだけに利用する地球資源化体制を築きあげ、その歩みを日一日と強めている。年間に消費する炭素約60億トンに相当する化石炭素燃料はその頭目である。この消費速度は地質時代たとえば石炭紀などに植物群が100万年をかけて蓄積したエネルギー量を10年間で使用するスピードといわれている。約200年前に始まった化石エネルギーの大量使用は、科学技術文明を開花させ、一部の先進国では人類史上かつてなかった繁栄を多くの人々が楽しんでいる。

しかし、進行する地球資源化体制は、地球のいたる所で“ひずみ”を生じさせており、少なくとも35億年の歴史をもつ生物圏の未来にも危険の灯が見え隠れするほどにまでなっている。その一つが大気組成の人為的变化→温室効果の増大→地球気候暖化の心配である。そこで、本

小論では気候暖化の基である温室効果の増大と地球大気の人為的变化について簡単に説明する。

2. 地球大気の歴史

最近の地球—惑星科学の急速な進歩によって、地球大気は地球自身および生物圏の相互作用によって46億年の歴史を通じて、進化的に形成され現在にいたっていることがわかってきた。地殻やマントルから噴出したガス類によって形成された初期の大気は還元的で、現在の数百倍から千倍に近い二酸化炭素を含んでいた。地表に海洋が形成されると炭酸塩沈澱作用が急速に進行し、大気中の炭素は水圏や地圏内の袋小路へと移行していった。このため、地球大気中の二酸化炭素濃度は傾向的に低下し、地表から宇宙への熱放射をささげる能力（これが温室効果の原因）も減少した。

もし、太陽からの放射が一定なら、大気中のCO₂濃度低下は当然地球気候の著しい寒冷化をもたらしたはずである。しかし、原始的な原核細胞生物が地球上に生まれてから約35億年を経ていることを考えると、生物の生存に適した

Zenbei UCHIDA: Anthropogenic changes in atmospheric composition and climate warming

気候 (0 ~ 40°C) が絶えることなく続いたということになる。これを支えたのは10億年間に地球温度を7°C上昇させるほどの強さで増大し続けている太陽の出力の変化である。それゆえ、地球上に生物を発生させ、絶えることなく進化させ、そして現在の生物圏を形成させたのは、地球大気中の二酸化炭素の傾向的減少と太陽出力の傾向的増大とがうまく同調的に、しかも同じスケールで進行したことであるといわれている。

では、地球気候の一定性の原因の一つである地球大気中の二酸化炭素濃度は46億年の地球歴史のなかでどのように変化したのだろうか。最近、地球大気の進化の痕跡を色濃く秘めている堆積岩に関する研究から、地球の古大気の物理的・化学的特徴を復元することが可能になってきた (たとえば、Budykoら、1985; 平・八木下、1989)。それらを複合した結果が図1に示されている。

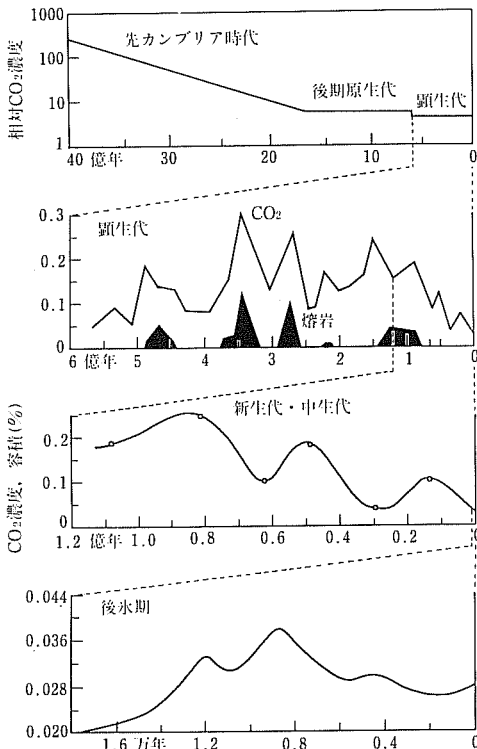


図1 地球大気中の二酸化炭素濃度の歴史的变化 (Budykoら、1985; Berger 1987より作図)

すでに説明したように、35~40億年前に地球上にあった超高CO₂大気は、時間の経過につれて次第に変質し続けて、現在のように0.035%という薄いCO₂大気へと進化した。しかし、その進化は単調ではなく、顕生代 (約5~6億年の間) のCO₂濃度変化にみられるように、約1億年の周期で変動している。その原因はマントル対流の周期的な活動であるといわれている。活発なマントル対流期に非常に大規模な火山爆発が地球上で生じ、多量なCO₂ガスを大気中へ補給した。このため、大気中のCO₂濃度は異常に高まった。その後の減少は炭酸塩堆積と無機栄養植物群による有機炭素蓄積のためである。最近のCO₂濃度は顕生代のなかで最も低い。これは、約1億年前のマントル対流活動期あと大規模な火山活動がなく大気中のCO₂が一方的に地圏内へ移動し袋小路に堆積したためといわれている。この傾向が今後200~300万年も続くと、大気中のCO₂濃度は異常に低下し、温室効果を失い地球温度は大幅に低下するとさえいわれていた。

3. 大気の温室効果

地球気候を決めているエネルギー源は1.5億kmの宇宙から絶えることなく地球へ入射する太陽エネルギーである。このエネルギーは地表で吸収されたあと、様々な物理現象 (気象現象) をひき起こし、そして見えない波長の長い熱放射として宇宙空間へ去っていく。これら二つの過程でのエネルギー量がバランスしているために、地球気候はほぼ一定に維持されてきたと考えられている。

この様子をモデル的に示すと図2のようになる。これから次のバランス式がえられる。

$$S_0 \cdot (1 - A) \pi r_e^2 = 4 \pi r_e^2 I_E \quad (1)$$

ここで S_0 は太陽定数 (= 1.96 cal / (cm² · min)), A は惑星アルベド (= 0.3), r_e は地球の半径,

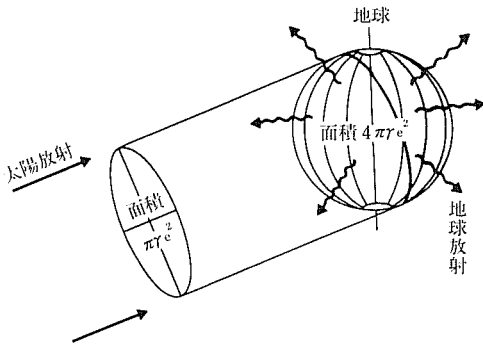


図2 地球の放射バランス(小倉, 1984)

I_E は地球から宇宙への長波放射流束(= σT_E^4 , cal/($\text{cm}^2 \cdot \text{min}$), σ はステファン・ボルツマン定数 (= 8.2×10^{-11} cal/($\text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{K}^4$), T_E は地球の放射平衡温度(K)。上式を利用すると, 平衡温度 T_E は下のようなになる。

$$T_E = \left(\frac{S_0 (1 - A)^{1/4}}{4 \sigma} \right) = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{ C} \quad (2)$$

一方, 地表気温の観測値の地球平均 (T) は下のようなになる。

$$T = 288 \text{ K} = 15^\circ \text{ C}$$

これから, 放射バランスで決まる平衡温度は実際の地球平均温度より約33°C低いことがわかる。この違いをもたらしているのが, 地球大気中に含まれている水蒸気・二酸化炭素などの温室効果である。

では, このように大きい温室効果をもたらしている地球大気はどのような光学的性質をもっているのだろうか。それを端的に表わしたのが図3である。図には, 太陽面と地表面から射出される短波放射と長波放射のスペクトルと大気全層の放射吸収スペクトルとが示されている。最も顕著なことは, 太陽からの短波放射域と地表からの長波放射域にある吸収スペクトルの凹部分(透過率の高い)が広さと強度で非常によく違っていることである。このため, 太陽からの放

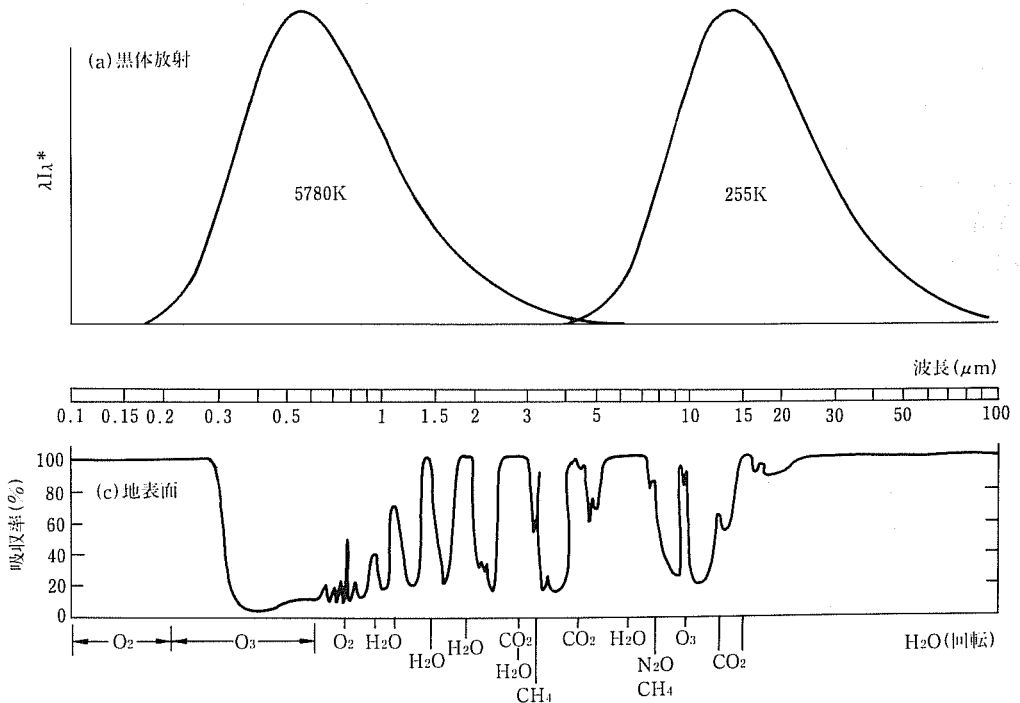


図3 地球大気吸収スペクトル(小倉, 1984)

射は大気をよく素通りして地表に達するが、地表からの放射は大気層で吸収されやすく、再び逆向きに地表へ射出される。このために、地表近くの空気が暖められ温度が上昇する。これが地球大気の温室効果である。

4. 大気組成の人為的变化

すでに説明したように人類は炭素で60億トンに近い化石炭素燃料を毎年消費し、200億トンを超える二酸化炭素を大気中へ放出している。この他、便利な生活のため天然には存在しない様々な化合物を合成し、利用している。その数は10万種に近いといわれている。また、食糧を生産するために、森林を開拓し肥料を施用し、多くの家畜を養っている。これらの過程で多様なガスが大気中へ放出されており、そのなかには図3に示した長波放射の窓域に強い吸収帯をもつCH₄、N₂Oがある。これらを要約すると表1のようになる。

食糧生産活動および工業生産活動の地球的な広がりにつれて、大気中へ放出されるガス量も飛躍的に増え、大気の化学組成も次第に変化している。その様子が図4に示されている。約200年前、第1次産業革命がスタートしてから大気質の人為的变化が始まり、1950年代の第2次産業革命に入ってから急激に加速されたことが分かる。すなわち、地球誕生以来の地質学的過程

と植物群の生物地球化学的過程との働きによって46億年をかけて進化して現在にいたっている地球大気に、いま新しい、しかもかつて経験したことのない強力な人類の手が及び始めたのである。その強力さは地質時代の植物群の10万倍ともいえるほどで、地球の育んだ生物圏がそれに耐えうるか疑問である。

20世紀末に60億、21世紀半ばに80億に達する

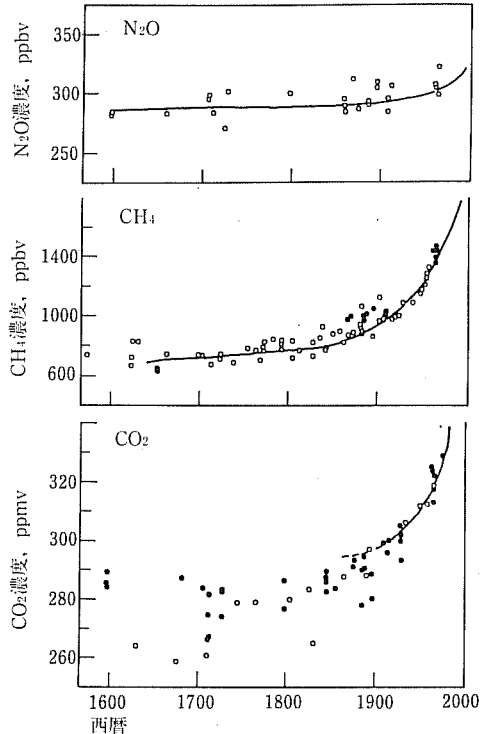


図4 大気質の人為的な変化(Pearmanら,1986)

表1 人為的な温室効果ガス

ガス	1985年平均濃度	1985年増加率(%/年)	平均滞留年	吸収帯(μm)	
二酸化炭素	CO ₂	340ppmv	0.5	2~3	>13
メタン	CH ₄	1.6ppmv	1.0	5~11	7.66
一酸化二窒素	N ₂ O	0.31ppmv	0.2	120~150	7.78
対流圏オゾン	O ₃	40ppbv	2.0?	0.1~0.3	9.6
フロン11	CFCl ₃	0.21ppbv	5~7	60~75	9.22, 11.82
フロン12	CF ₂ Cl ₂	0.35ppbv	5~7	111~130	9.13, 8.63, 10.93
四塩化炭素	CCl ₄	0.13ppbv	1.0	50	
メチルクロロホルム	CH ₃ C	0.13ppbv	7.0	7	

注) 1ppmvは体積の1×10⁻⁶を、1ppbvは体積の1×10⁻⁹比を示す。

という人口爆発、そして生活水準向上への飽くなき欲望を考えると、大気組成の人為的変化の歩みは加速されることはあっても止まることはむずかしい。しかし、この歩みの先には急激な気候暖化、地球環境および生物圏の軋みという危険な深淵が口を開いているように思われる。

5. 温室効果と気候暖化

19世紀末に、Tyndall, Arrhenius, Chamberlin は大気中の二酸化炭素濃度の変化が地球気候の変化の原因であろうという結論を発表していた。しかし、あまりにも水準を抜いていたので彼らの学説は注目をひかず、約100年近く埋もれていた。1958年よりハワイのマウナ・ロア山頂で続けられているCO₂濃度モニタリングは、地球大気が人間の生産活動で変化していることを具体的に明示した。それ以来、温室効果ガスの濃度上昇とそれによる気候暖化に多くの関心が向けられ、これらの問題は気象科学の最も重要な課題の一つになっている。

多くの理論的研究から、重要な温室効果ガスの温室効果（平衡上昇度の地球平均値、 ΔT_b ）は次のように表わされることが分かった(Ramanathan ら, 1985)。

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{b,c} &= -0.677 + 3,019 \theta_n [C(t)/C(0)] \\ \Delta T_{b,N} &= 0.057 [N(t)^{1/2} - N(0)^{1/2}] \\ \Delta T_{b,H} &= 0.019 [H(t)^{1/2} - H(0)^{1/2}] \\ \Delta T_{b,O} &= 0.7 [O(t) - O(0)] / 15 \\ \Delta T_{b,11} &= 0.14 [CF11(t) - CF11(0)] \\ \Delta T_{b,12} &= 0.16 [CF12(t) - CF12(0)] \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで添字 C, N, H, O, 11, 12 は二酸化炭素、一酸化二窒素、メタン、オゾン、フロン11、フロン12を示す。カッコ内の t は西暦 t 年の濃度を示す。カッコ内の 0 は CO₂ では 1880 年の、その他のガスでは 1980 年の濃度を示す。特に重要なことは、上にあげた各ガスの温室効果の間につきの加法則のなりたつことである。

$$\Delta T_{b,s} = \Delta T_{b,c} + \Delta T_{b,N} + \Delta T_{b,H} + \Delta T_{b,O} + \Delta T_{b,11} + \dots \quad (4)$$

それゆえ、20世紀以降になると二酸化炭素による温度上昇とその他の温室効果ガスによる温度上昇とがほぼひとしくなると考えられている。上式で計算すると、2×CO₂条件に対応するような大気質変化（2030～2040年頃）では、平衡温度上昇度は 3.0 ± 1.5℃ になると予想されている。

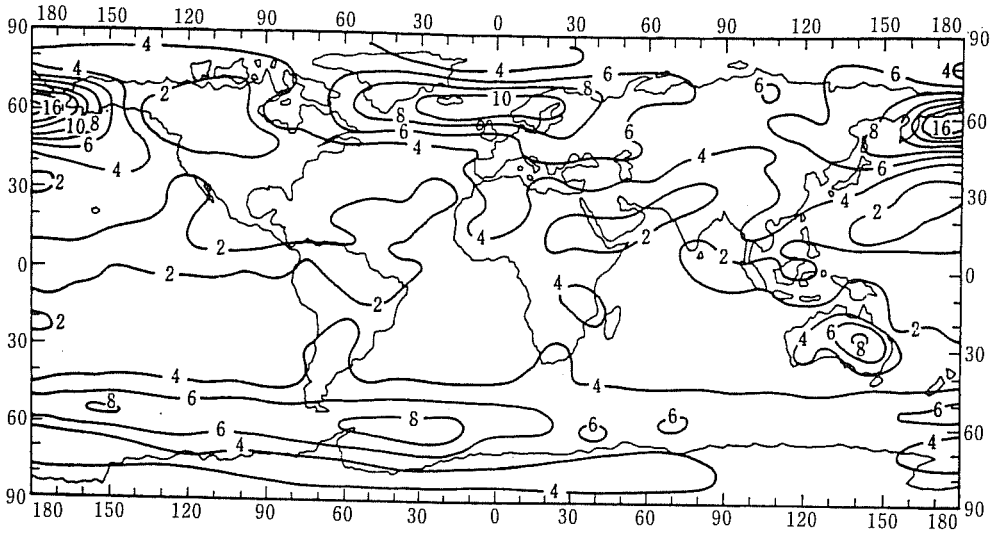
しかし、地球上の気候を決定している気候システム（大気—海洋—陸地・生物圏からなる）は大きな熱イナーシャを持っているので、温度変化は当然減衰してくる。この関係は次式で表わされる。

$$\Delta T_s = \mu \Delta T_{b,s} \quad (5)$$

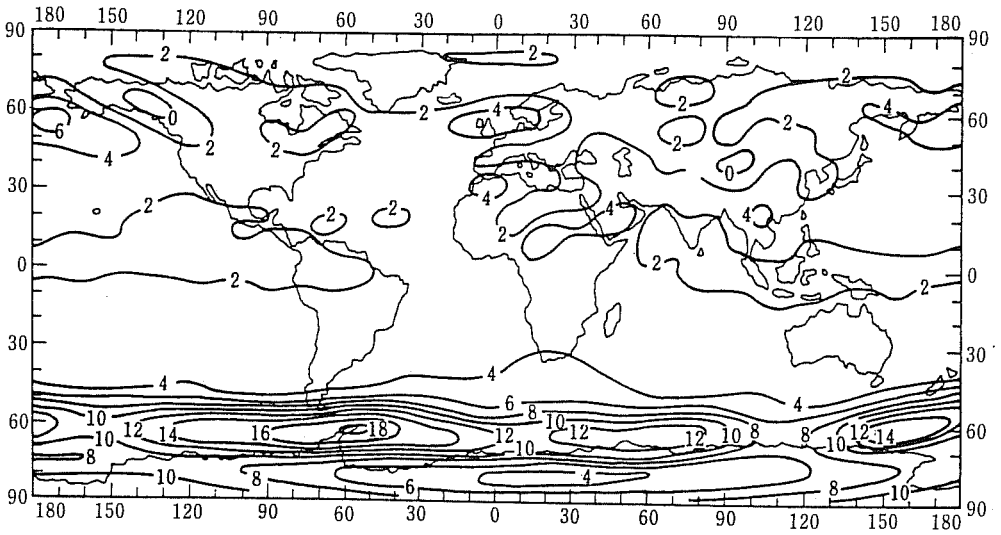
ここで $\Delta T_{b,s}$ と ΔT_s とは気候システムの熱イナーシャを無視した時と考えた時の気温上昇度、 μ は熱イナーシャによる温度変化減衰係数。10⁴年以上という地質学的時間スケールでは $\mu \approx 1.0$ とおけるが、10¹～10² という近未来の現象では $\mu \approx 0.5 \sim 0.9$ になるといわれている。気象庁では $\mu \approx 0.7$ を採用している(気象庁, 1989)。

最近、大気質の人為的変化による気候暖化の診断的研究に、大気大循環モデル(GCM)が広く利用されている。(たとえば、Hansen ら, 1988; Manabe and Wetherald, 1980; Washington and Meehl, 1984)。その1例が図5に示されている。図には 1×CO₂ と 2×CO₂ での地上気温の差（熱イナーシャによる減衰は無視）が示されている。図にみられるように、温度差は冬半球の高緯度帯で大きく、夏半球の低緯度帯で小さい。日本の付近では、冬季に 4～7℃、夏季に 2～3℃の昇温というシナリオになっている。海洋内での海流の動きと大気の流れとを結合した改良モデルの結果によると、南半球の高緯度帯の強い昇温域は消失する。これは海流によって多量の熱が深海へ運搬され、表層の昇温が抑制されるためといわれている。

このように大規模に気温分布が変化すると、大気中の大気の流れのパターンやその強度も変化し、水資源や植物生産に関係の深い水分条件（降水量、降水パターン、降水強度、蒸発能、



(a)



(b)

注) 上: 冬季(12、1、2月)
下: 夏季(6、7、8月)

図5 2×CO₂時の平衡上昇度(ΔT_b)の地理分布(Washington and Meehl, 1984)

流出など)も当然変化してくるといわれている。

6. むすび

不変と考えていた地球大気の化学組成が人類

の活動によって変化していることが明らかとなった。大気へ放出するガス類には多くの温室効果ガスが含まれており、21世紀半ばには大気の温室効果は2×CO₂条件に相当するレベルになるといわれている。このような変化は過去の自

然的な変化の約10万倍のスピードであり、多くのインパクトを自然生態系や農業生産に与えたと心配されている。

(お茶の水女子大学理学部 教授)

引用・参考文献

- 1) Budyko, M. I., Ronov, A. B., and Yanshin, A. L., (1985) 大気の世界史 (内嶋訳, 地球大気の世界史, 1989, 朝倉書店)。水文気象出版局。
- 2) Budyko, M. I., and Izrael, Yu. A., (1987) 気候の人為的变化。水文気象出版局。
- 3) Hansen, J., Fug, L., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S. R., and Russell, G., (1988) Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. J. Geophys. Res., 93, 9341-9364.
- 4) 気象庁 (1989) 近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し (IV)
- 5) Manabe, S., and Stouffer, R. J., (1980) Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. J. Geophys. Res., 85, 5529-5554.
- 6) 小倉義光 (1984) 一般気象学, 東大出版会。
- 7) Ramanathan, V., Cicerone, R. J., Singh, H.B., and Kiel, J. T., (1985) Trace gas trends and their potential role in climate change. J. Geophys. Res., 90, 5547-5566.
- 8) 平 朝彦・八木下晃司 (1989) 堆積岩からみた地球の歴史, 科学, 59, 367-377
- 9) Washington, W. M., and Meehl, G. A., (1984) Seasonal cycle experiments on the climate sensitivity due to a doubling of CO₂ with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed layer ocean model. J. Geophys. Res., 89, 9475-9503.
- 10) World Resources Institute (1987) A matter of degrees: The potential for controlling the greenhouse effect.

植物遺伝資源入門 1989

田中正武・鳥山國士・芦澤正和 編著

本書は15名の専門家の共同執筆による。

各執筆者は分担部分の急所を適確に易しく読者に提示している。同時に各人各様の豊かな個性が行間から滲みでており、魅力的な入門書となっている。専門外の人でも読みやすい。

第1章「遺伝資源とは」では、人類に有用な、またはその可能性のある生殖質を遺伝資源と規定しており、本書の内容をはじめに統括している。その上で、栽培植物の起源、伝播、日本への伝播などについて概説するとともに、最近の品種画一化による資源の消失の危険性を述べ、遺伝資源問題の緊急性を説いている。

第2章「遺伝資源の探索・収集、評価と保存」では、各事項の具体的な手続と方法を紹介している。導入・保存センターの設立・利用状況についても、国際的ネットワークや日本での情報管理などをわかりやすく説明している。

第3章「遺伝資源とその利用」は各種の栽培植物について、育種で成果をあげた例をあげている。読者はその豊富な例に驚かされ、一読して遺伝資源利用の巧拙が育種成果を如何に左右してきたかを知ることができよう。

第4章「遺伝資源の探索・収集の旅」では一転して、5大陸、日本での探索・収集旅行の実例が11例にわたって報告されている。本書の半分近くを占める分量であり、旅でもっとも注意したこと、苦勞したことなどを後継者のために、懇切に語り伝えている。読者はここで、遺伝資源を支える研究者の情熱を肌身に感じてうかがい知ることができる。

遺伝資源は育種研究のみならず、生理・生態等の基礎研究にも貴重な供試材料を提供する。その意味で本書は広い分野の研究者・学生にとって手離せない書となろう。

(技報堂出版刊, 274ページ 定価3,605円)

(東京大学農学部教授, 武田元吉)