地球温暖化の影響評価

内 嶋 善 兵 衛*

Assessment of Probable Effects of Global Warming

Zenbei UCHIJIMA*

I. は し が き

CALLENDAR (1938, 1958) によって再発掘された二酸化炭素と気候との問題は、人間活動の肥大化によって地球規模の環境問題として黒雲のように我々の前にたちはだかっている。TYNDALL (1861) がこの問題を初めて提示したとき、果たしてこのような事態をだれが想像したであろうか。まさに隔世の感がある。

このような変化をもたらしたのは、人口の爆発と化石燃料の大量使用である。1987年度に人類は炭素換算で59億トンに相当する温室効果ガスを放出した。この放出強度は、地質時代たとえば石炭紀に古代植物が100万年かけて蓄えた化石(太陽)エネルギーを10年間で消費する程度といわれている(BUDYKO ら1989)。すなわち、現在人類は地質時代に植物が大気に働きかけた強さの10万倍の強さで大気に作用している。

このような強い作用下では大気を中心とする炭素バランスに乱れが生じ、ここ100年間大気中のCO₂濃度は着実に上昇してきている。その勢いは強まり、最近では1.5~2.0ppmv/年の速度になってきている。そして、来世紀半ばには産業革命前レベルの2倍(≈600ppmv)になると予想されている。

温室効果ガス(GEG)のこのような濃度上昇は大気の温室効果を強化し、地表近くの気温を上昇させる。あとで説明するように、2倍のレベルになると、海洋の熱慣性を考慮したモデルでも、地球平均気温は2°C上昇する可能性がある。

この気温上昇は、後氷期のそれ(≈5°C/1.5万年)をはるかに上回っており、地球上に形成されている自然生態系と人間社会に大きなインパクトを与えるといわれている。そこで、本小論では、最近の研究成果と諸報告を参照して、CO₂気候温暖化の影響について説明する。

II. 温暖化の予想

RAMANATHANら(1985)は一次元の放射-対流平衡モデルを用いてGEG濃度と地球平均気温の平衡上昇度(ΔT, °C)との関係を研究し、次の関係を得ている:

$$\Delta T_{\text{CO}_2} = -0.677 + 3.019 \ln[\text{CO}_2(t)/\text{CO}_2(0)]$$

$$\Delta T_{\text{CH}_4} = 0.019[\text{CH}_4(t)^{1/2} - \text{CH}_4(0)^{1/2}]$$

$$\Delta T_{\text{N}_2\text{O}} = 0.057[\text{N}_2\text{O}(t)^{1/2} - \text{N}_2\text{O}(0)^{1/2}]$$

ここで括弧内のtは暦年を、同じく0はCO₂では1880年を、他のガスでは1980年を示す。CO₂濃度はppmvで、他のガスの濃度はppbvで示す。

上式から、単位濃度上昇あたりのΔTはメタン(CH₄)と一酸化二窒素(N₂O)で大きく、二酸化炭素

* お茶の水女子大学 * Ochanomizu University

図1 温室効果ガスの濃度上昇による気候温暖化(°C)の予想(STOUFFERら1989に加筆)

で小さいことがわかる。これは主として絶対濃度の差に由来している。

最近の大気-海洋結合モデルによる濃度上昇への気温の過渡的応答が図1に示されている。これから気温上昇は北半球において著しく、南半球で小さいことが分かる。それは南半球に海洋が多く、しかも南極大陸周辺での活発な沈降流によって多量の熱が深海へ運ばれるためといわれている。

北半球の日本の緯度帯では、2050年頃に約2°C、2150年頃に4°Cの気温上昇の可能性があるとして予想(予測ではない)されている。2°Cの気温差は、現在の平年気候でみると東京(15.3°C)と鹿児島(17.3°C)との年平均気温差に相当する。それゆえ、2°Cの気温レベルの変化は人間社会のみならず、地域に形成されている自然生態系にも大きな影響を与えるだろう。

もう一つの重要な結果は、北半球の高緯度地帯で気温上昇の大きいことである。これは気温上昇→海水の減少→海洋から大気中への熱流増大→気温上昇という正のフィードバックのためである。高緯度地帯での気候温暖化は、ボREAL林やツンドラの衰退を誘発し、土壌中に眠る多量の土壌有機物の分解を促進すると予想されている。これは大気中の温室効果ガスの濃度上昇を加速し、気候温暖化をさらに強めるといわれている。

III. 温室効果ガスの濃度上昇およびそれによる気候温暖化の影響

地球上の動・植物および人類は、長い時間のなかで地球自身と太陽との相互作用で準備された、地球上でのエネルギーの流れ、そして物質循環によって生きている。この流れと循環とは地球表面上に入射する太陽エネルギー量の多少によって著しく左右される。地表での太陽エネルギーの配分特徴は気候条件により大きく変化する。

それゆえCO₂気候温暖化は地表および生態系内でのエネルギーの流れと物質循環とを改変し、生物集団の構成と分布そして人類社会の営み(農業、林業、水産業など)にも大きなインパクトをもたらすだろう(例えばPARRY and CARTER 1984, EPA 1988)。

この様子を流れ図的にまとめると図2のようになる。図からわかるように、人間活動による温室効果ガスの濃度上昇の影響は下のようにならまとめることができる：

図 2 気候温暖化のインパクト (内嶋 1988)

温室効果ガス濃度の上昇

- 直接影響 (光合成活動の活発化, 蒸散の抑制)
- 間接影響 (気候変化を通して)
 - 温度状態の変化
 - 水文状態の変化
 - 海水位の上昇

この4つのルートを通してのインパクトは、人類および全生物がそれらの生をゆだねている環境の全局面に及んでくる。つぎに、インパクトの各々について簡単に説明しよう。

1) 直接影響

約20種の温室効果ガスが大気中に人為的に放出されているが、植物に直接に作用するのは CO_2 , SO_2 , O_3 と少ない。 SO_2 や O_3 の影響は大気汚染害として取り扱われているので、ここでは触れないことにする。よく知られているように、大気中の CO_2 は緑色植物の光合成活動の基本物質で、その多少は光合成活動、したがって乾物生産や収量に直接反映する。また、 CO_2 濃度は気孔開度の調節を通して葉面蒸散をコントロールする。

最近、高 CO_2 大気的光合成活動と蒸散活動への影響について多くの研究・調査が行われている。KIMBALL and IDSO (1983) は2倍の CO_2 濃度 ($\approx 600\text{ppmv}$) と1倍の CO_2 濃度 ($\approx 300\text{ppmv}$) で栽培した多くの C_3 作物 (イネ, コムギ, ダイズなど) の収量を比較して、平均増収率として下のような値を得ている:

$$\text{平均増収率} = 26 \pm 9\%$$

しかし、この増収率が農家の広い圃場にそのまま適用できるか疑問視されている。とくに窒素・磷酸肥料の施用が少く、病害虫防除の不十分な発展途上域では疑問視されている。

トウモロコシ, サトウキビなどの C_4 作物の光合成活動も $400 \sim 500\text{ppmv}$ の濃度までは上昇するが、増収効果は C_3 作物ほどではない。このような違いは CO_2 濃度上昇にともなう気孔開度の減少、すなわち気孔拡散抵抗の増加の差に原因している。 C_4 作物の気孔拡散抵抗の増加は C_3 作物のそれより著し

い。

気孔拡散抵抗の増加は、蒸散を抑制し葉温を高め、群落微気候を乾燥化に導く。高 CO_2 大気下では作物の葉温は通常 CO_2 レベルでより約 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 高くなるといわれている (VALLE ら 1985)。2 CO_2 条件下では蒸散量は対照区に比較して約 20% 低下するという報告もあるが、まだ研究は十分ではない。

2) 間接影響

(1) 温度状態の変化

図 2 から分かるように、気候温暖化につれ各地の作物栽培・植物成育にとっての温度資源が著しく改善される。このため、栽培北限や分布北限または高距はより北へ、またより高い標高へと移動するだろう。移動量は基礎となる気候温暖化のシナリオおよび緯度・地域によって若干違ってくる。GISS モデル (ゴッダード宇宙研究所の大気大循環モデル) によると、北半球の中緯度地帯の穀作地帯では年平均気温の 1°C の上昇は、

栽培北限の北への移動 約 $50\sim 200\text{km}$

栽培高距の上への移動 約 $150\sim 200\text{m}$

をもたらす (PARRY ら 1989)。この推定値と図 2 の結果とから、2050 年頃には日本でも作物の栽培北限が北へ $300\sim 400\text{km}$ 、高距が $300\sim 400\text{m}$ 上へ移動する可能性のことがわかる。

このような移動は、当然新しい病害、害虫、雑草の北への侵入を可能として、防除に大きな問題を投げかけるだろう。特に、熱帯・亜熱帯害虫の日本南部への定着が心配される。これは、マラリア、デング熱、日本脳炎を媒介する蚊類などの衛生害虫の分布域の広がりにもそのままあてはまる。また、中緯度帯南部や低緯度地帯では、作物の高温障害が心配されている。たとえば、秋まきムギ類は花成に低温処理が必要で、冬期温暖化が進むと低温程度が不足になり、現在のムギ作の南部地方 (メキシコなど) では耕作不能になると予想されている (ROSENZWEIG 1985)。これは、高緯度帯の気候温暖化と相まってムギ作地帯などの主な穀作帯がより北へシフトすることを示唆している。

高温と乾燥の組合せは亜熱帯原産のイネの生理活動、とくに開花受精にとっては致命的で、不稔発生の激増することが知られている (SATAKE and YOSHIDA 1978)。アメリカの環境保護局 (EEA 1988) は、このような研究結果から稲作地帯では高温障害の頻発、そして減収を予想している。

EMANUEL ら (1985) は 2CO_2 気候温暖化で世界の森林植生に次のような変化が生ずると報告している：

- ・世界の森林面積は 6% 減少、草地は 25% 増大
- ・ボREAL 林は 37%、ツンドラは 32% 減少
- ・温帯森林は湿潤型から乾燥型へ移行
- ・亜熱帯林は 22% 減少、熱帯林は 28% 増加

この評価から最大の植生変化は、昇温の大きいボREAL 林帯で生ずるものと思われる。KAUPPI と POSCH (1988) は GISS モデルからの気候暖化シナリオを用いて、ボREAL 林帯の北への移動について図 3 を発表している。未来は 2CO_2 気候暖化時に対応している。これから、有用なボREAL 林が温暖化につれより高緯度帯へシフトし、彼らの母国フィンランドの林は大幅に衰退する可能性のあることがわかる。

(2) 水文状態の変化

気温の上昇につれ、降水の量・強度・頻度・地理分布、大気の蒸発要求度、流出など水文状態が大きく変化するといわれている。大気大循環モデル (GCM) による降水シナリオや土壌水分シナリオは、温度状態シナリオに比較して精度が悪い。これを念頭においた上で、GCM による若干の結果を説明する。

図 4 は、気象研究所の GCM による降水シミュレーション結果である。上は全面積に対する雨域面積の百分率、下は全雨域面積への積雲性雨域面積の百分率を表わしている。これから 2CO_2 の温暖気候下では、雨域面積が約 5% 減少し、日雨量は増加する傾向のあることが分かる。これは対流・積雲性の降雨、すなわちシャワー性の雨が多くなることを示している。

図 3 ボレアル林分布への気候温暖化の影響
(KAUPPI and POSCH 1988)

降雨特徴のこのような変化は、流域水収支を乱し、水資源の利用効率の低下を招く。また、シャワー性降雨は雨滴分布がより大きい粒径の方へシフトするので、土壌面の圧密が強くなる。このため雨水の土層内への侵入が減少し、流去水が増える。これは土壌侵蝕を激化させると同時に、耕土層の貯蔵水分量の減少を招く。

一般に、気温の上昇につれて蒸発能および蒸発散能は大きくなる (BUDYKO 1983, 内嶋 1989)。内嶋 (1989) は拡散速度 (D , cm/s) と飽差 (mb) を一定、温度上昇を 3°C と仮定して、PENMAN 式を用いて次のような結果を得ている：

気温 ($^{\circ}\text{C}$)	5	10	15	20	25	30	35
$\Delta E_0/E_0$ ($\%/^{\circ}\text{C}$)	2.8	2.4	2.0	1.6	1.3	1.1	1.0

また最近、桜谷 (1990) は気温上昇、気孔拡散抵抗、温度などの変化の蒸発散能への影響を改良 PENMAN 式を用いて評価している。気孔抵抗が増すと気温上昇下でも蒸発散能は減少した。

シャワー性降雨の増加は降水間隔を長くする。この間に高い率で土壌水分が失われるので、夏期には耕土層が乾燥するといわれている。たとえば、GCM 実験から中緯度帯の畑作地帯では 2CO_2 温暖気候により乾燥し、旱ばつ発生の危険性が高いと指摘されている (MANABE and WETHERALD 1987)。内嶋 (1989) は 180mm の降雨が月間に 1, 2, 3 回と分けて降ると仮定して根圏内の土壌水分の変化を評価し、降雨の集中化につれて蒸発能>実蒸発なる期間が急増すると報告している。

この他、温度上昇は降雪量、降雪期間、結氷強度、結氷期間などにも著しい変化をもたらし、水資源の涵養やレジャー資源の豊さなどにも大きなインパクトを与えるだろう。

(3) 海水位の変化

図 4 降雨構造への気候温暖化の影響
(山崎 1989)

図 5 海水位上昇のシナリオ (THOMAS 1986)

図 6 気候温暖化のインパクト評価のための研究の流れ (内嶋原図)

気候温暖化により氷床・氷河・氷冠の融解と海洋表層の膨張が生ずると、海水位が上昇するといわれている。これは氷期・間氷期における海退・海進からも一応予想されることである。CO₂ 気候温暖化による海水位上昇は大きな問題で、いくつかのシナリオが発表されている。その一つの結果が図5に示されている。

海洋表層(数10m)の昇温あるなしで、水位上昇は大きく違ってくる。深層への熱流無しで表層の昇温・膨張があると来世紀末に約120cm、熱の多くが深層へ運ばれると約60cmの水位上昇になると予想されている。水位上昇のインパクトは海岸低地に人口密な水田地帯をかかえる東南アジア諸国で大きく、1

mの水位上昇で、広大な水田の水没、塩水の侵入、地下水の塩分増加などが生ずるといわれている。

バングラディッシュやエジプトでは、1 mの水位上昇で10~20%の人々が居住地を失い、国内総生産もほぼ同じ位減少すると予想されている (THOMAS 1986)。その他1 mの水位上昇で東南アジアを主とする水田作地域で、1千万人の桁の環境難民の発生もいわれている。しかし、これらの地域の詳細な地形図はなく、影響評価と対策確立のためには、水田地域を主とする詳細な地形調査が不可欠である。

その他、海水位上昇は海岸侵蝕の激化、護岸施設、荷役施設そして水利システムの見直しなど、インフラストラクチャーの再整備など深刻な問題をひき起こすものと思われる。

IV. おわりに

以上説明したように、人為的な気候温暖化は地球上の全生態系と人間社会に、今後1~2世紀の間に大きな影響を与える可能性がある。その影響を予想し、軽減するためには、地球、生物圏そして人間活動圏に関する我々の知識は断片的で、かつ不十分である。この欠点を補うには地球—生物—人間社会でのエネルギーの流れ、物質循環を統一的に取り扱う地球システム科学の展開が必要である。これを人間活動圏を中心にまとめると図6のようになる。

図から分かるように、関連する研究分野は大気大循環モデル—地域気候モデルから環境—生物領域を通して社会・経済領域まで広がっている。この問題の解決には地球的なスケールで学際的かつ国際的研究—分散広域型の巨大科学の推進が必要である。

文 献

- BUDYKO, M. I. (1983): 過去と未来の気候 (内嶋訳). 古今書院, 348 p.
- BUDYKO, M. I., RONOV, A. B., and YANSHIN, A. L. (1989): 地球大気の歴史 (内嶋訳). 朝倉書店, p. 198.
- CALLENDAR, G. S. (1938): The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **64**, 223-240.
- CALLENDAR, G. S. (1958): On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, **10**, 243-248.
- EMANUEL, W. R., SHUGART, H. H., and STEVENSON, M. P. (1985): Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic Change*, **7**, 29-43.
- EPA, OPPE, and ORD (1988): *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States*. No. 2, 10-1-10-51.
- KAUPPI, P. and POSCH, M. (1988): A case study of the effects of CO₂-induced climate warming on forest growth and the forest sector: A productivity reactions of northern boreal forests. In: *The Impact of Climatic Variations on Agriculture (I)* (eds. by PARRY, CARTER, and KONIN), Kluwer, Dordrecht, 183-195.
- KIMBALL, B. A. and IDSO, S. B. (1983): Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use and climate. *Agric. Water Manage.*, **7**, 55-72.
- MANABE, S. and WETHERALD, R. T. (1987): Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. Atmos. Sci.*, **85**, 1211-1235.
- PARRY, M. L. and CARTER, T. R. (1984): *Assessing the Impact of Climatic Change in Cold Regions*, SR-84-1, IIASA, 42 p.
- PARRY, M. L., CARTER, T. R. and PORTER, J. H. (1989): The greenhouse effect and the future of UK agriculture. *J. Roy. Agric. Soc. England*, 120-131.
- RAMANATHAN, V., CICERONE, R. J., SINGH, H. B. and KIEHL, J. T. (1985): Trace gas trends and their potential role in climate change. *J. Geophys. Res.*, **90**, D3, 5547-5566.
- ROSENZWEIG, C. (1985): Potential CO₂ induced climatic effects on North American wheat-producing regions. *Climatic Change*, **7**, 367-389.
- 桜谷哲夫 (1990): 気候変化の耕地蒸発散への影響予測. 日本農業気象学1990度大会予講集, 68-69.
- SATAKE, T. and YOSHIDA, S. (1978): High temperature-induced sterility in indica rice at

- flowering. *Jpn. J. Crop Sci.*, **47**, 6-17.
- STOUFFER, R. J., MANABE, S. and BRYAN, K. (1989): Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂. *Nature*, **342**, 660-662.
- TYNDALL, I. (1861): On the absorption and radiation of heat by gases and vapours and on the physical connection of radiation absorption and conduction. *Phil. Mag.*, **22**, 167-194, 273-285.
- THOMAS, R. (1986): Future sea level rise and its early detection by satellite remote sensing. In. *Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate* (ed. by TITUS, J. G.) No. 4, 19-36.
- 内嶋善兵衛 (1988): 農業気候資源に関する研究の現状と問題点. 気研ノート, No. 162, 81-93.
- 内嶋善兵衛 (1989): CO₂ 増加による気候変化と砂漠化. 気候影響・利用研究会報, No. 6, 31-36.
- VALLE, R., MISHOE, J. W., JONES, J. W. and ALLEN, Jr. L. H. (1985): Transpiration rate and water use efficiency of soybean leaves adapted to different CO₂ environment. *Crop Sci.*, **25**, 477-482.
- 山崎孝治 (1989): 気象研究所・気候モデルの現状. WCRP 第3回シンポジウム報告集, 1-9.

(1990年10月17日受理)