

研究展望

地球環境問題と土木・環境工学

GLOBAL ENVIRONMENT AND RELATED ISSUES TO CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

松尾友矩*

By Tomonori MATSUO

1. 問題の所在

地球環境問題または地球規模の環境問題というとならえ方はここ1~2年の間に急速に一般化してきた。特に国際政治のうえでの動きは、こんなに最初からスパートしてどれだけ続くのであろうかと心配されるような扱われ方がされている状態さえある。それではこの地球環境問題とはどのようなことを指しているのか、今、なぜ地球環境問題なのか、そして土木系の分野からみたとときどのような問題がその範囲に入ってくるのかについて考えてみたい。

環境庁による環境用語豆事典¹⁾では地球環境問題は次のように説明されている。いわく「オゾン層の破壊、地球の温暖化、酸性雨などその影響が一国内にとどまらず国境を越え、ひいては地球規模にまで広がっている環境問題や、国際的な取組みが求められている熱帯雨林の減少、砂漠化、開発途上国における公害問題などの開発途上国の環境問題を総称する概念。今や環境政策の最重要課題となっている」。また、環境白書²⁾では主な地球環境問題を「地球的規模の環境問題」、「国境を越える環境問題」および「開発途上国の公害問題」の3種類と分類している。さらにまた、取組みの対象を明確にすることを目的として、「主として先進国の経済活動に起因する地球環境問題」、「主として開発途上国において発生している地球環境問題」、および「先進国および開発途上国のいずれの活動にも起因する地球環境問題」の3つに分

けることも行われている³⁾。具体的には、オゾン層の破壊、二酸化炭素濃度の上昇等による地球の温暖化および酸性雨については、主として先進国の高度な経済活動に起因すると考えられている問題である。また、熱帯林の減少、砂漠化の進行および開発途上国における公害問題は、主として開発途上国における貧困、人口の増加や都市集中、経済活動の拡大などを背景とし、開発途上国において顕在化している問題である。さらに、野生生物種の絶滅および海洋汚染等については、先進国および開発途上国のいずれの活動にも起因している問題である。

このように地球環境問題はいくつかの切口で切ることができるし、対象となる現象も扱い方によってはその項目も変わってくることになる。ここでは次のような9つの分類で考えていくことにする。①成層圏オゾン層の破壊、②二酸化炭素等の温室効果ガスによる地球の温暖化、③酸性雨、④熱帯林の減少、⑤土壌侵食、砂漠化の進行、⑥開発途上国の公害問題、⑦野生生物種の減少、⑧海洋汚染、⑨有害廃棄物の越境移動。そしてこれらの現象あるいは問題の間には図-1⁴⁾のような複雑な相関関係がある。

こうやって列挙してみると、それぞれ個別の問題は、かなり以前からその問題点が指摘されてきたものであり、ここ1~2年で急に問題が顕在化してきたわけではないことは十分認識しておく必要がある。土木・環境工学の分野においても個別の問題についてはそれぞれの分野で対応をとってきたものも多く、改めて展望を語る必要もないのかもしれない。しかし、それを確認したうえでなおかつこれらの問題を地球環境の問題として大きな概念で総称し、人々の自覚を促し、国際的な協力のもとに対応がとられていくなれば、それは、まさに地球の安定

* 正会員 東京大学教授 工学部都市工学科

(〒113 文京区本郷7-3-1)

Keywords: global environment, atmospheric structure and composition, global climate model, global systems engineering

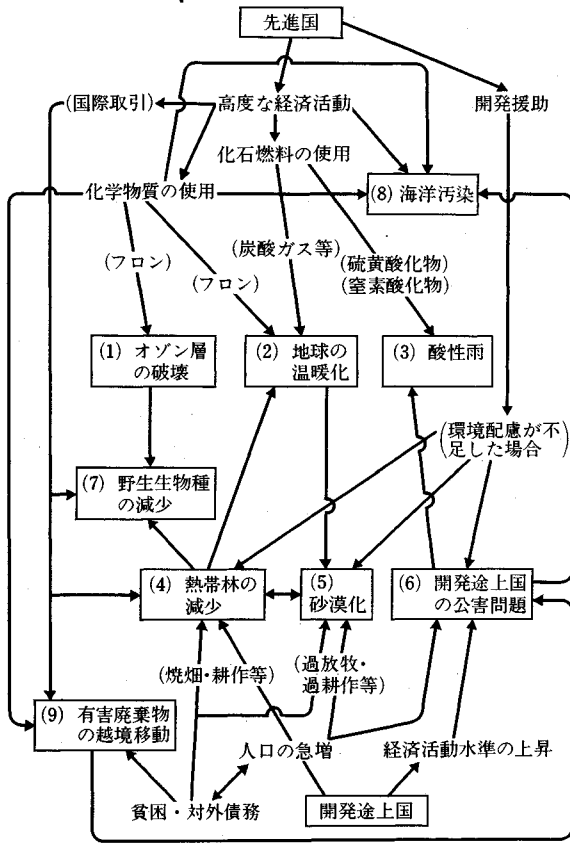


図-1 「問題群」としての地球環境問題⁴⁾

的な存続にとって非常に重要な一歩を踏み出すことになることは評価すべきことである。

本稿においては、従来の土木・環境工学の視点はどちらかといえば、地球表面のごく近傍(地上, 地下を含めて)、あるいは陸地に近い海洋のみをその対象としがちであったのではないかとこの反省から、地上をはるかに離れた地球の大気の大気構造、構成、運動といった事柄についての情報を整理する中で上で述べてきたいくつかの地球規模環境問題の位置づけを示すことを試みてみたい。かなりの程度教科書的な整理になるが土木・環境工学分野の目を高層大気まで見開きたいという心意気はご理解いただけたらと思う。またあわせて地球システム工学への積極的な参画のすすめを述べてみたい。

2. 大気・海洋の構造、構成、循環と地球環境問題

(1) 地球をとりまく大気の大気温度分布と大気層の区分
地球をとりまく大気の大気構造を知る有力な手段は大気温度の高度分布を知ることであった。地上に接する対流圏の上層に等温な大気層の存在が確認され、成層圏と名づけられたのは1902年のテスラン・ド・ボールの気球に

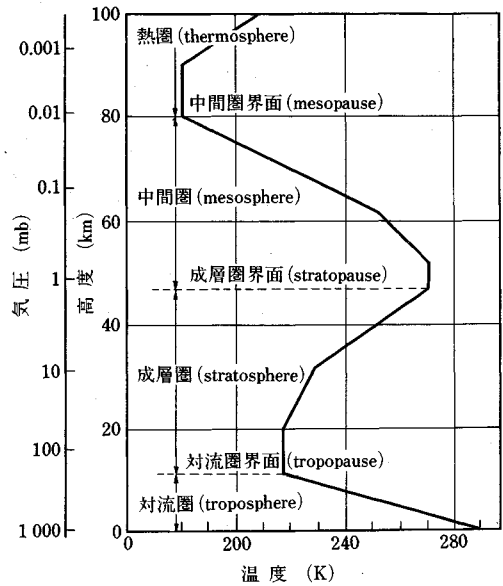


図-2 温度の高度分布(アメリカ合衆国標準大気)と大気層の区分⁶⁾

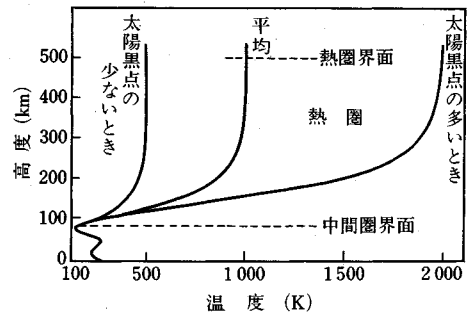


図-3 熱圏内の温度の高度分布⁷⁾

よる観測によるとされる⁵⁾。その後航空機の発達、ロケットの発達、計測機器の発達によって、超高層に至るまでの大気の様子はかなりの程度明らかにされてきている。

温度の高度分布(アメリカ合衆国の標準大気組成(1976)を基準にした)に基づく、大気層の区分の代表例は図-2⁶⁾のように示される。そして熱圏の上層は図-3⁷⁾に示されるように高温の等温層が形成されている。この熱圏内の温度は太陽放射の影響を直接に受けるので太陽黒点の多少によって500°Kから2000°Kの範囲で大きく変化している。また高度200 kmでは空気の密度は地表近くのその10億分の1以下で、ほとんど真空状態に近い。この熱圏高温等温層と80 kmあたりの中間圏界面付近の低温等温層との間の領域では、上に向かって急に気温が上がる場所であるから、強い逆転層の様相を呈することになる。

このように大気温度の鉛直分布の形態の特徴だけからいうと大気の大気層構造は、下から、対流圏、成層圏下部

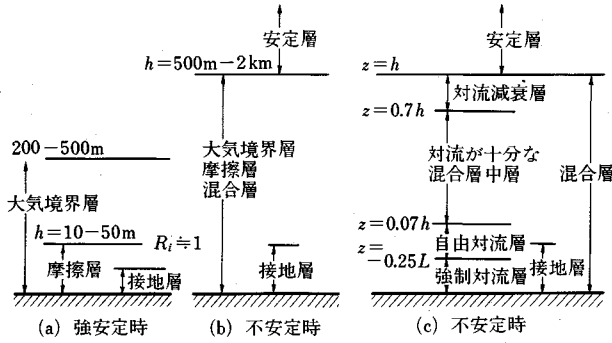


図-4 大気境界層の模式図⁹⁾

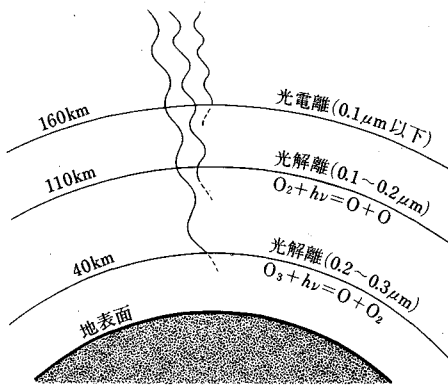


図-5 大気中のいろいろな層の中の光電離および光解離過程により、太陽放射の中の紫外線が地表面に達するまでほとんど吸収されてしまっていることを示す模式図¹⁰⁾

の等温層、成層圏に現われる第一の逆転層、高温の等温層、中間圏に現われる第2の対流圏、大気温度の中で最低となる熱圏下層の等温層、そして熱圏における第2の逆転層、と高温等温層という順番になっていると読み取ることができる。この温度分布よりわかるように地球大気は3つの独立した大気加熱のエネルギーを太陽放射から得ていることがわかる。すなわち、可視光線を中心と

する太陽放射を受けた地球表面による加熱が支配する高度20km付近までの対流圏と成層圏等温層よりなる「下層大気」、波長230nm付近の紫外線をオゾン層が吸収することによる加熱が有効な高度20~100kmの「中層大気」、波長約100nmの紫外線を酸素や窒素の原子が吸収し光電離されるに際し加熱される高度100km以上の「高層大気」、の3つの層に大別されることになる。

一方、対流圏のごく下層、地表に近い部分(地表から1km程度)では、水平のスケールが1000kmのオーダーの範囲内で大気境界層が形成されその内部では乱流混合が支配的となる。大気境界層の最底層には接地層が認められ、そこでは風速分布は対数則に従う。大気境界層の様子は大気の安定度によって変化するがその概要は図-4⁹⁾に示される。一般的な大気汚染の問題は多くの場合この大気境界層内の領域での問題である。

(2) 大気成分の高度分布

地表における大気の99%以上を占める主要成分は窒素ガス(N₂)と酸素ガス(O₂)が4:1の比で構成されており、気圧は約1000mbとなっている。しかし、超高層大気においては、太陽放射の紫外線的作用で光電離や、光解離が生起されて、気体も分子のままでは存在できずイオンや電子、原子の状態で存在することになる。前述したように、波長の短い紫外線から順に上層で吸収されそれがそれぞれの層の熱源になるわけでもあるがその様子は模式的に図-5¹⁰⁾に示される。この中でまず問題になるのがこの図では40km付近に示される波長にして200~300nm(0.2~0.3μm)の紫外線をオゾンが吸収している作用である。

太陽放射のスペクトルは図-6¹¹⁾のように示されるが地球大気の外層(この定義はあいまいであるが)でのスペクトルと地表面でのスペクトルでは後者において

300nm以下の紫外線がカットされている点に大きな相違がある。そしてこの紫外線のカットがなければ地表上に生物は存在できなかったであろうといわれているところである。オゾン層の破壊が進めば紫外線が地表に直達することになり皮膚ガンを発生させる原因となったり、生物種の変化を導くといった議論の出発点になるところである。なぜこの付近にオゾン層が形成するのか、どんなメカニズムでオゾンの過剰な分解が進むのかについての詳細は成書¹²⁾に譲るが、大気組成の鉛直分布の概要は図-7¹³⁾に示されるようである。20~40km付近の成層圏におけるオゾン濃度の増大する領域が成層圏オゾ

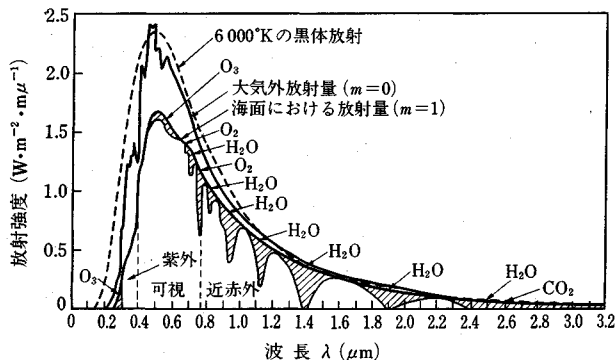


図-6 水蒸気およびオゾンの吸収の効果を受けた日射の波長分布(斜線の部分が吸収された量である)¹¹⁾

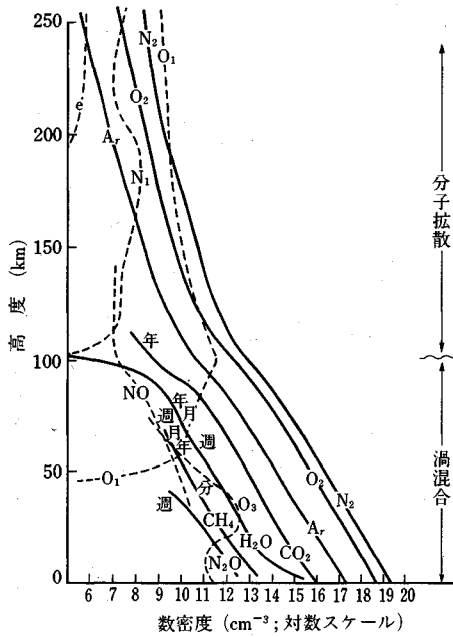


図-7 大気組成の密度の鉛直分布 (図中に、光化学的時定数も示されている。高度約 100 km 以下では混合比一定の傾向、また約 200 km 以上では重力分離の傾向が認められる。ただし、O₁, N₁ は酸素原子、窒素原子を示す)¹³⁾

ン層とよばれる。この層でのフロンガス(クロロフルオロカーボン類(CFC)の総称)からの遊離塩素がオゾン層破壊の元凶となっている。

一方、前項で述べたように地球をとりまく熱源の中で、現在問題になっている地球温暖化の問題は、地上に届いた太陽放射を吸収した地表を熱源とする最下層での熱収支の問題である。温室効果ガスとして酸素や窒素は不活性であり、二酸化炭素、水蒸気、メタンガス、一酸化二窒素、フロンガスは活性であるといわれる。これは酸素や窒素分子は紫外部の光に対しては活性であったのに対して、地球放射の主要成分になる赤外領域の放射に対しては吸収を示さないのであるが、いわゆる温室効果ガスは太陽放射の主成分である可視光線の領域では大きな吸収を示さないが、この地球放射の主成分である赤外領域にそれぞれ特有の吸収帯をもつということなのである。

図-7に示されるように大気下層には二酸化炭素、水蒸気、メタンガス、一酸化二窒素、酸化窒素およびオゾンが含まれていて、これらが地球表面からの赤外線を主成分とする放射を吸収し、再度地球表面へ放射するために地球表面の温度を、放射冷却で計算されるより高い温度に保つ保温効果をもつことになる。したがってこれはオゾン層と同様な意味において、現在の生物圏の存在にとって最も重要な保温上の効用をもつものとなっているのであるが、一定濃度以上に高濃度になることは現在の

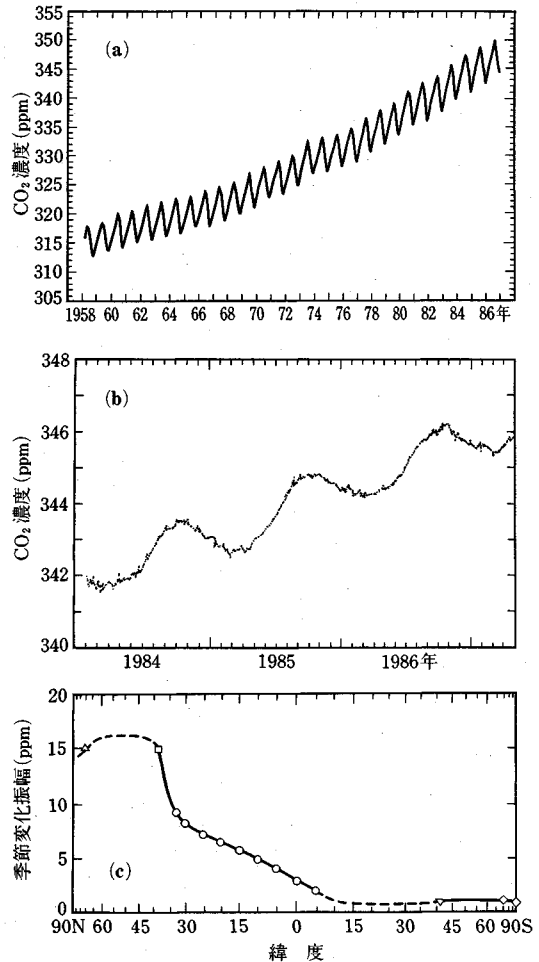


図-8 (a) ハワイ島のマウナ・ロアにおける月平均大気 CO₂ 濃度(バカストウとキーリング, 1981)¹⁴⁾, (b) 南極昭和基地における CO₂ 濃度¹⁴⁾, (c) CO₂ 濃度季節変化の振幅の緯度分布(田中ら, 1987)¹⁴⁾

各種のバランスを崩すことにもなり、温暖化問題として問題とされることになる。地球生態系は大気微量成分の微妙なバランスによって成立していることになっている。これらの成分の構成比は高度 10 km 付近までの対流圏においてはほぼ一様に保たれている。このように大気成分の構成比が一様であるということはこの圏内では気体の混合が相対的にすみやかによくなされていることを示すものでもある。

地球温暖化問題に際して問題となる二酸化炭素濃度の近年の変化は図-8¹⁴⁾にその代表例が示される。測定される濃度の値は発生負荷量と固定量(植物への固定、海洋への溶解も含めて)の差によって決まることを考えると森林の減少、砂漠化の進行も二酸化炭素濃度増大を加速する方向へ働く。現代における総体としての人間活動が、現在の濃度変化の原因を作っていることになる。問

表-1 温室効果微量気体による気温上昇効果の理論値の一例¹⁵⁾

化合物	1ppb当たりの気温上昇効果 (°C/ppb)
二酸化炭素 (CO ₂)	0.000004
メタンガス (CH ₄)	0.0001
一酸化二窒素 (N ₂ O)	0.001
フロン (CFC-11)	0.07
フロン (CFC-13)	0.10
四塩化炭素 (CCl ₄)	0.05
亜硫酸ガス (SO ₂)	0.01

Ramanathan et al. (1985)

題点はまさに、現代社会がきわめて高精度に組織化されてしまっているためにほんのわずかの変動に対しても非常に弱い体制になってきているという点にあるように思われる。現代文明の最大の弱点を示しているともいえるわけである。

なお、大気微量成分の現状レベルからの濃度上昇が地表大気温度の上昇に及ぼす影響の程度は物質ごとに異なっており、その理論値の代表例は、表-1¹⁵⁾に示される(実際の昇温は水蒸気量の増加等のため、この表より計算される値よりずっと大きくなる)。二酸化炭素は単位濃度当たりの温暖化寄与率は必ずしも大きくないが、他の物質に比べればはるかに存在濃度が高いので地上気温変化への寄与率は大きくなる。フロン問題はオゾン層問題とともに温暖化問題にも大きな影響を与えるものであることは注意しておくべきである。

大気成分の中では前述のガス成分のほかにエアロゾルとよばれる微粒子の存在と水蒸気が凝結した水滴の存在が地球表面付近での熱収支には重要な影響を与えているものとなる。成層圏に達する火山灰の吹上げ、人口衛星を含む天体の落下物が大気層で燃焼して生じる灰分、森林の大火災、航空機を含む地上での燃焼ガス中の微小粒子、砂漠からの砂塵、などがエアロゾルの原因物質として例示されている¹⁶⁾。エアロゾルは主として太陽放射を散乱させる効果として働き、地球全体のアルベド(太陽放射を反射する割合)を大きくする作用をもつ。したがっ

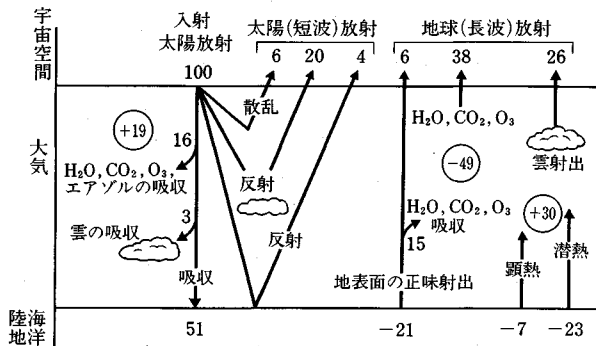


図-9 地球-大気系の放射収支¹⁷⁾

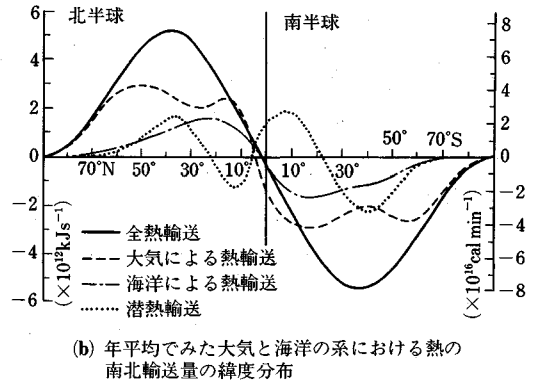
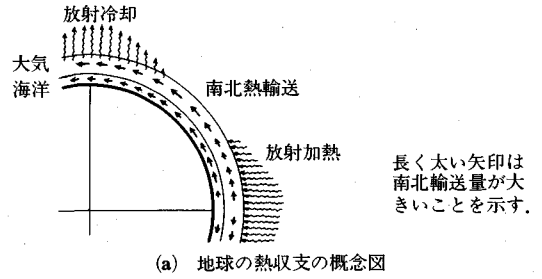


図-10 地球の南北熱輸送 (浅井富雄, 大気科学講座2, 東京大学出版会, 1981より)¹⁸⁾

てエアロゾルの増大は地球を寒冷化させるように働く。一方、水蒸気と水滴(雲を形成する)は太陽放射と長波長の地球放射の両方の成分に対して吸収および散乱の効果をもつ。特に雲の存在はそれが形成される高度や雲量が地表温度にきわめて大きな影響を及ぼすことになる。後述する気候モデルでもこの雲の扱い方が最も不確実な要因の1つとなっている。

(3) 対流圏ハドレー循環と砂漠化・酸性雨問題

地球大気および海洋を含めた固体地球が吸収する太陽放射の熱量と地球大気外縁から地球放射として出る熱量は等しく、その収支は図-9¹⁷⁾のように示される。しかし、地球が球形をしているために、地球が吸収する太陽エネルギーは赤道付近の低緯度地帯の方が北極や南極付近の高緯度地帯よりはるかに大きい。一方地球放射として出ていく熱量は緯度によってあまり変わらないことを考えればなんらかの方法によって低緯度地帯から高緯度地帯に向けて熱が移動されなければならない。この働きを大気と海洋の大循環が果たすことになる。この低緯度赤道付近と極地方との間の熱輸送の概念図とその緯度分布は図-10¹⁸⁾で示される。

大気における循環は主として対流圏における循環と成層圏を含む循環に分けて考えられる。前者は図-11¹⁹⁾のように示され、後者は図-12²⁰⁾のように示される。図-11に示されるハドレー循

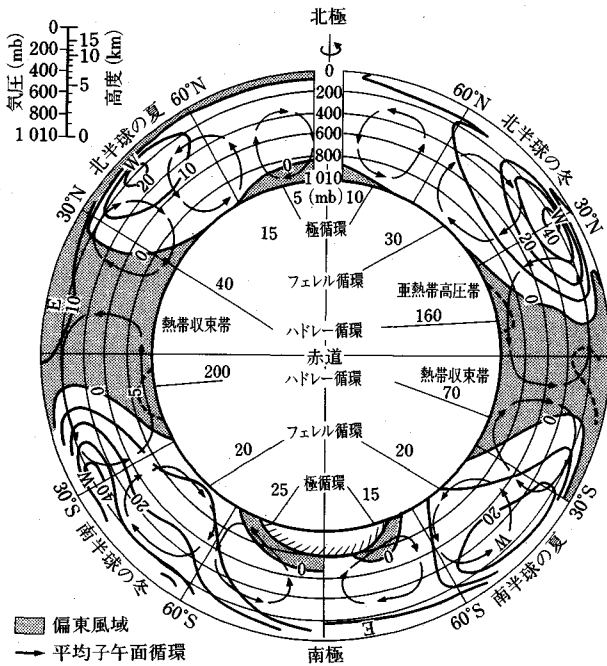


図-11 平均した南北鉛直断面(子午面)循環(浅井富雄, 前出, 1981より。3つの循環細胞はそれぞれ矢印で代表的な流れとそれに伴う質量輸送の大きさ(単位 10^9 kgs^{-1})を示す。南北鉛直断面内の実線は東西方向の地衡風成分の等値線, 西風が正, 東風が負で単位は ms^{-1} , 影をつけたのは東風が吹いている領域。)¹⁹⁾

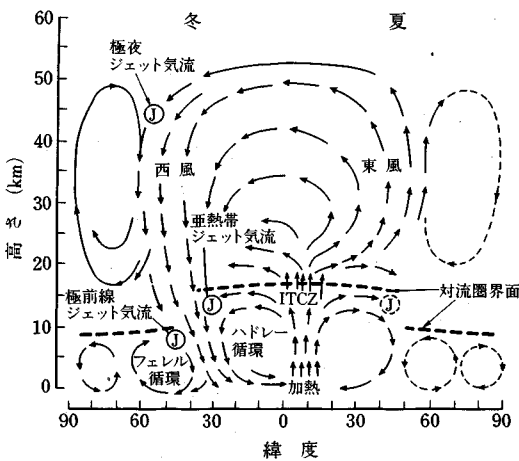


図-12 大気大循環の模式図²⁰⁾

環の下降流が生じる地域に当たる北緯 30° 付近は空気が集積して高気圧帯となる。この亜熱帯高気圧帯の下降気流の生じる地域では、空は晴れ、雨は少ない。陸ならば砂漠地帯になる。サハラ砂漠や、アラビア半島の砂漠、中国ではタクラマカン砂漠や、ゴビ砂漠、さらには北アメリカのグレートソルトレーク砂漠やモハーベ砂漠がこの付近に位置することになる。亜熱帯高気圧帯では平均

して1年に1m以上の水の層が蒸発するが、降雨量はその60%くらいにしかならないといわれる。そしてなんらかの理由によってこの周辺部において、地表の状態がアルベドの大きな状態に変化したとすれば、そこは太陽放射を吸収する割合が小さい冷却域になり、下降気流を誘うことになる。前述のように下降気流の生じやすいところは砂漠化しやすいことになっており、緑を伐採してしまうような土地利用の変化はアルベドを大きくするように作用し砂漠化を誘うことになる。これが砂漠化問題への人間活動の影響を説明するメカニズムである。

一方、図-12に示される成層圏を含む循環は対流圏大気成分が成層圏へ送り込まれる理由を説明するものである。地表面で放出されたフロンガスが対流圏を通過し、成層圏にまで達してオゾン層を破壊するようになるのもこのような循環流を通しての気体混合によるわけである。また、図-11に示される北半球の冬期における亜熱帯ジェット気流はほぼ地球を1周するような定常的な偏西風となり中国の砂漠地帯で巻き上げた黄土を春先の日本へ届けるなど長距離の物質輸送を担う大気の流れとなっている。このように北半球ではコリオリの力を受けて対流圏上層部での気流は西風になっており、酸性雨原因物質の長距離輸送

の影響は1000kmのオーダーを越えるスケールの問題として考えられていくことになる。その他の一般的な大気汚染に関する空間的なスケールの関係は表-2²¹⁾に示される。スケールが小さくなるほど地形や地表の状態などローカルな影響をより受けることになる。

(4) 地球熱収支における海洋の働きと気候モデル

図-9に示されるように地球表面での熱収支を考えると海洋が地球表面の70%を占めていること、大気の1000倍以上もの熱容量をもつことを考えるとその影響は無視することができない。特に大気の放射冷却を緩和させる働きをもつ潜熱輸送は海水の蒸発がその主要な要因となる。また図-10に示したように海流による熱輸送も重要な機能を果たしており地球規模での熱輸送量、

表-2 スケールと各種過程の影響²¹⁾

スケール	汚染現象	大気汚染の状況
リジョナル (100~1000km)	長距離輸送	酸性雨 ほう子、花粉の長距離輸送
メソ (10~100km)	中距離輸送	光化学スモッグ 高煙突からの汚染
ローカル (1~10km)	高濃度汚染	広域高濃度汚染
マイクロ (0~1km)	発生源近傍汚染	交差点や道路ぎわの汚染

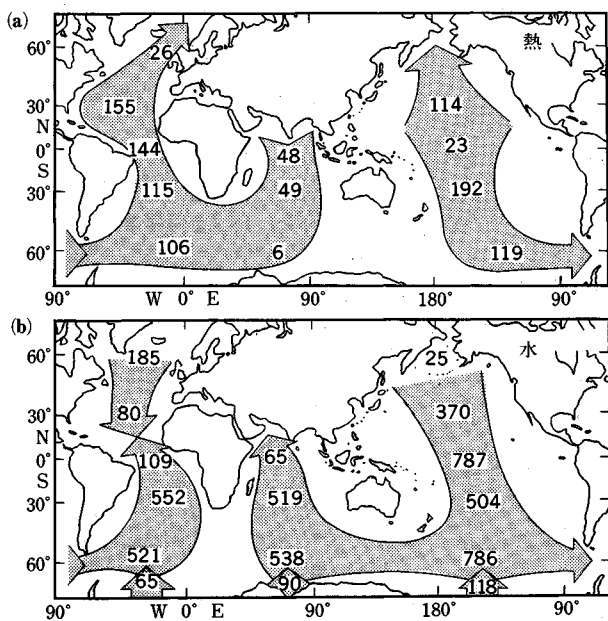


図-13 (a) 熱と (b) 水の循環 (熱輸送量の南北成分を 10^{13} W 単位, 水輸送量を 10^3 トン s^{-1} 単位で表わす。ストンメル, 1980)²²⁾

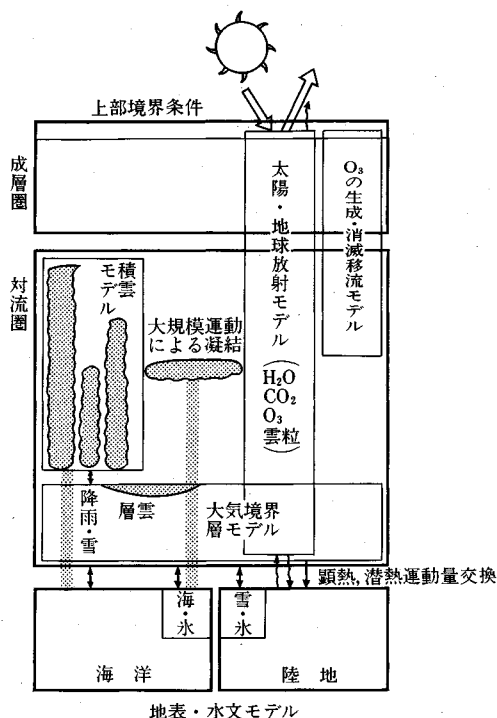


図-14 大気大循環モデルに組み込まれている物理過程の模式図 (気象研究所の大気大循環モデルをもとにしたもの)²⁴⁾

と水の移動量は図-13²²⁾のように示される。海洋における垂直方向の混合も海水面の水温を決めるうえで重要である。南アメリカペルー沖から南太平洋の広い海域に現われるエルニーニョとよばれる高温水域の規模は赤道付近に生じる東向きの貿易風の強さによって決まるといわれている。東風が弱いと垂直方向の上昇流が小さくなり海面に高温水域が広がるからと説明されている²³⁾。

二酸化炭素など温室効果ガスの増大時の気候変化を予測する気候モデルとしては大気と陸地、海洋との間の熱

収支をもとにして、三次元大気大循環モデルあるいは、大気・海洋結合循環モデルなどが開発されることになる。わが国の気象庁の大気大循環モデルを構成する物理過程は図-14²⁴⁾に示される。このモデルではまだ海洋の循環までは含まれておらず海洋の影響は海面水温、海水分布を外部データとして与えることにしてある。

表-3 CO₂ 倍増時の平衡状態の気候に関する実験：雲分布をモデルで予報した場合²⁵⁾

	GFDL ^a	GISS ^b	NCAR ^c	UKMO ^d	MRI ^e
水平分解能	スペクトル R15(注1)	格子 8° lat × 10° long	スペクトル R15	格子 5° lat × 7.5° long	格子 4° lat × 5° long
垂直分解能	9層 (地表~0mb)	9層 (地表~10mb)	9層 (地表~0mb)	11層 (地表~圏界面)	5層 (地表~100mb)
季節変化	有(日変化無し)	有(含日変化)	有(含日変化)	有(含日変化)	有(含日変化)
混合層の厚さ	50m	気候値 (<65m)	50m	60m	50m
海流による熱輸送	0	気候値	0	気候値	0
海水モデル	1層 lead無し(注2)	2層 lead有	1層 lead無し	1層 lead無し	1層 lead無し
地上気温上昇量	4.0°C	4.2°C	4.0°C	5.2°C	4.3°C
降水増加量	8.7%	11.0%	7.1%	15.0%	7.4%

a) NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory : Wetherald and Manabe (1986)

b) NASA Goddard Institute for Space Studies : Hansen *et al.* (1984)

c) National Center for Atmospheric Research : Washington and Meehl (1984)

d) United Kingdom Meteorological Office : Wilson and Mitchell (1987)

e) 気象庁気象研究所 (Meteorological Research Institute)

(注) 1. R15 : スカラー量を球面関数展開し、東西波数15までで切断したモデル

2. lead : 海水と海水の間にできた間隙

地球温暖化の程度（地上気温の上昇値）を予測するシミュレーションモデルの例は、表—3²⁵⁾のように開発されてきているが、問題も多く残されているようである。特に大気側においては雲の分布の扱い方、海洋においては海洋の混合あるいは循環のモデル構成、さらには予測値の得られる点が500~1000 kmの格子点であること、などの理由により詳細な影響評価にとってはいたって不十分なものとなっている。表—3によれば二酸化炭素(CO₂)が倍増し、平衡に達したときの地上気温の上昇は全球平均で2.3~5.2°Cの間と予測されている。

このような地上気温の上昇は海面の上昇を予測させることになっている。わが国においても主要大都市は海洋に面して位置しており海面上昇の影響を受ける地域が大きくなるのが心配されている。建設省の試算によれば東京、名古屋、大阪、等において1.0 mの水位上昇に対して合わせて約2900 km²の面積が水没するとされている。

地球温暖化の影響は地球表面の平均気温の上昇、海面の上昇、のほかに気象条件への影響も問題とされなければならない。土木の分野においては降水量の変化、降水パターンの変化、などの水文学的な分野での諸現象に及ぼす影響は特に大きい。そしてこの水収支の問題は水資源問題へ発展し、都市の存在、産業の存在、さらには治山、治水の問題にも影響を与える。表—3のモデルでは降水量は全体で7.1~15.0%の範囲で増大することが予想されている。しかし、降水変化の影響は河川流域といったきわめてローカルな影響として現われるのでここに示されているモデルの精度ではとても実用に耐える予測値が得られるとは考えられない。地球スケールでの気候変化の影響がローカルな水文特性に与える影響を解明していくことは重要な今後のテーマになっていく。

3. 地球上各地で共通に起こり得るという意味での地球環境問題

熱帯雨林（その他での森林を含めて）の減少、砂漠化の進行、土壌流出、いわゆる公害問題（わが国での典型七公害を含めて）、野生生物種の絶滅、海洋汚染、有害廃棄物の越境移動（主として開発途上国への廃棄物の移動）などの問題は、地球レベルでの大気の循環や海洋の循環といったレベルの現象に比較すれば、相対的にいって地域特性の影響を強く受ける問題である。とりわけ、開発途上国において象徴的に顕在化してきており、対策案を求められる緊急性という意味では最優先の順位が与えられるべきことになっている。

橋本道夫氏²⁶⁾はこのように途上国の環境問題を3つのフェーズにより論じている。すなわち、第1のフェーズは基本的な人間生存の条件（Basic Human Needs）

を確保するレベルの問題であり、安全な水の供給、排泄物の始末、食料、最低限の住居の保証をいかに進めるかが問われる。第2のフェーズは開発と環境保全の相克に関するもので工業化を意図する途上国においてまず解決しなければならない問題である。しかし、多くの場合環境保全上の対策は汚染源をいかになくしていくかといったわかりきった限られたものになるのであるが、経済性とのバランスがネックとなっている。原因も対策もわかっていても実行が難しいということになりがちである。最終的には環境保全を果たしつつ開発を進めるという持続可能な開発（Sustainable Development）をいかに達成していくかが問われることになる。これは工業化先進国においても共通する課題でもあることは明記しなければならない。

第3のフェーズはまさに地球規模の環境問題のレベルである。これは過去100年間に地球人口は3倍になり、エネルギー消費は60倍になったとき、環境問題もいまや、地域、圏域、国といった空間的な条件をいとも簡単に越えてしまっているということである。何をやるにしても宇宙船地球号の同乗者として協調と自制を余儀なくされる状況になっているわけである。

このような全体状況の中で日本の経済力、技術力への国際的な期待は大きいものがある。技術的な分野でいえばまさに土木・環境工学の分野が第一級の責任をもたなければならないことはいうまでもない。明治の近代化に際して果たしたお雇い外国人の役割を思い起こし、改めて世界のために働くといった気概が要請されているのであろう。

4. 土木・環境工学関係者の関心のありか

土木学会衛生工学委員会では平成元年度よりその中に地球規模環境問題に関する研究分科会を設置して研究会活動を開始している。著者はその分科会主査として活動を続けているが、その分科会メンバーがどのような関心をもって参加してきているかを簡単に紹介しておきたい。それは現在の土木学会メンバーの関心のありかを知るうえで参考になると思えるからである。

ここではアンケート調査に答えてくれた60名につき一次的な集計結果を示すことにする。60名の所属は大学29、国公立研究所8、建設会社15、民間研究所（含コンサルタント）2、電力・その他6、となっており、その関心の分布は表—4に示される。表—4は重複を許した選択の実数である。大項目分類においては地球温暖化に興味をもつ人が多いが、メンバーの関心はかなり幅広く、しかもほぼ同程度に分布していることが注目される。次にすでに研究を開始しているかどうかについてみると、酸性雨関係、温暖化、途上国問題、ライフス

表-4 地球環境問題項目別関心度集計

	研究状況の分類				小計
	①	②	③	④	
地球の温暖化(46)					
現象の解明(モデル化含む)	4	0	9	13	26
温暖化の影響と評価	3	3	14	10	30
発生源の解明と対策	2	8	12	7	29
政策/国際協力	3	2	4	14	23
その他	1	0	1	2	4
小計	13	13	40	46	112
オゾン層破壊(23)					
現象の解明	0	2	3	8	13
CFCの管理/規制	0	1	0	15	16
その他	1	0	0	7	8
小計	1	3	3	30	37
森林破壊(30)					
現状の把握	1	2	10	8	21
社会的要求・政策的対応	0	3	5	12	20
小計	1	5	15	20	41
酸性雨(32)					
現状の把握(輸送モデル含む)	7	3	7	11	28
対策	1	3	3	11	18
小計	8	6	10	22	46
国際協力/国際問題(南北問題)(27)	3	2	6	17	28
ライフスタイル/社会システム改変(29)	4	1	7	14	26
その他(11)	3	1	2	0	6
計	33	31	83	149	296

- (注) 1. 研究状況の分類は、①すでに関連研究を始めている、
②これから研究を始めたい具体的なテーマがある、
③具体的な研究テーマをぜひ見つけたい、④当面研究を行う計画はないが関心がある。
2. 大項目の後の()は大項目の集計数を示す。たとえば(46)は60名中46名が関心を示したことを意味する。

タイム/社会システム関連においてすでに始めている人が多いことは想像どおりでもある。しかし、全般的には興味はあるがこれからテーマを絞っていききたいという人も多いようであり、今後一気に対象分野も広がりそうに思われる。

5. 「地球システム工学」への展開のすすめ

すでにみたように土木学会をベースとする研究者のグループにおいても地球環境問題への関心の高さは注目されるどころではあるが、工学一般の広い立場からもこの問題は強く関心を集めるようになってきている。特に地球温暖化に象徴されるテーマは、人類の文明の発展に寄与してきた工学技術全体に対して共通する新たな課題を提示するものであり、工学の体系の新しい構築を求めるともいえる。ミリタリー・エンジニアリングに対するシビル・エンジニアリングの流れを継ぐものとしてはまさに格好のテーマであるはずである。

日本学会会議の第5部(工学分野)においても地球環

境問題は全工学分野に共通する重大テーマであるという認識のもとに、地球システムの工学を「地球システム工学」と呼び、新しい工学体系の必要性を提言している²⁷⁾。その内容は以下のようにまとめられる、若干長いが引用しておく。

(1) 地球環境のモデル化と人間活動の評価

① 地球生態系のモデル化と資源評価

地球上の代表的な生態系に関する物質循環について工学的なモデルを開発するとともに、人類が利用可能な地球上の化石的資源、水資源、生物資源(特に森林資源)などについて総合評価する。

② 地球環境モデルの作成

生態系モデルと地球物理研究者が開発している気象モデル、海洋・陸水、循環モデル等を連結し、地球系の中・長期的変化およびそれに伴う気候・海洋・陸水・土地・土壌など将来の変化を予測できるモデルの開発を行う。

③ 地球環境に及ぼす人間活動の影響に関する諸技術の検討

森林伐採、農業活動、産業活動など各種人間活動からの多くの排出物、特に二酸化炭素の排出に関するデータを集積するとともに、省エネルギー、地球システム工学的に健全なエネルギー開発、二酸化炭素の固定化あるいは変換技術など物質循環に影響を与える諸技術の評価・検討を行う。

④ 生態系変化の追跡、管理手法の検討

気圏・水圏・地圏における生態系の変化を広域的、長期的に観測し、モニタリングするための手法の開発、データベースの構築、膨大なデータの変換・処理手法を開発し、それに基づく地球生態系管理のための情報処理手法の開発を行う。

(2) 地球生態系の保全に有効な対策技術と健全な技術体系の構築

① 地球システム工学的な価値基準の創造

健全な物質循環とエネルギー利用のあり方、それに伴う産業活動およびライフスタイルについて検討を行うとともに、地球システム工学的な観点から諸技術を評価し、新しい価値判断基準の創造を行う。

② 新しい工学的価値基準を充足する新技術の開発

地球システム工学的に健全な物質循環を達成するための個別発生源対策技術の開発、地球システム工学的に安全な新物質、新材料、新エネルギーシステムの開発を行うとともに、エネルギー・物質の利用効率の増進、リサイクルなど廃棄物処理、特に放射性廃棄物の処理技術などの開発を行う。

③ 地球生態系に及ぼす人口集積の影響・効果の工学的評価

人口集積域のエネルギー・交通政策、環境容量に基づ

く総量規制等の評価を行う。

④ 社会基盤システムの改変による環境変化への対応技術

社会基盤施設の更新，都市改造・移転，産業構造の改革，産業立地の改善，社会モデルによる総合評価など環境変化に適応する手法を地震等自然災害対策の配慮のもとに開発する。

(3) 地球システム工学推進のための研究協力体制の強化

これらの内容は，土木の各分野とも幅広く関連をもつものとなっており積極的な参画が期待される所であり，遠慮はいらぬのではないだろうか。土木技術はそもそも自然と人間を相手にしてきた技術体系であることを思えば，まるごとの地球を相手にすることも得意分野の1つにできるのではないだろうか。しかしそのためには新しい価値観に基づく新しい方法論の提示といったことがあわせて要求されるのであろう。

6. おわりに

一般的にいて問題を解決していくプロセスとして，現象の解明，対策の立案，対策の実行といった手順がとられる。地球環境問題においても事情は同様であり，研究の対象も当然に広がっていく。地球温暖化の問題についての今後検討していくべき事項についてのスクリーニングの一例はすでに報告²⁸⁾しているが，何かの参考になればと願っている。なお，地球環境問題についてはすでにたくさんの成書や報告書が出されており，その扱い方，視点も幅広い。そのような状況の中で本稿の特徴をどう出すかが苦勞したところである。「高層大気を含む地球スケールの問題にまで土木分野の目を」という当初の目論見に必ずしも十分かなわなかったかもしれないが，紙数の制限もありこれまでとしたい。機会を与えて下さった編集委員会に感謝している。また都市工学科花木啓祐助教授には草稿段階から有効な助言を得た。ここ

に記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 環境庁編集協力：環境，ぎょうせい，No.9, p.9, 1989.
- 2) 環境庁編：環境白書（平成元年度版），pp.32-47, 1989.
- 3) 環境庁編：地球時代の環境ビジョン，1987年8月.
- 4) 加藤久和：序にかえて，季刊環境研究，No.77, p.6, 1990.
- 5) 木田秀次：高層の大気，東京堂出版，pp.32-34, 1983.
- 6) 小倉善光：一般気象学，東京大学出版会，p.19, 1989.
- 7) 6)の文献，p.31.
- 8) 5)の文献，pp.46-48.
- 9) 近藤純正：大気境界層の科学，東京堂出版，p.98, 1989.
- 10) 6)の文献，p.33.
- 11) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギー読本，オーム社，1981.
- 12) 島崎達夫：成層圏オゾン，東京大学出版会，1989.
- 13) 5)の文献，p.11.
- 14) 浅井 雄：気候変動，東京堂出版，p.88, 1988.
- 15) Ramanathan ほか：J. Geophysical Research, 90, pp.5547-5566, 1985.
- 16) M.I. プディコほか著，内嶋善兵衛訳：エアロゾルによる地球的な気候破局，学会出版センター，1988.
- 17) 14)の文献，p.6.
- 18) 6)の文献，p.167.
- 19) 6)の文献，p.173.
- 20) 12)の文献，p.125.
- 21) 磯野謙治編：大気汚染物質の動態，東京大学出版会，1982.
- 22) 14)の文献，p.121.
- 23) 14)の文献，pp.146-157.
- 24) 気象庁：異常気象レポート'89, p.53, 1989.
- 25) 財団法人計量計画研究所：地球温暖化が及ぼす影響評価予備調査，1989.
- 26) 橋本道夫：ODAにおける環境協力の現状と将来展望，第5回環境工学連合講演会講演集，pp.1-7, 1990.
- 27) 日本学術会議編：日本学術会議第5部報告—地球環境問題における工学研究の在り方について，1989年11月.
- 28) (財)日本環境衛生センター：地球温暖化問題への対策に関するスクリーニング調査結果報告書（建設環境・土木工学），1989年3月.

(1990.3.16・受付)