地球環境問題の現状と都市

富永　健

＜要旨＞

都市と環境問題の関わりを旧来の地域環境問題（公害）ではなく、地球規模の環境問題という新たな視点からとらえ、対応策に取組むことが急務となっている。地球環境問題として代表的な成層圏のオゾン層破壊と地球温暖化とについて現状を解説し、その特色・問題点を明らかにした。オゾン層破壊は科学的解明も、対応策の推進にあたっての国際協力も成功したモデルケースである。それに比べると地球温暖化は未解決の課題が多いが、「京都議定書」に従い二酸化炭素などの原因物質の排出削減が国際的な目標となっている。地球温暖化がとくに都市環境にどのような影響を及ぼすか、またどのような対策が検討されているかについても解説した。

キーワード：成層圏オゾン層破壊、地球温暖化

Keywords : stratospheric ozone depletion, global warming

1．はじめに

都市における人間活動といわゆる環境問題には密接な関係があることはよく知られている。かっての環境問題とは、たとえば自動車の排気ガスや工場の排煙に伴なう大気汚染とか、工場や家庭の排水による水の汚染などの地域性の強い局地的な環境問題、すなわち公害問題であった。このような公害問題の原因を解明し対応策を講ずるには、個々の都市の地域的なわくの中での取組みが主体となってきた。

一方、1970年代以降注目されるようになった地球環境問題は、その原因や影響の関わる範囲が地域的な枠をはるかに超えて地球全体に及ぶ地球規模の環境問題である。たとえば、地球温暖化は、人間のあらゆる生産・消費活動に必須なエネルギーを化石燃料の燃焼によってとり出すたびに、莫大な量の二酸化炭素を大気中に放出することが主な原因と考えており、これは世界のどの都市、地域で放出されたガスであっても、最終的には地球全体に共通した温暖化という環境影響をもたらすこととなる。したがって地球環境問題への対応では、これまでとはまったく異った立場からの取組みが必要となる。

地球環境問題という、世界にとってより普遍的な新たな環境問題が、さまざまな人間活動が集約された都市という場とどのように関わり、どのような役割を果たすかは、まだ比較的新しい課題であり、今後まだ明らかにされるべき点の方が多い。ここでは、地球環境問題として代表的な、「成層圏のオゾン層破壊」と「地球温暖化」の現状について概説し、

それらの影響評価や対応策などの取組みの中で「都市」との関連について考える手がかりを示したい。

2．地球環境問題の現状

表 1 に、今日地球環境問題とよばれているものを示した。この中には、類似の現象が世界各地で互いに独立に同時発生しているものなど、かなり異った性格の問題も含まれているが、同一の現象が全地球規模に共通して進行するという点で最も典型的な地球環境問題はオゾン層破壊と地球温暖化の 2 つである。その中、温暖化は、すでに19世紀にアーレニウスらによって理論的には予言されていたので発端は早いけれども、実際の科学的解明から対応策の実施に至る取組みではオゾン層破壊が先行する結果となり、これがいわば地球環境問題のモデルケースと考えられている。そこで、まず1974年に始まったオゾン層破壊問題が、どのような経過をたどって現状に至ったかを述べることにする。

表 1　地球環境問題

- ●オゾン層の破壊
- ●地球の温暖化
- 酸性雨
- 熱帯林の減少
- 砂漠化
- 海洋汚染
- 野生生物の種の減少
- 有害廃棄物の越境移動
- 開発途上国の公害問題

2.1. 成層圏のオゾン層破壊

われわれの地球は、大気圏によってとりまかれており、大気圏の下部は対流圏とよばれ大気が活発に動いている。対流圏の上方には成層圏（地上十数 km～50km）があり、その中程を中心としてオゾンが分布している（オゾン層)。成層圏のオゾン層は、太陽からふりそそぐ光のうち生物に有害な B 領域（波長280～315ナノメートル）の紫外線を吸収することが知られている。

1974年、米国の化学者 F. S. Rowland と M. J. Molina は、当時大気中に微量存在することが発見された人工化学物質フロン（クロロフルオロカーボン、CFC ともいう）がやがて成層圏上部に達して強い紫外線で分解され、塩素原子を放出し、これが（オゾン層の）オゾン分子と連鎖的に反応して分解することを理論的に予言した。フロンは、当時スプレーの噴射ガス、エアコン・カークーラー・冷蔵庫などの冷媒、工場での洗浄溶媒や発泡剤などに大量に用いられ、使用後ほとんどが大気中に放出されていた（**図 1**）。フロンの生産・消費の急速な伸びを考慮すると、そのまま放出が続けば数十年後に成層圏のオゾン層は平均10％程度（ 7 ～13％）減少するものと予測された。**図 2** は、東京大学の筆者らのグループが1970年代から現在まで観測を続けてきた 3 種の代表的なフロン（CFC-11、12、13）の地球大気中平均濃度の経年変化である。後述の世界的なフロン規制が開始されるまで1980年代を通じてこれらのオゾン層破壊物質が大気中に蓄積し、その濃度が増え続けたことが明らかである。フロンが大気中に放出されてからオゾン層破壊に至るまでの化学的プロセスの各段階は、実験や大気中でのさまざまな観測によって確かめられ、Rowland ら

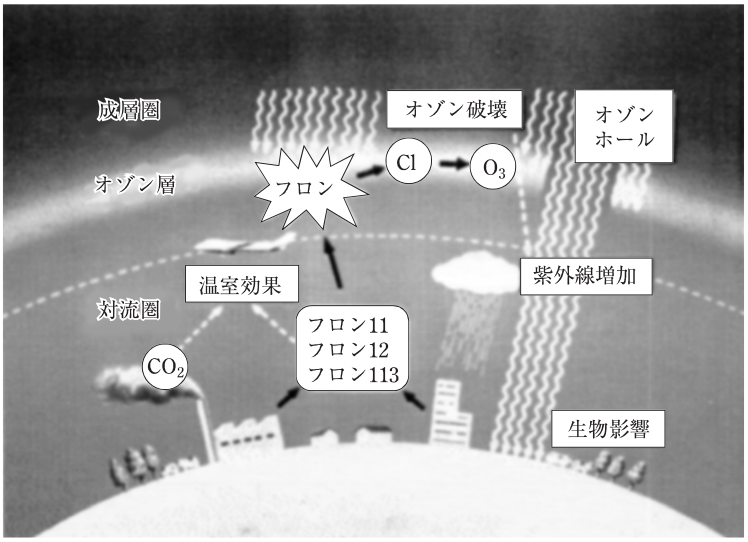


図1　成層圏のオゾン層破壊と地球温暖化

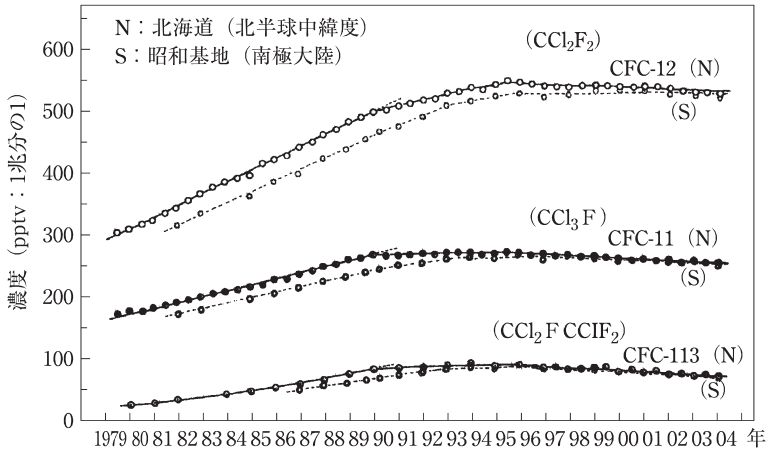


図2　地球大気中のフロン（CFC）濃度の変化

の仮説が正しいことは間もなく科学的にはほぼ実証されたが、地球規模の環境問題としての重要性が一般に認識されるには至らなかった。

1980年代の半ばになって、南極上空のオゾン量が毎年春先に異常に減少することが発見され、原因がフロンと指摘されたが、これは南極オゾンホールとして世界に大きな衝撃をあたえた。そして南極付近の大気の大規模な分析・調査が行なわれた結果、南極上空の成層圏ではこの時期きわめて低温となるため細かな氷の粒子からなる雲が生成し、これが春先の太陽光と相まって塩素化合物を活性化させ、（フロンからの）塩素によるオゾン層破

壊を著しく促進してオゾンホールを生ずることが明らかになった。南極オゾンホールの面積は、その後年々拡大の傾向を示し、現在は年によって気象条件で多少のゆらぎはあるものの最大規模を保っている（**図３**）。その後北極圏についても、春先低温となる年にはオゾン量の著しく低下した地域が短期間出現することが見出されており、これは南極ほど長期かつ大規模ではないが、いわば不安定なミニオゾンホールのような現象である。

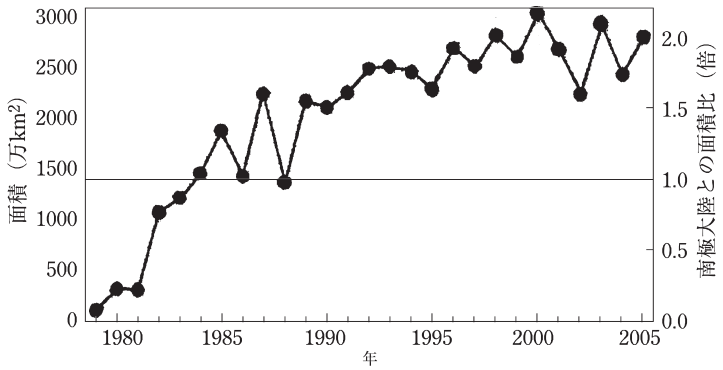


図３　南極オゾンホールの最大面積の推移
（気象庁オゾン層観測報告 2005 による）

極域ばかりでなく、低緯度地域を除く世界のほとんどの地域では、1980年代以降成層圏のオゾン量が徐々に減少する傾向がみられる。これらの地域の平均オゾン量（全地球平均）の経年変化を人工衛星や地上観測などさまざまな手法でしらべた結果を総合すると（**図４**）、1980年代の減少が著しい。オゾン層が破壊されると、地上に達する UV-B 量が増加し、その結果、人では皮膚がん（有棘細胞腫など）や、眼の白内障の患者が増えたり、免疫機能の低下がおこるといわれており、オゾン量が１％減ると皮膚がんの発生が数％、白内障が0.6～0.8％それぞれ増加すると予測された。また、植物プランクトンをはじめとする水生生態系やある種の農作物にもオゾン減少に伴なう紫外線増加が悪影響を及ぼすと考えられる。

このように、CFC などの化学物質が原因でオゾン層破壊がおこると人の健康や環境がそこなわれる懸念があるので、オゾン層を守る国際的な取組みが必要となった。オゾン層保護対策を世界的に協力して推進するため、1985年「オゾン層保護のためのウィーン条約」と1987年「モントリオール議定書」が採択され、先進国では1989年からフロン規制が開始された。そして数度にわたる規制の強化を経て、先進国では CFC、四塩化炭素、メチルクロロホルムなどのオゾン層破壊物質の生産・消費が1996年までに全廃され、HCFC も2019年末の全廃に向けて規制が始まっている。途上国についても、1999年に規制が開始され2009年までに全廃となる CFC をはじめ、その他のオゾン層破壊物質の規制への取組みがすでに着々と進みつつあるが、これは先進国から途上国への技術移転や資金援助の成果と

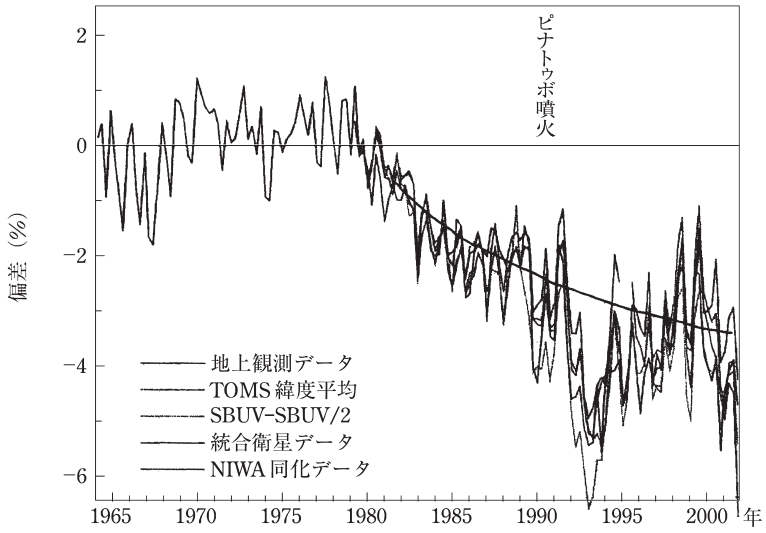


図 4　全球オゾン全量の変化

いえよう。

このような国際的協力によって放出量が減少した結果、CFC の大気中濃度はすでに頭打ちないし微減の傾向を示している（**図 2**）。一方、CFC からオゾン層にやさしい代替物質である HFC などへの切替えが進んだため、HFC などの大気中濃度は最近急増しつつあり、これは後述のように地球温暖化を促進するので新たな問題となっている。

さて、国際的なフロン規制という対策の実施によってオゾン層は将来回復するであろうか。**図 5** は、モントリオール議定書（1987年）およびその後数次にわたる改訂にもとづく規制のシナリオに対して、成層圏のオゾン層破壊の原因となる塩素・臭素濃度が今後どのように推移するかを予測したものである。図で右上りの曲線はオゾン層破壊がさらに進んでオゾン全量が減少し続けること、右下りの曲線はオゾン層破壊にブレーキがかかってオゾン全量が回復に向かうことを示す。**図 5** のように成層圏の塩素（臭素）濃度はそろそろピークに達し、今後はきわめてゆっくりと減少していく見込みであるが、すでに大気中に放出・蓄積された CFC の寿命が非常に長いため、規制が完全に守られたとしても、塩素濃度がオゾンホール出現以前のレベルまで低下するには今後数十年かかるものと予想される。一方、破壊されたオゾン層は2020年頃から徐々に回復し始めるものと期待されるが、将来のオゾン層の状態は気象条件など塩素濃度以外の要因にも左右されるため、実際にもとの状態を回復する時期は今世紀後半と見られる。

フロンによるオゾン層破壊では、原因となる物質が大気中に放出されてから人や環境への影響があらわれるまで、また規制などの対策をとってから実際の効果があらわれるまでに、長い年月がかかるが、これは地球環境問題の特色の一つである。従来の公害問題のように、健康被害など環境影響が見つかってから原因を探索し、対応策を講じていたので

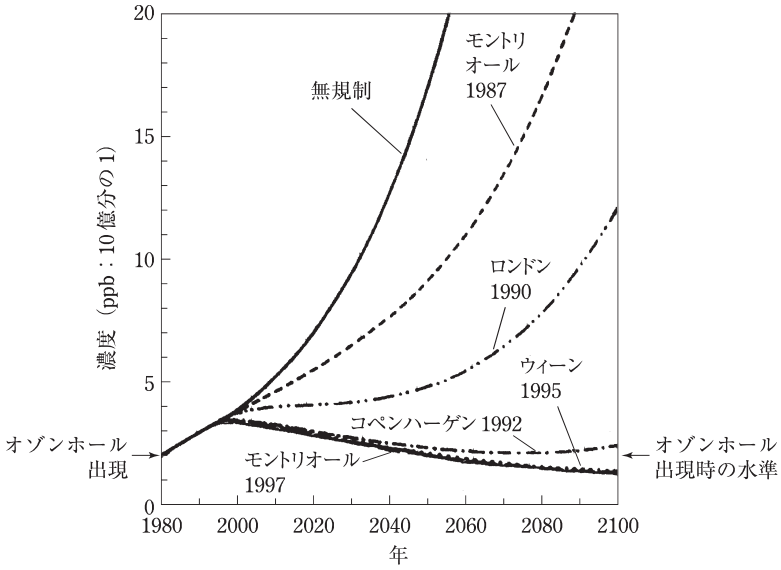


図5　オゾンを破壊する成層圏の塩素（と臭素）の濃度予測
（曲線は、全く規制が行なわれなかった場合と、最初のモントリオール議定書（1987年）およびその後4回の改訂が行なわれた年次・会議開催地名とともに各々のシナリオで規制した場合を示す）

は、とても間に合わないので、早期に予防的な対策をとることが不可欠となるのである。

2.2. 地球温暖化

地球は、日射によって太陽からのエネルギーを吸収する一方、夜間は吸収したエネルギーを赤外線として宇宙空間に放出する（**図6**）。地球大気の成分である水蒸気や二酸化炭素・メタンなどの気体は、紫外・可視光など波長の短い光をほとんど吸収しないが、赤外光は一旦吸収したのち再び放出し、その一部が地表を暖めることになる（温室効果）。地球の大気中にもしこれらの気体が存在しない場合には、地表の平均気温は−18℃と推定されるので、実際の平均気温15℃との差の約33℃が温室効果によって暖められた分ということになる。したがって、温室効果気体は生物の生存にとってむしろ不可欠な存在であるが、近年の人間活動などのためにその大気中の濃度が増えすぎると、後述のようにさまざまな重大な環境影響を生ずるというのが地球温暖化の問題なのである。

温室効果気体として最もよく知られているのは二酸化炭素であるが、ほかにもメタン、一酸化二窒素、CFCなど特定フロン、HFCなど代替フロンといった温暖化の原因となる天然および人工の化学物質が大気中に含まれており、いずれも二酸化炭素より強力（数十倍から数千倍）な温室効果気体である（**図6**）。実は、温暖化への寄与が最も大きいのは水蒸気（水）であるが大気中の存在量が時間的にも空間的にも変動しやすく（湿度）ゆらぎの巾も大きい。

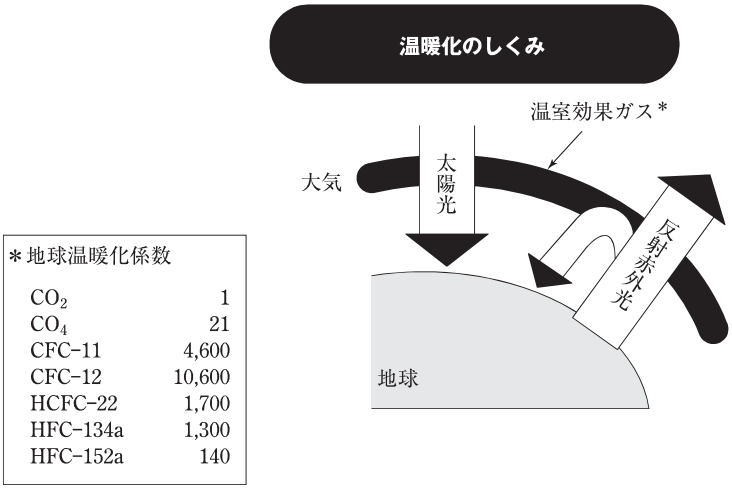


図6　地球温暖化のしくみと温室効果ガスの例

図7に1950年代からハワイで観測されている北半球大気中の二酸化炭素濃度の変動を示す。近年の人間活動の著しい拡大に伴ない二酸化炭素濃度は年々増加していることが明らかであるが、メタン、一酸化二窒素、CFC など他の温室効果気体も20世紀後半から急増しており、気候への影響が懸念された。実際、世界各地の観測点のデータに基づいた地球平均気温は、年ごとのゆらぎはあるものの概ね右上りの傾向を示し過去100年間でおよそ0.6℃ほど上昇している（**図8**）。もっとも、たとえば東京のような大都市では100年間におよそ3℃ほど昇温しており、その大部分は地球温暖化（地球規模の変動）ではなくいわゆる都市化現象の結果である。上記の全球平均気温は、各観測点における都市化などの局地的な昇温効果の影響を除いて算出された補正値といわれているが、それらの値が妥当なものかどうかについては異論もないわけではない。

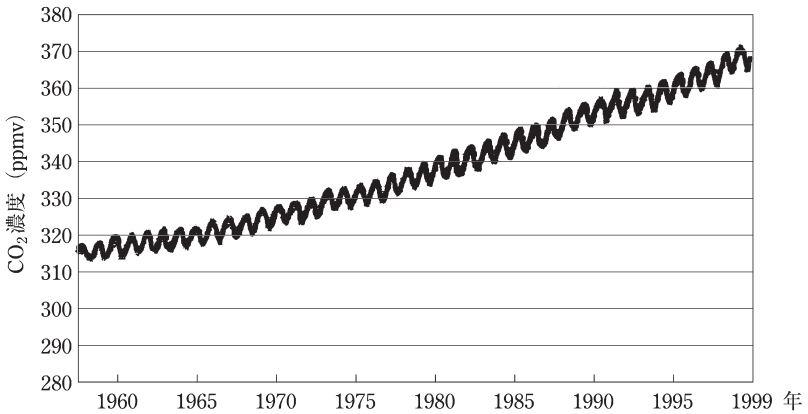


図7　北半球大気中の二酸化炭素（CO_2）濃度の変化（Keeling による）

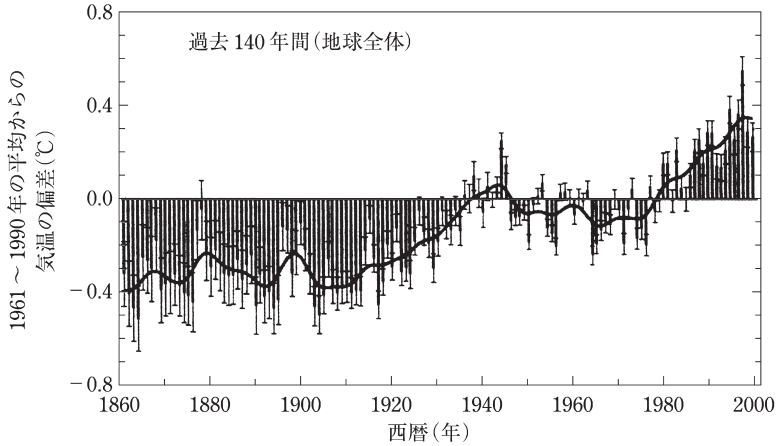


図 8　近年の全球平均気温の変化
（IPCC 第 3 次評価報告書による）

大気中の二酸化炭素をはじめとする温室効果気体の濃度上昇が、実際に観測された昇温現象の主原因かどうかが地球温暖化をめぐる議論の核心である。極域の万年雪から生まれた氷床の掘さく試料の精密な分析によって過去数十万年までさかのぼって過去の二酸化炭素濃度と気温の間に密接な相関関係があることがわかっているが、どちらが原因なのか（因果関係）はこれだけからではきまらない。

地球の気候変動を見通すため、地表（大気・海洋）を細かく格子にわけていろいろな気候変動要因を考慮した気候モデルを構築し、スーパーコンピュータで100年後など将来の気候を予測する試みが進められている。この気候モデルで過去の実際の気候が再現できれば現実的で妥当な将来予測も可能と期待される。**図 9** のように、過去 1 世紀以上にわたり観測された地球の気温変動には、20世紀前半（1940年以前）と後半（1970年以降）の 2 つの山（昇温期）がみられるが、気候モデルにすべての気候変動要因（自然影響＋人為影響）をとりこんでシミュレーションを行った結果、2 つの山ともよく再現できることがわかった。一方、太陽活動の周期変動や火山の大噴火（成層圏に達したエアロゾルによる地表の冷却効果）などの自然影響だけを考慮したモデルでは、20世紀前半の山しか説明できず後半については実際の観測結果と大きな差が出るし、人為影響（人間活動による温室効果気体の放出）のみに基くモデルでは20世紀後半の山は説明できるが前半の実測結果とのずれが大きい。このような検討から、最近の地球の温暖化には人為影響、すなわち人間活動に伴なう大気中の温室効果気体濃度の増加が寄与しているというのが現在の大方の認識となっており、気候モデルが将来の気候の予測にも用いられるようになっている。シミュレーションに基いて、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、何も規制がなければ、100年後には地球の平均気温は1.4～5.8℃上昇し、平均数十センチメートルの海面上昇などが起こると警告している。地球温暖化は、気候変動ばかりでなく、人間の生活・環境に

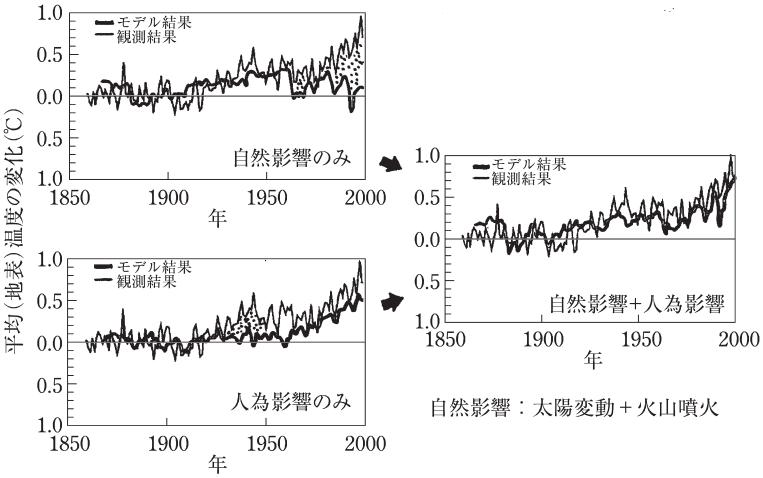


図 9　気候モデルによる 19〜20 世紀の気候の再現（野沢　徹・住　明正らによる）

広範な影響をもたらすことになるが、これについては次節でさらにふれることにする。

人類に重大な影響をもたらす地球温暖化を防ぐためには、温室効果気体の排出抑制や、森林など吸収源を増加させることが不可欠である。温暖化防止への国際的な取組みとして、1992年気候変動枠組条約が採択され、1997年京都で開催の第 3 回締約国会議（COP 3）で、21世紀の地球温暖化への具体的な対応の第一歩となる「京都議定書」が合意された（**図10**）。これは、二酸化炭素をはじめ温室効果気体の総排出量の削減をめざすもので、2010年までに1990年の排出量から全先進国平均 5 %（日本は 6 %、米国 7 %など国別に異なる）減少させることとした。もっとも、わが国の場合は、1990年以降排出量は実際には増加しているため上記の目標を達成するためには現在よりも14%近い削減が必要となるなど、目標の達成が容易でない国も少くない。そこで、このような困難を解決するための便宜的な手法として柔軟性メカニズムが提案された。すなわち、枠にゆとりのある国から排出量（権）を購入したり、自国外で実施した事業の排出量削減分を算入して自国の排出量削減に充当することができる。また、二酸化炭素の吸収源である森林を整備することによって、森林吸収量を確保し削減にあてることができる。しかし、京都議定書では多数の途上国が規制に反対の立場を表明し、また一旦は加わった米国が後から離脱するなど、各国の国益のはざまで今後の世界の温暖化防止への取組みは前途多難である。

COP3（'97）「京都議定書」

●温室効果ガス排出量削減

1990 年（基準）➡ 2010 年（2008-12）

- EU　−8%
- 米国　~~−7%~~
- 日本　−6%

} 全先進国　−5%

●柔軟性メカニズム（京都メカニズム）

- 排出権取引（先進国間）
- 共同実施（先進国間）
- クリーン開発メカニズム /CDM

●吸収源（植林等，1990 以降）

●途上国問題

図 10　京都議定書の概要

3．地球環境問題と都市

地球温暖化は、地球規模の気候変動であり、地表で気温の上昇が起こるほかに降水の量や分布も変化するといわれている。昇温は全球が一様に進むのではなく、高緯度地域の方が温度上昇が大きいと予測されており、また降水の変化も地域によりまちまちで洪水・干ばつなど異常な現象が起こりやすくなる。温暖化に伴なって高山の万年雪がとけたり、海水が膨脹するため、多くの地域では海面上昇が起こると予想されている。図11は、このような温暖化が世界の農業などにあたえる影響を予測したものである。

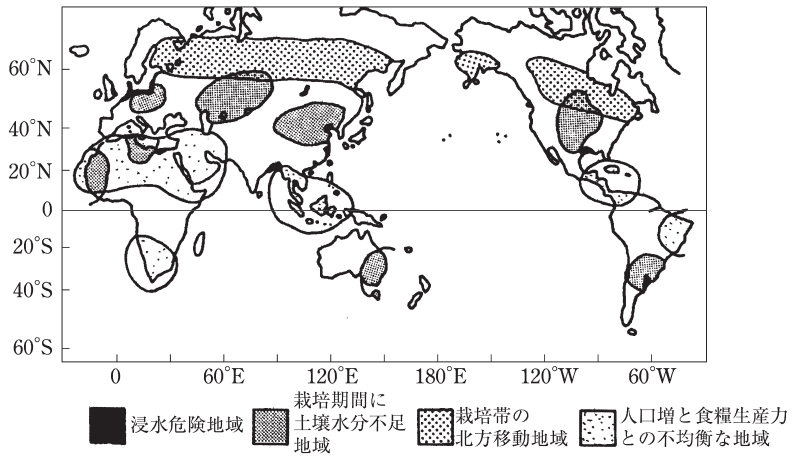


図 11　世界の農業・食糧生産への温暖化の影響。大気中の二酸化炭素濃度倍増の場合
（IPCC 報告による）

ここで温暖化を例として、地球環境問題と都市のかかわりについて考えてみよう。都市を人口が集中し人間活動が高密度に集約された場としてとらえたとき、温暖化に伴なう上記のような諸変化が都市の生活環境に及ぼす影響の一例を図12に示した。図には、それらの影響に対する対策も併せて示したが、これはいわば対症療法としての対策といえよう。一方、都市の集約化された生産・消費などの人間活動を、莫大なエネルギーの消費と二酸化炭素をはじめとする大量の温室効果気体の放出という温暖化の根源としてとらえるとき、温暖化防止のためにはどのような対策が必要かをまとめたものが図13である。これは温暖化防止をめざす総合的な施策で、省エネルギー（省 CO_2）、二酸化炭素などの排出抑制、新エネルギーの導入を柱とした原因療法というべきものである。ここでは、機器（もの）から主体（ひと）へ、さらに地域構造社会システムへと重層的に対策を積み重ねることで、脱炭素社会、持続可能な社会の構築をめざしている。

21世紀の世界は、このように人類文明の存亡にかかわる重大な地球環境問題に直面しており、そのような認識のもとに今後の都市のあるべき姿を見直すべき時期であろう。本稿

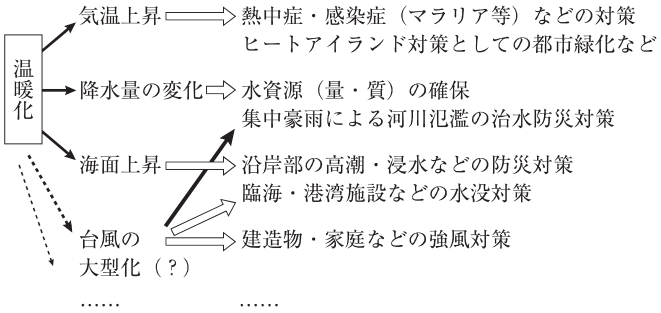


図 12　地球温暖化が都市環境に及ぼす影響とその対策

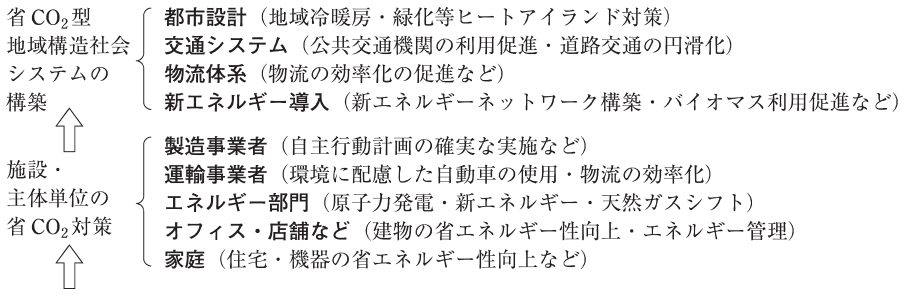


図 13　都市と地球温暖化防止対策

のような科学・技術の視点ばかりでなく、社会・経済・文化などさまざまの分野から、また国民（個人）の意識から国として、あるいは国際的な立場まで、いろいろな切り口で総合的な議論が深まってゆくことが望まれる。

〈参考文献〉

1）不破　敬一郎・森田　昌敏編「地球環境ハンドブック　第 2 版」朝倉書店（2002）
2）気象庁「オゾン層観測報告2005」（2006）
3）環境省「平成17年度　オゾン層等の監視結果に関する年次報告書」（2006）
4）富永　健・巻出　義紘・F. S. ローランド著「フロン――地球を蝕む物質」東京大学出版会（1990）