

## B-11 温暖化の社会・経済的影響の評価と検出に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 原沢英夫

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ	統括研究官	西岡秀三
社会環境システム部 (委託先)	環境管理研究室 広島大学工学部	原沢英夫・高橋 潔 福島武彦

平成8～10年度合計予算	37,643千円
(平成10年度予算額)	16,417千円)

### 〔要旨〕

#### ・研究の目的

温暖化の影響に関しては、IPCC 報告をはじめ種々の研究成果が集積されつつあるが、市民生活にどのような影響が具体的に現れるかについての知見は不足している。一方、1994、95年の夏は日本の観測史上最高の猛暑を記録し、全国的に1～2℃の気温上昇がみられ、各地で渇水が生じるとともに市民生活に種々の影響を与えた。本研究は、温暖化の日本への影響についてレビューを行うとともに、1994年及び95年の夏の猛暑の実態を気象データや社会・経済影響、とられた対応について検討し、温暖化の社会・経済影響とその検知に資する指標の体系化を行い、指標を用いた影響の検知のための方法について検討を加えることを目的としている。

初年度は、温暖化の日本への影響についてレビューを行い、種々の分野で予測される潜在的な影響について整理するとともに、94、95年の猛暑の影響を特定するとともに、一部については定量的な評価を試みた。その結果、温暖化は広範囲の分野において悪影響が予測され、社会・経済システムの脆弱性の拡大はそれを助長することが予想される。

2年度目は温暖化の日本への影響についてレビュー結果をもとに、温暖化の影響を検出するための指標について抽出するとともに、いくつかの指標については、従来蓄積されてきたデータを用いて検出指標としての定量的な評価を試みた。

最終年度は、温暖化検出に関する既存の知見をレビューするとともに、影響検出の方法論及び指標体系について検討した。さらに、内外の温暖化の影響に関する研究成果を踏まえ、今後の温暖化研究の展望作業を行い、結果をまとめ発表した。

〔キーワード〕 温暖化，社会・経済影響，影響検出

#### ・研究の背景

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は 1995 年 12 月に第2次評価報告書を公表し、気候変動の現象、影響・適応、対応策について最新の知見をとりまとめている。影響・適応を担当し

た第二作業部会の報告書は、900 頁におよぶ膨大なものであるが、日本に関する影響については知見が限られており、今後有効な対応策を検討する場合には、別途、温暖化のわが国への影響についての知見を分野ごとに詳細に整理しておくことが必要である。また、1997 年 12 月に開催された気候変動枠組条約の第 3 回締約国会議(COP3) で決定された 2000 年以降の CO<sub>2</sub> 削減量の数値目標の達成手段の検討の際にも、影響がどの分野で顕著にみられるか、またその範囲と程度はどうかなどが、対応策選択の焦点になると考えられる。

こうした背景を踏まえ、本研究は、①温暖化の影響が顕著に現れると予測される分野について推進費研究の研究成果も含め、既存の研究論文や報告書などを収集し、レビューを行い、各分野に特徴的な影響についてとりまとめること、②1994 年、1995 年の夏の猛暑に関する気象現象と影響についての情報を収集し、影響の範囲と程度についての知見を得ること、そして③社会・経済影響の変化を検知するために有効な指標を見出し、モニタリングシステム構築の際の知見を得ることを目的としている。

## 1. わが国における温暖化の影響「要旨」

わが国における温暖化の影響に関する最近の研究・調査報告のレビューを行い、結果をわが国の温暖化の影響評価報告書としてとりまとめた。分野としては、気象、自然生態系、農林水産業、水文・水資源・水環境、都市インフラ・海面上昇、健康、その他の分野（公害、異常気象）をとりあげた。本レビュー作業は、環境庁に設置された地球温暖化問題検討委員会の温暖化影響ワーキンググループの下で実施され、総勢 30 名におよぶ研究者が参画している。本レビュー作業について全体の企画及び報告書作成に関わる編集作業等については本研究の一環として行った。

### ・温暖化の影響研究に用いられている気候シナリオ

既存の温暖化の影響研究について共通している問題点の一つに前提となる気候シナリオがある。主として大気大循環モデル(GCM)の結果を気候シナリオとして利用しているが、複数機関がデータ提供していることから、必ずしも同じシナリオを用いているわけではなく、また任意に設定した気温上昇と降水量変化を組み合わせたシナリオを用いている研究もある。またGCMの研究は大気中のCO<sub>2</sub>二倍時の気候変化を検討する平衡実験からCO<sub>2</sub>濃度を徐々に(年1%程度)を上昇させて計算する遷移実験に移行しつつあるが、さらに最近では、硫酸エアロゾルなど負の放射強制力も考慮した実験結果も公表されている。影響研究については最新のGCMの結果を入手することは困難であることから、平衡実験の結果を用いたものが大半である。影響研究の前提となる気候シナリオの取扱いについては研究成果の比較という点で統一的な取扱いが望ましく、このためGCM研究者及び影響研究者による検討が必要となっている。

### ・温暖化の影響の概要

表-1は各分野に予測された温暖化の影響の概要をまとめたものである。詳しくは、本文第2章を参照されたい。

表-1 温暖化のわが国への影響の概要

分野	主たる影響
自然生態系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 降雨強度の増大による山地斜面の侵食の増大</li> <li>・ 積雪変化による山地の植生分布の変化</li> <li>・ 自然草原の種個体群の絶滅の危険性増大</li> <li>・ 湧水型・高層湿原ともに影響を被る</li> <li>・ 種の移動が都市等によって制限され種によっては絶滅</li> </ul>
農林水産業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 農 業                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水稲は北日本で増収，西日本で減収，小麦は減収</li> <li>・ 食料自給率が低く，他国の農業生産の影響を受けやすい</li> </ul> </li> <li>・ 林 業                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 森林パターンの変化，ハイマツ群落，ブナ分布の変化</li> </ul> </li> <li>・ 水産業                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・ オショロコマなどの減少，サケ類の生息南限の北上など</li> </ul> </li> </ul>
水文・水資源	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 気温上昇より降水量変動が河川流況に影響，雪解けの早期化による流況変化</li> </ul>
水環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水温上昇により多くの動物でサイズの低下を招くなど影響</li> <li>・ 湖沼では富栄養化や貧酸素層の拡大</li> </ul>
沿岸域	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海面上昇と高潮によって氾濫域の面積，人口，被害が拡大</li> <li>・ 65cmの海面上昇で，砂浜面積の81.7%が消滅</li> </ul>
観光・レクリエーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スキー場や海水浴場などへの影響</li> </ul>
エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 需要・供給に大きく影響</li> </ul>
人間の健康	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱波の直接影響による日射病患者の増大，とくに高齢者</li> <li>・ マラリアの潜在地域が西日本まで広がる可能性がある</li> </ul>

## 2. 1994年及び95年夏季の猛暑の影響「要旨」

1994年及び1995年の夏季は日本の観測史上最高の猛暑を記録し，全国的に2～3℃の気温上昇がみられ，各地で渇水が生じるとともに市民生活に種々の影響を与えた。1994年及び1995年の夏の猛暑の実態を気象データを基に解析するとともに，主として社会・経済活動に与えた影響及びとられた対応について広範に情報を収集し，猛暑（温度上昇と降水量変化）とその影響の因果関係を明らかにした。

・1994年，1995年夏季（7～9月）の気温，降水量の平年値との比較を行った。1995年では，気温については全国で1.5～2.9℃高く，降水量では中部地方以西で平年に比べて少なく渇水が深刻であったことを示している。温暖化は単に温度上昇ばかりでなく，降水量の変化を伴うことから，地域によっては温度上昇と渇水が重複し，影響が深刻化する可能性があることを示している。

### ・異常気象による一般的影響

近年発生した異常気象による影響は，影響を受ける社会の経済構造，都市構造，ライフスタイルが変化していることから，異常気象が一旦発生すると産業活動，日常生活に大きく影響するな

ど、社会・経済システムの脆弱性が問題となっている。とくに洪水や渇水など水資源の変動に対する脆弱性、熱波・寒波などに対する脆弱性が、長期にわたり平均的に生じる温暖化による気温上昇と相互影響して社会・経済システムに多大の影響を与えることが予想される。

#### ・農林水産業への影響

農林水産業の脆弱性の例として、1993年の冷夏や1994、95年の猛暑が挙げられる。1993年の冷夏では、出穂の遅れ、不稔の多発、発育不良のために米の生産量が半年の70%に減少し、米不足が生じ、社会的に混乱が生じた。また、翌年、翌々年の猛暑では、農業、酪農業に多大な影響を与え、被害面積64万ha、被害見込み額は、1409億円に及んだ。日本の食料自給率は、1993年で穀類で22%であり、温暖化がもたらす変動の影響は社会・経済システムにも多いに影響を与えられられる。

#### ・水資源への影響

首都圏では、1964、72、73、85、90年と渇水が生じており、水道の取水制限・給水制限、水質の悪化、農業用水の不足などの影響が発生している。とくに94年夏季は、猛暑に加えて渇水も併発したために、各地で取水制限などが発生した。

#### ・典型7公害との複合影響

温暖化と水質汚濁や大気汚染との複合影響についても懸念される。猛暑の水環境への影響として、霞ヶ浦における長期の水質データを用いた分析の結果、気温上昇は湖沼水質を悪化させる傾向があることが確認された。琵琶湖においても同様な解析結果が報告されている。

### 3. 温暖化影響の検出「要旨」

温暖化しつつあるか否かの判定(温暖化の検出)については、主として地上気温などの気象変数が用いられる。IPCCでは、気温データによる温暖化の検出方法について整理しており、1)1変数(地上気温)の統計的検定、2)1変数(気温)の観測値とモデル結果のパターンの類似性解析、3)1変数の二次元/三次元パターン解析、4)多変数のパターン解析による方法を示している。

温暖化の影響についての検出については、自然生態系、水資源、社会・経済的項目、人間の健康に与える影響をいくつかの指標で見えていくことが考えられる。温暖化の気象要因による検出方法を参考にすると、影響の検出方法については、1)代表的な影響分野、影響指標の観測値による変化の解析、2)いくつかの影響分野からそれぞれ指標をとり、その時間的変化の解析、3)2)の指標について、時間的変化、空間変化パターンの解析、が挙げられる。

温暖化影響の検出のための指標について、従来の影響研究をもとに整理したのが、表-2である。ここで温暖化の影響伝播の特徴を考慮して、一次(直接)影響と高次影響(二次、三次影響)に分類した。一次影響については検出が比較的容易であるが、高次の影響ほど、例えば、産業や健康への影響ほど因果連鎖が複雑となり一般に検出が難しくなる。換言すれば、温暖化による影響以外の因子によるノイズが大きいため検出は困難になると考えられる。温暖化以外のノイズとしては、エルニーニョ現象など異常気象の影響、またヒートアイランド現象などの都市域における昇温現象が挙げられる。表-2に示した温暖化影響分野における指標について、既存の研究や報告等がある場合については、報告事例として挙げている。表-2に示した指標のうち、

生物季節による温暖化影響の検出，水環境分野における影響検出について過去の観測データを用いて解析を行い，影響検出方法の検討を行った。

表-2 温暖化影響の検出のための指標

影響	分野	指標(変数)と現象	報告事例
一次 影響	雪氷圏	<ul style="list-style-type: none"> <li>・南極氷の融解，崩壊</li> <li>・氷河の後退</li> <li>・流氷の変化(増減，時期)</li> </ul>	ラルセン棚氷崩壊(1995, 98) アルプス
	気象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・降雪・積雪の変化(量，雪解け時期)</li> <li>・霜・霜柱</li> <li>・暖冬，冷夏，年平均・冬季気温</li> <li>・台風発生数</li> <li>・季節風の強弱</li> </ul>	富士山の雪解け(5月29日)
	海象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海流，日本沿岸の平均海面</li> <li>・波浪の高さ・入射方向</li> </ul>	
	自然生 態系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高山植物の変化(種構成，開花時期など)</li> <li>・生物季節</li> </ul>	富士山の高山植物? アルプス植生
		<ul style="list-style-type: none"> <li>植物(開花日，紅・黄葉日)</li> <li>動物(初見日，初鳴日)</li> </ul>	桜開花の早期化
	↓↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>・南方性動物の北上</li> <li>・珊瑚礁の白化現象(人為圧?)</li> <li>・野生動物の生活，生息域変化</li> <li>・渡り鳥のルート変化</li> <li>・多様性変化，保護地域の変化</li> </ul>	蝶，クモの北上 鳥類，両生類，昆虫
	水象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水温度</li> </ul>	地下水温度の上昇
高次 影響	水環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・湖の結氷</li> <li>・河川・湖沼水質</li> <li>・冷水性魚種の変化</li> </ul>	北海道の湖
	農林水 産業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・農産物収量(病虫害，雑草)</li> <li>・畜産，野菜栽培への影響</li> <li>・漁獲の変化(魚種，漁獲量)</li> </ul>	94年乳牛への影響(北海道) 大阪湾の魚類変化 イワシの漁獲量減少(鳥取)
	産業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・季節商品の変化</li> <li>・エネルギー利用量の変化</li> <li>・スキー場，水浴場の利用者変化</li> </ul>	
	健康	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱中症の発生頻度</li> <li>・食中毒，伝染病の変化</li> </ul>	94, 95年救急車の搬送増加

#### 4. 温暖化影響の検出の事例研究

##### ・生物季節による温暖化影響の検出

生物季節データは，気象庁が1963年以降代表的な植物と動物について観測している。気象の変化によって，植物の発芽，開花，紅(黄)葉，落葉などの時期，動物の発生，出現などの時期が変化する。生物季節は気象の年変化に伴って消長する生物現象について調べることによって気象の変化と生物活動の関係を分析する。気象庁が提供している生物季節の項目は，植物16種，動物1

1種の計27種で、観測地点は日本全国で102地点である。観測データは、生物活動が観察された年月日で表されているので、データ期間である1963～1996年の44年間について、欠測値のない地点を取り上げて解析を行った。解析の手順は以下のとおりである。

- (1) 各項目、各地点毎に生物現象発現日（例えば、桜の開花日）の経年変化プロット
- (2) 44年間のデータがそろっている地点については、傾向変動の回帰曲線による近似と、マン検定法による傾向変動の強さの統計的検定
- (3) 傾向変動の回帰直線をもとに、生物季節現象の早期化、遅延化の計算結果を10年当たりの日数で表示（地図情報および表化）

図-1は桜の開花日について示したものである。○は開花が早くなっていることを、△は開花が遅くなっていることを示している（10年あたりの日数で表示）。図から、桜の開花はこの44年間に、早くなっている地域が多いこと、しかしその値は、10年間で最大でも1日未満であることがわかった。また取り上げた地点の開花日のマン検定の結果から統計的にも有意であることが示されている。

以上は桜の開花日についてであるが、その他の植物季節や動物季節の解析から、植物季節については、温暖化の傾向を示す項目が多いが、逆の傾向を示す地点もあること、また植物季節項目すべてが温暖化傾向を示す地点は少なく、ある項目では、早く、ある項目では遅くなるなど、同一地点でも項目間で変化に差があること、桜、梅などの樹木は他の植物に比べて経年的な変化の程度は小さいことが、特徴として挙げられる。また、動物季節についてもほぼ同様な傾向が見られるが、植物季節に比べて欠測値が多いために、一つの項目だけで日本全体の傾向を知ることは困難なことがわかった。

#### ・ 湖沼水質に及ぼす気象の影響の検討

湖沼の水質に及ぼす気象の影響を定量的に評価する方法を考案し、多項目の水質が長期的に測定されている霞ヶ浦を対象に適用した。水質データの蓄積されている17年間という長期間を対象とするため、流域変化の影響を無視することはできないので、隣接年で気象差と水質差を比較する方法を取り上げ、定量的な解析を行った。温暖化等の長期的な気象変化の影響評価を目的としているので、長期平均的な年平均値の変化による影響を解析した。

隣接年比較法は、流域変化がほぼ無視できると考えられる隣接年を対象として気象差と湖内水質差の相関解析を行い、気象の湖内水質への影響を定量的に予測する手法である。気温が1℃上昇の場合水温は0.75～0.96℃上がること、CODでは0.92～1.70ppm増加することが分かった。地球温暖化等により、湖沼周辺の気温が上昇した場合、水温上昇が起こり一次生産などの増加によるCODの増加など水質悪化が予測される。

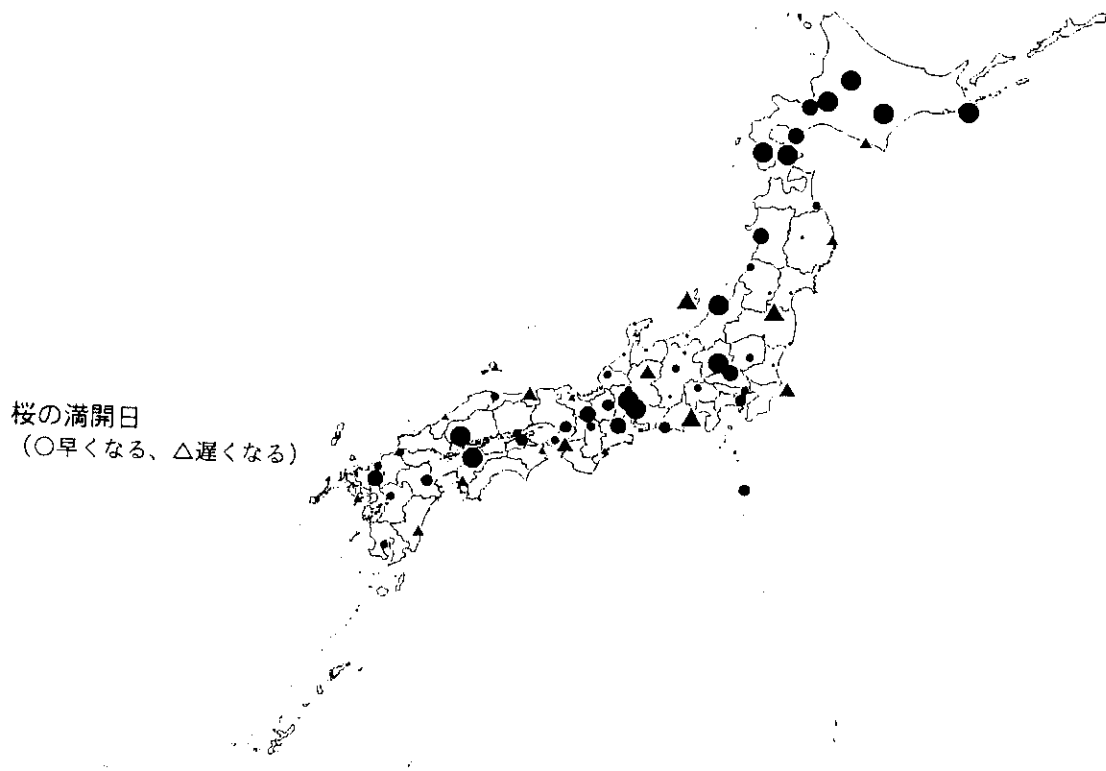


図-1 生物季節（桜の開花日）による影響の検出事例

・温暖化影響の検出の可能性について

生物季節現象は、生物が気候の変化（気温、降水量などの気象要因の総合的な影響を表している）を身をもって示していることから、温暖化の検出に適した指標であることが分かったが、全国一律に温暖化の傾向にはなく、地域によって傾向が異なること、また動物季節についても同様な傾向が見られるが、植物季節の項目に比べて欠測値が多いために、温暖化などの傾向判定には不十分な地点が多かった。生物季節を温暖化影響の検出指標として用いるためには、今後とも観測を継続し、データの蓄積をはかること、また観測方法など欠測がないような方法をとること、欠測値がある場合の評価方法を検討することなどが今後の課題として挙げられる。

水質による温暖化影響の検出の可能性については、気温変化は湖沼の水温変化となって現れることから、温暖化は水質悪化をもたらすと予想される。このため、従来の水質モニタリングを今後とも継続して実施し、傾年的な変化を気象変化と併せて考慮することにより、温暖化検出のための方法として用いる可能性がある。

5. 温暖化影響研究の展望

最終年度は温暖化影響研究の展望作業を影響分野の研究者の協力をえて実施した。

・影響研究の国際的動向

IPCC、米国や UNEP のカントリースタディにより、温暖化影響の研究がこの 10 年間に相当

進んだ。1997年12月の温暖化防止京都会議(COP3)の成功は、人間活動に起因する温室効果ガス(GHG)排出が温暖化を引き起こすこと、温暖化が進行すると自然生態系を破壊したり人間活動や生活を脅かすなど悪影響が生じることを指摘した温暖化研究の成果に負うところが大きい。

IPCCは、2001年を目処に第三次レポートのとりまとめ作業を開始した。影響分野で取り上げられている課題は、「地域や分野毎の脆弱性」、「温暖化の適応策」を中心として、「温暖化の非気象変数による検出」、「影響研究の前提となる気候／社会・経済シナリオや方法論」、「大気中のGHG安定化と影響の関連性」などである。また現象や対策面との分野横断的な問題や政策関連の問題にも積極的に対応することも課題となっている。

#### ・わが国の影響研究の成果と問題点

影響分野の研究課題は幅広いが、この10年間に大学、国立研究機関を中心に個別分野の影響研究が大いに進んだ。従来研究成果をレビューし「温暖化の日本への影響」がとりまとめられ、影響の全体像が明らかになり、温暖化の重大性を国民にアピールした。一方、1)前提となる気候シナリオの空間的粗さ、2)各分野で基礎～応用研究が進んだが、総合的評価が遅れていること、3)適応策など対応面での研究が一部分野に限られていることなどが指摘された。

#### ・影響研究の目標と展望

影響研究の目標としては、①影響に関する実験、現地調査、モデル化により基礎的知見を得たり、知見の信頼性を向上させること、②温暖化の検出や影響の予測を通じて、温暖化対策の重要性を平易な言葉で意思決定者や国民に伝えること、③脆弱な分野や地域を特定し、適応策などの対応を検討すること、④異常気象なども含め限界的な影響(閾値)を特定すること、などが挙げられる。

温暖化の影響は全ての分野や地域に現れる。従来研究が進められてきた自然生態系、農林水産業、沿岸システム、人間の健康に加えて、水資源、水環境、都市・産業、日常生活などの分野の研究も適応策を検討するために重要になってきた。今後、温暖化対策推進法に基づいて地方自治体が削減計画の立案や実施にあたっては、地域レベル(例えば、関東地方)の影響評価に基づいた、きめ細かな対策を打つことが必要となるため、現在開発が進んでいる地域気候シナリオを用いた地域の影響評価や脆弱性評価の進展が期待される。そして重大な影響が予想される分野や地域については、適応策を技術的・経済的に検討することや、GHG排出削減の緩和策も含めて総合的な評価も必要となる。また、日本を含めたアジア地域の途上国の影響／適応研究を各国研究者と協力して進めるカントリースタディの推進や、そのための影響評価の方法論や手順のガイドラインやマニュアルの開発も期待される。

#### 〔国際共同研究等の状況〕

・温暖化の日本への影響については英文報告書を作成して、内外の影響・適応関連の研究者に配付、提供するとともに、IPCC第2作業部会(影響・適応)第三次評価報告書のアジア地域の影響・適応の章(11章)の執筆責任者(Coordinating Lead Author, CLA)として研究成果等の情報提供等につとめた。



## 5. 成果発表

### (1) 口頭発表

- ・原沢英夫(1996)再浮上した典型7公害の温暖化による影響と対策の行方, 資源環境対策, 32(8), 2-8.
- ・原沢英夫(1996)気候変動影響の研究, 影響評価の方法論とその問題点について, 第25回気候影響・利用研究会, 1996.11, 東京.
- ・原沢英夫他 (1997) 第7章その他の分野への影響, 温暖化の日本への影響 1996, 環境庁報告書, 157-172.
- ・藤森真理子, 山田和人, 原沢英夫, 西岡秀三(1997): 94年, 95年の猛暑による日本の社会への影響, 第5回地球環境シンポジウム, 土木学会, 東京.

### (2) 論文発表

- ・西岡秀三, 原沢英夫編: (1997) 地球温暖化と日本—自然・人への影響予測—, 古今書院,
- ・福島武彦, 上西弘晃, 松重一夫, 原沢英夫: 浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響, 水環境学会誌, 21(3), 180-187, 1998.
- ・Nishioka, S. and H. Harasawa eds. (1998) Global Warming - The Potential Impacts on Japan. Springer-Verlag, 244pp.
- ・Fukushima, T., N. Ozaki, H. Kaminishi, H. Harasawa, and K. Matsushige(1999) Forecasting the changes in lake water quality in response to climate change, using past relationships between meteorological conditions and water quality. Hydrological Research (in press)



## 第1章 わが国における温暖化の影響

わが国における温暖化の影響に関する最近の研究・調査報告のレビューを行い、結果をわが国の温暖化の影響評価報告書としてとりまとめた。分野としては、気象、自然生態系、農林水産業、水文・水資源・水環境、都市インフラ・海面上昇、健康、その他の分野（公害、異常気象）をとりあげた。本レビュー作業は、環境庁に設置された地球温暖化問題検討委員会の温暖化影響ワーキンググループの下で実施され、総勢30名におよぶ研究者が参画している。本レビュー作業について全体の企画及び報告書作成に関わる編集作業等については本研究の一環として行った。

### 1.1 温暖化の影響研究に用いられている気候シナリオ

既存の温暖化の影響研究について共通している問題点の一つに前提となる気候シナリオがある。主として大気大循環モデル（GCM）の結果を気候シナリオとして利用しているが、複数機関がデータ提供していることから、必ずしも同じシナリオを用いているわけではなく、また任意に設定した気温上昇と降水量変化を組み合わせたシナリオを用いている研究もある。またGCMの研究は大気中のCO<sub>2</sub>二倍時の気候変化を検討する平衡実験からCO<sub>2</sub>濃度を徐々に（年1%程度）を上昇させて計算する遷移実験に移行しつつあるが、さらに最近では、硫酸エアロゾルなど負の放射強制力も考慮した実験結果も公表されている。影響研究については最新のGCMの結果を入手することは困難であることから、平衡実験の結果を用いたものが大半である。影響研究の前提となる気候シナリオの取扱いについては研究成果の比較という点で統一的な取扱いが望ましく、このためGCM研究者及び影響研究者による検討が必要であろう。

### 1.2 気候変化予測

我が国の気候を特徴づけるものとして、冬と夏の季節風、梅雨と秋雨（秋霖）と呼ばれる雨季、台風などがあげられ、温暖化に伴ってこれらにどのような変化が現れるかは関心の高い問題である。現在の科学・技術の水準では、これらの問題や我が国の各地域毎の気候の変化について明確な評価を行うまでには至っていないが。

（我が国の気温、降水量への影響）

地球温暖化が我が国の気候へ及ぼす影響について、世界の6つの研究機関における7種類の地球大気・海洋結合モデルによる二酸化炭素濃度漸増実験の予測結果をもとに、二酸化炭素濃度倍増時点での我が国周辺の気温・降水量の変化を求めると以下ようになる。

- 年平均では、気温は1～2.5℃程度の上昇、降水量は-5%～+10%程度の変化が予想される。
- 気温の変化には際だった季節による違いは見られず、0.7～3℃程度上昇する。
- 降水量は、冬季においてはモデルによる違いが大きく-15～+11%の変化幅があるが、その他の季節では-数%～10数%の変化幅がある。

なお、この結果は漸増実験で得られた結果であり、従前の大気・海洋混合層モデルによる平衡実験の成果より気温の上昇が低く示されている点に留意する必要がある。

(海面水位等、日本付近の海洋への影響)

日本列島周辺の地形情報を適切に取り入れた気象庁気象研究所の全球大気・海洋結合モデルによると、二酸化炭素濃度が倍増する時点において以下のような結果が得られている。

- 我が国周辺における海面水位は日本海沿岸で 10～20cm、太平洋及びオホーツク海沿岸で 15cm 程度上昇する。ただし、これには氷河・氷床の変化による寄与は含まれていない。
- 黒潮は僅かではあるが強まる。
- 海面水温は日本海沿岸で 1.6℃程度、太平洋沿岸で 1.2～1.6℃、オホーツク海沿岸で 1.8℃ 程度上昇する。

(我が国に特徴的な気象現象の変化)

現在の全球大気・海洋結合モデルの空間解像度が粗いこと、および我が国を含む東アジアを対象とした地域気候モデルによる予測結果が少ないため、細かな点については判断できないが、以下のようなような変化が考えられる。

- 冬季の寒気の吹き出しが弱まる傾向にある。これと関連した日本海側の降水(雪)の変化については、増加、減少の双方が考えられ、変化の傾向については判断できない。
- 夏のアジアモンスーンは強まる傾向にあり、現在の気候のもとで降水量の多い(少ない)地域では降水量の増加(減少)が見込まれる。なお、梅雨の動向については判断ができない。
- 台風(熱帯低気圧)の発生の頻度、地域、季節、強度(平均及び最大)がどう変わるかについては現時点では結論できない。

### 1.3 自然系への影響

(山岳地に対する影響)

・山岳地域における地形形成作用への影響

- 日本の山地は、世界的にみて侵食量が最も大きい部類に属する。後氷期における山地斜面の深い侵食は、降雨強度に強い影響を受け、地域差が認められることから、温暖化にともなう降雨強度の増大は、山地斜面の侵食の増大を予測させる。
- 一方、周水河作用を受ける地域では、斜面形成営力の定量的な把握が行われてきた。短時間で進行する温暖化によって山岳地域の地形形成作用にどのような変化が起こるかについて明らかにするには、過去の温暖期にどのような変化が起きたかを動的に解明することが必要である。

・森林分布に対する影響

森林に対する影響を評価するには現象スケールごとに要因を区別する必要がある。

- マクロスケールでは降水量は十分なので温度要因が効く。緯度的には熱帯と温帯の移行部に位置し、温度の季節変化が大きく、それに関連した温度条件が日本の森林分布を律している。森林の分布を支配する温度条件は熱帯では積算温度であるが、日本の照葉樹林帯では夏は熱帯とほとんど変わらないので、その北限は年平均気温などではなく冬の低温によって決まっ

ている。

- 地形とそれに応じたさまざまな環境要因がメソスケールの分布を支配する、脊梁山脈の存在による積雪分布は日本海側と太平洋側の植生の違いをもたらす。温度要因だけでなく、積雪、地形・土壌、地質などはそれぞれ成立する森林を規定する。とくに、温暖化にともなう積雪の変化は日本の山地の植生分布を大きく変化させる。

#### (草地への影響)

- 日本の草地のうち自然草原は陸地全体の1%で、種個体群サイズは小さく、環境条件のわずかな変化によっても絶滅の危険がある。レッドデータブックによる絶滅危惧種の多くが草原の構成種である。
- 人工草地は大きく寒地型と暖地型に分けられそれぞれ C3, C4 植物が主体である。温度変化はこの2種類の草地の分布、種構成を変化させる。日本の場合は温度、あるいは温度と降水量両方が重要である。降水量の増大は土壌侵食にとって問題となる。また、人工草地では輸入飼料等にともなう外来雑草の侵入や特定の雑草の繁茂などが引き起こされる可能性もあり、草地管理上大きな問題となる。こうした人工草地は遷移の途中相なので、放置すれば遷移が進行し、二酸化炭素は植物体と土壌に急速に固定されていく。また、農業情勢の変化によってその存在すら失われてしまう可能性があり、日本の伝統的な農耕体系にともなって進化してきた種の保存という意味からも温暖化の影響と同時に人為的要因の草地生態系に対する影響が再評価される必要がある。

#### (砂漠化 その日本への影響)

日本では現状では砂漠化の危険はないが、グローバルな視点では、とくに隣の中国で砂漠化が進行しており、その間接的な影響が問題となろう。日本の近くでは北京の北 400 km 付近に広がる内蒙古が問題になる。この半乾燥地では草原を耕地化しているが、その結果水分消費量が増大し、地下水の枯渇を引き起こす可能性がある。過放牧になると家畜の踏圧によって土壌が固くなり、降雨直後の蒸発を増大させ植物の水利用が妨げられた。温暖化によって地球の南北の温度差が小さくなると亜熱帯高気圧の平均緯度が北上し、中国内陸部では林野火災が起こる危険性が増大している。こうした変化も日本には直接的に及ぶ可能性もあり、周辺地域での変化を視野に入れる必要がある。

#### (湿原への影響)

湿原植生は大きく湧水によって涵養されるものと高層湿原にわけられる。

- 湧水涵養型では周辺の森林の変化によってその成立が大きく規定され、温暖化による集水域森林の変化が蒸散量の変化などに関連して影響する。
- 高層湿原は主としてミズゴケの生育によって維持されている。高層湿原を構成するミズゴケの多くは比較的広い温度域に生育が可能であり、わずかな温度変化によって大きな影響を受けるとは考えにくい。しかしながら、温暖化によって降雨量・雲霧日数の低下があるならば、

ミズゴケ類の生育状況に大きな変化が生じることが予想される。

(生物多様性、自然保護区への影響)

- 温暖化による環境の変化は後氷期の15 - 30倍ほどの速度で、さまざまな生物種、生態系の移動を強いる。移動能力は種に固有なので現在の生態系の構成は維持できず、種組成、構造が変化し種の絶滅が危惧される。
- 希少種、遺存分布種、分布限界種など地史的要因による種の分布は生物地理学的境界、とくに植生帯の移行部などに多く、大きな変化を受け種の絶滅が起きやすい。
- 現在の環境要因に対応した種でも移動にあたっては、温度要因以外に既存の種との新たな競争関係が想定され、局所的絶滅が想定される。
- 気候変化とともに都市化、農耕地化などによる自然環境の喪失は、生態系の孤立化、島化を生みだし、これまで希少種だけだった絶滅危惧種が普通種にも起こりうることになり、温暖化にともなう複合影響を評価する必要がある。

#### 1.4 農林水産業への影響

農業への影響

温暖化の農業への影響については、作物の生育・生長及び生産と気温・CO<sub>2</sub>濃度との関係に関する基礎的データが比較的蓄積されている。これらの限られたデータに基づいた作物モデルが作成されており、林業・水産業に比べると定量的評価が進んでいる。

(作物の生育・生長への影響)

人工気象室や温度勾配チャンバーを用いて行われた結果は次のように要約される。

- 一般にイネの収量は高CO<sub>2</sub>によって増大する。その他の要因が制限されない状態であれば、CO<sub>2</sub>濃度倍増によって収量は30%以上増大する。十分な日射がある適度な高温状態(33/26℃)では、28/21℃の区に比較して収量は70%増大する。
- 高CO<sub>2</sub>条件下では、穀粒内のマグネシウム含量とマグネシウム・カリの比率が減少するが、リンは変化しない。これはコメの品質が落ちることを意味している。
- 高CO<sub>2</sub>濃度がイネの乾物生産や収量を増加させる割合は、温度と窒素の条件に大きく影響される。イネ穎花は開花期の高温に極めて敏感であり、開花期の温度が約35℃になると受粉障害が発生し収量に影響する。イネ穎花の受精率は開花期の目最高気温の増加に伴って減少するが、二酸化炭素濃度には関係しない。

(作物生産への影響)

国内の代表的な地点を対象に作物モデルを用いて行われた結果は次のように要約される。変化の幅は、予測に用いた複数の大気大循環モデルの結果が異なることに起因する。

- 水稻では、温暖化によって北日本では増収(札幌:+6~+22%、仙台:-11~+26%、新潟:-5~+12%)、西日本では減収(名古屋:-37~-8%、宮崎:-13~+6%)すると予想されて

いる。また、年々の収量変動は北日本では安定化する傾向にあるが、西日本では変動がさらに大きくなると予想されている。

- トウモロコシでは、北海道で増収（帯広：+6～+28%）、中部日本ではほとんど変わらない（松本：-7～+7%）、九州では減収（都城：-7～-3%）すると予想されている。
- 小麦では、いずれの地点も減収する（北見：-41～+8%、盛岡：-18～-1%、福岡：-27～-9%）。北海道の減収は夏の降水量の減少が主因である。
- 寒地型牧草では、北海道・東北の一部で+5～+10%の増収が期待されるが、その他の地域では10%以上の減収となると予想されている。
- サトウキビでは、10月の降水量が20～27.5%減少すると、収量は2～8%減収すると予想されている。

#### （国内生産量の変化）

地域ごとに行われた収量の変化を積み上げて求められる国内生産量の変化は次のように予想されている。

- 水稲：-6～+9%
- トウモロコシ：+1～+5%
- 小麦：-22～0%
- 寒地型牧草：+6%

#### （温暖化への適応技術）

- 温暖化に適応する技術として、水稲では新品種あるいは早植えの導入はきわめて効果的である。
- トウモロコシと小麦では、早植えと灌漑の導入が北海道地域については有効な手段となるが、その他の地域では減収を回避できない可能性がある。

#### （昆虫相への影響）

- 温暖化によって害虫の世代数が増加し、分布域が拡大すると予想されている。今後は、病害虫の作物生育・生長への影響も含めた影響評価研究が必要である。

#### 林業への影響

数ヶ月で収穫できる作物と異なり、林木の生長には長期間を要する。このため、温暖化の影響を調査することは容易ではない。そのため、影響評価のための基礎的資料は非常に少ない。

#### （森林生態系への影響）

- 年輪年代学的手法を用いて過去の気温や降水量のデータが再現され、気候変化と樹木の生長の関係が明らかにされた。北北海道では、1700年代の夏は乾燥し、1830年代の夏は平年より湿度が高かったことが明らかになった。

- 吉良及びケッペンの気候区分方法によって地球規模での森林植生分布への影響が評価され、潜在的な森林地帯のうち33～52%が温暖化の影響を受けると推定された。また、日本及び韓国の桜の開花は1℃の気温上昇で3～4日早まると予想された。
- 森林内の樹木の大きさ分布の動態に関する地理的拡張モデルのシミュレーションによって、現存する森林のバイオマス量が変化すること、異なる森林タイプ間の境界線の移動にはタイムラグがあり、結果的にジグザグのバイオマス分布パターンをつくりだすことなどが予想された。
- 亜高山性の針葉樹は温暖化によって分布域を拡大するが、よく発達したハイマツ群落が発達したところでは拡大できない。また、ブナの分布は降雪と同様に気温によっても影響を受ける。

#### 水産業への影響

水産業への影響は、温暖化に伴う海水温の上昇や、海流・混合層の変化、及び複雑な食物網の変動を通して現れる。海洋における調査の困難さから、これらに関する知見は不十分であり、水産業への影響評価を難しくしている。

##### (水産業への影響)

- 海洋の長期変動に関する研究では、近年は全球の気温の上昇に伴って海洋表面水温も上昇していることが示された。温暖化によって親潮や黒潮の流量が減少し、風速の減少による低次生産に関連する混合層の厚さも減少することが予想された。また、温暖化によって黒潮流量が減少すれば蛇行の頻度が少なくなると予想された。
- 温暖化によって平均気温が1～4℃上昇すると、オシロコマの生息域は25～74%減少し、アメマスは4～46%減少すると推定されている。
- 釧路沖の低次生産力の暖水年と冷水年の比較から、温暖化の進行によってこの水域では低次生産力が減少することが示された。
- 「海洋にはマイワシの変動を引き起こす大規模な周期的変動があり、気温の上昇はマイワシには好都合である」という仮説が提示されている。地球温暖化が進行すれば周期的変動をしながらもマイワシがさらに卓越する可能性があるが、地球規模の気候－生態系の変動（レジームシフト）の機構を含めて検討が必要である。
- サケ類の生息南限は温暖化によって北上すると考えられる。

### 1.5 水文・水資源および水環境への影響

#### (水文・水資源への影響)

既往の気象・水文資料による温暖化の影響評価、温暖化シナリオと長期流出モデルによる影響評価、大気と陸面の相互作用を考慮したマクロ水文モデルによる影響評価が行われている。これらの研究から抽出される知見は以下のようなものである。

- 3℃程度の気温上昇の影響よりも、10%程度の降水量の変動の方が流況に与える影響は大き



い。

- 3℃程度の気温上昇があっても 10%の降水量増加があれば、平均的に見て、低水部流量はあまり減少せず、高水部流量は 15%程度増大する。
- 気温上昇により降雪が雨になったり、融雪が早まったりするので、1～3月の流量が増加し、4～6月の流量が減少する。

#### (淡水生態系への影響)

- 淡水生態系における高温耐性の低い生物（サケ科の魚、大型枝角類のダフニア、アミの仲間やヨコエビ）は、温暖化によって湖沼・河川の水温が上昇すると、夏に温度障害を受けるものと考えられる。
- また、水温上昇の結果、多くの動物で成熟サイズの低下が起き、水生昆虫では成長速度が上昇して年間の世代数が増えるものと期待される。
- 水温の上昇は、湖沼でのラン藻類の優占、貧酸素層の拡大を引き起こすものと考えられ、これが生物の分布を変え、生物間相互作用を介して生態系全体に影響を及ぼすもの推察される。多くの生物群集で、水温が上がると平均サイズが減少することが知られており、これは生態系の食物連鎖を変え、一次生産者から高次生産者へのエネルギー転換効率を低下させるものと考えられる。
- 湖沼では富栄養化の状態が進む。また、温暖化は農薬の使用を増やし水界での農薬汚染を進め、その結果水生生物が農薬の影響を受けるであろう。さらには水温の上昇が農薬と相乗的に水生生物に悪影響を与える恐れがある。

#### (沿岸・海洋環境への影響)

人口や社会経済活動の多くが集中する沿岸域では、栄養塩や有機物の増加、海岸や干潟の埋め立てにともなう海水浄化能力の低下などのために、1950年代から水質汚染が進行した。有機物汚染や赤潮や青潮などの発生頻度も以前に比べて減少したが、近年は改善の傾向が見られないため、窒素やリンの削減対策が実施されようとしている。このような日本の沿岸環境に対する温暖化影響の研究はほとんどなされていない。

- 日本のサンゴ礁は世界のサンゴ礁分布から見れば北限域にあり、温暖化による水温上昇はサンゴの生育にとって望ましい方向に働く。また海面上昇もサンゴ礁の上方成長速度の範囲内であり、サンゴ礁は海面上昇に追いつくポテンシャルを持っている。しかしながら、日本のサンゴ群集は低水温に適応した種組成をもっているため、急激な温暖化に適応できるかどうかについては注意が必要である。
- また日本のサンゴ礁は、沿岸域への人間活動の圧力の増加によって破壊されつつあり、これによる活性度の低下は温暖化やそれに伴う様々な環境変動に対する耐性と再生能力を著しく損ねている。

### 1.6 社会基盤施設と社会・経済システムへの影響

#### (わが国周辺の海面水位の変化の実態)

- 地殻変動の影響を強く受けていたり、地下水の汲み上げによる地盤沈下の影響もあるため、わが国周辺の海面水位は全球平均の海面上昇とは異なる変化の傾向を示している。過去数十年の観測結果に基づくと、地域的なばらつきは大きいですが、北日本から中部にかけて 1.5-1.8mm/年の上昇傾向、西日本では 1.0mm/年程度の下降傾向を示している。ただし、海面水位の変化速度の数値は研究者によって異なっており、定説を得るには至っていない。

#### (沿岸域に対する影響)

- 海面上昇の自然海岸に対する第一の影響は、侵食の激化である。特に、砂浜への影響は大きく、海面上昇が生じれば、30、65、100cmの上昇によって現存する砂浜面積の 56.6、81.7、90.3%が消失すると予測されている。わが国の砂浜では、過去 70 年間に 129km<sup>2</sup>が侵食される等現在でも侵食問題に悩まされているが、事態は一層深刻化する。
- このほかの自然環境に対しては、河川における土砂の堆積場所の変化と河床の上昇、湿地帯や干潟の水没、南西諸島に存在するマングローブ林への影響等地形と生態系への影響が指摘されている。これらの海岸地形や生態系は、最終氷期以降海水準の変化に適応しながら存続してきており、将来の海面上昇にも陸側に移動するなどの形で応答すると考えられる。問題は、予測されている海面上昇の速度や沿岸の開発の状況がこうした自然地形の適応を許す範囲にあるかどうかであるが、これに答えを与える研究成果は出されていない。
- 沿岸域の人間社会に対するマクロ的な影響評価（脆弱性評価）として、海面上昇と高潮によって影響を受ける氾濫域の面積、人口、および資産の増加が算定された。現状でも 861km<sup>2</sup>の国土が満潮位以下であり、そこでは 200 万人が住み、54 兆円の資産が集積されている。これに対して、仮に 1m の海面上昇が生じるとすると、面積は 2.7 倍以上の 2339km<sup>2</sup>に広がり、人口および資産もそれぞれ 410 万人および 109 兆円に拡大する。その上に、高潮が来襲するという場合には、さらに多くの人や資産が氾濫域内に含まれることになる。
- 台風が強大化するとすれば、東京湾や伊勢湾、瀬戸内海などでは高潮水位の増大が生じる。例えば、東京湾では 15hPa の台風の中心気圧低下（強大化）によって約 1.2 倍の高潮水位の増大が生じると予測されており、温暖化による台風の変化には充分注意を払う必要がある。

#### (人間居住に対する影響)

- 温暖化の国民生活そのものに対する影響としては、冷暖房需要の変化や生活用水への影響があげられる。これまで、我々の生活に対して、直接的にどのような影響があるのかに関する研究は少なかった。現代の国民生活は社会的インフラシステムによって何重にも防護・支持されており、直接的な影響が見えにくくなっているためであろうが、潜在的な影響の有無について今後更に注意深く検討されなければならない。

#### (インフラストラクチャに対する影響と対策費費用)

- インフラストラクチャとは、交通施設や生活環境施設、国土保全施設などの社会における基盤的な共同利用施設であり、生産・生活活動を間接的に支える役割を持つ。日本における社会資本ストックの総額は、公共・民間部門が整備したものを合わせて 1988 年度末で約 500

兆円にも上っている。その大部分が都市にあたり、発電所やダムのように都市生活を支えるために利用されている。もしこれらの都市インフラが地球温暖化によって被害を受けた場合には、それ自身の被害のみならず、インフラを利用できなくなることによって生じる波及的被害が大きいと考えられる。しかし、それらへの影響予測は、沿岸域のものを除いてほとんど行われていない。

- 沿岸域のインフラ施設に対する影響予測の結果、温暖化は、海面上昇や気象・海象条件の変化を通じて、港湾、漁港、人工島、埋立地、高潮・津波防災施設、内水排除・下水道システム、海岸保全施設等あらゆる種類の社会基盤施設の機能や安全性の低下をもたらす可能性があることが示された。とくに、地下水位の上昇によって、地盤の支持力低下や液状化強度の低下が生じる可能性がある点には注意を要する。
- 1mの海面上昇に対して、沿岸域の諸施設の機能と安全性を現在の水準に保つために必要な対策費用の総額は、全国の港湾施設及び港湾に隣接した海岸（運輸省所管）に対するもので11.5兆円と算定された。この中では、防波堤および護岸の嵩上げ、係船岸壁の嵩上げ、埠頭や上屋等の用地の嵩上げ、水門・排水機場施設の再建設といった防御策が含まれている。また、建設省所管の約2700kmの海岸線の護岸を嵩上げた場合の費用は約6兆円と見積もられている。この他にも漁港等があるので、1mの海面上昇に対して、わが国の海岸線の諸施設の機能と防災レベルを維持するために必要となる対策費は優に20兆円を超える額になるであろう。

#### （産業活動に対する影響）

- 温暖化によって、観光・レクリエーション産業に影響が生じる可能性がある。近年の暖冬や異常低温の夏には、冬のスキーや夏の海水浴、海洋性レクリエーションへの入れ込み客数が激減し、関連産業に大きな影響が生じた。
- 温暖化と気候変動によって対策費や災害復旧費が増えると、建設業には新たな需要の発生になる。
- 気候変動は、生産活動よりもむしろ消費者の購買意欲に大きく影響する。製造加工品は、低温型気象で悪影響を及ぼされ、高温型気象では、概ね好影響を及ぼすことが示されている。エアコン、ストーブ等家電商品のうち1/4は季節商品であるし、また飲料の売り上げ減少とともにアルミ産業も不振となりといった関係が多く見られる。
- エネルギー部門では、供給サイド、需要サイドともに気温の上昇や気候変動の影響を強く受ける。これらの態様の予測には、近年の暖冬や猛暑の年に発生した電気やガス、ガソリン等の消費動向が参考になる。

### 1.7 健康への影響

#### （温暖化による熱ストレスと熱中症）

- 温暖化は温帯地域において夏季の数か月間、高温の発生頻度と期間が増加することから、熱ストレスによる健康への種々のリスクが高まると予測される。疫学的な調査によると、東京では、熱関連の疾病の発生は、暑熱環境に顕著に関連していること、また、高齢者の暑熱による健康障害や死亡の発生が夏季に相当急速に増加していることを示している。回帰分析に

よると、東京において、日平均気温、日最高気温がそれぞれ 27℃、32℃を越えると熱中症患者数が指数関数的に増大することが示された。

#### (動物媒介性感染症)

- 温暖化は、マラリア、デング熱などの動物媒介性感染症の拡大をもたらし、人間の健康に影響を与える。中国南部のマラリア流行地での現地調査結果から、マラリアの流行に係る気候要素の閾値について検討し、特に死亡率の高い熱帯熱マラリアが従来からいわれてきたよりも低い気温（最低月平均気温 13℃）で流行を維持すること、これらの結果に基づき、将来の気候シナリオを用いた解析から中国北部から韓国、そして西日本一帯までが流行危険地域に入る可能性がある。

#### (熱波による死亡)

- 日本では、これまでいわゆる熱波による局地的な死亡率の増加は報告されていない。1970年～1990年の熱中症の死亡数は年間 26～155 件とそれほど多くないが、65 才以上の高齢者の占める割合が高いことが特徴である (41.4%)。
- 熱帯夜 (日最低気温が 25℃以上の日) と真夏日 (日最高気温が 30℃以上の日) の調査から、年間熱中症死亡数と熱帯夜および真夏日の年間日数との間には有意の正の相関関係を認め、暑い日が多いと熱中症による死亡も多くなると推測される。

#### (日最高気温と日死亡率の関係)

- 1972年～1990年の 19 年間の人口動態統計死亡票と気象資料を用いて、九州 7 県について日最高気温と死亡率の関係を検討した結果、日最高気温が高くなるにつれて死亡率は低下し、日最高気温が 28～33℃の時に死亡率が最低となり、33℃以上になると死亡率は再び上昇し V 字型の死亡率曲線を示した。この関係は 65 才以上の年齢階級のみ顕著に認められ、また日本の多くの地域で同様な傾向が見られることがわかった。

## 1.8 日本の脆弱性評価

#### (異常気象による潜在的影響)

- 近年発生した異常気象による影響は、影響を受ける社会の経済構造、都市構造、ライフスタイルが変化していることから、異常気象が一旦発生すると産業活動、日常生活に大きく影響するなど、社会・経済システムの脆弱性が問題となってきた (とくに、洪水、渇水、熱波・寒波に対する脆弱性)。
- 農林水産業の脆弱性の例として、1993年の冷夏や 1994、95年の猛暑が挙げられる。1993年の冷夏では、出穂の遅れ、不稔の多発、発育不良のために米の生産量が平年の 70% に減少し、米不足が生じ社会的混乱が発生した。また翌年の猛暑では、農業、酪農業に多大な影響を与え、被害面積 63 万 ha、被害見込み金額は 1409 億円に及んだ。
- 首都圏では、1964、72、73、85、90 年と渇水が生じており、水道の取水・給水制限、水質の悪化、農業用水の不足などの影響が発生している。とくに 1994 年夏の猛暑は、少雨による渇水も併発したために、各地で取水制限などが発生した。

- 温暖化が進行すると、気温上昇と降水量の変化がおき、また異常気象の頻度や規模が変化すると予測されていることから、こうした異常気象に対する社会・経済システムの潜在的影響についての調査研究が緊急課題となっているが、従来の研究調査はあまりないのが現状である。

#### (典型7公害との複合影響)

- 大気汚染、水質汚濁、地盤沈下、騒音・振動などの局所汚染と温暖化との複合的な影響が懸念される。この分野については、水質への影響などの一部の分野について調査研究が進められているが、他の分野については研究はまだ緒についたばかりである。
- 大気汚染との関連では、光化学オキシダントの原因物質であるオゾンやPANと気温との関係を調べた研究から、温暖化により光化学オキシダントの発生頻度が変化するとともに、影響区域の拡大が懸念される。
- 地下水への影響については、研究はまだ緒についたばかりであるが、温暖化による地下水温の上昇がアラスカ、北米につづいてわが国でも観測されている。
- 94年夏の猛暑は渇水を伴うものであり、琵琶湖では、藻類の発生や水質の悪化が顕著に現れた。こうした影響は、各地の河川、湖沼でも観察されているが、気温上昇と渇水との複合的な影響であり、温暖化した後の影響の一つとして顕在化する問題として位置づけられる。

#### (1994年、1995年の夏の猛暑の影響)

- 1994年、1995年夏期に猛暑が日本全域で発生し、観測史上記録的な高温が各地で観測された。猛暑による実際発生した影響に関する情報やデータを整理することにより、気温上昇など温暖化による生活環境への潜在的な影響の発生する分野が確認された。



## 第2章 1994年及び1995年夏季の猛暑の影響

### 2.1 夏季の猛暑の位置付け

IPCC 第二次評価報告書(IPCC, 1996b)では、温暖化をもたらす異常気象やサプライジング(予期せぬ影響)について言及している。異常気象の発生機構の解明やその予測はまだ緒についてばかりであり、台風の予測などについては研究報告も出始めているが(例えば、杉他, 1996)、不確実性が未だ高い状況である。しかし、一旦異常気象が発生したり気象の変動性が大きく変化したりすると、長期的・平均的に変化する気温上昇などの諸現象と複合して、わが国の社会・経済に深刻な影響を及ぼすと予想される。

そこで、わが国における異常気象とその影響について、既存の研究報告や調査報告書などを中心にレビューし、将来生じるであろう温暖化に起因して発生する異常気象によって引き起こされる社会・経済的な潜在的影響について整理する。続いて、典型7公害で代表される大気、水質などの環境質の変化に温暖化がどのように影響するか、すなわち局所的な公害現象に温暖化がどう影響するか、研究事例は少ないが、今後環境行政を行う上で重要な視点であることから事例を整理する。

### 2.2 異常気象に対する日本の脆弱性

#### 2.2.1 異常気象の定義

WMOによる異常気象の定義は3種類ある(吉野他編, 気候学・気象学事典, 1985)。

- ・短期間に社会や人命に重大な影響を及ぼす気象現象
  - 遅霜による農業災害, 集中豪雨による洪水, 崖くずれ, 台風・低気圧に伴う強風, 大雨による被害をもたらす気象現象
- ・1カ月以上にわたって天候が平年から著しく偏った場合(過去30年間以上にわたって観測されなかった天候)
  - 異常な高温, 低温, 異常多雨, 異常少雨など
- ・月々の天候は平年からわずかしこ偏っていないが, 何カ月も続くために被害が生じた場合は, その期間の天候をいう場合もある。
  - 数年にわたる小降雨による渇水など

#### 2.2.2 IPCC 第二次評価報告書における極端な気象現象の記述

IPCC の国際連合気候変動枠組条約第2条の解釈に関する科学的・技術的情報の第2次統合評価報告書(IPCC, 1996a)では、「気候変動による気温の上昇は、水循環の活発化をもたらす、ある地域ではいっそう厳しい早魃や洪水が起こり、一方他の地域では緩和されると予想される。いくつかのGCM(大気大循環モデル)は降水強度の増加を示しており、一層極端な降水現象が発生する可能性を示唆している。熱帯性低気圧のような非常に強い嵐の発生や地理的分布がなんらかの変化を受けるかどうかについて現在の知識は不十分である。」としている。

将来の気候変動を予測し、検出するための能力は限定されており、また多くの不確実性が存在する。過去に起こったような、大きく激しい気候システムの変化は、その性質上予測が困難である。将来の気候変動が『突発的变化』を伴う可能性を示しており、とくにこれは気候変動の非線型性によるとされる。非線型性のシステムは、急激な外力(強制力)を受けると予期しない挙動を特に示しやすく、今後気候システムの非線型過程と構成要素を研究することにより、解明を進めることができると考えられる。

#### 2.2.3 異常気象に対する日本の脆弱性

近年の主な異常気象を概略整理すると表 2.1 のようになる(国土庁, 1994)。こうした異常気象は影響を受ける社会の経済構造、都市構造、ライフスタイルが変化していることから、従来以上にこうした異常気象がいったん発生すると産業活動、日常生活に大きく影響するなど、社会・経済システムの脆弱性

が増大している。気象変動は産業、日常生活などへの影響が大きい、とくに比較的短時間の変化に対して脆弱性を示している。異常気象の種類による『望ましくない影響』についてまとめているが（表 2.2）、主要な分野における脆弱性を以下に示す。

・洪水などに対する脆弱性

洪水に対して脆弱になっている理由としては、以下の諸点が挙げられる。

・人口が都市に集中し、国土の10%の河川氾濫原に全人口の50%、全資産の70%が集中している（酒井，1988）。

・河川流域の都市化

流域内の土地利用変化、森林伐採などにより保水機能、遊水機能が減少し、洪水が頻発化、土砂の流出の増大、流出時間の短縮化を招いた。

・市街地部の拡大による傾斜地など本来住宅地に不適切な土地への住宅建設

長雨によるがけ崩れ被害、また小雨による影響も受けやすくなった。

・食品流通機構の拡大により、主要幹線道路の不通は致命的な障害をもたらすようになった。

・長期化する渇水に対する脆弱性（国土庁，1996）

生活水準の向上、生活活動の多様化、拡大などにより水需要が増大しつつあるが、一方最近の小雨傾向などにより、水資源関連施設の利水安全度が低下し、水需給の逼迫している地域を中心に渇水が恒常的に発生しており、市民生活や社会経済活動に多大な影響・被害を与えている。

わが国では、1967年、73年、78年、84年、85年及び94年に規模の大きな渇水が発生している。渇水の影響としては、給水制限や節水強化などを意味している。図 2.1 は各種用水の渇水影響地区数を示している。

・熱波・寒波に対する脆弱性

気象と産業活動の関連性については、例えば酒井(1988)は、物価と天気分析による結果から、

1) 気温の変化によって需要量は大きく増減するが、価格があまり変化しないものがある。2) 気温の変化による需要の変動が価格の変動に影響を受けるものとして、冬季の灯油、夏・冬物衣料、冷・暖房器具がある、3) 気温の変化によって生産量が大きく変動し、需要があまり変わらないために、価格変動の大きいものに生鮮野菜や果物がある。異常天候の影響によって季節商品需要や価格変動の傾向はさらに大きく増幅される。

2.4 で述べるように、1993年は冷夏、1994、1995年は猛暑を経験し、農作物を始めとして産業活動や日常生活が多いに影響を受けた。1993年、1994年の両年の気象の地域別の平年値との比較をしたのが、表 2.3 である。

#### 2.2.4 異常気象に対する日本の脆弱性の具体的事例

猛暑、冷夏、暖冬もしくは渇水などの短期的な異常気象が、日本の社会経済にさまざまな影響を及ぼした。ここでは、近年の報文を基に、農林水産業、水資源、エネルギー資源の各分野にみられる脆弱性について概観する。



表 2.1 最近の主な異常気象(国土庁, 1994)

西暦年	日本の異常気象	世界の異常気象
1984	大寒冬, 猛暑	ソ連(ウクライナ)干ばつ, アフリカ干ばつ
1985	猛暑	ヨーロッパ北部冷夏, ヨーロッパ寒波
1986	西日本少雨(秋)	米南東部干ばつ, ヨーロッパ北部低温
1987	暖冬, 少雨(春)	インド干ばつ, バングラデシュ洪水, ギリシア熱波
1988	長梅雨	米中西部干ばつ, 中国南部熱波, バングラデシュ洪水
1989	暖冬	東アジア・シベリア・ヨーロッパ暖冬, 中国中部洪水
1990	暖冬, 猛暑, 少雨 (梅雨期)	東アジア・ヨーロッパ暖冬, アフリカ干ばつ, オーストラ リア洪水
1991	暖冬, 東日本多雨 (秋)	中国洪水, オーストラリア干ばつ, 米南部洪水
1992	暖冬, 東日本以西 多雨(春)	北米暖冬, 中東低温・大雪, アフリカ干ばつ, フィリピン 干ばつ, パキスタン洪水
1993	暖冬, 冷夏, 多雨 (夏)	米国中西部洪水・南東部熱波干ばつ, 中国洪水

気象庁資料による。

表 2.2 異常天候カテゴリー別「望ましくない影響がある」回答の品目別比率(酒井, 1988)

	農産物全	農産加工品全	畜産物全	畜産加工品全	水産物全	水産加工品全
暖冬	6.6	5.0	1.3	0.0	5.6	4.9
寒冬	13.9	1.7	34.8	10.5	7.7	6.2
豪雪	24.3	1.7	20.9	10.5	7.5	12.3
暖春	0.7	0.0	0.8	0.0	3.3	3.7
冷春	71.4	23.3	31.5	7.9	13.8	8.6
小雨	32.0	15.0	12.2	5.3	8.0	4.9
大雨	56.9	20.0	23.8	13.2	12.6	12.3
猛暑	32.2	23.3	50.0	13.2	10.0	11.1
冷夏	54.0	20.0	22.1	13.2	11.5	11.1
暖秋	3.6	0.0	0.7	0.0	4.2	3.7
冷秋	46.2	18.3	24.2	7.9	7.3	7.4
降ひょう	48.5	21.7	11.1	7.9	3.5	7.4
台風	40.7	13.3	16.5	10.5	14.0	12.6
晩霜・早霜	24.3	12.3	11.9	7.9	2.6	8.6
計	24.3	12.3	18.7	7.7	8.0	8.3

札幌管区気象台(1985): 気候変動と地域産業との関係および古気候資料の所在に関する調査。

表 2.3 1993年と1994年夏の月平均値の平年との比較(茅陽一編, 1995)

	北海道・東北			関東・中部			近畿・中国 四国・九州			奄美・沖縄		
	気 温 (°C)	降 水 量 (%)	日 照 時 間 (%)	気 温 (°C)	降 水 量 (%)	日 照 時 間 (%)	気 温 (°C)	降 水 量 (%)	日 照 時 間 (%)	気 温 (°C)	降 水 量 (%)	日 照 時 間 (%)
1993年 6月	-1.0	136	61	-0.3	114	89	0.0	153	88	+0.7	53	101
1993年 7月	-2.0	98	91	-2.0	173	57	-1.5	209	57	+0.5	68	92
1993年 8月	-2.1	93	92	-1.9	135	61	-1.7	223	65	+0.6	31	116
1994年 6月	+0.3	63	109	+0.6	55	108	+0.4	69	101	+0.5	86	111
1994年 7月	+1.7	59	115	+2.6	40	138	+2.5	29	151	+0.7	42	105
1994年 8月	+2.6	82	118	+2.0	51	138	+1.6	39	130	+0.2	111	88

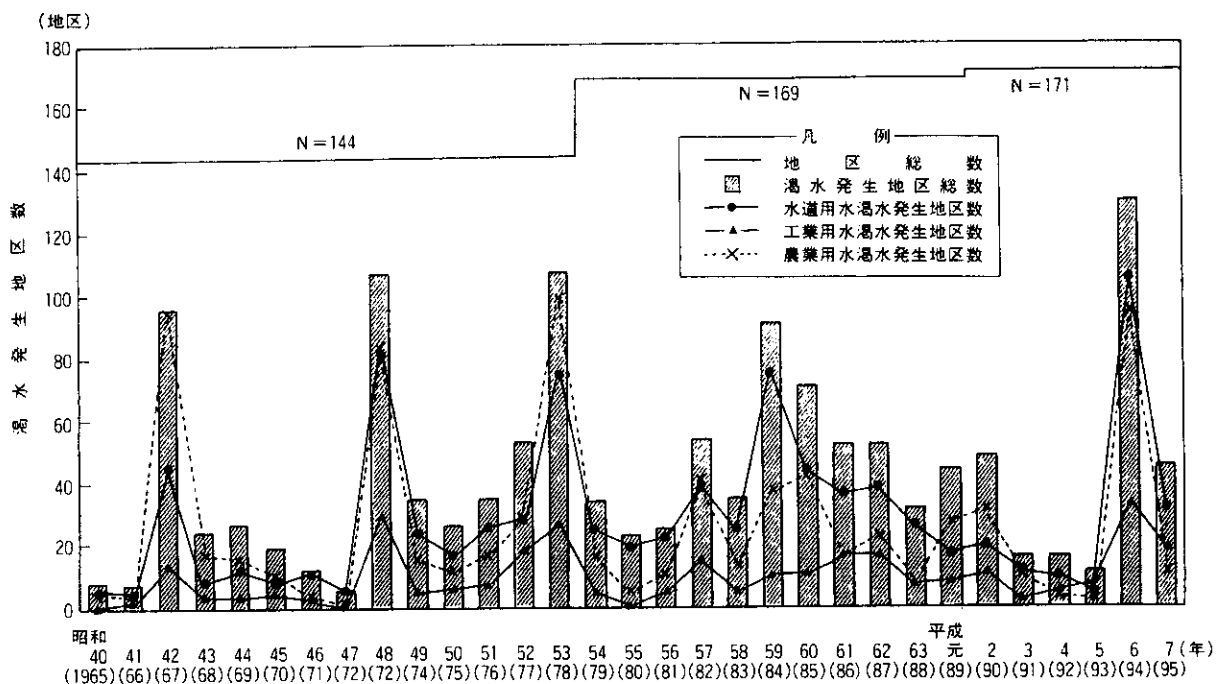


図 2.1 各種用水の渇水発生地区数(国土庁, 1996)

(1) 農林水産業の脆弱性

気象の影響を直接受けやすい第一次産業は、異常気象によりさまざまな被害が生じている。1993年の冷夏・日照不足、及び1994年の猛暑・少雨により、全国的に農作物の被害が発生した。

水稲では、1993年の冷夏により、出穂の遅れ、不稔の多発、発育不良、長雨・集中豪雨・台風による被害、及びそれを原因とする疾病の多発がみられた(宮田, 1994; 伊藤, 1994)。1994年の猛暑・少雨の際には、生育期の水不足による生育不良、萎凋、枯死、出穂異常などがみられた(気象庁, 1996)。

この他、1994年の猛暑では、乳牛、養豚、採卵鶏、ブロイラーの死亡や出荷量の減少、スギ・ヒノキ等の種苗・幼木の枯損、ニジマス、アユなどの養殖魚の死亡などの被害が生じた(気象庁, 1996)。

## (2) 水資源の脆弱性

異常気象による水資源への影響は、少雨による渇水、猛暑による需要増に伴う水不足などの形で発生する。夏季の猛暑と少雨はしばしば同時に生じるため、その場合はより影響が大きい。

1994年の猛暑・少雨の際には、各地で取水制限、給水制限が行われた。四国地方では、2ヶ所のダム貯水量が完成以来初めてゼロとなるなど、著しい影響が生じた(高橋, 1994)。この他、首都圏では1964, 72, 73, 78, 85, 90年にも渇水が生じており、この時には水道の取水・給水制限、給水車の出動、水質の悪化、農業用水の不足などの影響が生じた(富田, 1994)。

関西圏の水瓶である琵琶湖についての研究から、1994年の琵琶湖の水位は、梅雨期やそれ以降にまとまった降雨がなかったために、5月後半から減少しはじめ、特に7月中旬から9月中旬にかけて急激に低下し、9月15日には-123cmに達した(山中他, 1995; 原他, 1995)。この間、南湖では高いCOD値が観測され、湾部(赤野井湾)ではアオコの発生が顕著であった(岡本他, 1995)。

## (3) エネルギー資源の脆弱性

エネルギー資源への異常気象の影響は、主として電力需要の変化として表れる。特に、夏の電力需要はその約1/3が冷房関連需要であるため(電気事業連合会, 1994)、特にわが国では猛暑による冷房需要の増加は大きな影響を示す。1994年夏の猛暑の際には、電力消費の状況を表す最大電力、発電受電電力量の伸び率、電力使用量などが、各地で過去最高を記録した。また、発電のための出水率は、渇水のため前年を大きく下回った(平沼, 1994)。

## (4) 身近な動植物への影響

1994年、1995年の猛暑・渇水の際には、街路樹などの植栽樹木の大部分が枯死などの影響を受けた。気温の上昇よりも、無降雨期間、即ち乾燥期間が長びくことによる、土壌水分の不足の影響が大きいと思われる。一方、東京都目黒区の自然教育園の林内においては、1mm以上の降雨のない期間が1ヶ月以上継続した1995年の夏期にも、猛暑の影響と思われる現象はみられなかった(千羽, 1996)。

1994年の夏期には、スズメバチによる被害、巣の駆除依頼などが前年と比較して著しく上昇した。これは、気温の上昇と少雨により成虫となる昆虫が増加し、またハチの活動が活発になったことにより、巣の拡大や個体数の増加が前年の冷夏・多雨と比較して著しく大きかったことが主な要因と考えられる。ただし、郊外の人口増加などに伴い、人とスズメバチの接触する機会が増加したことも一因として考えられる(鈴木, 1995)。

## 2.3 温暖化の大気等に与える影響

### 2.3.1 大気環境に与える影響

温暖化に限らず気象条件の変化は、大気汚染の発生状況、例えば、大気汚染の発生回数や汚染の強度などに影響する。温暖化による気温の上昇は、対流圏オゾンの生成プロセスを加速するので、とくに人口や交通、工場が集中する都市部においてオゾン濃度が上昇し、光化学スモッグの発生頻度が増え、その結果健康被害が出ることも予測されている。一方気温の上昇によるエアコンの多用など夏期の電力需要が増大することになり、結果的に石油、天然ガスの利用が増大し、温室効果ガスやSO<sub>x</sub>やNO<sub>x</sub>の排出量が増大して、さらに温暖化を促進する要因になったり、酸性雨の被害を助長する可能性もある。

### (1) 温暖化と光化学スモッグとの関係

光化学スモッグは工場などの固定発生源や自動車などの移動発生源から排出される炭化水素と窒素化合物が紫外線によって光化学反応を起こし、光化学オキシダントや有機化合物の酸化物、粒状物質に起因して発生し、その主成分はオキシダントである。鷲田らは、大型光化学チャンバーを用いた実験か

ら、気温上昇とオゾンやPANとの関係を調べている（鷲田，1990：Hatakeyama, et al., 1991）。その結果、気温が上昇するほど高濃度状態が長時間維持され、PANは逆に気温が高くなるほど濃度が低くなることが判明した。このことから、気温の上昇によってオゾンの影響区域は拡大し、PANによる影響域は減少するとしている。

木村は、これまでの光化学オキシダント状況の推移や気温との関係を調べ、温暖化が進行した場合、気温の上昇により光化学オキシダントの高濃度状況の発生する可能性は少なくないとしている。しかし、光化学オキシダントの生成は気温以外にも、風速や一次汚染物質の排出量などの影響を受けるために、高濃度状況が発生するとは断言できず、今後温暖化による大気汚染への影響の研究が必要であるとしている（木村，1996）。

## (2) オゾン濃度の上昇の影響

1988年熱波が米国で発生し、農業などに深刻な影響を与えたが、同時に大気の停滞状況が続き気温が上昇したために、全米で76都市でオゾン濃度を基準値の25%以上超えた。1994年夏は猛暑であり、わが国で同様な影響がみられた。例えば、群馬県では、1994年13の測定局で光化学オキシダント濃度が光化学スモッグ注意報の発令基準を18回超えている（ちなみに、1993年の発令回数は8回）。県では、雨量が少なく日照の多いカラ梅雨であったこと、梅雨明け後に気温が高く日照が多いという猛暑であったことが影響したと分析している（群馬県，1995）。東京都では、注意報発令回数は前年に比べて増えているが、警報発令日数は0であった（東京都，1995）。しかし前年は0であった被害届出者数が183人であったことから、注意報発令レベルであっても、気温が高い場合には、健康被害が増大する可能性があることを示唆している（図2.2，原沢，1996）。

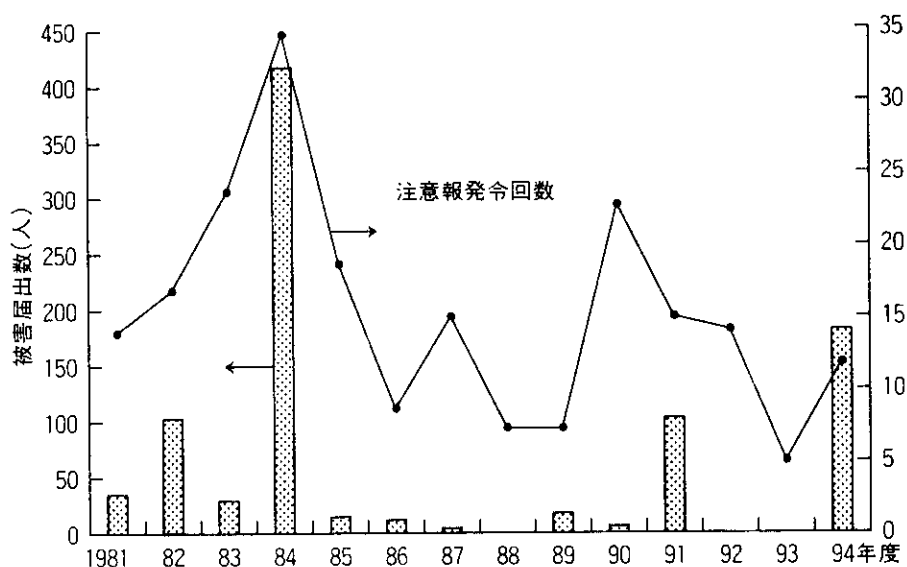


図 2.2 光化学スモッグ発令回数と被害届出者数(東京都, 1995)

## 2.3.2 従来型の公害との複合的な影響

### (1) 水環境への影響

温暖化は河川・湖沼・感潮域・沿岸域などの水質に直接・間接的な影響を与えるが、IPCC 報告（IPCC, 1996b）では水量の検討に比べて、水質に関する記載は少ない。ひとつには、水文、水資源分野では、水量がまず第一に重要であること、水量に関する研究に比べ水質への影響に関する研究が少ないことが挙げられる。

#### ・温暖化の河川水質への影響

温暖化の河川水質へ及ぼす直接的な影響は、流量変化（とくに環境を維持するために必要な低水流量の変化や洪水流量の変化）、気温変化である。水質悪化は、1)降水量が減少し、または蒸発散量の増加が降水量の増加を越える時に生じる場合、2)また、降水量が増加しても、雨期が冬・春に移り、多くの地域で低水が生じる晩夏に乾燥した条件となる場合、に発生する。流域の河川流量や水収支が変化し、総流量や水位、河川流域や河床の浸食により、濁度と沈澱物の負荷などの変化も予想され、多くの水域では水質が悪化する可能性がある。94年猛暑時の水系水質については気温上昇と渇水の複合影響で水質変化がみられた自治体もある。

#### ・温暖化の湖沼への影響

温暖化の湖沼への影響として、水量の変化、水温の上昇、結氷の減少が予想される。とくに、温度成層の長期化による水質悪化と温度上昇による富栄養化の進行が懸念される。河川流量の減少と湖水位の低下は、希釈と掃流による汚濁物質の除去作用を減少させ、流出パターン、気温、蒸発散量にも影響しよう。例えば、温暖化のダム湖や琵琶湖への影響が報告されている（Fushimi, H and M. Kumagai, 1991）。

#### ・地下水への影響

温暖化による地下水温の上昇に関する研究報告がある。地下水の温度は様々な要因によって影響を受ける。地球温暖化に起因する地下水温上昇にかんしては、アラスカ、北米各地で観測・解析が行われており、広範囲に地球温暖化の影響が表れていることが示されている。東京都に位置する深井戸の地下水鉛直分布の測定から、地表面温度の上昇に伴い、熱輸送が地中深くまでに及び、地下水温を上昇させていることを明らかにした（谷口他、1996）。

### (2) 騒音・振動などへの影響

温暖化が、騒音・振動、地盤沈下、悪臭、土壌汚染に与える影響についての知見は乏しいのが現状である。以下は予想される影響について示したものである。

温暖化は地下水変動を通じて間接的に地盤沈下へ影響すると予想される。前述のように温暖化は水資源へ影響を与え、水質を低下させる。水質悪化の結果、地下水への需要が高まり、結果的に地盤沈下につながる可能性があり、とくにこの傾向は地下水の塩水化とも関連して沿岸部に顕著に現れわれよう。

騒音・振動、悪臭公害は感覚公害の代表的なものであり、苦情件数も多い（環境庁、1996）。全般的に産業・建設より都市・生活環境などに対する苦情が割合が増えている。とくに近隣騒音などの日常生活密着型公害が、生活の質向上、快適な環境を求める地域住民の間で問題化している。温暖化のこうした感覚公害への影響については、例えば、真夏日や熱帯夜の長期化によるエアコンの夜間の連続運転などに起因する苦情などが増大する可能性もある。土壌汚染については、土壌劣化や浸食、土壌有機物の分解促進などを通じて間接的に影響すると考えられる。水質、大気、地盤沈下も含めて典型

表 2.4 温暖化の典型7公害に及ぼす影響

温暖化	影響分野	影 響
気温上昇	水質汚濁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・河川水質の悪化</li> <li>・湖沼・沿岸海域の富栄養化</li> <li>・水生生態系の破壊</li> <li>・豪雨による高濁度水の発生</li> <li>・水不足と原水水質の悪化</li> </ul>
	大気汚染	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対流圏オゾンの増加</li> <li>・光化学スモッグの頻度増加</li> <li>・電力需要増加による温暖化促進</li> <li>・視程の低下</li> <li>・農薬など有機汚染物質の気化促進を加速</li> <li>・花粉などの飛散状況の変化</li> </ul>
降水量変化	地盤沈下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水質悪化，河川流量減少による地下水汲み上げ地点，量の増大</li> </ul>
海面上昇	振動・騒音	<ul style="list-style-type: none"> <li>・近隣騒音などの頻度，程度増加（熱帯夜長期化によるエアコン利用など）</li> </ul>
異常気象	土壌汚染	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土壌水分の不足の激化</li> <li>・土壌有機物の分解促進</li> <li>・土壌侵食，劣化の促進</li> </ul>
	悪 臭	<ul style="list-style-type: none"> <li>・悪臭物質の気化促進</li> <li>・沿岸部処理場からの悪臭発生</li> <li>・埋立地からのメタン発生の促進</li> </ul>

7公害と温暖化の影響を要約すると表 2.4 のようになる。

## 2.4 1994, 1995 年夏の猛暑による影響

94 年，95 年の夏にみられた猛暑現象は，温暖化影響を検出するための指標のあり方を考える手がかりとして，貴重な情報となるものである。ここでは，1994 年，1995 年の猛暑に関連する情報を全国的に収集し，その特徴について整理した結果を示す。

### 2.4.1 1994, 1995 年夏の気象の特徴

気象庁の全国主要都市気象表，及び最高気温累年順位などのデータに基づき，1994 年，1995 年の夏期（7～9月）の気象の状況について，平年値との比較を行った。

#### (1) 気温

1994 年7～9月の全国の日平均気温の月平均値は，7月が 26.8℃，8月が 27.8℃，9月が 23.3℃であり，平年値よりも 2.1℃高かった。また日最高気温の月平均値は 2.4℃，日最低気温は 2.0℃高かった。一方 1995 年については，日平均気温，日最高気温，日最低気温とも，平年値との差は 0.7℃であり，大きな開きはみられなかった（表 2.5）。

日最高気温の累年順位については，1994 年の記録が上位を占めた。1995 年の日最高気温は，累年順位ではさほど高くはなく，アメダスの観測結果の中で上位に当たる例が若干みられた。

#### (2) 降水量

1995 年，1994 年の7～9月の降水量と平年の降水量とを比較すると，1994 年は7，8月が平年よりもかなり降水量が少なく，9月は多かった。1995 年では，7月の降水量は平年よりもかなり多かったが，8，9月の降水量は少なかった（表 2.6）。

表 2.5 94年, 95年7~9月の気温の平均値との比較

月	1994年			1995年			平 年 値			94年と平年の差			95年と平年の差		
	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低
7月	26.8	31.4	23.2	25.1	29.0	21.9	24.3	28.4	21.0	2.5	3.0	2.2	0.8	0.6	0.9
8月	27.8	32.6	24.1	27.1	31.7	23.4	25.6	30.1	22.1	2.1	2.5	1.9	1.4	1.6	1.3
9月	23.3	27.8	20.1	21.6	25.9	17.9	21.7	26.0	18.1	1.6	1.7	2.0	-0.1	-0.2	-0.2
平均	26.0	30.6	22.4	24.6	28.8	21.1	23.9	28.2	20.4	2.1	2.4	2.0	0.7	0.7	0.7

表 2.6 94年, 95年7~9月の降水量の平均値との比較

月	1994年	1995年	平 年 値	94年と平年の差	95年と平年の差
7月	68.0	293.0	188.7	-119.8	104.3
8月	82.5	133.2	155.7	-73.2	-22.5
9月	213.1	128.5	189.5	23.6	-61.0
平均	121.5	184.9	178.0	-56.5	6.9

## 2.4.2 猛暑の影響分野

日本の社会全般において、猛暑の影響と考えられる現象がどのような分野に生じているかを把握するため、1994年及び1995年の7~10月に発行された新聞記事(朝日新聞)から、「猛暑」というキーワードに関連する記事1274件を検索した。この中から猛暑の影響と考えられるものを選択し、KJ法でとりまとめ、経済、社会、自然、気象、産業、農・林業、エネルギー、健康・衛生、生活・レジャー、災害の10分野に分類した(図 2.3)。検索した記事には、気象、農業、自然、エネルギー、及び健康・衛生の5分野に関するものが多くみられた。各分野の記事の例を以下に示す。

### (1) 気象

— 埼玉県熊谷地方気象台によると、県内の最高気温は熊谷が38.1℃、浦和36.8℃、越谷38.0℃を記録するなど記録的猛暑が続いた(94.8.4)。

— 東京都内は24日も猛暑が続き、正午過ぎには35.1度を記録。35度を超える「酷暑日」になった。気象庁天気相談所によると、東京の酷暑日は今年9日目で、昨年の8日を抜く最多記録になった(95.8.24)。

### (2) 農業

— 食糧庁によると、農家から出荷されて食糧事務所の検査を受けた米は8月末までに1993年同期の5.1倍、一昨年同期の3.3倍に達した。しかし、米の代表ササニシキは、「暑さ寒さに弱い」性質のために品質が低下した(94.9.15)。

— 1994年春以降の干ばつによる農作物被害が、1,377億円に上っていることが、農林水産省のまとめでわかった。地域別では九州の被害が最も大きく373億円。以下、中国・四国が238億円、関東が228億円などであった(94.10.22)。

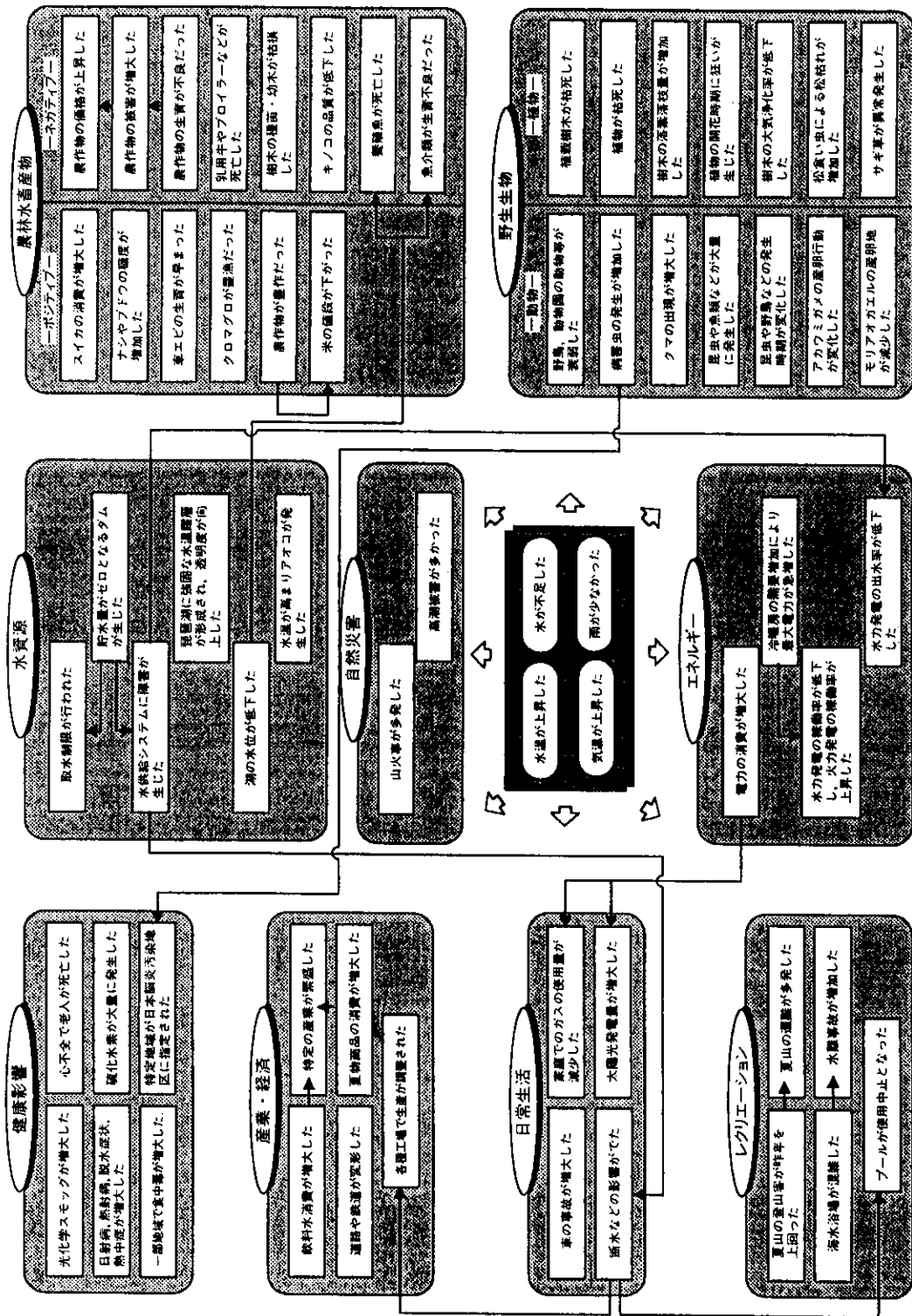


図 2.3 1994, 95年の猛暑による影響の因果関連図



### (3) 自然

- 福岡県北九州市では猛暑と日照り続きで、ミツバチの天敵オオスズメバチが例年より早く発生し、養蜂業者の巣箱を襲撃した。防御のための捕獲器の取り付けが間に合わず、被害が増加した(94.9.20)。
- 千葉県若葉区の千葉中央観光ぶどう園での「異変」はカブトムシ。同園のナシに、「例年の10倍はいる」という数のカブトムシが群がってきている。東京都多摩動物公園に聞くと、カブトムシは梅雨が明けるところ、一斉に成虫となって地表に出てくる。昨年の夏の暑さで産卵の量が多く、今年は突然の猛暑でそれが一斉に成虫になって出てきたとの見方だ(95.8.6)。

### (4) エネルギー

- 都市ガスの大手、西部ガス7月のまとめによると、猛暑で水温が上がり、需要の半分をしめる家庭でのガス使用量が5.5%減った。逆に工場やビルなど業務用は、冷房需要の増加などで10.8%も増えた(94.8.17)。
- 東北では梅雨明けとともに気温が上昇してエアコンを使う人が増え、電力需要が急増している。梅雨明けが発表された24日、東北電力管内の東北六県と新潟県の県庁所在地での平均気温は34.1度に達した。このため、1日の需要ピークを示す「最大電力」は1230万キロワットまで上昇、猛暑だった昨年の最高記録(8月8日の1264万キロワット)に迫った(95.7.27)。

### (5) 健康・衛生

- 福岡市内で1994年7～8月、日射病や熱中症によって救急車で運ばれた人が、昨年の2.5倍の125人に上ったことが、市消防局のまとめで分かった(94.9.8)。
- 千葉県では、1994年食中毒の発生件数が1993年と比べ倍増した。県営西部は1994年7月25日、警報制度を設けた1988年以降最も早く食中毒警報を出した(94.8.26)。

## 2.4.3 温暖化の市民生活への潜在的影響

ここでは、短期的な異常気象の影響のみではなく、温暖化による影響と考えられる長期的な変化についての報告・論文を基に、市民生活に対する潜在的な影響についてとりまとめる。

### (1) 農業への影響(太田, 1996)

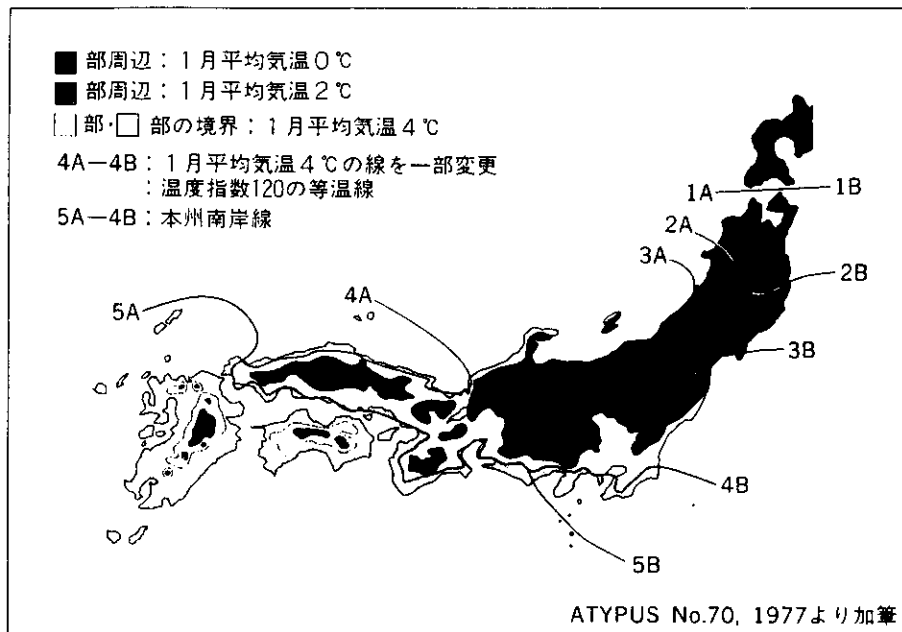
温暖化による食糧生産への影響は、最も重要な影響の一つである。日本の主要作物である水稲について、CO<sub>2</sub> 倍増時の浅い湛水域(水田)の熱環境シミュレーションを行った結果の概要を以下に示す。

CO<sub>2</sub> 倍増により、水温は約2～4℃上昇する。また、稲の移植可能日が早まり、水稲耕作の潜在的可能機関が20～40日長くなる。この結果積算有効水温が800～900℃・日増加する。さらに年間の等蒸発散量線が北方に移動する。

これらの熱環境の変化により、21世紀末には日本における商業的稲作の現在の北限が、200～500km程度北に移動し、稲の耕作面積を拡大させることは確実である。しかし、稲の栽培に対する高温ストレスにより、日本の太平洋沿岸域及び南西部において、現在のジャポニカ米品種の育成が困難になる可能性も考えられる。

### (2) 身近な自然環境への影響

身近な自然環境への代表的な影響としては、南方系生物の分布域北上が挙げられる。日本におけるクモの分布は、本州南岸線(年平均気温15度、温量指数約120の線)を境として分布の変化がみられる(図2.4)。近年、スズミグモ、トビジロイソウグモなどの南方のクモが、10～20年前と比較して



クモの分布線

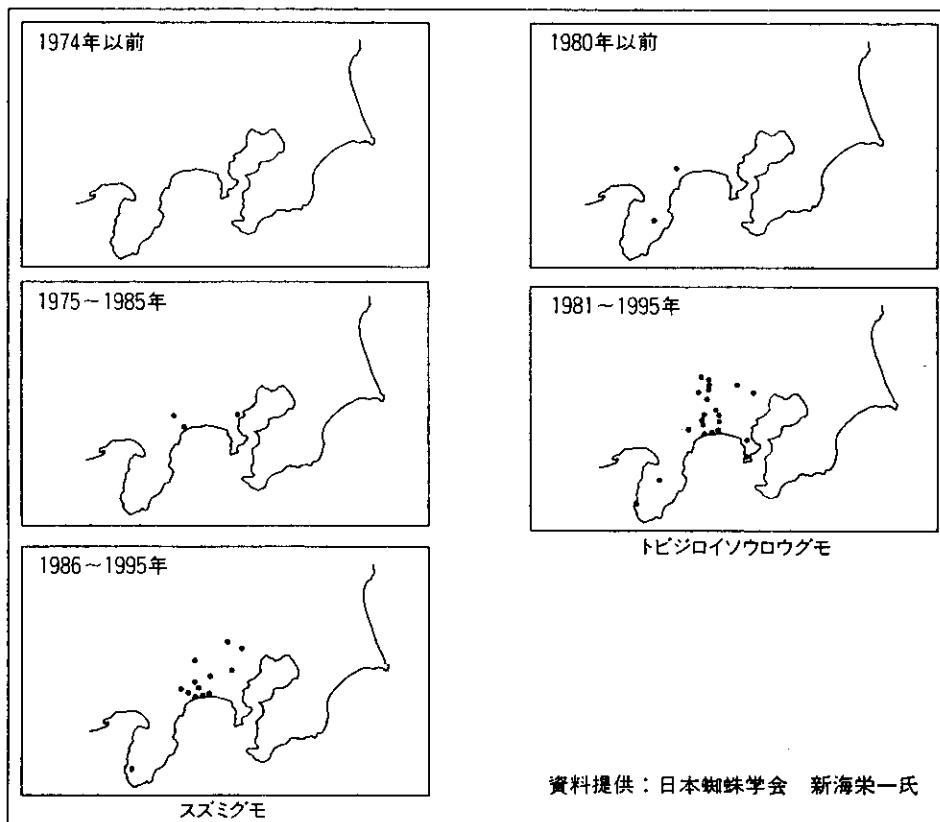


図 2.4 クモの分布の変化

北上してきていることが確認されているが、これはこの本州南岸線の変動による影響が考えられる。また、越冬期である1月の最低気温が上昇すると越冬が容易になるため、分散した子グモが定着し、新たに繁殖することが可能になることから、冬期の平均気温上昇の影響も考えられる（新海，1996）。

飼い鳥として輸入されたワカケホンセイインコなどの熱帯原産鳥類が、繁殖・定着している例が多く報告されている。これは、冬期の最低気温の上昇と、寒さに対する耐性の向上の両方の影響があると思われる。特に東京都内を中心として、年最低気温の平均値が上昇していることの影響もあると考えられる（千羽，1996）。同様に、植物ではシュロ、ノシランなどの南方系植物の北上が見られる（原田，1996）。

## 2.5 今後の課題

### 2.5.1 異常気象などの社会・経済への影響の評価

1980年代半ば以降の連続的な暖冬、1993年の冷夏、1994-95年の猛暑の発生など、近年の極端な気象現象や異常気象が自然変動の範囲に入るものであるかもしれないが、こうした極端な気象現象の発生は我々の社会・経済に多大な影響をもたらす。例えば、1993年の冷夏による米生産量の大幅減少は米不足を招き、緊急的に海外から米を輸入せざるを得ない状況に到ったのは記憶に新しい。また、1993年、1994年の猛暑も農業分野のみならず、日常生活にも多大の影響がでた。こうした異常気象は今後とも発生するであろうし、その発生頻度や規模の予測が現在では不可能であるとしても発生した場合の社会・経済の障害、損害を予め見積もり、その脆弱性について評価を行うこと、さらに生じるであろう障害や損害を極力さける方策を考慮しておく事が必要であろう。異常気象についての統計資料などについての報告は次第に増えている（例えば、山川，1994；小元，1996；日本気象協会，1996；気象庁，1994，1996）。しかし、その影響を日本の脆弱性といった面から捉えた調査・研究はまだ少ない。今後、長期にわたって平均的に気温が上昇することと、異常気象のような現象が発生した場合に対する脆弱性評価の方法論が確立される必要がある。また、とくにその経済・社会的影響を防止するための諸方策も今から検討しておく必要があろう。

### 2.5.2 温暖化の影響の検知

猛暑は種々の分野に多大な影響を与えることが報告されているが、とくに自然生態系はその影響を身をもって表している。例えば、熱帯性きのこオオシロカラカサタケの京阪神地域（近畿地方）への進入（横山，1995）など、気象の長期変動を反映して変化している。気象庁で実施している生物季節などのモニタリングも今後影響面から重要な役割を果たすことになるだろう。

### 2.5.3 社会・経済システムの脆弱性評価手法の確立とそれによる評価

都市は人口集中、エネルギー利用の集中など、人間活動が活発化し、一方では、自然が大きく減少することにより、水の循環が変化している。このため、洪水の頻発や水資源涵養などの自然の能力を大きく減少させている。都市の脆弱性を回復するためには、単に都市だけではなく、流域の自然、広域の自然保全に目をむける必要がある。この意味で従来の自然環境保全の対策はより重要な役割を果たすことになろう。

### 2.5.4 局地・地域的公害と温暖化との関係分析

温暖化は、大気、水質などの環境質に影響を与えることの報告が増えている。いまだ知見は充分ではないが、今後両者の関係を分析、知見を整理して、温暖化と典型7公害との関係を考慮した上での対策立案が必要になろう。

## 引用文献

- 電気事業連合会, 1994: 夏の電力ピークと冷房需要の凄まじさ異常猛暑の特需で昨年と対照的に. JETI, 42(13), 33-35.
- Fushimi, H. and M. Kumagai, 1991: Decrease of snow cover amounts induced by climate warming and its influence upon dissolved oxygen concentration of Lake Biwa, Japan. International Conf. on Climate Impacts on the Environment and Society(CIES), University of Tsukuba, Japan, Jan.27-Feb.1.
- 群馬県, 1995: 平成7年度版環境白書. 282 pp.
- Hatakeyama, S., H. Akimoto, and N. Washida, 1991: Effects of Temperature on the Formation of Photochemical Ozone in a Propene-NOx-Air irradiation System, *Environ. Sci. Technol.*, 25(11), 1884-1890.
- 原稔明・西嶋孝治・加藤正典, 1995: 琵琶湖の水環境モニタリングと湖水位変動, 環境システム研究, 23, 632-637.
- 原田 洋, 1996: 土壌動物及びその他の生物に対する温暖化の影響について, 暑い夏の現象及び影響事例の収集とインベントリ作成作業報告書. 52pp.
- 原沢英夫, 1996: 再浮上した典型7公害の温暖化による影響と対策の行方, 資源環境対策, 32(8), 2-8.
- 平沼洋司, 1994: 異常気象と社会・経済. 日本エネルギー学会誌, 73(4), 260-266.
- IPCC, 1996a: The IPCC Second Assessment Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change.
- IPCC, 1996b: Climate Change 1995-Scientific-Technical Analysis of Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change, Report of IPCC Working Group II.
- 伊藤純雄, 1994: 北海道地区における水稲の異常気象災害を振り返って, 肥料, 38(68), 32-39.
- 環境庁, 1996: 平成7年度版環境白書, 各論. 446pp.
- 茅陽一編, 1995: '96/'97 環境年表. オーム社.
- 木村正伸, 1996: 地球温暖化による大気汚染への影響－光化学大気汚染を中心に－. 資源環境対策, 32(8), 20-24.
- 気象庁, 1994: 平成5年冷夏・長雨調査報告－災害時自然現象報告書－. 気象庁技術報告, 115, 231pp.
- 気象庁, 1996: 平成6年5月上旬から10月中旬の少雨および高温に関する調査報告書. 気象庁技術報告, 118, 249pp
- 国土庁, 1994: 日本の水資源－健全な水循環をめざして－. 507pp.
- 国土庁, 1996: 日本の水資源－水資源の有効利用－. 374pp.
- 日本気象協会, 1996: 気候変動に伴う極端な気象現象の変化に関する調査報告書.
- 岡本誠一郎・宇野孝一, 1995: 平成6年渇水時における琵琶湖の水環境. 環境システム研究, 23, 360-365.
- 宮田悟, 1994: 平成5年産水稲不作の教訓. 肥料, 38(68), 32-39.
- 太田俊二, 1996: CO<sub>2</sub>-Induced Climate Change and Terrestrial Ecosystems in Monsoon East Asia - Probable Effects on Biological and Climatic Resources -. 早稲田大学博士論文, 76pp.
- 小元敬男, 1996: 近年の異常気象を考える－グローバル気候と都市気候の観点から－. 地理, 41(2), 32-39.
- 酒井俊二, 1988: 気候変動の第二次産業及び第三次産業への影響. 吉野正敏編日本における気候

- 影響・利用研究の課題，気候影響・利用研究会報告書。
- 千羽晋示，1996：自然教育園周辺の生物に対する温暖化の影響について，暑い夏の現象及び影響事例の収集とインベントリ作成作業報告書，52pp.
- 新海栄一，1996：1960年代～90年代の南方性クモの分布変化／温暖化影響について，暑い夏の現象及び影響事例の収集とインベントリ作成作業報告書，52pp.
- 杉正人・野田彰・佐藤信夫，1996：地球が温暖化すると台風の数が増える？ - 気象庁全球モデルの数値実験による考察，37，気象学会春季大会。
- 鈴木惟司，1995：昆虫に対する温暖化の影響について，暑い夏の現象及び影響事例の収集とインベントリ作成作業報告書，52pp.
- 高橋裕，1994：渇水対策を考える-松山，中部圏，首都圏を例に-。河川，580，3-8.
- 富田邦裕，1994：首都圏における渇水。河川，580，53-64.
- 谷口真人・佐倉保夫・ダバシアクアン・嶋田純・島野安雄・榎根勇，1996：地下水鉛直分布に現れた地球温暖化および都市化の影響。1996年度日本地下水学会秋期大会予稿。
- 東京都，1995：平成7年度版東京都環境白書。
- 山川 修，1996：グローバルにみた天候異変。地理，39(6)，28-37.
- 山中直，他，1995：1994年の渇水に伴う琵琶湖水質の変動。環境システム研究，23，376-381.
- 横山和正，1995：熱帯性きのこオオシロカラカサタケの京阪神地域（近畿地方）への進入。自然環境科学研究，8，13-21.
- 吉野正敏他編，1985：気候学・気象学辞典，三宮書店。
- 鷲田伸明，1990：地球温暖化と光化学スモッグ。遺伝，44(1)，5-6.



## 第3章 温暖化の影響検出

### 3.1 温暖化影響の検出の重要性

全球の年平均気温でみると1970年代末より高温が観測されており、1998年も記録的な高温になった(WMO, 1998; UK Met. Office, 1998)。一方、南極の棚氷の崩壊や植物・動物の生息域の変化などが観測されている。IPCCの第二次評価報告書ではすでに人為的な温暖化が始まっていることが指摘されているが、これらの現象が温暖化の影響かどうかを検出する問題を取り上げて、その意義や報告されている事例などについて整理してみた。

ここで、気温や降水量などの気候因子の変化が温暖化の影響として現れているかどうか(温暖化自身が進行していることの検出)と、温暖化が進行しつつあるならば、その影響がすでに自然生態系や社会システムに現れているはずである(温暖化影響の検出)。そうした影響を早期に検出することは、1)温暖化が進行しつつあることの証拠を補強するとともに、2)影響を低減するための対策(適応策)を早急に立て、実施するためにも必要である。また、温暖化影響の重大性を社会、とくに政策決定者や国民にアピールして温暖化対策の推進を後押しすることも、この種の研究では重要になってきた(国立環境研究所, 1998)。

本章では、まず、温暖化自身の検出の問題をIPCC第二次評価報告書をもとに簡単に紹介する。続いて、温暖化の影響検出の問題に関して既存の知見を整理し、その意義を事例を踏まえた上で検討する。

### 3.2 温暖化の検出の方法

IPCC第二次評価報告書の主要なメッセージの一つは人為的な温室効果ガスの排出による温暖化がすでに始まっていることである(環境庁, 1996)。そして気候変化の「検出」の問題は、温暖化の現象研究の一つとして、本当に温暖化が進んでいるかどうか、実際の観測データやモデルから証明しようとするものである。

#### 3.2.1 「検出」と「原因特定」の問題

検出が重要な点は、人為的影響(例えば、温室効果ガスの排出量の変化)による気候変化の「シグナル」が、自然の気候変化による「ノイズ」に重なっているため、部分的あるいは全面的に隠されてしまうかも知れないからである。自然の気候変化としては内部的な変化(大気、海洋、雪氷、陸生生態系などの相互作用)と外部的な変化(太陽活動や火山活動など)がある。

まず気候の変化が「有為」であるためには、それが自然の変化として期待されるものに比べて、特異な変化(統計的に有為な変化)であることが必要である。

さらに人為的な温室効果ガスの増加の他にも原因は考えられるので、気候変化の原因を明らかにする必要がある。変化の因果関係を解明するためには、一連の実験でいろいろな原因に対する応答を系統的に調べることが必要であるが、温暖化の場合これは不可能であるので、実際には数値モデル(大気大循環モデル)を用いる。いろいろ仮定される要因による気候変化を明らかにし、それと観測された気候変化と比べて、「有為」な気候変化が検出された場合、その原因として人為的影響を特定するために、人為的要因以外のメカニズムをすべて取り除く必要がある。

### 3.2.2 気候に与える人為的影響の確認

第二次評価報告書によると、気候に対する人為的影響を確認する試みとして第一次評価報告書(1990)に比較して進んだ点として以下の点を挙げている(IPCC, 1996)。

#### ①温室効果ガス以外の外的要因の考慮

人為起源の硫酸エアロゾルや成層圏オゾンの変化が、気候に影響する因子としてモデルに取り入れられた。人間活動による気候変化として予想される「シグナル」は、不確実性が残っているが、より適切に定義されるようになった。

#### ②自然の変動性の評価が進んだ

気候系のバックグラウンドとしての自然の変動性をよりよく決定する事項に関するもので「変化の検出」は、観測された気候変化が統計的にみて極めて異常であることを明示する手順である。自然変動として内部要因によるものと外部要因によるものがある。

#### ③因果関係の特定(原因特定)

観測された気候変化のある面を人間活動に起因するという因果関係を確立するための変化パターンに基づく方法の応用が行われた。

### 3.2.3 気候変化検出の研究タイプ(表3-1)

研究タイプは以下の4段階で進むが、現在のところ第二段階以降の研究事例は少ない。

#### ①第一段階

過去1世紀程の全球の年平均気温の変化を統計的に特異かどうかを検討する。比較の対象となる自然状態は、内部要因による自然変動を物理モデルでシミュレートしたもの、自然変動性の統計モデルから求めたものを使い、もしも全球年平均気温の変化が内部要因による自然変動だけでは考えにくい場合には有為であると判断する。しかし、この種の研究が最も多いが、変化の原因が人為的な影響だけで起こったことを示すのは一般に困難である。

表3.1 気候変化の検出方法(IPCCによる)

	対象変数	検出方法	基準・尺度
①	1変数 地上気温	ある期間(100年程度)の全球平均気温の変化が統計的にみて、特異かどうか	内部要因による自然変動の物理モデルによるシミュレーションや自然変動性の統計モデルの結果
②	1変数 気温	パターンに着目したモデルと観測結果の比較(地域毎, 大気鉛直断面, 3次元パターンの時間変化)	パターンの類似性指標
③	1変数	二次元/三次元パターンを調べる。観測から気候変化のシグナルを探す際に最適化を行う。自然変動ノイズを減少させるフィルターを用いる。	最適指紋(Optimal fingerprint)
④	多変数	複数の変数のパターン変化を調べる。気温+降水量+気温日較差など。	多変数の空間・時間分布変化が観測データと一致



## ②第二段階

気温を対象とし、モデルと比較する場合にそのパターンに着目する。気温変化のパターンは各地域、大気鉛直断面、さらに三次元的なパターンを対象とする。この種の研究は、まだ事例が少ない。

## ③第三段階

1 変数の二次元あるいは三次元パターンを調べる。観測値から気候変化のシグナルを探す際に、最適化を行う。最適化は、観測データにフィルターをかけて、モデルで予想された自然変動ノイズを小さくし、シグナルを検出しやすくする（最適指紋）。

## ④第4段階

複数の変数を同時に解析対象とする。

### 3.3 温暖化影響の検出

温暖化が進行すると、気温や降水量の地域的、時間的な変化となって現れる。自然生態系や社会システムはその変化の影響を受ける。従来の影響評価は、将来の気候変化や社会・経済の変化をシナリオとして与え、影響を受ける側(exposure unit:曝露単位)が気候因子に対する応答モデル(物理・生物モデルなど)を用いて、影響の程度を推定することである。現在はまだ温暖化の影響が出ていないことを前提としている。

しかし、温暖化が進行していることの証拠として、自然生態系に影響が現れつつあることの報告が見られるようになってきた。温暖化の影響検出の問題は、以下の点で重要性を増してきた。

#### ①影響の研究面では、

- ・影響モデルの改善：具体的に影響が現れているのであれば、モデルの予測値との比較を行うことにより、モデルを改善する。
- ・もし思わぬ(想像していなかった)影響が現れているのであれば、その影響の重要性を考慮し、影響研究の対象とする。

#### ②影響の対策面では、

- ・影響が各地域や各分野に何時現れるかについては、二倍CO<sub>2</sub>時や2050年、2100年時点の影響予測がなされているが、実際温暖化は長期的に進むので、影響の出やすい分野や出にくい分野などがある。GCMの遷移実験データを用いる時間的な影響評価が行われるようになれば、こうした近い将来の影響も予測可能であるが、現在では困難である。このため、影響の検出は、こうした影響予測では見込めない近い将来の変化を早い段階で捉え、対策に活かすことができる。
- ・また、影響が各地で観測されるに及び、温暖化が進行する場合の対策として適応策が重要となってきた。適応策の必要性を政策決定者に認識させるためには、現在の影響の健在化している事例を蓄積し、温暖化との関係を整理しておくことが重要である。

#### ③影響検出の問題点

- ・1982/83年、97/98年のエルニーニョなど異常気象による影響と長期平均的な温暖化の影響、さらに都市のヒートアイランド現象などに代表される人為的な影響などが相互関連して影響を

もたらすと考えられるので、こうした影響要因を分離する手法などの開発が必要となっている。  
・気候に比べて自然生態系や社会システムについてのデータは乏しく、また得られる期間も短いので、統計的な有為性の検定手法のみによる判定では不十分である。それらに代わる手法なり、考え方の整理が必要である。

### 3.4 温暖化の影響検出に係わる研究事例 (WWF, 1998)

温暖化が進行し、野生生物など自然生態系への影響が観察されている。影響を考える上で、温暖化の速度（生態系が適応できない）、継続性（長期間継続する）がキーになり、そして、全球の温暖化により地域・局所の気温、降水量が変化し気候の新たなパターンを生じることが自然生態系や種の変化の要因となる。気候変化と野生生物への影響検出事例としては、以下のような種類の研究報告などがある（③～④は省略）。

- ①生活サイクルの変化
- ②種の分布と数の変化
- ③渡り鳥の移動経路の変化
- ④生態学上貴重な生息地の変化

#### 3.4.1 生活サイクルの変化（生物季節の変化）

**例：英国，植物**

20種以上の植物・動物に関して27種の生物季節データ(200年)をもとに気温変化との関係を解析した結果、1℃気温が上昇すると、多くの樹木で5～7日早く葉がでることがわかった (Sparks and Carey, 1995)。

**例：英国，蝶類**

1883～1993年のデータをもとに英国の蝶類の出現日と春季の気温との関係を解析した結果、1℃上昇すると蝶が4～10日早く現れる (Sparks and Yates, 1997)。

**例：コスタリカ，鳥類**

おおはし (keel-billed toucan) は気温が上昇するにつれて、高い標高に移動する。

**例：英国：鳥類**

1971～1995年に65種の鳥類のうち63%が早く巣をつくる傾向を示した。31%の種で統計的に有為であり、この期間に9日早くなった (Crick et al., 1997)。

**例：英国，両生類**

蛙 (ヒキガエル)、イモリは17年間のデータから1℃上昇すると9-10日早く池に現れ、卵を生む (Beebee, 1995)。

**例：日本，桜，梅**

気象庁の生物季節データをもとにした桜の開花日が早くなっているなどの研究成果が得られている (気象庁報告書、増田、古野らの研究による)。

生物季節データは、比較的観測期間が長いことから、温暖化影響の検出には適切な指標と考えられるが、検出に関連した利点としては、比較的長期のデータがある。植物の開花日、紅・黄葉日、動物の出現日、初鳴日などの観察項目が多い。また、問題点としては測定方法（観測場所や対象となる樹木など）や欠測値が多い（気象庁の生物季節データ）。データ期間と検出方法やエ

ルニーニョなどの異常気象や都市化（ヒートアイランド）の影響の複合的な影響がでているので、その分離方法などの検討が必要。

生物季節データは、気候の変化を植物といったセンサーで総合的に表していると考えられる。一時気象庁の生物季節データは意味なしということで廃止論がでたが、結局継続して測定されている。今では温暖化影響の検出面からは貴重なデータとなっている。

### 3.4.2 種の分布や数の変化

温暖化が進むにつれて、種の分布域が北または高標高へ移動する例が報告されている。

#### 例：北米，蝶

*Euphydryas editha* は分布南限のメキシコから北限のカナダまで分布していたが、南限地域では、北に比べて4倍の速度で絶滅している。また2400m以上の高地の生息数に比べて、低地では2.5倍の速さで絶滅している。絶滅のパターンは今世紀に北に92km、上方に124m移動したが、米国の気温はこの一世紀に0.7℃上昇し、気候帯のシフトは北に105km、上方に105mであり、よく一致している(Parmesan, 1996; Karl et al., 1995)。

#### 例：欧州，蝶

14種の蝶の分布が北に200km移動し、3種は安定、1種は南へ移動した。北への移動は大規模な環境変化によるものであり、温暖化が原因と考えられる。人間活動による土地利用変化などの影響とは考えられない。

#### 例：米国，鳥類

黒みずなぎ鳥(*Puffinus griseus*)はかつて500万羽いて、非産卵期は米国西海岸沖ですぐす。87~94年の間に数が90%減少した。海水面温度の変化と、海流の変化(湧昇の減少)が原因で、これは気候の変化による(Veit et al., 1997)。

#### 例：南極，鳥類(ペンギン)

南極の広範囲の厳冬の海水が1940年代以降少なくなっており、それに伴ってペンギン(Adelie Penguin)の出生数が減少している。これは海水が減少すると、餌が少なくなったり、餌場が遠くなるためである(Fraser et al., 1992)。

#### 例：アルプス，植生

アルプスの植生の変化は穏やかな温暖化でも、植物群落の移動の原因となる。気温が上昇するにつれ、アルプスの植生は比較的冷涼な高標高へ移動した。しかし、移動は気温変化に比べてゆっくり生じるため、温暖化のスピードが速いと生息域が縮小するなどの影響がある(Grabherr et al., 1994)。

#### 例：北米，草原に生息する鳥類

米国に草原に生息する鳥類は、温暖化によって北にシフトするが、以前は森林に占有されていた地域に入ってしまう。鳥類が依存する草原植生や昆虫群は同じ速度で北にシフトできないので、草原の鳥類は、その生息範囲と数とがミスマッチのために保持することはできない(Price らによる)。

#### 例：北米，アヒル

Prairie Pothole 地域では、浅い湿地が高密度にあり、北米の養殖用のアヒル(breeding Duc

k) の50~80%を生産している。42年間の調査データより、地域の春季の湿地とアヒルとは相関が高く、渇水の頻度と規模の増加は池の数を減らし、2060年までには、アヒルの数は60%減少する(Sorenson et al. による)。

以上の他に日本でも、大阪湾や鳥取県で暖水系の魚種が捕獲されたり、南方系のクモが北上していること、地下水の水温が上昇していること、さんご礁の白化現象が確認されているなどの報告などが見られる。こうした温暖化の影響が顕在化していると思われる事例を定期的、系統的に収集し、評価することが重要になってきたと言えよう。

#### 参考文献

- 1) Beebee, T.J.C., 1995: Amphibian breeding and climate, *Nature*, 374, 219-220.
- 2) Crick, H.Q.P., C. Dudley, D.E. Glue, and D.L. Thomson, UK birds are laying eggs earlier, *Nature*, 388, 526.
- 3) UK Met. Office, 1998: Climate change and its impacts, Material distributed at COP4.
- 4) Grabherr, G., M. Gottfried, and H. Pauli, 1994: Climate effects on mountain plants, *Nature*, 369, 448.
- 5) Huntley, B., P.M. Berry, W. Cramer and A.P. McDonald, 1995: Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces, *Journal of Biogeography*, 22, 967-1001.
- 6) IPCC, 1995: 第8章 Santer, B.D., T.M.L. Wigley, T.P. Barnett, and E. Anyamba 気象庁訳.
- 7) 環境庁, 1996: IPCC 地球温暖化第二次レポート, 中央法規.
- 8) 国立環境研究所, 1998: 地球環境研究の展望~地球温暖化の影響~.
- 9) Karl, T.R., R.W. Knight, D.R. Eastering, and R.G. Quayle, 1996: Indices of climate change for the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(2), 279-292.
- 10) 西岡秀三・原沢英夫編, 1997: 地球温暖化と日本~自然・人への影響予測~, 古今書院, 244pp.
- 11) Sparks, T.H. and P.D. Carey, 1995: The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*, 83, 321-329.
- 12) Sparks, T.H. and T.J. Yates, 1997: The effect of spring temperature on the appearance dates of British butterflies 1883-1993, *Ecography*, 20, 368-374.
- 13) Parmesan, C., 1996: Climate and species' range, *Nature*, 382, 765-766.
- 14) Veit, R.R., J.A. McGowan, D.G. Ainley, T.R. Wahls, and P. Pyle, 1997: Apex marine predator declines ninety percent in association with changing oceanic climate, *Global Change Biology*, 3, 23-28.
- 15) WMO, 1998: Statement at the 14th of IPCC by G.O.P. Obasi, Vienna, 1 Oct 1988.
- 16) WWF, 1998: Climate change and wildlife, A summary of an international workshop at NCAR.

## 第4章 温暖化影響の検出の事例研究

### 4.1 生物季節による温暖化影響の検出

生物季節データは、気象庁が1963年以降代表的な植物と動物について観測している。気象の変化によって、植物の発芽、開花、紅(黄)葉、落葉などの時期、動物の発生、出現などの時期が変化する。生物季節は気象の年変化に伴って消長する生物現象について調べることによって気象の変化と生物活動の関係を分析する。気象庁が提供している生物季節の項目は、植物16種、動物11種の計27種で、観測地点は日本全国で102地点である(図4.1, 表4.1)。

観測データは、生物活動が観察された年月日で表されているので、データ期間である1963～1996年の44年間について、欠測値のない地点を取り上げて解析を行った。解析の手順は以下のとおりである。

- (1) 各項目、各地点毎に生物現象発現日(例えば、桜の開花日)の経年変化プロット
- (2) 44年間のデータがそろっている地点については、傾向変動の回帰曲線による近似と、マン検定法による傾向変動の強さの統計的検定
- (3) 傾向変動の回帰直線をもとに、生物季節現象の早期化、遅延化の計算結果を10年当たりの日数で表示(地理情報および表化)

表4.1 植物季節・動物季節データ項目

植物季節観測項目	動物季節観測項目
1: ウメの開花日	17: ヒバリの初鳴日
2: ツバキの開花日	18: ウグイスの初鳴日
3: タンポポの開花日	19: ツバメの初見日
4: サクラの開花日	20: モンシロチョウの初見日
5: サクラの満開日	21: キアゲハの初見日
6: ヤマツツジの開花日	22: トノサマガエルの初見日
7: ノダフジの開花日	23: シオカラトンボの初見日
8: ヤマハギの開花日	24: ホタルの初見日
9: アジサイの開花日	25: アブラゼミの初鳴日
10: サルスベリの開花日	26: ヒグラシの初鳴日
11: ススキの開花日	27: モズの初鳴日
12: イチョウの発芽日	
13: イチョウの黄葉日	
14: イチョウの落葉日	
15: カエデの紅葉日	
16: カエデの落葉日	

期間は、1953～1996年の44年間である。



図 4.1 生物季節観測地点

#### 4.1.1 マン検定

長期の気象データのトレンド分析に利用されるマン検定の方法は以下のとおりである (WMO, 1988)。

時系列を  $X_1, X_2, \dots, X_n$  とする。帰無仮説を  $H_0$ : 観測値はランダムに並んでいる vs. 観測値は時間的に一定の傾向がある、とする。  $R_1, R_2, \dots, R_n$  を時系列の順位とし、符号の関数  $\text{sgn}(x)$  を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x) &= 1 & x > 0 \\ \text{sgn}(x) &= 0 & x = 0 \\ \text{sgn}(x) &= -1 & x < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$H_0$  のもとで、

$$S = \sum_{i < j} \text{sgn}(R_j - R_i) \quad (2)$$

は平均 0、分散  $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$  で漸近的に正規分布する。検定の変量は、

$$u(n) = S / [\text{Var}(s)]^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $u(n)$ はすべての  $i(i=1,2,\dots,n)$ について計算でき、 $u(i)$ と  $i$ のグラフは、変化点をグラフで検出することが可能となる。

#### 4.1.2 適用事例

図 4.2 は桜の開花日の経年的な変化を例示したものである。横軸に年を縦軸に開花日の1月1日からの累積日数をとっている。傾向をみるために回帰直線をもとめたところ、 $y=-0.20??$ となり、全体の傾向から、開花が早くなっていること、そしてマン検定の結果は統計的に有意であることがわかる。

図 4.3 は、梅、桜の開花日及び満開日について各地点の結果を示したものである。○は開花が早くなっていることを、△は開花が遅くなっていることを示している (10年あたりの日数で表示)。図 4.3 から、例えば桜の開花はこの44年間に、早くなっている地域が多いこと、しかしその値は、10年間で最大でも1日未満であることがわかった。また取り上げた地点の開花日のマン検定の結果から統計的にも有意であることが示されている。

表 4.2 に日本の各地点毎に表としてまとめたものを示した。

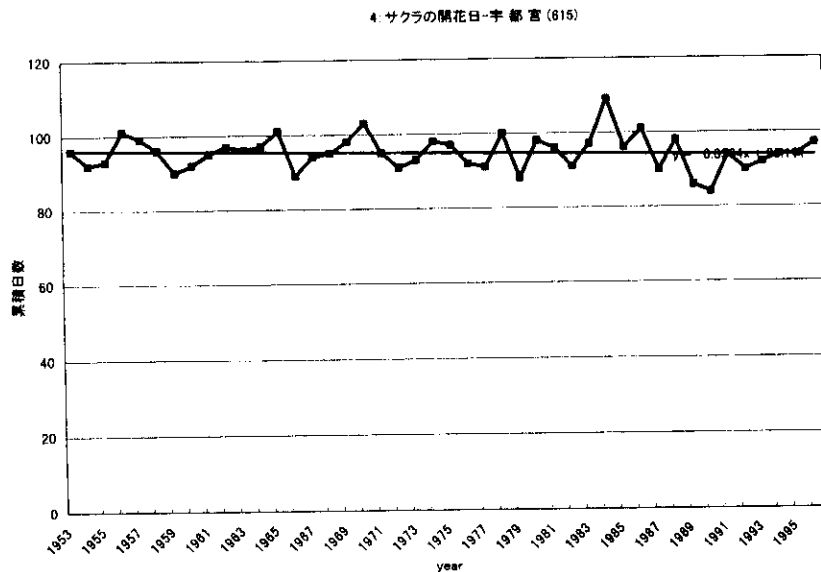


図 4.2 生物季節の変化の例 (桜の開花日、宇都宮の例)

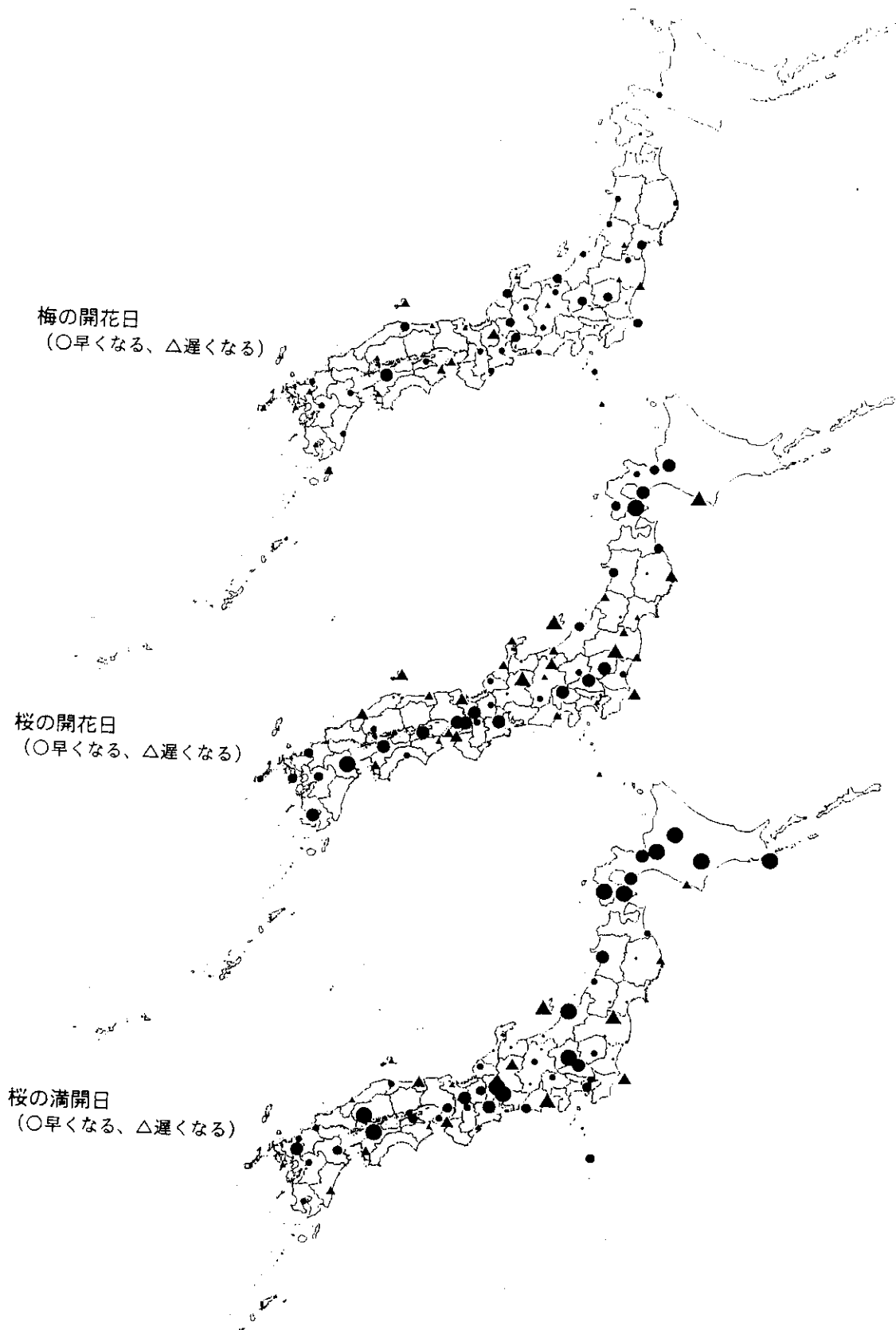


図 4.3 梅、桜の開花日、桜の満開日の経年的傾向 (○は早くなっていることを、△は遅くなっていることを示している)



以上は、梅、桜の開花日と満開日についてであるが、その他の植物季節や動物季節の解析から、植物季節については、温暖化の傾向を示す項目が多いが、逆の傾向を示す地点もあること、また植物季節項目すべてが温暖化傾向を示す地点は少なく、ある項目では、早く、ある項目では遅くなるなど、同一地点でも項目間で変化に差があること、桜、梅などの樹木は他の植物に比べて経年的な変化の程度は小さいことが、特徴として挙げられる。また、動物季節についてもほぼ同様な傾向が見られるが、植物季節に比べて欠測値が多いために、一つの項目だけで日本全体の傾向を知ることは困難なことがわかった。

表 4.2 梅、桜の開花日、桜の満開日の経年的傾向

(数字は10年あたりの日数、+は遅く、-は早くなることを示す。---はデータ欠測定値あり)

収録地点一覽表	梅開花日	桜開花日	桜満開日	収録地点一覽表	梅開花日	桜開花日	桜満開日
1 稚内(401)	---	---	---	51 静岡(656)	---	0.36	0.76
2 留萌(406)	---	---	---	52 東京(662)	---	-0.03	-0.12
3 旭川(407)	---	-1.13	-1.62	53 尾鷲(663)	-1.90	0.04	0.07
4 網走(409)	---	---	---	54 横浜(670)	---	0.14	-0.27
5 札幌(412)	-0.53	-0.47	-0.61	55 館山(672)	---	---	---
6 岩見沢(413)	---	-0.61	-1.18	56 大島(675)	---	---	---
7 帯広(417)	---	-0.78	-1.04	57 三宅島(677)	-1.90	---	---
8 釧路(418)	---	---	-0.76	58 八丈島(678)	1.67	0.19	-0.29
9 根室(420)	---	---	---	59 西郷(740)	3.31	0.58	0.25
10 室蘭(423)	---	-0.66	-0.62	60 松江(741)	---	0.02	---
11 蒲河(426)	---	0.76	0.42	61 米子(744)	-2.75	-0.01	-0.13
12 江差(428)	---	-0.34	-1.27	62 鳥取(746)	1.19	0.03	0.40
13 函館(430)	-0.31	-0.87	-1.11	63 豊岡(747)	---	0.46	0.57
14 倶知安(433)	---	-0.20	---	64 舞鶴(750)	1.58	0.73	0.19
15 紋別(435)	---	---	---	65 浜田(755)	---	0.72	0.21
16 広尾(440)	---	---	---	66 京都(759)	---	-0.66	-0.57
17 新庄(520)	---	---	---	67 彦根(761)	6.83	-0.15	-0.40
18 青森(575)	---	---	---	68 下関(762)	---	-0.04	-0.21
19 八戸(581)	---	-0.29	-0.19	69 広島(765)	2.13	-0.12	-0.89
20 秋田(582)	-1.21	-0.33	-0.65	70 岡山(768)	0.34	0.02	-0.06
21 盛岡(584)	---	0.01	-0.04	71 神戸(770)	0.26	-0.69	-0.28
22 盛岡(585)	-1.08	0.56	0.50	72 大阪(772)	---	-0.69	---
23 酒田(587)	-1.55	0.26	-0.19	73 洲本(776)	4.19	0.43	-0.12
24 山形(588)	1.84	0.04	-0.38	74 和歌山(777)	---	0.59	0.67
25 仙台(590)	-3.55	0.12	0.13	75 湖浜(778)	---	---	---
26 福島(595)	-0.86	0.32	0.61	76 奈良(780)	-1.77	-0.13	-0.23
27 白河(597)	1.32	0.88	0.11	77 岐阜(800)	-0.51	-0.28	-0.17
28 小名浜(598)	3.09	0.33	0.17	78 福岡(807)	1.53	-1.08	-0.65
29 輪島(600)	0.11	0.48	0.29	79 佐賀(813)	-1.68	-0.20	-0.20
30 相川(602)	---	0.96	1.05	80 大分(815)	---	-0.95	-0.39
31 新潟(604)	-1.93	-0.45	-0.74	81 長崎(817)	0.68	-0.25	0.10
32 金沢(605)	-3.00	0.46	0.40	82 熊本(819)	-0.59	-0.35	-0.18
33 富山(607)	---	-0.01	0.00	83 延岡(822)	---	---	---
34 長野(610)	-0.93	0.62	-0.11	84 鹿児島(827)	1.89	-0.61	-0.23
35 高田(612)	-4.02	0.42	0.15	85 宮崎(830)	-0.55	---	0.33
36 宇都宮(615)	-3.35	-0.53	-0.11	86 鹿児島(836)	---	---	---
37 橋本(616)	---	-0.07	-0.11	87 種子島(837)	2.82	---	---
38 高山(617)	-0.67	0.83	0.60	88 福江(843)	0.84	-0.14	0.04
39 松本(618)	0.87	0.22	-0.05	89 松山(887)	-6.92	-0.54	-0.77
40 前橋(624)	-2.92	-0.10	-0.76	90 高松(891)	-2.19	-0.72	-0.33
41 熊谷(626)	-0.01	-0.71	-0.51	91 宇和島(892)	1.96	0.33	0.38
42 水戸(629)	-0.18	-0.17	-0.02	92 高知(893)	---	-0.19	---
43 敦賀(631)	-3.01	0.04	-0.11	93 徳島(895)	4.04	0.22	0.23
44 岐阜(632)	---	-1.16	-0.86	94 名瀬(909)	---	---	---
45 名古屋(636)	-2.50	-1.10	-0.81	95 与那国島(91)	---	---	---
46 飯田(637)	-1.13	-0.16	0.04	96 西表島(917)	---	---	---
47 甲府(638)	---	-0.57	-0.08	97 石垣島(918)	---	---	---
48 桃子(648)	-3.43	0.53	0.73	98 宮古島(927)	---	---	---
49 津(651)	-1.31	-0.60	-0.72	99 久米島(929)	---	---	---
50 浜松(654)	-2.16	-1.06	-0.27	100 那覇(936)	---	---	---
				101 名護(940)	---	---	---
				102 南大東島(945)	---	---	---

## 4.2 湖沼水質に及ぼす気象の影響の検討

### 4.2.1 温暖化の水質に与える影響

温暖化の水質への影響について従来研究成果をもとに、概略整理すると表 4.3 のようになる。

とくに河川についてみると、水質悪化は、①降水量が減少し、または蒸発散量が増加して、降水量を越える場合や、②降水量が増加しても、雨期が前後にズレルため、多くの地域で低水状況となる晩夏に乾燥して発生することが考えられる。温暖化は、こうした低水流量や洪水流量の変化によって水質に影響を及ぼすとともに、気温が上昇し、その結果水温が上昇することによって溶存酸素量（DO）の低下や一部の水域では、富栄養化を促進することが考えられる。

表 4.3 温暖化の水質への影響の概要

水域	影響の概要
河川	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 低水流量の低下：水質の悪化や水系生態系の消失</li><li>・ 気温上昇：溶存酸素量の低下による影響</li><li>・ 洪水流量の増加：河床の浸食、沈殿物・濁度の増加</li></ul>
湖沼	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 温度成層の長期化による水質悪化</li><li>・ 水温上昇による富栄養化の進行</li></ul>
感潮域	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 海面上昇による塩水進入（河口域）</li><li>・ 淡水・海水との境界部分の水質や生態系への影響</li></ul>
沿岸域	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 沿岸地域の地下水の塩水化</li><li>・ 沿岸域の処理施設（廃棄物、下水）への影響（海面上昇）</li></ul>

また、湖沼については、例えば琵琶湖における温暖化の影響予測では、平均温度が 1.5℃ 上昇した場合、降水量の増加が 20% であれば、琵琶湖流域の平均積雪量は多くて 10 億 m<sup>3</sup> になると推定される(Fushimi, 1991)。平均気温が 3.5℃ 上昇したとすると、降水量が 20, 40% 増加したとしても、平均積雪量は、それぞれ 0.6, 0.7 億 m<sup>3</sup> に減少すると予測されている。積雪量が 10 億 m<sup>3</sup> 以下になると、琵琶湖の深層の最低 DO は急激に減少し、0.6 億 m<sup>3</sup> では、10% 程度減少すると予測されている。また、水温の上昇により富栄養化などが促進され、水質悪化が助長されると考えられる。エリー湖などでも同様な解析が行われており、また結氷する湖沼については、結氷の下での生物活動が変化する、例えば冷水性の魚類の生息環境が変化的ることなどが指摘されている。

### 4.3 温暖化の湖沼水質に与える影響（霞ヶ浦の事例）

#### 4.3.1 影響評価の手法

湖沼水質に及ぼす温暖化や気象の影響を評価、予測する方法としては、(1) 異常年における現象を解析、(2) 数値シミュレーションモデル、(3) 気象と水質の統計解析、などによりなされてきた。(1) については、冷夏(1993年)、渇水時(1994年)や猛暑時(1994,1995年)を対象とした解析がなされている。(2)のモデルによる解析については、水温、溶存酸素などの水質項目についてのモデルによって降水量、流量、気温・水温などの気象や水象条件を変化させた場合の影響予測や感度解析などが行われてきた。(3)としては、霞ヶ浦を対象に、水質の日間変動、月間変動、季節変動と気象変動との関係を統計的に解析した事例がある(福島, 1984)。しかしながら、気象変化に伴う湖沼水質の定量的な変化予測の解析手法の開発やその適用についてはほとんど行われてこなかった。

こうした気象と水質との関連については、流域の人間活動や環境変化の影響を複合して受けていることから、解析にも工夫が必要であった。そこで、霞ヶ浦について観測された17年間の長期間にわたる水質測定データ及び気象データを用いて、流域変化を考慮して気象と水質との関連を調べる方法を検討した。

すなわち、流入河川水質を介在させ、気象の湖沼水質への直接影響、流入河川を介して、気象の湖沼水質への間接影響に分けて推測する方法と、隣接年で気象差と水質差を比較する方法を考案して、長期気象・水質データに適用して、将来の温暖化の水質への影響を定量的な評価を試みたものである。

ここでは、年平均値の変化による隣接年による解析法とその適用結果を示す。

#### 4.3.2 対象地域と用いたデータ

対象とした湖は霞ヶ浦である。霞ヶ浦については国立環境研究所で継続的に水質や水生生物のモニタリングを実施している。図4.4は霞ヶ浦の概要と水質測定地点、流入河川の水質測定点、気象観測地点の位置を示している。霞ヶ浦は表面積171km<sup>2</sup>、平均水深4m(最大水深7m)の浅い富栄養化した湖である。水質測定点は10地点であるが、そのうちの3地点、地点1,3,9(湖心)のデータを解析に用いた。対象とした水質項目及び測定期間は表-1に示したとおりである。解析の対象とした水質データの期間は、1979年4月～1996年3月の17年間である。

表 4.4 対象とした水質項目の概要

水質項目	測定期間	年間変動(%)	経年傾向
水温	1979.4-1996.3	0.6	増加
COD	1979.4-1996.3	21.5	減少
SS	1979.4-1996.3	17.9	減少
透明度	1979.4-1996.3	20.6	増加
T-N	1983.4-1996.3	14.8	増加
DTN	1983.4-1996.3	17.8	増加
NO3-N	1979.4-1996.3	19.9	減少

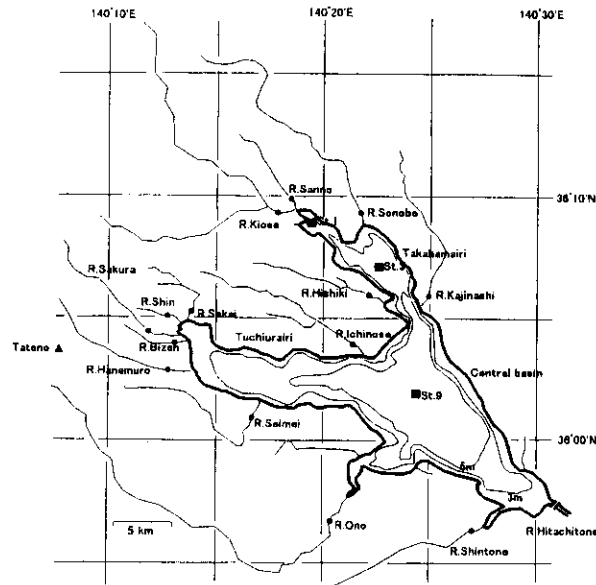


図 4.4 研究対象として霞ヶ浦

#### 4.3.3 隣接年による水質比較方法

流域の変化は隣接年ではほぼ無視できると考えて、長期データから隣接年を対象にデータを抽出して、気象の差と湖内の水質差について相関解析を行い、水質への影響を定量的に予測する手法である。

図 4.5(1) は、気温の COD に及ぼす影響、(2) は降水量の TN 濃度に及ぼす影響を調べた結果である。(1) では、異常な年の降水年、(2) では、異常な気温の年を除いている。前者では、降水量が平年並み、かつ変化が少ない 2 年間を選び、後者では気温が平年並み、かつ変化が少ない 2 年間を選んだことになる。全期間で、前者は 5 ケース、後者は 7 ケース (TN の場合は 5 ケース) である。

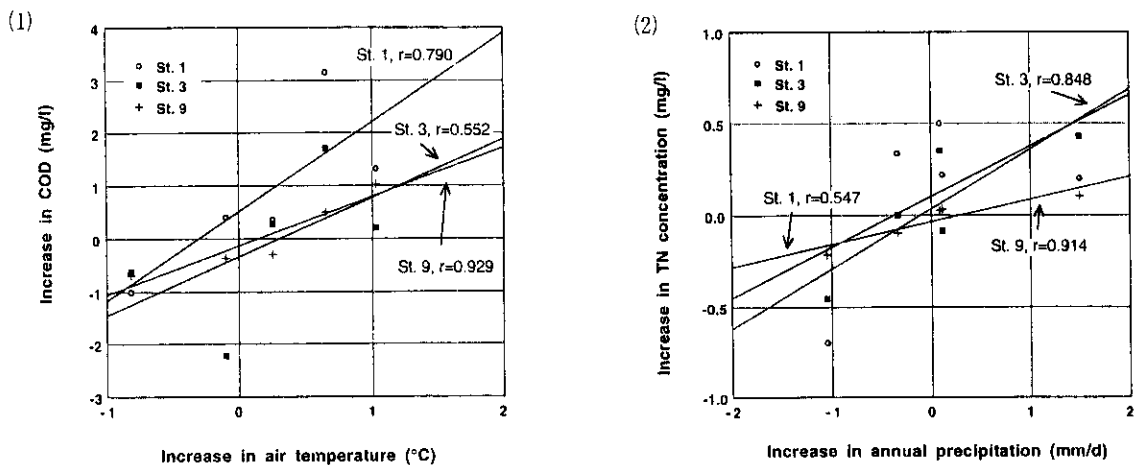


図 4.5 気温の COD に及ぼす影響(1)、降水量の TN 濃度に及ぼす影響(2)

削除前と削除後の回帰式の係数値の変化と相関係数の変化を示すと以下のとおりである。

気温差と COD 差 (削除前/削除後)

	回帰式の傾き	相関係数
地点 1	1.48/ 1.70	0.556/ 0.508
地点 3	0.49/ 1.12	0.241/ 0.552
地点 9	0.98/ 0.92	0.408/ 0.929

降水量差と TN 差 (削除前/削除後)

	回帰式の傾き	相関係数
地点 1	0.33/ 0.28	0.702/ 0.548
地点 3	0.27/ 0.33	0.816/ 0.848
地点 9	0.14/ 0.12	0.885/ 0.914

相関係数が低い場合は、傾きが小さくなるが、それ以外では削除前後の差はあまり大きくない。

表 4.5 は、降水量と気温が変化した場合の水質項目 (多くの地点で統計的に有為なもの) の定量変化の予測結果である。水温については、降水量の影響があまりないと考えられるので、全 17 年間、隣接年の 16 の組み合わせに対する相関解析の結果を示している。

降水量の影響の場合、TN, DTN, NO<sub>3</sub>-N で大差がない。また、気温が 1℃上昇の場合、水温は 0.75-0.96℃上昇すること、COD,SS 等の変化は流入河川河口近傍の方が、電気伝導度では、湖心の方が大きいことなどが大きいことがわかる。メンドータ湖についての解析では、統計モデルによって気温 1℃の増加に対して、約 1℃水温上昇する結果が得られているが、今回も同様な結果となっている。水深が浅いことがこうした結果となっていると考えられる。平均水深は霞ヶ浦 4.0m、メンドータ湖 12.4m である。

また COD,SS では栄養塩濃度など他の条件が一次生産に有利な河口近傍で大きな影響がでたものと考えられる。

以上から、流域変化の影響を簡単に除去するために、隣接年の気象差と水質差を統計的に解析する方法を提案し、気温と降水量変化が、水温、窒素、COD といった水質に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、地球温暖化等により、湖沼周辺の気温が上昇した場合、一次生産などの水質悪化が懸念される。また、長期にわたる水質・気象データがある場合には、こうした隣接年による方法が気象と水質との相関関連を求め、現在進行しつつある地球温暖化の影響を定量的に評価する手法としてすぐれたものであることが分かった。

表 4.5 降水量と気温が変化した場合の水質項目 (多くの地点で統計的に有為なもの)の定量変化の予測結果

(1) Precipitation; 100 mm/y increase					
	n	St. 1	St. 3	St. 9	
TN	7	0.076	0.090**	0.034**	mg/l
DTN	7	0.068	0.115**	0.044*	mg/l
NO <sub>3</sub> -N	7	0.082	0.099***	0.033*	mg/l
(2) Air temperature; 1 degree up					
	n	St. 1	St. 3	St. 9	
W. Temp; s	16	0.954***	0.874***	0.838***	degree
W. Temp; b	16	0.946***	0.875***	0.756***	degree
COD	5	1.70*	1.12	0.92**	mg/l
SS	5	11.9**	6.9*	3.9	mg/l
Transparency	5	-22.3**	-30.0**	-28.9**	cm

\*; p<0.1, \*\*; p<0.05, \*\*\*; p<0.01

#### 4.4 温暖化の影響検出とモニタリング

・生物季節による温暖化影響の検出の可能性について

生物季節現象は、生物が気候の変化(気温、降水量などの気象要因の総合的な影響を表している)を身をもって示していることから、温暖化の検出に適した指標であることが分かったが、全国一律に温暖化の傾向にはなく、地域によって傾向が異なること、また動物季節についても同様な傾向が見られるが、植物季節の項目に比べて欠測値が多いために、温暖化などの傾向判定には不十分な地点が多かった。生物季節を温暖化影響の検出指標として用いるためには、今後とも観測を継続し、データの蓄積をはかること、また観測方法など欠測がないような方法をとること、欠測値がある場合の評価方法を検討することなどが今後の課題として挙げられる。

・水質による温暖化影響の検出の可能性について

気温変化は湖沼の水温変化となって現れることから、温暖化は水質悪化をもたらすと予想される。このため、従来の水質モニタリングを今後とも継続して実施し、傾年的な変化を気象変化と併せて考慮することにより、温暖化検出のための方法として用いる可能性がある。

・影響検出の指標

温暖化の影響検出は今後ますます重要視されると考えられる。影響の検出のための種々の指標をとりあげてまとめたのが、表 4.6 である。温暖化の直接影響がある気象要素、海洋要素、さらに気象要素や海洋要素の(間接的)影響を受ける自然生態系、そして高次影響を受ける社会システムに分けている。高次影響を受けるほど、その影響の検出は種々のノイズ(人間活動など)を受けけるために、一般に困難となる。

今後は、温暖化の検出をいち早く行うための指標についての可能性を検討するとともに、モニタリングシステムの構築すること、検出された結果を即時に社会に還元するとともに、適応策の検討など対策に結び付けることも必要となろう。

表 4.5 温暖化影響の検出のための指標

影響	分野	指標(変数)と現象	報告事例	
一次 影響          ↓ ↓	雪氷圏	<ul style="list-style-type: none"> <li>・南極氷の融解, 崩壊</li> <li>・氷河の後退</li> <li>・流水の変化 (増減, 時期)</li> </ul>	ラルセン 棚氷崩壊 (1995, 98) アルプス	
	気象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・降雪・積雪の変化 (量, 雪解け時期)</li> <li>・霜・霜柱</li> <li>・暖冬, 冷夏, 年平均・冬季気温</li> <li>・台風発生数</li> <li>・季節風の強弱</li> </ul>	富士山の雪解け (5月29日)	
	海象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海流, 日本沿岸の平均海面</li> <li>・波浪の高さ・入射方向</li> </ul>		
	自然生態系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高山植物の変化 (種構成, 開花時期など)</li> <li>・生物季節</li> </ul>	富士山の高山植物? アルプス植生	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>植物 (開花日, 紅・黄葉日)</li> <li>動物 (初見日, 初鳴日)</li> </ul>	桜開花の早期化	
	高次 影響	水象	<ul style="list-style-type: none"> <li>・南方性動物の北上</li> <li>・珊瑚礁の白化現象 (人為圧?)</li> <li>・野生動物の生活, 生息域変化</li> <li>・渡り鳥のルート変化</li> <li>・多様性変化, 保護地域の変化</li> <li>・地下水温度</li> </ul>	蝶, クモの北上 鳥類, 両生類, 昆虫
			<ul style="list-style-type: none"> <li>・湖の結氷</li> <li>・河川・湖沼水質</li> <li>・冷水性魚種の変化</li> </ul>	地下水温度の上昇 北海道の湖
			<ul style="list-style-type: none"> <li>・農産物収量 (病虫害, 雑草)</li> <li>・畜産, 野菜栽培への影響</li> <li>・漁獲の変化 (魚種, 漁獲量)</li> </ul>	94年乳牛への影響 (北海道) 大阪湾の魚類変化 イワシの漁獲量減少 (鳥取)
			<ul style="list-style-type: none"> <li>・季節商品の変化</li> <li>・エネルギー利用量の変化</li> <li>・スキー場, 水浴場の利用者変化</li> </ul>	
	健康	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱中症の発生頻度</li> <li>・食中毒, 伝染病の変化</li> </ul>	94, 95年救急車の搬送増加	

参考文献

- 1) 福島武彦, 1988 :東京大学、博士論文.
- 2) Fushimi, H. and M. Kumagai, 1991: Decrease of snow cover amounts induced by climate warming and its influence upon dissolved oxygen concentration of Lake Biwa, Japan. International Conf. on Climate Impacts on the Environment and Society(CIES), University of Tsukuba, Japan, Jan.27-Feb.1.
- 3) WMO, 1988: Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability, WCAP-3, WMO/TD-No.224.



## 第5章 温暖化影響研究の展望

本研究課題において、温暖化の検出もふくめて影響予測評価に関わる研究の将来展望作業を影響分野の研究者の協力を得て実施した。以下はその概略である。

### 5.1 温暖化の影響研究の特徴

#### ・温暖化の影響研究は、温暖化研究の柱の一つ

影響研究は、現象と対策を結ぶ温暖化研究の柱の一つである。1997年12月に開催された温暖化防止京都会議(COP3)を契機に、一挙に防止対策の本格的実施にむけて流れが変わりつつあり、研究面でもいきおい対策研究に重点が移りつつあるが、温暖化の影響研究が一段落した訳ではなく、今後とも影響研究の重要性は増すことはあれ、減じることはない。

#### ・温暖化防止対策に資する知見を要求される温暖化研究

ただし、温暖化の影響研究も対策面への貢献も期待されていることから、従来の影響評価の方法論やその応用などの研究を進展させるとともに、世界的にも注目度が増しつつある適応策やより詳細な対応策を立案・実施するための地域影響の研究など、影響研究としてカバーすべき分野は拡大しつつある。

#### ・これまでの影響研究の蓄積を生かした新たな研究の進展

影響研究の研究課題は幅広いが、この10年間にわが国においても大学、国立研究機関を中心に影響研究が大いに進んだ。世界的にもIPCCによる影響研究のレビューが行われ、将来生じるであろう深刻な温暖化影響に対する認識は、気候変動枠組み条約の締結、そしてCOP3で先進国の法的拘束力をもつ温室効果ガスの削減目標設定への結びついた。今後は影響研究はその蓄積を生かしつつ、研究の深化や総合化を図るとともに、温暖化政策に役立つ、政策指向研究へ展開などさらなる研究の展開が期待されている。

### 5.2 国際的な影響研究の動向

影響研究の国際的動向については、2001年1月に予定されているIPCC第3次評価報告書づくり、米国などが進めている途上国を対象とした温暖化の影響・対策評価(カントリースタディと呼ばれている)、さらにアジア・パシフィック・ネットワーク(APN)などの活動を見極めておく必要がある。

#### 5.2.1 IPCC

IPCC(Integrated Panel on Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)の影響研究についての成果はいくつかの報告書やワークショップの形でまとめられてきた。

##### (1) IPCCの温暖化影響評価のガイドライン

IPCCは影響や適応評価の手順や方法について日本・英国の研究者が中心となってガイドラインを作成しており、それまで研究者毎に異なる方法を用いて影響研究を行ってきたが、統一的な手順などが示された(Carter, T. et al., 1996, Parry M. and T. Carter, 1998)。

##### (2) IPCC第2次評価報告書(1995)

1995年末に公表されたIPCCの第2次評価報告書のうち第2作業部会報告は影響・対策双方を扱ったものであった。報告書は900頁におよぶ膨大なもので、影響については、分野別に最新の知見がまとめられている(IPCC, 1996)。ここでレビューされた影響研究の大半は、大気中のCO<sub>2</sub>濃度が産業革命前(或いは、研究によっては現在の濃度)の2倍になった時を仮定して大気大

循環モデル(GCM)で予測した気温・降水量を前提として(気候シナリオ)利用した研究である。一般にGCM研究は、その前提条件として、1)平衡実験(大気中のCO<sub>2</sub>濃度を2倍にして、その平衡状態の気温・降水量を得る)、2)過渡実験(大気中のCO<sub>2</sub>濃度を徐々に増加させる。一般に1%づつ)に分かれる。さらに後者は、冷却効果をもつSO<sub>2</sub>を考慮しないか(2-1)、考慮するか(2-2)に分かれる。

第2次評価報告書で対象となった影響研究の大半が、1)から得られた気候シナリオを用いており、2-1による結果を用いた研究は一部にとどまっている。また、2-2については、2研究機関のGCMの研究成果が取り上げられているのみで、影響研究に使われた事例はほとんどない。すなわち大気大循環モデル(GCM)研究との時間的遅れがあるのが実際である。また、GCMの空間分解能(空間的な計算単位)が数百kmであることから、日本のように国土の狭い国についての影響研究は一般に難しく、第2次評価報告書作成までの研究は、世界レベルや大陸レベルが研究対象となっている。

### (3) 地域影響のIPCC特別報告書

1995年以降、IPCCは各種の技術報告書や特別報告書を取りまとめ公表してきた。特別報告書の一つが「気候変動の地域影響に関する特別報告書」(IPCC, 1998)である。この報告書は、気候変動枠組み条約の補助機関(SBSTA)からの要請で作成されたものであり、約1年をかけてとりまとめられ、温暖化防止京都会議(COP3)にIPCCの温暖化影響に関する最新の知見として提出された。

この特別報告書は、第2次評価報告書の影響に関する知見を世界を10地域に分け、各地域毎に再整理するとともに、各地域の影響研究者により地域影響の最新の研究成果を盛り込んだものである。とりまとめにあたっては、地域の脆弱性の視点から影響研究をレビューすること、各地域共通の重要分野についてまとめること、統合評価の事例や不確実性についても記述すること、などが編集方針とされたが、不確実性の記述については時期早尚ということで見送られた。取り上げられた分野は、自然生態系、水資源・水供給、農業・繊維作物生産、人間居住、人間健康、沿岸システムである。各地域毎に1章が割り当てられ、各地域の特徴を出しながら、分野毎の相互比較ができるよう、統一的な目次としている。

### (4) 国際的な影響研究・レビューに対する日本の貢献度

IPCCの第2次評価報告書(1996)、地域影響の特別報告書(1998)では、日本人研究者の論文が多く引用されているが、日本の学問水準から見ればまだ極めて不十分である。その理由は、いくつか挙げられるが、イ)日本人研究者が成果を国際的な学協会誌に発表している数が少ない。ロ)国際的な議論や関心を意識して成果を整理していない。ハ)原稿の段階で日本人もレフリーにまわるが、そのときに日本の研究者が国際的な習慣や基準で対応していないか、対応できにくい状況にあるなどの問題点があり、この点を改善する必要があることが指摘されている(国立環境研究所, 1998)。

この点について、IPCCの報告書に引用された文献中の日本のシェアを示すIPCC引用指数を使って示すと、1990年報告の第1作業部会報告では、0.7%(全引用文献約1,200のうち8編、以下8/1,200)、第2作業部会報告では、1.8%(18/1,027)であった。1995年報告書では、第1作業部会1.09%(24/2,220)、第2作業部会2.2%(126/5,666)、第3作業部会1.3%(22/1,731)であった。日本の世界におけるシェアは、人口で約2%、陸域面積で0.25%、GDPで約15%である(西岡, 199

6). 人口比ではトントンであるが、経済規模に比べるとまだ貢献度が少ないことが特徴である。

IPCC といった国際的な研究レビュー作業にあまり日本人研究者の論文が取り上げられない日本なりの理由がある。その一つに優秀な論文でも日本語で書かれている場合、その論文を IPCC の執筆者が取り上げなければ、レビューの対象にならないことがある。この点は 2001 年を目指した第 3 次評価報告書では若干変更され、日本語、中国語などの論文も限定的であるが（例えば産業界における出版物）対象とすることができることになったが、問題はそうした英語以外の論文を誰かが取り上げなければ、従来と変わらないことになる。

#### (5) 2001 年 1 月を目指す IPCC 第 3 次評価報告書

1997 年 9 月にモルジブで開催された IPCC の第 13 回全体会で、2001 年を目処に第 3 次評価報告書の作成体制が決定した。1998 年 3 月にジュネーブで開催された IPCC ビューロー会合による報告書作成の中心的な執筆者が決定され、6 月末には報告書の内容や目次案を決定するスコーピング会合がドイツで開催された。第 2 作業部会報告書では、影響・適応を対象範囲とすること、方法論・分野別/地域別影響・統合評価をキーワードとして取りまとめる方針が示された。また目次案がスコーピング会合及び 1998 年 10 月にウイーンで開催された第 14 回全体会で承認された。従来からの分野毎、地域毎の影響研究とともに、影響評価の方法論や気候シナリオ、温暖化の検出（指標）、適応策やその経済評価などチャレンジングな内容が盛り込まれたことが特徴である。

#### (6) 適応に関する IPCC ワークショップ

1998 年 3 月 29 日～4 月 1 日にコスタリカで適応に関する IPCC ワークショップが開催された。適応は、温暖化しつつある気候に対して、自然に（自発的）に、あるいは意図的に（社会的）に対応しようとするもので、温室効果ガスの削減や吸収源の拡大を中心とする防止（緩和）対策とならぶ温暖化対策のひとつである。日本ではあまり適応についての議論が活発ではないが、カナダなど既に温暖化の影響が明確に現れている国では適応策の検討が進んでいること、適応については対策分野よりも影響研究の一環として実施することが適切なことから、影響分野でも重要な課題となっている。

#### 5.2.2 カントリー・スタディ

IPCC と相互連携しながら、米国や国連環境計画（UNEP）が途上国の温暖化影響・適応評価/政策立案の支援を行うカントリー・スタディを進めている。IPCC による温暖化影響評価のガイドラインなど統一した方法論を用いて、途上国の人材や能力開発も念頭において実施されてきた。一方、UNEP でもカントリー・スタディの支援を行うとともに、より実用的な影響評価のマニュアル作成を行っている。米国のカントリー・スタディでは、詳細な影響評価用のマニュアルを作成し、影響評価に利用する各種のモデルや基礎となる気象データ、さらにモデルの利用に関わる知見の技術移転を行う体制をとっている。また、得られた成果は研究ジャーナルなどで公表し、影響研究の進展や IPCC の報告書作りにも積極的に対応してきた（IPCC では原則査読付の英文の研究論文がレビューの対象となる）。

### 5.3 国内の影響研究の動向

#### 5.3.1 温暖化の日本への影響レビュー

IPCC の影響評価に関する報告書では、日本に関する影響の記述が少ないことから、独自に日

本への影響についてレビューが行われた。環境庁に設置された温暖化問題検討委員会（1988年設置、北野康名古屋大学名誉教授が座長）のもとに影響評価ワーキンググループが設置され（1996年）、約1年をかけて分野別に温暖化影響研究および今後の検討課題が取りまとめられ、1997年4月に公表された。その一部は、気候変動枠組み条約事務局に提出する国別報告書（正式には、国際連合気候変動枠組条約への日本国報告書）の一部となっている（環境庁、1997、西岡・原沢編、1997、英語版はNishioka, S. and H. Harasawa eds., 1998）。

JGCC 報告書は、従来実施されてきた影響研究と関連研究の成果を中心に、国立試験研究機関の研究者及び大学の研究者等30名により取りまとめられた。IPCCと同様に既存の研究論文や報告をレビューし、まとめるといった方法をとったことから、JGCCと略称でこのプロジェクトを呼んでいる。英文単行本としても出版され、各国の影響研究者や政策決定者へ日本の知見を伝えるとともに、IPCCの第三次報告書のとりまとめに際して、日本からの影響研究のまとまった知見として貢献するものと期待される。

#### ・影響研究の進んでいる分野と進んでいない分野

ここでの影響研究は、GCMなどの将来気候の予測結果（気候シナリオ）を用いて、将来の気温・降水量変化が各分野にどういった影響を与えるかを定量的に評価するIPCCの影響／適応評価のガイドラインで示された方法に基づいて実施された研究を意味している。影響研究の進んでいる分野としては、農業、沿岸システム（海面上昇）分野が挙げられ、両分野とも適応策まで考慮した研究成果がまとめられている。今回JGCCで取り上げられた他の分野では、上記の定義による影響研究はまだ少なく、今後の進展が期待される。

自然生態系への影響については、この種の研究はまだ少ないが、一方これまで植物と温度や降水量との関係を解析した論文は非常に多く、気候と自然生態系との関係についての知見は非常に多く蓄積されていることが特徴であり、今回はそうした知見をもとに執筆者が温暖化した時の潜在的な影響について定性的に評価した結果がまとめられている。

#### 5.3.2 環境庁地球環境研究総合推進費研究（推進費研究）

環境庁の地球環境研究総合推進費による影響研究も開始以来9年がたち、研究成果の蓄積がなされている。今回のJGCCでも推進費研究の成果が多く取り上げられており、約8年間の研究が国立試験研究機関や大学の研究者によって大いに進展したことが評価されている。

### 5.4 影響研究の目的と問題点

#### 5.4.1 影響研究の目的

##### ・影響研究を含む温暖化研究の目的は何か？

温暖化のメカニズムを解明し、その潜在的影響を推定し、予防原則に基づいて対策を打つ等、温暖化を科学的に究明することは、それ自身地球科学としての意義がある。さらに重要なことは、人類が直面している温暖化といった緊急事態の中で、温暖化防止のためのアクションを政策決定者にとらせるための科学的なメッセージを送ることである。その意味で、温暖化研究は問題解決を目指した政策指向研究であるべきである。もちろん、温暖化研究は実験、調査、モデル化などに裏づけられた基礎的な研究成果やデータがなければ、「狼少年」になってしまうことは明らかである。

##### ・影響研究の目的は何か？

それでは影響研究者は、これまで温暖化研究としての影響研究の目的や意義について十分考えて研究を進めてきたらどうか？三村によれば、影響研究の目的は次の3つからなる（国立環境研究所，1998）。

目的1：温暖化問題の重要さの程度を提示し、防止策をとる必要性に根拠を与える。

目的2：温暖化防止策を検討する上で、危険性の限界（閾値）や経済コストを含めた基礎データを提供する。

目的3：最も影響に対して脆弱な分野と地域を特定し予防的に適応策を検討すること

国内外の影響研究の動向、昨年12月のCOP3の成功（もちろん十分ではないが）は影響研究の目的1は部分的にはあるが達成されている。勿論、後に示すように多くの影響研究者が研究の前提となる気候シナリオが不十分であることを指摘していることから、いまだ不確実性は高いことは留意する必要がある。

今後とも目的1の「対策をとる必要性の根拠」をより正確なものとするために、継続的な研究が必要であるが、さらに目的2及び3を目指した研究が期待される。いずれも従来の影響研究の延長では対応が困難な問題であり、他分野の研究者との緊密な協力も必要となる。目的2と3は、1に比べ研究が難しくなる。影響で言えば、直接的な影響ばかりではなく、受ける側（暴露系）の感受性(Sensilivity)、回復可能性(Resilience)、適応性(Adaptability)など脆弱性(Vulnerability)を考慮し、高次の影響をも把握した上でないと「危険性の限界（閾値、Threshold）」についての議論はできない。また、環境影響の経済コストや被害額の算定などもまだ研究が緒にいたばかりである。本格的な研究の推進には、経済学者の協力が不可欠である。

#### 5.4.2 従来の影響研究の成果

従来の影響研究の成果は、多くの研究論文や報告書として公表され、上記の目的達成に役立ってきた。従来の影響研究の成果を示せば以下になるよう。

##### ①国際的に認知される影響研究の枠組みが確立された。

・シナリオ→暴露系の特定→影響予測→適応・対策の研究手順が確立し、研究成果をもとに標準化されて、国際的にもIPCCの影響・適応評価ガイドライン、沿岸域の脆弱性評価手法として定着した。

##### ②自然・社会システムの分野毎に、膨大な影響予測が実施された。

・IPCC報告書、地域影響の特別報告書、IPCC報告書など

##### ③各国研究（カントリー・スタディ）による国毎の影響が明らかにされた。

・例えば、米国が支援して途上国55か国について実施された。日本でも太平洋の島嶼国の影響評価を支援した。

##### ④影響に関する地域レベルの統合が始まった。

・地域影響に関するIPCC特別報告書では世界を10地域にわけて脆弱性を評価した。

##### ⑤統合評価モデルの開発、現象、影響、対策に関する総合評価の基礎ができた。

・アジア太平洋統合評価モデル(AIM)の開発と適用。分野間のリンクや自然生態系と社会システムとの垂直的な総合化。

## 5.5 影響研究の体系的整理

これまでの影響研究をもとに影響研究の体系的な整理を試みた。

### 5.5.1 影響研究の3つの視点（図5.1参照）

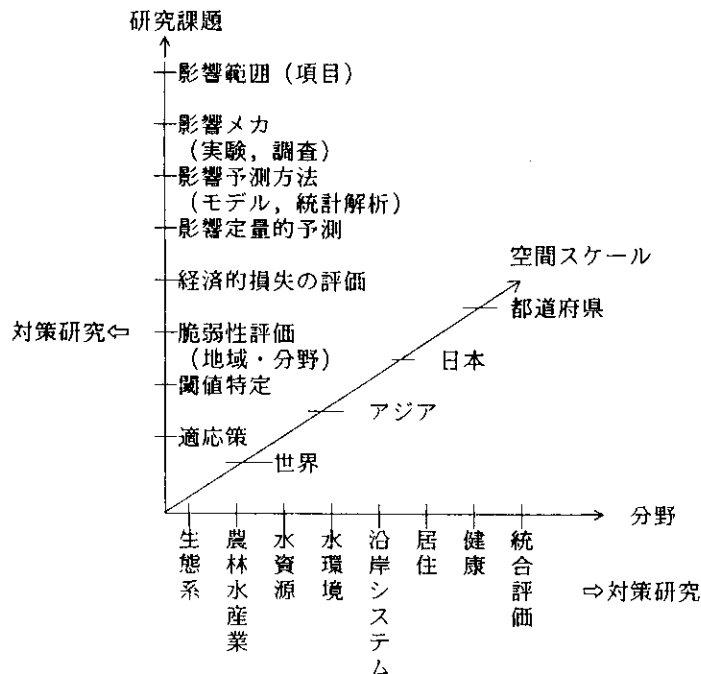


図 5.1 影響研究の課題、分野、地域による評価

影響研究を3つの軸によって類型化してみた。軸としては、1)影響研究の課題の軸、2)分野の軸、そして3)地域の軸を取り上げた。影響研究の課題の軸は、現在の影響研究が単に研究のみに止まらず対策まで念頭においた政策指向的な研究であるべきであるといった方向も考慮している。

#### (1) 影響研究の課題の軸

- ①影響項目の抽出（定性的なリストアップ、チェックリスト）
- ②影響のメカニズムの解明
- ③影響予測の方法の開発
- ④影響予測のためのシナリオ開発
- ⑤影響の定量的評価
- ⑥影響の経済的損失の評価
- ⑦脆弱な地域、分野の特定
- ⑧影響の危険な水準（閾値）の特定
- ⑨適応策の検討
- ⑩総合化と統合評価

#### (2) 分野の軸（とりあげるべき分野は何か）

主要な分野として、自然生態系、農林水産業、水資源・水環境、沿岸システム・都市インフラ、人間居住や人間健康、異常気象の影響（とくに最近では、エルニーニョ現象の生態系や社会経済影響）。さらに分野横断的な問題や複合的な問題なども IPCC で取り上げられている。複合的な

問題の一つに各地に異常気象をもたらすエルニーニョ現象などの影響評価がある。エルニーニョ現象と温暖化との関連については現在研究が進められているが、なんらかの関係が想定される。エルニーニョ現象の将来予測については短期については可能となりつつあるが、長期的な予測はまだできていない。そこで、過去に発生したエルニーニョ現象や異常気象のもたらした影響について事例を収集し、解析評価しておくことが要求されよう。

### (3) 地域の軸（対象地域はどこか）

影響研究の対象地域としては、都道府県レベル～地域レベル（関東地方など）～日本列島～アジア地域（脆弱な地域も含む）とそのスケールは多様である。影響モデルの構築では、特定地域の観測結果などが重要であり、一方対策研究とのリンクでは、地域レベル、日本など国レベルでの研究が、そしてアジア地域における日本の位置を考慮すると、アジア地域を対象とした温暖化の影響／適応評価を今後実施する必要がある。

## 5.4.2 各分野に共通する検討課題

3つの軸のうち、特に課題の軸に関して、内外の動向や影響研究者の意見から得られた各影響分野に共通かつ重要な検討課題について以下に示す。

### (1) 実験研究，現地調査研究，モデル研究

影響研究では、対策や施策指向の研究が期待されている。すぐに対策・施策上の質問に答えられるモデル的研究が中心になりがちであるが、これまでの影響研究の経緯を振り返るとモデルの検証や予測に用いられる基礎的なデータ、それを得るため実験研究、調査研究が影響研究の根幹を形づくるものとして今後ともますます重要性が増していこう。例えば、高CO<sub>2</sub>と温度の植生や穀物に与える影響に関する基礎データは世界でも限られている。十分正確で説得力のあるモデルづくりには、基礎的な研究も同時に進めなければ、影響評価は成り立たない。

### (2) 影響予測の方法

影響予測で用いられる方法は各分野によって大きく異なる。農業のように非常に多くの影響評価モデルが構築されている分野とそうでない分野があり、とくに影響だけではなく適応評価についての方法論やそのための適応技術の開発、適用が重要となろう。

### (3) 気候シナリオ

気候シナリオについては、影響研究者の一番の関心事である。第一世代の気候シナリオ（空間スケールや2xCO<sub>2</sub>の平衡実験）の限界があること、極力新しい気候モデルの結果を用いた影響の再評価や地域気候モデルを用いた、20～50kmといったより空間精度の細かい気候シナリオを用いた地域影響研究が必要となってきた（表5.1）。

影響研究は、GCMによる将来気候予測の研究の進展に則して展開してきたが、一般に影響研究は、数年遅れた気候シナリオを利用してきたため、GCM研究とのタイムラグが生じていた。この点については、IPCCも早くから認識しており、影響研究へ最新のGCMの計算結果を提供するための仕組みが検討されてきた。その結果昨年12月には英国のイーストアングリア大学とハドレイセンターが中心となってIPCCのデータ提供センター(DDC: Data Distribution Center)を開設し、気候シナリオや過去の気候データを整理し、研究者に配付している(ホームページは、<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>)。

表 5.1 影響研究のための気候シナリオ

	気候シナリオの概要	特徴
第一世代 気候モデル 1985～	全球大気大循環モデル(GCM) 2xCO <sub>2</sub> (平衡実験) 400～500km 年間平均値(気温, 降水量)	局所的な気候条件に左右される自然生態系・農林業などへの適用は不向き 日本への適用は困難
第二世代 気候モデル 1990～	海洋-大気結合モデル(AOGCM) 自然近似度改善 CO <sub>2</sub> 1%増加(過渡実験)+SO <sub>2</sub> 空間解像度改善 月間値(気温, 降水量, 全日射量, 純放射量, 蒸発量, 土壌水分量)	IPCCのデータ配付センターで幾つかの気候シナリオを配付中 温暖化の過渡的な影響評価 統一した気候シナリオの利用 米国カントリースタディ, IPCC 研究者, EMF
RegCM 1995～	地域気候モデル(RegCM) スケーリング手法 統計的手法 ネスティング 空間解像度 20～50km	米国等では影響研究に利用されている 日本, 電中研, 土木研, 気象研で開発中 県, 地方, 日本のより詳細な影響評価が可能となる GCM 研究者との連携が必須

日本においても、同様に気候シナリオ、とくに地域気候モデルによる 20～50km といった空間スケールの細かい気候シナリオやベースラインシナリオ（社会・経済発展や人口の伸び）の整備が、今後の影響研究の鍵を握っている。標準化した気候シナリオを利用することは、影響研究の結果の相互比較を可能とするなど、メリットが多い。しかし研究者個人では、こうしたデータベースの整備や提供などのサービスは人的、費用的に困難が伴うので、国立研究機関などがこうした仕事を担当することが期待される。

#### (4) 影響の経済的損失の評価

温暖化対策が進むにつれ、対策経費が膨大なものとなってきた。一方、進行しつつある温暖化に対しては適応策が有効であることが認識されており、IPCC でも影響を扱う第2作業部会の中心的検討課題となっている。しかし、適応策やその経済性については、対策費用と比較しうるだけの研究や基礎データが乏しい。また適応策を本格的に検討しているのはカナダなどの一部の国に限られている。今後、影響の被害、適応策の費用などは、影響研究と対策研究を結ぶ知見となると考えられる。また、適応技術（ソフト、ハード）や費用などの研究成果や基礎データは積極的にデータベース化して、他の研究の資料に活用するなどの取り組みが必要である。

#### (5) 脆弱性評価

脆弱な地域や分野について、脆弱性評価など一連の影響や適応評価を行うための研究が進められており、評価手順なども標準化されつつある。具体的には米国のカントリー・スタディなど途上国地域を対象としたものであるが、同様な研究が日本でも必要である。

#### (6) 閾値の特定

政策評価のための許容排出量の算定等には、各分野の対象毎に影響の危険な水準（閾値）の特定がまず必要である。しかしながら、閾値の特定には、外力と系（たとえば、社会システム）の要素に関する種々の情報が必要であり、非常にチャレンジングな課題であり、長期的な課題と位置づけられよう。

#### (7) 適応策の検討



地域の特別報告書でも、各地域の適応策についてのまとめが要求された。適応策（技術や経費）についての研究が必要である。

#### (8) 統合評価

分野毎の影響評価とともに、分野横断的な影響の評価や社会・経済への二次・三次影響、さらには貿易を通じての世界への影響も関心が高まっており、IPCC では統合評価や統合評価モデルが重要視されている。また、それに関連して、知見の不確実性の評価も何らかの形で要求される。これは、対策を実施する政策決定者にとって何が最も重要な影響かを判断して、適切な対策や優先度の設定を行うためには不可欠な情報となる。

#### (9) 対策研究とのリンク

例えば、1998年10月に公布された温暖化防止対策推進法では、国や地方自治体に温室効果ガスの削減計画の立案・実施を義務づけることとなった。地域における対策実施にあたっては、温暖化の潜在的影響をできる限り詳細に予測し、それを情報として企業や個人に提供し、温暖化問題の重要性を認識させる必要がある。温暖化の対策実施は長期にわたって実施することから、各主体が何のために対策を行うかなどに答えるには、温暖化の現象や影響、とくに地域への影響や住民の日常生活への影響について示す必要がある。

#### (10) 温暖化影響の検出と監視・モニタリング

温暖化が進んでいることの種々の徴候が現れており、こうした温暖化の徴候をいち早くとらえ、対応を迅速に行うためには、影響の検出手法や指標の開発とそれによる長期モニタリングが不可欠である。

以下は影響研究に限らないが、今後重要性が増すと考えられる点である。

#### (11) 途上国の能力開発

途上国での温暖化の影響評価や対策立案の能力や人材を育てるためには、途上国研究者と共同して影響研究を進めることが必要であるが、同時により多くの研究者や技術者に影響評価のノウハウをトレーニングワークショップ等によって伝えることも影響研究の一環となりつつある。APN に対する途上国からの要請では、具体的な温暖化問題への取り組みのためのトレーニングに対するニーズが非常に高まっている。途上国における人材開発は、準備や実施に多くの労力が必要で、日本では研究面での評価が得にくいのが欠点である。

#### (12) 情報提供

温暖化に関する情報量はこの数年間に飛躍的に増加したが、一方、影響や対策に関する種々の数値が飛びかかっており、何が正しい情報かなど、情報過多ゆえに、情報の受け手が混乱しかねない。温暖化に関する正確な情報を迅速に提供することも、影響研究を含む温暖化研究では重要な視点となる。

### 5.5 影響研究の展望

#### 5.5.1 分野毎の影響研究の課題

IPCC 報告書、「地球環境研究等の今後のあり方について－最終報告書－」、影響研究者の意見をもとに、分野毎に提案されている研究課題を網羅的に示したのが、図 5.2 である。

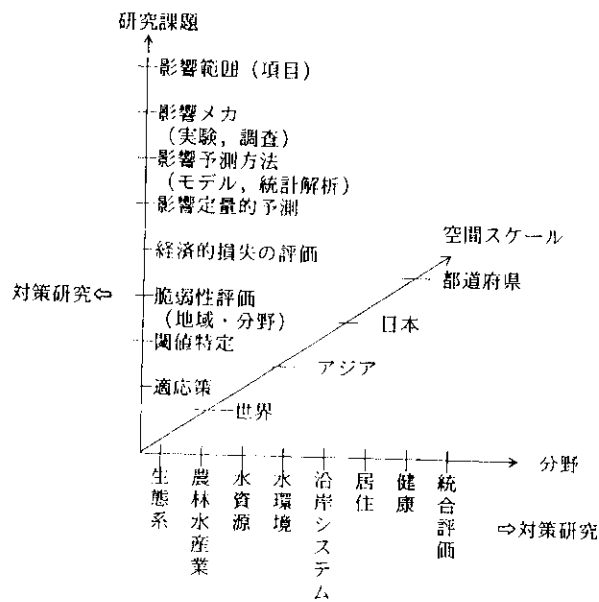


図 5.2 影響研究の構成要素

従来からの取り組みもあり、今後とも自然生態系、農業、沿岸域、健康分野の研究の進展が期待されるが、さらに水資源、水環境、都市、産業や日常生活などの分野における影響研究の進展も期待したい。とくに都市への影響について温暖化の間接的影響が卓越し、他の人為的な影響や環境変化との分離・評価が難しいなど影響研究の実施が困難な面があった。現在は当時と状況はほとんど変化していないが、温暖化の影響は生態系ばかりでなく、社会・経済システムにも顕在化すると予測されることから、こうした分野の研究の重要性も増してきた。

### 5.5.2 影響研究の体制

影響研究の実施体制について、分野を越えた研究（者）のネットワーク作り、定期的な情報交流の場の設定、自治体との研究協力体制などが必要となる（国立環境研究所，1998）。例えば、統一したシナリオを用いて分野ごとの影響予測を進めたり、温暖化の現象や対策分野の研究者との共同研究を進めるためには意見交換する場や機会が必要で、分野を越えた影響研究に関するシンポジウムやワークショップの開催も効果的である。

また、地球温暖化対策の推進法が1998年10月に公布されたが、今後自治体の温暖化防止行動計画の策定が責務となると、地域レベルの影響評価も対策立案に際しての基礎的情報として必要となる。しかし現在地域レベルに対応できる成果は殆どないので、自治体との連携をとりながら、地域レベルの影響研究を開始する必要がある。国立研究機関、大学、県の環境研究機関と地域の特徴を踏まえた影響に関する共同研究を進めることが必要となろう。

### 5.5.3 国際共同研究計画への積極的参加

地球環境問題はすぐれて国際的であり、現在 IGBP, IHDP, IPCC など数多くの国際的研究計画やプロジェクトが進行している。こうした国際的プロジェクトとの関わりをもちながら積極的に研究をリードしていくことも必要であろう。

しかし一方では、国際共同研究計画への参加は研究者個人に任せられていること、国際的プロジェクトが国際学会などのNGOとして各国政府とは一步距離をおいて実施されていることから、組織的にこうした国際的プロジェクトを財政的に支援する仕組みがないことも事実である。とくに国際プロジェクトでは、IPCCなどもそうであるが、年度にかかわり無くワークショップの開催（ホスト）などが要求される。こうした要請にも臨機に対応できる仕組みや財政的な支援、データベースや情報センター的な役割を担う機関があればより研究の進展が期待できよう。

#### 5.5.4 今後重点的に進めるべき影響研究

今後重点的に進めるべき研究課題について、その重要性や緊急性も考慮して列挙すると以下のようになる。◎はとくに緊急性が高く重要と思われる研究課題である。

##### ①従来の影響研究の延長線上にある研究

◎最新の気候シナリオ、地域気候シナリオを用いた影響評価（再評価）

例：各分野への影響とその総合化（日本のカントリー・スタディ）

例：過渡的な気候変動に対する系の影響評価

◎影響評価モデルの基礎データとなる実験研究、現地調査研究

例：高CO<sub>2</sub>の植生・農作物への影響評価とモデル化

○温暖化と他の気象・環境要因の複合影響の研究

例：温暖化と異常気象、温暖化と高CO<sub>2</sub>、酸性雨とオゾンとの関係

○動植物を考慮した生態系全体への影響評価

例：害虫、微生物、動物を考慮にいたした生態系への影響

##### ②京都議定書など、最近の流れに沿った研究（世間や行政ニーズの高い研究）

◎温暖化の影響検出指標やモニタリングのあり方

例：気象、影響分野ごとに温暖化していることの証拠集めと解析

◎エルニーニョなどの異常気象による自然生態系や社会・経済的への影響評価

例：82/83、97/98年のエルニーニョ現象の影響評価

○温暖化のGHGsシンク、ソースに与える影響

例：森林、土壌のCO<sub>2</sub>シンク、ソースに与える温暖化の影響

##### ③社会・経済面も考慮した影響研究

◎温暖化影響に対する適応策の技術やその効果（経済性）の評価

例：ソフト・ハードの適応技術とその効果、経済性、適用性の検討

○温暖化の社会・経済への高次影響の評価

例：産業、エネルギー、交通を通じて伝播する日常生活への影響

○温暖化と都市ヒートアイランド現象の総合評価

例：健康的な都市のあり方検討、熱波対策（緑化、水辺、...）

##### ④対策も考慮した影響研究

◎温暖化に対して脆弱な分野や地域の評価

例：アジア太平洋地域の脆弱性マップ、脆弱な森林などのマップ

◎世界の経済、貿易も考慮した影響研究

例：アジア地域の農業影響と食料安全保障

○影響被害や適応策の費用効果と GHG 削減対策との比較

例：適応策・緩和策の費用効果分析

◎分野別の研究成果の総合化

例：温暖化→影響→対策→影響（フィードバック）

◎分野横断的な統合評価モデルの開発

例：排出，大気，影響，排出

#### ⑤長期的な影響研究

○影響評価の不確実性を下げるための研究

例：確率論的モデル化，感度分析，リスクアセスメント

○限界的な水準（閾値）の特定に関する研究

例：非線形現象の解析とモデル化（海流，南極，陸生生態系），過去事例の解析

#### ⑥影響研究の普及，技術移転

○影響評価の方法論などのガイドラインの作成

例：IPCC ガイドライン，影響評価の技術資料と手順，データベース

○影響評価の標準化／基準／マニュアル化

例：自治体でもできる温暖化影響評価手順の開発

○影響評価のためのデータベース開発と運用

例：気候シナリオ，ベースラインシナリオの開発と蓄積，提供

### 5.6 さらなる展望

現象研究，対策研究に比べると影響研究は対象分野も広く，限られた予算と人材を考慮すると焦点を絞りにくい性格をもつ研究である。繰り返しになるが，都市や産業，日常生活などへの影響のようにノイズの多い間接的，高次な影響についての研究はなかなか難しい。温暖化対策が進むにつれて影響研究の重要性の認識は高まっており，さらに現在温暖化の影響の検出，適応策が重要課題として挙げられてきた。

一方，各方面の努力で新しい気候シナリオや地域気候シナリオが影響研究にも使える環境が整ってきた。こうした詳細な（地域）気候シナリオを用いて，従来の研究の延長線上にある研究をさらに進展させること，その一環として個別分野で得られた成果を総合的に評価したり，また IPCC の影響評価プロセスに則った統一したシナリオを用いて評価を行う日本版カントリー・スタディが実施できる基礎がすでにできたと考えている。

また，温暖化の検出，適応策の評価（効果，費用），危険な水準（閾値），異常気象と温暖化の影響評価，複合影響の評価など，分野横断的でチャレンジングな課題もぞくぞくと現れている。一方では基礎的研究の重要性も再確認されるに至っている。

影響研究が進んで，影響学会の設立まではいかないとしても，研究者層の広がりや一般国民と行政の関心の高さを反映して，影響研究発表会が定期的に行えるまでに研究の進展を期待したい。

#### 参考文献

環境庁，1997：地球温暖化と日本への影響 1997，温暖化問題検討委員会影響評価グループ報告書，

172pp.

国立環境研究所, 1998: 地球環境研究展望－地球の温暖化－(影響), 29pp+資料.

Nishioka, S. and H. Harasawa, eds. 1998, Global Warming: The Potential Impacts on Japan, Springer-Verlag Tokyo, 244pp.

吉野正敏, 1998: 和書案内, 農林水産図書資料月報, 49(3), 74-75.

西岡秀三, 1996: 地球環境研究センターニュース, 6(12), 1-5.

西岡秀三・原沢英夫編, 1997: 地球温暖化の日本への影響, 古今書院, 256pp.

Carter, T., et al., 1994: IPCC Technical Guidelines for Assessing Impacts and Adaptation, IPCC Special Report, 59pp.

Parry, M. and T. Carter, 1998: Climate Impact and Adaptation Assessment, Earthscan, 166pp.

地球環境研究等企画委員会地球環境研究等の今後のあり方小委員会, 1997: 地球環境研究等の今後のあり方について－最終報告書－.

### IPCC関連の報告書, 特別報告書, 技術報告書

#### 1. IPCC 第2次評価報告書

- a) Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. Report of IPCC Working Group I, 1995.
- b) Climate Change 1995 - Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Report of IPCC Working Group II, 1995.
- c) Climate Change 1995 - The Economic and Social Dimensions of Climate Change. Report of IPCC Working Group III, 1995.
- d) The IPCC Second Assessment Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change, 1995.

#### 2. IPCC 特別報告書(1994年以降)

- a) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (3 volumes), 1994.
- b) IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations, 1994.
- c) Climate Change 1994 - Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios.
- d) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (3 volumes), 1996.
- e) The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. A Special Report of IPCC Working Group II, 1997.

#### 3. IPCC 技術報告

- a) Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change - IPCC Technical Paper 1, 1996.
- b) An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report - IPCC Technical Paper 2, 1997.

- c) Stabilization fo Atmospheric Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-economic Implications - IPCC Technical Paper 3, 1997.
- d) Implications of Proposed CO<sub>2</sub> Emissions Limitations - IPCC Technical Paper 4, 1997.