

**土木学会
地球温暖化対策特別委員会
報告書**

地球温暖化に挑む土木工学

2009年5月

土木学会会長挨拶

土木界は、水力・原子力発電などエネルギー基盤整備、新エネルギー開発、交通体系の適正化、施設計画・設計の適正化、構造物の長寿命化などを通じて温暖化防止策に貢献するとともに、温暖化に伴う海面上昇や気象の凶暴化を前提とした災害に強い適応した社会づくりに貢献していかなければなりません。リオ・デ・ジャネイロ市で地球サミット（環境と開発に関する国際連合会議）が開催された 2 年後の 1994 年に、JSCE では土木学会アジェンダ 21 を策定いたしました。その中には地球温暖化を含む地球環境問題に対して土木技術者が取るべき行動原則として、すでに以下のように記載されています。



1. 地球環境問題の自覚と自己啓発

・・・・・・・・土木建設事業の成果は、世代を越えて長く人類と地球環境に貢献することが可能である反面、適切な対応を怠れば環境破壊の方向に働く可能性があり、ここに地球環境問題の解決に土木工学が貢献すべき大きな責務があることを認識する。大規模な土木建設事業の実施に際しては特に、その事業が自然環境や社会問題に関わる複雑な利害関係をはらんでいる場合が多いこと、短期的な経済性を優先し環境質の劣化と引換えに安易な妥協を図ることは後世に禍根を残し、また長期的にはかえって経済性を損なうことを十分に理解することが必要である。・・・・土木建設事業の実施に際しては、以下に述べるような行動を取ることが望まれる。

再生不能なエネルギーの消費を最小にし、リサイクルに努めるとともに木材等の建設資材のような再生可能な資源についても再利用を図る等適切な利用に努める。とりわけ、土木建設事業が環境に与える影響を事業の計画段階から維持管理段階にわたって評価し、その影響の大きさを重要な判断基準にする姿勢が望まれる。

環境の悪化に関わる外部不経済コストと、良好な環境の創造によってもたらされる便益を土木建設事業の経済性評価の枠組みに含める、さらに、社会や歴史的文化遺産に土木建設事業が与える正負両面の影響を総合的に評価し、負の影響を緩和するミティゲーションを含めた事業に取り組む。

事業の遂行によって生じる環境問題について、土木技術者として率直な態度を取り、技術的な対応と環境影響についての情報を提供するように努めるとともに、事業計画への市民の理解、参加・協力が得られるよう努める。・・・・・・・・（土木学会アジェンダ 21 より。全文については次の URL を参照 <http://www.jsce-int.org/>）

本報告書は 2007 年度～2008 年度の時限付き特別委員会である地球温暖化対策特別委員会の最終報告書であり、上記の行動原則に則り、特に土木分野に関係する気候変動、海面上昇などの影響予測や、それら影響に対して海岸侵食や水害の被害軽減のための適応策、そして温暖化緩和策として土木分野に課せられた温室効果ガス削減対策について最新の知識を概観し、地球温暖化に対して土木技術者が今後いかに行動していくべきかを取りまとめたものです。学会会員のみならず、土木関係者の方々には地球温暖化対策に関して土木界が大変重要な責任を負っている事を認識され、関心を持って、積極的にその対策に取り組まれることを期待します。

2009 年 5 月
第 96 代会長 栢原 英郎

地球温暖化対策特別委員会 委員長挨拶

土木学会(JSCE)では学会全体で地球温暖化対策に取り組むこととし、2007年度の会長として地球温暖化対策特別委員会を創設しました。この委員会は図に示すように28存在する土木の各分野に対応するJSCEの既存の調査研究委員会を横断する組織として、本特別委員会の下に3つの小委員会

地球温暖化影響小委員会： 将来の気温変化、海面上昇など対策を研究する前提条件を提示

緩和策小委員会： 温室効果ガス発生抑制技術やエネルギー供給方法改善技術などを提示

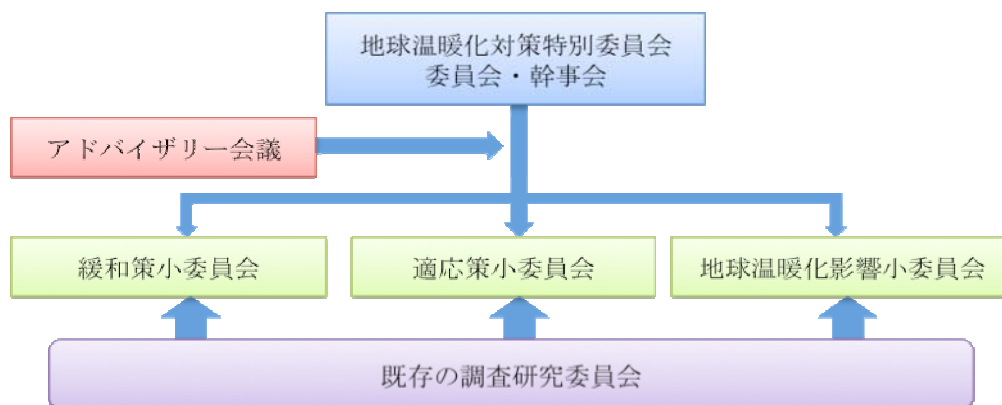
適応策小委員会： 海面上昇や異常気象対策技術などを提示

を設置し、また、地球環境問題に携わった学会の研究者・専門家からなる「アドバイザリー会議」を設置し、委員会の運営に対し助言を受けるようにしました。本委員会の活動として、i) 土木分野における地球温暖化対策に関する最新情報の収集整理 ii) これらの情報を国内学会員や一般市民、政策決定者に対して提供するためのシンポジウムの開催やパンフレット・報告書の作成 iii) 国際活動の窓口としての活動 などを行いました。さらに iv) 土木技術者としての行動指針となるべき **Structural**、**Non-structural** な対策の最終提言の策定を行い、2008年度の成果として本最終報告書をまとめました。

本報告書が 21 世紀の人類最大の課題である地球温暖化問題に挑戦する土木技術者の姿をより多くの方々に知って頂くために役立つとともに、土木技術者にとっても自らの行動指針策定のために役立てれば幸甚です。

2009 年 5 月

地球温暖化対策特別委員会委員長（第 95 代会長） 石井 弓夫



地球温暖化対策特別委員会の構成

目 次

第1編 土木工学は地球温暖化問題に如何にして挑むのか？	1
(土木学会地球温暖化対策特別委員会 提言骨子)	
1. 気候変動は社会インフラに大きな危機をもたらす	1
2. 土木界は何をすべきか？	1
3. 気候変動の緩和に向けて	2
4. 気候変動への適応に向けて	3
第2編 地球温暖化の影響	5
1. はじめに	5
2. 気候予測の概要	6
2-1 IPCC 第4次評価報告書 (AR4; IPCC, 2007) の気候システムに関する主な知見	6
(1) 現状の評価	6
(2) 将来予測	6
2-2 日本の気候予測	8
(1) 現状	8
(2) 将来	9
3. 我が国に対する影響	12
3-1 水資源	12
(1) 降水量の変化	12
(2) 積雪量の変化	12
(3) 河川	12
(4) 湖沼	13
(5) 地下水	14
(6) 水資源への影響とその対策	14
3-2 防災 (河川洪水, 土砂災害, 高潮)	16
(1) 河川洪水	16
(2) 土砂災害	17
(3) 高潮	18
3-3 自然生態系	20
(1) 顕在化している影響	20
(2) 予測される将来影響	21
(3) 土木施設への影響と対策	21
3-4 食料生産	22
(1) 概要	22
(2) 国内生産 (コメ生産) への直接影響	22
(3) 世界の食料需給関係の変化を介した間接影響	24
3-5 われわれの生活と健康に関する影響	26
(1) 地球温暖化とわれわれの生活	26

(2) 安全な暮らしに関する影響.....	26
(3) 健康な暮らしに関する影響.....	27
(4) 経済的に豊かな暮らし.....	28
(5) 快適な暮らし.....	29
(6) 文化や歴史を感じられる暮らし.....	29
(7) 国民生活や健康への影響予測の課題.....	29
3-6 エネルギーと産業他.....	30
(1) エネルギー産業への影響.....	30
(2) 発電方法の高効率化の影響.....	31
(3) 運輸部門の動向.....	32
4. 世界及びアジア・太平洋地域に対する影響.....	33
4-1 世界における異常気象の影響.....	33
4-2 途上国における気候変動影響.....	33
(1) 途上国及びアジア太平洋地域における気候変動影響の特徴.....	33
(2) アジア太平洋地域における気候変動影響のメカニズム.....	33
4-3 IPCC AR4 による主な知見.....	34
(1) 現状.....	34
(2) 将来.....	37
5. 土木から見た影響予測と対応の課題.....	40
5-1 複合リスク、影響の予測とそれへの対応.....	40
(1) 水環境に対する複合影響と対応.....	40
(2) 沿岸域における複合災害.....	42
5-2 複合的な方法による対応.....	43
5-3 対応策がトレードオフの関係にある場合の課題.....	43
(1) 都市の生活環境について.....	43
(2) 渇水に伴う地下水利用の増加、これに伴う地盤沈下の発生.....	43
5-4 段階的な取組の必要性.....	44
5-5 対策の優先順位のつけ方.....	44
5-6 予測される影響に対する適応策の実施が困難な場合の対応.....	44
5-7 許容されるリスクやハザードの決定（合意形成）.....	44
5-8 気候変動対策に対する土木分野の責務.....	44
第3編 地球温暖化に対する緩和策.....	47
1. はじめに.....	47
1-1 温室効果ガスの排出と緩和策.....	47
1-2 温室効果ガスの排出と土木.....	48
1-3 わが国における削減対策計画と土木事業.....	49
(1) 京都議定書目標達成計画.....	49
(2) 2050 日本低炭素シナリオ.....	52
1-4 土木の果たすべき役割.....	52

2. 建設事業由来のライフサイクル的な CO ₂ 削減	54
2-1 はじめに	54
2-2 土木学会における LCA 手法の検討経緯	54
2-3 土木構造物のライフステージ別環境負荷	55
2-4 LCCO ₂ の削減ポテンシャル	56
2-5 意志決定への LCA の反映	57
3. 国土計画とモビリティ由来の CO ₂ 削減	61
3-1 モビリティ由来の CO ₂ 削減	61
3-2 国土計画と CO ₂ 削減	64
4. 地域社会全体としての CO ₂ 削減～人口密度・交通需要・居住特性から考える	66
4-1 はじめに	66
4-2 諸外国での低炭素地域社会に向けた長期目標の設定	66
4-3 日本での低炭素地域社会に向けた動き	67
4-4 地域レベルでの交通・土地住宅部門の役割	68
(1) 地域シナリオからの要求	68
(2) 交通負荷と人口密度・勤務地の関係	69
(3) DID 人口の動向と地価	72
(4) 人口密度別・住宅の建て方別居住選好の分析	73
(5) ガソリン消費の価格弾力性	74
4-5 まとめ	75
5. 都市の代謝システムと温室効果ガスの排出削減	77
5-1 廃棄物・下水道事業由来の温室効果ガスの直接的な排出削減	77
5-2 廃棄物・下水汚泥の活用による温室効果ガスの排出削減	78
(1) 廃棄物・下水汚泥の有効活用に関する総合的な評価	78
(2) メタン発酵によるエネルギー回収	79
(3) 固形廃棄物の焼却排熱の利用	80
(4) 下水熱の利用	81
(5) その他の活用方法	81
5-3 まとめ	82
6. 再生可能エネルギーの開発	86
6-1 エネルギー部門における CO ₂ 削減技術	86
6-2 再生可能エネルギーの開発	87
(1) 再生可能エネルギーの種類と開発の必要性	87
(2) 再生可能エネルギー開発の現状	88
(3) 再生可能エネルギーの普及に向けた提言	90
6-3 二酸化炭素回収・貯留	91
7. 土木学会における取組の考え方と方策	93
7-1 自然資源や再生可能エネルギーの活用	93
7-2 交通対策	94
7-3 LCA にもとづくインフラ整備	94

7-4 廃棄物等の有効利用	97
7-5 まとめ	98
 第4編 地球温暖化に対する適応策	101
1. はじめに	101
2. 地球温暖化時代における社会基盤整備と土木技術	103
3. 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会	104
3-1 水の安全保障	104
3-2 地球温暖化と気候変動に関する既往の提言	104
3-3 地球温暖化と気候変動に関する不確実性と賢い選択	105
3-4 粘り強い適応	107
4. 適応策に関する水工学からの寄与	109
4-1 治水の整備水準が低い中での気候変化の襲来	109
4-2 既存の枠組みに囚われない既存ストックの活用	109
4-3 画期的な水災害リスク評価手法の開発と公開	110
4-4 水資源政策の転換	110
4-5 諸外国の適応策への支援	111
4-6 水問題に関する教育の革新	111
4-7 地球温暖化適応策実施のための法的・経済的・社会的システムの整備	112
4-8 余裕ある社会へ向けて生活・制度の見直し	112
5. 適応策に関する海岸工学からの寄与	113
5-1 適応策の基本的な考え方	113
5-2 適応策オプション	113
5-3 適応策のタイムスケジュール	114
6. 適応策に関する環境工学からの寄与	116
6-1 概要	116
6-2 各側面での適応策	117
7. 水の安全保障に関する適応策の推進に向けての提言	122
8. 土木学会と土木技術者としての適応策—粘り強く賢い選択	124
 土木学会地球温暖化対策特別委員会	
委員会名簿	143
幹事会名簿	143
温暖化影響評価小委員会名簿	145
緩和策小委員会名簿	145
適応策小委員会名簿	145

第1編 土木工学は地球温暖化問題に如何にして挑むのか？

1 気候変動は社会インフラに大きな危機をもたらす

地球温暖化は、既に広い分野に影響を与えつつあり、このまま進めば社会にとって大きな脅威になる可能性が高い。将来の気候変動の影響について、以下のことが言える。

- 1) 人間社会を支える陸上・海洋生態系といった自然システムには、1℃程度の小さな気温（海水温）上昇でも大きな影響が現れる。また、1.5～2.5℃程度の比較的低い気温上昇でも、わが国の水資源や防災、農業、健康、観光産業などの分野に大きな影響が現れる。
- 2) インフラ施設の整った都市などでは、経済活動など別の要因による環境変化も大きく、気候変動の影響が単独では顕在化しにくい。しかし、防災レベルを超えて異常気象現象が激化すれば甚大な被害が発生する。
- 3) 土木の視点から気候変動の影響をみた場合、①土木構造物の安全性や機能、②土木事業の遂行、③インフラ施設群としての機能、④安全・安心や環境保全など地域や国土の姿や国民生活、に対して現れる。
- 4) 温暖化・気候変動には平均気温や海水準といった平均状態の変化と異常気象や台風といった極端現象の変化の2つがある。極端現象の変化は想定外力など施設の設計基準に直接関係するが、その予測にはまだ多くの不確実性がある。
- 5) 気候変動の影響は広い範囲に及ぶため、複数の影響が重なった複合影響であり、また、地震などの他の自然災害、少子高齢化、資源・エネルギー問題、水・食料問題など現代社会が直面している問題と重なって現れる。
- 6) 途上国ではインフラ整備が遅れており、気候変動に対してより脆弱である。

2 土木界は何をすべきか？

気候変動対策としての緩和策と適応策には土木分野が関わるものが広範に含まれるため、気候変動問題は、土木分野に新しい課題と使命を投げかけている。土木における対策の考え方と総括的方针として以下のことが言える。

- 1) 二面作戦：温暖化対策の目標は、気候変動の進行を危険な水準以下に抑えることに据えるべき。そのためには、適応策と緩和策の2つの柱の適切な組み合わせが必要。
- 2) 対策の主流化：温暖化対策を社会経済政策の主要な政策分野の中に組み込むことが必要。
- 3) 土木の対象の特徴：土木の対象は寿命が長く、一旦建設したら長く存続するため、土木分野は、緩和策の目的である「低炭素社会・地域」作りと適応策の目的である「長期的に安全・安心な国土」作りの両方に貢献すべき。
- 4) 複合・多重効果：緩和策と適応策に対してともに有効な一石二鳥の対策を生み出すべき。また、個別の対策においても、副次的な効果や多重効果を持つものが望ましい。

- 5) 国のリーダーシップと専門部署の設立：国家プロジェクトとして温暖化対策を推進し、将来の低炭素社会としての国土の姿、安全で安心な国土の姿を早期に示すことが必要。このために必要な法制度や技術体系などの仕組み、費用、組織や人材の確保など具体的戦略を併せて立案。政府に担当する専門部署を設立するなど強力な推進体制の構築が必要。
- 6) 地球温暖化賢人会議の設置：不確実な予測の下、将来の破滅的なリスクを避けるために、予防的立場で政策を検討することが必要。このため様々な専門家が協力して地球温暖化への対応を検討する組織「地球温暖化賢人会議」を設置し、ここから政治と行政のリーダーに様々な提言や情報提供を行い、賢い選択を実現。
- 7) 土木技術の結集と地域貢献：よりよい策を選択するためには全国の土木技術を結集させることが必要。また、温暖化対策の具体的な検討・実施では、地方においても積極的に取り組む姿勢が必要であり、土木技術者は、それに対して積極的な貢献を果たすことが重要。
- 8) 市民とのコラボレーション：市民・NGO 組織などとのコラボレーションが重要。このため誰もが自由に分かりやすく地球温暖化に関する情報を得られるデータベース作りなどの体制整備が必要。
- 9) 国際貢献：途上国からの CO₂ 排出は今後大きく増加するため、途上国における排出対策が極めて重要であり、ポスト京都議定書の国際枠組みでは、途上国の参加が不可欠。一方、大きな災害被害や食料危機、環境難民の発生は国際的不安定をもたらすため、途上国では、経済開発政策の中に気候変動への適応策を組み込んで、気候変動への備えをはかる適応策の主流化を行うことが必要。これら取り組みに対して、土木界は積極的に貢献すべき。
- 10) 土木学会行動計画の推進：「土木学会地球環境行動計画－アジェンダ 21／土木学会－」に則った具体的な行動計画策定が必要。
- 11) 強力な推進体制の整備：土木学会において地球温暖化対策を担当する学会横断的な組織が必要。これは従来の地球環境委員会のような調査研究委員会ではなく、温暖化対策担当理事を設け、理事会直属の組織として学会全体に強力な指導力を発揮できる組織であることが必要。

3 気候変動の緩和に向けて

気候変動に対する緩和策の中で最も重要なのは、エネルギー消費に由来する温室効果ガス排出削減である。その基本的戦略は、エネルギー消費量削減と、エネルギー供給にあたって炭素強度が低く、可能な限り再生できるエネルギーを開発、利用するという二点である。これらの基本戦略に対して、土木分野は個々の土木事業において二酸化炭素を排出すると同時に、社会の基盤を形成することを通じて中・長期的に二酸化炭素の排出に深い関わりを持つため、その削減に貢献することが期待される。

また、土木は研究開発の面においても、気候変動問題のほぼすべての領域を対象としている。緩和策に関するものでは、さまざまな対策の連携、シナリオ研究、政策、産業構造変化、社会的な要因、経済的な側面などの課題に対して、土木分野の持つ広がりを活かした研究開発を推進していくことが求められる。

これらの特徴を持つ土木分野は低炭素社会形成にむけ戦略を立て、実行していくことが有効で

あり、また求められている。その戦略は以下の8項目に大別できる。

- 1) 土木工事における排出削減：建設機械の高効率化、省エネ型施工技術の開発など、土木工事における省エネにより温室効果ガスの排出削減を実施。
- 2) 土木材料由来の排出削減：セメントや鉄などの材料についてのリサイクル材料の利用、木材などの低炭素素材への転換など、土木材料のライフサイクルにおける温室効果ガスの排出を明らかにし、その削減を実現。
- 3) ライフサイクルを通じた土木施設からの温室効果ガスの排出削減：土木施設の長寿命化、および上下水道施設などの運用時の省エネ技術やエネルギー回収技術の開発と普及。
- 4) 政府調達における環境負荷削減メカニズムの組込：政府の公共調達を価格だけでなく、温室効果ガス排出量、リサイクル材の利用など、ライフサイクルでの環境負荷によっても評価する制度を設けるべき。
- 5) 土木構造物の利用により誘発される温室効果ガスの排出削減：ボトルネック踏切対策、ITSによる道路交通の円滑化など、交通施設利用時の省エネに資する技術の開発・普及。
- 6) 低炭素エネルギー技術の開発・支援：水力や風力などの再生可能エネルギーに関わる技術開発や普及などの支援、原子力発電の着実な推進や高効率火力発電や炭素回収貯留などの技術開発支援。
- 7) 都市・交通計画による低炭素都市システムの構築：都市計画、交通計画により低炭素型都市インフラと都市構造を形成。
- 8) 途上国支援：クリーン開発メカニズムなどを活用した技術や計画の支援により、途上国での温室効果ガス排出削減に貢献。

4 気候変動への適応に向けて

持続可能な社会は、水、食料、エネルギーの3つの安全保障の確保のもとに達成される。このとき、地球温暖化と気候変動、社会変化の不確実性の中で政策上、技術上の選択肢と、その賢い選択が必要となる。適応策の役割が極めて重要な水の安全保障では、土木技術は水問題・水災害に関して歴史上多くの成果を挙げてきた経験から、社会変化や地球温暖化の進展に応じて多くの選択肢を提示でき、また、様々な分析・評価方法を開発しており、目標に対する政策・技術を賢く選択できる。

さらに、選ばれるべき選択肢は、壊れにくくかつ壊れても迅速な復元が可能な粘り強い機能を有することが必要であり、土木技術はこうした面からノウハウを蓄積してきた。2に示した総括的方針に加え、以下の諸点が重要となる。

- 1) 適応策の主流化と顕在化：適応策は、社会的に混乱や誤解もなく円滑に、効果的、効率的に行われることが重要。このため社会・経済政策や国の安全保障政策に組む「適応の主流化」と、適応策の費用を明確に見込み、通常の対応に埋もれないようにする「顕在化」を行うべき。
- 2) 実現のための技術進展と制度・体制作り：構造物の更新時や災害復旧時に適応策を組み込むのが現実的。このため、外力予測や影響評価の精度向上、設計基準への反映など技術的な進展と、費用の確保など制度面の確立、影響と適応策の対応に関するデータベースなど

の体制作りが必要。

- 3) 賢い選択と粘り強い適応の実現：「賢い選択と粘り強い適応」を実現するために土木技術を結集させ、「地球温暖化賢人会議」を強力に支援することが必要。
- 4) 水工学・海岸工学・環境工学における適応策：水工学では、既存ストックの活用、画期的な水災害リスク評価手法の開発と公開、水資源政策の転換、諸外国の適応策への支援、水問題に関する教育の革新など、海岸工学では、防護、順応、撤退と、これらの組み合わせによる被害最小化と多面的効果の獲得、影響のタイムスケジュールを考慮した対策の実施など、環境工学では、水代謝システムの改善、都市の発汗機能の改善、栄養塩循環の改善による食料生産への寄与、病原微生物・熱帯伝染病対策の導入などを進めることが必要。

第2編 地球温暖化の影響

1 はじめに

近年、国内においても国際的にも地球温暖化問題が大きくクローズアップされている。2007年6月のハイリゲンダム・サミットで2050年に少なくとも50%の排出削減を真剣に検討することが確認され、その議論は2008年7月の洞爺湖サミットに引き継がれた。国際的な議論の焦点は、中長期的な温暖化対策の枠組みをいかに作るかであり、複雑で難しい国際交渉が行われている。

地球温暖化対策が21世紀の世界的な課題になった背景には、温暖化の影響の世界的な顕在化があると思われる。ヨーロッパを襲った熱波、ハリケーン・カトリーナの被害、オーストラリアの干ばつなど、今世紀に入って、目に見える異常気象の被害が続いている。また、北極海の海氷の縮小や干ばつによる農業生産への打撃なども毎年報告される。我が国でも、かつてない猛暑の年や集中豪雨、コメの高温障害、熱帯性の生物の北上など、その先触れと考えられる影響が現れている。

気候変動の深刻な影響を回避する方策には、緩和策と適応策という2つがある。緩和策は、温室効果ガスの排出削減と森林などによる炭素の吸収・蓄積を促進することによって温暖化の進行を抑制する対策であり、適応策は、防災や水資源管理などによって気候変動の悪影響を抑えるための対策である。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が示した将来の気候予測では、今後20年程度は、どの排出シナリオをたどっても $0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年というほぼ同じ割合で気温上昇が生じる。いったん大気中に排出された CO_2 は数十年といった長い期間留まるため、過去の排出による CO_2 が温暖化の推進力になっており、今後20年位は速いペースで温暖化が進行するのである。それでは今から排出削減をしても無駄かというところではなくて、今後の排出削減の努力が、さらに先の長期的な温暖化の進行を左右する。そのため、とりわけ中期的に適応策が必要となる一方、適応策だけで温暖化の影響を解消することは不可能なため、適応策と緩和策とのベストミックスが必要ということになる。

緩和策を進めようとするれば、エネルギー供給やものの生産・輸送・消費のあらゆる分野で大規模な技術革新と経済システムの変更、さらにライフスタイルの変革を必要とする。2050年に60～80%の排出削減といったドラスティックな長期目標は既存の個別対策だけでは達成できず、かつてない技術革新が必要になる。土木界は、建設事業からの CO_2 排出の削減といった直接的な対策から、低炭素型の地域作りという地域社会のあり方の変革まで、幅広い責任を有している。同時に、適応策は、防災や水資源管理、農林水産業、健康をはじめ国民生活の各分野で、気候変動の脅威から人々を守る対策であり、土木分野に深く関連するものである。

こうした対策を進める上で必要となる認識は、今後どのように気候変動が進行し、どのような影響が現れるかである。さらに、将来の影響の程度は、今後の緩和策と適応策の進み具合によって大きく左右される。今後の対策を考える上では、対策あり／対策なしの各種シナリオの下での影響予測が必要になる。地球温暖化影響小委員会では、温暖化対策にとって不可欠なこうした認識をまとめるために、日本への影響を概観し、土木の視点から特に重要な影響を抽出することを任務として、レビューを行った。

2 気候予測の概要

気候変動の予測研究は、多くの国・機関で行われている。それぞれ固有の前提条件やシナリオを用いており、それぞれ過去の再現性や将来予測の精度、特徴等が異なる。ここでは、環境省「地球温暖化影響適応研究委員会」による「気候変動への賢い適応―地球温暖化影響・適応研究委員会報告書」（環境省，2008）に示された、既存の気候予測シナリオに関する最新の知見を中心に、これまでに行われている気候予測の概要を示す。

2-1 IPCC 第4次評価報告書（AR4；IPCC，2007）の気候システムに関する主な知見

(1) 現状の評価

IPCC-AR4 では、観測結果に基づいて、近年の気候変動に関して以下のような内容が報告されている（図 2.1.1）。

- ・ 気候システムの温暖化には疑う余地がない。1906 年から 2005 年までに観測された 100 年間の世界平均の気温上昇値は 0.74°C 。
- ・ 1961～2003 年にかけて世界平均海面水位は年平均 1.8mm の割合で上昇した。また、グリーンランドと南極の氷床の減少が、1993～2003 年の海面水位の上昇に寄与した可能性が非常に高い。
- ・ 北半球及び南半球の両半球において、山岳氷河と積雪面積は平均すると縮小している。
- ・ 大雨の頻度はほとんどの陸域において増加。
- ・ 寒い日、寒い夜及び霜が降りる日の発生頻度が減少、暑い日、暑い夜及び熱波の発生頻度が増加。

また、「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガス（GHG）の観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い」と、人為起源の GHG の増加が温暖化の原因とほぼ断定している。

(2) 将来予測

IPCC AR4 では、SRES シナリオに基づく地球温暖化による気候変動の将来予測結果が示されており、そのうち主な変化は以下のとおりである。

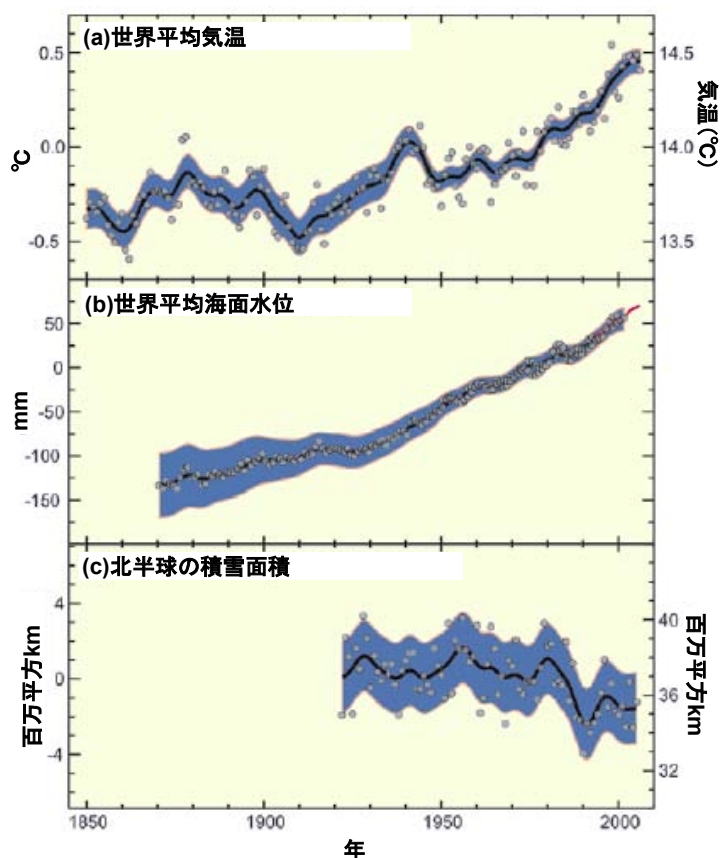


図 2.1.1 世界平均気温、世界平均海面水位、北半球の積雪面積
(1961～1990 年の平年値との比較) (IPCC, 2007)

1) 気温

今後 20 年間は 10 年あたり約 0.2°C の割合で上昇すると予測されている。また、2090～2099 年の世界平均地上気温は、1980～1999 年の平年値と比べて $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ の範囲で上昇すると予測されている（図 2.1.2）。

2) 海洋

2090～2099 年の世界平均海面水位は、1980～1999 年の平年値と比べて $0.18\sim 0.59\text{m}$ の範囲で上昇すると予測されている（表 2.1.1）。また、大気中の二酸化炭素濃度の増加は海洋の酸性化を引き起こし、21 世紀には世界平均の海面の pH は $0.14\sim 0.35$ 減少すると予測されている。

3) 降水量

高緯度地域では増加する可能性が非常に高く、一方、ほとんどの亜熱帯地域においては減少（A1B シナリオで 2090-2099 年の降水量が 1980-1999 年の平年値と比べて最大で約 20% 程度減少）する可能性が高いとされている（図 2.1.3）。

4) 極地への影響

特に大きな影響が予測され、すべての SRES シナリオにおいて、北極域及び南極域の海水が縮小すると予測されている。特に、北極海の晩夏の海氷は、21 世紀後半までにほぼ完全に消滅するとの予測もある。

5) 東アジア地域の気温、降水量

1961～1990 年の平年値と比べた東アジアの地上気温変化の予測値を参照すると、2010～2039 年の年平均気温は $1.4\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で、2040～2069 年の年平均気温は $2.5\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で、2070～2099 年の年平均気温は $3.4\sim 6.1^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で上昇するものと推測される。また、1961～1990 年の平年値と比べた降水量変化の予測値を参照すると、2010～2039 年の夏季（6～8 月）及び冬季（12～2 月）の期間

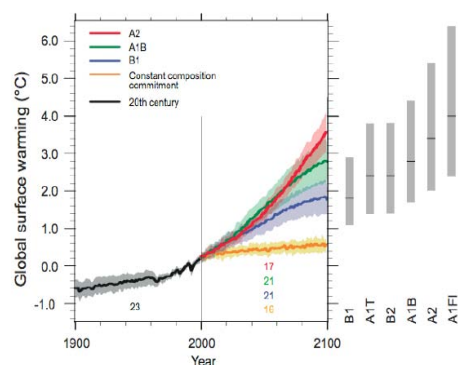


図 2.1.2 排出シナリオ別の 2090～2099 年の世界平均地上気温の上昇
(1980～1999 年の平年値との比較) (IPCC, 2007)

表 2.1.1 排出シナリオ別の 2090～2099 年の世界平均海面水位の上昇

Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)	
Case	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
B1 scenario	0.18 – 0.38
A1T scenario	0.20 – 0.45
B2 scenario	0.20 – 0.43
A1B scenario	0.21 – 0.48
A2 scenario	0.23 – 0.51
A1FI scenario	0.26 – 0.59

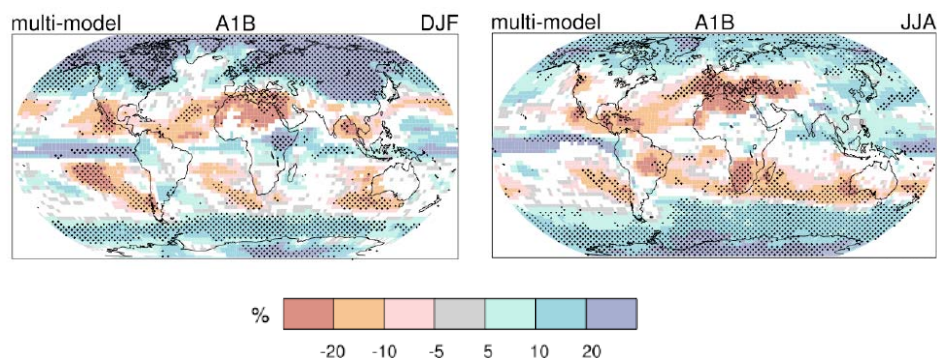


図 2.1.3 2090～2099 年の降水量の相対的な変化割合
(1980～1999 年の平年値との比較、A1B シナリオ) (IPCC,

降水量はそれぞれ2～3%、5～6%程度の範囲で、2040～2069年の期間降水量はそれぞれ5～8%、10～13%の範囲で、2070～2099年の期間降水量はそれぞれ8～14%、15～21%の範囲で増加すると予測されている。

2-2 日本の気候予測

(1) 現状

気象庁では、1974年以来5年ごとに「近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—」（通称：異常気象レポート）を刊行し、異常気象、地球温暖化などの気候変動、その他の地球環境の現状や変化の見通しについての見解を公表している。7回目となる「異常気象レポート2005」（気象庁、2006b）では、日本の気候変動等の現状として以下の内容が示されている。

1) 気温

近年、平均気温の上昇傾向が認められている。日本の年平均気温は1980年代後半から高温が続いており、特に1990年代に入ってから顕著な高温となった年が多い。統計を開始した1898年以降での年平均地上気温が高かった上位5年は全て1990年以降である（図2.2.1）。

2) 異常高温・異常低温・真夏日日数

近年、異常高温の出現数の増加及び異常低温の出現数の減少が認められている。1901～2004年の異常高温及び異常低温の出現数は、20世紀初頭と最近30年間の出現数を比較すると、異常高温が5.8倍に増加した一方、異常低温は約3割にまで減少している。また、熱中症の発症に結びつくような高温日が近年大幅に増加している（図2.2.2）。真夏日（日最高気温が30℃以上）の日数は1980年代以降、猛暑日（日最高気温が35℃以上）の日数も1980年代後半以降増加傾向となっており、猛暑日は最近では1970年代までの約3倍の出現頻度となっている。

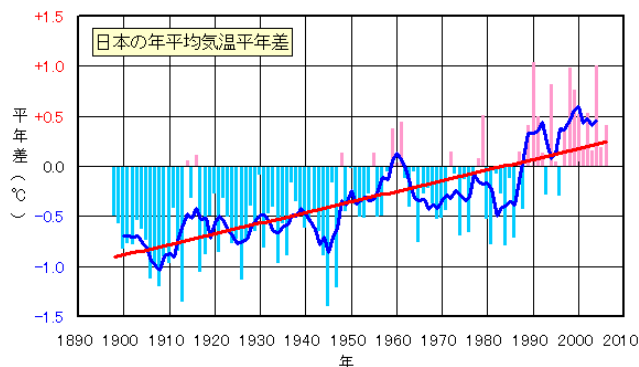


図 2.2.1 日本の各年の平均気温の平年値との差（気象庁、2006a）

青（太線）：平年差の5年移動平均値

赤（太線）：長期的な変化傾向

※平年値は1971～2000年の30年平均値

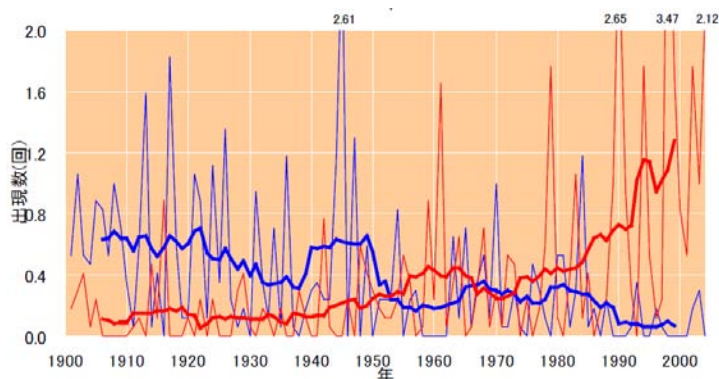


図 2.2.2 日本の異常高温と異常低温の出現数（気象庁、2006b）

赤（細線・太線）：異常高温の出現数

（年間値・11年移動平均値）

青（細線・太線）：異常低温の出現数

（年間値・11年移動平均値）

※値は1地点あたりの平均出現数を示す

（調査に利用した気象官署は17地点）

3) 降雨量・降雪量

近年は降水量の年々変動が大きくなっていることが認められている。全国平均の降水量において 1901～1930 年の平年比の標準偏差は 8.7%であったのに対し、1975～2004 年のそれは 12.3%と増加している。また、降雪量は、気象庁が観測している年最深積雪（前年秋～該当年夏までの最も深い積雪深）の長期的変化傾向（1962～2004 年までを対象として算出した 10 年あたりの長期変化傾向）が、北日本の日本海側、東日本の日本海側、西日本の日本海側のいずれの地域においても、それぞれ 4.7%、12.9%、18.3%の減少となっている。

4) 異常多雨・異常少雨

降水量の変動性が増加していることが認められている。1901～2004 年の異常多雨、異常少雨の出現傾向を見ると、1980 年代以降は異常多雨、異常少雨ともに出現数が増加する傾向にある。

5) 降水強度

弱い降水の減少傾向と強い降水の増加傾向が認められている。日降水量を 10 区分した降水強度別の年降水量の長期変化を見ると、弱い降水階級（階級 1,3）の年降水量は減少し、最も強い降水階級（階級 10）の年降水量は増加している。さらに、日降水量 100mm 以上、200mm 以上の出現数にも増加傾向があり、最近 30 年間（1975～2004 年）と 20 世紀初頭の 30 年間（1901～1930 年）を比較すると、100mm 以上の日数は約 1.2 倍、200mm 以上の日数は約 1.5 倍の増加となっている。

6) 台風

台風の発生数を見ると、1960 年代半ばと 1990 年代はじめにピークが見られ近年は比較的少ない傾向となっており、日本への接近数・上陸数についても発生数と同様の傾向を示している。また、強い台風の発生数を見ると、長期的に増減いずれかに偏る傾向はなく、発生割合も発生数の変動と似た傾向を示している。

7) 海面水位

過去約 100 年にわたる日本沿岸の海面水位は統計的に有意な上昇を示していないが、1980 年代後半から海面水位の上昇傾向は続いており、近年は 1950 年前後と並んで過去 100 年で海面水位が最も高い状態にある。2004 年の値は過去 100 年の平均値より 67mm 高く、過去最高記録を更新した。異常潮位（潮位偏差の高い(低い)状態が広範囲に数週間を越えて長期間続く現象）の発生回数の経年変化からは明確な傾向は見られていない。近年、西日本を中心に異常潮位などにより災害が増えている主な要因は、異常潮位の回数の変化よりも平均的な海面水位が上昇していることによる影響が大きいと推定される。

(2) 将来

わが国の将来の気候変化に関する予測情報としては、「異常気象レポート 2005」の主な項目の予測に用いられている RCM20 による温暖化実験結果や、AR4 で取り扱われた 17 研究機関 23 種類の全球気候モデルによる温暖化実験結果（以下、PCMDI データと呼ぶ）などが挙げられる。なお、温室効果ガスの排出シナリオについては、SRES シナリオのうち RCM20 は A2 シナリオを、PCMDI データは A2 シナリオと A1B シナリオ、B1 シナリオの 3 シナリオを想定して、将来予測を行っている。これらのモデルの温暖化実験結果による将来の予測結果を以下に示す。

1) 気温

PCMDI データに基づく整理結果によれば、2070～2099 年の年平均気温は 1961～1990 年の平

年値と比べて 1.3～4.7℃（地域別では 1.2～5.8℃）程度の昇温が生じ、高緯度地域でより昇温が大きくなると予測される。

RCM20 による温暖化実験結果においても、2081～2100 年の年平均気温は 1981～2000 年の年値と比べて 2～4℃程度（北海道の一部で 4℃以上）程度の昇温が生じると予測されており、高緯度地域で昇温が大きくなっている（図 2.2.3）。

2) 真夏日日数・真冬日日数

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の真夏日の出現数の年平均値は 1981～2000 年の年値と比べて全国的に増加（特に九州南部や南西諸島では 25 日以上増加）し、熱帯夜の出現数も全国的に増加（特に九州南部や南西諸島では 30 日以上増加）すると予測される。一方で、真冬日の出現数は全国的に減少（特に北海道の太平洋側やオホーツク海側では 40 日以上減少）すると予測される（図 2.2.4）。

3) 降水量・降雪量

PCMDI データに基づく整理結果によれば、2070～99 年の年降水量は 1961～1990 年の年値と比べて -2.4～16.4%（地域別では -8.4～22.4%）の割合で変化が生じると予測される。

降雪量については、RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の年平均降雪量は 1981～2000 年の年値と比べてオホーツク海を除く全ての地域で減少が予測される。特に現在降雪量の多い北海道から山陰にかけての日本海側での減少が大きく、多いところで年間 400mm（水換算）程度の減少が予測される。

4) 無降水日日数

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の無降水日の出現数の年平均値は、1981～2000 年の年値と比べて一部の地域を除いて増加し、特に北日本日本海側及び南西諸島で著しく増加すると予測される。

5) 強い雨の頻度

RCM20 による温暖化実験結果によれば、2081～2100 年の日降水量 100mm 以上の日の出現数の年平均値は、1981～2000 年の年値と比べて太平洋側の一部地域と北海道の一部を除く多くの地域で現在よりも増加すると予測される。また、日降水量 200mm 以上の日の出現数も近畿地方など一部を除く多くの地域でわずかながら増加すると予測される。

6) 台風（熱帯低気圧）

文部科学省の研究計画「人・自然・地球共生プロジェクト」の一環として、気象庁気象研究所や財団法人地球科学技術総合推進機構を中心とする研究グループが、約 20km という非常に高い水平分解能をもつ全球大気気候モデルの開発や数値実験に取り組んでいる。その結果によれば、温暖化により、全球的な熱帯低気圧の年間発生数は現在より減少するが、最大風速が 45m/s を超えるような非常に強い熱帯低気圧の出現数は増加すると予測されている。

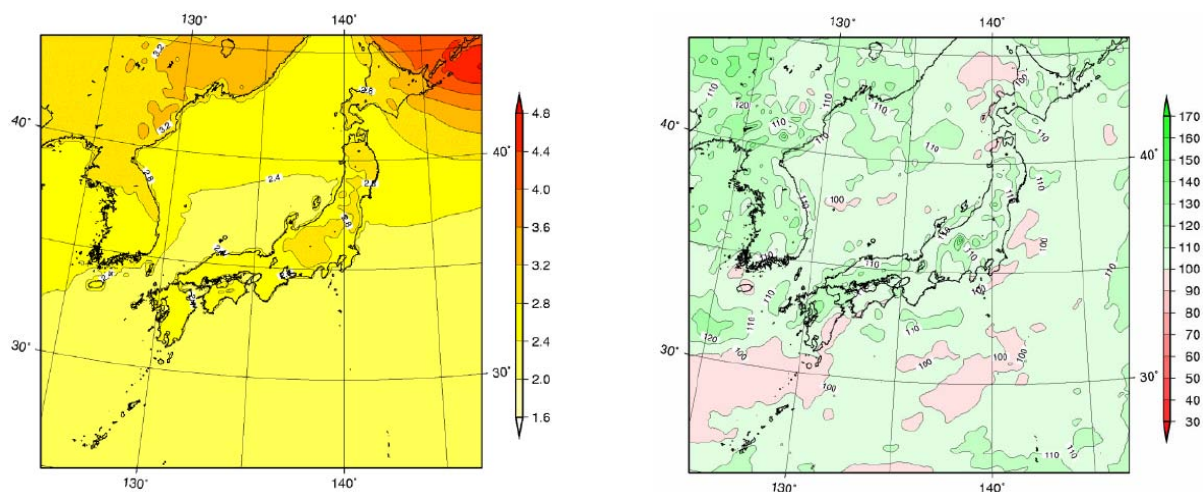


図 2.2.3 RCM20 を用いた気象現象の将来予測（2081～2100 年と 1981～2000 年の差）
（気象庁，2006b）

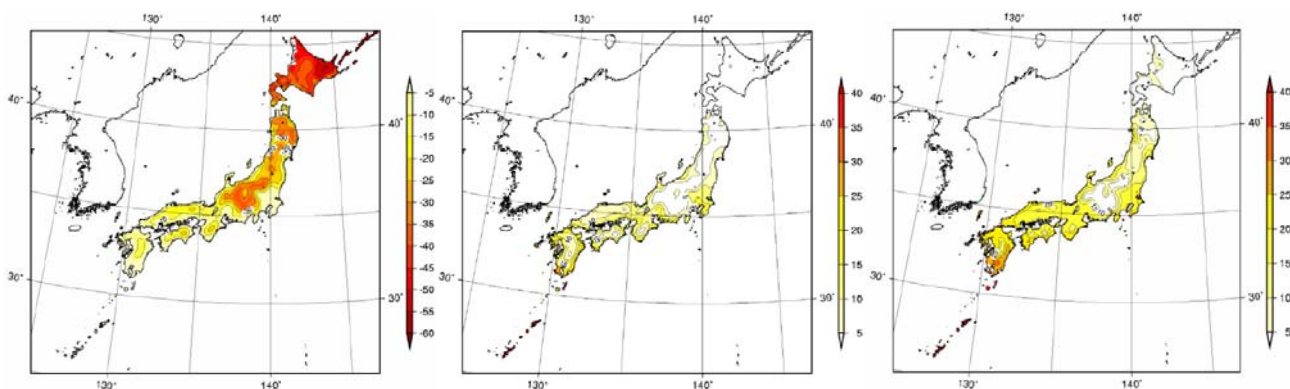


図 2.2.4 RCM20 を用いた各気象現象の年間出現日数の変化（2081～2100 年と 1981～2000 年の差）[日]
（気象庁，2006b）

参考文献

環境省，2008：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，340p..

IPCC，2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976p..

気象庁，2006a：気候変動監視レポート 2006 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について，88p. (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/>).

気象庁，2006b：異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～（Ⅶ），383p.

3 我が国に対する影響

3-1 水資源

(1) 降水量の変化

GCM(大気循環モデル)によると、将来気候において降雨量の増加と無降雨期間の拡大が示されている。これは年降水量、1 降雨イベントともにいえる。年降水量は、少雨の年が増えているとともに、多雨の年との年降水量の差が次第に大きくなりつつあり、年変動が大きくなる傾向が過去のデータから示されている（国土交通省、2007）。1 イベントの降雨についても、極めて短い時間スケールの豪雨と無降雨の渇水期間が拡大する傾向にある。こうした降水パターンの変化は水資源管理システムの運営を困難にする。

(2) 積雪量の変化

温暖化の影響が最も顕著に現れるのが積雪量である。冬季降水量の減少については明らかにされていないが、気温の上昇は、降雪を降雨に変化させると同時に冬季融雪量も増加させる。北陸から東北地方にかけては、春季（代掻き期）の水田の灌漑用水は融雪水に依存しているため、積雪水資源量の減少は、農業生産性のみならず河川環境にも大きな影響を与える。過去の記録によると平均年最深積雪について、10 年あたりの長期変化傾向は北日本の日本海側、東日本の日本海側、西日本の日本海側においてそれぞれ、 -4.7% 、 -12.9% 、 -18.3% となっており、東日本の日本海側、西日本の日本海側で有意な減少傾向が認められる（国土交通省、2007）。また、積雪減少量に対する農業用水の比率を見ると、日本海側より積雪量が少ない東北地方の太平洋側流域の方が深刻であることが示されている（那須他、2007）。こうした積雪量の変化において、植生が重要な働きをすることが示されており、常緑樹が落葉樹に比べて積雪期間が長くなることや、間伐が積雪期間に影響することが考えられている。

(3) 河川

河川水は様々な利権者に利用されており、最も重要な水資源であるといえる。しかし、日本の一人当たり水資源賦存量は欧米諸国と比べて少ないと同時に、急峻な地形のため多くの河川水が海に達してしまう。そのため、ダムや貯水池、ため池が、貯留効果を担ってきた。これらの多くの貯水池容量は、1980 年以前のデータによる河川計画流量によって計算されており、気候変動に対応できないことが危惧される。近年の気象データを基にした代表的な 10 年間の中で一番厳しい渇水年における供給可能量は、計画値の約 4 割程度しか供給できないことが示されており、ダムを計画・建設した段階で確保したはずの渇水対応能力が、気候変動によって、最近は有意に低下している（山本聡、2007；国土交通省、2003）。渇水の最近の例として、例えば、2005 年は、4 月以降、西日本を中心に降水量の少ない状態が続いた。4～6 月の 3 ヶ月間降水量は、東海地方から九州地方にかけての多くの地点で平年の 20～50%程度となり、54 地点で最小値を更新する渇水が生じている。ただし、河川流量は都市化に伴う地下浸透量の減少が気候変動より大きく影響することが知られており、土地利用や水利用の制限の効果が高いと考えられる。

気候変動に伴う気温上昇や渇水により、河川水の水温・水質に変化が生じ、これが水利用や水域の生態系等に影響を及ぼすことが想定される。既存の報告（尾崎ら、1999）では、9 年間にわたる国内の 34 の一級河川の水質データとその流域の気象データ（AMeDAS）を併せて、流域内

最下端の河川水質（水温、BOD、DO、DO 飽和度、SS、pH）への影響を統計的に解析している。その結果から、夏場には気温と水温に強い正の相関（傾き 1.4）が見られた。また、冬場に比べて、夏場では、その他の多くの水質項目でも相関が強く（1℃上昇に対して、BOD で 1.10 倍）、これは生物活動が活発化するためと推測している。香川県環境森林部環境政策課（2007）は、県内の 5 河川（財田川、土器川、綾川、香東川、鴨部川）について、1979～2005 年までの 27 年間に観測した水温測定結果の年平均値の変化を調べた結果、各河川とも年平均水温は上昇傾向にあり、その上昇率は 0.012～0.065℃/年であったことを報告している。降水パターンの変化に伴う汚濁負荷量の変化も報告されている。豪雨の発生は土砂流出を助長させるため、濁質成分の流出を多くさせる。一方、渇水期間の拡大も地表面の大気降水物の堆積量が増加するため、直後の降雨時に大量の汚濁物質が流出する。このため浄水場の水質管理は新たな対応を必要とされ、コストの増加をもたらす。

都市内の河川の存在は、ヒートアイランドに有効とされる。潜熱の移動や風による熱交換によって地表面温度を下げる効果がある。また、散水による気温減少の効果も認められており、都市の炎熱化を防ぐ水資源の効果も期待されている。

（4）湖沼

ダムや貯水池と同様に貯留効果が大きい湖沼も重要な水資源である。しかし、滞留時間が長いため、水質悪化の影響を受けやすく回復しにくい特徴をもつ。気温上昇に伴う流域蒸発散量の増加と無降雨期間の拡大は、湖沼の水量を減少させる。琵琶湖では、近年 2000 年 9 月に琵琶湖基準水位（B.S.L.）-0.97m、2002 年には 9 月から 12 月の長期にわたって同-0.9m 前後の低水位を記録する（最低水位は同-0.99m、11 月 1 日）など、渇水が頻発し、水位低下の度合いも大きくなってきている（滋賀県琵琶湖研究所、1996）。神奈川県においても 1996 年に、1967 年以来 29 年ぶりの渇水に見舞われ、相模湖・津久井湖・丹沢湖の貯水量が大幅に減少し、県営水道、横浜市営水道、川崎市営水道、横須賀市営水道は、1996 年 2 月 26 日から 5%、3 月 4 日から 10%の取水制限を実施し（県営水道、横浜市営水道、横須賀市営水道は同率の給水制限も実施）、一部地域で断水が発生する等の影響が出た。気候変動により大きな渇水の頻度が増える場合には、このような取水制限、給水制限、断水等の社会的な被害がもたらされることも考えられる（神奈川県ホームページ）。

気候変動に伴う湖沼の水質悪化は、河川水と同様の理由によるところが多いが、滞留性からより深刻な場合が多い。福島ら（1998）は、17 年間にわたる水質観測資料をもとに、霞ヶ浦における水質に気象が及ぼす影響を解析し、気温 1℃上昇に伴い、水温は 0.75～0.96℃、COD は 0.92～1.7mg/L、SS は 3.9～11.9mg/L 上昇していたことがわかった。琵琶湖では、1994 年の渇水期間の夏季には、北湖の表層水温が平年より高く、水温躍層の形成が強くなったこと、渇水のため河川からの栄養塩類・懸濁物の流入が少なく、表層水はきれいに見えるが（透明度は 9～14m と例年に比べ高い）、目に見えない躍層付近ではクロロフィル-a 濃度のピークがあり、水温躍層付近で植物プランクトンが増殖していることが報告されている。また、速水・藤原（1999）は、水温上昇による微生物活性の増加に伴い、貧酸素化の増加、水温上昇に伴う飽和溶存酸素濃度の低下、低温期間の短縮による水温成層期の長期化など酸素供給の不足による湖底の貧酸素化に拍車をかける可能性を指摘している。また、水温の上昇に伴い、富栄養化が顕在化する場合が考えられる。年平均気温が 10℃を越えると、急激にアオコ発生確率が上昇する傾向が見られたとしてい

る（草場ら、2007）。さらに、気温上昇だけでなく渇水（降雨量減少）によっても湖沼水質の変化がもたらされた例として、琵琶湖の例や宍道湖の例がある。1994 年の琵琶湖渇水では、夏季（6～8 月）の降水量が 208mm で、琵琶湖水位は最低のマイナス 123cm を記録した。水位低下時においては、植物プランクトンの栄養塩摂取及び強固な成層形成により下層からの N、P 補給が少なく、低濃度で推移し、秋口には北湖の透明度が高くなっていた。一方、浅い南湖では湖水の停滞と赤野井湾からの汚濁負荷により高めの推移となり、秋口までに 27 日連続でアオコが発生した（滋賀県琵琶湖研究所、1996）。気温低下時の大循環が湖沼環境に大きな影響を与えているとされ、躍層の存在が大循環を阻害し、低層の貧酸素化をもたらす。湖底が嫌気状態になると硫化水素を生じるため、生態環境に影響を与えると同時に水資源に適さない湖沼環境に変化する場合がある。

(5) 地下水

地下水に関しては、渇水時の代替水源として利用が増加し、過剰採取によって地盤沈下等の影響が想定される。地下水は安定した水温と水質のため最も利用しやすい水資源であるが、気候変動に伴い水温上昇と水質悪化が懸念されている。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が明らかになっている（谷口他、1996）。また、水質に関しては、地球温暖化による海面上昇に伴い、沿岸部での地下水の塩水化が起こることが想定されている。地下水を重要な水資源としている沿岸地域や島嶼にとっては、塩水化は深刻な温暖化影響となる。海面上昇と高潮による地下水への塩水侵入によって塩水化は加速する。また、沿岸域の開発は地下浸透量を減少させる傾向にあり、沿岸域の地下水資源は脆弱であるといえる。ガイベン・ヘルツベルグの理論式によると地下水水位の減少の 40 倍で塩水界面が上昇するとされ、淡水レンズからの揚水は急激な地下水資源の減少をもたらす。

(6) 水資源への影響とその対策

以上のような影響に対して、表 3.1.1 に示すような対策が提案されている。

表 3.1.1 水資源への影響と対策

対象	影響	対策
河川	渇水 (積雪量減少)	法制度の見直し（水利権の見直し、土地利用の制限） 新たな貯留施設の建設 浸透施設（透水舗装、浸透ます等） 雪ダム
湖沼	渇水 水質悪化	水利用制限 負荷量の減少、循環（曝気）施設の導入
ダム、調整池	管理の複雑化 堆砂 水質悪化	複数ダムによる総合管理 プレダム、森林保護、斜面保護 負荷量の減少、循環（曝気）施設の導入
浄水場	水質悪化	負荷量の減少
地下水	塩水侵入 枯渇	地下ダム、浸透施設 浸透施設、揚水制限

参考文献

本報告の多くの部分を環境省「気候変動への賢い適応-地球温暖化影響・適応研究委員会報告書-第三章」によっている。

国土交通省 土地・水資源局水資源部，2007：「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方研究会」／同省社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会。

那須貴之・風間聡・沢本正樹，2007：地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性，水工学論文集，第 51 巻，pp.361-366.

山本聡，2007：気候変動と水資源について，河川，2007-1 月号，pp.42-47.

国土交通省 土地・水資源局水資源部，2003：平成 15 年版日本の水資源について～地球規模の気候変動と日本の水資源問題～（第 1 編）。

尾崎則篤他，1999：気候変動が河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究，第 33 回水環境学会年会講演集，28.

香川県 香川の環境ホームページ (<http://www.pref.kagawa.jp/kankyo/data/0712/071225.htm>)

滋賀県琵琶湖研究所，1996：平成 6 年度琵琶湖の異常渇水の影響に関する調査研究報告書

神奈川県ホームページ

(<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/01/0104/suigenkaihatu/page20.html>)

福島武彦他，1998：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)，pp.180-187.

速水祐一・藤原建紀，1999：琵琶湖深層水の温暖化，海の研究，8，pp.197-202.

草場智哉他，2007：ダム貯水池の富栄養化（アオコ発生）の簡易的な手法の研究，H18 年度ダム資源池環境技術研究所所報，pp.3-9.

谷口真人，2005：気候変動と地下水，地下水学会誌，47(1)，pp.5-17.

3-2 防災（河川洪水、土砂災害、高潮）

(1) 河川洪水

1) 降水量の変化

環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)によれば、温暖化による豪雨増加は地域によって差があり、山岳域はより増加する傾向があると分析している。以下は引用である。

温暖化による豪雨の増加量を評価するために、GCMと確率降雨の概念を用いて気候変動による豪雨の増加量を算定した。図3.2.1はGCMによる日本全域の将来の雨の降り方(日雨量)の変化を示したものである。

図3.2.1に示す解析結果は、現在の降雨の統計値から求めたもので、50年に1回降るとされる豪雨と30年に1回降る豪雨の差を示している。求めた値は日降雨量である。これは気候シナリオMIROCによるとおおよそ現在と2030年頃の気候差に相当し、気候変動によって豪雨が増加することを表している。大きい値の地域は、他の地域より豪雨の増加が大きい地域である。この図によると、豪雨の増加量は、地域によって大きな差があり、太平洋沿岸や山岳地域の豪雨が大きくなる。つまり、これらの地域が、気候変動により、他の地域よりも災害が増加する可能性を示しており、気候変動に対する備えが他の地域より必要であると言える。

つぎに、国土交通省河川局 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策にあり方についての答申（社会資本整備審議会河川分科会、2008）では、以下の分析を行っている。

・年最大日降水量を 100 年後と現在とで比較した場合、RCM20 の予測結果の変化率（A2 シナリオ）は、概ね 1.0～1.5 倍となり、GCM20 の予測結果の変化率（A1B シナリオ）は、概ね 1.0～1.2 倍で、北海道、東北など地域によっては 1.3 倍になり、最大で 1.5 倍となる可能性がある。また、RCM20 の予測結果から、50 年後と 100 年後の 100 年確率最大日降水量を比較した結果（A2 シナリオ）では、50 年後の変化率は概ね 1.1～1.2 倍、100 年後の変化率は概ね 1.2～1.4 倍となる結果が得られた。

・これらの結果から、100 年後の降水量の変化を予測すると、現在の概ね 1.1～1.3 倍、最大で 1.5 倍程度となる可能性がある。

・全国を 11 の地域に区分して 100 年後の年最大日降水量を算出すると、北海道、東北で倍率が高くなる傾向となる可能性がある。

2) 洪水の増大

国土交通省河川局 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策にあり方についての答申（社会資本整備審議会河川分科会、2008）では、以下の分析を行っている（環境省地球温暖化影響・適応研究委員会報告書、2008）。

100 年後の降雨量の変化が、河川において想定される洪水の大きさに対して、どのような影響を及ぼすかについて検討した。具体的には、全国の一級河川のう

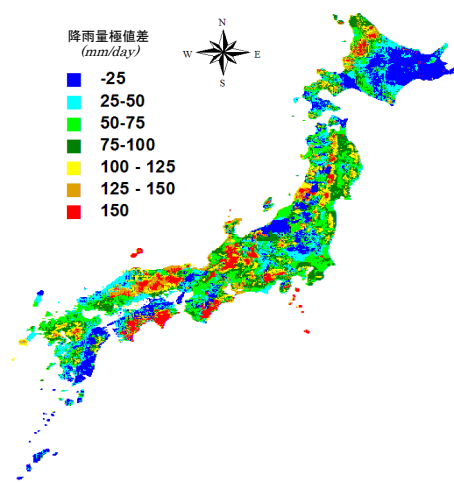


図 3.2.1 30 年に 1 回の豪雨と 50 年に 1 回の豪雨の日降雨量の差(mm/日)

（環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008）

ち、各地域から 1 河川ずつ選び、100 年後の降水量の変化率に相当する倍率（1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍、1.5 倍）を計画降雨量に乘じて、100 年後および現在の計画の治水安全度（降雨量の年超過確率）と基本高水のピーク流量の変化を試算した。原計画の計画降雨量を上記の倍率で引き伸ばし、年超過確率を求めた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・現計画の治水安全度を 100 年後においても確保するとすれば、非常に大きな治水安全度に相当し、これまでの考え方にに基づく治水対策のみでは対応することは極めて困難である。

- ・100 年後の基本高水のピーク流量を試算した結果、計画降雨量の倍率が高くなるほど基本高水のピーク流量の倍率はそれ以上の倍率で大きくなる傾向が見られた。このことから、降水量の変化が大きくなればなるほど、より大規模な治水対策が必要となり、対応はより一層困難となる。

- ・100 年後の現計画の治水安全度は、1/200 の場合 1/90-1/145、1/150 の場合 1/22-1/100、1/100 の場合 1/25-1/90 と大きく低下する可能性がある。浸水、氾濫の危険度が増大する可能性がある。

(2) 土砂災害

環境省 地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)によれば、温暖化によって、豪雨による斜面崩壊による土石流の発生、河道への土砂堆積、ダム貯水池への堆砂が加速し土砂災害が増加する可能性があると分析している（社会資本整備審議会河川分科会、2008）。以下は引用である。

温暖化による土砂生産への影響を評価するために、斜面災害リスクを用いて土砂生産分布を算定した。ダム湖の堆砂量とダム

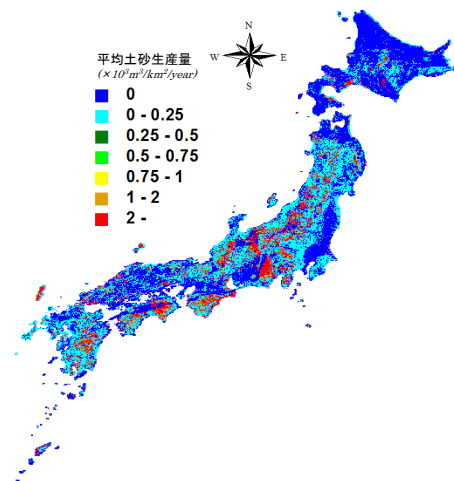


図 3.2.2 斜面災害に伴う土砂生産分布図
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

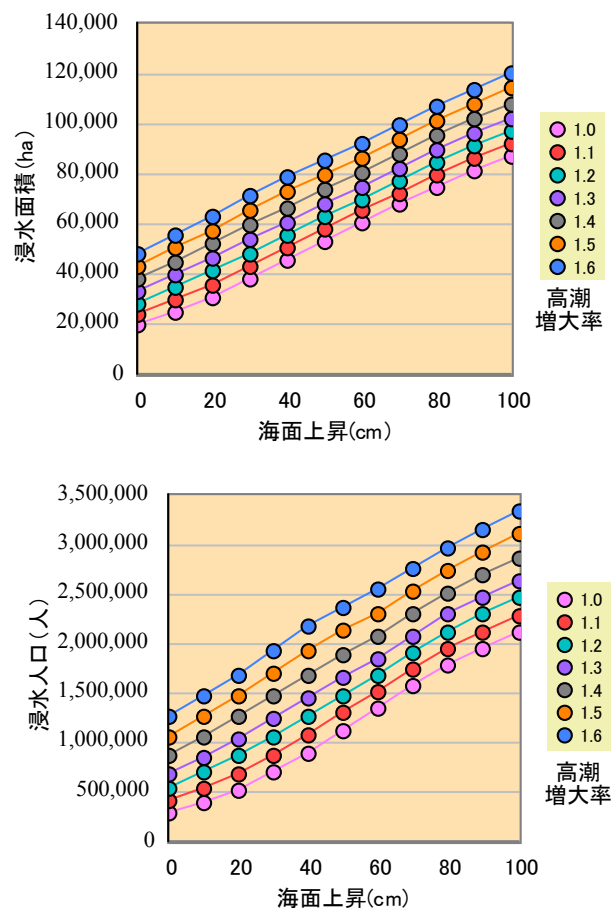


図 3.2.3 高潮で浸水する面積・人口の海面上昇と高潮増大による変化
(環境省 地球環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

湖流域の斜面災害リスクの関係を求めた。その結果、堆砂量はリスクに対して指数関数的に増加する。これは、豪雨量の増加の割合に対して、堆砂量は加速度的に増加することを意味している。この関係を用いて、斜面災害リスク分布図を土砂生産量分布に変換したものが図 3.2.2 である。関東から九州へ、西南日本を縦断する大断層である中央構造線に沿って大きな土砂生産量の地域が広がる。もともと土砂生産の多い地域はより大きな土砂生産量になる。特に北アルプスから南アルプスにかけては、土砂生産の増加が危惧される。また、山岳地の土砂生産はダム湖の堆砂を促す。この影響により、洪水調整能力を減少させるだけでなく、栄養塩の流出に伴う水質悪化も加速させることが推測される。

これらの対策として、砂防事業やプレダム（ダム湖流入河口付近に築く堆積用ダム）のようなハードによる堆砂対策や堆砂を取り除く浚渫や排砂操作が考えられる。サンドバイパス（堆砂を下流へ移動させること）や排砂操作は、河床や海岸線の安定に重要であるが、下流への影響が大きいため、慎重に計画する必要がある。

(3) 高 潮

日本では、海に面する市町村に人口の 46%、工業出荷額の 47%、商業販売額の 77%が集中し、沿岸域は社会・経済活動にとって重要な地域になっている。温暖化が進行した場合、海水の膨張や陸上雪氷の融解等で海面が上昇し、海水温の上昇等により日本に來襲する台風が大型化すると考えられている。そうした変化が進めば、沿岸域では高潮による浸水の危険度が高まることになる。

環境省 地球環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-4(2008)では、温暖化による高潮危険度を評価するため、高潮による浸水が生じる地域の面積とそこに居住する人口を予測している。

高潮浸水の危険度の予測は、地表面の高低と防護施設の情報を持つデータ空間をコンピュータ上に構築し、その海側境界に海面上昇と高潮の増大を想定した海面変動を与え、それに対応する海水の流入と陸域での湛水を計算することによって行なっている。計算の対象地域は、人口や資産の集積が大きく、低地が大きく広がる三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）の奥部と台風の来襲頻度が高い西日本（中国地方、四国地方、九州地方）である。海面上昇は 0cm から 100cm まで、高潮偏差は 2000 年頃の高潮偏差を基準にして 1 倍から 1.6 倍までを計算している。

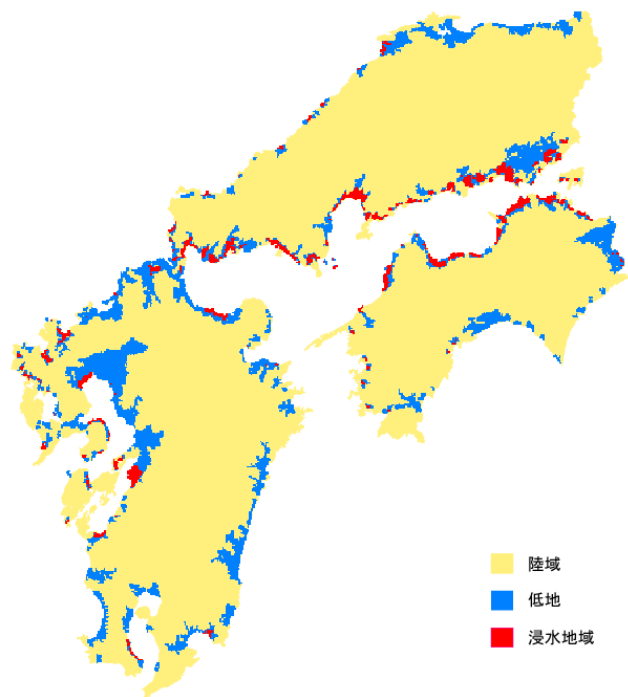


図 3.2.3 2100 年の西日本の高潮浸水
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

計算結果によれば、高潮による浸水面積と浸水人口は、全体として直線的に増加する。そのため、高潮に対する対策はある水準までは様子を見、その水準に近づいたときに対策を講じるのではなく、状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが重要だとしている。

また、同プロジェクトでは、気候シナリオ MIROC をもとにした 2100 年気候時における高潮に脆弱な地域の平面分布を提示している。

それらによれば、西日本では、温暖化が進行した場合に高潮浸水の危険が認められる地域は、瀬戸内沿岸、有明海沿岸、八代海沿岸、北西九州に多い。高潮浸水に脆弱な場所の特徴は、閉鎖性海域や入り江に多く分布していることである。そうした場所は、古くに開発されたため護岸や堤防等の防護水準が低かったり、港湾や漁港として海陸を往来するため防護水準が低かったりすることが特徴である。

東京湾、伊勢湾、大阪湾は奥部にはゼロメートル地帯を含む大きな低地が広がっている。そこは、大都市圏の市街地や臨海工業地帯が広がり、浸水を受けると大きな被害が発生する。それら地域の中で高潮に脆弱だと考えられる場所は、東京南部沿岸、名古屋港内、大阪中南部沿岸で、比較的古くに開発された埋立地とその周辺である場合が多い。

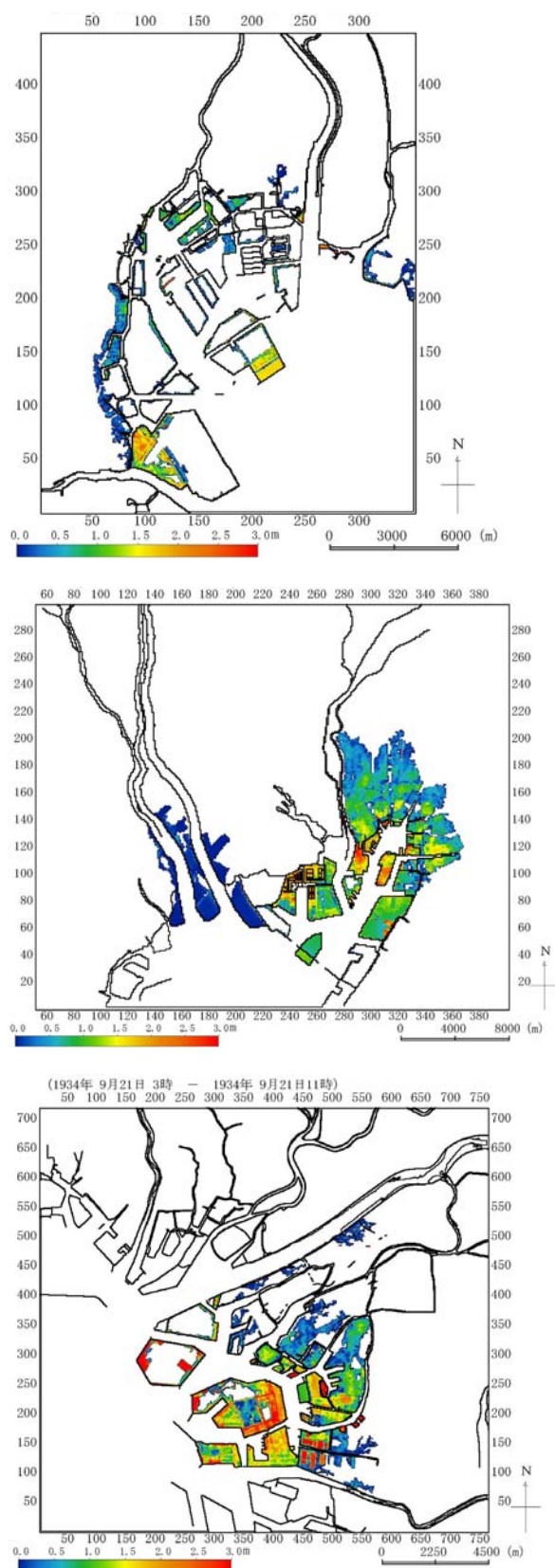


図 3.2.4 2100 年の三大湾奥部の高潮浸水深
(上段：東京湾，中段：伊勢湾，下段：大阪湾)
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

参考文献

温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－，環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」，

<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/>， 95p.

環境省，2008：気候変動への賢い適応，地球温暖化影響・適応研究委員会報告書，

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html， 400p.

国土交通省河川局，2008：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策にあり方について（答申），社会資本整備審議会河川分科会，<http://www.mlit.go.jp/common/000017547.pdf>， 15p.

3-3 自然生態系

(1) 顕在化している影響

温暖化の進行に伴い、日本の生態系にも様々な影響が現れていると報告されている（地球温暖化影響・適応研究委員会，2008）。自然生態系は、気温や二酸化炭素濃度の上昇、および、降水量・積雪変化などの気候変化、気候変化に伴う自然変化（河川流量、水温・水質変化、土壌変化）によって多大な影響を受ける。また、人間活動によっても大きな影響を受け、それぞれが複合的に影響しあっていることに注意しなくてはならない。

1) 陸上生態系

- ・ 大気の乾燥化による水ストレス増大により平坦地での過ぎの衰退減少
- ・ 冬の平均気温上昇と積雪期間短縮によってニホンジカの越冬地が拡大し、ニホンジカの被食による木本の衰え
- ・ 気温上昇に伴い病原マツノザイセンチュウの媒介者マツノマダラカミキリが高緯度・高標高へ拡大し、マツ枯れ被害が拡大
- ・ 温暖化による富士山永久凍土の下限の上昇
- ・ 湿原面積の縮小（群馬県と新潟県の境にある平ヶ岳頂上部湿原の面積が、1971～2004年までの33年間で約10%縮小）
- ・ 植物季節変化（開芽の早まりと落葉の遅れ）

2) 海洋生態系

- ・ 過去50年のデータ分析によると、オホーツク海を含む北太平洋の中層水の水温が上昇し、溶解酸素濃度が減少傾向
- ・ 気象庁の沿岸海氷観測によると毎年の流氷期間が減少
- ・ 海水温上昇に伴う海洋生物の分布や量的変動（日本周辺で、アオウミガメ、アカウミガメ、ミズクラゲ、カブトクラゲ、ヒョウモンダコ、ミドリイガイ、有毒渦べん毛藻類、カニ類など）
- ・ 干潟・藻場に生息する個体群分布の北上
- ・ 種間相互作用の変化を通じた生態系変化（例えば、南方系の魚類であるナルトビエイの増加により、サリやカキが大量に摂食されたり、草食性の魚類であるアイゴが温帯域のアマモ場で増加することで、アマモを過剰摂食することにより藻場を衰退させる）

(2) 予測される将来影響

1) 陸域生態系（地球温暖化影響・適応研究委員会，2008；温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008）

ブナ林分布適域は、全国では、現在比で 65～44%（2031-2050 年）、31～7%（2081-2100 年）に減少し、西日本や本州太平洋側ではほとんど消滅すると予測されている。白神山地（世界遺産地域）の 77%を占めるブナ林の分布適域も、2031-2050 年には 44.3～2.9%、2081-2100 年には 3.4～0.0%に減少すると予測されている。さらに、北海道における温暖化の北上速度は 10～50km/100 年であるが、ブナの移動速度は 1～2km/100 年（本州の過去最大値は 23.3km/100 年）であるため、ブナの移動が気温上昇に追いつけない可能性が懸念されている。

マツ枯れ危険域は、1～2℃の気温上昇により、現在被害のない青森県平野部にまで危険域が拡大する。さらに気温上昇が 2℃を超えると、岩手県内陸部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に壊滅的な被害が及ぶ可能性がある。

チシマザサ（ネマガリダケ）の分布適域は、現在比 54～45%（2031-2050 年）に減少し、佐渡島ではほぼ消滅すると予測されている。

ハイマツの分布適域は、全国では、現在比で 49～56%（2031-2050 年）、31～14%（2081-2100 年）に減少し、東北地方では、現在比で 14～6%（2031-2050 年）、9～0%（2081-2100 年）とほぼ消滅すると予測されている。

シラベ（シラビソ）の分布適域は、全国では、現在比で 48～26%（2031-2050 年）、23～13%（2081-2100 年）に減少し、四国では適域が消滅すると予測されている。

高山生態系は、分布可能域の下限上昇に伴い「追い落とし現象」やニホンジカによる食圧・跡圧によって消失する可能性が懸念されている。

2) 海洋生態系⁴⁾

海水温上昇を、短期（30 年後）では 1.0℃、中期（50 年後）では 1.5℃、長期（100 年）では 3.0℃と設定した場合、温帯性と亜熱帯性の海洋生物の分布境界となる年間最高水温 29℃が、現在の九州南方から、50 年後には中国・四国沿岸域に、100 年後には完投や北陸沿岸に達することが予測されている。このとき、浮魚類は遊泳力が強いので、分布域が変化するものの影響が軽微であり、底魚類は、水深 100m 以深の水温上昇がわずかであるため、影響が現れない。一方、沿岸に生息・養殖する種や海藻は短期から影響が出ることが懸念されている。

サンゴ礁やマングローブ生態系は、温暖化に伴う海面上昇、大型台風の頻発、高水温によって、様々な被害を受けると予測されている。

(3) 土木施設への影響と対策

温暖化による自然生態系への影響と関連した土木施設への影響は、現状ではあまり無いと考えられる。しかしながら、自然生態系への影響を軽減するために、1) 温暖化によって生態系の分布が変化する場合、できるだけ自然でスムーズな移動を可能にするような生態学的回廊の設置（例えば、森林生態系機能をバランスよく発揮させる森林の配置や、効果的な魚道など付帯設備の設置）、2) 生態系保全を考慮した土木施設の設置、3) 人間活動による生態系への影響を軽減するような土木施設の敷設（例えば、淡水生態系への影響を軽減するための、湖水保全のための、面源からの排水を効果的に集めて処理するためのインフラ整備）、などの観点から、土木技術を活か

すことができると考えられる。

参考文献

地球温暖化影響・適応研究委員会，2008：気候変動への賢い適応，

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html.

温暖化影響総合予測プロジェクトチーム，2008：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－，環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」，

<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/>，95p.

桑原久実・明田定満・小林聡・竹下彰・山下洋・城戸勝利，2006：温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測、地球環境 Vol.11、N0.1、49-57

3-4 食料生産

(1) 概要

世界の主要穀物の生産は、品種改良、栽培技術などの進歩により過去においては人口の伸びよりも大きい生産量の増加率を示してきた。しかし、1980年代からその伸びが鈍る傾向が見え始めるとともに変動も増大する傾向が現れてきた。そして今後、食料供給をさらに不安定化させる要因として次のことが懸念されている。

- ・ 気候変化とそれに伴って頻発すると予測されている干ばつ、大雨、高温などの異常気象
- ・ 途上国の経済発展、人口増加による食料要求量の増大と自給率の低下
- ・ 貿易依存、国際分業化による世界の穀物の主要輸出国の北米、南米ならびにオーストラリア大陸への極端な偏在化
- ・ バイオマス燃料との競合

ここでは、気候変化がわが国の食料供給に引き起こす影響について、国内生産への直接影響と世界の食料需給関係の変化を介した間接影響とに分けて推計を行った結果を報告する。ただし前者については、わが国の主食であるコメ生産に対する影響を対象とする。

(2) 国内生産（コメ生産）への直接影響

1) 影響評価の方法

気候変動に伴うわが国のコメ収量（単位面積あたりの収穫量）の変動リスクを評価するために、温度、日射、および大気中の二酸化炭素濃度といった気象環境とイネの生育、コメ収量との関係について、日本全国を県単位で記述する機構的モデルを構築した（図 3.4.1）。このモデルは過去の気象環境の状況から県別平均出穂日ならびに平均コメ収量の年変動を定量的に再現するとともに、それに気候シナリオを入力することにより、将来の気候変化がイネの生育、コメの収量に及ぼす

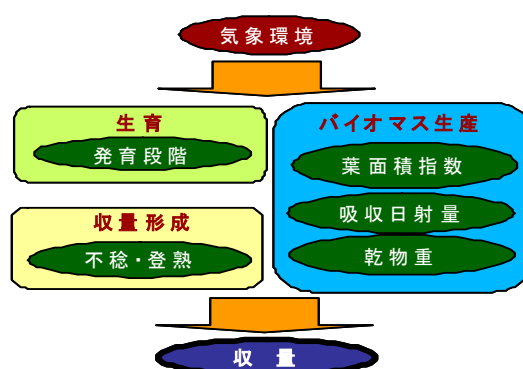


図 3.4.1 県別コメ収量推定モデルの構造

影響を推定するものである。気候シナリオとしては MIROC、 A1B を入力した。

2) 県別コメ収量推定モデルによる気候変化の影響予測

■コメ収量は、北日本では増収、西日本では現在とほぼ同じかやや減少する傾向が見られる

コメ収量は、移植（田植え）から出穂までの栄養生長過程と出穂から収穫までの^{ねんじつ}稔実・^{とうじゅく}登熟過程における気温と日射量によって決まる。気温上昇は生育を速めてバイオマス蓄積、出穂後は子実^{しじつ}形成に影響を与える。

県別コメ収量推定モデルでは移植日を現在のままと仮定すると、2046～2065 年の平均収量は、現在（1979～2003 年平均）に比べて、北海道および東北においてそれぞれ 26%、13%増収すると推計された（図 3.4.2a）。一方、近畿、四国では、両地域とも現在に比べて 5%減収すると推定された。この傾向は 2081～2100 年ではより強く現れ、減収地域は中国、九州へ広がると推定された（図 3.4.2b）。

■平均収量が減少する地域と同じ西日本を中心とする地域では、収量の年々変動も大きくなる傾向が見られる。

図 3.4.2c および d は、それぞれ 2046～2065 年および 2081～2100 年の期間における収量の変動係数（その期間の値の標準偏差を平均値で除したもの）の変化を示している。平均収量が減少する地域とほぼ同じ地域（近畿、四国、中国、九州）で、変動係数が大きくなると推計され、収量の年々変動、とりわけ不作年が頻発することを示唆する。これは食料供給の不安定化をもたらす、平均的变化よりも深刻な問題を引き起こすと考えられる。

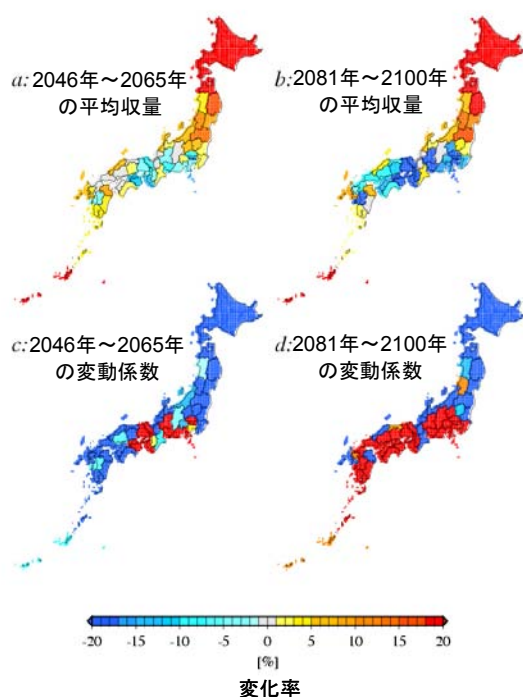


図 3.4.2

気候シナリオ（MIROC、A1B）によるコメ収量の変化推計結果. a, b : 平均収量、c, d : 20 年間の収量の変動係数

（環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008）

■全国平均収量は 2060 年頃までは増加するが、その後減少すると推計される

図 3.4.3 は全国平均収量について、年々変動を表す時系列を示したものである。2040～2060 年にかけて収量の増加トレンドが見えるが、その後、平均収量は減少するとともに年々変動が大きくなると推計された。温暖化により北日本を中心として平均的には増収の可能性はあるが、年々変動の増大は、平均気温が高い環境下においても冷害が発生する危険性もあることを意味する。

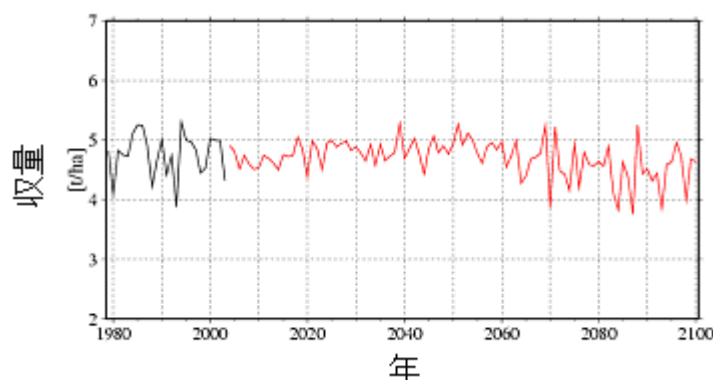


図 3.4.3

気候シナリオ (MIROC、A1B) による全国平均収量の時系列推定値
(環境省地球環境研究総合推進費
戦略的研究開発プロジェクト S-4, 2008)

(3) 世界の食料需給関係の変化を介した間接影響

1) 影響評価の方法

気候変化が及ぼす食料需給への影響を考えるには、作物収量の変化だけでなく作付面積への影響を考慮に入れ、生産量(=収量×面積)として評価する必要がある。生産者は市場の価格変化に応じて作付面積を変え、農家は生産している農産物の来年の価格が上昇すると期待すれば作付面積を増やす。市場価格は穀作物の在庫量変化や国際貿易などによって決定される。ここでは、気候変化とともに、そのような経済活動の変化に伴う国別の食料需給関係への影響を評価するために、これまで開発してきた世界食料モデルを用いた解析を行った。気候変化による影響のみを見るために、社会経済シナリオは固定して、気候変化が起きずに平年の気象状態で推移する場合(ベースライン)とシナリオに沿って気候変化する場合との算定結果を比較した。この際、シミュレーションの基準年は 1998 年であり、2030 年までを予測期間とした。

気候変化シナリオは、IPCC の温室効果ガス排出シナリオ (SRES) A2 に沿って、英国ハドレー気象研究所の GCM、HadCM3 で推計された結果を国別に集計したデータ(気温と降水量)を利用した。

2) 世界食料モデルによる気候変化の影響予測

■期間内(2030 年代まで)のアメリカの主要穀物生産量の増加率は気候変化により減少する。期間内の日本への食料供給に対する影響は少ないが、トウモロコシの供給量増加率は減少する。期間内の世界全体の穀物生産量に関しては大きな影響はない。

はじめに、主要穀物の世界市場の価格リーダー国であるアメリカの生産量の動向を見る。図 3.4.4 は、2005 年から 2030 年までの各穀作物の年間平均生産量増加率を示している。ベースラインでは、トウモロコシと大豆の生産量の年間増加率はそれぞれ 0.67%、1.97%であるが、気候変化が起きた場合では、それぞれ 0.55%、1.81%に低下する。小麦生産は、カナダやオーストラリアなど他国の生産量が増加するため、ベースラインの場合、年間 0.21%の減少となるが、気候変

化した場合には、年間減少率が 0.27%へとさらに低下すると推計された。

わが国への食料供給量の年間増加率を図 3.4.5 に示す。ベースラインでは、トウモロコシ、他粗粒穀物、大豆の供給量は、それぞれ年間 0.78%、1.50%、0.48%増加するが、小麦とコメの供給量は、それぞれ年間 0.16%、0.71%減少する。気候変化した場合には、トウモロコシの供給量は、パーセンテージが 0.048 だけ減少するが、その他の穀作物の供給量に変化は見られないと推定された。

世界全体での気候変化の影響について、図 3-5-6 に各穀作物の年間生産量増加率を示した。ベースラインでは、年間の生産量増加率は、小麦は 1.56%、トウモロコシは 1.67%、他粗粒穀物は 1.91%、コメは 1.72%、大豆は 1.85%、それぞれ増加するが、気候変化した場合では、パーセンテージの値が、それぞれ 0.021、0.010、0.012、0.032、0.025 だけ減少する。とりわけコメは相対的に温暖化の影響を受けやすく、増加率の減少が大きいと推計された。

以上をまとめると、温暖化の影響を大きく受ける地域はあるが、世界合計で見るとそれほど影響は大きくないと言える。それは、単純な合計による正負の影響の相殺のほかに、貿易によって地域間で農産物が移動し、世界全体への影響が緩和されるからである。

ただし、この結果は 2030 年代頃までの推計であり、使用した気候変化シナリオでは、全球平均気温の上昇幅は高々 1℃程度である。したがって、とりわけ主要生産地域が分布する中緯度地域では、温暖化の影響は顕著に表れない。IPCC の第 4 次評価報告書によれば、全球平均気温が現在より 3～4℃以上上昇すると中緯度から高緯度にかけての農業地帯での生産性が低下すると報告されている。

参考文献

本報告は、環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008：温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究，3. 農業への影響 の抜粋によっている。

横沢正幸、飯泉仁之直、小寺昭彦、坂本利弘：県平均水稻収量の推定モデル、P1473、農業環境

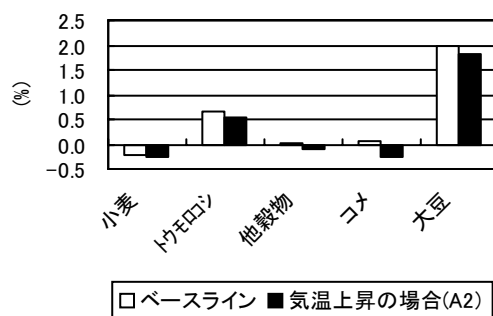


図 3.4.4 アメリカの穀作物の年間生産量増加率

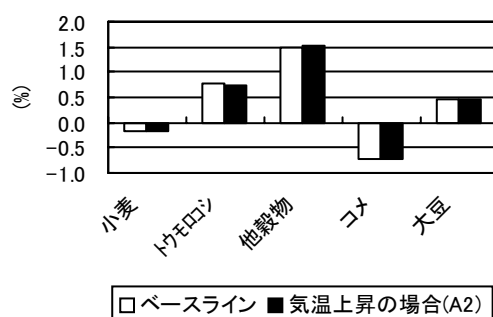


図 3.4.5 日本の穀作物の年間供給量増加率

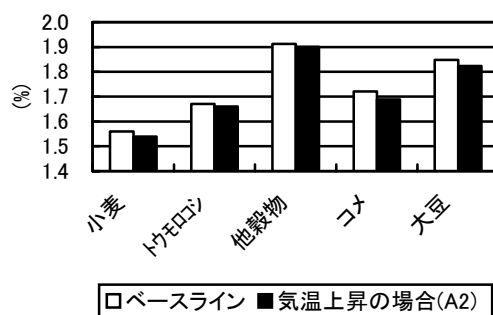


図 3.4.6 世界の穀作物の年間供給量増加率
(環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-4，2008)

工学関連学会 2006 年合同大会、2006.

Furuya J, Koyama O : Impacts of climate change on world agricultural product markets: estimation of macro yield functions. *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)* 39(2), pp.121-134、 2005.

3-5 われわれの生活と健康に関する影響

(1) 地球温暖化とわれわれの生活

地球温暖化は自然環境や社会環境にさまざまな影響を与え、最終的に我々の生活にさまざまな影響を及ぼす。環境省（2008a）は国民の立場にたって、図 3.5.1 に示すような①安全な暮らし、②健康な暮らし、③経済的に豊かな暮らし、④快適な暮らし、⑤文化や歴史を感じられる暮らし、の 5 分類に基づいて温暖化影響を整理している。

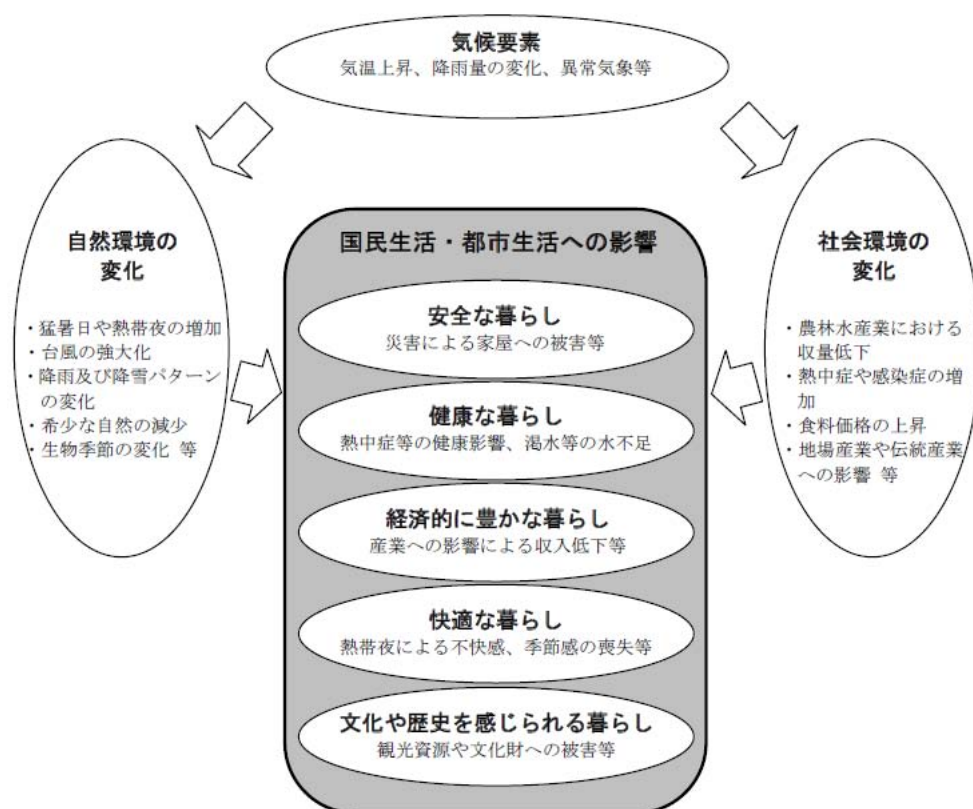


図 3.5.1 地球温暖化の要因及び国民生活・都市生活分野への影響に関するフロー
（環境省、2008a）

ここでは、この 5 分類に基づいて、現在把握されている影響および将来予想される影響の事例を紹介する。温暖化による影響であるかどうか現時点では明確には判断し難いが、その可能性が高いと考えられる現象や温暖化が進行すればさらに増加すると考えられる現象を対象としている。

(2) 安全な暮らしに関する影響

安全な暮らしに関する影響としては、異常気象（台風の強大化、豪雨、渇水等）に伴う家屋への浸水や土砂崩れ、都市施設への被害など、国民の生命や個人資産へ直接影響を与える家屋への

被害、人間生活の場（都市／山地）への影響が考えられる。現在把握されている影響や将来予想される影響の事例は、3.(1)や3.(2)に記載されている。

(3) 健康な暮らしに関する影響

健康な暮らしに関する影響としては、暑熱の影響、感染症への影響およびその他の影響（大気汚染、自然災害、衛生害虫）に分けられる。それぞれにおける温暖化影響のメカニズムを構成する要素を表3.5.1に示す。ここで挙げられた影響のうち自然災害については3.(1)や3.(2)に記載されている。

暑熱の影響としては、猛暑となった2007年には熊谷市と多治見市で日本最高気温（40.9度）を更新するとともに、多くの都市で過去最高の熱中症患者数を記録した。温暖化の進展とともに、熱波による死亡や熱中症のさらなる増加、あるいは熱帯夜の増加による睡眠障害などが懸念されている。気温上昇に伴い熱ストレスによる死亡確率については、2100年までに変化の小さい県でも約2倍、大きな県では5倍以上にもなると予測される（環境省、2008b）。死亡率が最低になる日最高気温は寒冷的な地域で低く温暖な地域で高いことも示されており（環境省、2008b）、北日本など暑さになれない地域で影響が大きくなることが予想される。また、高齢者が特に暑熱への影響を受けやすいことに注意が必要とされている（環境省、2008a）。

感染症への影響としては、デング熱、チクングニヤ熱などの媒介蚊であるヒトスジシマカの生息域（環境省、2008b）や水系感染症を引き起こすビブリオ・バルニフィカスの発生地域（古城、1999）の北上が報告されている。また、東南アジアからの日本脳炎媒介蚊の沖縄地方への侵入が確認されている（環境省、2008a）。これらの現象は直接該当する疾病の増加に結びついてはいないが、これらの疾病が発生しうる素地を有する地域が拡大していると言える。将来においては、温暖化に伴い水系感染症（コレラ、腸炎ビブリオ）や蚊媒介性感染症（デング熱、リフトバレー熱、チクングニヤ熱）などについて、これらが発生しうる地域が拡大するとともに、発生そのものの増加が懸念されている。一方で、温暖化影響としてよく指摘されるマラリアの影響については、我が国における流行の可能性が低いという報告がある（環境省、2008b）。

また、気温上昇による光化学オキシダント濃度上昇に伴う健康への悪影響の可能性も指摘されている（環境省、2008a）。

表 3.5.1 健康分野における温暖化影響のメカニズムの構成要素（環境省、2008a）

カテゴリー		気候要素	自然的要素	社会的要素	影響
暑熱の影響		● 夏季の最高気温 ● 湿度 ● 日射	● 地形	● ヒートアイランドの原因となる都市構造・排熱	● 熱中症 ● 死亡リスクの増加 ● 睡眠障害
感染症への影響		● 夏季や冬季の気温、年平均気温 ● 雨量 ● 湿度	● 媒介動物の分布拡大、数の増加 ● 海水温の上昇による海水中の細菌数増加	● 上下水道の整備 ● 雨水マス等排水路の整備 ● 農業（稲作等）や畜産業の構造変化 ● ワクチン接種状況 ● 啓発活動 ● 高齢化・免疫不全者の増加 ● 海外との人の移動、物流の増加 ● 食習慣（魚介類の生食等）	● 水系感染症の増加 ● 蚊媒介感染症の増加
その他	大気汚染への影響	● 高濃度の光化学オキシダントが発生する気象条件の増加（高温、日射）	● 地形	● 光化学オキシダントの大陸からの移流	● 局地的な高濃度発生による直接的な健康影響 ● 死亡リスクの増加
	自然災害による影響	● 大雨 ● 大型台風 ● 干ばつ		● 上下水道の整備	● 蚊媒介感染症の増加 ● 水系感染症の増加
	衛生害虫による影響	● 年平均気温 ● 冬季平均気温	● 衛生害虫の分布、数	● 海外旅行の増加 ● 貿易の増加	● 衛生害虫による咬症・刺咬等患者数の増加

(4) 経済的に豊かな暮らし

経済的に豊かな暮らしに関する影響としては、温暖化の影響を受ける農林水産業や観光産業の収入低下、食料価格の上昇、地場産業・伝統産業、製造業、レジャー産業への影響等がある。これらのうち農林水産業や食料に関する影響については、3.(4)に記載されている。

製造業やレジャー産業の影響として、家電製品、衣料品、食料飲料製品等の売上げの変化（暖房器具、冬物衣料等の売上げの減少、エアコンや清涼飲料等の売上げの伸びなど）や、暖冬によるスキー場及び観光産業への影響が報告されている（気象庁、2007）。スキー場への影響については、温暖化の進展による降雪の減少や時期の遅れ及び短縮等による影響が懸念されており、気温が3℃上昇すると、北海道と標高の高い中部地方以外では、ほとんどのスキー場で利用客が30%以上減少すると予測されている（IPCC、2007）。なお、これらの影響の中で農林水産業や観光産業への影響は農村域において影響が大きい。

家計への影響として、温暖化による食料生産高の減少が物価上昇を招くとともに、気温上昇による影響を軽減したりするための出費が増えることが考えられる。具体的には、気温上昇に伴う

エアコン使用時間の増加による電気料金支払いの上昇などである（環境省、2008a）。

(5) 快適な暮らし

快適な暮らしに関する影響としては、夏の暑さの激化や衛生害虫の発生による不快感の増加、水道水質の悪化、季節感の喪失が挙げられる。これらのうち、水道水質の悪化については 3.(1)に、季節感の喪失については 3.(3)に詳しく記載されている。

夏の暑さの激化については、2004 年度までの観測値を基に 100 年あたりの気温上昇量を調査すると、日本の中小都市で平均 1.1 度上昇しており、さらに主要な大都市ではこれにヒートアイランド現象の影響が加わり、2.2～3.0 度上昇していることが報告されている。また、熱帯夜の年間日数も増加傾向を示しており、4 都市（東京、名古屋、京都、福岡）の 1970 年代の平均年間日数が 6.3～21.3 日であるのに対し、1994～2003 年の平均年間日数は 21.6～37.2 日に増加していることが報告されている（気象庁、2005）。温暖化が進展すると、猛暑日や熱帯夜がさらに増加し、日常生活の不快感やストレスが増加していくことが考えられる。これらは都市部で影響が顕著であり、高齢者が特に影響を受けやすいと考えられる（環境省、2008a）。

(6) 文化や歴史を感じられる暮らし

文化や歴史を感じられる暮らしに関する影響としては、脆弱な自然環境や自然遺産等への影響、砂浜の消失による海水浴や潮干狩り等への影響、文化財や伝統行事への影響、ウィンタースポーツへの影響等が挙げられる。

文化財や伝統行事への影響では、厳島神社回廊の冠水回数の増加（3.(2)を参照）や諏訪湖の「お神渡し」（3.(1)を参照）などが報告されている。また、桜開花時期の変化による伝統行事への影響なども懸念されている（環境省、2008a）。

また、高山植物の減少や湿原の縮小など、脆弱な自然環境・生態系が温暖化によって失われることによる自然景観やレクリエーション空間の喪失、四季の季節感の喪失、砂浜の消失による観光やスポーツ、レクリエーションの機会の減少なども懸念されている（環境省、2008a）。

(7) 国民生活や健康への影響予測の課題

地球温暖化のわれわれの生活への影響の把握については、幅が広い分野における事例や知見の集積と、波及的な影響も含めた総合的な影響の評価が求められている。また、これらの影響は平均的な気候変化に伴う影響ばかりでなく、異常気象などの突発的・特異的な影響がわれわれの生活に重大な影響を及ぼす可能性が大きくなっており、そのような事象に注目して影響予測の精度を向上していくことが求められている。また、これらの影響の出方や影響に対する脆弱性は地域や人ごとに異なるため、温暖化影響を実際の地域で検討していくうえでは地域性や脆弱性への配慮が必要である。

また、土木・建設業における対応という視点からは、異常気象などによる自然災害への影響、水資源とその利用への影響、暑熱に関する影響などが注目すべき影響と考えられる。

参考文献

IPCC , 2007 : IPCC 第 4 次評価報告書第 2 作業部会報告書, 938p.

環境省, 2008a : 地球温暖化影響・適応研究委員会, 気候変動への賢い適応,

http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/index.html.

環境省, 2008b : 地球環境研究総合推進費温暖化影響総合予測プロジェクト, 地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－, 戦略的研究開発プロジェクト S-4「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」報告書,

<http://www.cger.nies.go.jp/climate/rrpj-impact-s4report/20080529report.pdf>.

気象庁, 2005 : 異常気象レポート 2005,

http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/index.html.

気象庁, 2007 : 気象年鑑 2007 年版.

古城八寿子, 1999 : *Vibrio vulnificus* 感染症－診断と治療のフローチャートの試み, 日本皮膚科学会誌, 109, pp.875-884.

3-6 エネルギーと産業他

(1) エネルギー産業への影響

電力中央研究所では、IPCC 第 4 次評価報告書 WG1、WG2 の内容を踏まえて、以下の分析を行っている（坂井ら、2007 ; 2008）。

1) 電力需要への影響

日本の気候を考えた場合、平均的な気温上昇は冬季の暖房エネルギー需要を減少させる一方、夏季の冷房エネルギーを増加させると考えられる。暖房のエネルギー源は石油、石炭、ガス、電力など多様であるのに対し冷房エネルギーのほとんどは電力により賄われていることから、電力需要の増加が予想される。現在すでに冷房使用が通常である地域では平均気温の増加に対応した緩やかな電力需要の増加が想定される。一方、例えば北海道などの冷房使用が一般的でない地域において冷房設置が進む場合、電力需要は不連続に突発的に増加していく可能性がある。また、夏季の異常高温が頻発するような場合、需要のピークが最大供給可能量を上回る事態も想定される。

2) 水力発電への影響

水力発電に影響を及ぼす要因を整理すると、雨の降り方の変化、および積雪融雪時期の変化が挙げられる（西澤ら、2007）。雨の降り方の変化では、短時間降雨強度の増加による、洪水時のダム操作や定常的な流量確保など電源運用面への影響、貯水池への土砂流入量の増加とそれに伴う堆砂対策や浚渫費用の増加、および土砂災害の増加が考えられる。

さらに、季節的に渇水期間が長期化した場合には、基底流量が減少し、緊急放水等の影響で貯水池の利用効率の低下も予想される。積雪融雪時期の変化は、ダム運用計画の見直しにつながる可能性がある。

気温上昇に伴う水温上昇により、生物化学過程の変化による藻類の発生や、栄養塩の現象による水質悪化などから、安全な水を確保するための水処理費用の増加につながる可能性もある。

3) 火力・原子力発電への影響

我国に大規模な火力・原子力発電所も、そのほとんどが沿岸域に建設されており、将来的には温暖化影響による被害リスクが増加することが考えられる。発電所施設に係わる具体的な被害リスクとしては、海面上昇に伴う海岸侵食の進行と地下水位上昇による地盤の脆弱化、高潮被害の増加、熱帯低気圧強度の増加に伴う浸水被害の増加、海水温の上昇による発電効率の低下、ならびに港湾施設機能低下に付随する物流システムへの影響などが想定される。

4) 生物相の変化の影響

陸上および沿岸域の生物相の変化は、電力施設の設計・運用・保守、および環境影響評価手法など、事業計画の策定に影響を及ぼす可能性がある。例えば、水力発電施設においては、貯水池内の水質環境保全対策の見直し、沿岸域の火力・原子力発電所における取水口への付着生物の増加に対する対策強化などが想定され、火災や極端な気象現象など陸域生態を攪乱する現象の頻度や強度の増加は、水源涵養機能を提供する集水域の森林分布にも影響を及ぼし、結果的に流出特性を変化させ、炭素クレジットとしての森林隔離量に対して脅威に成り得る。

5) その他の影響

石油、石炭、ウランなどのエネルギー源を輸入に頼っていることから、輸出国の採掘現場の脆弱性や燃料輸送経路の脆弱性も、電気事業に影響を及ぼす可能性がある。このような温暖化進行に対する脆弱性への適応としては、エネルギー源の分散化や輸入国の分散化の観点が益々重要となる。

(2) 発電方法の高効率化の影響

電力中央研究所では、IPCC 第4次評価報告書 WG3 の内容を踏まえて、以下の分析を行っている（山本ら、2008）。

- ・ 我国は 1973 年と 1978 年の 2 度の石油危機を契機に、脱石油火力を目標として大容量石炭火力、高効率 LNG 複合発電を実用化してきた。その結果、火力発電の平均熱効率は現在世界の最高レベルにある。LNG は高温高効率ガスタービン複合発電が開発・導入されて以来、現在 LNG 生焚き発電との比率が 50% 近くになっている。
- ・ 石炭火力は、石炭中の炭素分が多いため、発熱量当りの CO₂ 発生量が天然ガスの倍近いいため、逆風が吹いているが、我国にとり安価で賦存量の多い石炭資源はエネルギーセキュリティー上重要である。また、中国をはじめ急成長するアジア諸国では石炭を一次エネルギーとして利用しているので、石炭火力の高効率化による CO₂ 排出量の緩和効果は非常に大きい。
- ・ 我国の化石燃料発電技術は環境排出物質のクリーンさを含めて、世界最高レベルの性能を達成している。これら技術を低コスト化、メンテナンス性を改善して、今後、電力需要の急速な伸びが懸念されるアジア諸国に技術移転すれば、その GHG 緩和効果は莫大だと予想される。
- ・ 既存火力のリプレース時期に高効率火力を導入するという火力の高効率化による、2030 年までの電力部門の CO₂ 削減ポテンシャルは、23Mt CO₂/年と予想される。

(3) 運輸部門の動向

電力中央研究所では以下の分析を行っている（山本ら、2008）。

- ・ 運輸部門からの、CO₂排出量は、我国の総排出量の 20%に達している。内燃機関自動車では、走行性能の向上により、低燃費化は進んでいるものの、車両の大型化により総排出量は減っていない。また、ガソリンや軽油など石油燃料に大半が依存し、エネルギーセキュリティ面でも課題となっている。
- ・ 自動車分野では省エネ、脱化石燃料、温暖化排出ガス低減に向けて、駆動系と燃料のハイブリッド化が加速している。駆動系においては内燃機関と電動機とのハイブリッド化が、燃料においてはガソリンや軽油の化石燃料とバイオ燃料（エタノール）や GTL・CTL との混合によるハイブリッド化が進められている。なかでも、化石燃料依存度の少ない電気エネルギーの利用は、エネルギーの多様化と併せて期待が大きく、自動車分野での電気エネルギー利用へのシフトは加速する方向になる。
- ・ 車両の電動化、特に系統からの電力供給も行えるプラグインハイブリッド自動車(PHEV)が注目されている。PHEV は電気自動車の充電距離が短いという欠点をハイブリッド走行により補い、普及の可能性がある。また、利用分野をフリート走行の配達車両や路線バスなどに限定することで、電気自動車の普及もある。排出ゼロでの走行が可能となり、CO₂排出低減が期待できる。ただし、これらの充電にあたっては、電源構成により発電原単位の十分な考慮が必要である。

参考文献

- 坂井伸一・筒井純一・門倉真二・西澤慶一，2007：IPCC 第 4 次評価報告書 WG1 の内容分析 ― 地球温暖化に関する科学的知見―、調査報告 V07402、45p.
- 坂井伸一・立田 穰・本多正樹・石井 孝・松村秀幸・中屋 耕・芳村 毅・横山隆壽，2008：IPCC 第 4 次評価報告書 WG2 の内容分析 ― 気候変化の影響、適応、脆弱性と電気事業への係わり―、調査報告 V07404、44p.
- 西澤慶一・北端秀行・筒井純一・吉田義勝・丸山康樹，2007：大気海洋結合モデルを用いた地域水収支変化のアンサンブル予測、電力中央研究所 研究報告 V07002、22p.
- 山本博巳・佐藤幹夫・森塚秀人・池谷知彦・上野 剛・渡部良朋・志田原 巧・朝岡善幸・根本孝七・坂井伸一，2007：IPCC 第 4 次評価報告書 WG3 の内容分析 ― 温暖化緩和ポテンシャルの詳細とわが国への含意―、調査報告 Y07401、44p.

4 世界及びアジア・太平洋地域に対する影響

ここでは、環境省地球温暖化影響適応研究委員会（2008）に示された知見を中心に、アジア・太平洋地域の途上国における気候変動影響の概要を示す。

4-1 世界における異常気象の影響

近年、世界各地において、台風、豪雨、干ばつ、熱波等の異常気象による災害が頻発している。後述する途上国にとどまらず、影響への抵抗力が強いと考えられている先進国においても、さまざまな被害が発生している。2003年8月には、欧州の熱波により2万人以上が死亡した。2005年8月にはアメリカでハリケーンカトリーンにより、1800名以上の死者、120万人以上の避難民が発生した。オーストラリアでは、年・地域差はあるものの、6年以上も干ばつが続き、農作物に深刻な影響を与えている。近年の異常気象による災害の例を、図4.1.1に示す。

これらの異常気象の発生に、気候変動が関与しているかどうかを断定することはできないものの、温暖化・気候変動が進行することによって、異常気象の発生頻度や強度が増加する可能性が指摘されている。

4-2 途上国における気候変動影響

(1) 途上国及びアジア太平洋地域における気候変動影響の特徴

IPCC-AR4のWG2報告書では、「すべての大陸及びほとんどの海洋で観測によって得られた証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変動、とりわけ気温上昇の影響を受けつつあることを示している。」と示されている。従って、自然資源に対する依存度の高い農業等を主要産業とする途上国においては、特に気候変動の影響を受けやすい。また、途上国は人的、科学的、技術的、財政的、制度的に、気候変動への対処能力が不足しており、貧困と低開発とは、気候変動への抵抗力が不足する最大の要因となっている。

アジア太平洋地域諸国は、多様な自然要素と社会経済的な要素を有しており、また対象地域が広大なことから、関連する気候要素も種々にわたる。世界人口の60%が居住し、沿岸域にある多くのメガシティに人口や資産が集中していることから、被害を受ける人口や資産が多いことも特徴である。また、中国、インドのように10%前後の経済成長率を示す新興国もある一方、ブータン、ミャンマー、ラオスなど後発開発途上国に分類されている国もあり、気候変動に対する脆弱性は様々である。しかし、現状でも多くの国で食料や水などの問題が生じており、その上に気候変動の影響が加わることで、持続可能な開発が阻害されることが懸念される。

(2) アジア太平洋地域における気候変動影響のメカニズム

アジア太平洋地域における重要分野への気候変動影響のメカニズムについて、図4.2.1に示す。温暖化、気候変動性、極端気象現象などの気候変化が、海面上昇や、雪氷、水災害、沿岸域、生態系などに直接的な影響を及ぼし、さらに影響が様々な分野に波及することを示している。

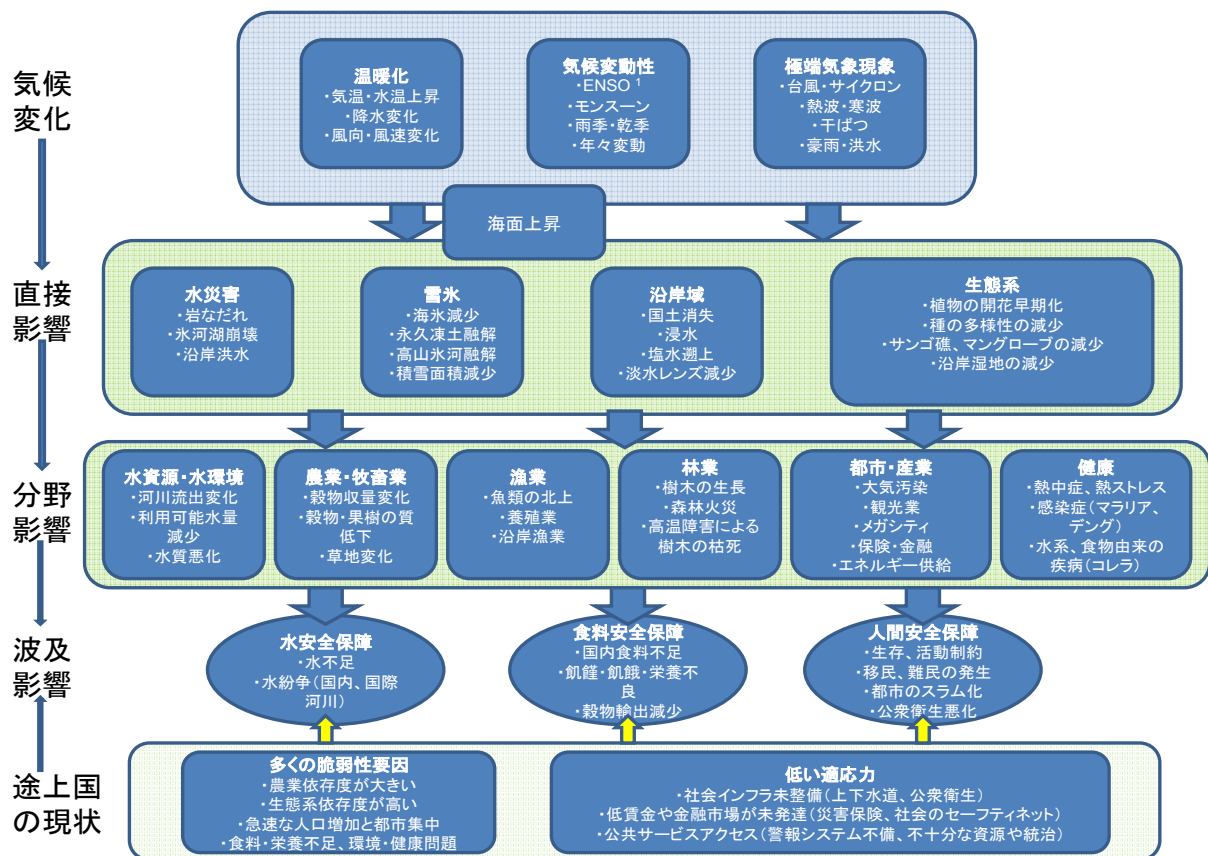


図 4.2.1 アジア太平洋地域における重要分野と温暖化影響のメカニズム（環境省，2008）

気候変動により、農林水産業、水資源、都市・産業、健康など種々の分野における影響が現状および将来に発生すると考えられる。また、直接的、物理的な影響に加えて、間接的、波及的な影響も考えられる。たとえば、水不足や気温の変化などによる穀物生産量の減少により、国内の食料需要に対して十分な供給がなされない場合、輸入による食料調達が不十分であれば、極端な食料不足が生じ、さらには飢饉などにつながる可能性もある。

また小島嶼国においては、食料供給のための農業・漁業、外貨獲得のための観光業など、産業が特化・限定されている場合が多い。海面上昇による影響とサイクロンなどの極端現象が重複すると、これらの産業に甚大な被害をもたらす。また、サンゴ礁を基礎とする島々では、淡水レンズに貯水された淡水資源が降水量変化や海面上昇などの影響により減少したり、高波浪や海面上昇によって海岸侵食が激化してくる可能性がある。

4-3 IPCC AR4 による主な知見

(1) 現状

IPCC-AR4 は、観測された気候変動影響について、「すべての大陸及びほとんどの海洋で観測された証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変化、とりわけ気温上昇によって、今まさに影響を受けていることを示している」と、前回報告書に比べてさらに踏み込んだ結論を示している。同報告書が「2001 年の第 3 次評価報告書以来、物理・生物環境において観測されたトレンド、

並びにそれらの地域的な気候変化との関係に関する研究の数は大きく増加した」と述べていることから分かるように、この結論は、影響の観測・検出に関する科学的知見の進展に裏付けられたものである。

一方で、報告書は「しかしながら、観測された変化に関わるデータ及び文献の地理的バランスが著しく欠如しており、特に途上国においてそれらの不足が目立つ。」とも述べている。欧米に比してアジア太平洋を含む途上国での観測事例は少なく、さらにその途上国の中でも大きな地理的偏りが見られる。これは、長期にわたる継続的観測が、これまで途上国において体系的に行われてこなかったことによるものであり、今後は、途上国における観測・モニタリング体制の拡充が望まれる。

以下に、AR4 で取り上げられた、アジア太平洋地域の主要分野における気候変動影響の現状を示す。

1) 雪氷圏・水資源

多くの都市及び居住地が、主として気温上昇に起因する永久凍土層の急速な融解及び凍土厚の減少により脅かされ、地すべりの頻度が増加し、永久凍土地域の湖で水位が上昇した。

より乾燥した地域では、通常、氷河の融解による水が淡水供給量全体に占める割合は 10%を超えている。中央アジア、西モンゴル、中国北西部のゼラフシャン氷河、アブラモフ氷河、チベット高原の氷河などは、近年その融解速度が増した。氷河の急速な融解の結果、氷河流出量及び泥流と岩なだれを招く氷河湖決壊の頻度が増大した。ただし、最近の北パキスタンでの研究では、過去 40 年間で西ヒマラヤでの冬季降水量増加により、インダス溪谷の氷河が拡大している可能性が示唆されている。

中国の一部地域では、水利用増加とともに気温上昇及び降水量減少によって水不足が生じ、結果的に湖及び河川が干上がるに至った。

2) 生態系

過去 20 年間に、アジアにおける森林火災の強度増大と拡大が観測された。その原因は主として気温上昇及び降水量減少が土地利用強度の増加と組み合わさったものである。最近の研究によると、シベリアの泥炭地における火災の急増は、人間活動の増加と気候条件の変化、特に気温上昇と関係がある。また、過去 60 年間に春季降水量が 17%減少、地表温度が 1.5℃上昇したため、モンゴルの森林及び草原火災の頻度及び範囲は 50 年間にわたって著しく増大した。

草地の成長期における降雨が次第に減少しているため、近年中央・西アジアでの乾燥が強まり、草原の成長が遅れ、地表の露出が増した。露出が進むとさらに土壤水分が蒸発することになり、地面はますます乾燥するため、草原の劣化が加速した。

アジアの湿地帯は、近年の温暖化した気候により次第に脅かされつつある。パキスタン、バングラデシュ、インド、中国のほとんどのデルタ地域において降水量の減少及び干ばつが生じ、その結果、湿地帯が干上がり、深刻な生態系劣化がもたらされた。

アジアにおける気候変動に関連した生物多様性喪失の証拠は依然として限られているが、近年アジアの多くの場所において、気候変動の結果、多くの動植物種がより高い緯度や高度へ移動していると報告されている。

3) 沿岸域

気候変動による海面上昇については、モニタリング期間は短いものの、1993 年から海面上昇の測定に衛星（TOPEX/POSEIDON）も利用されはじめた。全球平均で海面が $3.1\pm0.7\text{mm/年}$ 上昇していることが示され、上昇量に地域差があることも分かってきている。ツバル（Hall、2006）やモルディブなどアジア太平洋の標高が極めて低い島嶼国でも、海面上昇が進行してきていることは事実との認識が広がっており、海面上昇による影響は今後より明確になると考えられる。

海岸侵食、海水温、塩分濃度をはじめとした水質や生態系の変化も報告されている。気候変化によるマングローブへの大規模な影響が、インダスデルタとバングラデシュで確認されている。しかし、水質や生態系の変化には開発行為の影響も含まれていることから、気候変動との関係を示すには継続した観測が必要である。

気候変動により台風の強度の増加が予測されている中、ここ数 10 年、太平洋で発生する台風の頻度と強度に増加傾向が見られる。ベンガル湾やアラビア海では、発生数は減少傾向にあるが、強度は増している。これらの台風やサイクロンが引き起こす災害は、インド、中国、フィリピン、ベトナム、カンボジア、イランやチベット高原などの国・地域をはじめとして、各地で増加している。2007 年 11 月にバングラデシュで被災者 870 万人以上の被害をもたらしたサイクロン・シドル^⑥は記憶に新しい。2008 年 5 月 2 日には、サイクロン「ナルギス」が、人口密度の高いイラワジ川デルタ地帯に襲撃した。同 16 日時点での被災者数は、死者が 77、738 人、行方不明者が 55、917 人とされている（OCHA, 2008）。死者・行方不明者に加え、被災者は数十万～百万人以上に上ると言われている。存在する記録の中で、このデルタ地帯にサイクロンが上陸したのは初めてで、この 100 年間のミャンマーで最悪の自然災害となるとみられている。

なお、土木学会では 2008 年 5 月にミャンマー・サイクロン災害調査に対する災害緊急調査団を派遣した。調査団提供による現地の写真を図 4.3.1 に示す。



集落 （バゴー川右岸・河口から 21km）
（証言）道路上 15cm 程度まで冠水。

撮影日時：2007 年 5 月 14 日 11:36



川のほとり （バゴー川左岸・河口から 43km）
（証言）高潮の潮位は雨季の最大潮位と同程度だった。

撮影日時：2007 年 5 月 14 日 16:27

図 4.3.1 ミャンマーにおけるサイクロンによる高潮被害の状況

写真：横浜国立大学 柴山和也・高木泰士研究室

4) 人間の健康

AR4 では、長期データに基づき、気温・降水等の変化と結びつけて説明された健康影響の顕在化についての報告はなかった。ただし、近年の熱波によりインドのいくつかの州において多数の死亡があったことが報告されており、また、シベリアの都市においても、極端に高い夏季気温に伴う熱中症等深刻な健康リスクが報告されている。南アジアでは、下痢を伴う風土性の疾病が、高温に関連して増加することが報告されている。

(2) 将来

1) 雪氷圏・水資源

永久凍土劣化によって著しい地表沈下及び建築物損傷がもたらされるであろう。ロシア及びモンゴルの水はけの良い丘陵地及び高地では、永久凍土融解によりさらに水はけが良くなり、地下水量が減少すると予測される。チベット高原では、今世紀末までに全般的に永久凍土地帯の規模が縮小し、高標高へ移動し、劣化に直面すると予測されている。地表気温が 3℃ 上昇し降水量が変化しないとすると、長さ 4km 未満のほとんどのチベット高原の氷河は消滅すると予測されており、長江の氷河地帯の面積は 60% 以上減少する可能性がある。

河川の流量の季節性及び水量にも、変化が生ずると予想される。中央アジア、南アジア、東アジア、東南アジアにおける淡水の利用可能性は、とくに大河川の集水域において減少する可能性が高い。このことは、人口増加と生活水準の向上とあいまって、2050 年代までに 10 億人以上の人々に悪影響を与えうる。メコン川流域では、最大月流量が増加する一方で、最小月流量が減少する。即ち、雨季の洪水リスクの増加と乾季の水不足の増加が同時に起こり得ることを示している。

ヒマラヤ山脈の氷河の融解により、洪水や不安定化した斜面からの岩なだれの増加、および今後 20～30 年間における水資源への影響が予測される。これに続いて、氷河が後退することに伴う河川流量の減少が生じる。

中国北西部およびモンゴル西部では、今世紀末までに、春季の積雪の融解量が大きくなるとともに、融雪時期が早期化する。結果的に春季の水資源量が増加し洪水のリスクも高まる一方、冬季の畜産用の水資源が大幅に減少すると見込まれている。

水質に関しては、海面上昇に伴い、沿岸域において地下水及び表層水の塩分濃度が増加する。特にインド、中国、バングラデシュがその影響を受けやすい。

2) 生態系

アジアの生物多様性の最大 50% が、気候変化によるリスクに曝されている。北アジアの北方林はさらに北に移動する。タイガがツンドラに入れ替わり大幅に増加し、さらにツンドラが北に移動することにより極砂漠が減少する。気候変化と生息域の断片化の相乗効果により、生物種の数大幅に減少すると見込まれる。二酸化炭素濃度倍増を仮定した二つの気候モデルによる予測によると、中国においては 105～1,522 の植物種と 5～77 の脊椎動物種が、インドシナ半島及びビルマでは 133～2,855 種の植物と 10～213 種の脊椎動物が、絶滅する可能性がある。

北アジア・東南アジアでは降水も増加する中で、予期される気温上昇によって森林火災の頻度・強度が増すかどうかは不確実である。1℃ の平均気温上昇によって、北アジアでは、森林火災が起

こりうる乾燥した期間が 30%増加するとの研究もある。もしそうなるならば、森林生態系の機能に様々な変化が生じることになる。気温上昇及び蒸散量の増加に伴い、アジアにおいては自然草地の面積及び成長量は一般的には減少すると予測されている。南アジアでは、草地・サバンナの自然資本が大きく減少すると予想される。モンゴルのステップでは、高地山岳地帯とゴビを除くと、気温上昇と降水量減少に伴い、牧草の生産性が約 10~30%低下すると見込まれている。

チベット高原の自然植生帯は大きく変化すると予測されている。温帯草地及び冷温帯針葉樹林は拡大するが、温帯砂漠及び氷縁砂漠は減少するかもしれない。気候変動により遊牧の移動域の境界が北東中国南部に移り、それにより草原面積が増加し、家畜生産の好条件をもたらす。しかしながら、遊牧の移動域は同時に潜在的な砂漠化地域であるため、新たな移動域で何ら保全対策がとられなければ、砂漠化が起こるであろう。気候変動及びその他の人為的要素との影響によって起こる、さらに頻繁で長期にわたる干ばつは、結果としてアジアにおける砂漠化傾向を増幅させるであろう。

3) 農業・食料

農業に関しては、今世紀末までにアジアにおける穀物の潜在生産量が大きく減少すると見込まれているが、その地域差は大きい。21 世紀半ばまでに、穀物生産量は、二酸化炭素の施肥効果を考慮したとしても、東アジアおよび東南アジアにおいて最大 20%増加しうる反面、中央アジアおよび南アジアにおいては最大 30%減少しうる。これらと人口増加と都市化を考慮すると、いくつかの途上国において、非常に高い飢餓のリスクが継続すると予測される。

より地域的な研究の結果としては、例えばバングラデシュでは、同時期までに、イネとコムギの生産量がそれぞれ 8%および 32%減少すると予測されている。インドでは、冬季の気温が 0.5℃上昇するだけで、コムギの収量が 0.45t/ha 減少すると予測されている。また、0.5~1.5℃の気温上昇で、コムギ及びトウモロコシの潜在収量が 2~5%減少するとの予測もある。中国では、2℃の平均気温上昇で、天水栽培のイネの収量が 5~12%減少すると見込まれている。

一方、農業適域は北にシフトする。例えば中国北部では、今世紀半ばまでに、三期作の境界が長江溪谷から黄河流域まで 500km 移動し、二期作地域は現状の一期作地域まで移動する。その一方で、一期作の地域は 23%減少すると見込まれている。

気温上昇・成長期間の伸長は、アジア温帯地域において害虫の数を増加させうると見積もる研究もある。また、大気中の CO₂ 濃度の増加と気温上昇により、光合成経路の異なる雑草間の競合関係が変化すると考えられている。

4) 沿岸域・島嶼国への影響

海面上昇は海岸侵食に直結する。発生数については未だはっきりしないが、温暖化によって熱帯低気圧の勢力が増す可能性が高い。したがって、海岸の低平地、特に人口が集中するデルタでは、海面上昇と高潮の強度の増加によって、現在よりも危険度が高くなる可能性が高い。気候変化と海面上昇により最も人々が影響を受けやすいのは、次の地域である。

- ・アジアのメガデルタ（バングラデシュと西ベンガルのガンジス-ブラマプトラ川デルタ等）
- ・自然現象及び人為的な活動による地盤沈下と熱帯低気圧の上陸点が重なる沿岸地帯
- ・ツバル、モルディブ等環礁に代表される標高の低い小島嶼

海面上昇によって 2050 年に 100 万人以上の人々が影響を受ける地域は、バングラデシュのガ

ンジス・ブラマプトラ川デルタ、ベトナムのメコン川デルタ、エジプトのナイルデルタである。紅河とメコン川の河口デルタでは、1m の海面上昇により、それぞれ 5、000 km²、15、000～20、000 km² の土地が洪水に見舞われ、400 万人、350～500 万人の被災者が発生することや、約 1、000 km² が塩分を帯びた干潟になり、耕地や養殖場の喪失、2、500 km² のマングローブ消失が予想されている。

海水温の上昇による、海洋生態系のさまざまな変化も懸念されている。アジアのサンゴ礁は今後 10 年以内に 24%、30 年以内に 30%が、気候変化と人為的活動などの複合ストレスを受けて失われると予想されている。

サンゴ礁からなる島々には、ツバルやモルディブなど標高が数 m 未満の国が少なくなく、海面上昇のみでも水没する面積が相対的に大きい。島嶼国における波浪の防御には、砂浜、サンゴ礁やマングローブなど自然のものを活用している場合が多いため、海面上昇や海水温上昇でこれらが失われると、防御機能が低下する。2100 年に海面が 88cm 上昇した場合、サモアでは 50%、15 の太平洋の島々で 12%のマングローブ地帯が消失すると予測されている。

島嶼国では、飲み水として、雨水の貯留以外に、海水との濃度差による淡水レンズ効果で溜まる地下水が重要である。降雨の減少と海面上昇が重なると淡水レンズが縮小し、水不足を引き起こす。例えばキリバスの Tarawa 環礁では、2050 年で降雨が平均 10%減少すると、淡水レンズの大きさが 20%減少すると予測されている。

これらの島嶼国は熱帯もしくは亜熱帯地域にあることが多く、気象や気候が伝染病の拡大に関係しているが、温暖化がさらにそれを加速させる可能性が高い。海水温の上昇は重要な食料、観光資源である海洋生態系へも大きく影響する。

参考文献

環境省、2008：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，340 pp.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976p..

気象庁、2006：気候変動監視レポート 2006 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について、88p. (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/>)

気象庁、2006：異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～（Ⅶ），383p.

環境省、2008：Stop the 地球温暖化 2008, 24 p.

OCHA,2007: Cyclone SIDR Bangladesh, Situation Report No. 12, 3.

OCHA, 2008: Cyclone Nargis Myanmar, OCHA Situation Report No. 20, 3.

5 土木から見た影響予測と対応の課題

以上の節で見てきたように、気候変動の影響は非常に広い範囲に及ぶ。土木分野の視点で見ても、影響はいくつかに分類できる。それには、1) 土木構造物の安全性や機能への影響、2) 土木事業の遂行（計画・設計・施工・維持管理）に対する影響、3) インフラ施設群としての機能不全、4) 安全・安心や環境保全など地域や国土の姿や国民生活に対する影響、等が含まれる。また、気候変動への対策としての緩和策と適応策には、土木分野に関わるものが広範に含まれる。そうした意味では、気候変動問題は、土木分野に新しい課題と使命を投げかけているといえる。

一方、気候変動の影響は広い範囲に及ぶため、複数の影響が重なって多重で複雑な影響が現れるのが現実であろう。そうした意味で、気候変動の影響は多くの場合、複合影響であることに特徴がある。また、現代社会が直面している多くの問題、すなわち、地震などの他の自然災害、少子高齢化、資源・エネルギー問題、水・食料問題などと気候変動の影響は重なって現れる。たとえば、集中豪雨の直後に地震が発生すると土砂崩れが拡大することや海面上昇の結果沿岸部の地下水位が高くなり、地盤支持力の低下した状況下で地震の被害が拡大すること、外国での農業生産への打撃が貿易を通じて我が国の食料問題に重なることなどである。そのため、気候変動の影響と他の問題の重なりによっても、複合影響が発生する。影響がこのような複合的であれば、その対策の考え方にも注意を要する。副次的な効果（コベネフィット）や多重の効果を持つものが期待される一方、個々の影響に対する対策がトレードオフになる場合も想定される。望ましいのは、多面的効果を持つ一石二鳥、一石三鳥の対策である。

以下では、こうした視点から、複合的な影響及び対策の検討を中心に示す。

5-1 複合リスク、影響の予測とそれへの対応

(1) 水環境に対する複合影響と対応

水環境管理の主要な目的は水環境を保全することにあるが、地球温暖化問題と水環境問題は図5.1.1に示したように互いに密接に関連している。例えば、水環境保全のための下廃水の処理は資源とエネルギーの消費を通じて温暖化の原因になっている一方で、処理を行わなければ放流先での温室効果ガスの放出を招くこととなる。一方、水環境は地球温暖化により多大な影響を受けると考えられ、海水面の上昇による地下帯水層への海水浸入や感潮河川への塩水遡上の進行、水温の上昇による河川や湖沼における環境容量の減少、などが指摘されている。温暖化による影響に加えて、水環境に対しては従来から認識されているように人間活動による影響が存在する。今後50年間の長期的な影響を考えると、全世界的に資源枯渇や食糧問題等の問題が水環境にもリスクとなりうるし、発展途上国ではこれに加えて人口増加や経済発展が水環境に対する大きなリスクとなる。日本では、少子高齢化とそれともなう労働力の減少が水環境管理上のリスクとなるであろう。ある程度の温暖化の進行はもはや避けられないことから、今後は温暖化に加えて上記のその他の要因による水環境への悪影響を前提とした、一層高度な水環境管理が必要になるであろう。このような多様な課題を同時に考慮し、総合化しなければ、地球温暖化下における高度な水管理は実現不可能である。

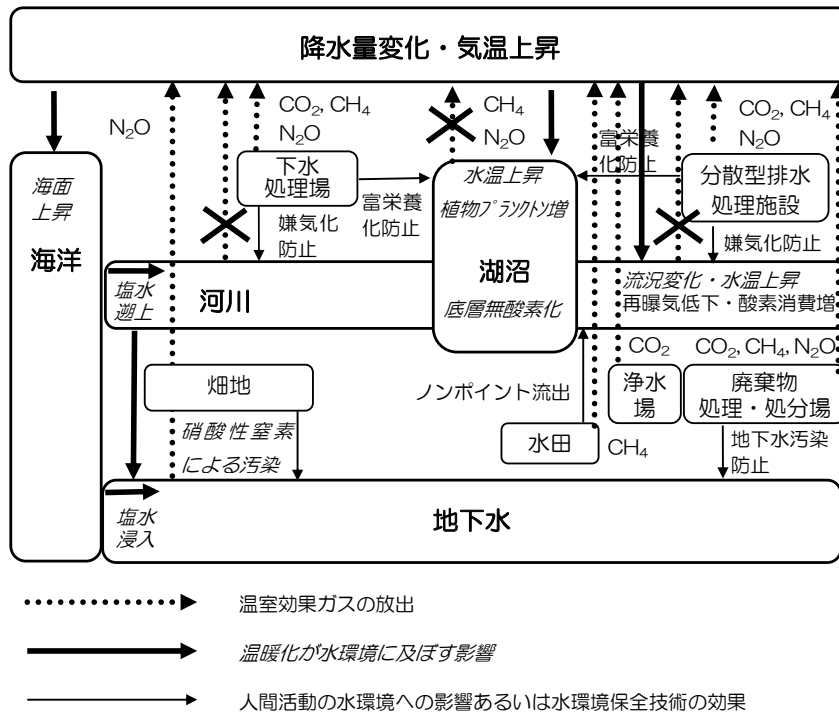


図 5.1.1 地球温暖化と水環境の相互関係¹⁾

水環境への複合影響に対する対応の例を図 5.1.2 に示す。地球温暖化にともなう水温上昇の結果、飽和溶存酸素濃度は低下するとともに植物プランクトンの増殖速度が増加するため、下廃水の処理においては現在以上の高度な水処理が求められる。発展途上国では将来の人口増加や経済発展により発生負荷の増大が見込まれることを勘案すると、革新的な高度処理技術の開発が必要となるであろう。その際には、温室効果ガスの排出抑制に加えて、省資源・省エネルギーの技術が温暖化防止の観点から求められる。少子高齢化・労働力不足が見込まれる日本においては、維持管理が容易なプロセスの開発も求められるであろう。さらには、汚泥や下水熱など大きなエネルギーポテンシャルを有している下廃水の特性を活かし、バイオマスや熱の収集、運搬、資源化も視野に入れ、資源・エネルギーの回収を行う必要がある。

個別の水環境要素においても、環境容量低下にともなう水環境悪化を防止するとともに温室効果ガスの水環境からの放出を抑制するため、水環境と温室効果ガスの放出の両面から調査研究を進展させなければならない。温暖化による富栄養化の進展に対する適応策としては、上述した点源由来の栄養塩の高度処理のみならず、栄養塩類、濁質成分等のノンポイント汚染物質の閉鎖性水域への流入特性の詳細を明らかにする必要がある、今後の土木分野による研究の進展が期待される。河川における溶存酸素の枯渇や海水面の上昇による地下帯水層への海水浸入に対する適応策も重要である。

水環境要素の一例として水田を中心と考えた場合には、水資源、生物多様性（生態系）、文化などへの影響を考えることができる。水資源の観点からは、田に水を引く時期に、十分な水の供給量の確保が必要となる。そのためには、森林の整備など、集水域の水源涵養能力の確保などの対策が必要となる。一方で、温暖化による豪雨に対して、水害を防止するための治水対策が必要と

なる。さらに、稲の管理には、水田内への水の引き込み量を調整したり、途中から乾田としたりするため、必要な時に水を入れて、不要時に排水できるなど、水が管理可能な状態にあることが必要である。水田からはとりわけ田植えや代掻き時期の栄養塩類の流出が報告されており、温暖化下での富栄養化防止のためにはこれらの流出抑制対策が重要な課題となる。生物多様性（生態系）の観点からは、猛禽類の一種であるサシバは、関東地方では4月に、東南アジア方面から渡ってきて繁殖し、9月に再び東南アジア方面に戻る。渡ってきた当初は、カエル類を捕食し、その後昆虫やトカゲを食べる。温暖化が進行した場合、渡りの時期と餌の発生時期に狂いが生じる可能性がある。

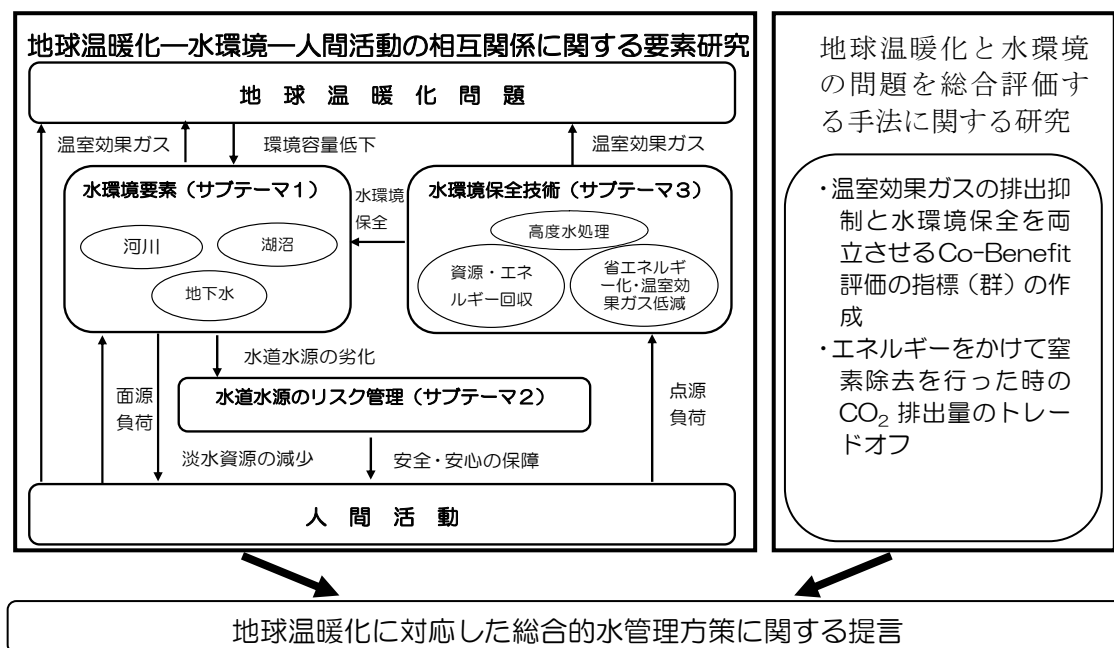


図 5.1.2 水環境への複合リスクに対する取組の例¹⁾

文化の観点からは、稲の収穫は、地域の文化である祭りなどと密接に関連していることが多い、適応策を検討する場合には、文化との関わりについても検討が必要となる。

温暖化の進展にともなう水環境の劣化は、淡水資源の減少と水道水源の劣化をもたらす。水温の上昇にともなう水道水源のリスク上昇も考慮し、水道を適切に管理していく必要がある。水道の適切なリスク管理は人間生活の「安全・安心の保障」をもたらし、温暖化下における持続的な発展に寄与するであろう。

最後に、地球温暖化と水環境の問題を総合評価する手法についても土木分野として研究を進める必要があろう。具体的な要素技術の開発に加えて、温室効果ガスの排出抑制と水環境保全を両立させる Co-Benefit 評価の指標（群）の作成が求められる。

(2) 沿岸域における複合災害

日本をはじめとするアジア・太平洋諸国の沿岸域には、人口、都市機能が集積しており、重要な地域である。これらは通常低平地からなるので、海面上昇や台風に伴う高潮により浸水するリ

スクが高まる。また、一方で海面上昇により地下水位が上昇することも考えられる。このことにより、地震の際の地盤の液状化の可能性が高まることが予測される。また、温暖化による気候変動によって豪雨が増えることになれば、山岳地帯で地震時の土砂崩壊（土砂崩れ）の危険が高まることになる。これらの懸念は温暖化そのものによる影響ではないので新たな災害とは呼べないにしろ、温暖化によってその災害危険度が高まることから複合災害と呼べるものである。今後十分な検討と予防対策が必要となるであろう。

5-2 複合的な方法による対応

温暖化の影響に対して、特に適応策を策定・実施する際に、いくつかの複数のオプションを検討して、それらのメリット・デメリットを提示することはもちろん、複数のオプションの組み合わせで対応することが望ましい場合がある。

- ・ 個々の対策オプションのメリットを組み合わせるより大きな効果を発揮させる場合
- ・ 個々の対策オプションのデメリットを相殺して対策効果を得る場合
- ・ 長期的に望ましい対策オプションと短期的に効果的なオプションを組み合わせる場合

海岸侵食対策などは、土砂生産・運搬・堆積のフローに関する自然の持つ機能を最大限に利用することが望ましいとされているが、現状の海岸ではそのような効果が期待できないことが多い。その場合でも、当面の侵食対策と将来のあるべき姿の両方を見据えた対策を取ることが必要である。このような、特に適応策の対策効果についての研究が求められることになる。

5-3 対応策がトレードオフの関係にある場合の課題

(1) 都市の生活環境について

温暖化の進行に伴う熱ストレスによる死亡数の増加や熱中症の増加に対して、寒冷ストレスの減少が考えられる。

産業技術総合研究所による「ヒートアイランド現象によりもたらされる環境影響の定量化」の研究報告では、ライフサイクル環境影響評価手法を用いて算定した結果、ヒートアイランドによりもたらされた 23 区内の 2002 年の環境影響は、睡眠障害 114 億円、熱ストレス 8.7 億円、熱中症 1.8 億円に対して、寒冷ストレス 80 億円、冷房エネルギー消費 0.28 億円、暖房エネルギー消費 0.47 億円と推計されている。東北地方などでは、温暖化による影響がプラスに働く可能性もあるなど、地域による影響の違いを考慮することも必要となる。

(2) 渇水に伴う地下水利用の増加、これに伴う地盤沈下の発生

温暖化による影響として、渇水に伴う地下水利用の増加と、これに伴う地盤沈下の発生が予測されている。これに対する対応策として、雨水利用が考えられている。雨水の利用を促進することは、地下水への涵養量を減少させることになり、トレードオフの関係にあると言える。地下水涵養と雨水利用を適切に行うためには、地下水の水源涵養域の設定など、水資源の管理が必要となる。

5-4 段階的な取組の必要性

温暖化による影響に対応するためには、緊急避難的に実施する適応策と、その後の恒久的な適応策に分けて段階的に実施することも必要である。

例えば、緊急避難的にコンクリート擁壁で防護し、その後より環境への負荷の少ない恒久的な手法を採用するなど。

5-5 対策の優先順位のつけ方

予測される影響に対して、実際に対応策を検討し実施する場合、優先順位をつけることが必要となる。この検討にあたっては、「影響の生じる時間（時期）」と「影響の大きさ」を評価の軸とした検討が必要となる。特に、影響の大きさについては、治水や健康、食料生産、生物多様性、生活、文化など複数の分野間の大きさを比較検討できる手法が必要となる。

また、対策の実施のための予算等の配分について、利害関係者間の合意形成も課題である。

5-6 予測される影響に対する適応策の実施が困難な場合の対応

温暖化によって、湖沼の水温の上昇や富栄養化の進展によるアオコの発生など、プランクトン相の変化が捕食する生物の構成を変えることによって、湖沼内の生態系の構造が変化することが予測されている。この他に、湖沼や海洋の鉛直循環の消失(停滞)による湖底の二枚貝や底生の魚類の減少などの影響が考えられている。これらの影響は、水質（健康）、生物多様性、水産などの分野に大きな影響を及ぼすが、根本的な適応策の実施が困難又は不可能な分野となっていると考えられる。このような分野に対する技術開発が必要である。

生物多様性の分野については、生物の生息範囲に変化(移動)が生じることが予測されている。これらに対する適応策としては、気候の変化に対応して生物が移動できるようなルート（コリドー）の整備や生息の拠点となる環境の整備等を行うことが考えられるが、これらに適切に対応するためには、生物相の変化の正確な予測が必要である。

5-7 許容されるリスクやハザードの決定（合意形成）

温暖化による影響に対して、どの程度の水準の対応策をとるのかを決定するためには、利害関係者間で許容されるリスクやハザードの大きさや頻度を決定することが必要である（ライフスタイルの選択も含め）。例えば、洪水をある程度許容する社会として、高床式の住宅を建設するなど。温室効果ガスの排出を抑制するための社会を実現するためにも、「原子力や高度な技術開発に依存する」～「再生可能エネルギーを中心に自然と共生する」までいくつかの選択肢がある。

5-8 気候変動対策に対する土木分野の責務

気候変動への対策としての緩和策と適応策には、土木分野が関わるものが広範に含まれる。そうした意味では、気候変動問題は土木分野に新しい課題と使命を投げかけている。

- 1) 温暖化対策の目標は、国連気候変動枠組み条約にあるとおり、気候変動の進行を危険な水準以下に抑えることに据えるべきである。そのためには、現在現れつつある気候変動の影響を避けるための適応策と CO₂ 排出削減の緩和策の 2 つの柱がある。この 2 つの対策の適切な組

み合せ（ベストミックス）が必要であり、その具体化のために、緩和・適応策ベストミックスのあり方に関する研究が必要である。

- 2) 温暖化の影響はあらゆる分野に及び、対策には社会全体の行動が必要であることを考えると、温暖化対策を社会経済政策の主要な政策分野の中に組み込むことが必要である（適応策の主流化）。そのため、各分野においてどのような取り組みが必要かを明確にする必要がある。
- 3) 土木分野の対象（インフラ施設とその運用システム、国土・地域づくり）は寿命が長く、一旦建設したら長く存続することに特徴がある。そのため、土木分野は、緩和策の目的である「低炭素社会」「低炭素地域」づくりと適応策の目的である「長期的に安全・安心な国土」作りの両方に密接に関係している。これらの実現に貢献するため、土木学会のあらゆる分野を結集して長期的にこの課題に取り組む体制を整える必要がある。
- 4) 緩和策と適応策に対してともに有効な一石二鳥の対策を生み出すべきである。また、個別の対策においても、両者の相乗効果や生態系の維持・保全や地域社会の問題克服に対して複合的な効果（コベネフィット）を持つものが望ましい。人口減少・高齢化社会を迎え、公共投資の伸びが期待できない制約の中で、社会基盤施設の設計・建設・運用のあり方についてさらに研究を進めるべきである。
- 5) 中国やインド、ブラジルなど新興国を含む途上国からの CO₂ 排出は、先進国のそれを上回り、今後大きく増加すると予想される。そのため、途上国における排出対策が極めて重要であり、ポスト京都議定書の新しい国際枠組みでは、途上国の参加が不可欠である。一方、影響の観点から見ても、より厳しい影響が現れるのもインフラ施設の整備が遅れている途上国である。大きな災害被害や食料危機、環境難民の発生は国際的な不安定をもたらす要因にもなる。そのため、途上国では、経済開発政策の中に気候変動への適応策を組み込んで、気候変動への備えをはかるべきである。こうした取り組みに対して、土木分野は積極的に貢献すべきであり、そのための行動計画を策定すべきである。

参考文献

藤原 拓・渡辺義公・船水尚行・村尾直人，2008：環境工学委員会における地球温暖化問題への取組、第 16 回地球環境シンポジウム講演集、pp.1-3.

第3編 地球温暖化に対する緩和策

1 はじめに

1-1 温室効果ガスの排出と緩和策

気候変動の原因となっている温室効果ガスには二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素(一酸化二窒素)、ハロカーボン類などがある。二酸化炭素以外の温室効果ガスは、地球温暖化ポテンシャル(GWP)によって二酸化炭素相当の量に換算できる。IPCC¹⁾によれば、2004 に排出された温室効果ガスの比率は、化石燃料の燃焼による二酸化炭素が 59.4%、森林破壊やバイオマスの分解による二酸化炭素が 17.3%、メタンが 14.3%、亜酸化窒素が 7.9%、ハロカーボン類が 1.1%などとなっている。

一方、わが国の温室効果ガス排出²⁾の気体別の内訳を見ると、二酸化炭素が 95.0%、次いで、亜酸化窒素 1.9%、メタン 1.8%、ハロカーボン類 1.3%となっている。エネルギー消費の圧倒的多さが農業活動などによるメタンや亜酸化窒素の生成を大きく上回っている結果であり、農業活動の低い先進工業国の典型となっている。部門別に見れば、図 1-1 に示すように、概略で製造業(廃棄物を含む)が 5 割、家庭と業務で 3 割、運輸が 2 割である。京都議定書の基準年である 1990 年からの増加分を比較すると図 1-2 のようになり、部門によって大きい違いがある。産業部門は減少しているのに対し、運輸部門、家庭部門、業務部門は大きな増加を示している。これらは、日常生活に関連する部門であり、われわれの生活の場と、ライフスタイルやビジネススタイル、社会を担う商業やサービス業活動がエネルギー多消費型に変化したことが原因である。これらを変革していくことが緩和策、すなわち温室効果ガス削減策として重要となる。

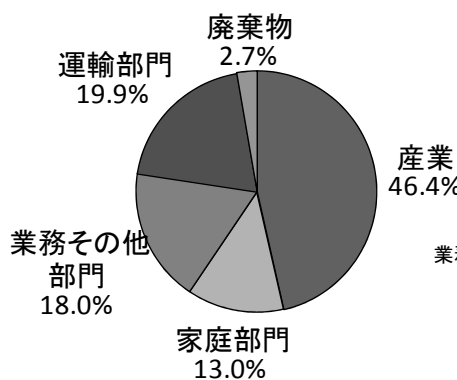


図1-1. 日本の部門別CO2排出量(2006年)

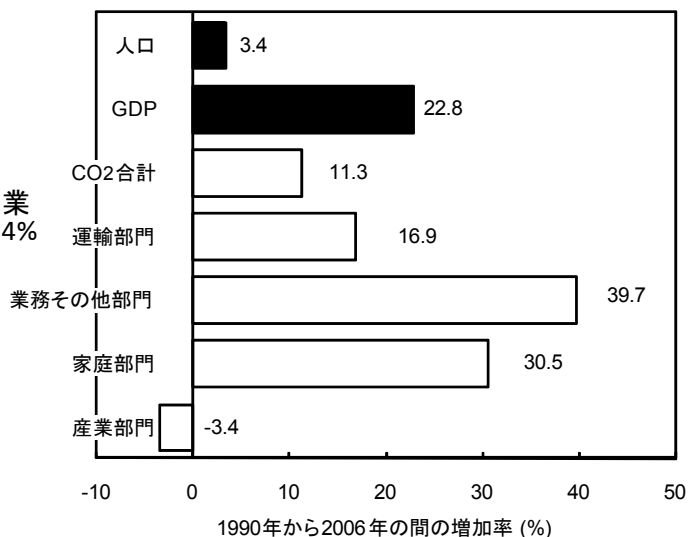


図1-2. 日本の部門別CO2排出量変化(1990年から2006年まで)

二酸化炭素排出削減のための基本的な戦略は、化石燃料の消費を抑制し排出する温室効果ガスを減少させることにあり、そのためにはエネルギー消費量を抑制することと、エネルギーあたりの炭素排出量、すなわち炭素強度の低いエネルギーに転換し、さらに実質的な二酸化炭素排出量を伴わない再生可能エネルギーを創出することが必要である。

1-2 温室効果ガスの排出と土木

産業、運輸、業務、家庭のすべての部門の二酸化炭素排出に土木は関連を持つ。

産業部門の二酸化炭素排出量には、エネルギー消費に伴って排出する分に加えて、セメント製造など、製造プロセスにおいて排出する二酸化炭素も含まれる。この製造プロセスの排出も含めた全排出量に対して、建築を含む建設業からの排出は2.4%となっている。しかし、建設業が誘発する産業部門の二酸化炭素排出はそれだけに留まらず、建設業で用いられる素材の製造に伴い二酸化炭素が排出される。とりわけ鉄筋コンクリートの材料である鋼材とセメントは二酸化炭素多排出型の材料である。業種別で見れば、鉄鋼業の二酸化炭素が全産業の排出量に占める割合は33%、窯業土石業は17%となっており、それぞれ第1位、2位の排出量になっている。もちろんこれら鋼材とセメントは土木事業のみのために製造されるのではないが、これらの製造がもたらす二酸化炭素の大きさは土木事業として意識すべきである。これら材料由来の二酸化炭素排出の把握はライフサイクルアセスメント(LCA)によって行うことができ、それについては第2章で述べる。

運輸部門の二酸化炭素排出は、直接的には自動車など運輸機器の効率に依存するところがあるものの、根本的な排出原因となる人と物の移動については土木が本来的に深い関わりを持つ分野である。交通機関分担と施設の整備のみならず、国土計画、都市計画が運輸部門の交通手段と交通量を根本的に支配する。これらについては、第3章で述べる。

長期的に二酸化炭素の大幅な削減をめざしてさまざまな対策を導入していく場合、それは単に技術を導入することに留まらず、制度の変更、経済的なインセンティブの付与や社会の誘導などが必要になってくる。それらが実際に行われる場合は、都市や農村であり、地域単位で低炭素の戦略を立案し実現する中で土木は社会工学として重要な役割を果たす。とりわけ、実際の緩和策を実行していく際には政策主体としての自治体の積極的な関与が必要であり、長期的な視点が求められる。この点については第4章で述べる。

家庭部門及び業務部門からの排出は、直接的には建築物からの排出であり、建築分野で緩和策について多くの検討が行われている。しかし、実際の地域や都市においては建築単体の対策のみならず、適切な地域への地域冷暖房の導入など、面的な対策を講じていかなければならない。さらに、家庭部門、業務部門の活動からは単にエネルギー消費に伴って二酸化炭素が排出されるのみならず、熱や廃棄物の排出も生じる。熱の排出はヒートアイランドの形成に直結し、廃棄物の排出はさまざまな廃棄物問題を引き起こす。しかし、その一方で排熱の有効利用、廃棄物の有効利用を進めることによって温室効果ガスの排出を抑制することが可能になる。これらのいわば「代謝システム」を合理化することは、従来から土木工学の一環として取り組まれてきたところである。詳しくは第5章で述べる。

通常、部門別の温室効果ガス排出を図1-1のような形で示すときには、電力に伴って生成する二酸化炭素はそれぞれの需要部門に割り振られる。従って、発電部門はすべての部門の排出量に直接的な影響を与える。電力の炭素排出原単位を低下させる根本的な方法はエネルギー源の選択にある。古典的な再生可能エネルギーである水力のさらなる活用、炭素中立で二酸化炭素の排出を伴わない再生可能エネルギーの導入や原子力発電においては土木は重要な役割を担う。これについては第6章に述べる。

先に述べたように、二酸化炭素以外の温室効果ガスの寄与はわが国全体としては小さいが、土木分野に関連がある温室効果ガスとしては、下水道分野において下水汚泥の焼却と排水処理に伴って生成する亜酸化窒素、排水処理から生成するメタンがある。また、わが国においては廃棄物の埋め立て比率が低いものの、世界的には埋め立て処理が行われているところが多く、このような場所ではメタンが生成する。下水道事業から発生する温室効果ガスは二酸化炭素換算で約 700 万トン（2004 年現在）³⁾であり、日本の総排出量の 0.5%であり、一つの事業の排出量としては小さい。また、下水道事業は自治体によって運営され、そのため自治体自身が排出する温室効果ガス排出削減の対象となるが、多くの自治体では自治体の事業の最大を下水道が占めている。下水道からの排出の特徴は亜酸化窒素の比率が高いことで、汚泥焼却に由来する亜酸化窒素の寄与が 30%、水処理における亜酸化窒素の生成が 11%（2002 年現在）⁴⁾と、推定されている。

土木に関連して排出される温室効果ガスは、①土木施設の運用による排出、②土木材料由来の排出、③提供される土木構造物が誘発する排出、に分けられる。①の典型は発電所、下水処理場、浄水場、であり、これらの運用時に伴う温室効果ガスの排出は大きい。②の典型はセメントと鉄の利用によるものである。③は建造された道路を自動車が走行することによる排出、などである。このように土木事業は温室効果ガスの排出に複雑な関わりを持つが、このことはまた削減の可能性が大きいことを示す。産業連関表を用いた漆崎ら⁵⁾の分析によると、建築も含む建設分野が原因となって生じる二酸化炭素排出量が日本全体に対して占める比率は 1995 年現在で 40%を超えるものと推定されており、その削減ポテンシャルが大きいことが示唆されている。土木構造物の建造を行うか否かの検討、設計方式、設計基準、技術開発によってこれら①から③の排出量を減ずることができるわけであるから、これらの排出を土木事業との関連でとらえて、削減策を検討することは有意義である。

古くから水力発電に代表されるように再生可能エネルギーの開発を土木は担ってきた。今日、古典的な水力から新たな再生可能エネルギーの獲得と創造にその技術を生かすことが求められている。

1-3 わが国における削減対策計画と土木事業

今日、温室効果ガスの削減のための省エネルギーや再生可能エネルギーの開発と普及が強力に推し進められており、世界的にも、またわが国においても経済の活性化の策としても考えられるようになってきた。温室効果ガスの削減策としてはさまざまな技術の導入、社会の変革、政策の実施等多様なものがある。それらを統合的に進めていくことが、短期的にもまた長期的にも必要である。ここでは、そのような統合的な対策計画の内容に土木がどのような関わりを持つかをいくつかの計画を参考にして、見ていきたい。

(1) 京都議定書目標達成計画

2008 年から 2012 年の 5 年間を第一約束期間とする京都議定書に向けての達成計画が、2005 年 4 月に策定され、2008 年 3 月には全面的に改定された⁶⁾。ここに示されている対策は、基本的に短期のものであり、技術的には見通しがついているものである。

図 1-3 にエネルギー起源の二酸化炭素排出削減の対策の一覧を示す。この図の中で、土木事業が関連を持つ対策については印を付した。実に多数の対策に土木事業が関わっていることがわか

る。これらの主なものについて、以下に示す。

本達成計画では、部門別計画を横断的に束ねるものとして、全体として「低炭素型の都市・地域構造や社会経済システムの形成」を大きな目標として掲げている。その中で、「A. 低炭素型の都市・地域デザイン」として、エネルギー需要密度の高い都市部を対象にして、エネルギーの面的利用やヒートアイランド対策等により都市のエネルギー環境を改善するとともに、住宅・建築物・インフラの長寿命化を進めること、また、都市機能の集約等を通じて歩いて暮らせる環境負荷の小さいまちづくり（コンパクトシティ）を実現することを目標としている。これらは、短期的というよりは、中・長期的対策であり、地区、地域、国土規模での計画に反映されるものである。具体的には①集約型・低炭素型都市構造を実現して、公共交通機関を有効に働かせ、未利用エネルギー活用し、さらに施設の長寿命化を図ることによって LCA 的な意味での排出を削減すること、②街区・地区レベルにおける面的な対策では、再開発の機会にさまざまな対策を地域全体として導入していくことがめざされている。③エネルギーの面的な利用の推進では、未利用エネルギーや再生可能エネルギーの利用を、複数連携させることによって効果を挙げていくことをめざしている。緑化等ヒートアイランド対策による熱環境改善を通じて都市の低炭素化をめざしている。

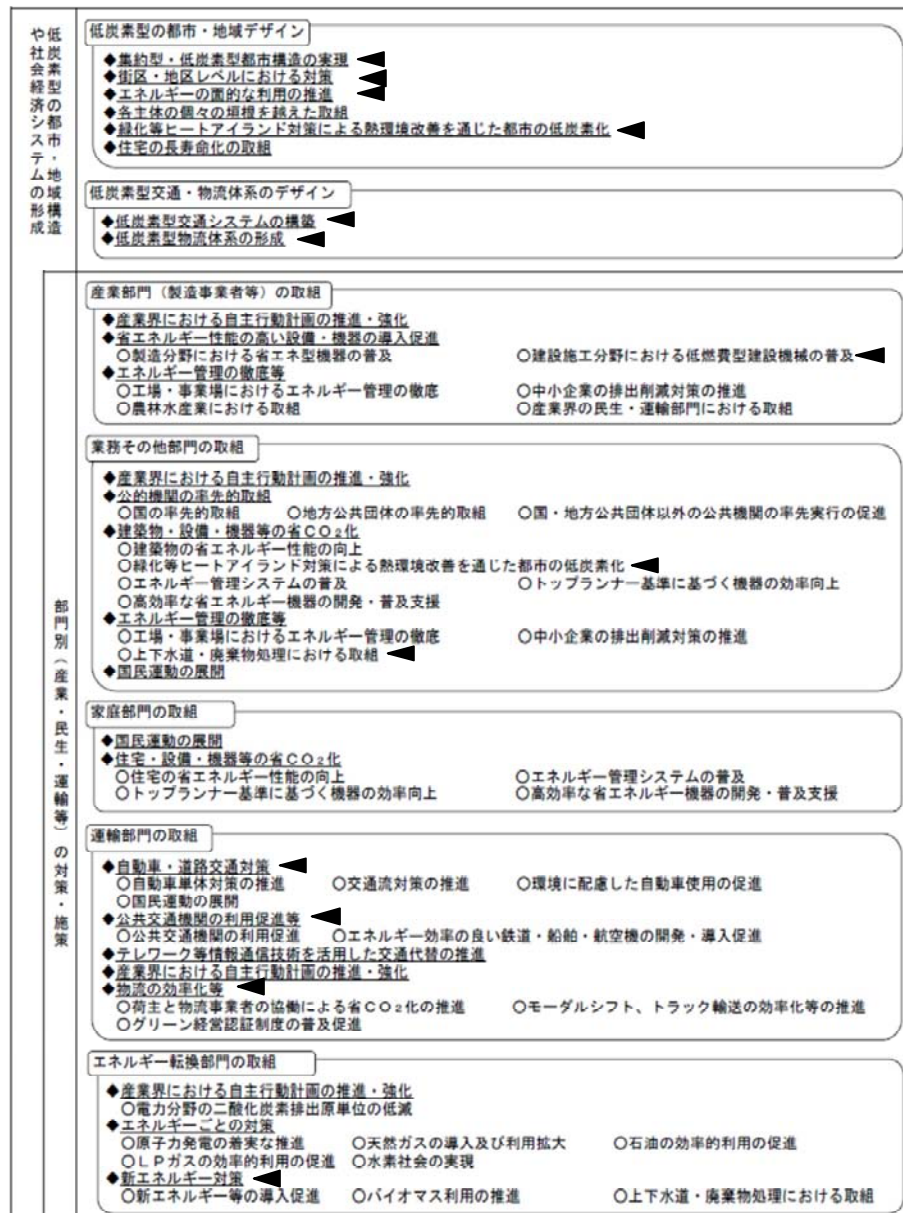


図1-3. 土木が関連するエネルギー起源二酸化炭素対策と土木の関係
（図中の ◀印は関連が深い対策。京都議定書目標達成計画改定版（2008年3月）
中の<表6.エネルギー起源二酸化炭素に関する対策の全体像>を加工）

また、「B. 低炭素型交通・物流体系のデザイン」では①低炭素型交通システムの構築、②低炭素型物流体系の形成などが課題となっている。

一方、部門別の対策の中では、建設施工分野における低燃費型建設機械の普及が直接的な土木工事にかかわるものとして挙げられ、上下水道・廃棄物処理における取組として、省エネルギーと再生可能エネルギー導入、汚泥から生成する消化ガスの活用、下水熱の活用、廃棄物発電のさらなる普及などが挙げられている。

二酸化炭素以外の温室効果ガス削減には、直接埋め立てされる廃棄物を削減することによるメタンの排出削減と前述の下水道からの下水汚泥焼却改善が亜酸化窒素の削減策として挙げられている。

(2) 2050 日本低炭素シナリオ

国立環境研究所が中心になって、将来の社会像の想定の下に長期的な社会の変化を織り込んだ上で 2050 年におけるわが国の温室効果ガス削減可能性を示すことを目的として「脱温暖化 2050 プロジェクト」⁷⁾が行われている。その一環として 2050 年時点の温室効果ガス排出量を 1990 年に比較して 70%削減する可能性を示し⁸⁾、またそのような大幅削減を実現するための 12 の方策を示している⁹⁾。

ここでは、2050 年時点の社会シナリオとして二つの可能性を考えている。一つは、活発で競争と技術志向の社会であり、大都市部に人口が集中する。もう一つはゆとりのある分散居住の社会である。いずれの社会像を想定しても、省エネルギーとエネルギー源の炭素強度の低下によって 1990 年に比較して 70%の二酸化炭素排出削減が 2050 年に可能であることを示している。これらの社会を実現するためには土木が大きな役割を果たすことは言うまでもない。

図 1-4 はそこで示されている 12 の方策と各部門における効果の関係を示したものである。この中で、運輸部門、まちづくり、エネルギー転換部門へのさまざまな方策に土木分野は積極的にかかわることが期待されている。

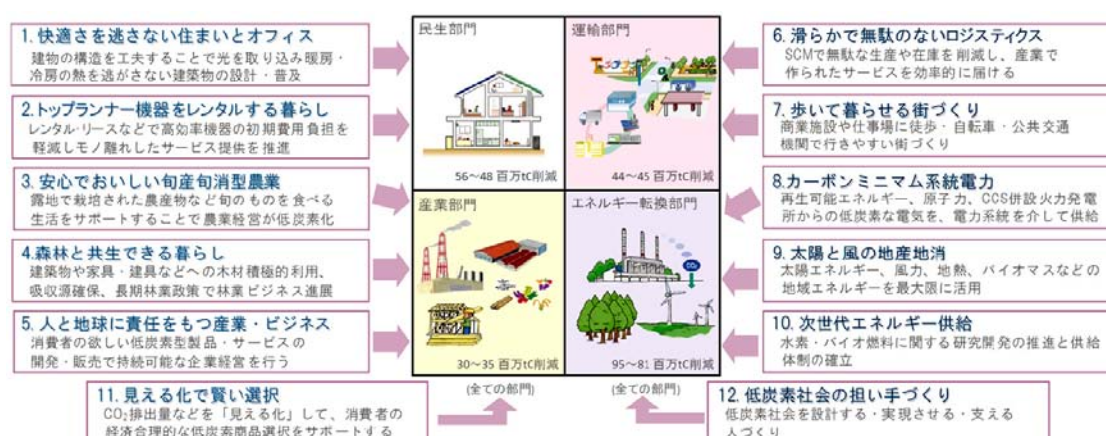


図1-4. 低炭素社会に向けた12の方策

1-4 土木の果たすべき役割

土木は、寿命が長いインフラを通じて実際の社会を形作っていく役割を担っており、とりわけ中・長期的に大きな役割を果たすことが期待され、先進的に低炭素社会形成に取り組んでいくことが必要である。大きく言えば、人間が生活する都市自身も、土木事業によって形成されるものであり、その都市の作り方によって温室効果ガスの排出量が変化する。

また、研究面としての土木は大きな広がりと深さを持っており、単に土木事業に関連するもののみならず、気候変動問題のほとんどすべての領域を研究対象としている。緩和策に関するもので言えば、さまざまな対策の連携、シナリオ研究、政策、産業構造変化、社会的な要員、経済的な側面など、ほとんどすべての課題に対して研究が展開されている。これについては第7章で述べる。

参考文献

- 1) IPCC (2007), Fourth Assessment Report , Working Group I Report "The Physical Science Basis", technical summary.
- 2) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス,
<http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html> (2008 年 8 月現在)
- 3) 国土交通省下水道部による (2008)
- 4) 森田弘昭(2006) 「地球温暖化と下水道」、日本水環境学会誌、Vol.29, 62-66
- 5) 漆崎昇, 水野稔, 下田吉之, 酒井寛二 (2001) 「産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定」,
日本建築学会計画系論文集, 549, 75-82
- 6) 京都議定書目標達成計画改定版 (2008 年 3 月)
- 7) 脱温暖化 2050 プロジェクト : http://2050.nies.go.jp/index_j.html
- 8) 2050 日本低炭素社会シナリオチーム (2007 年 2 月、2008 年 6 月改訂) 「2050 日本低炭素社会シナリオ : 温室効果ガス 70%削減可能性検討」 : http://2050.nies.go.jp/index_j.html から入手可能
- 9) 2050 日本低炭素社会シナリオチーム (2008 年 5 月) 「低炭素社会に向けた 12 の方策」 : http://2050.nies.go.jp/index_j.html から入手可能

2 建設事業由来のライフサイクル的な CO₂ 削減

2-1 はじめに

土木事業における建設行為から直接排出する二酸化炭素は重機や輸送における燃料由来が主になっている。しかし、土木事業が誘因となって排出する二酸化炭素はこのような直接排出に留まらない。土木事業よりも上流側のセメント・鉄の生産に伴う二酸化炭素排出は非常に大きい¹⁻³⁾。産業連関分析による CO₂ 排出原単位を用いて誘発分まで含めた建設事業の CO₂ 排出量を求めると、日本全体の CO₂ 排出量の 9.2% を占めることがわかる。また、上下水道システムのように建設時以上に運用時に CO₂ 排出量を発生するインフラもある。さらに、交通システムのように、運用時の環境負荷発生構造を長期間にわたり規定するインフラもあり、土木事業の CO₂ 排出量への実質的な寄与はさらに大きいと考えるべきである。

このように、誘発的な CO₂ 排出を含めて建設事業の環境負荷を評価することは極めて重要であり、ライフサイクルアセスメント (LCA) はそのための有効なツールである。

2-2 土木学会における LCA 手法の検討経緯

LCA の発想は、元々さまざまな消費財や工業製品を念頭に生まれたものであるが、その考え方や手法を、土木構造物や施設、あるいはそうした施設の集合体としての地域や都市に対して適用するための手法については、90 年代前半から検討されてきた。そこでは、建設事業の次のような特徴を考慮した上で、LCA の手法開発、原単位整備、事例研究等が進められてきた⁴⁾。

- ①施設の寿命が 20～30 年、あるいはそれ以上長いこと
- ②工場において製造される規格品と異なり、オーダーメイドの面が大きいこと
- ③実際に発生する環境負荷及びそれによる環境影響の地属性が大きいこと
- ④構造物の整備によって他の社会システムにも影響を及ぼすこと
- ⑤代替案との間で得られる便益が異なるため、厳密な機能単位の統一が困難なケースが多いこと

地球環境委員会においては、1994-96 年度に小委員会を組織し、建設事業の LCA について網羅的、体系的に調査研究が進められた⁵⁾。そこでは、共通データとしての二酸化炭素排出原単位の検討と、LCA 試算の蓄積が進められた。これらの成果は、環境パフォーマンス評価研究小委員会の成果と合わせた形で、2000 年に出版された⁶⁾。

また、環境システム委員会のメンバーが中心となって、1996-1998 年度の文部省科学研究費プロジェクト「社会資本整備に係わる LCA 手法の体系化と環境評価の総合化」として、建設事業の LCA 手法が意志決定支援ツールとして発展・定着するための総合的検討がなされた⁷⁾。CO₂、LCE、NO₂、SO₂、COD、BOD、T-N、T-P、SS の各原単位が整理されたほか、多くの事例研究が蓄積された。また、意志決定への LCA の反映のため、環境資源勘定や費用便益分析などとの融合方法が検討された。なお、この成果についても上梓されている⁸⁾。

同じく、環境システム委員会では 1999 年から環境評価小委員会を組織し、LCA も含めた様々な環境影響評価手法を対象に、環境を費用・便益も含めて多面的に評価する研究の現状、問題点、今後の方向性が検討された。2002 年 5 月のシンポジウム「環境の評価システムの理論と実践について」において、成果が報告された⁹⁾。

これまでの LCA 研究の知見からは、建設事業由来のライフサイクル的な CO₂ を削減するためには、次のような視点が必要であるといえる。第一に、土木構造物のライフサイクルのどのステージ、どの過程から CO₂ 発生が多いのかを正確に把握することである。第二に、複数の建設資材、工法、構造方式を LCA によって比較することで、より CO₂ 排出の少ない選択肢を提示することである。第三に、土木構造物の構想段階に LCA を反映させることで、より CO₂ 排出の少ない社会システムを形成することである。以下、この 3 点に即して、研究動向及び成果を整理する。

2-3 土木構造物のライフステージ別環境負荷

土木構造物には、ダムやトンネルのように、建設時に多くの資源・エネルギーが投入され、その後は長期にわたってあまり保守を必要とせずに供用されるものと、上下水道のように運用段階で多大な資源・エネルギーを要するものがある。これはライフサイクルに注目することで明らかになることであり、土木構造物の環境負荷を評価する際にそのライフサイクル的視点が重要であることがわかる。つまり LCA により、土木構造物のライフサイクルにおける環境改善余地を特定でき、環境改善のボトルネックが明らかになることで、技術開発あるいは制度改善に向けた戦略立案につなげることができる。

例えば、図 2-1 はトンネルと下水道終末処理場の CO₂ 排出構造を比較したものである⁶⁾。トンネルは建設時の資材生産過程からの排出が大半を占め、解体を必要としない。一方、下水道終末処理場では、運用段階で多量にエネルギーを消費することから CO₂ の大半の排出がある。また機器の寿命が相対的に短いことから、廃棄過程も無視できないことがわかる。

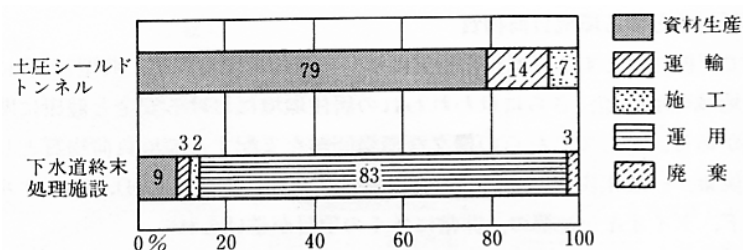


図 2-1 ライフステージ別の CO₂ 排出量比率の比較⁶⁾

図 2-2 は、ニュータウン造成の CO₂ 排出量の内訳である¹⁰⁾。最も大きな比率を占める材料をさらに細分化すると、図 2-3 のようになる。この分析から、平板ブロック・石積ブロック、セメント、生コンなどのセメント製品の使用量の削減が CO₂ 排出量軽減には重要であることがわかる。

道路については、効率的な道路整備により渋滞が緩和することで自動車の走行速度が向上し、その結果 CO₂ 排出が減少する一方、道路整備に伴い新たに発生（誘発）する自動車交通（走行量）も存在し、これによって CO₂ 排出量が増加するという面もある。さらに、例えば東京 23 区で年間 1 km 当たり約 760 時間の路上工事が実施されているが、路上工事による渋滞は CO₂ 排出の大きな要因となっていることも指摘されている¹¹⁾。そこで、工事事業者間の調整や情報開示等により路上工事の縮減に取り組むことで、最大 10 万 t/ 年の削減を目指すとされている¹¹⁾。

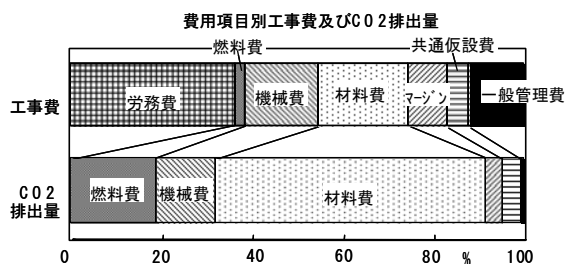


図 2-2 ニュータウン造成工事からの CO₂ 排出量の内訳¹⁰⁾

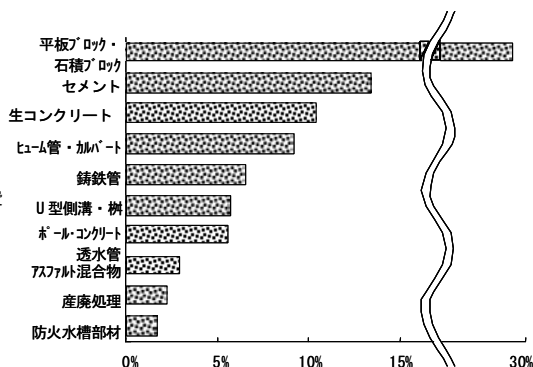


図 2-3 ニュータウン造成時の 材料由来の CO₂ 排出量の内訳¹⁰⁾

2-4 LCCO₂の削減ポテンシャル

建設事業の LCA の第 2 の役割としては、複数の建設資材、工法、構造方式を比較することで、より CO₂ 排出の少ない選択肢を明示することである。これにより、材料、工法、構造等に関する複数の代替案の中から最適解を見つけ出すことが可能となる。

コンクリート委員会では、省資源・省エネルギーなど環境に配慮したコンクリートの開発と利用を促進するために、1997 年にコンクリート資源有効利用小委員会が設置された。1999 年にはコンクリートの環境負荷評価研究小委員会（1999.12～2004.9）が設置され、環境負荷の観点からコンクリートの性能を評価する手法について調査研究を進めてきた。さらに、環境負荷評価が実務の中で適用されるためには、具体的な評価システムの構築が必要との認識から、コンクリート標準示方書の現行体系である性能照査型規定を環境に拡張適用するために、示方書小委員会環境側面検討部会（2003.9～2005.3）が設置され検討が進めてきた（図 2-4）。これらの成果は、報告書や指針という形で出版されている¹²⁻¹⁴⁾。

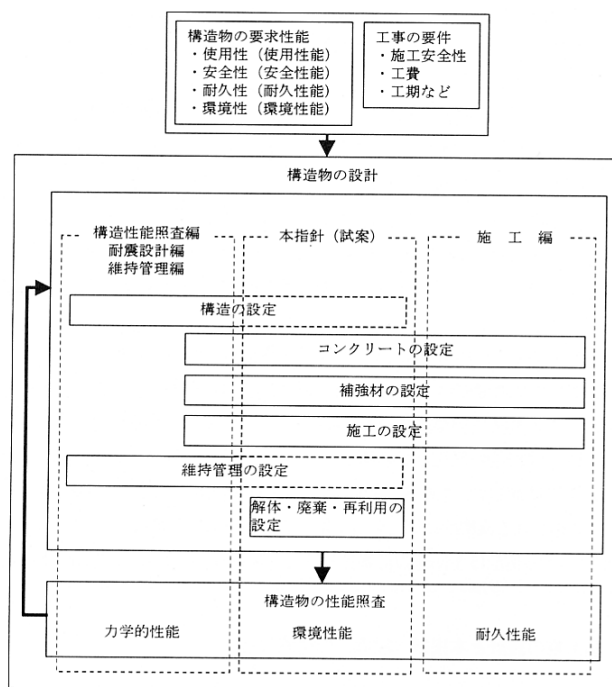


図 2-4 コンクリート構造物の設計と環境性能照査指針の位置づけ¹⁴⁾

一方、舗装の分野においては公共工事が大きな割合を占めており、現在 LCA に効果のある再生材の利用を義務化していることから、アスファルト舗装の再生率が 99%に達している。舗装工学委員会舗装環境小委員会においては、これらの効果を明確にするため、現在、環境適合設計の舗装分野への導入に関する研究を行っている。

公共工事におけるグリーン購入法特定調達品目選定のための評価基準に LCA 手法を導入することも、CO₂ 削減のためには非常に有効となる。例えば、北九州市では、建設リサイクル資材の評価手法として、簡易 LCA 手法を用いた環境側面の評価と、機能、価格の側面をも考慮した総合評価手法を開発し、すでに実際の採用基準に採用している¹⁵⁾。

また、環境システム委員会環境評価研究小委員会においても、国土交通省の下に設置された委員会を引き継ぐ形で、2008 年 1 月から評価基準に LCA を導入する手法を検討している¹⁶⁾。図 2-5 に、LCA 手法導入後の特定調達品目の環境評価イメージを示す。

	ライフステージ						環境分野毎の評価	
	採取	製造	運搬	建設	使用	廃棄	定量評価	定性評価
地球温暖化(CO ₂ 排出量)	±0	50	±0	-60	±0	±0	-10	○
廃棄物・資源	△	◎	△	△	▼	△	—	◎
有害化学物質	△	-10	△	△	△	△	—	△
生物多様性	△	△	△	△	△	△	—	△
その他	△	△	△	△	△	△	—	△

【定性的評価の凡例】

- ◎ : 環境負荷低減効果が十分であると認められる。
- 注 : 環境負荷低減効果が明確でない。
- : 十分とは言えないが環境負荷低減効果が認められる。
- △ : 環境負荷について比較対象と同程度である。
- ▼ : 環境負荷が増大する。
- ▼注 : 環境負荷増大懸念がある。
- × : 環境負荷が大幅に増大する。
(例えば、有害化学物質が規制値を超える場合など)

↓

廃棄物・資源分野で高い効果があり、他の環境分野で環境負荷増大の懸念がないため、総合的に勘案して、「①十分な環境負荷低減効果が認められる」と評価

図 2-5 LCA 手法導入後の特定調達品目の環境評価イメージ¹⁶⁾

2-5 意志決定への LCA の反映

建設事業の LCA の第 3 の役割としては、構造物単体ではなく複合システムとしてのインフラに LCA を適用し、CO₂ 排出量の少ない都市・社会システムを形成するための選択肢を示すことである。この観点からの研究は、近年盛んに取り組まれつつある。

環境システム委員会都市資源循環システム研究小委員会では、都市の資源循環システムの望ましい将来像を提示するとともに、このゴールに向かってどのようにシステムを再構築するかの方針を示すことを目的に 2004 年より検討を進め、LCA を用いた各種シナリオ分析の結果を提示した¹⁷⁾。他に、水循環システム¹⁸⁾、都市構造¹⁹⁾、交通システム²⁰⁾、ディスポーザー²¹⁾、バイオガспラント²²⁾、下水熱利用地域冷暖房システム²³⁾などに LCA を適用し、シナリオ分析を行った研究例がある(図 2-6～2-9)。また、LCA を組み込んだ環境シミュレータの開発も進んでおり、一般廃棄物処理システム処理の多様なシナリオを対象として、CO₂、エネルギー、コストを評価するシステム²⁴⁾、都市から発生する一般廃棄物・産業廃棄物全体を既存産業施設においてリサイクルするケースを想定し、望ましい廃棄物の投入範囲について LCCO₂ で評価するシステム²⁵⁾などが開発されている(図 2-10)。

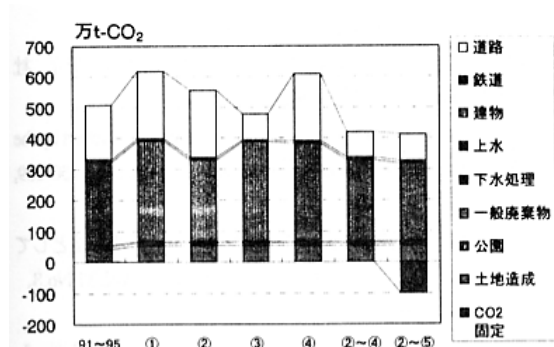


図 2-6 都市空間構造改変施策実施に伴う
2036-40 年の LCCO₂ 予測 (①BaU、
④主要駅付近への住宅誘導) ¹⁹⁾

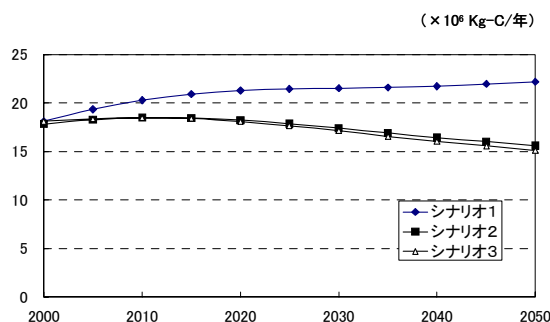


図 2-8 ライフサイクルシミュレーションによる
システムポーター導入シナリオ別の
LCCO₂ 予測結果 (シナリオ 1 : BaU、
シナリオ 2 : 2000 年以降単体ディス
ポーター導入、シナリオ 3 : 2000 年以降
固液分離装置付ディスポーター導入) ²¹⁾

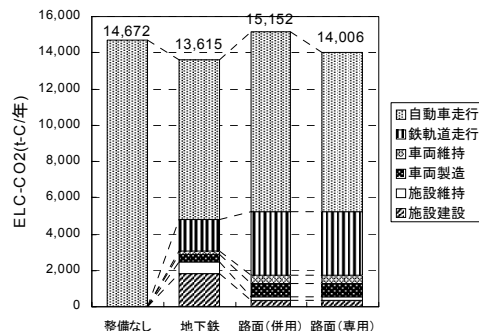


図 2-7 地下鉄・路面電車整備による LCCO₂
変化 (区間総需要 10 万人/日、
鉄軌道への転換率 40%) ²⁰⁾

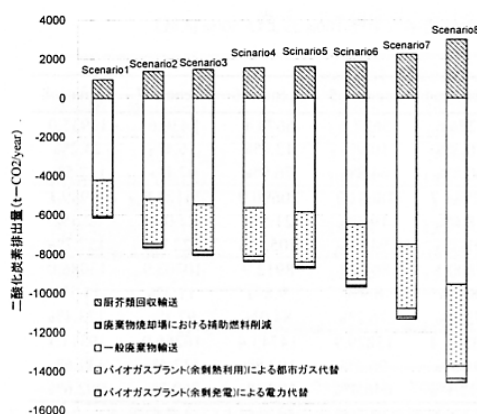


図 2-9 厨芥類の収集シナリオ別
CO₂ 収支の内訳 ²²⁾

政策の意志決定の場に LCA をより接近させるために、「2-4」で触れたグリーン購入の他、戦略的環境アセスメント (SEA)、環境会計、費用便益分析における LCA の応用が検討されている。

環境に影響を及ぼす政策や計画について、事業の実施段階ではなく、その構想あるいは計画の段階で環境影響を評価しようというのが SEA である。これまでに廃棄物処理計画についての SEA が検討された経緯があるが ²⁶⁾、LCA はそのための重要な分析ツールとなっている。都市あるいは国土の長期あるいは短期の整備計画を対象に、トータルで必要となるエネルギー消費、環境負荷発生量を LCA 的に評価し、環境的に望ましい代替案の選定に役立てる必要があり技術的にも制度的にも今後の整備が待たれる状況にある ²⁷⁾。

環境保全のためのコストとその効果を定量的に把握し、その結果を企業の会計システムの中に取り入れるようとするのが環境会計である。もともとの環境会計は企業会計を対象とするものであったが、この概念を自治体の下水処理事業 ²⁸⁾ や廃棄物処理事業 ²⁹⁾ に応用することも検討が進んでいる。その中で、環境負荷削減効果については、LCA による評価が有効であることが論じられている。

さらに、近年ではプロジェクトの事前あるいは事後の事業評価が重要視されているが、その代

表的な手法である費用便益分析あるいは費用効果分析と LCA の融合も検討が進んでいる。例えば、交通システム²⁰⁾ やニュータウンにおける CO₂ 削減策¹⁰⁾ などの研究事例（図 2-11）がある。

また、慢性的な交通渋滞交差点における地下道建設を対象に、建設工事による環境負荷と渋滞解消による環境負荷低減効果を評価し、初期の環境負荷（CO₂, SO_x, NO_x）のペイバックタイムを指標として建設工事の意義を評価した事例もある³⁰⁾。

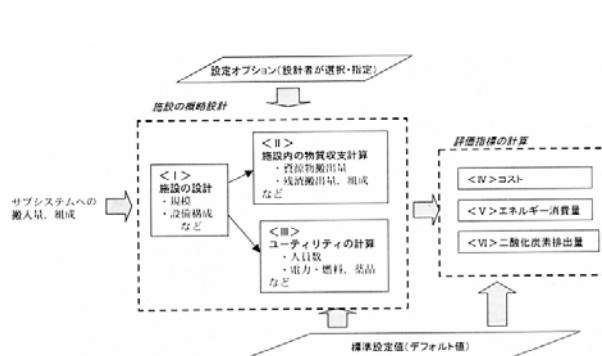


図 2-10 ごみ処理サブシステムの設計から評価までの計算フロー²⁴⁾

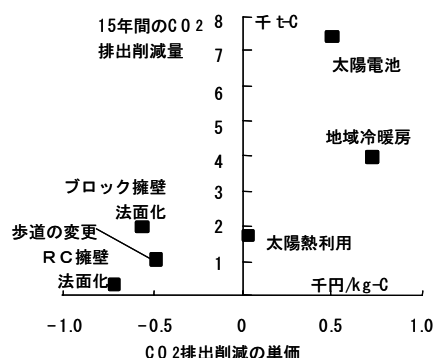


図 2-11 ニュータウンにおける CO₂ 削減策の効果とコスト¹⁰⁾

参考文献

- 1) 酒井寛二・漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定，環境情報科学，Vol.21，No.2，pp.130-135，1992.
- 2) 岡本英靖・酒井寛二・漆崎昇：土木工事における炭素排出量の推定，第 1 回地球環境シンポジウム講演集，pp.93-98，1993.
- 3) 池田秀昭・井村秀文：日本・中国・韓国の社会資本整備にともなう環境インパクトの比較研究，環境システム研究，Vol.22，pp.154-15，1994.
- 4) 松本 亨・左健：都市基盤の再構築における LCA の役割：都市生活排水・廃棄物処理システムを事例として，第 32 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.195-202，2004.
- 5) 土木学会地球環境委員会環境負荷評価（LCA）検討小委員会：土木建設業における環境負荷評価（LCA）検討部会平成 7 年度調査研究報告書，1996.
- 6) 土木学会地球環境委員会編：建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント，鹿島出版会，2000.
- 7) 井村秀文編：「社会資本整備に係わる LCA 手法の体系化と環境評価の総合化」研究成果報告，科研費基盤研究(A)(1)（代表：井村秀文），2000.
- 8) 井村秀文編：建設の LCA，オーム社，2001.
- 9) 土木学会環境システム委員会環境評価研究小委員会：環境システムシンポジウム「環境の評価システムの理論と実践について」，pp.1-36，2002.
- 10) 花木啓祐：大規模宅地造成事業の LCA，「建設の LCA（井村秀文編）」所収，オーム社，pp.93-102，2001.
- 11) 地球温暖化防止のための道路政策会議：地球温暖化防止のための道路政策会議報告，2005.
- 12) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ 44，2002.

- 13) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの環境負荷評価（その2），コンクリート技術シリーズ 62, 2004.
- 14) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125, 2005.
- 15) 鶴田 直・松本 亨：LCA 概念を導入した自治体の建設リサイクル資材認定制度の提案，第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.311-313, 2006.
- 16) 土木学会グリーン購入法の公共工事の技術審査に関わる運用方針検討委員会：グリーン購入法の公共工事の技術評価基準についての検討結果報告, 2006.
- 17) 土木学会環境システム委員会・地盤工学委員会都市資源循環システム研究小委員会：成果集循環型社会の未来～都市における資源循環の再構築～, 2005.
- 18) 楠田哲也：水道システムと LCA, 「建設の LCA（井村秀文編）」所収、オーム社, pp.161-176, 2001.
- 19) 林 良嗣・加藤博和・北野恭央・喜代永さち子：都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル，環境システム研究論文集, Vol.28, pp.55-62, 2000.
- 20) 林 良嗣・加藤博和：交通システム整備の LCA, 「建設の LCA（井村秀文編）」所収、オーム社, pp.103-119, 2001.
- 21) 松本 亨・石崎美代子・左 健・島岡隆行：家庭系食品廃棄物の再資源化技術導入シナリオへのライフサイクルシミュレーションの適用，土木学会環境システム研究論文集, Vol.31, pp.125-132, 2003.
- 22) 石井 暁・花木啓祐：川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定，環境システム研究論文集, Vol.34, pp. 443-453, 2006.
- 23) 池上貴志・荒巻俊也・花木啓祐：下水熱利用地域冷暖房システムの戦略的導入による環境負荷低減効果の解析，環境システム研究論文集, Vol.33, pp. 343-354, 2005.
- 24) 松藤 敏彦・田中 信壽：一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価，土木学会論文集, VII 巻, 678 巻, 19 号, pp.49-60, 2001.
- 25) 藤田 壮・長澤恵美里・大西悟・杉野章太：川崎エコタウンでの都市・産業共生の展開に向けての技術・施策システム，環境システム研究論文集, Vol.35, pp.89-100, 2007.
- 26) 環境省個別分野における戦略的環境アセスメントに関する研究会：廃棄物分野における戦略的環境アセスメントの考え方（中間報告書），2001.
- 27) 土木学会環境システム委員会：第 24 回環境システムシンポジウム 戦略的環境アセスメント（SEA）の展望と課題 講演資料, 2007.
- 28) 東京都下水道局：東京都下水道局環境報告書，2001-2005.
- 29) 橋本征二・田畑智博・松本亨・田崎智宏・森口祐一・井村秀文：廃棄物処理事業を対象とした環境会計の枠組み試案，第 33 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.142-148, 2005.
- 30) 堺孝司・小嶋克宏・草薙悟志・入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益評価に関する研究，土木学会論文集 G, Vol.63, No.1, pp.40-50, 2007.

3 国土計画とモビリティ由来の CO₂ 削減

日本の国土利用をどのように図り、かつ各土地利用を運輸部門のインフラストラクチャによってどのように結び付けるかは、CO₂排出量の増減を大きく左右する重要な要因である。平成 20 年 7 月に閣議決定された国土形成計画（全国計画）にもみられるように、国土計画やモビリティ由来の CO₂排出量の削減可能性は小さくない。集約型都市構造の実現により、公共交通機関等の利用促進が図られ、また、森林の整備・保全、都市緑化等の推進は、温室効果ガスの吸収源対策となる。運輸部門においては、環状道路等幹線道路ネットワーク、高度道路交通システム（Intelligent Transport System(ITS)）、Light Rail Transit(LRT)や Bus Rapid Transit(BRT)といった公共交通機関などインフラストラクチャの整備、交通関連の対策、モビリティ・マネジメント、プライシング、環境的に持続可能な交通体系を実現する計画の推進などのマネジメントにより CO₂排出量を削減できる。モーダルシフト等の物流体系のグリーン化も重要である。以下では、国土計画とモビリティ由来の CO₂排出量削減に関して、主要な緩和策について紹介し、それらの効果に関して議論することとする。

3-1 モビリティ由来の CO₂削減

運輸部門は、自動車、鉄道、船舶、航空機、自転車、徒歩など交通手段別に捉えることができ、それぞれインフラストラクチャ、車両・機材、交通主体、制度・政策といった内容が要素として存在する。交通主体による意思決定の結果、フローとして人の流れ（旅客）とモノの流れ（物流）が生じ、それぞれ地球温暖化問題と密接な繋がりがある。また、運輸部門からの温室効果ガス排出量は、化石燃料の燃焼による CO₂排出量が中心となるが、化石燃料消費量と CO₂排出量がほぼ線形の関係となることを考えれば、運輸部門における取り組みは 1970 年代のオイルショックの時代にまで遡ると言えよう。なお、自動車、鉄道、船舶、航空機それぞれの車両・機材に関する単体対策を促進する制度・政策を整備することも極めて重要であるが、以下では、主にインフラストラクチャと交通主体、およびこれらに関連した制度・政策に基づく CO₂排出量削減を中心に検討する。

運輸部門からの CO₂排出量削減を目的の 1 つとして、乗用車からバス、鉄道、非動力交通手段への旅客の転移が図られている。CO₂排出量削減の程度は、バスや鉄道の乗車人員と一次エネルギー源に依存している。乗用車のバスと鉄道に対する人 km 当たりの平均エネルギー消費量は、それぞれ西欧の大都市では 2 倍、5 倍、日本では 3 倍、6 倍であるが、米国では 0.85 倍、1.17 倍である。米国のように、乗車人員が極端に低い場合には、バスや鉄道の方が人 km 当たりの平均エネルギー消費量が高くなる場合がある。しかし、乗用車トリップが既存のバスや鉄道に転移する場合、バスや鉄道の乗車人員を増すことになり、乗用車トリップによる CO₂排出量が削減されるのに対して、バスや鉄道トリップが乗用車に転移する場合、乗用車トリップによる CO₂排出量が純増する点に注意する必要がある。

バスや鉄道利用促進政策が採られた場合、どれ位の旅客が乗用車からバスや鉄道に転移するかは重要な問題である。特に、新規の鉄道などがどの程度、以前の乗用車利用者からの転移を促しているかは重要な情報となるが、必ずしも蓄積が図られているわけではない。マンチェスター LRT の調査結果では、旅客の 11%が、もし、LRT が無かったら乗用車を利用しているとしている。日

本の新規鉄道やモノレールを対象とした調査によれば、旅客の10～30%が乗用車からの転移であり、大多数の旅客は以前も既存のバスや鉄道ルートを利用していた。英国における調査でも、5～30%と推定しており、もともと乗用車トリップのシェアが高い米国やオーストラリアにおいて欧州よりも高い値が認められるとしている。発展途上国の都市においても、ほとんどが既存公共交通からの転移トリップか、新たな発生トリップであると結論付けられている。

とは言え、乗用車に対する交通代替手段を提供しなければ乗用車利用とこれに伴うCO₂排出量の削減を図ることができないのは明白である。1990年代には欧州、米国等を中心としてLRTの復活が目覚しかったが、近年ではブラジルの都市を手本としたBRTへの関心が高まってきている。特に、運輸部門における最初のクリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism (CDM)）スキームがコロンビアのボゴタ BRT において認められ、さらに注目を集める結果となっている。また、LRT や BRT の利用を促進するために、これらの公共交通機関整備を鉄道駅、バス停付近の都市開発と連携させる、いわゆる Transit Oriented Development(TOD)に関する検討も重要である。

一方、どの程度、乗用車から非動力交通手段、例えば、徒歩や自転車に転移することによりCO₂排出量を削減できるかは地域条件に左右されよう。オランダやデンマークなど欧州の一部の国々では、自転車利用の促進が大々的に行われている。日本でも、自転車に関わる道路交通法の改正が行われたばかりであり、さらに自転車利用の促進が図られるものと考えられる。また、日本では、鉄道駅から自転車利用圏内に住んでいる人々が高い割合を占めており、自転車単独のトリップのみならず、便利で安全な駅前駐輪場や自転車道を整備することにより、他の手段との組み合わせにより非動力交通手段の利用を促進できるであろう。非動力交通手段利用の促進は、国民健康の視点からも望ましいという議論も行われている。

カーシェアリングも、条件によってはかしこい自動車の利用方法を促し、もって自動車によるCO₂排出量削減に寄与する場合がある。特に、電気自動車など既存のガソリン車と比較してCO₂排出量が格段に少ない車両を用いれば、大きなCO₂排出量削減を見込むことができる。反面、電気自動車などはエネルギー供給の面で既存のガソリン車よりも劣ることから、何らかの体系的な対応により、この点を補完することが必要となる。エネルギー供給の面で不利なことは、燃料電池車、天然ガス車などにも当てはまる点であり、これらの車両に対するエネルギー供給システムをどうデザインするかが課題である。

1990年代には、主に渋滞緩和を目的として交通需要マネジメント（Travel Demand Management(TDM)）が取り組まれてきたが、地球温暖化対策としての比重も増してきている。前節で触れた乗用車から鉄道、バス、非動力交通手段、カーシェアリングなどへの転移促進の他、時差通勤やフレックスタイムの導入、テレワークなどIT技術による交通の代替、ETC、VICS、信号制御の高度化などITSによる道路交通の円滑化、などTDMには様々な内容が含まれている。この内、情報提供、コミュニケーション戦略、教育手法の利用といったソフト対策は、ハード対策を支援する目的にも用いられるし、効率的な運転スタイルの促進や乗用車利用の削減といった人々の行動変化を支援する目的にも用いられる。よく組織されたソフト対策は低費用で乗用車利用を効果的に削減できることがわかっている。インディビディアライズト・マーケティングと呼ばれる、的を絞った、個人的な、カスタムメイドなマーケティング手法は、乗用車利用の削減を目的として、複数の都市で実施されている。オーストラリア、ドイツ、スウェーデンの都市にお

いて、乗用車トリップ数をそれぞれ 14%、12%、13%削減することに成功している。トラベル・フィードバック・プログラムは、オーストラリアの都市に適用され、自動車台 km を 11%削減することに成功し、その効果には持続性があることが確かめられている。日本における行動プランを伴ったトラベル・フィードバック・プログラムの適用事例でも、乗用車利用が 12%、CO₂排出量が 19%削減されたことが報告されている。

ソフト対策は、日本においては、特に、モビリティ・マネジメント (Mobility Management (MM)) と表現され、主要な CO₂ 排出量削減策の 1 つとして認識されている。モビリティ・マネジメントは「人々の意識や行動の自発的変化を期待し、人々に大規模かつ個別的に働きかけるコミュニケーションを主体とした交通政策」と定義されており、「一人一人が「過度に自動車に依存する習慣」から「自動車や公共交通をかしこく利用する生活」へと少しずつ変容していくこと」で環境などの改善が図られるものである。日本におけるモビリティ・マネジメントに関連する知見の蓄積は、近年、目覚ましいものがあり、居住地のみならず学校、職場において実施され、その長期的な効果の検討、海外事例との比較などが行われている。また、実施のタイミングとして、自動車免許の取得、居住地の変更などが注目され、その場合の実施効果が確認されている。

エコドライブも重要な対策の 1 つである。自動車の燃料消費は運転の仕方により抑制することができる。通常の自動車における燃費の良い運転の仕方としては、スムーズな加減速、低いエンジン回転数の維持、アイドリングストップ、最高速度の低減、適切なタイヤ圧の維持がある。欧州や米国の研究結果によれば、エコドライブ訓練により 5~20%の燃費改善が可能である。また、多くの場合、エコドライブ訓練による CO₂ 削減費用はマイナス、つまり便益を発生すると報告されている。エコドライブは訓練プログラムや車内装備の補助により実施され、大型貨物車から小型乗用車まであらゆる種類の自動車に適用可能である。問題は、いかにドライバーを訓練プログラムに参加させるか、そしてプログラム参加後、いかに効率的なドライビングを長期にわたって維持させるか、という点にある。

自動車の保有や利用に影響を与えるべく市場価格を変化させる一連のプライシングもまた重要な対策の 1 つである。道路交通に関する典型的なプライシング手段には、燃料税、車両登録料、保有税、通行料金、駐車料金などが含まれる。税、料金などは、政府の財源になると共に、交通需要とこれに伴う燃料需要に影響を与え、CO₂ 排出量削減にも貢献する。また、税制を工夫することにより、CO₂ 排出量の少ないハイブリッド車や小型車への保有シフトを促すことも可能である。もっとも CO₂ 排出量削減にのみ焦点をあててプライシングを議論することは少なく、大気汚染、事故、混雑緩和など多様な目的の 1 つとして CO₂ 排出量削減が存在する。近年の燃料税を中心とした道路特定財源に関する議論にみられるように、道路交通に関する税制、およびその用途をどのようにすべきかという点に関する検討は少なくない。様々なシナリオに対する自動車保有、利用、CO₂ 排出量を含む様々な効果を計測し、比較検討するためには複雑なモデル分析が必要となる。先進国における価格弾力性に関する研究によれば、実質燃料価格の 10%の増加は、道路交通による燃料消費量を短期的 (1 年程度) に 2.5%削減し、長期的 (5 年以上) に 6%削減する。また、長期的にみて、交通需要に対する所得弾力性は燃料価格弾力性の 1.5~3 倍も大きいため、燃料税や CO₂ 税の効果を限定的なものとしている。プライシングの一形態とも捉えることができるエコポイント制度の導入可能性やその効果に関する検討も行われている。また、シンガポール、ロンドン、ストックホルムに代表される都市部のロードプライシングの導入においても、CO₂ 排

出量削減は重大な関心事となっており、ストックホルムのケースでは、都市圏で 3%程度 CO₂ 排出量削減すると想定されていた。

道路や鉄道などの適切なインフラストラクチャの整備も重要である。交通政策は、地球温暖化対策のみならず、経済、社会、環境に関連する多様な目標を課されて展開されている。特に発展途上国においては、CO₂ 排出量を増加させても、経済的、社会的目標から将来の交通需要に見合う適切なインフラストラクチャの整備を実施する必要性が生じる場合もあるだろう。また、先進国でも、前述のように都市部にロードプライシングを導入する場合には、環状道路等幹線道路ネットワークの存在が多様で弾力的な料金設定を行う上で不可欠となる。交通のインフラストラクチャの整備評価に最もよく用いられる手法が費用便益分析であり、CO₂ 排出量は間接的には燃料費用、直接的には CO₂ 価格により評価される。その際、評価の対象範囲を適切に設定することも重要である。異なる種類のインフラストラクチャの整備を比較するマルチモーダル評価や異なる整備計画を比較する戦略的評価の制度を充実させる必要がある。また、既存のインフラストラクチャを最大限に活用するマネジメント施策も重要である。集中工事・共同施工の実施による路上工事の縮減、ボトルネック踏切等の対策などにより CO₂ 排出量を削減することができる。

人の流れ（旅客）に対して、モノの流れ（物流）による CO₂ 排出量の削減も重要である。トラックから海運や鉄道へのモーダルシフト、国際貨物の陸上輸送距離の削減などの対策が考えられる。また、高速道路での大型トラックの最高速度の抑制も CO₂ 排出量削減に寄与する対策の 1 つである。先進国の中で日本の旅客交通の人 km 当たりの平均エネルギー消費量はかなり低い水準にあるが、貨物交通のトン km 当たりの平均エネルギー消費量は非常に高い水準にあるという事実はあまり知られていない。先進各国の特徴や原単位のとり方にもよるが、物流における一層の CO₂ 排出量削減の可能性を十分に検討する必要がある。

3-2 国土計画と CO₂ 削減

都市における土地利用計画と交通計画の適切な連携により CO₂ 排出量の小さい交通システムを構築しようとする試みも検討されている。Newman, P. and Kenworthy, J.は、世界の 46 都市を対象として、都市ごとの自動車交通への依存性の比較調査を行い、人口密度と 1 人当たりの乗用車利用量との間の負の相関関係を見出し、土地利用計画と交通計画の連携のあり方に大きな示唆を与えた。これ以外にも、都市の人口密度と 1 人あたりの自動車利用との間の相互関係を検討した例は非常に多くなっており、多くの場合、負の相関関係を確認している。しかし、米国では、土地利用パターンの大体は既に定まっており今後の変化はわずかな部分にしか生じない、あるいは、土地利用への選好よりも人々の行動への直接的な政策介入の方が影響を与えやすい、といった反論も少なくない。また、交通行動に対する居住密度の弾力性は居住密度に依存し、ある閾値以下では交通行動と居住密度の関係が見出せなくなる、1 人あたりの乗用車利用距離に対する人口密度の弾力性は $-0.15 \sim -0.89$ である、あるいは、交通行動に対する環境デザインの弾力性をレビューしたところ、自動車利用距離と自動車トリップに対する密度の弾力性は、いずれもおおむね -0.05 程度である、といった結論も得られている。

米国の都市のほとんどは居住密度が 20 人/ha に満たず、他国の都市と比較して極端に居住密度が低いことに留意する必要がある。日本の同様な研究例では、より高い弾力性が得られるようである。土地利用と交通との間の相互関係、特に因果関係については、注意深く検討すべき点が少

なくない。対策としては、住宅地を自動車交通への依存性別に詳細に分類し、それぞれの分類に対して自動車依存性を減少させる対策を図ろうとするアプローチなどがある。また、都市計画規制、交通施設整備により、望ましい土地利用と交通の相互関係を導こうとするアプローチも検討されている。具体的な都市圏を対象に、直接間接に都市の人口密度を上昇させる政策の評価を行なった事例も多く、東京都市圏や京阪神都市圏を対象とした分析例などがある。海外における都市における土地利用計画と交通計画の適切な連携の好例としては、ブラジルのクリチバ、米国のポートランド、スウェーデンのストックホルムなどがある。もっとも、米国における反論もあるように、土地利用計画と交通計画の連携だけでは、必ずしも交通行動変容を促すには至らないという指摘もあり、前節で触れたようなソフト対策も必要である。

都市以外における国土利用も CO₂ 排出量削減に寄与する重要な要素である。日本の国土の約 70%は森林であり、温室効果ガス吸収源としてその適切な整備・保全が必要となる。また、今後の人口減少に伴い、国土の都市的土地利用である住宅地やその関連土地利用はいずれ減少に向かうものと考えられる。このような都市的土地利用の縮退は、集約型都市構造の推進によってさらに加速する可能性が高い。その際には、CO₂ 排出量削減に資する縮退跡地利用のあり方を検討する必要が生じるであろう。緑地や水面の効率的な配置の検討の他、太陽光発電、風力発電など新エネルギー供給、バイオマスの利活用の推進を国土利用にどう位置づけるかという点も重要な課題となろう。制度的には上述の点を総合的に検討したうえで国土のランドデザインを描くことも必要と考えられる。

最後に、国土利用やモビリティ由来の CO₂ 排出量削減は国土計画、交通計画が取り組むべき多くの問題の 1 つであり、常に他の問題とのバランスを検討する必要がある。特に、運輸部門は他の部門と密接に結びついていることから、運輸部門のみで CO₂ 排出量削減を図ることが他の部門にとって必ずしも望ましくない結果をもたらす場合もあるであろう。また、自動車に依存せざるを得ない状況にある地域や人々に対して、少なくとも短期的には、自動車の利用によりある程度のモビリティ・ニーズを満たす必要もあろう。すなわち、環境的側面のみならず、経済的、社会的側面から対象を吟味する必要がある、持続可能性の観点が非常に重要となる。

4 地域社会全体としての CO₂ 削減～人口密度・交通需要・居住特性から考える

4-1 はじめに

2008 年、いよいよ京都議定書の第一約束期間がスタートした。日本の足元をみると、2006 年度の温室効果ガスの排出量（確定値）¹⁾は 1990 年比で 6.2%増加しており、削減目標の-6%との隔たりは約 12%となっている。議定書達成に向けた努力を国レベルに加えて地域レベルでも加速しなければならない。

一方、京都議定書は地球レベルの気候安定化に向けた国際約束の画期的な第一歩ではあるものの、長期的に必要なとされている削減量と比べればその歩みは僅かなものに過ぎない。

そのような認識のもと、2050 年までといった長期では温室効果ガス排出量半減社会（低炭素社会）の必要性は、科学的にも政治的にも大きな異論は少なくなりつつある。しかしながら、短中期となると多くの国・地域が思い切った政策転換を躊躇しているのも事実である。バックキャスティングという思考実験は、このような現実の優柔不断さに楔を打ち込めるのではという期待も背負いつつ注目を集めてきた。

そこで本稿では、低炭素地域社会の形成に向けた国内外の動向をレビューしたうえで、滋賀県全体を対象としたバックキャスティング研究の成果を題材に、中長期的にみてどのような政策転換が地域の交通部門や土地住宅部門において求められるのかを考察したい。

なお、地域社会全体の CO₂ 削減といった場合、産業部門・業務部門や貨物交通部門の対策も重要であるが、地域レベルの政策との関係性を考慮し、ここでは旅客交通部門や土地住宅部門に焦点を当てることとする。

4-2 諸外国での低炭素地域社会に向けた長期目標の設定

欧州においては近年、国レベルでの低炭素社会に向けた長期目標が設定されてきた。発展途上国の排出量は 2050 年まで増加せざるをえないことを考慮すると、先進国には半減以上の削減が求められることは必至であるため、表 4-1 に示すように 2050 年までに英国は 60%削減、フランスは 75%削減、ドイツは 80%削減を国家目標として掲げた（いずれも 1990 年比）。英国ではこの目標達成に向けた法制度の準備も進んでいる。

これら欧州 3 カ国の長期シナリオにおける交通部門の位置づけをみると、いずれも相当量の削減が求められており、とくにフランスでは 2050 年の必要削減量の 5 割～6 割を交通部門が担っている。

表 4-1 国レベルでの長期削減目標と交通部門の役割

国	発表年	2050 年削減目標(基準年)	交通部門の役割
イギリス ²⁾	2003 年	CO ₂ 排出量: -60% (1990)	2020 年目標達成に必要な削減量の 15%を交通部門がになう。
フランス ³⁾	2004 年	CO ₂ 排出量: -75% (1990)	2050 年目標達成に必要な削減量の 50~60%を交通部門がになう。
ドイツ ⁴⁾	2002 年	GHG 排出量: -80% (1990)	2050 年の交通部門のエネルギー消費を基準ケースから 39~51%削減。

表 4-2 都市・地域レベルでの長期削減目標と交通部門の役割

都市/地域[国],	発表年	排出削減目標(基準年)	交通部門の役割
大ロンドン ⁵⁾ [UK]	2004 年	化石燃料由来 CO ₂ 排出量 2010 年: -20% (1990) 2050 年: -60% (2000)	2010 年目標達成に必要な削減量の 17%を交通部門が担う。
カリフォルニア州 ⁶⁾ [USA]	2006 年	GHG 排出量 2010 年: 0% (2000) 2020 年: 0% (1990) 2050 年: -80% (1990)	2020 年目標達成に必要な削減量の 46%を交通・土地利用部門が担う。
コネチカット州 ⁷⁾ [USA]	2005 年	GHG 排出量 2010 年: 0% (1990) 2020 年: -10% (1990) 長期: -75% (現状)	2020 年目標達成に必要な削減量の 20%を交通部門が担う。
オレゴン州 ⁸⁾ [USA]	2004 年	GHG 排出量 2010 年: 0% (1990) 2020 年: -10% (1990) 2050 年: -75% (1990)	2005 年目標達成に必要な削減量の 23%を交通部門が担う。
ストックホルム市 ⁹⁾ [スウェーデン]	2002 年	GHG 排出量 2030 年: -20% (1990) 2050 年: -60~80%(1990)	2030 年目標達成に必要な削減量の 52%を担う。
ミュンヘン市 ¹⁰⁾ [ドイツ]	2004 年	GHG 排出量 2010 年: -20% (1987) 2030 年: -50% (1987)	交通部門では 2030 年までに 42%削減する (1987 年比)。
ベルリン市 ¹¹⁾ [ドイツ]	2004 年	CO ₂ 排出量 2010 年: -25% (1990) 2020 年: -40% (1990) 2030 年: -50% (1990)	交通部門では 2030 年までに 25%削減する (1990 年比)。
滋賀県 ¹²⁾ [日本]	2008 年	GHG 排出量 2030 年: -50% (1990)	2030 年目標達成に必要な削減量の 29%を交通部門が担う。
豊中市 ¹³⁾ [日本]	2007 年	GHG 排出量 2020 年: -20% (1990) 2050 年: -70% (1990)	交通部門では 2020 年までに 34%, 2050 年までに 79%削減する(1990 年比)。

また、表 4-2 に示すように都市や地域のレベルでも同様の目標設定や政策形成が進みつつある。国レベルでは京都議定書を離脱している米国のいくつかの州においてもチャレンジングな目標を掲げたことは注目に値する。このなかでの交通部門の役割をみると、目標達成に必要な排出削減量の 2 割～3 割程度を交通部門が担っている地域が多い一方で、カリフォルニア州やストックホルム市では必要削減量の約 5 割を交通・土地利用部門が担っており、この部門の大きな役割が期待されている。

4-3 日本での低炭素地域社会に向けた動き

このような諸外国での意欲的な目標設定と戦略策定が進むなか、日本では 2004 年度より国立環境研究所¹⁴⁾が中心となって研究プロジェクトを進めており、2007 年 2 月には 2050 年までに日本の温室効果ガス排出量を 7 割削減 (1990 年比) するために必要な対策群を定量的に提示した。このなかで交通部門の位置づけをみると、必要削減量の 22%～23%を交通部門が担うこととなっている。また、松橋ら¹⁵⁾は同プロジェクトのなかで 2050 年の交通部門からの二酸化炭素排出量を 7 割削減するための諸対策を検討しており、そのなかで 2020 年に向けて年間約 1%～1.5%のペースで自動車交通量を抑制する必要性を指摘した。

一方、都市・地域レベルでは、2007 年度に滋賀県や豊中市で長期的な温室効果ガス排出の削減計画・構想が策定された (表 4-2 参照) ほか、東京都や京都市、つくば市においても同様の検討

が進んでいる。

Shimada ら¹⁶⁾は、滋賀県での 2030 年排出量半減シナリオ（以下「滋賀シナリオ」という）の策定に研究面から支援したところであるが、その結果を端的に示したのが図 4-1 である。電源構成の低炭素化や自動車燃費の向上など国全体での対策の削減寄与が多い一方で、環境配慮行動や交通構造改革といった地域レベルでの取組みに依存する部分も相当あることを見逃してはならない。

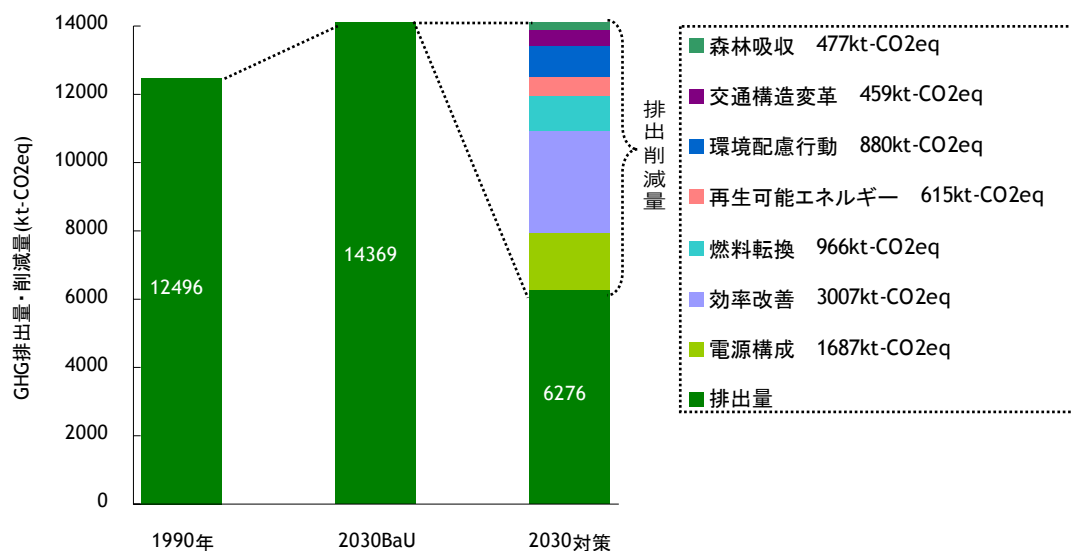


図 4-1 滋賀シナリオでの温室効果ガス排出量半減の内訳

4-4 地域レベルでの交通・土地住宅部門の役割

本項では上述した滋賀シナリオを題材として、地域の交通・土地住宅部門に求められる役割を以下の手順で検討する。

- 1) 温室効果ガス排出制約による地域の旅客交通需要面の制約
- 2) 旅客交通需要制約による自動車の分担率やトリップ長の制約
- 3) 自動車分担率・トリップ長制約からみた地域の人口密度レベル
- 4) 人口集積を図るための地域の諸要因（雇用、地価、居住選好等）
- 5) 地域のガソリン消費量の価格弾力性

(1) 地域シナリオからの要求

滋賀シナリオを現実のものとしていくためには、図 4-2 に示すように自動車の旅客交通需要を成り行きケース(BaU)から 44%削減する必要がある。そのためには鉄道や自転車といった移動手段への大胆な変更が求められる。

このため滋賀シナリオでは、自動車のトリップ分担率を 66%から 46%に減らす一方で、公共交通機関によるトリップ分担率を 25%から 37%に伸ばすことを対策目標として掲げた。この目標が全国の交通機関分担の状況に照らしてどのような位置づけにあるかをみるため、日本の 275 市区町村における両者の分担率の関係を示したのが図 4-3 である（2000 年前後の各都市圏のパーソントリップ調査結果より作成）。滋賀シナリオの要求を達成するには、図 4-3 の近似曲線に沿っ

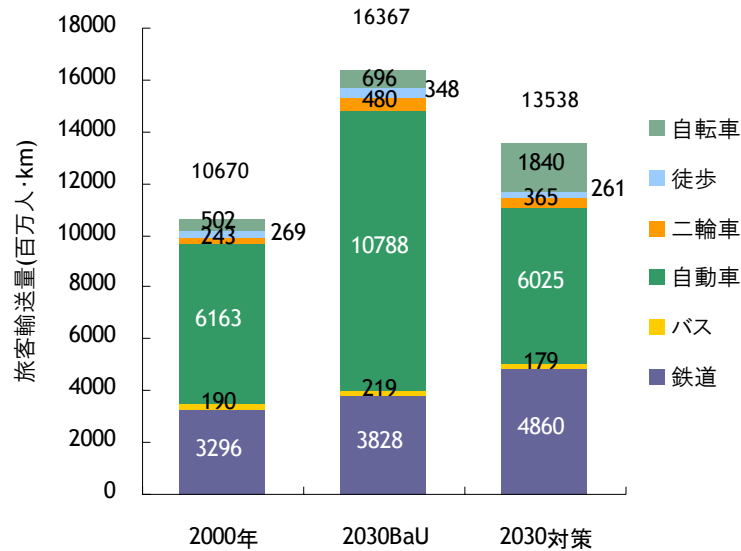


図 4-2 滋賀の将来の旅客交通需要に求められる抑制（交通機関別）

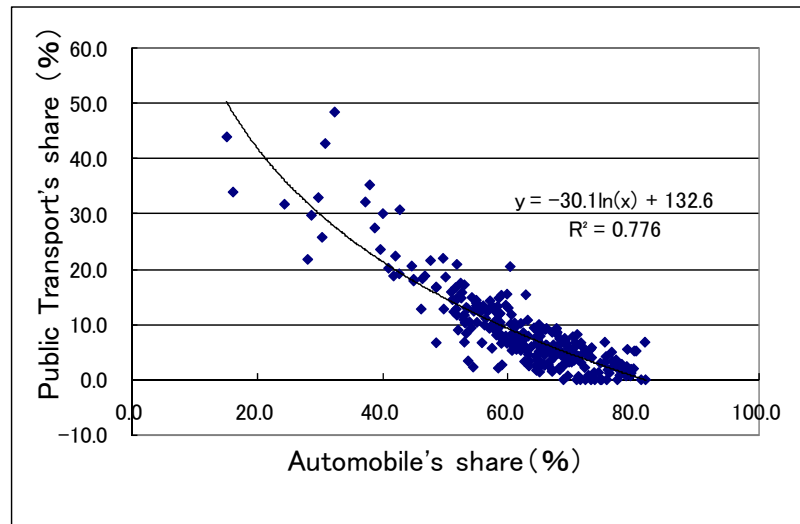


図 4-3 日本の市区町村の自動車と公共交通機関のトリップ分担率の関係

た右下から左上への移行が必要となる。

(2) 交通負荷と人口密度・勤務地の関係

このようなシナリオのもつ人口密度論的の意味合いをみるために描いたのが図 4-4 である（全国 238 市区町村の 2000 年前後のデータより作成）。いくつかの先行研究¹⁷⁾が指摘してきたように可住地人口密度と自動車分担率は負の相関関係にあることは間違いない。滋賀シナリオからの要求である自動車分担率の減少を実現するためには、可住地人口密度を現状の 1000～2000 人/km² 程度から 4000～5000 人/km² 程度に増やすための政策と連携して公共交通機関や歩道・自転車道の整備を進める必要があるだろう。

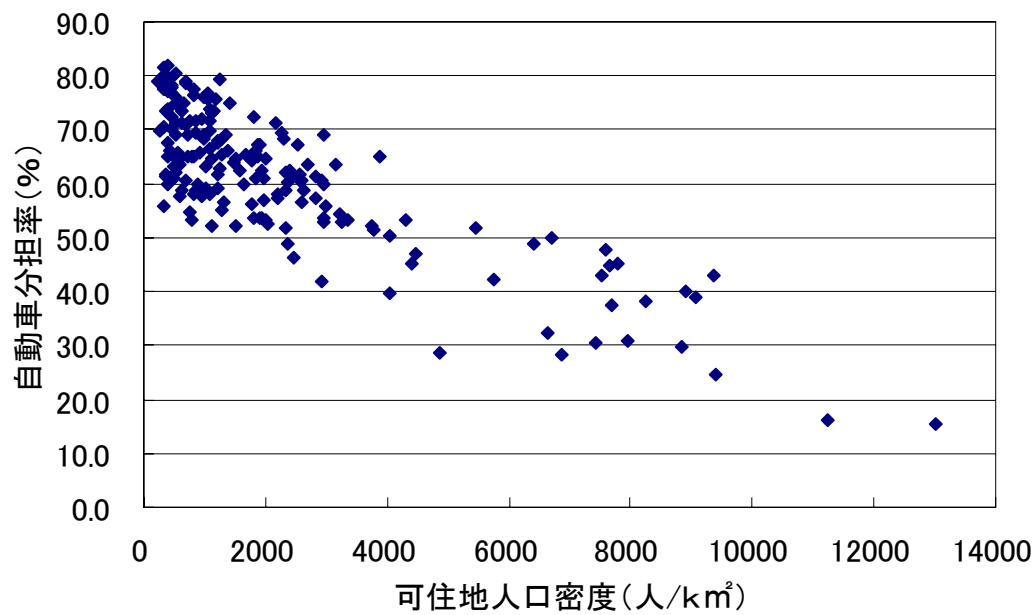


図 4-4 日本の市区町村の可住地人口密度と自動車分担率の関係

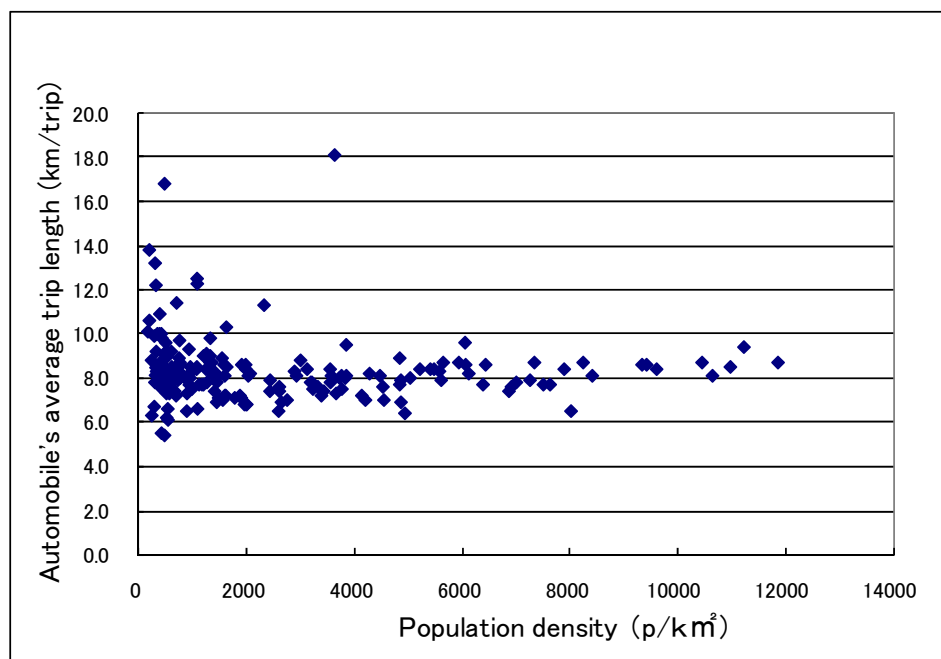


図 4-5 京阪神の市区町村での可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係

また滋賀シナリオは、平均トリップ長を 25%削減することも求めている。図 4-5 は第 4 回京阪神都市圏パーソントリップ調査から 190 都市の可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係を示したものである。人口密度が 2000 人/km² 以上の都市では自動車トリップ長はおおむね 8km で一定であるが、2000 人/km² 未満の地域ではトリップ長が大幅に増加する市区町村が現れる。このことから、自動車分担率に加えて自動車の平均トリップ長の観点からも一定の人口密度を必要とすることが示唆される。

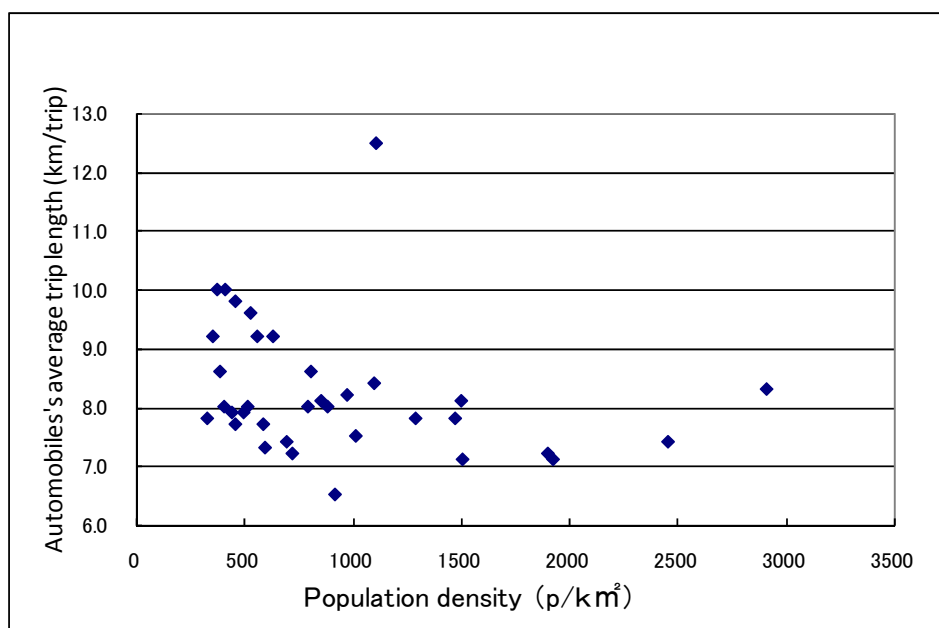


図 4-6 滋賀県下市町での可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係

表 4-3 CO₂排出量/人・トリップと人口密度・他市町通勤率の関係（滋賀の市町）

重回帰分析によるパラメータ推計 ¹					
	非標準化係数		標準化係数		有意確率
	B	標準誤差	ベータ	t	
(定数)	7.096	1.335		5.317	.000
人口に占める他市町村への通勤者の割合	.000	.000	.979	4.142	.001
可住地人口密度	-.006	.001	-1.035	-4.377	.001

1. 従属変数: 1人1トリップ当たりのCO₂排出量, データ数: 17, 自由度調整済み決定係数: 0.532, F値: 10.645

図 4-4 や図 4-5 は全国レベルや京阪神レベルでの実績から描いたものであり、ミクロな分析には地域特性を精査しなければならないのは当然であるものの、都市機能の集約と当該拠点への集住の要求は滋賀シナリオのバックキャスティングからえられた重要な政策的含意である。

さらに図 4-5 の対象地域を滋賀県に絞って、35 市町における可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係を示したのが図 4-6 である。データ数が減って明確な傾向を見出すには限界があるものの、可住地人口密度 500 人/km² 前後の低密度地域を 1500 人/km² 程度にまで高めればトリップ長を 25% 程度減少させることは可能であることが示されている。

つぎに、トリップ分担率とトリップ長により推計される人・トリップ当たりの CO₂ 排出量に着目して検討を進める。表 4-3 には、滋賀県下 17 市町における人・トリップ当たりの CO₂ 排出量を可住地人口密度と他市町村への通勤率によってどの程度説明しうるかを統計解析（重回帰分析）した結果を示す。その結果、自由度調整済み決定係数は 0.53 で分散分析の結果 1% 水準で有意なモデルをえた。説明変数の影響をみると、可住地人口密度の標準化回帰係数は -1.04 (1% 水準で有意) となる一方で、通勤者に占める他市町村への通勤者比率の標準化回帰係数は 0.98 (1% 水準で有意) であることが示された。したがって人・トリップ当たりの CO₂ 排出量を削減するには、人口

密度と自市町での通勤者比率の両方を高めることが重要である。幸い滋賀は自市町や近隣市町への通勤割合が多いという地域特性を有しており、このような特性を活かした長期的な人口・土地利用政策の展開が望まれる。

(3) DID 人口の動向と地価

前節で必要性を指摘した人口集積の実態をみるため、2000 年と 2005 年の国勢調査¹⁸⁾から滋賀県下市町の人口集中地区(DID)人口増加率を表 4-4 に示す。大津市、草津市、栗東市といった湖南エリアの中心地でこの 5 年間で約 10%の DID 人口増加率であるのに加え、それに隣接する守山市、野洲市、湖南市では 5 年で約 20%の増加率となっている。製造業等が好調で利便性がよく、不動産価格が割安なこれらの市の DID を求めて人口が集積しつつある現象と解釈できる。一方、1980 年代～90 年代初頭に開発された郊外型住宅団地を要する志賀町では、2000 年からの 5 年間で DID 人口が 6%減少している。

それでは滋賀県下の住宅地平均価格はどのような要因で決定されているであろうか。表 4-5 には DID 地区を有する 11 市町の 2005 年データをもとに住宅地平均価格の予測式を重回帰分析で求めたものである。自由度調整済み決定係数 0.94 の 1%水準で有意なモデルとなっており、説明変数の標準化偏回帰係数をみると DID 人口割合（市町の DID 人口/市町の総人口）は 0.50(5%水準で有意)、自動車分担率は-0.84(1%水準で有意)、可住地面積当たりの新規住宅建築件数では-0.39(5%水準で有意)をえた。この結果の因果関係論的な解釈には慎重な検討を要するものの、DID 人口割合は高いが新規住宅建築件数は少なく、自動車分担率の低い市ほど住宅地平均地価は高いという結果である。住宅地地価の高さは新規参入の障壁となる一方で、資産価値としては魅力としての側面もあり、人口集積を促進するためにはそのバランスを考慮する必要があるが、今後の住宅・土地政策を進めるうえで留意すべき点であろう。

表 4-4 滋賀県下の人口集中地区人口増加率(2000 年～2005 年)

人口集中地区(DID)人口増加率(%)	市町名
18-21%増加	守山、野洲、湖南
7-11%増加	大津、長浜、草津、栗東、東近江
2-5%増加	近江八幡、能登川、彦根
1%増加	甲賀
6%減少	志賀

表 4-5 滋賀県下 DID 地区(11 市町)の住宅地平均地価の決定要因

重回帰分析によるパラメータ推計 ¹					
	非標準化係数		標準化係数		有意確率
	B	標準誤差	ベータ	t	
(定数)	164609.413	26329.307		6.252	.000
DID 人口割合	53411.323	20423.860	.499	2.615	.031
自動車分担率	-2085.717	362.338	-.843	-5.756	.000
可住地面積当たり 専用住宅立地件数	-292.543	126.894	-.390	-2.305	.050

1. 従属変数: 住宅地平均地価, データ数: 11, 自由度調整済み決定係数: 0.935, F値: 53.568

(4)人口密度別・住宅の建て方別居住選好の分析

以上の解析より、旅客交通起因のCO₂排出量を需要側面から減らすためには、可住地人口密度を高めることと自市町での勤務者割合を増やすこと（およびそのための就業先の確保）の必要性が明らかになった。実際に滋賀の湖南エリアではDID人口は増加し続けており、これらDIDが居住者にとって魅力ある土地資産であり続けるためには、DID人口割合を高め続け、自動車に依存しないまちづくりを進める必要性も示唆された。

本節ではさらに、県民の居住選好の観点からみた人口集積策を探るため、住宅需要実態調査¹⁹⁾のマイクロデータを用いて解析を進める。本調査は、全国約87千人を対象とした187項目の居住実態や住宅・環境の評価に関するアンケート調査であり、ここでは滋賀県分(834件)のデータを使って、可住地人口密度(<1000人/km², 1000-2000人/km², 2000-3000人/km²の3分類)や住宅の建て方(戸建, 集合の2分類)を順序従属変数とし、これを説明する居住特性(20変数)を明らかにするため順序回帰分析(プロビット分析)を実施した。

まず、人口密度区分別の居住確率を分析した結果を表4-6に示し、以下にその解釈を記述する。

第一に、人口高密度地域(2000-3000人/km²)に居住する世帯は、低密度地域の世帯に比べて、一世帯あたりの人数は少なく一人当たり住宅床面積は狭い。第二に彼らは、買物・医療面での利便性や近隣公園・遊び場の環境は享受しつつも、自然とのふれあいの面では不満をもっている。第三に現在の住宅に対する総合評価は低くなっている。

表 4-6 滋賀の人口密度別の居住特性

		パラメータ推定値					95% 信頼区間	
		B	標準誤差	Wald	自由度	有意確率	下限	上限
しきい値	人口密度ランク = 1	-4.029	.929	18.796	1	.000	-5.851	-2.208
	人口密度ランク = 2	-2.453	.910	7.264	1	.007	-4.236	-.669
変数	結露の有無	-.073	.095	.589	1	.443	-.258	.113
	断熱建具の有無	.136	.143	.910	1	.340	-.144	.416
	住宅の総合評価	-.338	.115	8.720	1	.003	-.563	-.114
	断熱性・気密性評価	.008	.129	.003	1	.953	-.244	.260
	住宅省エネ性評価	-.085	.142	.356	1	.551	-.364	.194
	住環境の治安評価	.028	.149	.036	1	.849	-.264	.321
	住環境の騒音・大気評価	.069	.118	.338	1	.561	-.163	.300
	通勤・通学利便性の評価	-.119	.129	.850	1	.357	-.373	.134
	買物・医療利便性の評価	.390	.144	7.367	1	.007	.108	.672
	公園・遊び場の評価	.362	.127	8.072	1	.004	.112	.612
	自然とのふれあい評価	-.435	.140	9.720	1	.002	-.709	-.162
	空間のゆとり評価	.006	.124	.003	1	.959	-.236	.249
	まちの景観評価	-.292	.156	3.509	1	.061	-.598	.014
	近隣との関わり評価	-.185	.146	1.596	1	.207	-.472	.102
	住居費負担の評価	.001	.095	.000	1	.988	-.185	.188
	世帯人数	-.363	.076	22.777	1	.000	-.512	-.214
	世帯主の年齢	-.002	.007	.100	1	.752	-.017	.012
	世帯の年収	.067	.036	3.416	1	.065	-.004	.137
	通勤時間	.000	.050	.000	1	.996	-.098	.099
	一人当たり都市公園面積	-.046	.022	4.440	1	.035	-.089	-.003
	一人当たり住宅床面積	-.019	.005	14.089	1	.000	-.028	-.009
	一人当たり大型小売店舗面積	.351	.269	1.709	1	.191	-.175	.878

リンク関数: プロビット, 有効データ数238, 適合度有意確率: 0.799, 疑似決定係数: 0.324

つぎに表 4-7 には、滋賀における戸建・集合住宅別の居住確率を分析した結果を示す。結果を要約すると、第一に集合住宅に居住する世帯は戸建住宅の世帯に比べて、若くて世帯人数の少ない層が多い。第二に彼らは、住宅の広さや騒音など近隣公害の面では我慢しながらも、大型小売店舗等での買物の利便性には満足している。第三に集合住宅の世帯は、住宅の気密性・断熱性への評価が高い。

表 4-7 滋賀の戸建・集合住宅別の居住特性

		パラメータ推定値					95% 信頼区間	
		B	標準誤差	Wald	自由度	有意確率	下限	上限
しきい値	戸建住宅or集合住宅	-7.986	2.547	9.830	1	.002	-12.979	-2.994
変数	一人当たり住宅床面積	-.124	.022	30.653	1	.000	-.167	-.080
	一人当たり都市公園面積	-.024	.056	.185	1	.667	-.134	.085
	一人当たり大型小売店舗面積	1.624	.650	6.246	1	.012	.350	2.898
	結露の有無	.342	.205	2.796	1	.094	-.059	.744
	断熱建具の有無	.612	.428	2.042	1	.153	-.228	1.452
	住宅の総合評価	.156	.269	.336	1	.562	-.371	.683
	断熱性・気密性評価	-.896	.305	8.599	1	.003	-1.494	-.297
	住宅省エネ性評価	.003	.299	.000	1	.993	-.583	.588
	住環境の治安評価	.299	.363	.682	1	.409	-.411	1.010
	住環境の騒音・大気評価	1.127	.351	10.319	1	.001	.439	1.814
	通勤・通学利便性の評価	.131	.288	.206	1	.650	-.434	.695
	買物・医療利便性の評価	-.658	.353	3.478	1	.062	-1.350	.034
	公園・遊び場の評価	-.090	.285	.100	1	.752	-.649	.468
	自然とのふれあい評価	.386	.332	1.349	1	.245	-.265	1.036
	空間のゆとり評価	-.015	.286	.003	1	.957	-.577	.546
	まちの景観評価	-.071	.334	.046	1	.831	-.726	.583
	近隣との関わり評価	.028	.322	.007	1	.932	-.604	.659
	住居費負担の評価	.004	.237	.000	1	.987	-.460	.468
	世帯人数	-1.625	.295	30.271	1	.000	-2.204	-1.046
	世帯主の年齢	-.082	.020	15.905	1	.000	-.122	-.042
	世帯の年収	-.082	.084	.938	1	.333	-.247	.084
	通勤時間	-.025	.111	.052	1	.820	-.244	.193

リンク関数: プロビット, 有効データ数: 238, 適合度有意確率: 1.000, 疑似決定係数: 0.843

これらの示唆を総合すると、製造業を中心とした産業活動が好調で今後も雇用増が見込まれる湖南エリアの DID に、一定の広さと質を確保した集合住宅を整備・誘導し、琵琶湖など自然環境とのふれあいを充実させながら、若年世帯層を受け入れていく方向性が浮かびあがる。このような政策は、交通部門や家庭部門からの温室効果ガスの排出を長期にわたって軽減する観点からだけでなく、地域活性化や税収確保面からも有効ではないかと考えられる。

(5) ガソリン消費の価格弾力性

滋賀シナリオでは、交通部門の対策はおもに輸送機器の効率改善と需要抑制を想定しているが、ガソリン等自動車用燃料価格の消費への影響は織り込んでいない。しかし、当面継続することが見込まれるガソリン価格の高値の影響は長期的には大きいと考えられる。

そこで 1990 年から 2004 年の石油情報センターのデータより滋賀でのガソリン消費の価格・所得弾力性を分析した(表 4-8)。自由度調整済み決定係数 0.76 の 1%水準で有意な結果をえており、価格弾性値は-0.91 (1%水準有意) となった。同期間の全国のガソリン消費に対する価格弾性値は-0.43(5%水準で有意)であり、滋賀ではこの 2 倍の弾力性となっている。このことから、思い切った自動車燃料税制の見直しにより、地域によっては長期的に大幅なガソリン消費削減が見込めることが示唆される。

表 4-8 滋賀でのガソリン消費の価格弾力性（1990 年～2004 年）

重回帰分析によるパラメータ推計 ¹					
	非標準化係数		標準化係数		有意確率
	B	標準誤差	ベータ	t	
(定数)	851.965	148.021		5.756	.000
ガソリン価格	-2.741	.410	-.907	-6.683	.000
一人当たり県民所得	-.019	.040	-.065	-.480	.640

1. 従属変数: 一人当たりガソリン販売量, データ数:14, 自由度調整済み決定係数: 0.761, F値: 23.322

4-5 まとめ

本稿での低炭素地域社会の形成に向けた検討結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 地域社会で長期的に旅客自動車交通需要を大幅に削減するためには、自動車分担率と自動車トリップ長の両方を削減する必要がある、そのためには、可住地人口密度を高めることに加え、自市町村での通勤比率を維持・向上していくこと（企業の安定立地・誘致）も重要である。
- 2) 現実に、滋賀では DID 人口が 2000 年～2005 年の 5 年間で 2 割増加している市もあり、思い切った政策誘導によりこのような人口密度目標を設定することは理不尽ではない。
- 3) 人口に占める DID 人口割合が高く自動車に依存しない市ほど住宅地地価は高く、資産としての魅力を維持しうるポテンシャルが高い。
- 4) 高密度地域や集合住宅の居住者は、住宅の広さや自然へのふれあい面で不満をもっており、自然環境へのアクセスを充実させながら、一定の広さと質を確保した集合住宅を整備・誘導して人口を集積することは、温室効果ガス排出削減面のみならず税収面でも有効な政策となる。
- 5) ガソリン消費に対する長期の価格弾力性値は全国では 0.43 に対し滋賀では-0.91 と高く、地域によっては自動車燃料税制の見直しにより大幅な燃料消費削減が見込める。

以上述べてきたように、遠い将来のチャレンジングな目標を掲げることにより、過去の慣性や目の前の問題をとりあえず捨象し、社会・経済の構造改革やそのための政策転換に道筋をつけようというのがバックキャスティングの狙いである。ところが、バックキャスティングの結果として求められる短中期的な改革（本稿では人口集積に向けた法制や税制の変更）には、結局のところ現実のさまざまな障壁や抵抗が立ち塞がることになる。せつかくの長期からのバックキャスティングが現実の壁に帰結せざるをえないジレンマにどう対処していくのか、今後とも議論を深めていく必要があろう。なお、本章作成にあたっては、国土交通省住宅局よりご提供いただいたデータを使用しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省 (2008) 2006 年度温室効果ガス排出量（確定値）について
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2006ghg.pdf>
- 2) UK Department of Trade and Industry (2003) Energy White Paper: our energy future –creating a low carbon economy. <http://www.berr.gov.uk/files/file21354.pdf>

- 3) French Interministerial Task Force on Climate Change (MIES) (2004) Reducing CO₂ emission fourfold in France by 2050.
- 4) Deutscher Bundestag (2002) Enquete Commission on Sustainable Energy Supply Against the Background of Globalisation and Liberalisation -Summary of the Final Report.
- 5) Greater London Authority (2004) The Mayor's Energy Strategy – Green Light to Clean Power. <http://www.london.gov.uk/mayor/streategies/energy/>
- 6) California Environmental Protection Agency (2004) Climate Action Team Report to Governor Schwarzenegger and the Legislature. <http://www.climatechange.ca.gov/>
- 7) Connecticut Governor's Steering Committee on Climate Change (2005) Connecticut Climate Change Action Plan 2005 –Executive Summary- <http://www.ctclimatechange.com/>
- 8) Governor's Advisory Group on Global Warming (2004) Oregon's Strategy for Greenhouse Gas Reductions. <http://www.oregon.gov/ENERGY/GBLWRM/Strategy.html>
- 9) Environmental and Health Administration of City of Stockholm (2002) Stockholm's action program against Greenhouse Gases. <http://www.miljo.stockholm.se/>
- 10) Öko institute e.V. (2004) Local strategies for the reduction of the emissions around 50% by the example of the city munich. <http://www.oeko.de>
- 11) Parliament of Berlin (2006) Local agenda 21 Berlin – draft coalition of parliamentary groups SPD-PDS. <http://www.berlin21.net>
- 12) 滋賀県(2008) 持続可能な滋賀社会ビジョン.
http://www.pref.shiga.jp/public/de00/jizoku_vision/kekka/vision.pdf
- 13) 豊中市(2007) 豊中市地球温暖化防止地域計画 -チャレンジ-70 プラン-
- 14) 「2050 日本低炭素社会」プロジェクトチーム(2007) 2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討.
- 15) 松橋啓介・工藤祐揮・森口祐一 (2007) 交通部門における CO₂ 排出量の中長期的な大幅削減に向けた対策. 地球環境 Vol.12 No.2: 179-189.
- 16) Shimada K, Tanaka Y, Gomi K, Matsuoka Y (2007) Developing a long-term local society design methodology towards a low carbon economy: An application to Shiga Prefecture in Japan. Energy Policy 35: 4678-4703.
- 17) 谷口守 (2006) 環境負荷の小さなまちづくり：都市構造から考える. 環境研究 No.141: 11-16.
- 18) 総務省：国勢調査(2000 年,2005 年調査).
- 19) 国土交通省住宅局：住宅需要実態調査(2003 年調査).
- 20) 日本エネルギー経済研究所：EDMC 石油情報センター.

5 都市の代謝システムと温室効果ガスの排出削減

人間活動からの代謝産物として出てくる廃棄物や廃水などは温室効果ガスの発生原因ともなるが、これらからエネルギーを回収することにより温室効果ガス排出の削減に寄与しうる。例えば、廃棄物や廃水の処理処分においては、収集、運搬や施設運用におけるエネルギー消費に伴う CO_2 排出の他、焼却施設における化石資源由来のものの燃焼に伴う二酸化炭素 (CO_2) 排出、埋め立て地などにおけるメタン (CH_4) 排出や焼却や污水处理プロセスにおける一酸化二窒素 (N_2O) 排出など多様な形で温室効果ガスが排出される。その一方、焼却熱を使った発電や地域冷暖房、メタンの回収利用など、エネルギー回収により温室効果ガスの排出削減に貢献しうる。よって、人間活動からの代謝産物を処理処分する静脈系施設における地球温暖化の緩和策は、現在排出している温室効果ガスの直接的な排出削減と、廃水や廃棄物が持つ未利用なエネルギーを有効に活用して化石燃料を代替することによる温室効果ガスの排出削減の2つの方策に分けて考えることができる。

この章では、廃棄物収集処分システムと下水道システムに関する上記2つの方策について、実例や導入状況、最新の研究事例を紹介する。

5-1 廃棄物・下水道事業由来の温室効果ガスの直接的な排出削減

環境省(2007)によると、廃棄物(焼却)由来の CO_2 排出は日本全国(2006年度)で約34百万トンであり、日本全体の CO_2 排出の約2.7%となっている。また CH_4 については CO_2 換算で約7百万トン、 N_2O については下水汚泥の焼却分も含めて CO_2 換算で約4百万トンとなっており、これらを合わせて考えると日本全体の温室効果ガス排出量の約3.3%を占めていることになる。この値は直接的な温室効果ガスの排出量のみを考えているので、廃棄物や下水道事業で用いられる電力消費に伴う CO_2 排出を含めるとその比率はさらに大きくなる。例えば下水道事業では、平成16年度において我が国全体の約0.5%の温室効果ガスを排出しており、電力消費や燃料などエネルギー起源の CO_2 がその50%を、汚泥焼却に伴う N_2O が24%、水处理に伴う N_2O が10%を占めている(森田, 2006)。廃棄物事業や下水道事業は、地方自治体にとって温室効果ガスの主要な排出源となっている。

廃棄物事業における直接的な削減策としては、プラスチックなどの化石燃料由来の廃棄物の焼却量の削減、有機性廃棄物の埋立量の削減による CH_4 の発生抑制、収集・施設運用時のエネルギー消費の削減などが挙げられる。

下水道事業においては、電力や燃料消費の削減、および汚泥焼却や水处理に伴う N_2O 排出削減が有効な緩和策となる。水处理において使用されるエネルギーはほぼ電力に依存しており、ポンプやブロワにおける電力使用が大きい。そのため、コンピューター制御やインバータの導入による機器の効率的な運転や散気装置の高効率化などプロセスの改善とともに、太陽光発電の導入や蓄電池による電力需要の平滑化などの取り組みが検討、実施されている(下水道協会, 2008)。 N_2O の発生削減については、汚泥焼却における N_2O の発生は凝集剤の種類や焼却炉の形式によって大きく異なり、高分子系汚泥の流動床炉による焼却炉において発生率が高くなっていることから、流動層炉の砂層上部の温度を高温域に保つことが発生抑制に有効であるとして検討されている(下水道協会, 2008)。

5-2 廃棄物・下水汚泥の活用による温室効果ガスの排出削減

図 5-1 に示すように廃棄物や廃水処理後の汚泥に含まれる成分のうち、エネルギーとして回収して利用が可能なものとしては、紙類、食品残渣や尿尿などのバイオマス系成分と、プラスチックゴミなどの化石燃料由来成分がある。その活用方法としてまず考えられるのは、焼却やガス化などの熱処理によりエネルギーを取り出し、電気や熱として供給する方法である。一方、下水汚泥や生ゴミなど水分が多いものは熱処理では効率的でなく、またこれらの廃棄物や廃水は輸送には不向きなため、物理的、生化学的なプロセスにより効率が高くかつ輸送が容易なものに変換して活用する方法もある。例えば、ゴミ固形燃料化や、バイオマス系成分であればメタン発酵（嫌気性消化）などがこれに該当する。

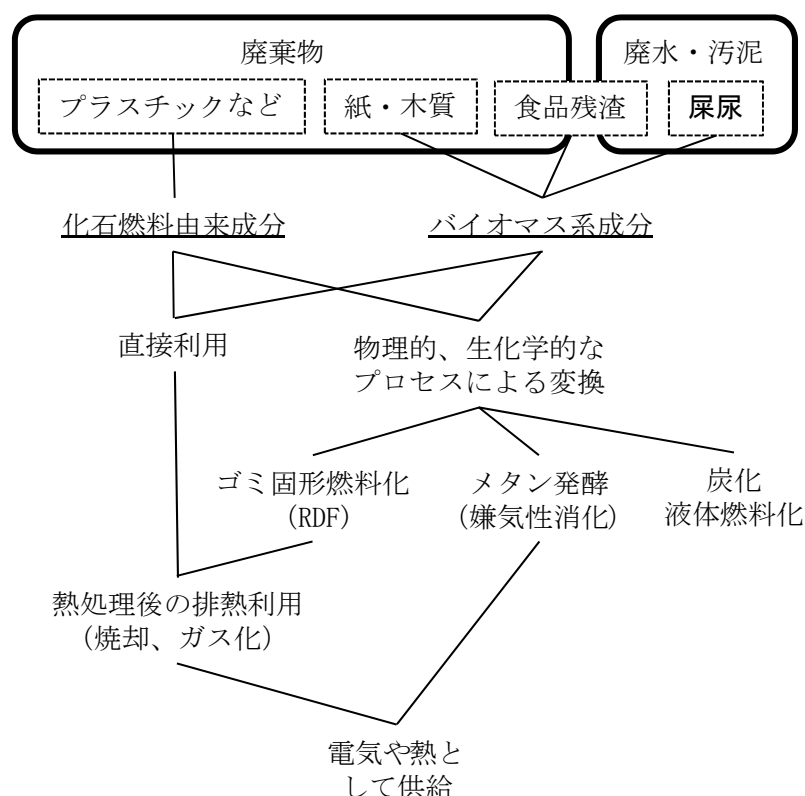


図 5-1 廃棄物や下水汚泥の温暖化対策への活用方法

このような活用方法は既に実施されているものも多く、その温室効果ガス排出削減効果については実務および研究レベルで多くの検討事例がある。しかし、廃水や廃棄物の性状が均一でないこと、回収したエネルギーを熱として利用する場合に利用効率が需要側の状況により影響されること、利用できなかった残渣の処分方法の違いなどから、排出削減効果は事例によりばらつきがあり、これらの活用方法の導入状況に応じたケースバイケースの評価が必要となっている。

以下に、廃棄物・廃水の有効活用に関してのさまざまな研究例や個々の活用方法の導入事例を紹介する。

(1) 廃棄物・下水汚泥の有効活用に関する総合的な評価

廃棄物・下水汚泥由来のさまざまなものに対していくつかの活用方法が存在しており、その活

用ポテンシャルや温室効果ガス排出削減効果，あるいはどのように活用していくかの意思決定支援に対してさまざまな研究事例が存在する．例えば，これらのさまざまな活用方法についてのライフサイクルアセスメント（LCA）による検討(志水ら，2004；鶴田ら，2004)や技術開発のインパクト分析(奥田ら，2006)，地域や都市といった空間スケールを限定してこれら有機性廃棄物に着目した活用ポテンシャルや温室効果ガス排出削減効果の検討(藤田ら，2004；岡村ら，2003)，回収したエネルギーを利用する側も含めた評価(横井ら，2007)，ポテンシャルの推定における不確実性を考慮した評価(矢野ら，2007)，有効活用方法に関する意思決定支援に関わるシステム開発や検討(丹治ら，2004；岩川ら，2004)などである．

また，バイオマス・ニッポン総合戦略(2006)では，下水汚泥や食品系廃棄物も含めたバイオマス資源についてその有効利用の戦略を描いているが，その方策として安定的かつ適正なバイオマス利活用が実施されているあるいは実施されうる地域についてバイオマスタウン事業を実施しており，その現況を調査した事例(坂本ら，2007)もある．

(2) メタン発酵によるエネルギー回収

下水汚泥のメタン発酵については汚泥減容の目的でも従来から広く用いられており，全国 2000 の処理場のうち 316 の施設（平成 17 年末）でメタン発酵施設が設けられている(植田，2008)．また，国土交通省のリードする下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト（LOTUS project）においても，下水汚泥の燃料化技術とともに下水汚泥と他の有機性廃棄物の混合消化やオゾンによる消化促進技術などの開発が進められてきた(小野田ら，2008)．三宮(2008)は全国の下水処理場で発生している消化ガス全量をガス発電に利用し，また消化汚泥を固形燃料化して火力発電の燃料として利用した場合，年間 36 億 kWh の発電が可能と試算している．しかし，メタン発酵時の効率は必ずしも高いとは言えず，その高効率化に向けたさまざまな技術開発，研究が行われている(高島ら，2006；小松ら，2006；川崎ら，2005；荒金ら，2005)．

一方，厨芥類などの食品系廃棄物のメタン発酵についてはこれまでほとんど導入されておらず，1990 年代後半から実証施設が建設され，最近になって一部で導入されている上京にある．厨芥類の効率的なメタン発酵についての技術開発，研究が行われる(片岡ら，2006；宮西ら，2005；水野ら，2004；洪ら，2003)とともに，下水汚泥や稲わらなどの農業系廃棄物との混合消化(齊藤ら，2004)についての検討も行われている．さらには，図 5-2 に示されているような，厨芥類をディスポーザーにより下水道で回収して下水処理場で効率的にメタン発酵を行うというようなシステムの提案もされている(津野ら，2006)．

一方でメタン発酵施設の導入による温室効果ガスの削減効果は，メタン発酵そのものの効率の影響の他に，メタン発酵後の廃水や残渣，あるいは余熱の利用方法の影響を受ける．例えば，メタン発酵後の栄養塩類が豊富な廃水を液肥として利用する場合と処理して放流する場合では，温室効果ガスの排出も含めた環境負荷は大きく異なる．このようなメタン発酵施設の導入効果の評価については，ライフサイクルアセスメントを用いた評価(安井ら，2005；渡辺ら，2003；松本ら，2003)や，実地域における厨芥類の分別回収時の輸送も含めた評価(石井ら，2006)，コンポスト化など他のさまざまな処理・再利用方法との比較評価(天野ら，2007)などが行われている．

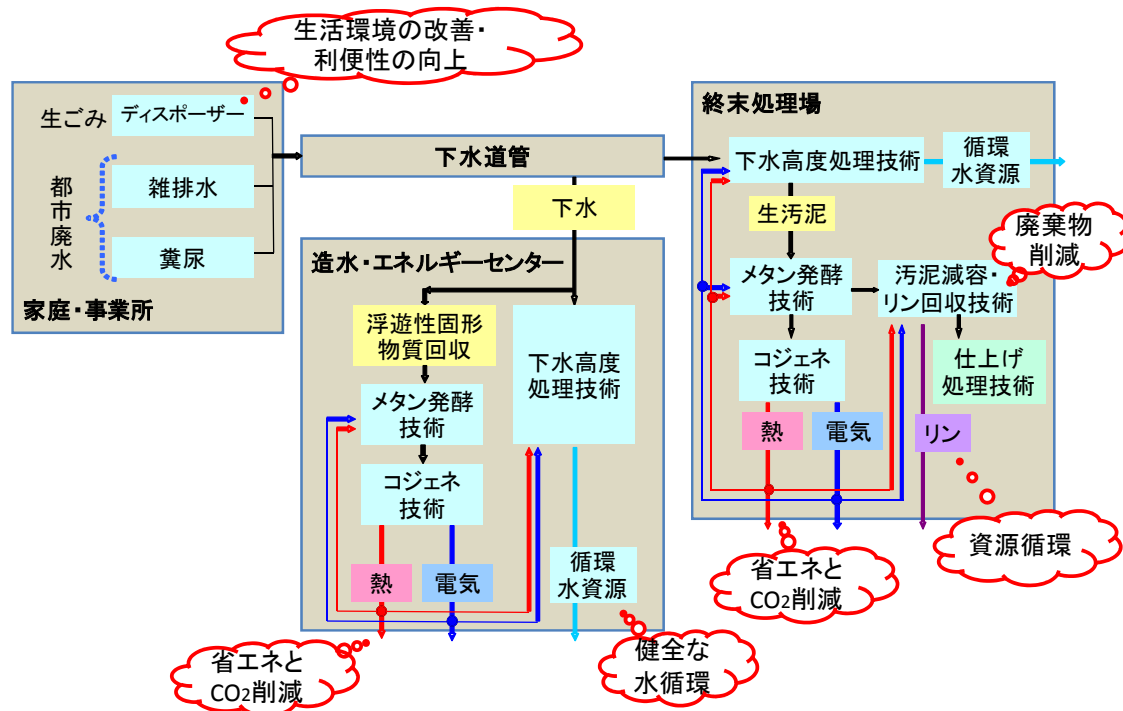


図 5-2 地球と地域の環境を改善する新しい都市廃水・廃棄物管理システムの提案
(京都大学津野洋教授作成)

(3) 固形廃棄物の焼却排熱の利用

固形廃棄物の焼却排熱の発電への利用は、「新エネルギー」の主要なものの一つとして京都議定書の目標達成にむけて大きな役割を期待されている。廃棄物発電は 1980 年代頃から導入が進んだが、その導入状況は一般廃棄物については全国で約 1,400 施設中 270 施設、産業廃棄物に至っては約 1,600 施設のうち約 70 施設にとどまっている。2005 年 3 月末現在その規模は 168 万 kW であり、2010 年の目標とされている 417 万 kW の達成は困難な状況にある(新エネルギー財団, 2006)。

従来の廃棄物発電はその発電効率が 10%程度と通常の火力発電と比べてかなり低いレベルにあったが、近年は廃棄物を乾燥させるスーパーヒーターの導入やボイラーの改良、化石燃料の平行利用などによる 20~30%の高効率な発電システムが開発されており、既存の廃棄物発電施設の改修も急務となっている。また、より発電効率が高いガス化溶融炉についてもさまざまな研究、実証が進められており、産業廃棄物等の処理への導入が進んでいる。ガス化溶融システムでは排気ガスが少ないことから熱ロスが少ないとともに排ガス処理装置をコンパクトにできること、高温処理によりダイオキシンの発生量を減らすことができる、生成される可燃性ガスが発電に用いられるとともにスラグの有効利用もはかれる、などさまざまな効果が期待されている(田中, 1998)。

一方、焼却排熱の熱としての利用については、清掃工場内での利用や近隣にスポーツ施設や福祉施設など熱需要の高い施設を設置しての利用が進められているが、周辺地域における地域熱供給の熱源としての利用は未だ進んでいない。日本熱供給事業協会(2008)によると、全国で 151 の地区で熱供給事業が行われているが、そのうち廃棄物焼却排熱が利用されているのは、北海道、千葉、東京、大阪などの 8 地区に過ぎない。配管なども含めた施設建設の費用から、市街地の再開発やニュータウンの開発に伴って導入される例がほとんどである。

焼却排熱の地域熱供給への利用による省エネ効果や温室効果ガスの削減効果については、余熱を発生する焼却施設側でなく、それを利用する熱需要家側の状況により大きく影響される。よって、導入されるシステムの違いによる効率性の違いの検討(下田ら, 2001)といった供給サイドの評価ばかりでなく、実際の導入先の熱需要を考慮した評価(荒巻ら, 2002; 藤木ら, 2007; 下田ら, 2002)が行われている。また、個々の清掃工場を対象としたものばかりでなく、日本全体でどの程度焼却排熱の利用ポテンシャルがあるかについての解析(佐土原ら, 1998; 森ら, 2000; 経済産業省, 2008; 河上ら, 2008)も行われている。

廃棄物を直接焼却するのではなく、固形燃料(RDF)化しての活用も、廃棄物の発生量が少ない地域において注目され、一部導入されている。ただし、固形燃料製造時にエネルギー消費、混入物による製造プロセスや品質への影響と選別された残渣の処理、高コストなどの課題が挙げられている(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2004)。

(4) 下水熱の利用

下水熱は廃棄物の焼却排熱と比較すると温度が低く質の低い熱源であるが、都市の地下に張り巡らされている下水のネットワークにより、熱需要密度の高い都市中心部に熱の利用ポイントを設置できるという優位性がある。下水を暖房時の熱源および冷房時の冷却水としてヒートポンプにより温水や冷水を製造し、地域熱供給に利用することが可能である。下水は冬大気より暖かく夏大気より冷たいという特性を持つため、大気熱源のヒートポンプよりも高効率にヒートポンプを運転することができる。国内では、下水管流下中の未処理下水を熱源としている東京後楽一丁目地区や盛岡駅西口地区、処理下水を熱源としている幕張新都心地区、東京都新砂三丁目地区)などの事例がある(日本熱供給事業協会, 2008)。

下水熱の活用ポテンシャルと温室効果ガスの削減効果についても、1990年代以降いくつか研究が行われてきた。山下ら(1991)は、福岡市などを対象として、下水温度と気温との温度差から下水熱利用可能性の検討を行った。一ノ瀬ら(2000)は下水管周辺地区の熱需要量と下水熱の回収可能熱量との空間的整合性を解析するためのシステムを開発した。河原ら(2000)や下田ら(1997)は、ヒートポンプの成績係数を考慮した下水熱の利用効果を算定しており、伊藤ら(1995)はライフサイクルアセスメントの考え方を組み入れた評価を行っている。池上ら(2007)は東京都区部を対象に、上記の要素を組み入れて二酸化炭素排出削減ポテンシャルの評価を行っている。

(5) その他の活用方法

その他の地球温暖化緩和策としての活用方法として挙げられるのは炭化や液体燃料化であろう。内海(2004)は廃棄物炭化処理の評価方法についての考察を行っているが、炭化生成物は既存の炭の代替品として用いることが可能であり、エネルギー用のみならず浄化用などさまざまな用途での利用が可能である。

液体燃料化については、サトウキビやトウモロコシのバイオエタノール生産や油糧作物や廃油からのバイオディーゼル精製などがすでに普及が始まっているが、廃棄物の利用という面からはまだ実用化が進んでおらず、木質系廃棄物についてはバイオエタノール化の実証実験が始まった段階である。研究事例としても廃木材を含めた木質系資源をどのように利用していくかという観点から行われているもの(村野ら, 2007; 加用ら, 2008)がある。

メタン発酵や固形燃料化でも同様だが、これらの活用技術はそのプロセスにおいて廃棄物などを変換するためのエネルギーが必要なため、システム全体でみた場合の温室効果ガス削減効果を評価する必要がある。

5-3 まとめ

廃棄物や廃水・汚泥の有効活用について、焼却、メタン発酵など技術的には古くから導入がされたものであり、その効率の改善は必要であるものの他の温暖化対策技術と比較すると技術的な課題は少ないものと考えられる。しかし、廃棄物や廃水が混合物であることや発生場所が広範であることから、安定的な運用が難しい場合があること、収集などのコストが高くなること、などの課題を抱えている。特に導入される地域の状況により導入効果が変わりうることから、廃棄物や廃水の有効活用に関する技術開発や既存技術の効率改善のみならず、実際の地域を想定して適切な廃棄物や廃水の有効活用システムを提案する、あるいは廃棄物や廃水の有効活用という観点からの地域開発、地域づくりを提案することが求められている。また、このような点で土木分野の貢献が期待されていると言えよう。

参考文献

- 天野耕二, 曾和朋弘(2007), 中間処理方法の組み合わせに着目した一般廃棄物処理システムの包括的評価, 土木学会論文集 G, 63(4), 391-402
- 荒金光弘, 今井剛, 村上定瞭, 竹内正美, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉(2005), 連続式亜臨界水処理法および UASB 法の組合せによる下水汚泥からのメタンガス回収に関する実験的研究, 環境工学研究論文集, 42, 171-182
- 池上 貴志, 荒巻 俊也, 花木 啓祐 (2008), ライフサイクルインベントリ分析による下水熱利用地域冷暖房システム導入効果の解析, 土木学会論文集 G, 64(2), 107-122
- 石井暁, 花木啓祐(2006), 川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定, 環境システム研究論文集, 34, 443-454
- 伊藤真知子, 伊藤武美, 花木啓祐, 松尾友矩(1995), 下水を用いた地域冷暖房施設のライフサイクルアセスメント, 環境システム研究, 23, 241-247
- 一ノ瀬俊明, 川原博満(2000), GIS による下水熱源地域熱供給事業の地域別適性評価, 土木学会論文集, 643, 29-36
- 岩川貴志, 牛島樹昭, 内藤正明(2004), 地域における参画型バイオマス循環システムの評価, 環境システム研究論文集, 32, 271-276
- 植田達博(2008), 日本下水道事業団の地球温暖化への取り組み, 下水道協会誌, 45(546), 18-21
- 内海秀樹(2004), 地球環境問題における廃棄物炭化処理の評価方法に関する予備的考察, 第 12 回地球環境シンポジウム講演論文集, 63-68
- 岡村実奈, 入山広阿貴, 井村秀文(2003), 都市の有機物資源循環将来予測システムの開発に関する研究, 環境システム研究論文集, 31, 113-124
- 奥田隆明, 秀島聡(2006), バイオマス新技術開発のインパクト分析手法の提案, 環境システム研究論文集, 34, 463-472
- 小野田吉恭, 藤川征宏(2008), LOTUS Project の地球温暖化対策としての期待される効果, 下水道

- 協会誌, 45(546), 15-17
- 片岡直明, 菖蒲昌平, 宮晶子, 米山豊, 渡辺昭, 鈴木隆幸(2006), 水素・メタン二段発酵法による生ゴミと紙ごみのバイオガス化特性, 環境工学研究論文集, 43, 15-22
- 加用 千裕, 荒巻 俊也, 花木 啓祐(2008), 木質資源フローに着目した温室効果ガス排出削減政策シナリオ評価フレームの構築, 土木学会論文集 G, 64(3), 207-220
- 河上裕美, 荒巻俊也, 花木啓祐(2008), 日本全国の清掃工場を対象とした排熱利用地域冷暖房システムによる CO2 排出削減ポテンシャルの推計, 環境システム研究論文集, 36, 発表予定
- 川崎達也, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃(2005), EGSB リアクターによる低濃度有機性排水の高速メタン発酵処理, 環境工学研究論文集, 42, 39-50
- 河原能久, 末次忠司, 小林裕明, 木内豪(2000), 水熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムによる排熱・排ガスの削減効果の算定—2010 年の東京都 23 区を例として—, 第 28 回環境システム研究論文発表会講演集, 443-448
- 環境省(2007), 我が国の温室効果ガス排出量—2006 年度(平成 18 年度)の温室効果ガス排出量(確定値)について, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/>
- 経済産業省資源エネルギー庁(2008), 未利用エネルギー面的活用熱供給の実態と次世代に向けた方向性(平成 19 年度未利用エネルギー面的活用熱供給適地促進調査報告書 概要版), 平成 20 年 3 月
- 下水道協会・文献委員会(2008), 文献レビュー: 下水道事業における地球温暖化対策, 下水道協会誌, 45(546), 43-53
- 洪鋒, 津野洋, 日高平, 千智勲(2003), 1 日 1 回給仕操作での高濃度高温メタン発酵の生ゴミ処理への適用性と操作因子に関する研究, 環境工学研究論文集, 40, 333-342
- 小松和也, 安井英斉, 李玉友, 野池達也(2006), 高温・中温のハイブリッドフローによるオゾン処理嫌気性消化プロセスの高効率化, 環境工学研究論文集, 43, 31-38
- 齊藤忍, 小松俊哉, 姫野修司, 工藤恭平, 藤田昌一(2004), 下水汚泥と混合嫌気性消化による稲わらのバイオガス化, 環境工学研究論文集, 41, 1-8
- 坂本直子, 二渡了, 乙間末廣(2007), バイオマスタウン構想実施事例における効率性評価, 第 35 回環境システム研究論文発表会講演集, 41-46
- 佐土原聡, 長野克典, 三浦昌生, 村上公哉, 森山正和, 下田吉之, 片山忠久, 依田浩敏, 北山広樹(1998), 日本全国の地域冷暖房導入可能性と地球環境保全効果に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, 510, 61-67
- 三宮武(2008), 下水道における地球温暖化対策への取り組み, 下水道協会誌, 45(546), 9-11
- 志水章夫, 楊翠芬, 玄地裕(2004), 地域のバイオマス資源利用に関する LCI 手法開発: 千葉県における事例研究, 第 32 回環境システム研究論文発表会講演集, 209-214
- 下田吉之, 水野稔, 亀谷茂樹, 百瀬敏成, 金地孝行(1997), 都市未利用エネルギーの活用可能性評価手法に関する研究(第 2 報), 空気調和・衛生工学会論文集, 67, 1-11
- 下田吉之, 柳邦治, 水野稔(2001), 熱需要の変動を考慮した清掃工場排熱活用熱電併給システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 80, 27-35
- 下田吉之, 水野稔(2002), 大阪市における一般廃棄物からのエネルギー回収ポテンシャルの推計: 都市における物質・エネルギー代謝と建築の位置づけ その 3, 日本建築学会計画系論文

集, 560, 65-72

- 新エネルギー財団・新エネルギー産業会議(2006), 廃棄物発電システムの導入促進に関する提言,
http://www.nef.or.jp/introduction/teigen/pdf/te_h17_03.pdf, 平成 18 年 3 月
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2004), 新エネルギー関連データ 16 年度版,
<http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/index.html>, 平成 20 年 8 月 25 日閲覧
- 高島正信, 田中義人(2006), 酸加熱処理を組み合わせた下水汚泥の嫌気性消化に関する研究, 環境工学研究論文集, 43, 1-6
- 田中勝(1998), 廃棄物学概論, 日本環境測定分析協会
- 丹治三則, 山本洋之, 盛岡通(2004), 流域管理におけるシナリオ誘導型の有機物循環政策立案支援ツール開発に関する研究, 環境システム研究論文集, 32, 91-100
- 津野洋, 永禮英明, 日高平(2006), 資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発, 計測と制御, 45(10), 851-856
- 鶴田直, 松本亨, 柴田学, 垣迫裕俊, 篠原弘志(2004), 環境会計と LCA の連携による地域資源循環施策の評価手法の開発, 第 32 回環境システム研究論文発表会講演集, 215-222
- 日本熱供給事業協会(2008), あなたの街の地域熱供給システム,
http://www.jdhc.or.jp/area/area02_02.html, 平成 20 年 8 月 25 日閲覧
- バイオマス・ニッポン総合戦略(2006), http://www.maff.go.jp/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf,
平成 18 年 3 月, 平成 19 年 8 月閲覧
- 藤木洋徳, 曹鳴鳳, 尾島俊雄(2007), ごみ焼却熱を活用した熱源ネットワークの構築に関する研究: 東京副都心エリアにおけるケーススタディ, 日本建築学会環境系論文集, 619, 25-31
- 藤田壮, 小瀬博之, 鈴木陽太(2004), 地域からの有機物の統合的な循環利用についての検討, 第 12 回地球環境シンポジウム講演論文集, 207-212
- 松本亨, 石崎美代子, 左健, 島岡隆行(2003), 家庭系食品廃棄物の再資源化技術導入シナリオへのライフサイクルシミュレーションの適用, 環境システム研究論文集, 31, 125-132
- 水野修, 李玉友, 奥野芳男, 関廣二, 一瀬正秋(2004), 二相循環式メタン発酵プロセスによる食品加工廃棄物の無希釈処理, 環境工学研究論文集, 41, 9-18
- 宮西弘樹, 岩本雅至, 石川宗孝, 笠原伸介(2005), 水熱反応処理の利用による厨芥のメタン発酵処理の高速化, 第 42 回環境工学研究フォーラム講演集, 72-74
- 村野昭人, 鎌田みゆき, 藤田壮(2007), 木質系バイオマスを対象とした循環利用技術インベントリの評価, 第 15 回地球環境シンポジウム講演論文集, 225-230
- 森保文, 亀卦川幸治, 乙間末廣, 寺園淳(2000), 全国における未利用エネルギー利用による省エネルギー効果の推計, エネルギー・資源, 21(4), 363-368
- 森田弘昭(2006), 地球温暖化と下水道, 水環境学会誌, 29(2), 62-66
- 安井英斉, 小松和也, 松橋隆治, 大橋晶良, 原田秀樹(2005), 地域特性を考慮した嫌気性消化プロセスと消化ガスの利用に関する LCA, 環境工学研究論文集, 42, 171-182
- 矢野貴之, 吉田登, 曾田真也, 金子泰純, 山本祐吾(2007), 都市由来のバイオマス廃棄物のエネルギー変換における技術や事業収支要因の不確実性が環境負荷や事業性に及ぼす影響の分析, 環境システム研究論文集, 35, 109-120
- 山下孝光, 楠田哲也, 井村秀文(1991), 都市における下水廃熱の利用可能性に関する研究, 環境

システム研究, 19, 76-82

横井隆志, 山本祐吾, 齊藤修, 盛岡通(2007), 小地域内で廃棄物・バイオマス由来の電力・熱を融通する地域エネルギー供給による効果の算定システムの構築, 環境システム研究論文集, 35, 109-120

渡辺勇, 小松俊哉, 姫野修司, 藤田昌一(2003), 生ごみと下水汚泥の同時嫌気性消化システムのLCAによる評価, 環境工学研究論文集, 40, 311-320

6 再生可能エネルギーの開発

6-1 エネルギー部門におけるCO₂削減技術

エネルギー部門のCO₂削減の取組みについて、見ていきたい。先ず短期のエネルギー転換部門の取組みとして、2008年3月に改定された京都議定書目標達成計画²⁾では、原子力発電の着実な推進、天然ガスの導入及び利用拡大、石油の効率的利用の促進、LPガスの効率的利用の促進、水素社会の実現、新エネルギー等の導入促進などの取組みがあげられている。このなかで「新エネルギー」は、自然のプロセス由来で絶えず補給される太陽、風、バイオマス、地熱、水力などから生成される「再生可能エネルギー」のうち、その普及のために支援を必要とするものを指すと定義されている。

さらに、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書第3作業部会報告書³⁾によれば、エネルギー供給部門の主要な緩和技術及び実施方法として、

①現在商用化されている主要な緩和技術及び実施方法

- ・供給及び流通効率の改善、石炭からガスへの燃料転換、原子力発電、再生可能な熱と電力（水力、太陽光、風力、地熱、バイオエネルギー）、コジェネレーション、二酸化炭素回収・貯留（CCS）の早期適用（例、天然ガスから分離したCO₂の貯留）

②今後2030年までに商用化が予想される主要な緩和技術及び実施方法

- ・ガス、バイオマス、石炭を燃料とする発電所でのCCS、先進的原子力技術、潮汐発電、波力発電、集中型太陽光、太陽光発電など先進的再生可能エネルギーを取り上げている。

また、経済産業省は、2008年3月に「Cool Earth-エネルギー革新技术開発計画」⁴⁾を発表し、エネルギー分野における革新的技術開発を加速・推進するため、発電・送電、運輸、産業、民生などの分野で我国が世界をリードできる技術として、CO₂を大幅に削減できる21の技術を選定し、これらの技術について、長期にわたる技術開発を着実に進めていくためのマイルストーンとして、各技術の開発に向けたロードマップを作成している。このうち、発電・送電分野では、高効率天然ガス火力発電、高効率石炭火力発電、二酸化炭素回収・貯留（CCS）、革新的太陽光発電、先進的原子力発電、超電導高効率送電、部門横断では、高性能電力貯蔵、パワーエレクトロニクス、水素製造・輸送・貯蔵、CCS(再掲)の各技術を取り上げている。

以上のようなエネルギー部門におけるCO₂削減の計画・取組みにおいて、土木技術の貢献が期待される主な技術とその内容としては、次のようなものが有ると考えられる。

- ①原子力発電の着実な推進、先進的原子力発電及び高効率火力発電の技術開発：原子力発電及び火力発電の土木設備における設備設計や耐震技術などの高度化、放射性廃棄物の処理・処分技術への土木技術面からの検討
- ②再生可能エネルギーの導入及び技術開発：水力、風力、地熱発電などを中心とした再生可能エネルギーの導入及び技術開発、再生可能エネルギーを用いたCDM（クリーン開発メカニズム）開発
- ③二酸化炭素回収・貯留（以下、CCSという）の技術開発：輸送技術、CO₂の地中挙動メカニズム、地中挙動予測、地下水・地盤への化学的影響、挙動モニタリング等の信頼性向上などの検

討

ここでは、CO₂削減の重要な選択肢であり、また土木技術からの貢献も期待される再生可能エネルギーの導入及び技術開発について、第6.2節に述べる。併せて、新しい技術であるCCSについて、土木技術面から期待される貢献を含めて、第6.3節で紹介したい。

6-2 再生可能エネルギーの開発

エネルギー委員会では、2006年12月に「再生可能エネルギー開発の現状と課題」報告書¹⁾を取り纏めている。ここでは、上記報告書及び報告書作成以降の動向を踏まえて、再生可能エネルギーの開発に関して、報告したい。

(1) 再生可能エネルギーの種類と開発の必要性

再生可能エネルギーの種類には、水力発電、地熱発電、太陽光発電、風力発電、太陽熱利用、雪氷熱利用、温度差熱利用、バイオマス発電、バイオマス熱利用、バイオマス燃料製造、廃棄物発電、廃棄物熱利用、廃棄物燃料製造、波力発電、海洋温度差熱発電などがある。再生可能エネルギーの開発に関しては、2008年5月に経済産業省総合資源エネルギー調査会需給部会において「長期エネルギー需給見通し」が取り纏められている。この中で、2020年度における水力と地熱を除く新エネルギー導入見通しは、現状固定ケース・努力継続ケースとして、原油換算で1,733万kl、最大導入ケースとして、2,036万klとしている。また、2030年度におけるエネルギー需給見通しでは、最大導入ケースとして、水力、地熱を含む再生可能エネルギーが一次エネルギー国内供給の約11%（2005年度で約6%）を占めると予測している。

表 6-1 新エネルギー導入の見通し（長期エネルギー需給見通し、総合資源エネルギー調査会）

	2005年度	2020年度		2030年度	
	実績	現状固定ケース・ 努力継続ケース	最大導入ケース	現状固定ケース・ 努力継続ケース	最大導入ケース
太陽光発電	35	140	350	669	1,300
風力発電	44	164	200	243	269
廃棄物発電＋バイオマス発電	252	476	393	338	494
バイオマス熱利用	142	290	330	300	423
その他(※)	687	663	763	596	716
合計	1,160	1,733	2,036	2,146	3,202

※「その他」には、「太陽熱利用」、「廃棄物熱利用」、「未利用エネルギー」、「黒液・廃材等」が含まれる。
「黒液・廃材等」の導入量は、基本的にエネルギー需給モデルにおける紙パの生産水準に依存するため、モデルで内生的に試算する。

また、2003年4月に「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（以下「RPS法」という。）が施行された。RPS法は、電力の小売を行う事業者に対し、その販売する電力量に応じて、新エネルギー等電気を一定割合利用することを義務付ける法律で、利用義務量の全国合計値は2010年度で122.0億kWh、2014年度で160億kWhとなっている。RPS法の対象となり得るエネルギー源は、①風力、②太陽光、③地熱（熱水を著しく減少させないもの）、④水力（1,000kW以下の水路式及び維持流量又は利水流量を用いるダム式・ダム水路式）、⑤バイオマスの5種類である⁴⁾。

再生可能エネルギーは、発電時にCO₂を排出しないため地球温暖化防止対策に資すると共に、その多くが国内で生産できるためエネルギーの自給率向上にも有効であり、上記のような再生可

能エネルギーの開発の目標実現に向けて、積極的な取組みが進められている。

(2) 再生可能エネルギー開発の現状^{1), 6)}

「再生可能エネルギー開発の現状と課題」報告書では、風力発電、太陽光発電、地熱発電、小水力発電、バイオマス発電、廃棄物発電について、再生可能エネルギー開発の位置付けと開発の現状及び課題の調査・取り纏めを行っている。また、研究開発途上の再生可能エネルギーとして、波力発電、海洋温度差発電及び高温岩体発電について現状と将来見通しを紹介している。さらに、CDMに関しては、CDM制度の紹介、再生可能エネルギーを用いたCDM事業などの調査・取り纏めを行っている。

ここでは、水力発電、風力発電及び再生可能エネルギーを用いたCDMを取り上げ、調査・取り纏めの結果を中心に報告する。

1) 水力発電¹⁾

我国の水力開発の歴史は古く、1878年に世界初の水力発電所がフランスに完成した10年ほど後には、三居沢発電所（1888年、自家用初）、蹴上発電所（1891年、事業用初）が運転を開始している。以来、水力発電の開発は、それぞれの時代の要請に応じて進められ、現在も我国の電力供給量（kWh）の約1割を占め、また電源設備としても全電源容量の約2割を占めており、エネルギー源として重要な役割を果たしている。総合資源エネルギー調査会需給部会の長期エネルギー需給見通し（2005年3月）において、一般水力の2010年度の見通しは、設備容量2,070万kW（2000年度2,008万kW）、発電電力量927億kWh（同779億kWh）としている。

我国の水力開発は、一般水力においては開発の奥地化・小規模化により経済的に有利な地点は減少してきており、最近では既設水力の再開発や増改築、総合開発事業の一環としての開発が中心となっている。また、2003年に施行されたRPS法や国の開発促進施策の後押しで、未利用落差発電（既設ダム維持流量放流設備利用、農業用水路落差工利用、上下水道減勢工・減圧部利用、砂防ダム利用など）やローカルエネルギーとして地域と一体となった小規模水力開発も進められている。図6-1に農業用水路の落差工での適用を目指した簡易パッケージ型の開発事例を示す。



図 6-1 水路の落差を利用した発電の実証試験状況（出典：経済産業省、小水力資源有効活用平成 16 年度報告書）

一般的に水力発電は、建設コストは高いが運転コストは安く、長期にわたり安定して運転できるという特性を有している。ミニ水力（出力1,000kW～100kW）、マイクロ水力（出力100kW以下）などの小規模水力の開発に当たっては、

- ① 長期間の安定した運転の確保として、既設発電所水路、農業用水路、河川維持流量、上下水道管路などの長期間に亘って流量が把握されている地点
- ② 建設コストの低減として、これまでの技術開発成果の活用のほか、水力発電設備のシンプル化や既設工作物の有効利用、地点特性に応じた適切な水車・発電機の選定

③ 運転コストの低減として、メンテナンスフリー設備の設置、監視方式・点検方法

などの検討が重要となる。小規模水力開発はスケールメリットが少ないため、これまでに培われてきた水力発電技術を駆使して、簡易でユニークな発電所も生まれている。「純国産」「自然・再生可能」「クリーン」なエネルギーとして、優れた特性を有している水力発電を今後も継続して開発を促進していくことは、我国にとって引き続き重要政策課題の一つである。現在、支援制度として、中小水力発電開発費補助金補助事業などがあるが、様々な事業者で開発を進める気運を活性化するためにも、更なる開発促進施策の充実・拡大が望まれる。

2) 風力発電^{1),7)}

風力発電は、再生可能な純国産エネルギー源を利用した、発電時に CO_2 を排出しないクリーンな発電方式のひとつとして大いに脚光を浴びている。日本の風力発電の設備容量累計は、1990年度にはわずか1,000kW程度であったのに対し、2000年度には約14万kW、2002年度には約46万kWと、1990年代後半から急激に増加している。2003年4月からは、RPS法など一層の導入拡大を目指した政策的支援が実施されており、2007年度における導入実績は、設備容量約167万kW、設置基数1,400基超に達している。また、プロペラ直径が60mを超える1,500kW級の大型風車の導入など設備の大規模化も著しく、2007年度時点で1,000kWを超える設備が700基稼動しており、総出力15,000kW以上の大型施設の設置も次々と進んでいる。

このように、我国における風力発電の導入は1990年代後半から急速に拡大している。しかし、我国の地形条件と気象条件は欧州と大きく異なり、山岳地帯における複雑な気流に起因する風力発電量予測精度の低下や台風襲来に伴う風力発電設備の被害も発生している。また風力エネルギーの地域偏在性は、陸上の風力開発の適地不足問題を引き起こしている。

台風襲来に伴う風力発電設備の被害の対応については、2004年9月、土木学会構造工学委員会に「風力発電設備耐風設計小委員会」が設置され、2007年11月に国内で初めて風力発電設備支持物の構造設計方法を具体的に示した「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」が策定された。本指針の活用により、風力発電設備支持物の安全性・信頼性の向上が期待されている。

また、風力発電の将来的な開発地点として、陸上に比べ、安定した強い風が吹き、景観や騒音の問題が少ないうえ、土地の制約を受けずに大規模な風力発電所の建設が可能である洋上風力が有望視されている。欧州では比較的浅い水域に適した着床式洋上風力発電が主流であり、約3万kmを超える長い海岸線をもつ日本でも洋上風力発電の開発が期待されているが、我国の沿岸は遠浅な立地好適地が少なく、より水深の深い海域に建設可能な浮体式洋上発電システムの開発が望まれている。既に複数台の風車を搭載するセミサブ浮体構造（図6-2）や単体の風車を搭載するスパーブイ型浮体構造が提案されており、さらにこれらの浮体構造をあわせもった複合構造も研究され、実用化に向けた研究開発が進められている。

洋上風力発電を本格導入するためには、風況・波浪の予測、経済的で信頼性の高い発電設備の開発、送電系統や漁業補償の問題など、多



図 6-2 浮体式洋上風力発電システムの完成予想

方面での課題解決が不可欠である。かつての大規模水力の開発のように、21世紀における風力開発には、土木が果たすべき役割が大きい。これまでの海洋土木で培った高い技術力とノウハウを活かし、浮体式洋上風力発電の早期実現が期待されている。

3) 再生可能エネルギーを用いたCDM¹⁾

京都議定書目標達成計画²⁾では、京都メカニズム推進・活用の意義について、次のように述べている。

- ① 京都議定書の約束を確実に、かつ費用対効果を考えて達成するためには、京都メカニズムについて、国内対策に対して補足的であるとの原則を踏まえつつ、必要なクレジットを取得する。
- ② 今後、途上国などにおいて温室効果ガスの排出量が著しく増加すると見込まれる中、我国が地球規模での温暖化防止に貢献する観点から、京都メカニズムを推進・活用していくことが重要である。

このようななか、途上国に対して水力あるいは火力発電などのインフラ整備のために多数の海外技術協力を行い、調査・設計・施工のみならず設備の維持管理に至るまで、プロジェクトサイクル全般について途上国における運営ノウハウを有しているエネルギー土木部門が、再生可能エネルギーを活用した京都メカニズムの一つであるCDM開発に貢献していくことが期待される。

2008年7月現在の日本政府が承認したCMD/JIプロジェクト（JIは共同実施）は337件あるが、このうち再生可能エネルギー関連のものは、221件で、その内訳は水力111件、風力37件、バイオマス他73件である。CDMを実施するに当って、再生可能エネルギーの活用は有効な手法となっている。エネルギー委員会では、土木技術者が再生可能エネルギーを用いたCDMプロジェクトを海外で実施するに当って参考にできるように、CDM制度の仕組、CDMを活用したプロジェクトの具体的な事例を、CDM開発の現場に携わっている技術者により紹介する「再生可能エネルギーを用いたCDMに関する講演会」を2007年12月に開催した。水力発電関係では、e7（7カ国の電力10社で構成される電力NGO）によるブータンでのマイクロ水力発電やブラジルでの小水力発電プロジェクト、風力発電関係では、中国における風力発電プロジェクト、またバイオマス発電関係ではアルメニアでのランドフィルガス回収・発電プロジェクトやマレーシアでの強制メタン発酵・発電プロジェクトなどについて、土木技術者の視点からの紹介がなされた。

(3) 再生可能エネルギーの普及に向けた提言¹⁾

「再生可能エネルギー開発の現状と課題」報告書では、再生可能エネルギーの普及に向けて、エネルギー土木部門がインハウスエンジニアとして長年培ってきた技術力を活かして、以下のような土木技術者の取組みについて提言を行っている。

① 土木技術者による総合工学的な取組み

エネルギー土木はエネルギー関連施設を立地するための土木計画学、水象・海象・気象に関する知識、さらに環境調査・アセスメントや環境保全技術などを集積した総合工学である。エネルギー土木技術者には、土木工学に関する知識は元より、設備形成にあたりコスト、品質、工期、地域共生、環境、安全などを総合的にバランスさせるエンジニアリング力、技術以外の業務課題に対応するプロジェクト遂行力が求められており、より複雑化、高度化、専門化した要素技術を効率的に取り込み、最適に統合、実践する技術が熟成されてきた。このようなエネ

ルギー土木で培われたノウハウは再生可能エネルギーの設備形成にも十分に適用可能である。再生可能エネルギー関連設備の場合、従来の設備と比較して土木工学的な要素が占める割合は低いが、土木技術者が再生可能エネルギーの開発において、従来のプロジェクト遂行能力に機械や電気の領域の専門的な知識を取り込んで、再生可能エネルギー関連設備形成のイニシアティブを執り、総合的な管理を行えば、再生可能エネルギーの普及に大きく貢献しうるものと考えられる。

②新たな再生可能エネルギーの実用化に向けた技術開発の推進

例えば、風力発電では、風車基礎など土木設備の設計に当って、我国特有の風況や地質などの地点特殊性を適切に考慮する技術が求められる。また、今後開発が期待される洋上風力は、我国の沿岸には遠浅な立地好適地が少ないこともあり、従来の港湾・海洋土木技術を基礎とした土木分野における設計・建設技術の高度化を図ることや、土木技術者が機器メーカーと共同で研究開発を実施するなど関連技術と共同した研究開発を進め技術的なブレークスルーを目指すことが期待される。さらに、波力、海洋温度差、高温岩体などの再生可能エネルギーも研究開発の途上にある。エネルギー土木技術者が技術開発をリードし、我国に適した技術で再生可能エネルギーの普及・実用化を目指すことが望まれる。

③CDM/JIの活用による海外への展開

エネルギー土木技術者は、海外技術協力・投資などで海外におけるエネルギー関連プロジェクトの発掘、調査・計画、設計・施工、運転・管理とプロジェクト全体に携わり、技術力とノウハウを蓄積してきた。この技術力・ノウハウを最大限に活用して、CDM/JI プロジェクトを通じて、海外において再生可能エネルギーの普及を図り、温室効果ガス削減に寄与しながら、途上国の発展に貢献していくことが期待される。

6-3 二酸化炭素回収・貯留

二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon Dioxide Capture and Storage）は、CO₂を産業及びエネルギー関連の排出源から分離し、貯留場所に輸送し、大気から長期間隔離するという削減技術である。貯留方法として、地中貯留（油田及びガス田などの地層、非可採石炭層、大深度地下塩水層の中への貯留）、海洋隔離（海水中又は深海底への直接放出による溶解・希釈又は貯留）及びCO₂の無機炭酸塩としての工学的固定が考えられている⁸⁾。我国においては、地中貯留では多くの貯留容量が見込まれる大深度地下塩水層（以下、帯水層という）への貯留を中心に検討が進められている。

帯水層を対象とした地中貯留は、図6-3に示すように排出源から分離・回収したCO₂を貯留場所までパイプライン・タンカーなどで輸送し、上部に不透水層（キャップロック）を有する約800m以深の地下帯水層へ圧入・貯留する技術である。帯水層を対象とした地中貯留は、世界的には、ノルウェーの海底帯水層でのSleipnerプロジェ



図 6-3 CO₂ 地中貯留のイメージ（出典：経済産業省「CCS2020」）

クトにおいて天然ガスより分離した CO₂を用いて年間約100万t- CO₂規模の貯留が1996年より開始されている。我国においては、(財)地球環境産業技術研究機構が2003年～2005年に新潟県長岡で1万t- CO₂規模の帯水層貯留実験を実施し、詳細なモニタリングによって地中の CO₂の挙動解明を行っている。CCSの技術開発及び今後の実用化に当たって、パイプラインを中心とした輸送技術、CO₂の地中挙動メカニズム、地中挙動予測、地下水・地盤への化学的影響、挙動モニタリング等の信頼性向上の検討等において、土木技術からの貢献が期待される⁹⁾。

一方、海洋隔離では、固定されたパイプラインあるいは航走船舶を用いて海水中（通常1,000 m以上の深さ）に CO₂を注入し、溶解・希釈する方法、そして、3,000m以上の深海底に固定パイプラインや洋上プラットフォームを通して注入し、CO₂の貯留池を形成する方法の二つが可能であるとされている。IPCCの特別報告書によれば、海洋隔離とその生態系への影響については現在研究段階にあると評価されている⁸⁾。将来の実施に向けて、CO₂の海洋拡散・生物影響の科学的理解、拡散シミュレーション実験によるマッチングなどの技術の確立を目指した技術開発を行うことが重要であり、その成果を広く公開し、海洋隔離実施に対する国際的・社会的合意を得ていくことが不可欠である¹⁰⁾。

参考文献

- 1) 土木学会エネルギー土木委員会環境技術小委員会：再生可能エネルギー開発の現状と課題，2006年12月
- 2) 京都議定書目標達成計画，2008年3月
- 3) IPCC：Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change，2008年
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁：日本のエネルギー 2008，2008年3月
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁：平成19年度エネルギーに関する年次報告書(エネルギー白書)，2009年5月
- 6) 土木学会エネルギー委員会：再生可能エネルギーの開発・普及を目指して，土木学会誌，vol. 93 No. 7，PP. 31～38，2008年7月
- 7) 石原孟：わが国における風力発電の現状と将来展望，土木学会誌，vol. 93 No. 7，PP. 33～34，2008年7月
- 8) IPCC：IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage，Cambridge University Press，2005年
- 9) 駒田広也：二酸化炭素地中貯留，地盤工学会誌，vol. 56 No. 7，PP. 65～66，2008年7月
- 10) (財)地球環境産業技術研究機構：プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発「研究成果(技術戦略マップ)」成果報告書，2008年3月

7 土木学会における取組の考え方と方策

地球温暖化問題に対する研究の取組みとして、土木学会では学術研究グループによる組織的な研究を行っている。学術研究グループは、構造、水理、地盤、計画、コンクリート、建設技術マネジメントおよび環境・エネルギーの7分野にグループ化された28の委員会から構成されている。各委員会は主眼とする分野の学術的な研究成果を通して社会貢献を果たすとともに、重要なテーマや分野横断的なテーマに対しては、小委員会を設置し集中的かつ効果的な研究活動を行っている。ここでは温室効果ガスの発生抑制に関連する技術を研究対象とした小委員会活動の事例を紹介する。

7-1 自然資源や再生可能エネルギーの活用

建設技術研究委員会における間伐材利活用研究小委員会では、土木学会としての間伐材利用についての立場を明確にして、土木産業界が間伐材の利用を高めるための方策について、検討を石田修小委員長のもとで2006年8月から活動を行っている。

背景として、地球温暖化防止策、環境負荷の低減への貢献にあたり、地方自治体での間伐材の利用実績は増えているものの、農林水産関連が多く、土木分野での利用が少ないことにある。

具体的には、間伐材を利用した土木構造物に関する事例をヒアリング等により調査し、その費用、耐久性、維持管理等について既存材料を使用した場合と比較検討し、その特徴、課題を整理している。さらに、調査結果にもとづき、環境影響評価（温室効果ガスをはじめとする環境負荷の低減効果）の評価法の検討を実施し、土木業界での利活用を高めるための方策を検討している。表7-1に小委員会で実施した自然素材利用状況に関する文献調査結果を示す。

しかしながら、コスト、耐久性、強度、安定供給の課題により、現状における自然素材の採用は多くないことが小委員会の調査により明らかとなり、その課題を表7-2のように取り纏めている。

表 7-1 自然素材利用状況¹⁾

材料種別 構造種別	木材	石	土
	間伐材、粗朶、竹	自然石、転石	土砂、火山堆積物、碎石
ダム	治山ダム	大転石積み谷止め工	台形CSGダム
道路	丸太舗装、ウッドチップ舗装、木塊舗装	天然石舗装 (小舗石舗装、板石舗装)	土系舗装
道路施設	ガードレール、木柵、デリニエーター、防音壁、側溝蓋、丸太積み工、防風柵	—	—
法面防護	法枠工、法留め工、丸太伏工、落石防護柵	ふとんかご	—
橋梁	多数の木橋	多数の石橋	—
河川	聖牛、菱牛、粗朶沈床、蛇籠、牛枠工、かご出し、法覆工、木製水路、木製護岸、木工沈床	巨石工、かご工、法覆工 (多自然型河岸防護工)	—
擁壁	—	転石積み擁壁	土のう導流堤
基礎・補強杭	堤体補強杭、地盤補強杭、基礎杭	—	土のう基礎
建物・その他	ドーム、アーケード、会談、型枠、ベンチ、樹木保護	石垣	—

表 7-2 自然素材の利用に関する課題¹⁾

項目	内容
コスト	コンクリート、鋼材等の他の材料に比べて、材料費は安価であるが、設置費などが高く、全体として高コストとなる
耐久性	木材は腐朽して、性能が低下するため、防腐剤塗布などが必要となり、維持・更新などの管理費用が他の材料に比べて高い
強度不足	コンクリート、鋼材等の他の材料に比べて強度が不足するため、大規模構造物に不適である
安定供給	大量なニーズに対応できず、絶対量が不足している
品質の安定	材料の不均質性、強度のばらつきがあり、一定品質の確保が困難である
使い易さ	二次製品などのように加工されてないため、現地での施工で手間がかかる
マニュアル	標準図や歩掛かりの整備が遅れているため、積算できず工事仕様に盛り込めない
技術の伝承	伝統工法では、技術の伝承が必要であるが、人材が不足している

これらを踏まえて、この間伐材利活用研究小委員会では自然素材の積極的な採用のための今後の課題として、①自然素材評価項目に「温室効果ガスなどの環境負荷影響」等を追加、②自然素材のプレキャスト化等の研究③安全性を的確判断できる設計基準の整備、④自然素材活用の啓蒙活動、⑤伝統工法技術伝承のための人材の確保と育成の 5 つを掲げている。とりわけ、地球温暖化の観点から、①自然素材評価項目に「温室効果ガスなどの環境負荷影響」等の追加が待たれる。

7-2 交通対策

情報利用技術委員会における交通情報サービス基盤モデル小委員会では、2006 年 7 月より松本三千緒小委員長のもとで、ETC 利用の荷捌き駐車場の効果的な運用による CO₂ 削減に関する研究を進めている。

具体的には、前身である交通基盤情報ビジネス小委員会（2002 年 6 月～2006 年 6 月：浦野隆小委員長）の報告書²⁾として取り纏められている新荷捌き駐車場システムのビジネスモデル案（図 7-1）を実証段階へと移行し、温室効果ガスの削減効果を評価しようとするものである。

例えば、図 7-2 に示すように ETC を駐車場の管理に利用して、事前に登録した ETC 搭載の自動車に事前予約した時間帯に専用のスペースへ優先的に駐車することが可能なようにすることにより効果的な駐車場の運用を行おうとするものである。

ここで想定している利用状況は、宅配便や貨物の運送用トラックやバンなどが、荷物の積み卸しのために数分間、駐車場を利用するというケースである。今後、交通情報サービス基盤モデル小委員会による不要な路上駐車による温室効果ガスの削減効果の評価結果の公表が待たれる。

7-3 LCAにもとづくインフラ整備

環境システム委員会における環境評価研究小委員会（1999 年～継続中：盛岡通小委員長）では、公共工事におけるグリーン購入法による特定調達品目の選定時に、定量的ライフ・サイクル・アセスメント（以下、LCA）手法を適用した温室効果ガス等の評価結果を考慮することのできる評価手法の開発に取り組んでいる。

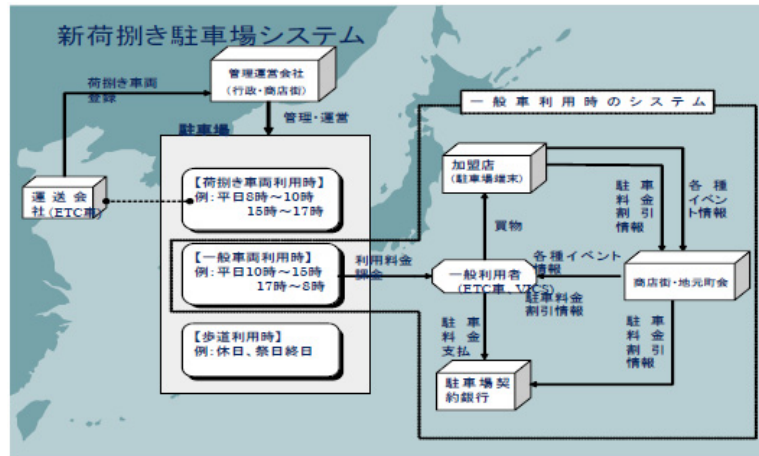


図 7-1 新荷捌き駐車場システムビジネスモデル案²⁾

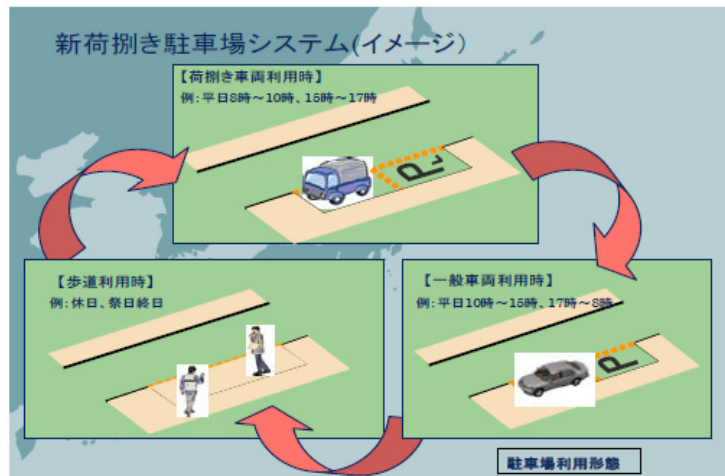


図 7-2 新荷捌き駐車場システムのイメージ²⁾

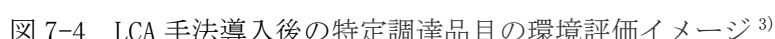
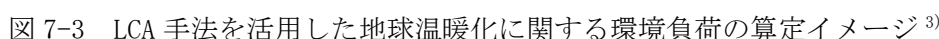
背景としては、循環型社会形成推進基本法の個別法の一つとして平成 12 年 5 月に制定された「国等による環境物品等の推進等に関する法律」（以下、グリーン購入法）に関連して、土木学会に設置されたグリーン購入法の技術審査に係る運用方針検討委員会（平成 15～17 年度）の報告の中で、特定調達品目が提案された時の技術評価に LCA 手法による評価が不可欠であり、これを評価する手法の開発が必要であると報告されたことにある。

この時、技術評価の適用範囲としては、提案される特定調達品目に対して、①内容確認→②環境評価→③品質評価→④普及評価→⑤経済性評価の 5 項目に対して実施される。さらに、②、④、⑤の評価過程で LCA 手法による評価を実施したのち、②環境評価の過程において温室効果ガス排出量を指標とした地球温暖化対策としての評価を行うとしている。

この土木学会報告を受けて、国土交通省の下に設置された公共工事の環境負荷低減施策推進委員会は、その下に LCA 手法開発を目的とした検討会を設置し、平成 18 年 12 月から平成 19 年 11 月まで 6 回の検討会を開催したのち、平成 20 年 1 月からその運営主体を土木学会（環境システム委員会環境評価研究小委員会）へ移行し、より具体的な手法開発を目指すこととなった。

以下に、環境評価研究小委員会にて検討が進められている LCA 手法の概要を紹介するが、ここ

図 7-3 に LCA 手法を用いて評価した地球温暖化に関する環境負荷算定のイメージ図を示した。



事例では再生骨材をアスファルト舗装に使用することにより、資源採取、製造、運搬の過程において、CO₂排出量削減の観点から改善が見られる様子を示している。

同様に、廃棄物・資源や生物多様性に対する評価方法の検討も進められているが、ここでは省略する。

これらのLCA手法導入後の特定調達品目の環境評価イメージを図7-4に示す。図7-4の上段の定性評価を主体とした現状の評価に対して、下段の定量評価結果を用いた環境評価では、より客観的な特定調達品目間の比較が可能となると考えられる。

同様のLCA手法を構築することにより、品質評価、普及評価および経済性評価を実施することが可能となり、最終的には特定調達品目の客観的な技術評価につながるものと期待される。

これらのことから、土木工事そのものからの温室効果ガスの排出量削減に限らず、長期にわたって使用される調達品目の選定段階において、温室効果ガス等の環境負荷の少ないものを選定するなどの対応がますます重要になってくると思われる。

7-4 廃棄物等の有効利用

ここでは、コンクリート委員会及び舗装工学委員会の取組みを紹介する。

まず、コンクリート委員会について示すと、同委員会に設置されたコンクリートの環境負荷評価研究小委員会は、コンクリートの環境性能の内容と照査・検査方法を具体化する手法を調査・研究することを目的として、河合研至小委員長以下22名の構成員で2002年8月から2年間の活動を行った。

この小委員会では、コンクリートの環境性能としてエネルギー消費量やCO₂排出量をはじめとする多種多様な環境負荷要因を統合して評価することを踏まえて、これらの環境負荷要因を計算するためのインベントリデータを収集・作成し、データベースとして構築し、さらに、コンクリートの環境性能を具体的な指標として示し、その照査方法の検討を行った。

これらの成果は、コンクリート技術シリーズ62「コンクリートの環境負荷評価（その2）」⁴⁾に取り纏められている。成果の事例として、鉄筋コンクリート100m³のインベントリ分析試算結果を図7-5に示す。鉄筋コンクリートのライフサイクル（材料製造・施工・解体・輸送・リサイクル過程）を通して、CO₂排出量（t-CO₂）割合の最も多い材料製造過程に注目し、セメントに普通ポルトランドセメントを用いた場合と、セメント40%を産業副産物である混和材で代替した場合のCO₂排出量を比較した場合に、後者の方が約20%のCO₂排出量削減を図ることができると試算された。

また、コンクリート委員会では、コンクリート構造物の建設が、環境負荷低減と社会経済活動の発展に寄与することを明示的に示すために、あるいはそのことを常に意識した社会基盤整備を行うために、コンクリート構造物の環境負荷評価と合理的な環境負荷低減システムが必要であるとして、コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）⁵⁾を取り纏めた。同指針は、コンクリート標準示方書の現行体系である性能照査型規定を「環境」にも拡張適用することを意図したものであり、コンクリート構造物に関する「環境性能」とその照査の概念を新たに導入されたものとなっている。

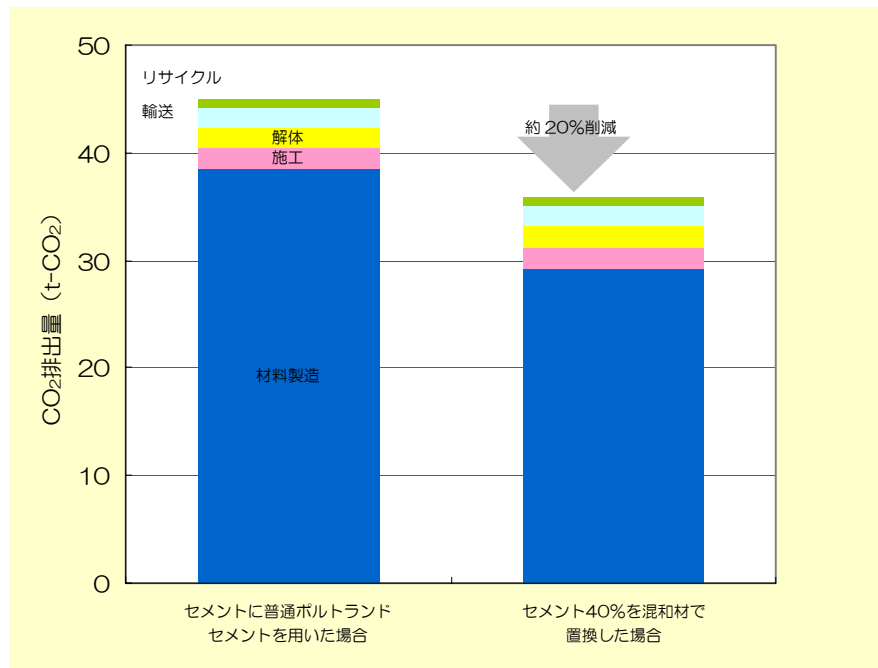


図 7-5 鉄筋コンクリート 100 m³のインベントリ分析試算結果⁴⁾

さらに、土木学会コンクリート標準示方書において、「耐久性照査設計」の概念を世界に先駆けて[設計編]⁶⁾[施工編]⁷⁾に導入し、[維持管理編]⁸⁾を新たに策定し、社会基盤施設であるコンクリート構造物の長寿命化を包括的に図ることによって、建設に伴う環境負荷の緩和・軽減に大きく寄与している。また、コンクリートの環境負荷評価と再生資源（産業副産物）の有効利用のための指針原案⁹⁾の作成、コンクリートの環境負荷評価と資源能有效利用に関する指針原案と再生資源（産業副産物）の利用拡大マニュアル¹⁰⁾の作成なども行われている。

同様に、フライアッシュ有効活用研究小委員会（2006年9月～2009年3月予定）が、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュのコンクリート材料としての有効利用促進のための調査研究活動を行っている。

続いて、舗装工学委員会に設置された舗装環境小委員会では、熱環境改善型舗装を取り上げ、低騒音舗装、ポーラス舗装の透水機能とともに、舗装工学ライブラリー4として、「環境負荷軽減舗装の評価技術」¹¹⁾を取り纏めている。

さらに舗装分野では、アスファルト舗装の再生率が99%を超えるなど、産学官全体としての取り組みが進められていることから、同小委員会においては、CO₂の排出量抑制も含めた環境負荷の小さな舗装の構築を促進するために、環境適合設計の舗装分野への導入に関する研究を行っている。

7-5 まとめ

土木学会では、これまで示したような温室効果ガスの排出量削減に関連する研究をはじめとして、多くのテーマに関連して、技術の開発、社会システムへの適用、シナリオ研究、経済性評価などの研究を展開している。今後、各委員会および各小委員会の研究活動がより一層推進されるとともに、その成果が社会に大きく貢献することを期待する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会建設技術研究委員会間伐材の利活用技術研究小委員会：土木学会建設技術研究委員会間伐材の利活用技術研究小委員会資料, 2007
- 2) 土木学会情報利用技術委員会交通基盤情報ビジネス小委員会：平成17年度交通基盤情報ビジネス小委員会研究報告書, 平成18年6月
- 3) 社団法人日本道路建設業協会資料：第 15 回道路技術シンポジウム 座談会「道路の環境と舗装技術の展望」, 2009
- 4) 土木学会コンクリート委員会コンクリートの環境負荷評価研究小委員会：コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価（その2）, 2004 年 9 月
- 5) 土木学会コンクリート委員会示方書小委員会環境側面検討部会：コンクリートライブラリー 125 コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）, 2005 年 11 月
- 6) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2008 年 3 月
- 7) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【施工編】, 2008 年 3 月
- 8) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2008 年 3 月
- 9) コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ 29 コンクリートと資源の有効利用, 1998 年 11 月
- 10) コンクリート委員会コンクリート資源有効利用小委員会：コンクリートライブラリー96, 資源有効利用の現状と課題, 2005 年 11 月
- 11) 土木学会舗装工学委員会舗装環境小委員会：環境負荷軽減舗装の評価技術（舗装工学ライブラリー4）, 2007 年 3 月

第4編 地球温暖化に対する適応策

1 はじめに

本提言は、将来予想される地球温暖化時の日本社会の適応について、土木学会地球温暖化対策特別委員会適応策小委員会が主として水工学、海岸工学、環境工学の視点から行なうものである。また、本提言では日本語の慣例に従い、温暖化や気候変動といった語句を用いるが、温度が上がることだけが問題でもなく、年々の気候の変動を問題としているわけでもないため、Climate Change（気候変化）という用語が世界の共通認識であることを最初に付記しておく。

ところで、地球の地圏・水圏における将来の動向に関しては氷河期の再來說や、温暖期や寒冷期の周期説なども存在していたが、今日言われるところのいわゆる地球温暖化現象は昨日や今日突然に認識されたものではなく、以下のような長い歴史を持つものである。

19世紀初め、地球大気に温室効果があるかもしれないとフーリエ（J. B. J. Fourier）が考え、1896年、CO₂の濃度変化とそれに伴う水蒸気量の変化が地上気温に重大な影響を与えることをアレニウス（S. A. Arrhenius）が計算し発表して以来、100年以上が経過した。ハワイのマウナロアではCO₂濃度がはっきりとした上昇傾向を示すことを1960年キーリング（C. D. Keeling）が発表し、真鍋（S. Manabe）とウェザラルド（R. T. Wetherald）が次元の放射対流平衡モデルを用いてCO₂倍増による地表気温上昇が2～3度になることを1967年に示してから考えても、50年近くが経過した。ちなみに、この2～3度という数字は現在の最先端の研究成果とほとんど違いのない数字である。世界規模での協調の下に気候研究を推進することの意義が認められ世界気候研究計画（WCRP）が1979年に発足し、1988年には、温暖化の脅威を政府レベルで真剣に評価分析するために気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設立された。そこから約20年、2007年に発行されたIPCCの第4次報告書は、地球の気候システムに人為起源の温暖化が生じていることはほぼ間違いないと断定した。

IPCCから公表された第4次評価報告書によるとその影響は、

- i) 生態系
- ii) 淡水資源
- iii) 食料
- iv) 沿岸と低平地
- v) 産業
- vi) 健康

など広範囲に及び、またCO₂等温暖化効果ガスの削減を中心とした緩和策を行ったとしても短期的及び長期的に起こるであろう温暖化による影響に対処するためには、地球温暖化そのものを緩和させる対策（緩和策）と温暖化に伴う諸現象への対策（適応策）が必要であることが指摘されている。

その中で地球温暖化に伴う気候変動は人間の生活する陸上の標高高度、海岸線からの距離、大陸の東西南北、気候区の違いなどに関わらず、あまねく大なり小なりの水循環に影響を与え

る。特に人口や資産の集中する沿岸域や低平地では、海面水位の上昇、大雨の頻度増加、台風の激化とそれらの複合した水害、土砂災害、高潮災害等が頻発・激甚化すると指摘されている。また、淡水資源に関しては、降水量の絶対的な量の大小の将来変化に伴う問題のほか、人間の生活・生産の活動度や人口と人口密度の変化など社会の変化に応じた水需要との需給の相対的な大小に起因する問題がある。このため、

- ・ 降水量の絶対量の減少
- ・ 降水量の変動幅の拡大
- ・ 積雪量や融雪時期が変化
- ・ 人口の増加
- ・ 途上国の発展に伴う水使用量の原単位の増加
- ・ 水の豊かな国・地域と水の乏しい国・地域間の水のやり取りの難しさ

などにより慢性的な水不足を抱える国・地域の増大と、渇水の頻度が増加するなど淡水資源の問題が顕在化することが想定される。

上述のように地球温暖化に伴う降水量の変化や海面水位の上昇等によって直接的または間接的に影響を受ける生態系、生活系、産業系の諸問題に、現在の人類が真摯に対応することは、将来における持続可能な人類社会を構築し、生態・環境の保全と創出を行う上で、現在を生きる我々にとって不可避の義務となりつつある。持続可能な社会の構築を現在の人類全体が掲げる重要な目的のひとつとするならば、地球温暖化と気候変動に伴う地上の全生命への過剰なインパクトの緩和と生態系、生活系、産業系における過不足のない合理的な適応策の立案とその着実な実行が必要不可欠なものではあるものの、その目的の遂行に対しては政治・社会・文化・経済等さまざまな分野からの対策と寄与の必然性が存在する。しかし本土木学会がそれら全ての対策を網羅し、その義務を履行することは学会の本来の目的でもなく能力と守備範囲を超えていると考えられる。上記の諸分野との緊密な連携のもとでの土木学会としての活動は本提言書の提出の後、全土木学会会員と土木技術者が真摯に考慮すべき人類の生存に関わる壮大なテーマである。

このような地球温暖化と気候変動に関する現状の認識にもとづき、本提言は、人類の歴史の始めから現在に至る土木技術者が獲得した土木技術と現在の土木学会会員の日ごろの業務や研究活動から得られた知見を総合化し、土木技術の観点に基づき、地球温暖化と気候変動に起因する諸問題に対して適応策の提言を行うものであり、本報告書は政治・行政のみならず国際社会、メディア、教育および地域社会全般を対象として提言するものである。

2 地球温暖化時代における社会基盤整備と土木技術

地球温暖化と気候変動による影響は、上述のように生態系、淡水資源、食料、沿岸と低平地、産業、健康など広範囲に及び、例えば健康という分野においても今後水と衛生の基盤整備が必要となるように、それぞれの分野においてこの問題は社会基盤整備と密接な関係を有している。このため広く土木技術の活用による社会基盤整備の着実な推進と地球温暖化や気候変動による社会基盤への影響を低減させる努力が必要であり、様々な土木技術の分野において、地球温暖化の適応策への貢献を考えることが重要である。特に降水量、海面水位などの変化を直接的に影響として受ける水と水循環に関する分野では、災害の発生などによって自然・社会に深刻な影響を被る可能性があり、土木技術の活用による適応策の役割が極めて重要である。

このため、ここでは、上述の生態系から健康まですべての項目において根幹をなしている水と水循環に関する分野を代表として、社会基盤整備と土木技術の観点から適応策のあり方と目指すべき社会像を検討することとする。

地球温暖化や気候変動による水の量の多寡および質の変化・変動に起因する人間社会へのインパクトの低減に直接寄与する適応策は、堤防、遊水地、ダム、堰、防波堤、上下水道等の社会基盤の整備に依存しており、それらは全て土木技術の上に立脚している。土木技術は本来、社会情勢の変化に対応しながら人々の生活の安心・安全を確保する社会基盤の整備を行うことがその目的のひとつであり、前述のとおり地球温暖化に対応する適応策として不可欠である。人口が多くかつ経済活動の中心となる沿岸域や低平地における水害、土砂災害、高潮災害等の too much water に起因する災害から人命・資産を守ることは重要な課題である。さらに不安定な水資源に起因する渇水や too little water に起因する安定な生活・生産活動に対する脅威を低減することも重要である。

一方、人口密度の低い地域の多くは農業、畜産業、林業および水産業の生産拠点であり、かつ豊かな生態系を有している。それらは地球温暖化と気候変動に伴う水災害等の発生、耕作・作付け時期の変化、農業水利の不安定取水や水温上昇と水質悪化、植生の変化に伴う流出特性の変化、山腹崩壊の発生等の直接的な影響を受けると考えられている。これらは全て生産活動を低減させ、さらに過疎化の促進を招くように働いている。

これらの諸課題を解決するにあたり都市や農村を含む地域計画、交通計画、治水、利水、農業土木などの分野において今日まで蓄積された高度な土木技術の有効な活用は不可欠であり、さらに新技術の開発や社会制度の充実をはかりつつ土木技術を中核とする地球温暖化の適応策を計画的に進めて行くことが重要となってくる。

3 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会

3-1 水の安全保障

地球温暖化と気候変動に対する適応策に関する基本的哲学として「水の安全保障」の考え方がある。この場合「水の安全保障」の考え方は以下のように定義される。すなわち字義通りの狭義の意味での

(1) 水災害・水需給・水質・環境・生態系の安全保障

と広義の意味での

(2) 人命、資産と平和に関する安全保障

がある。地球温暖化と気候変動に対する適応策に関する基本的哲学としては、上記(1)の安全保障に加え、食糧・食料とエネルギーの安全保障を前提としつつ、地球温暖化と気候変動の時代に適した生活の質の保障と向上を担保するものとしての、文化、教育、情報、農林水産業、工業、経済、衛生、医療等の進展が期待され、このもとで広義の意味としての人命、資産と平和に関する安全保障が考えられよう。すなわち持続可能な社会は以下に示す三つの安全保障の確保のもとに達成され、そのもとに平和で活力のある社会が構築される。

(1) 水の安全保障

(2) 食糧・食料の安全保障

(3) エネルギーの安全保障

3-2 地球温暖化と気候変動に関する既往の提言

現在までに地球温暖化と気候変動に対応した適応策に関して、いくつかの政策提言がなされている。その代表的なものと適応策の表題を列举すると以下ようになる。

- ・ 国土交通省河川局 気候変動に適応した治水対策検討小委員会・・・水災害適応型社会
- ・ 環境省 地球温暖化影響・適応検討委員会 気候変動への賢い適応—地球温暖化影響・適応検討委員会報告・・・賢い適応
- ・ 農林水産省水産庁 地球温暖化に対応した漁場・漁港漁村対策調査事業報告書
- ・ 日本学術会議 地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同 国土・社会と自然災害分科会 地球環境の変化に伴う水災害への適応・・・環境変化や災害に対して適応能力が高い強靱な社会を築く

日本学術会議では環境変化や災害に対して適応能力が高い強靱な社会を築く(Establishment of adaptive capacity, high-resilience society)ことが謳われており、環境省では適応策全般に対して「賢い適応」のもとにさまざまな提言がなされている。国土交通省は、「水災害適応型社会」の名の下に、水災害に特化した適応策を社会資本整備審議会から答申を受けている。このような現状のもとに土木学会では将来の地球温暖化と気候変動の影響の下で影響そのものの緩和を考える緩和策と適応策を構築しつつ、我が国と国際社会のあり方を検討する影響小委員会、緩和策小委員会と適応策小委員会の三つの小委員会が立ち上がっている。本報告書はその中の適応策小委員会からの提言であり、本節はその前提として地球温暖化と気候変動のもとでどのような社会の構築を目指して適応策を立案するかを論じるものである。

3-3 地球温暖化と気候変動に関する不確実性と賢い選択

地球温暖化と気候変動は時間的・空間的にも、またその質的・量的にも多くの不確実性が存在することが指摘されている。一方、温暖化と気候変動の有無に関わらず発生する政治情勢の変化、人口の増大や減少、少子高齢化、エネルギーおよび食糧の供給量の変化、経済活動の変化およびそれらに影響を受ける地域社会の構造変化等の社会変化にも現在の我々の知見では予測の困難な数多くの不確実性が存在する。その不確実性の中で地球温暖化と気候変動に対応していくにはさまざまな政策上あるいは技術上の選択肢が必要となり、かつそれらの適切な選択と組み合わせが必要になってくる。水の安全保障に関して言えば、我が国の土木技術者は *too much water* と *too little water* に関わる水問題・水災害に関して歴史上多くの成果を挙げ、他国に例を見ない安定した国土の形成に寄与しており、その経験から様々な水に関する解決可能な政策手段と技術的オプションを獲得し、その質を高め、社会変化や地球温暖化の進展に応じた多くの選択肢を提示することができる。また、選択肢の選択にあたって、これまでの調査・研究の成果や知見・経験の積み重ねにより、様々な水に関する課題の分析・評価方法を開発しており、気候変化、社会構造や情勢、科学技術、環境・生態系などに関して正しい認識のもと、課題の分析・評価を行って目標に対して推奨すべき政策・技術を賢く選択できる。賢い選択とは、地球温暖化やその影響の特性、抱える社会問題の原因などを踏まえて、これらにおける課題の解決と目指す社会のあり方を選ぶものであり、国や地方、官・学・民それぞれの役割や共通部分において存在する。例として以下の表に示すように、哲学・理念から法制度、政治・行政・社会システム、環境・生態系、技術、投資、人材、教育、国際貢献などにおける具体的な仕組みから基本的な考え方まで様々なことが考えられる。それぞれの事項において、推奨すべきものと反対に回避すべきものの両方の観点があり、将来に向け政策や技術の選択を行う必要性がある。

そして選択した事項の実現に向けては既存の政策や計画に適応策を組み込んでいくこと、すなわち適応の主流化が最も効果的でありかつ現実的であろう。

表. 1 地球温暖化に関する賢い選択

	推奨すべき事項	回避すべき事項
哲学・理念	水の安全保障(水災害・水需給・水質・環境・生態系の安全保障が国と国際間の安全保障の基礎である=持続可能社会)	国民、国のリーダー、行政の無知、無視、誤った理念への傾注
	順応的な対応	対応の硬直化
哲学・理念		優先順位の誤った選択
	適応の主流化	
	水循環の哲学	
法制度	水の安全保障を憲法・行政法レベルでの明文化	
	水利権・漁業権等の法制度改革	権利の硬直化
	地下水の利活用と権利	
	適切な税制	
政治・行政・社会システム		不作為
	政治行政におけるリーダーシップ	政策の遅れ
	事業主体の明確化と複数分野の総合的な対策、行政の連携	縦割り行政
	対策に関する専門部署	
	合意形成手法の確立	利害関係者の対立
	危機管理やBCPの導入	壊滅的なシステム崩壊
	土地利用の見直し	
環境・生態系	保全と創造の理念と実践	
	保全と創造技術の開発	
		環境への過負荷
	クリーンエネルギーの公共事業への活用	
	水循環の哲学	
研究・行政組織	地球温暖化の緩和策と適応策に関する国立の研究 所・センターの設立	
	政府・行政内におけるさまざまな省を統括する部署 の設立	
人材	行政・土木系研究分野における緩和策・適応策専門 家の養成	
	政治・行政・土木系研究分野における緩和策・適応 策に通じた人材養成（多様な視点を持ち地域の状況 に通じた人材）	
	NPOの養成と活用	
	国際的素養を習得した人材	

投資	公共事業の投資効率の向上	
		多重投資
技術		不適切な技術適用
		適切技術の不採用
技術	多機能と機能の高度化	
	適切なモニタリングとフィードバック	技術開発の遅れ
	WMO、統合型水資源管理、統合洪水管理と技術	技術開発の遅れ
	リスク評価手法の確立	技術開発の遅れ
	危機管理に役立つ技術	技術開発の遅れ
教育	国民・住民の理解のための行動	画一的な教育
	学校教育における理学・工学系専門教育者の養成とカリキュラムの形成	
国際貢献	対策を通じた国際貢献	
	水災害分野における貢献	
	水供給分野における貢献	
	衛生分野における貢献	
	WMO、統合型水資源管理、統合洪水管理	

3-4 粘り強い適応

上述のように地球温暖化と気候変動に対する政策と技術には多様な選択肢の賢い選択が必要となるが、その選ばれた選択肢に対しては必要となる要件が存在する。すなわち想定を超える外力や構造物の耐力を超えた外力に対しては、カタストロフィーに導く壊滅的な被害を回避する壊れにくくかつ壊れても迅速な復元が可能な粘り強い機能を必要とする。水災害と水の需給に関わる量的および質的な問題に関しては、可能な限りの耐力を有する防災能力の強化と、耐力を超える場合にはその外力の分散を図ることによる被害の最小化を目指した地域の災害耐力に応じた統合化された社会システムの構築と外力がもたらす被害からの避難や退避に基づく減災能力を必要とする。その中には被災想定箇所や地域からの住居や生産・産業拠点の退避も含まれる。

本節においては地球温暖化と気候変動のもとでの持続可能な社会を構築するにあたり必要となる項目を列挙している。すなわち既往の提言を踏まえつつ、

- (1) 基本的な哲学としての「水の安全保障」
- (2) 不確実性の中での賢い選択
- (3) 粘り強い適応

を論じてきた。

これらの哲学を基礎としつつ土木技術は(2)において選択肢の数と内容及び選択にあたっての分析・評価を充実させ、また(3)においては粘り強い適応の実現の可能性を高める上で不可欠である。

土木学会では、地球温暖化対策に取り組むために、地球温暖化特別委員会を設立し、この委員会の下に以下に示す三つの委員会を設立している。

- ・影響小委員会
- ・緩和策小委員会
- ・適応策小委員会

適応策小委員会においては土木学会内の水に関連した常置の委員会である、水工学委員会、海岸工学委員会、環境工学委員会の三委員会に具体的に適応策の検討を依頼しており、本提言はその検討の結果をまとめたものであり、以下の節で述べるとともに、検討された影響と適応策については末尾の一覧表にまとめている。

4 適応策に関する水工学からの寄与

4-1 治水の整備水準が低い中での気候変化の襲来

主要な大河川については200年に1度の洪水にも対応できるように整備基本方針および整備計画が策定されつつあるものの、例えば利根川の場合、30年に1度の洪水に対応する整備でさえ6割程度しか達成されていない。一方で、河川事業予算は1996年度のピーク時に比べ半分近くに減っている。このように、現在の治水目標に対してさえ整備には長期間を要すると見込まれる上に、温暖化が進んだ場合、今世紀末には現行での200年に1度の規模の洪水が100年に1度程度と頻発化し、同時に巨大化することが予測されている。このためダムや堤防の整備は着実に進める必要がある一方で、それらだけに頼るのは非現実的であり、水が溢れることも念頭にいた現実的な治水策を温暖化適応策の一部として導入していく必要があるだろう。

具体的には、

- ・ 犠牲者ゼロを目指す
- ・ 中枢機能地への重点対応、国土構造の再編成
- ・ 住まい方の工夫、土地利用（規制、と誘導）と一体となった河川計画
- ・ 補償や水害保険などの整備
- ・ 観測の高度化、継続による順応的対応と予警報の高度化
- ・ 極端な大規模災害（地震などとの複合災害を含む）の想定と、それへの備え
- ・ 従来の三本柱（河川改修、流域対応、危機管理）に加えて、四本目の柱として氾濫・浸水後の復旧・復興対策や地域のBCP（Business Continuity Plan）の立案

などが挙げられる。氾濫・浸水が生じなければ何よりであるが、氾濫・浸水が全く生じないことを前提とするのは、もはや無理であろう。様々な不確実性のもとで、溢れた場合への対応を十分に考慮した社会を認めるべきではないだろうか。また、各企業などはBCPへの取り組みを始めたが、水害に対する地域社会全体としてのBCPは無い。その作成は急務である。

これらは地球温暖化の脅威がなくとも、治水目標に対して整備に長期間を要する現状を考えた場合、いずれにせよ我が国の治水へ取り込むべき施策である。地球温暖化への適応が、その早期導入への契機となるものと考えられる。極端な大規模災害は、100年後でなく10数年後に日本を襲うかもしれない。温暖化による水循環の変化がはっきりと検出されてから行動するのでは遅い。

4-2 既存の枠組みに囚われない既存ストックの活用

上記のように、現行の治水利水目標さえ十分に満たされていないのが現実ではあるが、一方で戦前、戦後を通して、特に高度成長期以来、治水施設を整備してきたことも事実である。そのため膨大な治水施設がストックされてきた。しかしながら、高度成長期に整備した膨大なストックが寿命を迎えつつあることも事実である。人口減少、高齢化は待ったなしであり、国土の景観に関しての意識も高まってきた。既存ストックの寿命分布の平滑化は必須である。一方で、財政には余裕はない。このような現代の日本の治水利水事業が置かれた立場を考慮すると、

- ・ 施設の徹底活用と長寿命化、寿命分布の平滑化、改良による機能向上

- ・ 高度化した情報収集・解析技術を生かしたオペレーションの向上
- ・ 異なったセクター・自治体間での施設の共同整備と共同活用、日頃からの情報交換、人材交流
- ・ 旧来型事業遂行からコンソーシアム的な事業の推進
- ・ 水利権や水価格についての再考による水資源の有効利用

などによって、既存のストックや様々な有形無形の資産を最大限に生かし、最小限のコストから最大限の効用を産み出すことが求められる。

4-3 画期的な水災害リスク評価手法の開発と公開

これまで主たる河川流域を対象としたハザードマップこそ存在するものの、それぞれの流域に対して、流域の安全度（脆弱性）を定量的に明らかにしたものは無い。新たに作られるべきものは、流域内の各々の地域の安全度（脆弱性）を示すものであると同時に、異なった流域間を比較可能なものである必要がある。この新たな安全度（脆弱度）評価を基礎とした上で、様々な適応策を講じたときの安全度（脆弱度）の変化を評価できることが必要である。結果として、適切な適応策の選択や優先順位付けを行うことが可能となる。また例えば、東海地方におけるネーデルランド構想のように、想定しうる最大の外力についても考えておくべきである。そのような最大外力がすぐさま襲来するわけではないが、問題点の抽出・洗い出しが可能となる。

このような画期的な水災害リスク評価手法の開発には、

- ・ 定量的な水害影響評価（リスク評価）の高度化
- ・ 標準的評価手法の公開
- ・ それに基づく適応策の順位付けとロードマップの策定、適応限界（critical level）の試算などが含まれる。

災害リスクを明示することによって、水災害関係者・ステークホルダーの合意形成が図りやすくなり、街づくりや土地利用などの河川管理者以外による適応策を促進・誘導することができる。その際、人々が「実感」できるような明示手法もあわせて開発する必要がある。

4-4 水資源政策の転換

近年、少雨化傾向にあり、年降水量の変動幅も大きくなっていることから、これまで確保してきた水資源の安定供給量は減少しており、利水安全度は低下している。また、安全でおいしい水や豊かな環境等に対する国民の意識の高まりもあり、水循環、水利用、施設管理、危機管理等の観点から様々な課題が顕在化している。こうした課題のある中で、季別の降水量や年間の降雨パターンの変化、降水量の変動幅の拡大など地球温暖化による影響が予測され、規模の大きい渇水の発生が懸念される。また、積雪量や融雪時期の変化の予測から農業などの水利用に影響が生じる恐れもある。さらには水質や生態系への影響、海面上昇に伴う地下水の塩水化など広く影響が懸念され、適応策を講じる必要がある。

水資源の様々な課題は、水循環系を介して密接に関連しており、分野横断的な対応が重要であり、適応策を含めた課題の解決には以下のことが必要である。

- ・ 1つの水系に依存する流域（集水域及び関連する利水域、排水域、氾濫域）を単位として、水に関わる関係主体が連携・調整すること

- ・ 水量と水質、表流水と地下水、平常時と緊急時を総合的・一体的に考え、対策の適切な組み合わせ、適切な順序での施策を行うこと

水資源政策においては、従前の水資源開発による量的な充足を優先させる「開発」を主とする方策から、気候変動を見据えた水源開発も含め、多くの課題の解決を図る総合的な「マネジメント」へと施策を転換することが国土審議会水資源開発分科会調査企画部会から提案された。

水を持続的に活用できる社会の実現と健全な水循環系の構築を理念として、多様な主体の連携・調整のもと、豊かな水環境に配慮しつつ、最適な水資源配分等を図っていく総合的な水資源の管理を目指している。

今後、具体的な内容や仕組みについて実現性や既存の制度との整合性などの観点から検討を進める必要があろう。

4-5 諸外国の適応策への支援

地球温暖化によって諸外国が被る影響が食料輸入などを通じて国内社会に大きな影響を与える点において、日本は世界でも特殊な国である。そのため、諸外国における温暖化適応策に貢献することは自国の安全、安定のためにも重要な課題といえる。先進国としての世界への応分の貢献という側面も忘れてはならない。

食料の安全保障という意味では、世界の穀倉地域や人口密集地帯における農業生産に対する適応策を支援する必要があるかもしれない。一方で、人口密集地域であるアジアのデルタ地域での適応策の推進においては、日本の技術と経験が大いに役立つと考えられる。例えば、レーダー情報を基盤とした瞬時の広域降水量分布の把握や、IT 技術によるその伝達・公開、更には洪水・土砂災害の予測と迅速な対応などは、急峻な地形に豪雨の降り注ぐアジアモンスーン変動帯地域において共通に必要なとされる技術であり、日本が世界の最先端を切り拓いているものと考えられる。これらの技術を諸外国へと広めることは、短期的にも長期的にも国益に適うものであろう。

4-6 水問題に関する教育の革新

必ずしも地球温暖化に伴うものに限ったわけではないが、水問題に関する知識を普及していく取り組みが重要である。市民に対する直接的な教育・啓蒙のみならず、教育者に対する教育とそれを通じた防災知識の青少年への普及も非常に重要な課題である。教育者が適切な知識を持っていることで子供たちを直接危険から守ることが可能になり、またその知識を子供たちに伝えることで将来の潜在的なリスクを軽減することが可能となる。工学系・技術系大学卒業生の小中高先生への採用・配属も促進されるべきであり、地球温暖化、生物多様性等の地球環境問題に関する新しい重要事項関連の科目の必修化も視野に入れるべきではないか。

また、これまでの考え方や手法のみでは今後の気候変化に適切に対応することは難しいと考えられる。これから求められるのは、これまで経験したことのない問題に対して柔軟かつ適切に対応していくことができる人材である。その意味で、行政に携わるものや技術者の能力を向上させる取り組みを進めていく必要がある。たとえば、地域の NPO との協働を通じた、土木学会の旧来の枠にとらわれない人材育成などが求められる。もちろん、新技術、新素材の開発も絶え間なく継続していく必要がある。

4-7 地球温暖化適応策実施のための法的・経済的・社会的システムの整備

地球温暖化の緩和策では、二酸化炭素の排出規制のように、緩和策を実施するための枠組みが考えられているが、適応策においても同様に、適応策を実際に実施する（させる）ことを担保する枠組みを考える必要があると考えられる。現在の河川整備基本方針や河川整備計画の議論には将来の気候変化が織り込まれていないが、長期的にはこうしたことも考慮しつつ議論していくことが望ましいと考えられる。河川整備基本方針や河川整備計画立案における時間的、空間的、総合的枠組み作りが必要であろう。既存の行政法や行政の構造における縦割り構造を乗り越えた新たな計画案の実現、作成も必要である。既存の枠を超えるためには政治が主たる役割を果たすべきともいえる。そのために、例えば、省庁横断型の地球温暖化適応策本部、事務局の創出などが考えられる。

4-8 余裕ある社会へ向けて生活・制度の見直し

水災害に限らず、災害が発生したときは非常時なのだから、その非常な状態が終わるまで普通の日常生活をあきらめたほうが身のためになることが多い。すなわち、少し余裕を持って生活することによって、人命や資産を守ることができる。たとえば、台風が来たら、それが過ぎるまで仕事は休む、といったことである。上記は時間的な余裕であるが、空間的にも同様のことが言える。河川沿いの水災害リスクの高いところは、公園や空き地のように、余裕を持って空けておくことで、水害発生時の被害を軽減することができる。このように、全体として余裕ある社会を構築することで、生活基盤を災害に対して頑健なものとすることができる。

5 適応策に関する海岸工学からの寄与

5-1 適応策の基本的な考え方

適応策は、防護、順応、撤退に大別される。防護は、地球温暖化の影響を構造物等で防ぐことであり、堤防や護岸の天端を嵩上げして高潮災害を防ぐというのがこれに相当する。3 大湾を始めとして日本では人口や資産が集中する地域が海岸線付近に多い。このような地域は、構造物によって高潮などの災害に対して高水準の防護を行う必要がある。このような防護は、年齢や体力などにかかわらずすべての人とすべての資産が守られるという長所を有する。それだけの集積がなされている地域には積極的に防護策を推進すべきである。ただし、海岸の環境や利用面を考慮すると、護岸や堤防の形状などを工夫することによって、単なる天端の嵩上げにならないような技術開発の余地がある。

順応とは、浸水などが起こっても被害にならないように生活様式や利用方式を工夫することである。アメリカのフロリダ州のように高床式の住居にして、予測される高潮の水位より上に床を作るのがこれに相当する。また、ハザードマップを作成して、避難態勢を整えるのもこれに含まれる。順応は、想定を越える高潮のような外力に対しても対応しやすいという長所をもっているが、日常生活を含めて、人間活動はある程度の制約を受けることになる。

住民がいない地域や、人口がきわめて希薄な地域においては、防護することなしに撤退し、自然に任せて高潮や海岸侵食を受け入れることも可能性の一つとなる。人口減少の中で予算が限られている状況では、限られた地域についてはこのような適応策が有力となろう。

防護、順応、撤退という適応策は、単独で用いるだけではなく、組み合わせて進めることも考えられる。特に、高潮などに対する現状の目標レベルに対しても海岸の防護が完成せず、さらに台風の強度の増加を含む将来の不確実な外力レベルに対してまですべての海岸の防護水準を上げることは不可能であろう。こういった状況では、ある程度のレベルまでは構造物などによって完全に防護するが、それを越えた外力に対しては、順応策を取り入れて被害を最小にするという考え方が必要である。地球温暖化に対する海岸での適応策をきっかけに、海岸保全一般についても、組み合わせによる二重の防災・減災態勢を目指すべきであろう。

5-2 適応策オプション

沿岸域では、海水面の上昇および波浪の増大、台風・高潮の来襲頻度、規模の変化によって受ける影響が最も大きい。それらにより、海岸・港湾施設の機能低下が生じ、後背地に浸水・氾濫など大きな被害をもたらすと考えられる。また、沿岸域の浸水・氾濫リスクには、河川流域の降雨量・パターンの変化も大きく影響する。海水温の上昇や気温の上昇も沿岸域環境などの影響を与えと考えられる。

これらの影響に対する適応策オプションとしては、上記の防護、順応、撤退に対応して以下のように挙げられる。

防護：

- ・ 海岸・港湾施設の整備，改良
- ・ 海岸・港湾施設の設計基準の変更

- ・ 排水システムの強化
- ・ 河川・海岸の総合的土砂管理（サンドバイパス，養浜）

順応：

- ・ 建築様式の変更（建築物の嵩上げ，セットバック）
- ・ 総合的沿岸域管理
- ・ 迅速な避難支援
- ・ 地域防災力強化（情報提供，共有）
- ・ 災害復旧基金，補助金の創設，浸水保険制度
- ・ モニタリング（長期，リアルタイム）

撤退：

- ・ 土地利用の変更・規制（緩衝帯の設置，遊水池などの設置，住居などの移転）

5-3 適応策のタイムスケジュール

地球温暖化に対する適応策の実施に際しては、手遅れにならないように計画的にすることと、他方で、事前の対応が過剰になって無駄な投資にならないようにすることが重要である。図は、防護を念頭に置いた場合の、地球温暖化への適応策の実施のタイムスケジュールを示すものである。

堤防や護岸の天端高を念頭に置くと、左端は現有の構造物を建設した時点での必要天端高を示しており、実際には余裕高を加えて建設されている。その後の海面上昇によって、現在の必要天端高は若干上昇している。また、現状では不確定であるが、台風の強度の増加等も起こりつつある可能性がある。それらによって必要天端高が上昇する様子を右上がりの曲線が表している。しかし、それらは今のところ余裕高に吸収される程度であると考えられるので、構造物の機能は所定の水準を保っている。しかし、そのままの状態を続ければ、やがて機能水準が不十分となる。そこで、現在の構造物の更新や災害復旧の際に、まずはそれまでに実際に観測された海面上昇分を取り入れて、更新時期での最新の海水面高を使って設計を行うようにする。これで起こってしまった海面上昇への対応がなされたことになる。さらに後の更新時には温暖化現象がより明確になるであろうから、海面上昇の実績だけでなく耐用期間中の上昇予測値も加えたり、さらには台風の強度の増加の現象が明らかであればその分も加えたりして、設計を行う。

このような手順により、地球温暖化に対する適応が、手遅れになることもなく、また、無駄な投資に終わることもなく、漸進的に行われていくことになる。地球温暖化が現実になった現在でも、その定量的な将来予測については不確実性が残っているから、適応策の実施の中でその不確実性を吸収するような工夫が必要である。

ただし、上述の適応戦略の実施に際しては、技術的に解決しておかなければならない問題がある。例えば、10年オーダーの海水面の上下変動などが含まれる潮位記録から、長期的な海面上昇量をどのように抽出するかということもあるし、設計条件を越えて余裕高にかかるような外力の超過が起こった場合に、構造物の耐力が保証されるかなどもある。そのような技術的な問題を解決した指針を早急に策定する必要がある。

日本では、1990年代に地球温暖化の影響と対応策の検討が、学問的課題として、さらに行政

的課題として盛んに行われた。しかし、対応策が実施されるには不確実性の壁が高かったように思われる。地球温暖化が確実なものと断じられた今、それに対する対応の長期的な見通しを是非持たなければならない。

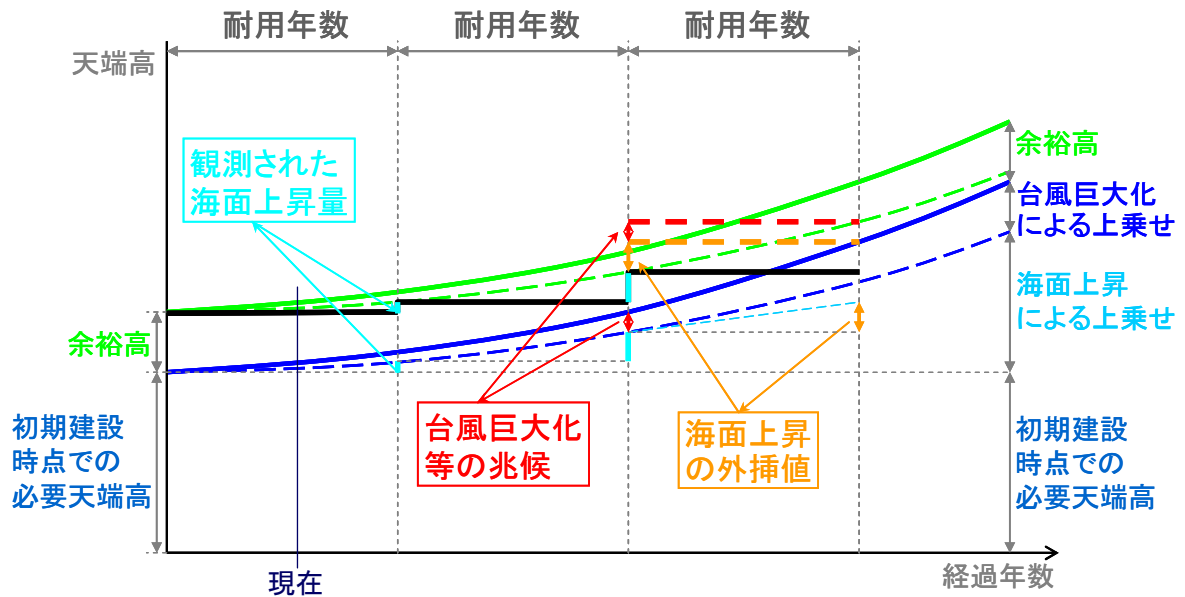


図. 1 地球温暖化に対する漸近的適応策（磯部，2008）

6 適応策に関する環境工学からの寄与

6-1 概要

環境工学分野における地球温暖化への適応策は多岐にわたるが、そのほとんどは次のものにまとめることができる：(1) 再利用の促進、(2) 都市発汗、(3) 地下水涵養・利用、(4) 農業用水・工業用水を含めた流域内水利用システムの再構築、(5) 流域間の水の相互融通システムの構築、(6) 栄養塩循環、(7) 病原微生物・熱帯伝染病、(8) 省エネルギー型技術の導入。

「(1)再利用の促進」は、主として喝水対策となる施策である。家庭レベルでの再利用から下水処理場での高度な水の再生処理を行うものなど、さまざまなレベルでの再利用が含まれる。再利用の促進の範疇には、下水処理水を農業利用することもある。標高の高い地域に都市が、標高の低い地域に農地が立地している場合、都市から発生した下水を処理し、さらにその処理水を農業利用することができるであろう。こうした施策は下水に含まれる栄養塩類の有効利用にもなる。また、低地に農地あるいは緑地が広がるような都市構造は、治水安全性の面から都市の低地利用が限定されるようになると、我が国において広く見られるようになっていくと予想できる。

「(2)都市発汗」は、都市の放熱作用を高めることで、都市域の温暖化・温室化を軽減しようというものである。植樹を施すこと、打ち水をすること、あるいは建物の外壁に水を流して放熱すること、水のスミストをまくことなど、水を用いたさまざまな方法で都市の熱放散を促進することが試験的に実施されている。こうした取組みの効果を定量的に評価する必要も出てくるであろう。また、こうした施策を可能ならしめるためにも、「(1)再利用の促進」が重要となる。

「(3)地下水涵養・利用」は、地下水の涵養を促進するとともに、その有効活用をはかろうというものである。地下水を一定の社会的ルールのもとで有効活用することで、表流水への需要を削減することができる。一方、地下水涵養は、雨水の流出抑制とあわせて実施することができる場合もあるであろうし、海岸付近では海水の地下水への侵入を抑制することができると期待される。技術の開発や実施だけでなく、社会的なルールづくりや地下水の動きに関する精緻な予測を行なう技術も必要である。

「(4) 農業用水・工業用水を含めた流域内水利用システムの再構築」および「(5) 流域間の水の相互融通システムの構築」では、流域内での水利用の最適化を、水の再利用システムや地下水利用、あるいは貯水池・ダムの水運用、また、都市用水・農業用水・工業用水利用を含め、再構築しようというものである。さらに、喝水対策を考えると、流域間での水の融通を必要に応じて促進していくことも有効である。制度づくり、あるいは水利権の段階的な見直しといった社会制度の側面その他、流域内あるいは流域間での水利用について適切な施策を策定し実施するような人材を育成することが必要である。

「(6) 栄養塩循環」は、温暖化との直接的なつながりは薄く見えるかもしれないが、我が国の食料自給能力を高めるために考慮しなければならない必要不可欠な項目である。下水、有機性廃棄物、あるいはし尿に含まれる栄養塩類を回収し農業利用していくための技術開発が必要である。また、そうした技術は農家の理解なくしては実施することができないので、農家あるいは農作物の消費者まで巻き込んで考えていくべき問題であるかもしれない。

「(7) 病原微生物・熱帯伝染病」で特に指摘したのは蚊の発生への対策である。水の循環型

利用を行うにあたり、あるいは、湿地処理のような低コストの水処理技術を導入するにあたり、十分に考慮すべきである。

「(8) 省エネルギー型技術の導入」は、緩和策との切り分けが難しいが、いくつか考えられる事例を表に列挙した。例えば、下水処理についてはエネルギー消費量のより少ない技術、あるいは、バイオマス回収をより促進する技術などをあげた。

以上の、適応策は、概して、水を中心とする社会の物質代謝システムに柔軟な変革を迫るものである。その一方、上下水道システムは地中に埋設されたインフラであり、柔軟性に乏しい性格を持つ。また、我が国では 1900 年代後半都市化が急速に進展したために、全国的に画一的な上下水道システムが採用されている傾向がある。地域の特性にあった水代謝システムに変えていく必要があるのはいうまでもないが、そのためには各地域の水に関する技術者の知力・技術力を高めていく必要がある。

6-2 各側面での適応策

a) 水供給

気温の上昇に伴い、湖沼において藍藻類が異常増殖する期間が長期化する可能性があり、これらの藍藻類からの放出により、水道水の異臭味（カビ臭）問題が大きくなると考えられる。これに対しては、下廃水処理の徹底により栄養塩の湖沼への流入を抑え、藍藻類の増殖を抑止することが第一に挙げられる。また、カビ臭除去に効果が高い活性炭吸着処理などを既存浄水処理プロセスに付加すると同時に、これらの適切な運転（添加率、接触時間など）を行う必要がある。また、気温の上昇が病原性微生物の河川水や湖沼水中での生存に有利に働き、水道原水中にこれまでより高濃度で混入する可能性が考えられる。これに対しては、浄水処理工程での塩素消毒をこれまで以上に注意を払って運転する必要性が生じる。一方で、気温の上昇は、これまでの浄水処理では低温時に問題となっていたアンモニアの生物酸化処理や凝集処理の効率低下に対しては、好都合に働くものとも期待できる。

渇水の増加により、水源水量が低下し、水道原水への下水混入率がこれまで以上に増加することが考えられる。これに伴い、下水中に含まれる医薬品や病原性微生物（原虫、ウイルスなど）により、原水が汚染される危険性が増加するものと考えられる。水源水量の低下に対しては、家庭内・ビル内循環利用の推進や、地下水利用ルール確立とそれにのっとった地下水利用の促進などが必要となる。さらには、地下水の涵養およびその水質保全の促進も必要であろう。このためにも、水源の分散化、ネットワーク化を考慮した取水計画が必要となる。また、医薬品や病原性微生物対策には、浄水処理工程にて活性炭吸着や膜処理などの導入を検討する必要性が生じるであろう。

衛生害虫の北上に対しては、直結給水を奨励することにより貯水槽を減らし、貯水槽にて蚊などの害虫が繁殖する可能性をできる限り低減する必要性が生じる。

省エネルギーへの取り組みとしては、現在より上流に取水場所を移動することにより、導水や配水に要するエネルギーを重力により賄うことが期待できる。また、マイクロ水力発電などにより積極的に浄水施設内で発電を試みると同時に、様々な省エネ技術を導入する必要がある。

b) 下水道

地球温暖化による気候変動は、降雨パターンを変化させ、地域的に豪雨洪水被害を生じることが懸念されている。下水道は都市における雨水の適切な排除という重要な使命を有しており、雨水の排除能力の向上および雨水の貯留や地下浸透を促進するための技術が必要となる。また、合流式下水道では、豪雨時に雨水と混ざった未処理下水の一部が公共用水域へ排出される、いわゆる越流水問題への対策を強化する必要がある。

降雨パターンの変化により、渇水頻度が増加することも考えられる。下水処理水は有効な代替水源の一つであり、処理水の再利用を更に進めるために、高度処理技術の更なる開発と導入、再利用水の需要や要求される水質に関する情報の蓄積と整理、基準や諸制度の充実を進めることが考えられる。また、集中型の下水処理では再利用水を供給できる範囲が処理場周辺に限られるため、処理場の分散配置も検討に値する。

地球温暖化により水温が上昇すると、閉鎖性水域に於ける藻類の異常増殖の促進と酸素溶解量の減少が共に生じるため、富栄養化による深刻な水質汚濁の進行が懸念される。下水は、富栄養化物質の主要排出源の一つであるため、適切な栄養塩対策を行なう必要がある。高度処理技術の開発・導入を推進する、あるいは、栄養塩を含む処理水を緑農地に供給し栄養塩を植物に吸収除去させること、あるいは栄養塩を含む処理水は閉鎖性水域をバイパスして開放性の高い水域に放流する、といった対策が考えられる。なお、栄養塩を除去するにとどまらず回収する技術を導入することが望ましい。

また、水温の上昇は下水処理の機能そのものに影響を及ぼしうる。すなわち、酸素の溶解効率が減少するため、好気性処理に於いては溶存酸素濃度を維持するためにエネルギー消費が増大すると予想される。曝気設備を中心とした省エネルギー型の装置の開発が必要であろう。また、嫌気性処理では加温の必要性が減少し、低強度の有機性排水についても処理が可能になることが期待される。低強度の有機性排水に適用可能な嫌気性処理方法の開発やメタン回収・利用設備の小型化が待たれるところである。

地球温暖化に伴う海水面の上昇は、沿岸地域における雨水排除を困難にし、また下水管への塩水侵入と処理への悪影響が懸念される。よりいっそうの雨水対策を講じるとともに、塩分の下水処理や再利用への影響を考慮する必要がある。

さらに、地球温暖化に伴って衛生害虫が北上することが指摘されている。下水関係の諸施設においては、下水管、処理施設および雨水貯留浸透施設などにおいて衛生害虫対策を強化する必要があるかもしれない。また、低コスト技術である湿地処理を導入する場合には、害虫を繁殖させない適切な管理方法を開発する必要がある。

c) 廃棄物管理

病虫害の発生や豪雨・洪水に伴う有害物質の漏出など、地球温暖化は、廃棄物の適切な処理・処分に悪影響を与えることが懸念される。廃棄物関連の適応策には、これらの問題への対策に加え、食料自給率向上を目指した有機性廃棄物の堆肥化など、廃棄物の資源化をも含めた総合的な取り組みが期待される。

地球温暖化に伴って降雨パターンが変化し、渇水が生じるような場合には、水の安定供給を図るため再利用水の需要が高まると考えられる。また、乾燥による粉塵被害の低減のために散

水需要の増大が予想されるなど、浸出水再利用の需要は増大すると予想される。そこで、浸出水再利用を促進するための技術や制度を開発・導入する必要がある。

降雨パターンの変化によって、豪雨による洪水被害が生じるような場合には、埋め立て処分場も同様の被害に遭うことが懸念される。処分場の新設時における立地選定において、豪雨の影響をこれまでよりいっそう慎重に評価する必要がある。また、水害の増加に伴い災害廃棄物が増加することも予想される。中間処理や処分の方法について、技術開発・ノウハウの蓄積を行なうとともに、災害時の対応に関する制度を充実させていく必要がある。

また、気候変動により、降雨・積雪が減少すると考えられる。ただし、この場合、冬期ゴミ収集に関する負担の減少など、現状に比べて良い方向の変化になると期待される。また、気候変動は衛生害虫の北上を引き起こすため、その対策も必要である。

地球温暖化に伴って海水面の上昇が生じるような場合には、海面埋め立て処分場において浸水被害が生じることが懸念され、堤防のかさ上げや雨水貯留容量やポンプ容量の増加による雨水排除能力の強化が必要となる場合もある。

一方、地球温暖化による気候変動は、世界的な食料需給バランスを崩壊させる懸念がある。食料自給率を改善し、我が国への影響を回避するためには、特に有機系廃棄物の農業生産利用を進めて行く必要がある。有機系廃棄物の堆肥化速度は、気温と共に上昇することが期待される一方、堆肥化施設までの収集・運搬・一時貯留の工程に於いて、腐敗の進行による臭気や衛生害虫の発生などの問題を生じる恐れがある。従って、有機系廃棄物の資源化を積極的に普及・促進するためには、以下の適応策が必要である。収集、運搬、一時貯留の各工程において腐敗を抑制し臭気や衛生害虫を制御する技術の開発、また堆肥化行程に置いても衛生害虫の発生を抑制する技術を開発する必要がある。

一方、有機性固形廃棄物を輸送の手間を要して回収し資源化を目指すよりも、下水管を用いて、人や周囲の環境に直接触れることなく運搬し、安全で適切な処理を行うことも適応策の一つとして重要な検討課題である。すなわち、ディスポーザーを用いた安全かつ省エネルギー的な廃棄物収集・運搬技術の開発、および、ディスポーザーを導入した流入下水からの資源回収技術の開発が考えられる。

d) 水環境

温暖化は気温だけでなく水温の上昇をも引き起こすと考えられる。水温の変化だけでも水辺の生物種を変化させる要因となりうる。さらに水温の上昇は植物性プランクトンの増殖を促し、富栄養化の被害を増大させると予想される。また、飽和溶存酸素濃度が低下しその一方水中微生物の呼吸活性が増大するので、貧酸素化を招きやすくなる。適応策として、水生植物を植栽するにあたり将来の水温変動の影響を考慮すること、各種栄養塩対策を実施すること（ヘドロの浚渫、下水の高度処理、水生植物を利用した栄養塩除去など）が考えられる。富栄養化対策はまた貧酸素化への対策ともなる。

北日本、日本海側の水系においては大量の雪解け水が春に供給される。降雪・積雪の減少は、雪解け水の減少を招き、それにともない生態系や農業（特に稲作）が大きな影響を受ける可能性がある。融雪水はまた地下水の涵養効果が高い。融雪水が減少するということは、地下水の涵養も減るということである。融雪水にかわる水の貯留方法・地下水の涵養方法を検討する必

要がある。一方、積雪が減少すれば融雪のための地下水くみ上げ量が減少し、結果として地下水位が上昇することも考えられる。

渇水による河川や湖沼の水量低下に対しては、下水処理水の放流や地下水涵養による地下水からの河川水供給を増加させることで、多少の影響緩和をできるかもしれない。水源林を確保することは、地下水の涵養に有効である。一方、河川は洪水の影響をより頻繁に受けることになる予想される。河川敷の利用にあたっては安全基準の見直しや利用形態の見直しが必要となるであろう。また、渇水や洪水が水生生物に与える影響を最小限にとどめるための装置を導入することも場合によっては有効であろう。

e) 都市生活

気温の上昇により微生物活動が活発となり、家庭内での生ゴミからの臭気発生が問題となることが考えられる。これに対しては、生ゴミの収集頻度を増加することにより家庭内での滞留時間を短くすることでの対応が考えられる。しかし、収集増に伴う二酸化炭素排出量の増加が危惧されるため、検討が必要である。一部の地域ではディスポーザーの導入による対処も考えられる。

また、気温の上昇は、夏期の冷房使用を増加させ、日中の野外活動を過酷化する。これに対しては、下水処理水や地下水による打ち水の実施やせせらぎの創出などの都市発汗システムの改善による対応が考えられる。さらには都市域の緑化を進め、健全な放熱の促進に力を入れることも大きく寄与するものと考えられる。一方で、冬季の暖房使用は減少の方向に進むものと期待できる。さらには、気温の上昇により、街路樹や雑草などのバイオマス系廃棄物が増加すると予想される。これらの廃棄物をバイオマス資源として利用する技術の開発とその実施による対応が期待される。

積雪の減少は、それへの対策の負担減少により、都市生活にはプラスに働くものと考えられる。

降雨パターンの変化に伴い、渇水の危険度増大することが考えられる。これに対しては、下水処理水の再利用など、カスケード的水利用の促進による適応が考えられる。そのためにも、処理水を再利用するための処理場・処理装置の分散配置を進める必要がある。

降雨パターンの変化は、豪雨や洪水の危険度をも増大すると考えられる。洪水時には、浄化槽から未処理下水が市街に越流し、その後に悪臭や害虫による被害が出るものと考えられる。これに対しては、雨水貯留施設・浸透施設の設置などによる越流の防止策や、低地利用の規制による対応策が考えられる。

海水面の上昇に伴い、ゼロメートル地帯が増加し、それによる地価の低下が予想される。堤防のかさ上げや内水排除能力を強化することによりゼロメートル地帯の安全性を確保すると同時に、住宅地から産業利用（工業や物流）へと土地利用を変更することによる対処が考えられる。

衛生害虫の北上の影響として、蚊によるデング熱やマラリアなどの感染症が広がる可能性が指摘されている。これに対しては、魚のいない水たまりを駆逐するなどの方策が考えられる。

f) 農村生活

農村の人々の生活に温暖化が与える影響のうち最も大きなものは、気候変動（気温上昇、降雨パターンの変化、積雪の減少）によって好適な栽培作物種が変化してしまうことであろう。しかしその他にも、影響としてはそれほど大きくはないかもしれないが、考慮されるべき影響がいくつか考えられる。

農地周辺に防風や日よけのための樹木を植えることは、気温上昇や大風の対策として有効であろう。有機系の廃棄物を堆肥化させるにあたって、気温の上昇は堆肥化速度を高めるであろう。富栄養化対策のために下水等から除去された栄養塩は、積極的に緑農地に還元されるべきであり、それを可能ならしめる技術の開発が必要である。

農業にとって渇水は大きな脅威となるが、地域によってはそれを緩和するために下水処理水を導入することも考えられる。農業用水として地下水を利用する場合は、地下水の涵養が有効な対策となる場合もあるかもしれない。その一方洪水に対しては、農地を洪水時の遊水地的に使う、あるいは逆に平時に遊水地を農業利用するようなことが考えられる。そのような柔軟な土地利用を行うための合理的な制度を作っていくことも検討に値する。

人口密度が小さく下水道が普及していない地域の洪水被害において、浄化槽や汲取槽があふれることによる衛生問題が発生することがある。これら施設を洪水時においても内容物があふれないような構造にすることも必要である。

海水位の上昇によって、海岸付近の農業活動に塩水が悪影響を及ぼすケースが増えることが考えられる。地下水への海水の浸入や、河川での塩水楔の思わぬ上流への遡上が、農業用水への塩分の混入を招きうる。地下水涵養や農業用水の取水位置の変更といった対策が考えられる。

衛生害虫対策は農村の方が都市部よりも困難であると予想される。排水の向上、水たまりの排除、滞水の防止といった対策の他、建物内の通風の向上、蚊帳・防虫ネットの利用、ヤブの伐採による蚊の隠れ家の消去、殺虫剤の散布といった、土木以外の技術を組み合わせての対策が必要であろう。

7 水の安全保障に関する適応策の推進に向けての提言

地球温暖化に伴う気候変動による影響は、これまで述べてきたように水災害、水需給、水質、環境・生態系という水の安全保障に大きく関わっており、食糧・食料、エネルギーと併せて国家の持続的な存続に関わる。このため、国家の安全保障として国がリーダーシップをとってこの問題に対応すべきである。国が国家プロジェクトとして地球温暖化の下での緩和策のみならず適応策を推進し、将来の安全で安心な国土の姿を早期に示す必要がある。また、このために必要な法制度や技術体系などの仕組み、費用、組織や人材の確保など具体的な戦略を併せて立案する必要がある。特に政府において専門の担当部署を設置するなど強力な推進体制の構築が望まれる。

この際に適応を考える上で「賢い選択と粘り強い適応」は中核を成すコンセプトであり、これを支える土木技術は不可欠となり、実現において多大なる貢献を果たすであろう。地球温暖化への適応に向けて土木技術を結集させる必要がある。また、地球温暖化への適応は、長期的かつ順応的な対応となることが多く、政治や行政において政策や戦略の継続性が重要である。適応策の具体的な検討、実施にあたっては、国と地方が適切な役割分担のもとに行うことになるため、地方においても地球温暖化に伴う気候変動及びその影響について、十分な認識が必要であり、地域に根ざした適応策の立案、実施が望まれる。このため、地方において積極的に取り組む姿勢が必要であり、全国の土木関係者は、地域の問題として認識し、地域において積極的な貢献を果たすことが重要である。

適応策は、社会的に混乱や誤解もなく円滑に、効果的、効率的に行われることが重要であり、治水など社会資本整備計画の長期的な特性と整合を図ることが肝要である。このため、革新的に行うよりも既定の政策や技術に徐々に組み込んでいく、適応の主流化を行う。ところが、適応の主流化を行うと、どこからが地球温暖化の対応なのかわかりづらいため、地球温暖化の重要性に鑑み重点的な投資をなすべきところが、なされない懸念がある。水の安全保障、国家の安全保障として重点的な投資は必要であり、地球温暖化の適応策の費用を明確に見込むとともに、通常の対応に埋もれないようにすべきである。

適応策の実現段階において、構造物の耐用年数による作り変えは良い機会となるが、災害の発生による復旧の機会も良い機会である。災害の復旧は、基本的に現状の機能を復旧するものであるため、短期間の内に行われる。この際に地球温暖化による影響分を見込む工夫が必要であり、外力の予測精度の向上、影響評価の精度の向上、設計基準への反映など技術的な進展と費用の確保など制度面の確立が必要である。

また、地球温暖化に関する知見やデータ、様々な情報を専門家から一般の国民まで利用可能なデータベースを設置し、誰もが自由にわかりやすく情報を得られることが地球温暖化問題の理解と解決につながる。

地球温暖化の影響は、現段階において不確実性が高く、様々な仮定において試算を行っている。現段階では、影響がどの程度のものか目安として把握できること、対応としてどの程度の対策が必要かわかることが重要で、適応策の基本的な方向性を見出すことが必要である。今後、進歩しているグローバルシミュレーターの成果を活かし、より詳細な検討を進めていかなければならない。

地球温暖化の問題は、気候変動の問題と社会の抱える問題の両方から考える必要があり、地域性のある複雑な構造を持つ問題である。このため、様々な分野の専門家が協力して地球温暖化への対応を検討できる組織「地球温暖化賢人会議（仮称）」の設置を提案する。この会議から政治と行政のリーダーに様々な提言や情報の提供を行い、賢い選択の実現に資する。土木学会では、「土木学会地球環境行動計画－アジェンダ 21／土木学会－」を定めており、これに則りながら地球温暖化に伴う気候変動に対して、土木学会としての具体的な行動計画を考えることが必要となろう。

8 土木学会と土木技術者としての適応策—粘り強く賢い選択

本節においては地球温暖化に対する我が国の土木学会としての適応策の考え方が述べられている。具体的な対策は300項目近くになり、それらは別表に記載されている。考え方や対策の理念としては「粘り強く賢い選択」である。

日本の歴史を紐解くと地震や津波、台風、火山爆発、冷害などの自然災害が数多く来襲しており、幾多の人為的な災難が我が国に降りかかってきたが、それらに対して我が国はしたたかに乗越えあるいはそれを契機に国力を増大させてきた。この日本の国力と国民性を考えると地球温暖化に伴う気候変動やそれに付随する自然条件の変化に対して、「きっとその災難を克服し、これを契機にさらにより豊かで安全な国土を形成していくであろう」とも楽観的には考えられる。しかし日本を襲った歴史的な災難はすべて空間スケールで見ると局所的であり、歴史的時間スケールで見れば瞬間的なものである。それに対し地球温暖化に伴って発生する多くの事象はすべて地球規模グローバルなものであり、当然我が国全体を覆うものである。さらにそれが及ぼす影響の継続時間は100年、1000年スケールであり、その意味で我が国のみならず全世界の人類にとって未曾有の経験となるものである。地球温暖化に対するこの認識を我が国のすべての国民と世界のすべての人々が共有することが近未来から未来にかけて人類が安定した持続可能な繁栄を迎えるための前提条件であろう。しかし全人類や我が国の国民すべてにおいてこの認識の共有という問題一つをとっても、人々の理解力の多様さや興味を持ち続けることの困難さから現実には実現困難なことであろう。発展途上国や先進国そして我が国においてさえ地球温暖化がメディアの継続的ですがすべての国民が真摯に向き合う主要話題であることは少なく、2008年後半の米国の金融恐慌に端を発した世界経済の混乱と低迷は日本国民や世界の人々から地球温暖化問題を遠い彼岸の話題とさせつつある。あるいは過去の話題になりつつあるか少なくとも主要な話題ではなくなってきた。このような世界と日本の情勢の現状と国民性を考慮した上で、本提言が目標とするのは一義的には我が国の土木学会であり、個々の適応策の提言は会員である我が国の土木技術者に向けられている。その理由は地球温暖化と気候変動に対する適応策は哲学、法学や、経済学等のいわゆる文系の学問にも関係しつつ、その多くはきわめて土木技術的であり、土木工学の分野と土木技術者が責任を持って対処せざるを得ない問題群からなっているからである。より簡明に言えば土木技術者のみがこれを組織的に勝未来に向かって継続的に遂行し得る資質と責任を有するからである。

地球温暖化適応策を具現化するためには水の実態と水使用の調査や維持の地球規模のモニタリングを必要とすることは当然であり、国内外の多くの公的な諸機関や大学等の研究機関が既にかかなりの部分を担当している。しかしその成果は多くの場合極めて理学的あるいは専門的であり、これを土木工学の問題として捉えるためにはそれらの情報の収集の他に、これから得られる情報に関して何段階かの工学的解釈と大部分の土木技術者への説明のプロセスを必要とする。これらに関して国内の多くの土木工学系の機関がそれを担当することにはなっているが、その成果や知見を土木学会と全ての会員に提示し、実現可能な技術体系としての理解を深めるためには土木学会内に地球温暖化緩和策と適応策に関する常置の委員会を設けることが必要であり、本提言書においてもこれを極めて強く推奨するのである。

以上の理由から本提言書が土木学会全会員にとって地球温暖化と気候変動に対する適応策

を考え、それを実行に移す際の起点となることを望むものである。

参考文献

- 1) 農林水産省水産庁：平成 14・15 年度地球温暖化に対応した漁場、漁港漁村対策調査総合報告書，2007
- 2) 下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会：下水処理水の再利用のあり方に関する懇談会 中間とりまとめ，2008
- 3) 「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方について」研究会：「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的水資源マネジメント」について（中間とりまとめ），2008
- 4) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－2008
- 5) 地球温暖化影響・適応研究委員会：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，2008
- 6) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申），2008
- 7) 日本学術会議 地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同 国土・社会と自然災害分科会：提言 地球環境の変化に伴う水災害への適応，2008
- 8) 自民党特命委員会「水の安全保障研究会」：特命委員会「水の安全保障研究会」報告書，2008
- 9) 土木学会：土木学会誌 07，15-30，2008

温暖化の影響と適応策

気温・水温の上昇

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)		
水関連災害 (沿岸域)	水産業の変化	マリンスポーツの専門学校を作るなどの事業を促進 ----- 養殖、漁業形態の変更
	サンゴ礁の劣化	高温に強いサンゴの移植←外来種等で悪影響を及ぼすものは除く
	沿岸域植生の変化	
水供給	アオコ発生時期の長期化	下廃水処理による栄養塩流入抑止
	水道水の異臭味(カビ臭)の発生時期の長期化	水道水の基準レベルを1ランク上げる
		水源地で浄化し head 差で水道供給を行う
	病原性細菌が環境中で長期間生存する可能性	浚渫(底泥を肥料化する技術の開発)
	積雪量や雪解け時期の変化による流量パターンの変化	
	低温時に問題となるアンモニアの生物酸化処理や凝集処理の効率の向上	
	水ストレス人口の増加	
下水とその処理	不栄養化(富栄養化)を抑制するために栄養塩除去への要求が高まる。	嫌気性処理技術の開発と導入 ----- 栄養塩除去技術の開発と導入
	閉鎖性水域の水質汚濁	処理水の閉鎖性水域バイパス放流
	水温の上昇	冬の暖房に使う
廃棄物関連	嫌気性処理効率の向上	嫌気性処理技術の積極的導入
	臭気問題の発生	一部地域では disposer を導入
	衛生害虫の発生	害虫の駆除
	有機系廃棄物の堆肥化速度の向上	有機系廃棄物の堆肥化促進と利用
水環境	ペットボトル使用量の増加に伴いリサイクル時にCO2が大量に発生	ペットボトルのリサイクルを廃止
	底泥の栄養塩溶出を抑制するような生態系制御技術の開発と適用	浚渫および底泥を肥料化する技術の開発 ----- 水生植物を利用した栄養塩回収技術の開発と適用
	植物プランクトンの増化による赤潮・アオコの発生時期の長期化	下廃水処理による栄養塩流入抑止
	水棲生物の種構成の変化	水温変動を見越した水生植物の植栽
	南方性の生物の侵入	農業用堰の集約、外来種を排除するための配置方法検討

分野	影響	適応策
	飽和溶存酸素濃度の低下及び微生物の活性化による底質の嫌気化と栄養塩の溶出	
都市生活	冷房の使用が増加する。逆に暖房の使用は減少する。	下水処理水や地下水による打ち水による放熱の促進 ----- せせらぎの創出による放熱の促進 ----- 緑化による放熱の促進 ----- 水辺観光産業の活性化
	生ゴミの臭化	一部地域では disposer を導入
	夏期日中の野外活動の過酷化	
	街路樹や雑草等のバイオマス系廃棄物の増加	街路樹落ち葉や雑草のバイオマス資源としての利用技術の開発と実施 ----- 雑草から作るバイオエタノール研究への援助
	媒介ウィルスの伝染	
	食糧危機	
	都市の高温化	風の道を考えた都市設計 ----- 都市計画法の改正 ----- 無法図に設置されている自販機の廃止
農村生活	食料生産適地の変化	農地利用の転換 ----- 品種改良
	耕作時期の早期化	風土と変動する気候にあわせた栽培作物の決定支援システム
	日中の農作業の過酷化	防風や日陰をとるための植樹
	農業用水及び肥料の不足	下水処理水や下水汚泥、浚渫底泥の栄養塩の利用技術の開発と導入
	南方性の生物の侵入	
	有機系廃棄物の堆肥化速度の向上	有機系廃棄物の堆肥化促進と利用
その他	生態系の変化(寒冷種の減少、温暖種の増加)	
	氷河の縮小	
	飢餓	
	栄養不足	
	人口の減少	

降雨・積雪の減少

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)	土砂生産や斜面崩壊、地すべりの発生の素因となる凍結融解作用による表層の風化度の変化	風化防止ネットの取付け
	外力によって川幅変動	
水関連災害 (沿岸域)		
水供給	融雪のタイミングの早期化	ダム貯水池操作の工夫
	融雪水の減少	水利権の見直し
		農作業の季節での適応
		品種や作物での変更
		モニタリングの継続及び精度の向上
下水とその処理	路面凍結防止剤の使用量減少	
廃棄物関連	積雪の減少による冬期ゴミ収集の負担減少	
水環境	融雪水の減少による河川湖沼への春期流入量減少地下水涵養の減少	森林保全
	融雪水の減少による地下水涵養の減少	雨水の地下注入等等積雪に代わる水源涵養法の推進
	融雪用水の取水減少に伴う地下水揚水の減少	
都市生活	アルベド(反射率)の減少	除雪の抑制
	スキー場など雪を利用した娯楽・観光産業の衰退	観光産業に対して人工雪を積極的に使用
	降雪・積雪対策の負担減少	
農村生活	雪解け水の減少	森林保全
	融雪期の出水減少による農作物の変化	
	出水減少による農作物の種類、成長期の変化	
その他		

降雨パターンの変化 1 (渇水対策)

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)	渇水危険度増加	土工施設の弾力的・効果的活用
	地下水位の低下	浸透域の増大による地下水確保
水関連災害 (沿岸域)		
水供給	渇水危険度増加	家庭内・ビル内での循環利用 ----- 下水処理水の再利用 ----- 地下水の涵養及びその水質保全の促進 ----- 水源の分散化、ネットワーク化 ----- 漏水防止 ----- 活性炭吸着や膜処理などの導入 ----- 水利権の見直し ----- 緊急時における水供給体制等の確立 ----- 水源林による土砂保全機能の強化 ----- ダムのオペレーションの高度化 ----- 海水淡水化技術の開発・普及 ----- 雨水の貯留と利用 ----- ダムの新設
	干ばつにより世界で食糧生産が減少し日本への輸出量が減少	
下水とその処理	再利用需要の増大	高度処理技術の開発と適用
		処理水の需要や要求される水質に関する情報の蓄積と処理
		処理雨水の利用や促進するための基準や諸制度の充実
	水供給量の低下から来る、下水混入率の増加	高度処理技術の開発と適用 ----- 処理水の需要や要求される水質に関する情報の蓄積と処理 ----- 処理雨水の利用や促進するための基準や諸制度の充実
廃棄物関連	処理場の不足	処理水の再利用を促進するための処理場の分散化
	乾燥による粉塵問題の発生、その対策のための散水需要の増大	下水処理水、浸出水処理水の散水
		埋立地散水用の水質基準の確立
水環境	河床露出	下水処理水の放流
		下水処理水の環境安全性の向上
	水生生物の生息域の減少	渇水時の水生生物の避難所書の確保 ----- 地下水の涵養促進

分野	影響	適応策
都市生活	渇水危険度増大	カスケード的水利用の促進 ----- 下水処理水の再利用の促進 ----- 下水処理場・処理装置の分散配置 ----- 節水機器の導入 ----- 節水意識の向上 ----- ダムの新設
	干ばつによる食糧輸入量の減少	
農村生活	渇水危険度増大	安全水源としての下水処理水の利用 ----- ダムの新設
	農業用水の不足	安全水源としての下水処理水の利用 ----- ダムの新設
	水運の利用が不可能となる	安全水源としての下水処理水の利用 ----- ダムの新設
	収穫量の減少	農業支援による食糧確保
その他	代掻き水の不足	新たな水源の確保
	山火事の増加	

降雨パターンの変化2(豪雨洪水対策)

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)	洪水の増大	堤防やダムなどの施設能力の向上に努める 新規施設の整備 現有の水工施設の弾力的・効果的活用 ダムの治水・利水容量を効率的・効果的に活用 ダム施設の改良、再生、運用の高度化 観測体制の強化や降雨・流出予測技術の向上 水文気象モニタリングの強化 雨量観測所の増設 降雨予報の精度向上 代表的な中小河川のモニタリング結果から、他の中小河川も評価できるような仕組み作り
	浸水リスクの増大	中枢機能地の重点対応 被害を最小化する土地利用や住まい方 国土構造の再編 高度化した情報技術を用いた既存施設の連携 氾濫域をいくつかのブロックで区切り、洪水氾濫の拡散の抑制 氾濫水の迅速な排水や非常用排水樋門の整備の推進 災害支援体制の強化や防災ネットワークの構築など大規模水害への備えを充実 水災害危険度評価の高度化 雨量観測所の増設 降雨予報の精度向上
	水難事故の増加	初等中等児童および学生にも「実感」できる分かりやすい情報の作成。 水災害・水防災に関する教育と啓蒙(周知活動) 水防災情報配信システムの構築 洪水予報・土砂災害警戒情報や水防警報の予警報等の強化 雨量観測所の増設 降雨予報の精度向上 小学校のカリキュラムに水災害に関する授業の導入 水災害防災演習を通じて市民参加型の避難活動の練習

分野	影響	適応策
	治水安全度の著しい低下	道路や鉄道等の盛土の活用や新たな整備 復旧・復興対策 極端な大規模災害の想定 地域の BCP の立案 施設の整備や操作、維持活動などハード、ソフトを組み合わせた対策が必要
	短時間雨量の増大による河川水位の急激な増加	浸透域の増大 High Water Level を明確に定めて、これを基にまちづくりを行う
	斜面崩壊や土石流の発生頻度の増加、発生規模の増大、異常土砂堆積	モニタリング等による土砂動態を解明と治水、利水、河川や海岸の環境への影響を把握
	冬季洪水の発生	
水関連災害 (沿岸域)	沿岸都市域における洪水増大	遊水池・貯水池の整備 土地利用の変更・規制(住居の移転) 総合的沿岸域管理 排水システムの強化 災害復旧基金、補助金の創設 浸水保険制度 迅速な避難支援 防災訓練・教育、自主防災組織への支援
	沈埋トンネル(臨港道路)の冠水	海岸保全施設の整備・改良
	山火事の増加	
水供給	洪水による取水施設の被害増大	ダム群の容量の再編(治水量と利水容量の振り替え) 発電ダムなどの連携運用 必要に応じ河川取水点の移動 水源の分散化、ネットワーク化
	供給量低下による水不足	(都市・産業・農業)下水処理水の再利用
		(都市・産業)家庭内・ビル内での循環利用
	ダム貯水池への堆砂が急速に進行しダムの機能に支障となる	ダムの事前放流事業
		地下水利用ルールの確立
下水とその処理	再利用需要の増大	地下水涵養・利用
		再利用のための高度処理
		処理水の農業利用
		処理水の農業利用を促進するための基準や諸制度の充実、農家との連携 分散立地を助けるための補助技術

分野	影響	適応策
	雨水対策需要の増大(雨水排除、処理施設・ポンプ施設の洪水耐性の強化)	処理施設の分散立地
		分散立地を助けるための補助技術
廃棄物関連	埋め立て処分場の豪雨被害	施設の豪雨に対する対策強化 ----- 立地選定における考慮
	洪水などによる災害ゴミの増加	立地選定における考慮
水環境	河床露出、鉄砲水等	正常流量の見直し ----- 放水路の新規開削 ----- 出水時水生生物の逃げ場所確保
	流量パターンの変化	正常流量の見直し ----- 代表的な中小河川のモニタリング結果から、他の中小河川も評価できるような仕組み作り ----- 河川敷利用に関する安全基準の見直し
	河床環境の変化	代表的な中小河川のモニタリング結果から、他の中小河川も評価できるような仕組み作り
	生活排水の合流機会の増加による水質悪化	
		河川敷内施設の大水対策
		出水時水生生物の逃げ場所確保
		水源林の確保と保全
都市生活	浸水被害の可能性の増加	雨水貯留・浸透施設の設置 ----- 低地利用の規制 ----- 耐震性のような耐水圧性(設計外力)の基準作成
	土砂災害発生危険箇所の増大・被害範囲の拡大	適切な土地利用・建築規制の実施による流域管理 ----- 砂防施設の機能向上 ----- 貯水池の土砂管理施設の充実
	避難可能な時間の短縮	高層建物等を緊急避難場所と設定 ----- ハザードマップや災害リスクなどの情報を提供し支援 ----- ユビキタス社会の実現(河川水位や氾濫情報、避難経路などの情報提供)
	国家機能の麻痺	中枢機関の立地の分散 ----- 中枢機能集積地域における国家機能麻痺回避システムの構築
	洪水時の浄化槽からの未処理下水の越流と、その後の悪臭・害虫被害	
	都市雨水の排除能力不足	可搬式の特設堤防や排水ポンプ等の整備 ----- 降雪・積雪対策の負担減少

分野	影響	適応策
	突発的は出水による河川利用者への危険性の増大	親水エリア(川水浴場)を設けて、人をそこへ集中させる ライフセーバー制度の導入
農村生活	水田への内水氾濫による稲の被害	遊水地、二線堤、輪中堤、宅地の嵩上げ 浸水危険度の高い農地・湿地での有効な農業利用 浸水危険度の高い地域で農業を営む農家のリスクを軽減するための制度の導入 情報提供や住民等との双方向の情報共有など、地域防災力の向上 災害に強い品種の開発
		災害リスクの提示や保険整備等を活用したインセンティブを提供による土地利用の誘導 洪水時でも漏れない浄化槽、し尿貯槽 土砂災害警戒区域等の見直し(住宅等の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進)
		土砂災害発生までの時間短縮による、避難までの時間の短縮
		ユビキタス社会の実現(河川水位や氾濫情報、避難経路などの情報提供)
		風土と変動する気候にあわせた栽培作物の決定支援システム 安定水源としての下水処理水の利用 カスケード的水利用
その他	河口閉塞	

台風・高潮の変化

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)	大型台風による洪水被害	水位観測所の増設
水関連災害 (沿岸域)	高潮の強大化	避難支援
		緩衝帯の確保
		防災訓練・教育, 自主防災組織への支援
		災害復旧基金, 補助金の創設
	高潮増大による, 海岸構造物の機能低下	必要に応じて防波堤・防潮堤の補強
		浸水保険制度
		港湾の施設の整備・改良
		海岸保全施設の整備・改良
	港湾の施設の機能低下	設計外力の見直し
		既存施設の強度検証(余裕高を含めた検証)
	高潮による臨海部の浸水	浸水保険制度
水供給		
下水とその処理	合流式下水道管から河川への直接流入	管径の拡張や下水処理施設の効率の見直し
		台風時の生活排水・工場排水の規制
廃棄物		
水循環		
都市生活	市街地への越水	避難ルートの確保・確認
		高潮堤のかさ上げ
		高規格堤防化、高潮対策河口堰の建設
	堤防決壊	避難ルートの確保・確認
		高潮対策河口堰の建設
		高規格堤防化
	浸水や洪水による被害	避難ルートの確保・確認
		ポンプ新設
農村生活	台風による農作物被害	被害を受けた農作物に対する農家の掛け金負担額の軽減
		浸水危険度の高い地域で農業を営む農家のリスクを軽減するための制度の導入
		ポンプ新設
		農場の移動
その他	停電	緊急用発電機を重要機関の集まり地域に設置

複合災害

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)		
水関連災害 (沿岸域)	地震・洪水・高潮の複合災害の甚大化	複合災害を想定した設計基準の見直し ----- 災害発生時の対応を再検討
水供給	水供給施設の停止	水資源の備蓄
下水とその処理	地震による下水処理施設の稼働停止による感染症の拡大	下水処理施設の耐震化 ----- 起こりうる感染症への対策
	下水浄化施設の停止およびそれに伴う感染症の危険	下水処理施設の耐震化 ----- 起こりうる感染症への対策
廃棄物	地震後の大雨による有害物質の溶け出し	余裕を持った処理施設の設計
	災害廃棄物増加による処理施設能力の不足	余裕を持った処理施設の設計
	廃棄物による土壌汚染物質の流出	
水循環		
都市生活	地震による堤防破壊による内水氾濫	堤防の耐震化
農村生活		
その他	雷、竜巻、突風による被害	

海水面の上昇

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)	浸水リスクの増大	排水施設の増強 ----- 適切な土地利用・建築規制の実施による流域管理
	河口部から河川下流域の河床上昇	堤防かさ上げ ----- 高潮対策河口堰の建設 ----- 海岸浸食の観点からも総合土砂管理の推進
	潮止め堰の塩水遡上抑制効果の減少	潮止め堰の設計の見直し ----- 塩水遡上の遡上抑制施設の設置
水関連災害 (沿岸域)	堤防高の不足	設計外力の見直し ----- 既存施設の強度検証(余裕高を含めた検証) ----- 施設更新などに併せて、増大する外力を見込んだ高潮堤防の嵩上げ ----- 高潮対策河口堰の建設 ----- 港湾の施設の整備・改良
	防波堤・防潮堤の外力に対する強度不足	排水設備などの強化 ----- 避難支援 ----- 防災訓練・教育, 自主防災組織への支援 ----- 災害復旧基金, 補助金の創設 ----- 浸水保険制度
	臨海部の浸水	沿岸漂流砂の制御、海岸の保全・再生 ----- 河川・海岸の総合的土砂管理 ----- 斜板堤など離岸堤の整備
	海岸浸食の進行がもたらす、砂浜の消失と海水浴等レジャー施設の衰退	沿岸漂流砂の制御、海岸の保全・再生 ----- 河川・海岸の総合的土砂管理 ----- 斜板堤など離岸堤の整備
	高潮の危険性が増大	海岸保全施設の整備・改良 ----- 必要に応じて防波堤・防潮堤の補強 ----- 高潮対策河口堰の建設
	地下水への塩水侵入	
	地下水位の上昇	
	マングローブ林の消失	
	サンゴ礁の消失	
	港湾の施設の機能低下	
水供給	地下水の塩水進入	地下水涵養、利用制限
	飲み水や工業用水の利用が困難になる	海水淡水化と下水処理水の利用

分野	影響	適応策
下水とその処理	海岸の流入下水の塩水侵入	管渠の適切な管理
		雨水貯留・地下浸透(地下水への海水侵入を抑止するため)
	雨水排除が困難化	雨水ポンプの強化
廃棄物	海域埋め立て処分場の浸水	堤防の高化
		雨水排除能力の強化
水循環	海面水位の上昇	遡上状況に応じた遡上抑制ゲート等の設置
	湖沼へ侵入した塩水が湖沼低層に溜まり、低層の貧酸素水塊の形成	必要に応じて水につかる前に栄養塩を含む土の除去
都市生活	ゼロメートル地帯の増加、地価低下	住民は退去
		ゼロメートル地帯では高層住宅、または、産業(工業や物流)利用、または緑地利用
		スーパー堤防化
		高台の建設
		堤防のかさ上げ
	海水浴場の消失	内水排除能力の強化
農村生活	地下水の塩水進入	淡水の地下浸透の促進
	標高の低い耕地の減少	計画的な撤退
		堤防のかさ上げ
	土壌の塩類化	内水排除能力の強化
その他	淡水レンズの減少	土地利用方法の変更
	海岸侵食の激化	海岸植生の利用による砂浜侵食対策

衛生害虫の北上

分野	影響	適応策
水関連災害 (流域・河川)		
水関連災害 (沿岸域)		
水供給	貯水池への害虫の死骸や卵の混入量増加	直結給水の奨励 ----- 雨水貯留槽内の蚊対策
下水とその処理	下水管内での害虫産卵量の増加	湿地処理は適切に実施 ----- 下水管や処理施設での衛生昆虫対策 ----- 雨水貯留施設での衛生昆虫対策
廃棄物		確実に覆土
水循環	害虫の増加による、生態系バランスの変化	魚類等を利用した駆除
都市生活	デング熱・マラリア等	魚のいない水たまりの駆逐 ----- 公衆衛生の改良
農村生活	デング熱・マラリア等	魚のいない水たまりの駆逐 ----- 害虫による農作物被害
その他		浸水保険制度

緩和策（特に省エネ）との関係より派生する諸課題

分野	緩和策
水関連災害 (流域・河川)	低炭素型及び水災害適応型のまちづくり(レイクタウンや集約型まちづくり)
水関連災害 (沿岸域)	海洋エネルギーの活用(洋上風力発電, 波力発電, 潮流発電)
水供給	上流取水&重力送水 ----- マイクロ水力発電 ----- 各種省エネ技術導入
下水とその処理	重力送水 ----- マイクロ水力発電 ----- 下水熱利用 ----- 嫌気性処理 ----- 省エネ技術導入 ----- 時間帯により変動するエネルギー価格への対応 ----- バイオガス利用・下水污泥炭化 ----- 脱水技術の向上 ----- 脱水性と污泥の組成との関連の精査 ----- 下水中有機物の積極的污泥化 & バイオガス化
廃棄物関連	嫌気性処理 ----- バイオガス利用 ----- 固形燃料化 ----- バイオエタノール化
水環境	
都市生活	地下水・下水処理水を利用した打ち水や建物冷却 ----- 地下水・下水処理水を利用した撒水 ----- 都市河川の緑化と流域の公園や緑道などと緑のネットワークを形成し、風の道を確保 ----- 太陽光発電の推進 ----- 自然エネルギー電力の買取価格を高くする
農村生活	重力送水 ----- バイオマスのバイオエタノール化 ----- マイクロ水力発電 ----- 害虫に強い品種の開発
その他	

※ 本表に示す地球温暖化と気候変動に関する影響・適応策は適応策小委員会が 2009 年 3 月時点において取りまとめたものであり、土木学会全会員とともに今後とも更新していく予定である。

土木学会 地球温暖化対策特別委員会

委員会構成

役職	氏名	勤務先名称
委員長	石井 弓夫	(株)建設技術研究所 代表取締役会長
副委員長	石田 東生	筑波大学 大学院システム情報工学研究科社会システム・マネジメント専攻 教授
小委員長	花木 啓祐	東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻 教授
小委員長	三村 信男	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 教授
小委員長	山田 正	中央大学 理工学部土木工学科 教授
幹事長	松岡 譲	京都大学 大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授
委員	池田 駿介	東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻 教授
委員	大塚 久哲	九州大学 大学院工学研究院建設デザイン部門 教授
委員	栢原 英郎	(社)日本港湾協会 会長
委員	阪田 憲次	岡山大学名誉教授
委員	布村 明彦	国土交通省 国土技術政策総合研究所 所長
委員	廣瀬 典昭	日本工営(株) 代表取締役社長
委員	古木 守靖	(社)土木学会 専務理事
委員	湯本 登	(株)エネルギー環境研究所 代表取締役
委員	吉見 憲一	(株)間組 技術・環境本部長
幹事	荒巻 俊也	東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授
幹事	米田 稔	京都大学 大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授

幹事会構成

役職	氏名	勤務先名称
顧問	青山 俊介	(株)環境構想研究所 代表取締役
顧問	北田 敏廣	豊橋技術科学大学 工学部 エコロジー工学系 教授
幹事長	松岡 譲	京都大学 大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授
特別委員	溝口 宏樹	国土交通省 大臣官房 技術調査課 環境安全・地理空間情報技術調整官
	(前) 五道 仁実	国土交通省 河川局 河川計画課 河川情報対策室長
特別委員	室石 泰弘	環境省 大臣官房 地球環境局地球温暖化対策課 課長補佐
特任幹事	松下 潤	芝浦工業大学 システム工学部 環境システム学科 教授
特任幹事	松本 亨	北九州市立大学 国際環境工学部環境生命工学科 教授
特任幹事	三村 信男	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 教授
特任幹事	宮本 善和	中央開発(株) 環境防災事業部 事業部長

幹事	須賀 正	清水建設(株) 土木技術本部先端技術部環境グループ グループ長
幹事	荒巻 俊也	東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授
幹事	米田 稔	京都大学 大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授
幹事	池野 正明	(財)電力中央研究所 環境科学研究所 物理環境領域 上席研究員
幹事	石川 一	(株)ドーコン 役員室 取締役
幹事	市川 陽一	龍谷大学 理工学部環境ソリューション工学科
幹事	大西 文秀	(株)竹中工務店 プロジェクト開発推進本部
幹事	川原 博満	(株)環境計画研究所 環境情報解析チーム 主任研究員
幹事	倉田 学児	京都大学 大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 准教授
幹事	小池 勝則	鹿島建設(株) 環境本部地球環境室 室長
幹事	柵瀬 信夫	鹿島建設(株) 環境本部環境計画担当 担当部長
幹事	島田 幸司	立命館大学 経済学部 教授
幹事	鈴木 武	国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 室長
幹事	竹本 和彦	環境省(地球環境審議官)
幹事	田畑 喜彦	中部電力(株) 技術開発本部電力技術研究所土木建築グループ構築チーム
幹事	那須 清吾	高知工科大学 社会システム工学科 教授
幹事	奈良 松範	諏訪東京理科大学 システム工学部機械システムデザイン工学科 教授
幹事	藤原 健史	岡山大学 廃棄物マネジメント研究センター 教授
幹事	藤原 靖	大成建設(株)技術センター 土木技術研究所 部長
幹事	松嶋 健太	(株)建設技術研究所 東京本社社会システム部環境システム室
幹事	松村 寛一郎	関西学院大学 総合政策学部メディア情報学科 准教授
幹事	真鍋 章良	復建調査設計(株) 経営企画本部技術研究所 課長
幹事	村尾 直人	北海道大学 大学院 工学研究科 環境フィールド工学専攻 准教授
幹事	室町 泰徳	東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻
幹事	山蔭 聡司	(株)大林組 東京本社地球環境室 主任
幹事	山下 隆男	広島大学 大学院国際協力研究科開発科学専攻
幹事	横木 裕宗	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 准教授
幹事	尾澤 卓思	国土交通省近畿地方整備局 河川部 部長
幹事	笠 博義	(株)間組 技術・環境本部 環境事業部環境技術課 課長
幹事	風間 聡	東北大学 大学院環境科学研究科環境科学専攻 准教授
幹事	岸 利治	東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 准教授
幹事	岸田 弘之	国土交通省 国土技術政策総合研究所環境研究部 部長
幹事	佐藤 健人	(株)大林組 東京土木事業部 営業部長
幹事	鷲見 浩一	金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 准教授

幹事	藤原 拓	高知大学 教育研究部自然科学系農学部門 准教授
幹事	増山 幸衛	世紀東急工業(株) 技術本部 技術研究所 副所長

地球温暖化影響小委員会構成

役職	氏名	勤務先名称
小委員長	三村 信男	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 教授
委員	荒巻 俊也	東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授
委員	池野 正明	(財)電力中央研究所 環境科学研究所 物理環境領域 上席研究員
委員	風間 聡	東北大学 大学院環境科学研究科環境科学専攻 准教授
委員	小池 勝則	鹿島建設(株) 環境本部地球環境室 室長
委員	鈴木 武	国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 室長
委員	肱岡 靖明	(独)国立環境研究所 社会環境システム研究領域統合評価研究室 主任研究員
委員	藤森 真理子	パシフィックコンサルタンツ(株) 地球環境部 主任コンサルタント(技術課長)
委員	藤原 拓	高知大学 教育研究部自然科学系農学部門 准教授
委員	松嶋 健太	(株)建設技術研究所 東京本社社会システム部環境システム室
委員	横木 裕宗	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 准教授

緩和策小委員会構成

役職	氏名	勤務先名称
小委員長	花木 啓祐	東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻 教授
幹事長	荒巻 俊也	東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授
委員	川原 博満	(株)環境計画研究所 環境情報解析チーム 主任研究員
委員	島田 幸司	立命館大学 経済学部 教授
委員	関根 裕治	東京電力(株) 技術開発研究所設備基盤技術グループ 主管研究員
委員	松本 亨	北九州市立大学 国際環境工学部環境生命工学科 教授
委員	室町 泰徳	東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻

適応策小委員会構成

役職	氏名	勤務先名称
小委員長	山田 正	中央大学 理工学部土木工学科 教授
幹事長	尾澤 卓思	国土交通省近畿地方整備局 河川部 部長
委員	大平 一典	国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 部長
委員	岡安 章夫	東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 教授

委員	沖 大幹	東京大学 生産技術研究所 教授
委員	川池 健司	京都大学防災研究所 流域災害研究センター 河川防災システム研究領域 准教授
委員	小林 智尚	岐阜大学 工学研究科 環境エネルギーシステム専攻 教授
委員	齋藤 利晃	日本大学 理工学部土木工学科 准教授
委員	佐藤 弘泰	東京大学 大学院新領域創成科学研究科環境学系 社会文化環境学専攻 准教授
委員	関本 恒浩	五洋建設(株) 技術研究所
委員	田中 仁	東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 教授
委員	中北 英一	京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門水文気象災害研究分野 教授
委員	中山 哲厳	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所開発システム研究室 室長
委員	藤田 正治	京都大学防災研究所 流域災害研究センター 流砂災害研究領域 教授
委員	増田 貴則	鳥取大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授
委員	松下 拓	北海道大学 大学院工学研究科環境創生工学専攻 水代謝システム講座環境リスク工学
委員	山下 隆男	広島大学 大学院国際協力研究科開発科学専攻
幹事	市川 温	山梨大学大学院 医学工学総合研究部工学学域社会システム工学系 准教授
幹事	鼎 信次郎	東京大学 生産技術研究所 准教授
幹事	横木 裕宗	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 准教授

土木学会 地球温暖化対策特別委員会 報告書
地球温暖化に挑む土木工学

2009 年 5 月

● 編集者…… 土木学会地球温暖化対策特別委員会

● 発行者…… 〒160-0004 東京都新宿区四谷 1 丁目外濠公園内

社団法人 土木学会
TEL: 03-3355-3443 FAX: 03-5379-2769

ご注意：当該出版物の内容を複写したり、他の出版物へ転載する場合には、必ず土木学会の許可を得て下さい。

