

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。

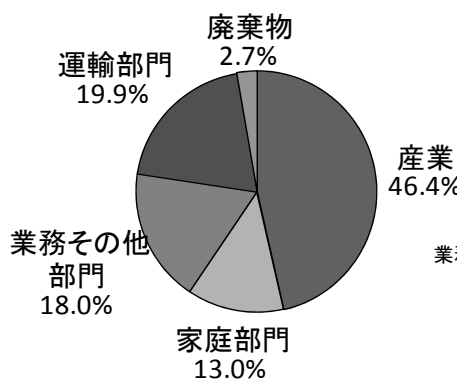


図1-1. 日本の部門別CO2排出量(2006年)

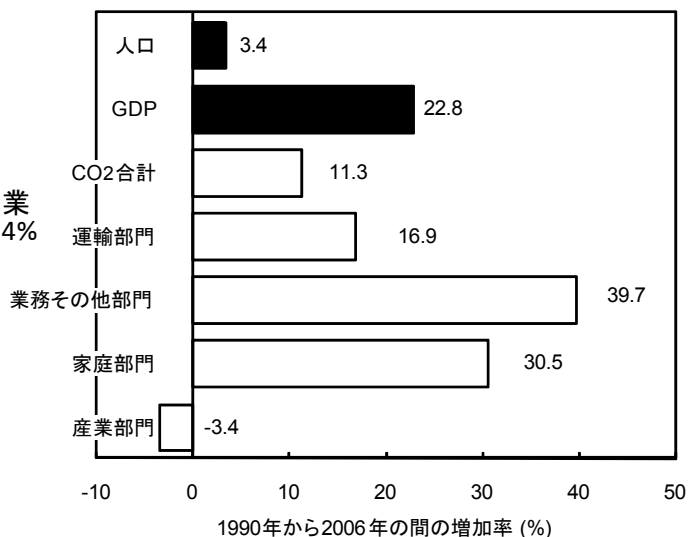


図1-2. 日本の部門別CO2排出量変化(1990年から2006年まで)

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。

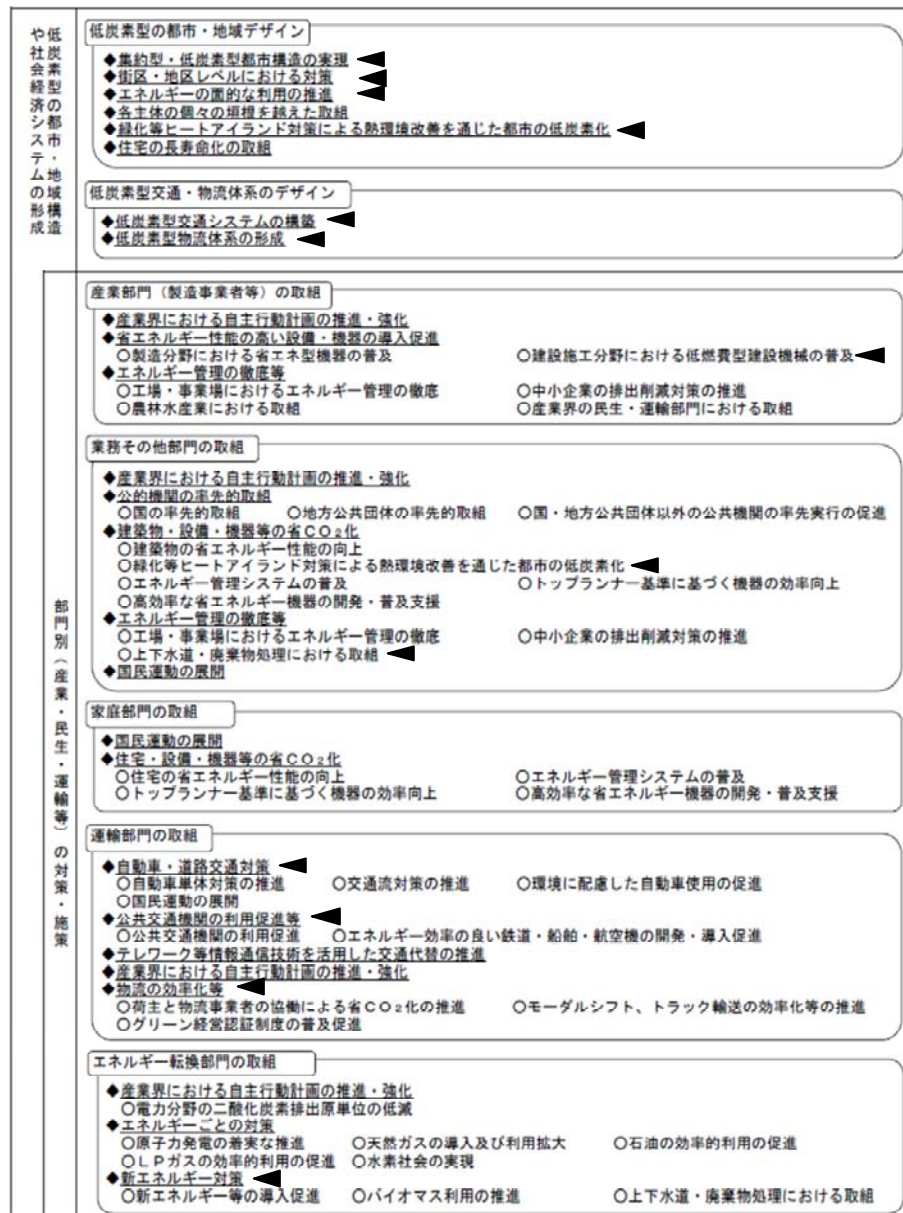


図1-3. 土木が関連するエネルギー起源二酸化炭素対策と土木の関係
 （図中の ◀印は関連が深い対策。京都議定書目標達成計画改定版（2008年3月）
 中の<表6.エネルギー起源二酸化炭素に関する対策の全体像>を加工）

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。

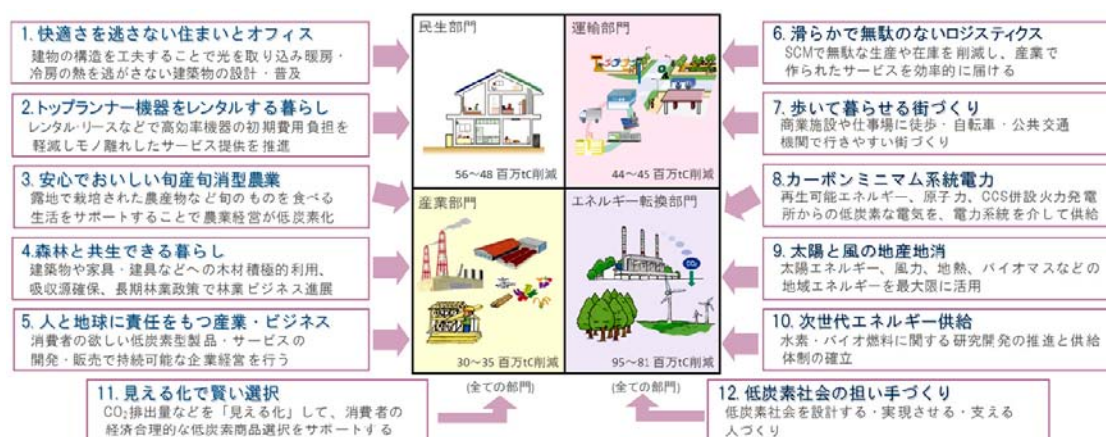


図1-4. 低炭素社会に向けた12の方策

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。

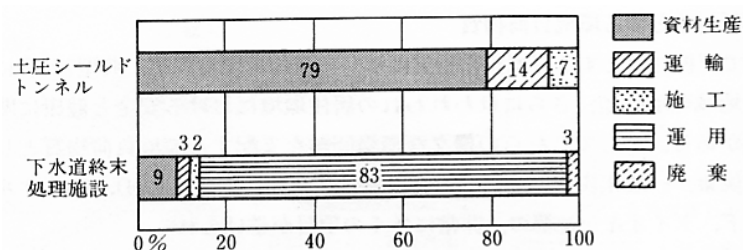


図 2-1 ライフステージ別の CO₂ 排出量比率の比較⁶⁾

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⁾。

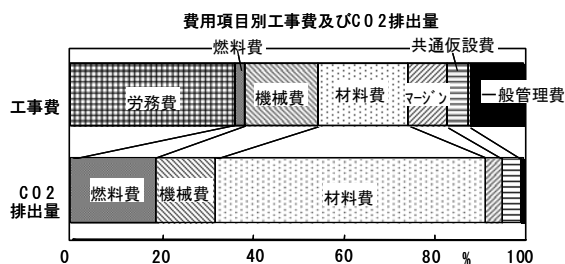


図 2-2 ニュータウン造成工事からの
CO₂ 排出量の内訳¹⁰⁾

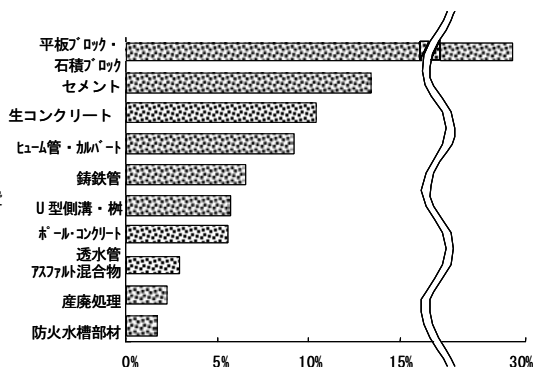


図 2-3 ニュータウン造成時の
材料由来の CO₂ 排出量の内訳¹⁰⁾

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⁾。

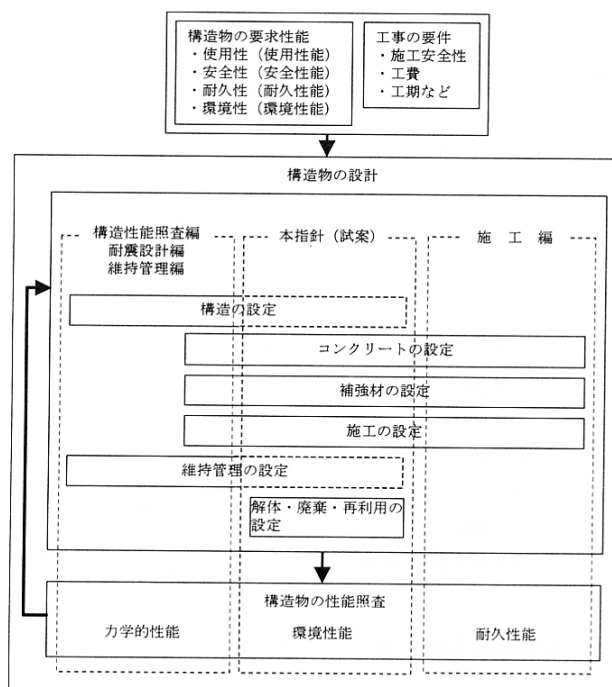


図 2-4 コンクリート構造物の設計と環境性能照査指針の位置づけ¹⁴⁾

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道筋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ランツ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)。

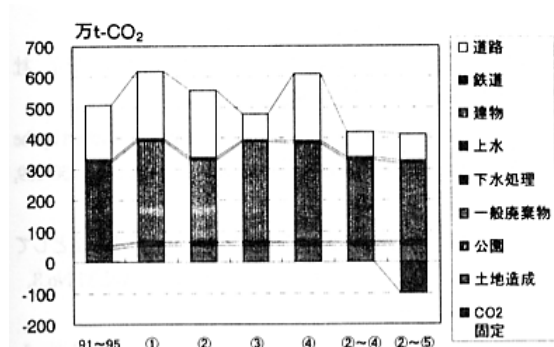


図 2-6 都市空間構造改変施策実施に伴う
2036-40 年の LCCO₂ 予測 (①BaU、
④主要駅付近への住宅誘導) ¹⁹⁾

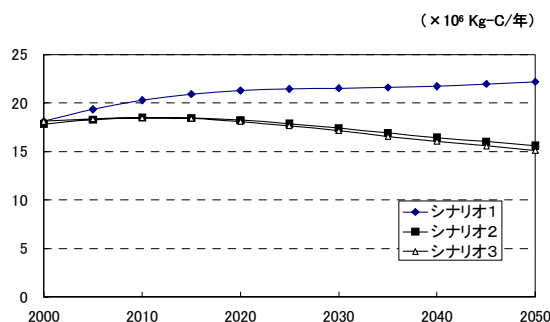


図 2-8 ライフサイクルシミュレーションによる
システムポーター導入シナリオ別の
LCCO₂ 予測結果 (シナリオ 1 : BaU、
シナリオ 2 : 2000 年以降単体ディス
ポーター導入、シナリオ 3 : 2000 年以降
固液分離装置付ディスポーター導入) ²¹⁾

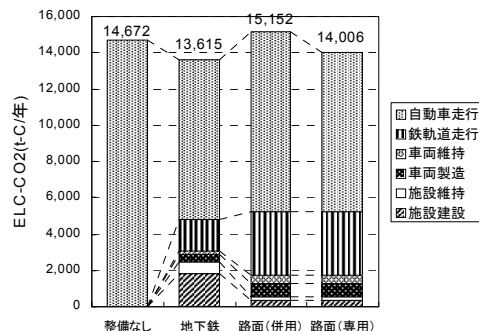


図 2-7 地下鉄・路面電車整備による LCCO₂
変化 (区間総需要 10 万人/日、
鉄軌道への転換率 40%) ²⁰⁾

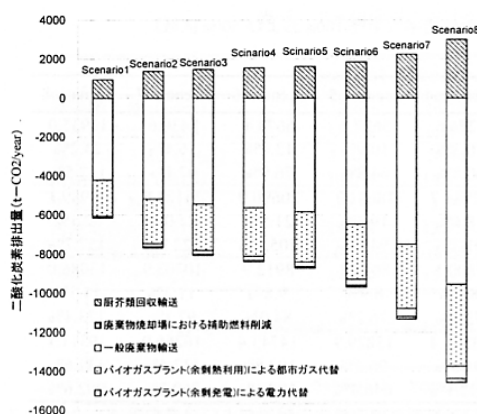


図 2-9 厨芥類の収集シナリオ別
CO₂ 収支の内訳 ²²⁾

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⁾。

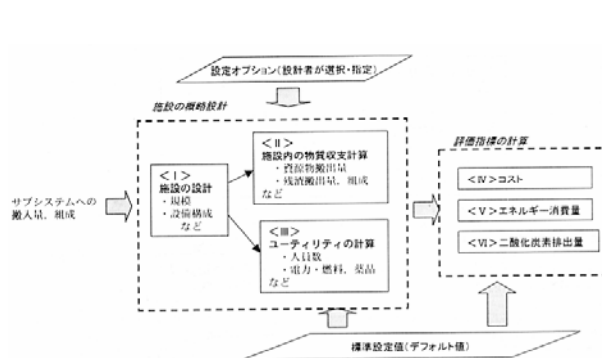


図 2-10 ごみ処理サブシステムの設計から評価までの計算フロー²⁴⁾

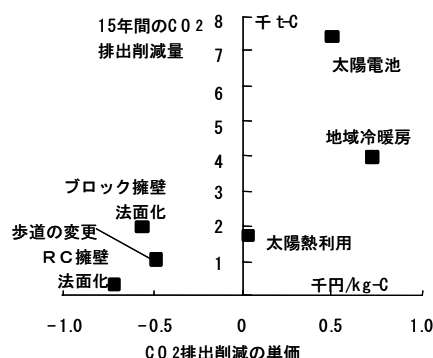


図 2-11 ニュータウンにおける CO₂ 削減策の効果とコスト¹⁰⁾

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。

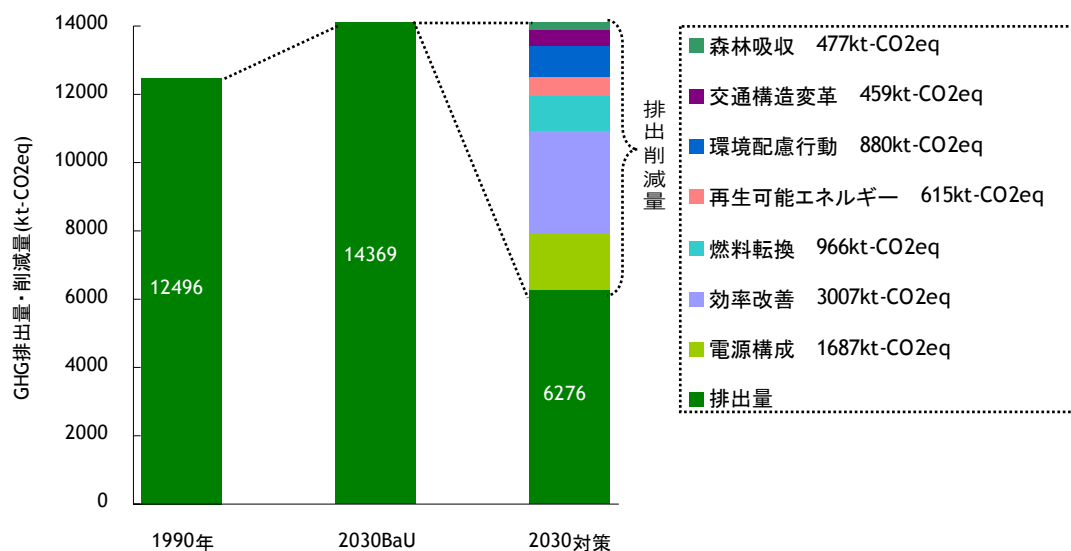


図 4-1 滋賀シナリオでの温室効果ガス排出量半減の内訳

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

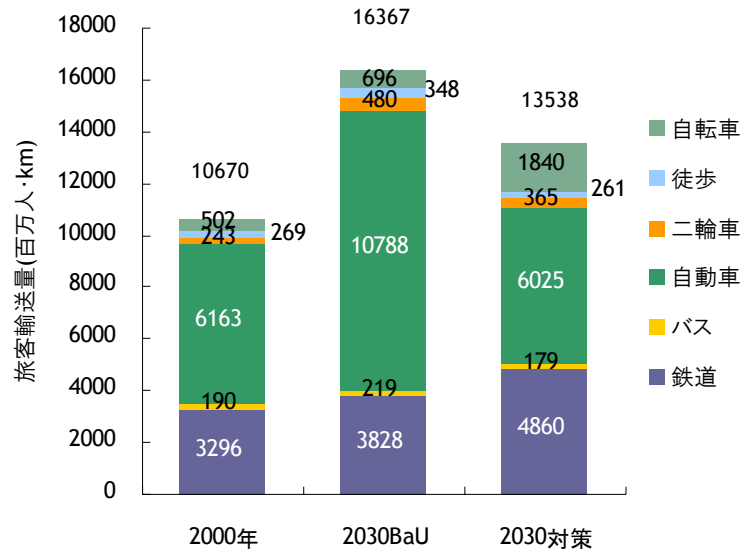


図 4-2 滋賀の将来の旅客交通需要に求められる抑制（交通機関別）

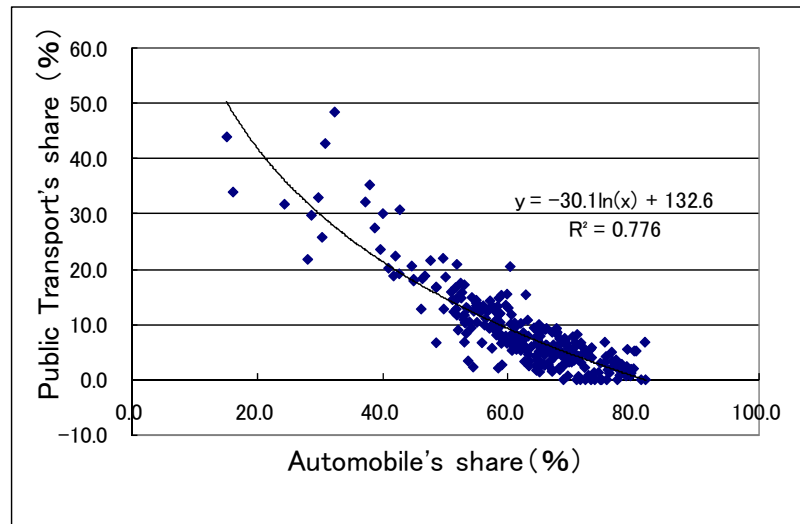


図 4-3 日本の市区町村の自動車と公共交通機関のトリップ分担率の関係

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。

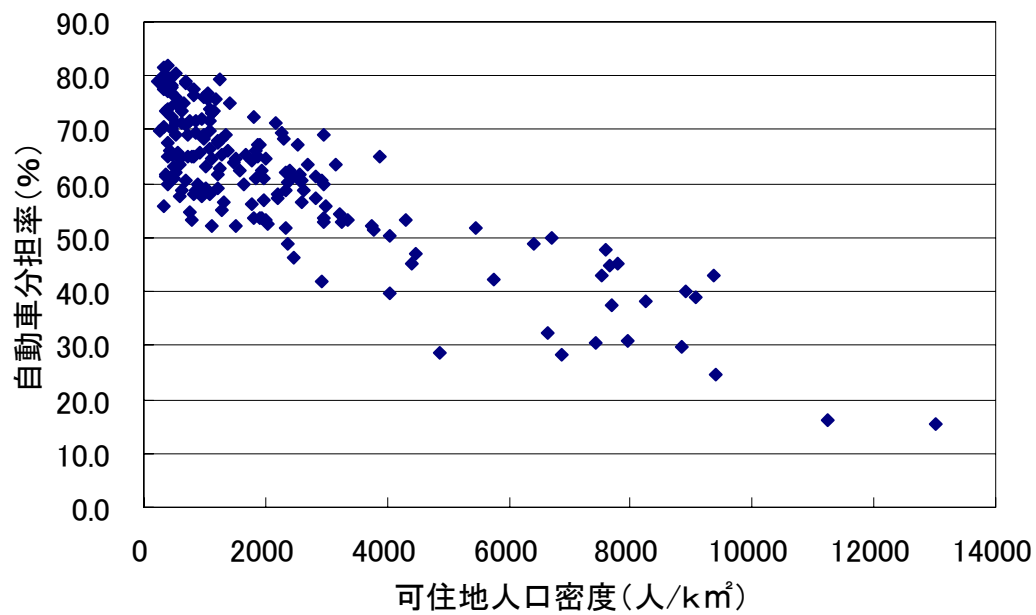


図 4-4 日本の市区町村の可住地人口密度と自動車分担率の関係

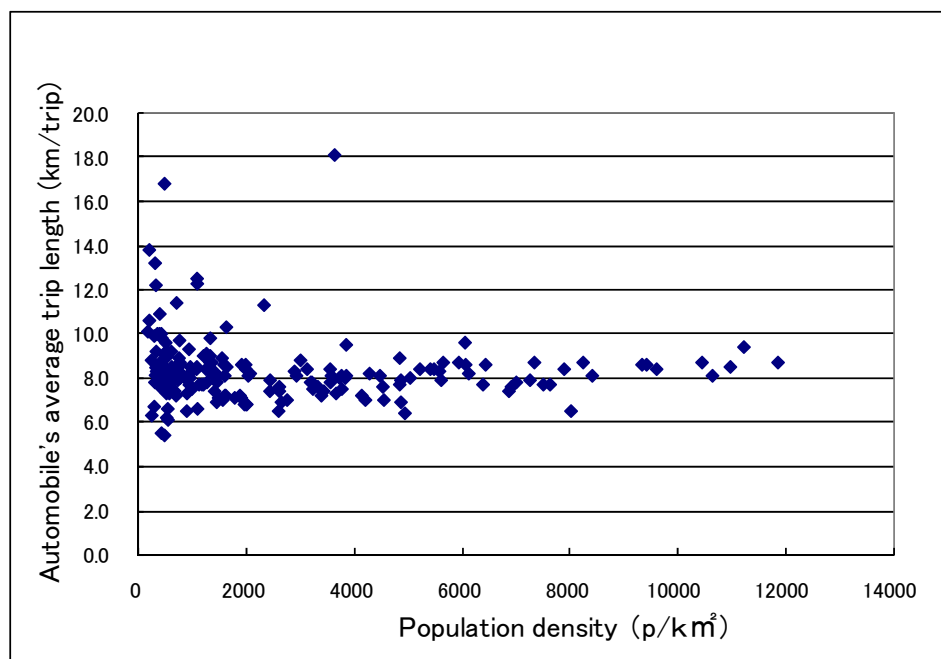


図 4-5 京阪神の市区町村での可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係

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。

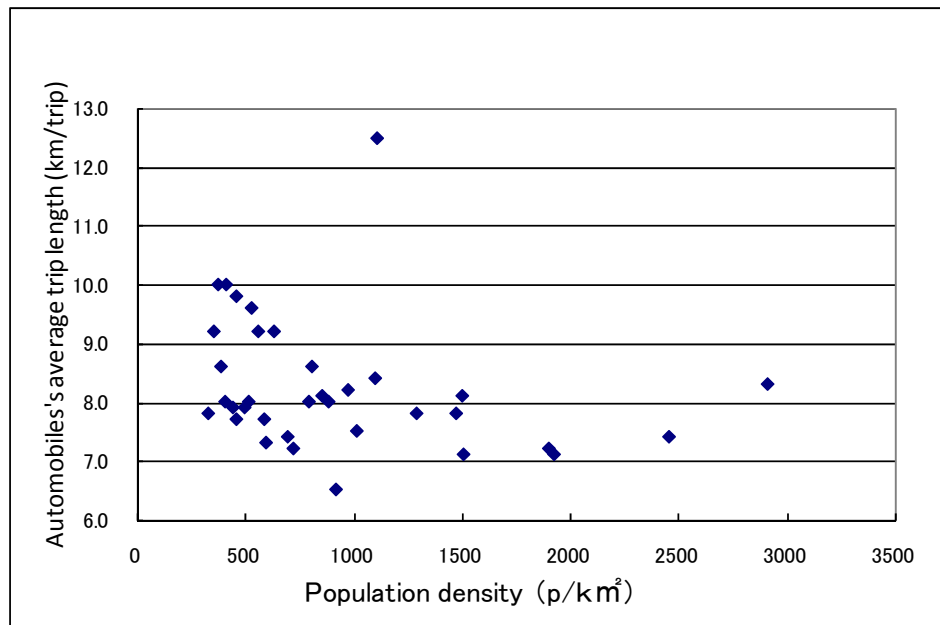


図 4-6 滋賀県下市町での可住地人口密度と自動車平均トリップ長の関係

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はなく、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		
	B	標準誤差	ベータ	t	有意確率
(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。

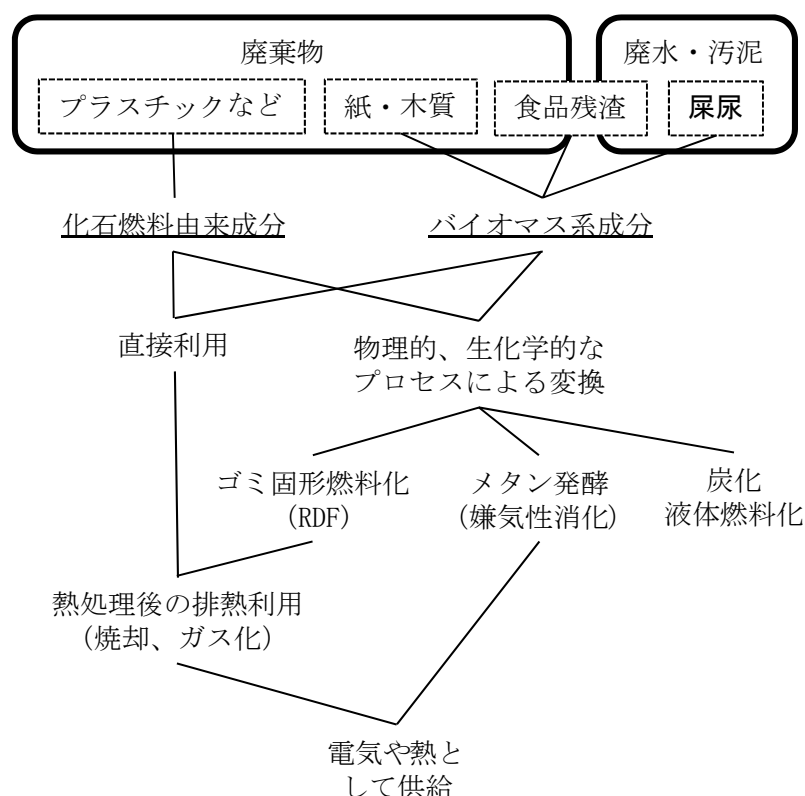


図 5-1 廃棄物や下水汚泥の温暖化対策への活用方法

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．

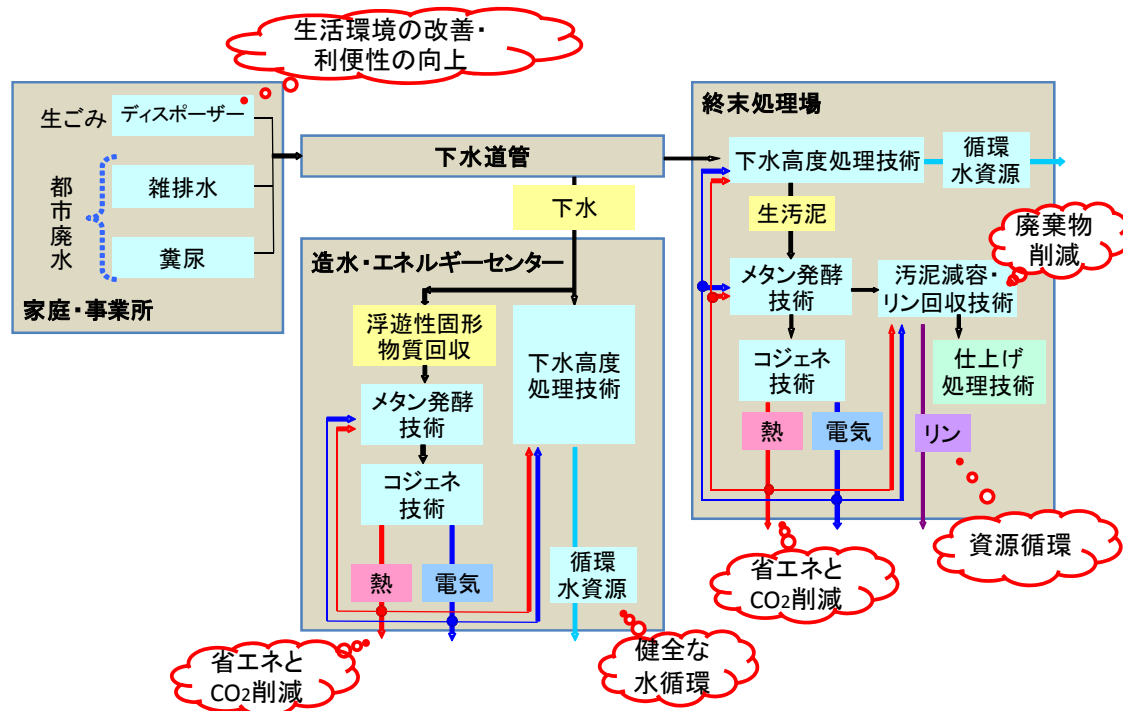


図 5-2 地球と地域の環境を改善する新しい都市廃水・廃棄物管理システムの提案
(京都大学津野洋教授作成)

(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を実施するに当たって、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た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いないため、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。

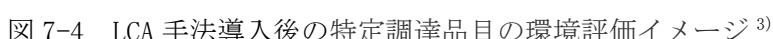
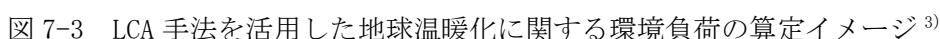
例えば、図 7-2 に示すように ETC を駐車場の管理に利用して、事前に登録した ETC 搭載の自動車が事前予約した時間帯に専用のスペースへ優先的に駐車することが可能なようにすることにより効果的な駐車場の運用を行おうとするものである。

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 7-3 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。

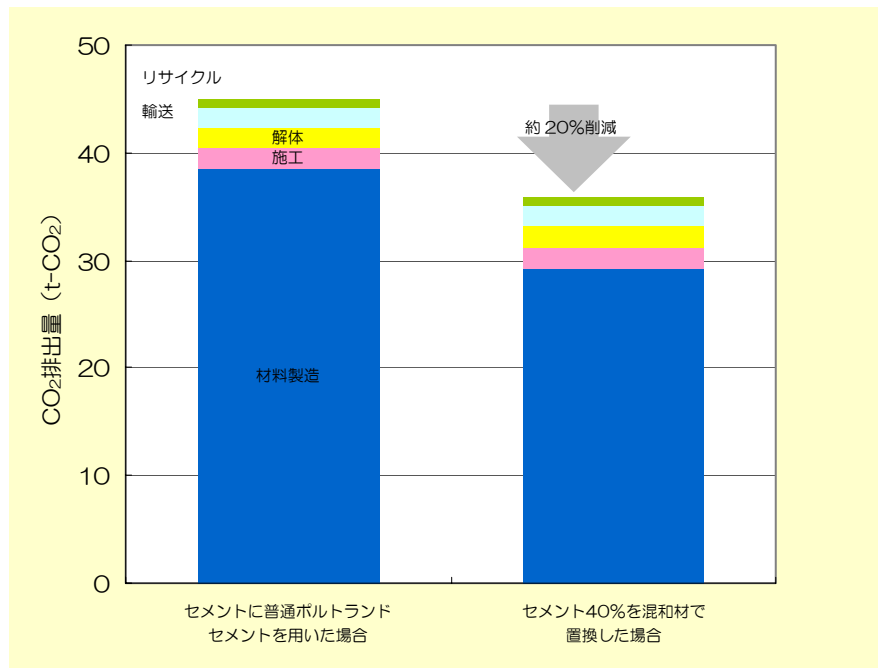


図 7-5 鉄筋コンクリート 100 m³のインベントリ分析試算結果⁴⁾

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