

S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト

3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

(3) 都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果

慶應義塾大学 理工学部

伊香賀俊治

(株)日建設計総合研究所

林 立也 (平成19~20年度)

平成16~20年度合計予算額 12,929千円
(うち、平成20年度予算額 2,497千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 2,983千円を含む。

[要旨] 本研究では、業務建築や住宅の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設や改修、解体に伴う誘発環境負荷を予測する手法を開発し、また、これに基づきCO₂排出量削減目標の達成に向けたシナリオを提示する。前者の対策には、断熱性能の向上、省エネ型設備の導入などがある。さらにライフスタイルの変更も検討対象とする。後者は、長寿命化やエコマテリアルの採用などがある。また、建築物は、ライフサイクルが長いために、都市内のすべての建築が更新されるまでに数十年以上かかること、都市計画的には建物規模の誘導が可能であること、家族構成・住宅面積・就業人口比率・勤務時間などのストーリーラインによって影響を受ける社会的な要因が大きいことなどの特徴を有する。研究ではまず、これらの複雑な要素を考えずに複数の都市に導入した場合のエネルギー消費量削減のポテンシャルを求める。次に中期解析に用いる建築物の更新サイクルの検討を対象都市に対して行うと共に、省エネ型の技術の普及を予測し、これらを建築物のエネルギー消費モデルに組み込む。さらに社会情勢の変化に伴う業務用建築、住宅の変化シナリオを作成し、エネルギー消費量、CO₂排出量を求める。

H16~17年度は、住宅の運用段階を対象とした「住宅のエネルギー消費量とCO₂排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法」を開発した。H18年度は、事務所ビル起因CO₂排出量の予測モデルを開発し、H19年度は、このモデルを全用途の業務用建物（事務所ビル、商業施設、医療施設、教育施設、宿泊施設、その他）に拡張した。H20年度は、住宅の建設・改修・解体起因CO₂排出量予測モデルを開発した。H16~17年度の成果である住宅の運用段階の予測モデルと併せ、住宅のライフサイクルを通じた予測が可能となった。以上より、わが国の建築部門のCO₂排出量の2050年までの予測が可能となり、温室効果ガス削減目標の達成に向けた検討が可能となった。

[キーワード] 業務用建築、住宅、省エネルギー、将来予測、シナリオ

1. はじめに

本研究では、業務建築や住宅の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設や改修、解体に伴う誘発環境負荷を予測する手法、また、これに基づきCO₂排出量削減目標の達成に向けたシナリオを提示する。前者の対策には、断熱性能の向上、省エネ型設備の導入などがあり、後者の対策には、長寿命化やエコマテリアルの採用などがある。さらにライフスタイルの変更も検討対象とする。建築物は、ライフサイクルが長いために、都市内のすべての建築が更新されるまでに数十年

以上かかること、都市計画的には建物規模の誘導が可能であること、家族構成・住宅面積・就業人口比率・勤務時間などのストーリーラインによって影響を受ける社会的な要因が大きいことなどの特徴を有する。研究ではまず、これらの複雑な要素を考えずに複数の都市に導入した場合のエネルギー消費量削減のポテンシャルを求める。次に中期解析に用いる建築物の更新サイクルの検討を対象都市に対して行うと共に、省エネ型の技術の普及を予測し、これらを建築物のエネルギー消費モデルに組み込む。さらに社会の変化に伴う業務用建築、住宅の変化シナリオを作成し、エネルギー消費量を求める。

2. 研究目的

民生部門のCO₂排出量は2005年度時で1990年度に比べて33%増加しており、業務用建築、住宅における温暖化対策が今後の重要な政策的課題と位置づけられる。そこで本研究では、業務用建築、住宅起因CO₂排出量の超長期予測モデル（以下、業務用予測モデル、住宅予測モデル）を開発し、温室効果ガス削減目標の達成に向けた対策について検討することを目的とする。

3. 研究方法

（1）業務用建築起因CO₂排出量の2050年までの都道府県別予測

予測モデルの概要（図1）

予測モデルの概要を図1に示す。予測モデルは以下の3つのサブモデルから構成されている。

- 床面積予測モデル：ストック／新築／改修床面積を都道府県別に2050年まで予測
- 床面積当りエネルギー消費量評価モデル：低炭素技術の導入による床面積当りのエネルギー消費量、CO₂排出量の削減効果を評価
- 低炭素技術の導入評価モデル：各低炭素技術について、経済合理的な導入率を評価

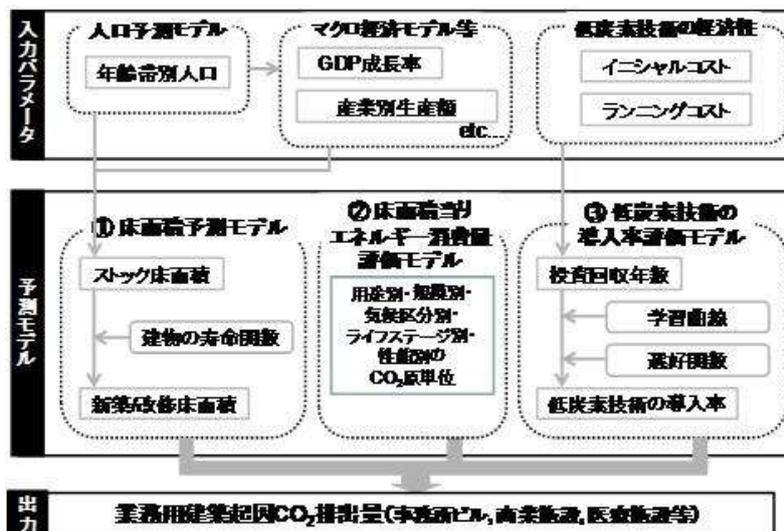


図1 予測モデルの概要

a. 床面積に関する予測モデル（図1-①）

i. ストック床面積の2050年までの予測（図2）

ストック床面積は、環境省「脱温暖化2050プロジェクト」長期シナリオ研究チームの推計値

を引用した¹⁾。ストック床面積の推計に用いられた説明変数および推計結果（都市集中型社会：シナリオA、地方分散型社会：シナリオB）をそれぞれ表1、図2に示す。

表1 業務用建築のストック床面積の説明変数

用途	主な説明変数	その他の説明変数
事務所ビル	生産年齢人口	在宅勤務率など
商業施設	商業生産額	無店舗販売率
教育施設	就学年齢人口 (年齢帯別)	就学率 (年齢帯別)
医療施設	人口 (年齢帯別)	罹患率 (年齢帯別)
宿泊施設	宿泊業生産額	—
その他	総人口	—

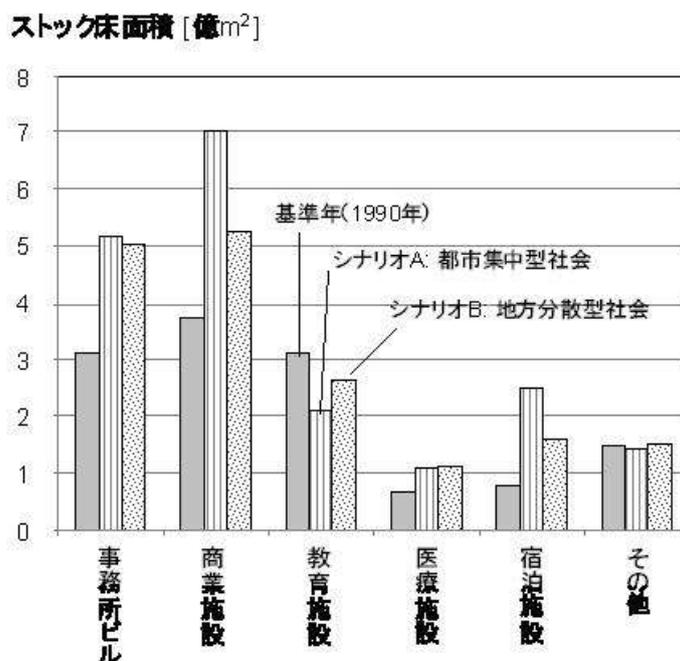


図2 ストック床面積の予測結果(全国)

ii 新築・改修床面積の2050年までの予測（図3、4）

2005年度までの新築床面積については、建築着工統計²⁾に基づき推計した。それ以降は、毎年の新築床面積が業務用建築の残存率関数³⁾に従い減少する一方で、ストック床面積を満たすように毎年の新築床面積を予測した。改修床面積に関しては、新築後20年周期で改修工事が行われると仮定し、毎年の改修床面積を予測した。新築・改修床面積の予測結果を、長寿命化対策の有無別にそれぞれ図3、4に示す。

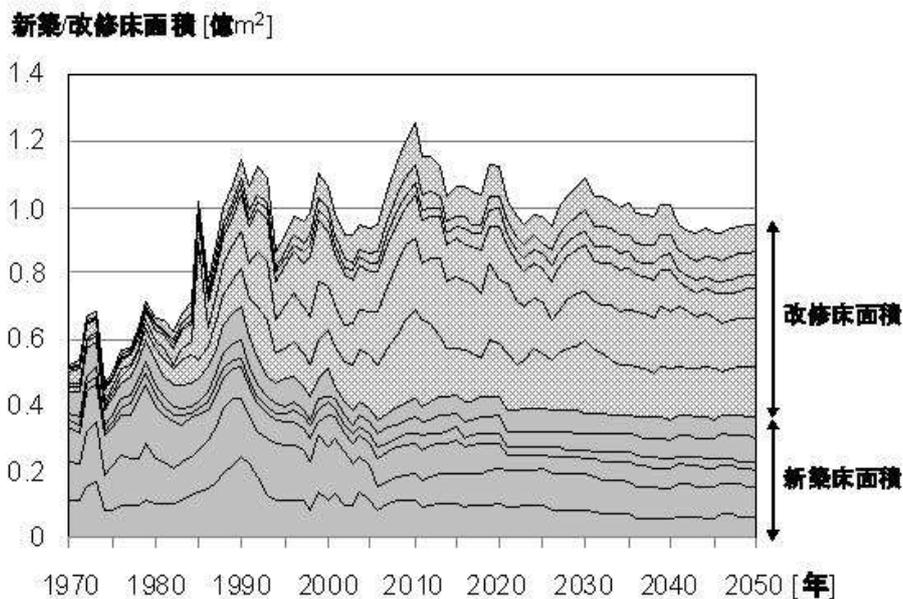


図3 新築・改修床面積の予測（長寿命対策なし）

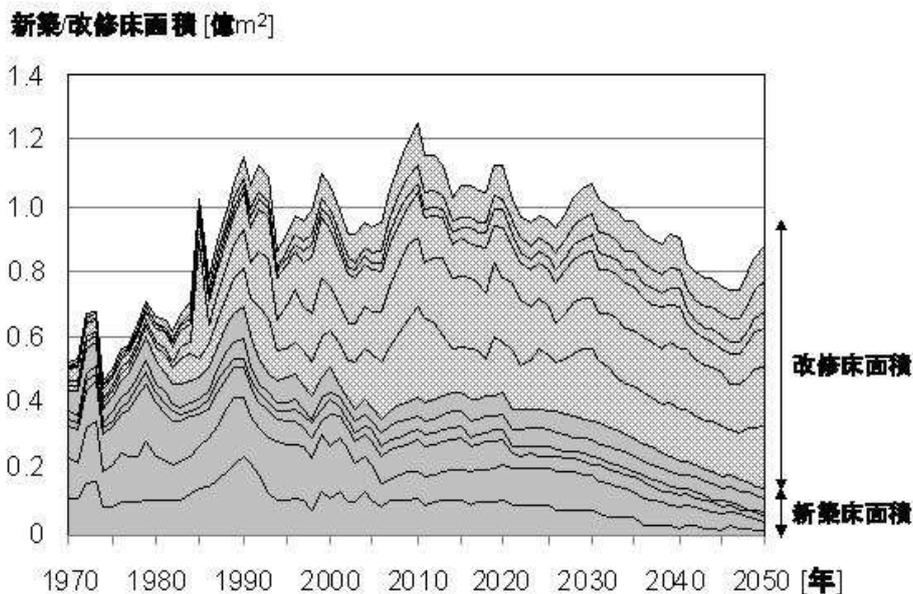


図4 新築・改修床面積の予測（長寿命対策あり）

b. 床面積当りのエネルギー消費量評価モデル（図1-②）

業務用建築のエネルギー消費/CO₂排出構造は、建物の用途や規模、所在地の気候等によって異なる。そこで、規模別の事務所ビルの標準モデルを設定し、各モデルビルに様々な低炭素技術を採用した場合のCO₂原単位を、規模別、気候区分別、ライフステージ別に算出し、データベースを作成した。データベース構築に必要な諸条件について以下に示す。

i. 業務用建築の標準モデルの設定

本研究で設定した各用途の業務用建築の標準モデルの概要を表2に示す。

表2 標準モデル建物の概要

用途	規模	延床面積	階数	コア	熱源方式
事務所ビル	小規模 (～1999m ²)	323m ²	F3	サイド	個別
	中規模 (2000～9999m ²)	3,447m ²	F7+B1	サイド	個別
	大規模 (10000m ² ～)	20,429m ²	F14+B1	センター	中央
商業施設	小規模 (～1999m ²)	336m ²	F1	サイド	個別
	中・大規模 (2000m ² ～)	7,635m ²	F8+B1	サイド	中央
教育施設	—	1,222m ²	F3	サイド	個別
医療施設	小規模 (～1999m ²)	414m ²	F2	サイド	個別
	中規模 (2000～9999m ²)	4,088m ²	F3+B1	サイド	個別
	大規模 (10000～m ²)	19,482m ²	F7+B1	センター	中央
宿泊施設	小規模 (～1999m ²)	342m ²	F3	サイド	個別
	中・大規模 (2000m ² ～)	6,210m ²	F10+B1	センター	中央
その他	—	662m ²	F3	サイド	個別

ii. 評価対象とする低炭素技術の選定

「官庁施設の環境保全性に関する基準」⁴⁾に基づき、CO₂削減効果が大きい低炭素技術を選定した(表3)。

表3 評価対象とする低炭素技術

		規模	標準	新築時の対策	改修時の対策
長寿命化	階高のゆとり	全	3.8m	4m	←
	天井高のゆとり		2.6m	2.8m	
	床荷重のゆとり		2900N/m ²	4500N/m ²	
	十分な耐久性		建築基準法で定められた基準	同50%増	
外皮性能	外壁の高断熱	全	PAL :	PAL :	←
	窓・ブラインド		300～320MJ/年・m ²	225～240MJ/年・m ²	
熱源方式	高効率熱源	小中	EHPビルマルチ		
			平均COP : 2.5	(～2020年)平均COP : 4.5 (2021年～)平均COP : 6.0	←
	氷蓄熱 全熱交換機	大	ガス吸収式冷温水		
			平均COP : 0.9	(～2020年)平均COP : 1.2 (2021年～)平均COP : 1.6	(～2020年)平均COP : 1.2 (2021年～)平均COP : 1.6
		無	有	←	
		全	無	有	←
熱搬送方式	制御方式	大	CAV	VAV	←
空調方式	外気量制御	全	無	有	←
	空調方式	大	標準	タスク&アンビエント方式	←
照明方式	高効率照明	全	標準	(～2020年)電力消費量20% 減 (2021年～)電力消費量50% 減	←
	初期照度補正		無	有	←
	昼光制御		無	有	←
エレベータ	制御方式	全	交流帰還	交流VVVF	←
給湯方式	高効率給湯	全	CEC/HW : 1.0	(～2020年) CEC/HW : 0.67	←
				(2021年～) CEC/HW : 0.5	←

iii. エネルギー消費量/CO₂排出量の評価方法

新築・改修時のCO₂排出量の評価には、建築物のLCA計算ツール⁵⁾を用いた。運用時のエネルギー消費量の評価には、空調に関してビル空調熱源経済性評価プログラムFACES⁶⁾を、空調以外に関してCEC計算基準⁷⁾を用い、年度別の電力CO₂原単位を乗じることによってCO₂排出量に換算した。

c. 低炭素技術の導入評価モデル（図1-③）

各低炭素技術の導入率は経済性に強く影響され、導入率と投資回収年数の関係は図5に示す選好関数で表されることが知られている⁸⁾。また、投資回収年数に影響を与える初期単位コストは、累積生産量が増加するほど低下し、その関係は図6に示す学習曲線として表される⁹⁾。選好関数と学習曲線に基づき、各低炭素技術の導入率を規模別、新築・改修時別に予測した。例として、大規模事務所ビルの新築時における各低炭素技術の導入率を図7に示す。なお、低炭素技術の効率向上は、超長期エネルギーロードマップビジョン¹⁰⁾を参考にした。

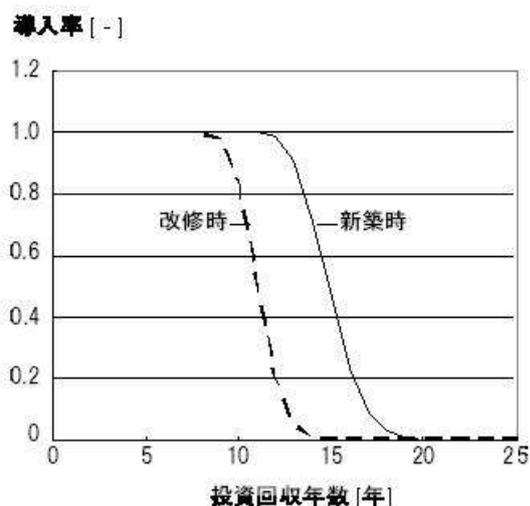


図5 低炭素技術の選好関数

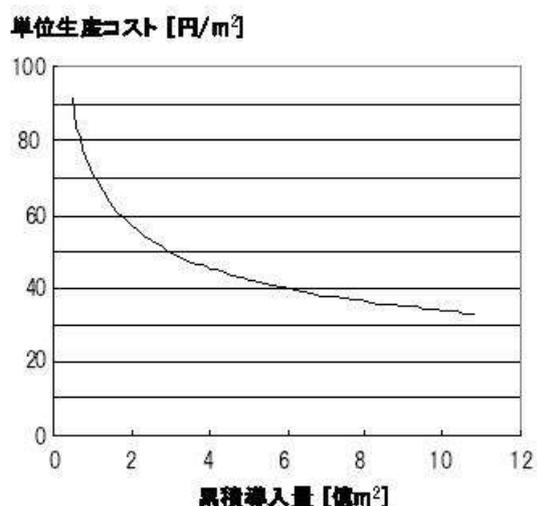


図6 照明方式における学習曲線の事例

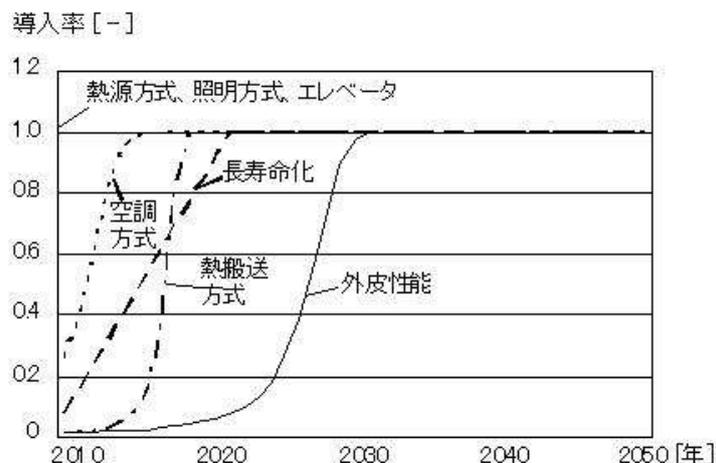


図7 各低炭素技術の導入率の推移（大規模事務所ビル、新築時の場合）

(2) 住宅起因 CO₂ 排出量の 2050 年までの都道府県別予測

1) 建設・改修・解体段階の予測モデルの概要

予測モデルの概要を図 8 に示す。予測モデルは、以下のモデルより構築される。

- a. 床面積の予測モデル： ストック／新築／改修床面積を都道府県別に 2050 年まで予測
- b. 床面積当たりの CO₂ 排出量評価モデル： 低炭素技術の導入による床面積当たりのエネルギー消費量、CO₂ 排出量の削減効果を評価

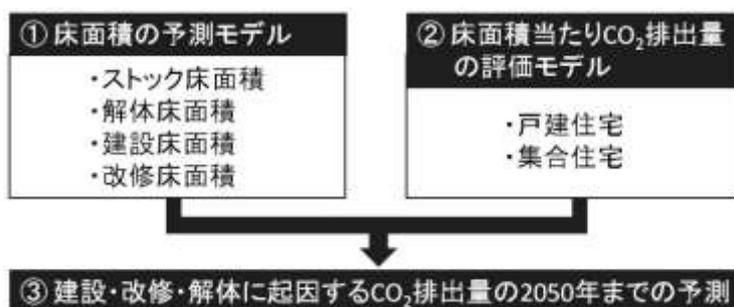


図 8 予測モデルの概要

これにより、年別、都道府県別、将来社会シナリオ別 (A シナリオ：都市集中型社会、B シナリオ：地方分散型社会)、家族類型別 (単独、夫婦のみ、夫婦と子、ひとり親と子、その他)、用途別 (戸建、集合)、構造別 (木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造) の CO₂ 排出量の予測が可能となる。

a. 床面積の予測モデル (図 8-①)

床面積の予測は、シナリオ別に i. 予測戸数、ii. 平均延べ床面積、iii. 構造比、を乗じることで算出される。それぞれについて以下で説明する。

i. 予測戸数

- ①ストック戸数の予測：ストック戸数は、環境省「脱温暖化プロジェクト」長期シナリオ研究チームの開発した建築物動態モデル (住宅)¹¹⁾ より算出した。結果を図 9 に示す。

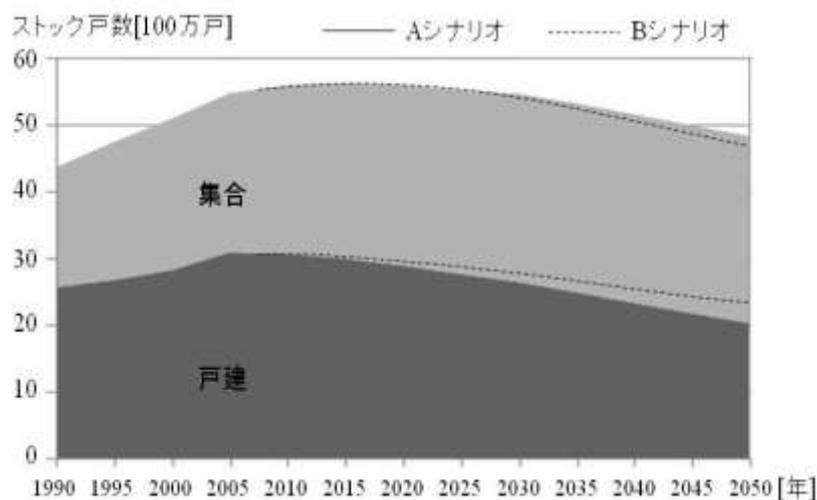


図 9 ストック戸数の予測結果

- ②解体戸数の予測：解体戸数は、①で算出したストック戸数に解体率を乗じることで算出した。解体率は、過去のストック総数に対する住宅の減少割合¹²⁾より、戸建住宅で1.5%/年、集合住宅で2.0%/年とした。解体戸数の経年別内訳は、統計値¹²⁾より設定した(表4)。

表4 解体戸数の経年別内訳

経過年	0-10年	10-20年	20-30年	30-40年	40-60年
戸建	0%	0%	55%	25%	20%
集合	0%	30%	35%	20%	15%

- ③建設戸数の予測：建設戸数の予測は、前年のストック戸数から②で算出した解体戸数を減じた戸数と当該年ストック戸数との差とした。
- ④改修戸数の予測：改修は建設後20年毎に行われるとし、改修戸数は建設した住宅の経年別減少率¹²⁾(表5)に、③で算出した建設戸数を乗じ、改修年(建設後20年毎)の戸数とした。

表5 着工した住宅の経年別減少率

経過年	0-10年	10-20年	20-30年	30-40年	40-60年
戸建	0%/年	0%/年	5.5%/年	2.5%/年	1%/年
集合	0%/年	3%/年	3.5%/年	2%/年	0.75%/年

ii. 平均延べ床面積

1950～2050年の都道府県別、家族類型別の割合を統計値¹²⁾より算出し、家族類型別の平均延べ床面積の推移を統計値¹²⁾より算出した。

iii. 構造比

1950～2003年の都道府県別の構造比の推移を統計値¹²⁾より算出した。2003年以降は2003年の値を用いた。

以上より床面積の2050年までの予測を行った。図10に全国の解体・改修・建設床面積の無対策ケースの予測結果を示す。また、表6に床面積の2050年における増減率(2005年比)を示す。Aシナリオの方が、解体床面積の増加率は小さく、建設床面積の減少率は大きくなった。改修床面積の減少率はBシナリオと比べあまり差はなかった。

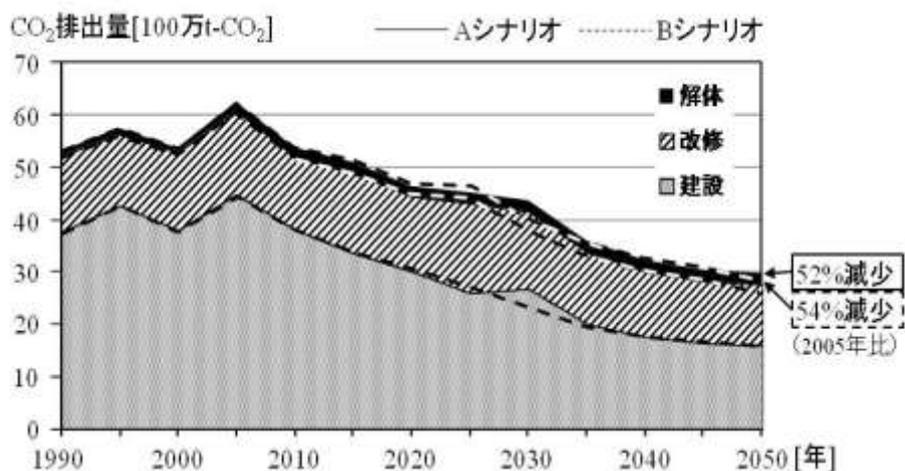


図10 全国の着工・改修・解体床面積の2050年までの推移

表 6 床面積の増減率 (2005 年比)

床面積	A シナリオ	B シナリオ
建設	73%減少	69%減少
改修	53%減少	54%減少
解体	3%増加	13%増加

b. 床面積当たりの CO₂ 排出量評価モデル (図 8-②)

建設・改修・解体段階の床面積当たりの CO₂ 排出量は、戸建、集合住宅共に、表 7 に示す一般的なモデルを想定し、「建物の LCA 指針」⁵⁾ を用い算出した。算出方法を式 (1) ~ (3) に示す⁵⁾。また、建設段階は、新築時に使う部材の製造・輸送、施工に起因する CO₂ 排出量、改修段階は、修繕・更新時に使う部材の製造・輸送に起因する CO₂ 排出量、解体段階は、解体時に発生する解体材の処理施設までの輸送に起因する CO₂ 排出量を対象とした。算出結果は表 8 に示す。

表 7 戸建住宅のモデルの概要^{※1}

	戸建住宅	集合住宅
構造	木造、S 造、RC 造	木造、S 造、RC 造
延床面積	125.86m ² (1F、2F とも 62.93 m ²)	5000m ²
構成資材	一般的に使用されている仕様を設定	建物の LCA ツール (AIJ-LCA&LCW Ver. 4.04) のデフォルト値
資材量	部材拾いにより算出	躯体工事における代表的な資材量 (統計値) ¹³⁾

※1 S 造：鉄骨造、RC 造：鉄筋コンクリート造、SRC 造：鉄筋鉄骨コンクリート造、代表的な資材量：コンクリート、型枠、鉄骨、鉄筋

$$\cdot \text{建設段階 } [CO_2\text{-kg/m}^2/\text{年}] = \Sigma (\text{部材量 } [kg/m^2] \times \text{各部材当たり } CO_2\text{排出量}[CO_2\text{-kg/kg}]) / \text{建築寿命}[年] \quad (1)$$

$$\cdot \text{改修段階 } [CO_2\text{-kg/m}^2/\text{年}] = \Sigma (\text{部材量 } [kg/m^2] \times \text{各部材当たり } CO_2\text{排出量}[CO_2\text{-kg/kg}] \times \text{修繕率 } [%/年]) + \Sigma (\text{部材量 } [kg/m^2] \times \text{各部材当たり } CO_2\text{排出量}[CO_2\text{-kg/kg}]) \times \text{建築寿命 } [年] / \text{部材の耐用年数 } [年] \quad (2)$$

$$\cdot \text{解体段階 } [CO_2\text{-kg/m}^2/\text{年}] = \Sigma (\text{搬出重量}[t] / \text{積載率 } [t/t] \times \text{運搬距離}[km]) \times \text{道路貨物輸送 } CO_2\text{原単位}[kg-CO_2/t \cdot km] \quad (3)$$

表 8 床面積当たりの CO₂ 排出量 (kg-CO₂/m²)

	戸建			集合 ^{※2}		
	木造	S 造	RC 造	木造	S 造	RC 造
建設	267.5	451.5	504.9	267.5	477.9	697.4
改修	75.6	63.0	54.3	75.6	367.9	362.6
解体	15.1	22.4	39.7	15.1	39.6	60.7

※2 木造の値は戸建住宅の値を利用した。RC 造は、SRC, RC 造の CO₂ 排出量の平均値とした。

2) 運用段階の予測モデルの概要

a. 推計方法

住宅のエネルギー消費量とCO₂排出量の計算フローを図11に示す。都道府県／都市別、7家族類型別（①高齢単独世帯、②その他単独世帯、③高齢夫婦のみの世帯、④その他夫婦のみの世帯、⑤夫婦と子から成る世帯⑥ひとり親と子から成る世帯、⑦その他の世帯）に、i. 暖冷房、ii. 給湯、iii. その他（厨房、娯楽情報、家事衛生、照明）別に計算する。

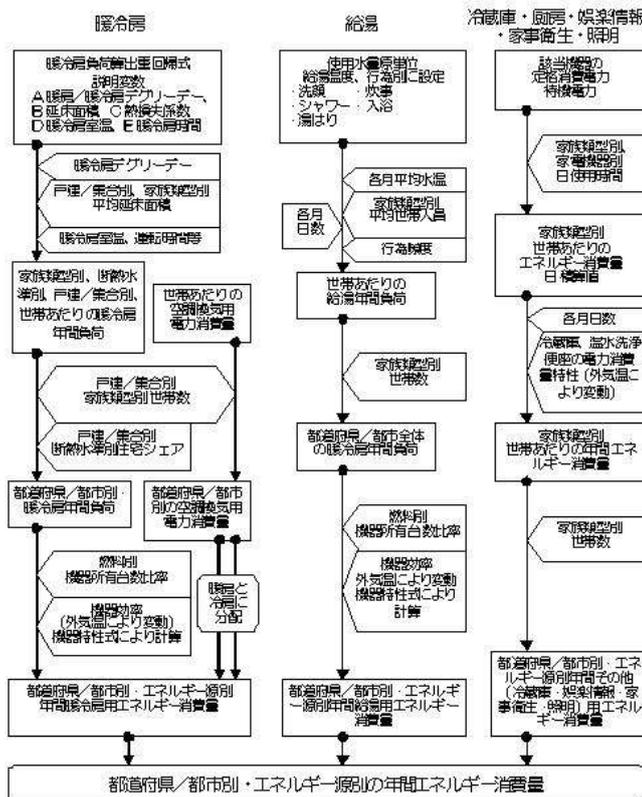


図11 住宅エネルギー消費推計マクロモデルの計算フロー

i. 暖冷房用エネルギー消費量の計算

気象条件、設定室温等を考慮した数十パターンでの建物条件による熱負荷計算結果を元に重回帰式を作成し、その式を推計ツールに組み込んだ。推計ツールには、家族類型や地域特性を考慮した延床面積、断熱性能等の変数を用意し、家族類型や検討地域に合わせて熱負荷原単位を変えて利用する仕組みとした。家族類型別の負荷原単位と世帯数から地域全体の負荷を求め、燃料別分担と燃料別平均COPから暖冷房用のエネルギー消費量を算出した。なお、空調換気扇の電力消費量もここに算入した。マクロモデルでの都道府県／都市別暖冷房負荷推計に利用するため、重回帰分析を行い、暖冷房負荷重回帰式を作成した。重回帰分析の基データとなる各条件の熱負荷は、戸建住宅および集合住宅の標準モデルについて、住宅用熱負荷計算ソフトSMASH¹⁴⁾で計算した値を利用した。説明変数のシミュレーション条件は、熱損失係数4水準、それ以外の3つの説明変数(デグリデー、設定室温、延べ運転時間)は3ケースずつ設定した。重回帰分析の観測数は各説明変数の計算条件の組み合わせで33×4=108通りとした。

ii. 給湯用エネルギー消費量の計算

給湯用エネルギー消費量の計算フローを図11に示す。使用量原単位および利用温度には、空気調和・衛生工学会（以下、空衛学会）の研究成果¹⁵⁾を利用した。給湯使用行為頻度テーブル、世帯数、各月平均水道水温から給湯負荷を求め、燃料別分担と燃料別平均COPから給湯用エネルギー消費量を算出した。

iii. 厨房・娯楽情報・家事衛生・照明用エネルギー消費量の計算

厨房・娯楽情報・家事衛生・照明用エネルギー消費量の計算フローを図11に示す。空衛学会の研究成果¹⁵⁾を利用し、家族類型別に各家電機器の電力消費量日積算値を設定した。日積算値を作成する際の家族構成モデルは、家族類型別に1種のモデルを仮定して当てはめた。日積算値に日数および世帯数を乗じて厨房他4用途のエネルギー消費量を算出した。

iv. 太陽熱利用量の計算

県庁所在都市毎に、南傾斜20度、南垂直面、最適角度別の単位集熱器面積あたりの年間太陽熱集熱量をデータベースに組み込んだ。戸建住宅、集合住宅別に、集熱器設置角度と普及率を入力して算出する。

v. 太陽光発電量の計算

太陽光発電量も太陽熱利用と同様に、県庁所在都市毎に、南傾斜20度、南垂直面、最適角度別の単位発電容量あたりの年間発電量をデータベースに組み込んだ。戸建住宅、集合住宅別に、太陽光発電パネルの設置角度と普及率を入力して算出する。

4. 結果・考察

(1) 業務用建築起因CO₂排出量の予測結果

1) 予測シナリオの設定

a. 床面積シナリオ

ストック床面積は将来の社会像（A：都市集中型、B：地方分散型）シナリオごとに算出し両シナリオの中間値を代表値として採用する（図12）。

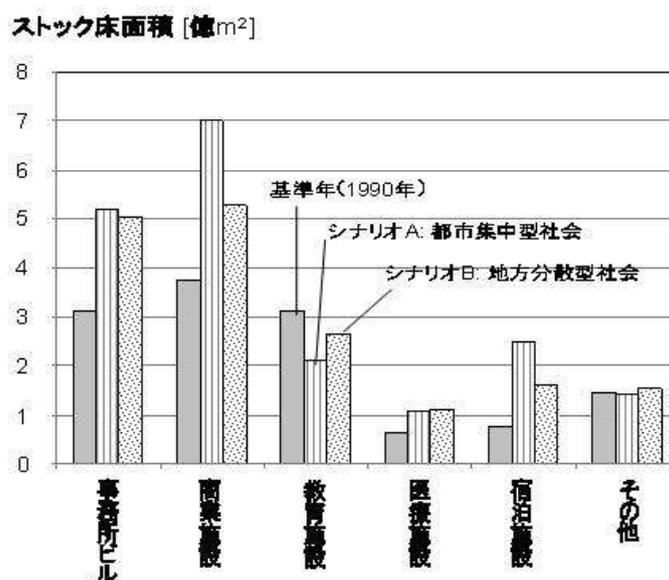


図12 ストック床面積の予測結果(全国)

b. 電力CO₂原単位のシナリオ

電力CO₂原単位を固定するシナリオと、改善されるシナリオを用意する。固定シナリオでは、2005年以降は2005年度の実績値（0.425kg-CO₂/kWh）を固定する。このシナリオでは、建築分野における努力による純粋な効果を評価するためである。一方、改善されるシナリオでは、経済産業省「超長期エネルギー技術ビジョンロードマップ」¹⁰⁾に基づき、2050年に2000年比で1/3まで削減（0.12kg-CO₂/kWh）されるものとする（図13）。このシナリオでは、建築分野と電力分野との複合的な努力を考慮することが可能となる。

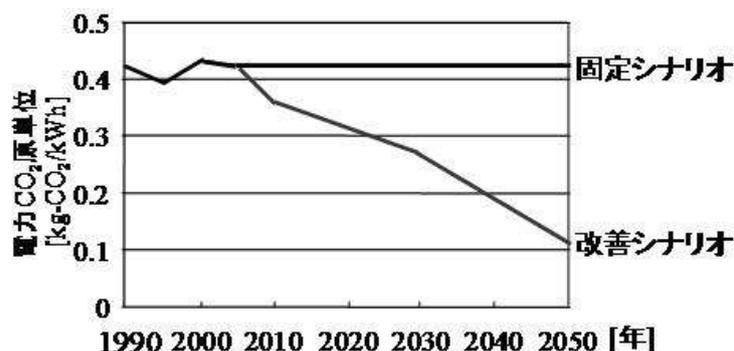


図13 電力CO₂原単位のシナリオ

c. 技術の普及シナリオ

本研究では、3つの対策シナリオを用意する。

- i. 無対策シナリオ：技術が一切普及しないと仮定
- ii. 通常対策シナリオ：経済合理性に基づき、投資を回収可能な範囲で技術が普及すると仮定
- iii. 徹底対策シナリオ：全ての技術を最大限普及させると仮定

これら3つの対策シナリオは、3.研究方法の(1)1)c.で解説した低炭素技術の導入率予測モデルにおいて、i. 無対策シナリオ：導入率=0で固定、ii. 通常対策シナリオ：投資回収年数を基に投資判断し、導入率を決定、iii. 徹底対策シナリオ：全ての技術の導入率を100%で固定、という条件設定で与えることにより、予測モデルに反映することができる。

2) CO₂削減ポテンシャル評価

a. 全国の業務用建築のCO₂削減ポテンシャル

前節で設定したシナリオに基づき、全用途の業務用建築の運用・新築・改修時CO₂排出量の予測結果を図14～16に示す。図14は電力CO₂原単位固定シナリオ、図15は電力CO₂原単位改善シナリオである。

図14において、技術が一切普及しなかった場合は2050年に2000年比で1%増加する一方、建築分野の努力（投資が回収可能な範囲の努力）によって44%削減可能であることが示された。これより、投資が回収可能な範囲の対策でも大幅な削減効果があることが明らかになったが、削減目標を達成するにはまだ不十分である。建築分野における更なる対策か、あるいは他分野（特に発電分野）との複合的な対策が求められる。そこで、次は電力CO₂原単位が改善され

たシナリオにおいて予測を実施する。

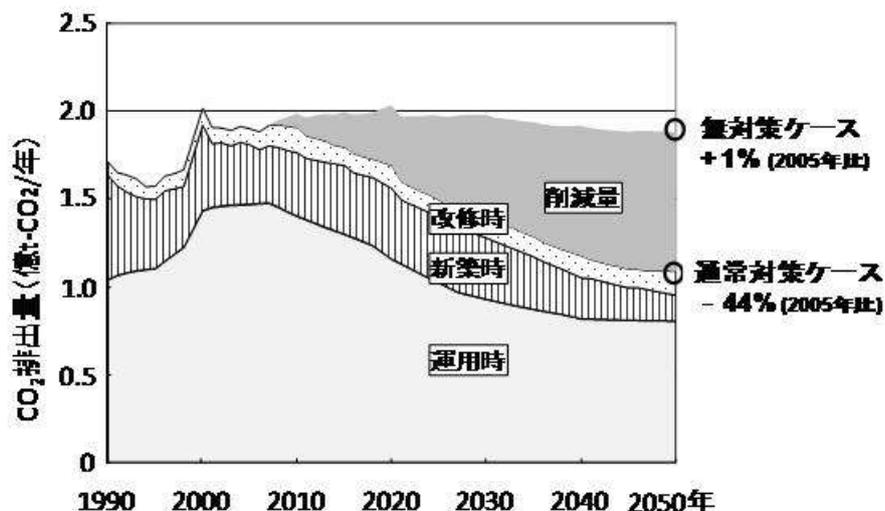


図14 CO₂排出量の予測結果（全用途、電力固定シナリオ）

図15において、技術が一切普及しなかった場合は2050年に2000年比でも55%減少し、建築分野の努力（投資が回収可能な範囲の努力）によって79%まで削減可能であることが示された。

なお、この図から、建築分野が何もしなくても大幅な削減ができるというメッセージをくみ取るのは誤りである。なぜならば、電力CO₂原単位は約1/3へと大幅に改善されるシナリオを想定しているが、原子力発電の徹底推進等の多大な努力が必要であり、必ず実現される保証がないからである。電力CO₂原単位が確実に削減される見通しが無い以上、電力分野の努力に依存するのはリスクが高く、建築分野においても努力を進めておくことが重要と考えられる。

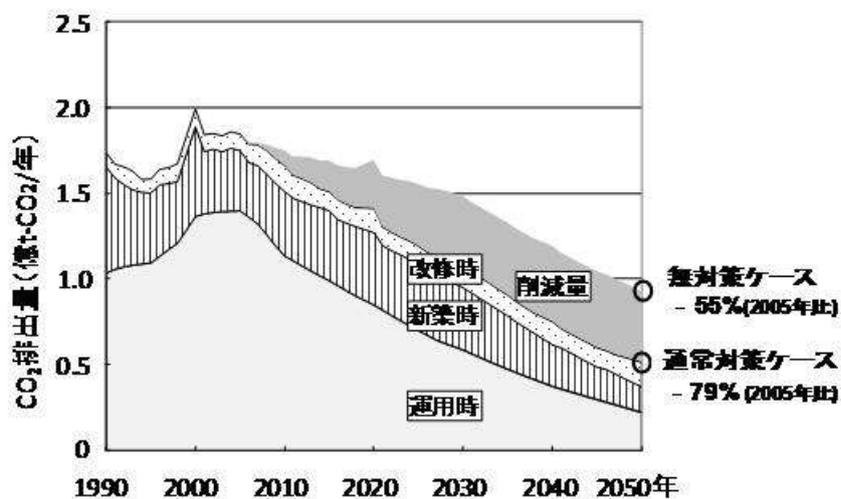


図15 CO₂排出量の予測結果（全用途、電力改善シナリオ）

次に、徹底対策ケースについて予測を行った。徹底対策ケースでは、耐用年数内では投資が回収できない技術、例えば太陽光発電や外皮の高断熱化、も最大限導入していくことを想定している。

図16に、運用段階のCO₂排出量の推移を、無対策、通常対策、徹底対策ケース毎に示す。先述の太陽光発電や外皮の高断熱化が加わった徹底対策ケースでは、最大64%まで削減可能であることが示された。これは、太陽光発電による効果が大きく、特に発電効率が向上する2020年以降からは大幅な削減が見込める。

現在、太陽光発電は高価であるため普及が進みづらい状況にあり、補助金などによる普及促進支援策が必要不可欠となる。しかし、今後は量産効果により単価が低下し、さらにイギリスやドイツのように補助金以外の支援策（設置の義務化、固定価格買い取り制度等）が発動することも考えられ、太陽光発電への追い風はますます強まっている。このように、徹底対策ケースは決して実現不可能ではなく、建築分野の対策のみで60%以上削減を達成することもシナリオの一つとして存在するのである。

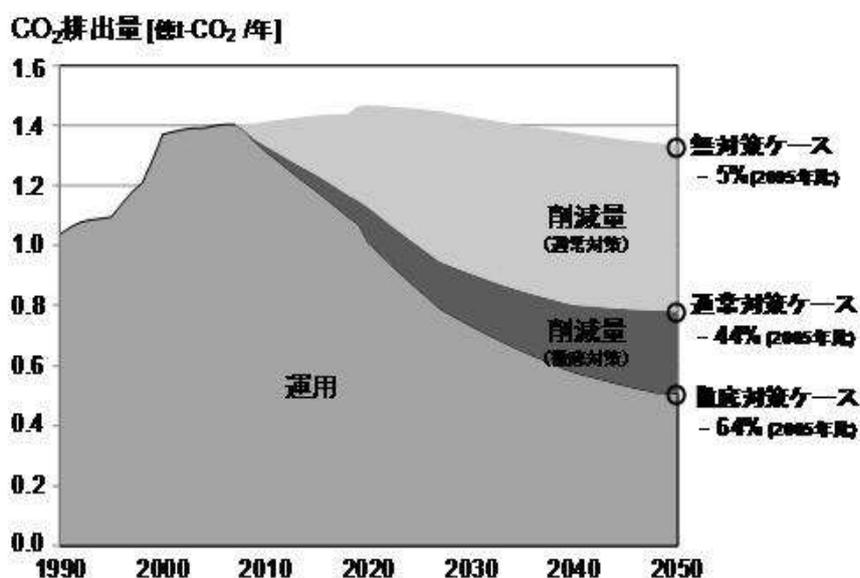


図16 CO₂排出量の予測結果（全用途、電力固定シナリオ、運用のみ）

b. 建物用途別の業務用建築のCO₂削減ポテンシャル

これまでは全ての建物用途の総和を議論してきたが、本節では建物用途別のCO₂削減ポテンシャルの評価を行う。用途建物毎のCO₂排出削減量の内訳を図17に示す。なお、電力固定シナリオ、通常対策シナリオにおける削減量である。

削減ポテンシャルが大きい建物用途は、商業施設（2050年時の総削減量の33%）、宿泊施設（同18%）、医療施設（同14%）であり、特に商業施設における削減ポテンシャルが大きいことがわかる。この原因として、①商業施設のストック床面積が大きいこと、②床面積当りエネルギー消費量大きいことが挙げられる。②は大きな要因である。なぜならば商業施設は基本的に接客業であるため、節約型ライフスタイルへの移行が難しく、床面積当りエネルギー消費量が大きくなる傾向があるからである。今後は商業施設における温暖化対策が重要となる。

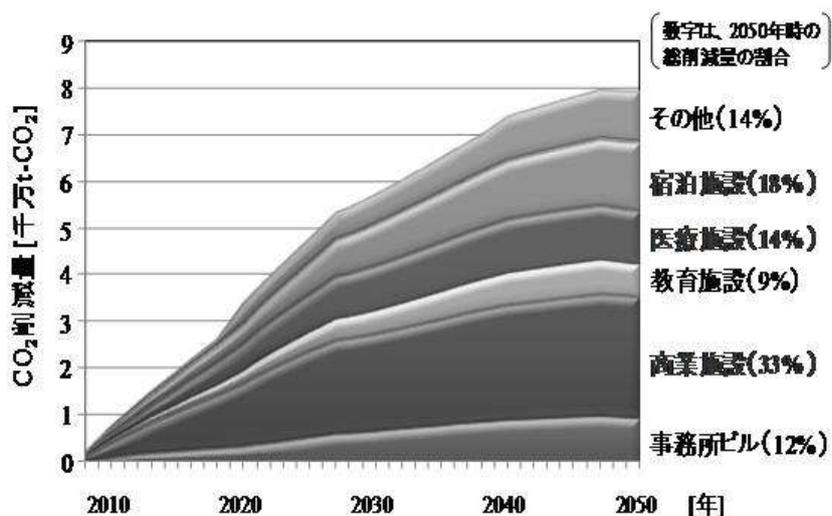


図17 CO₂削減量の内訳（電力固定シナリオ、通常対策シナリオ）

c. 都道府県別の業務用建築のCO₂削減ポテンシャル

近年、東京都や横浜市などの自治体における低炭素化対策が盛んである。自治体単位での対策には、地域の自然的社会的条件に応じて、温室効果ガスの排出抑制に向けた総合的かつ計画的な施策を策定・実施することができるという利点があり、今後も低炭素社会の構築に向けて自治体の果たす役割は大きくなっていくことが予想される。

本研究で開発した予測モデルは、業務用建築からのCO₂排出量を都道府県別に予測することが可能である。予測した結果を図18に示す。東京都、神奈川県、大阪府、愛知県、福岡県という順にCO₂排出量が多く、これら上位5都府県だけで日本全体のCO₂削減ポテンシャルの約半分（45%）を占めていることが明らかになった。これらの自治体における重点的な対策が望まれる。

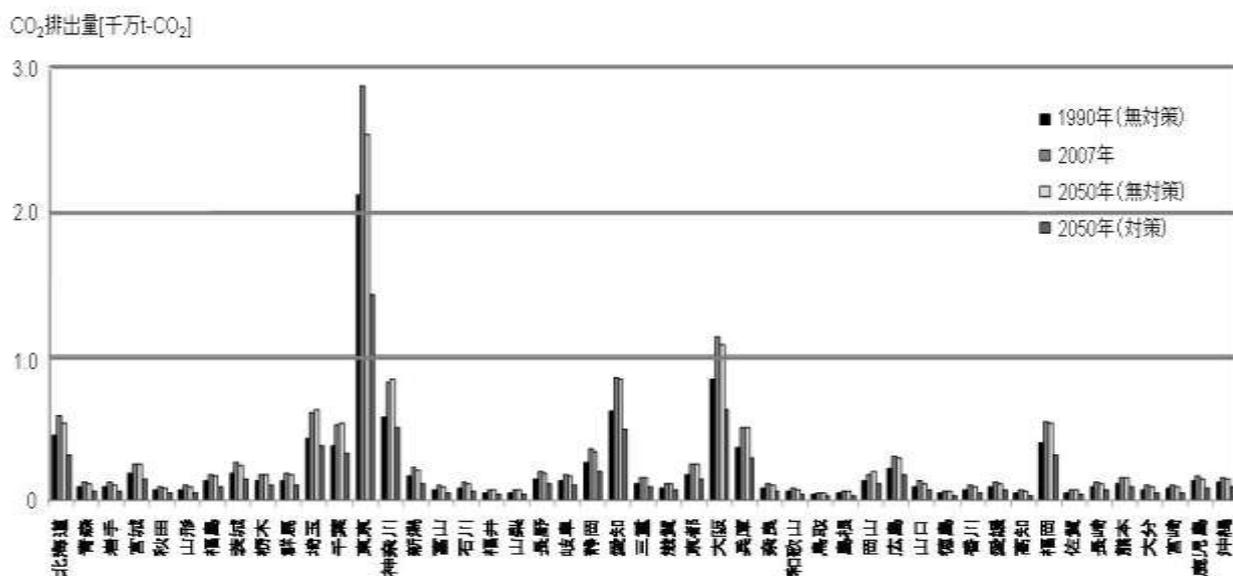


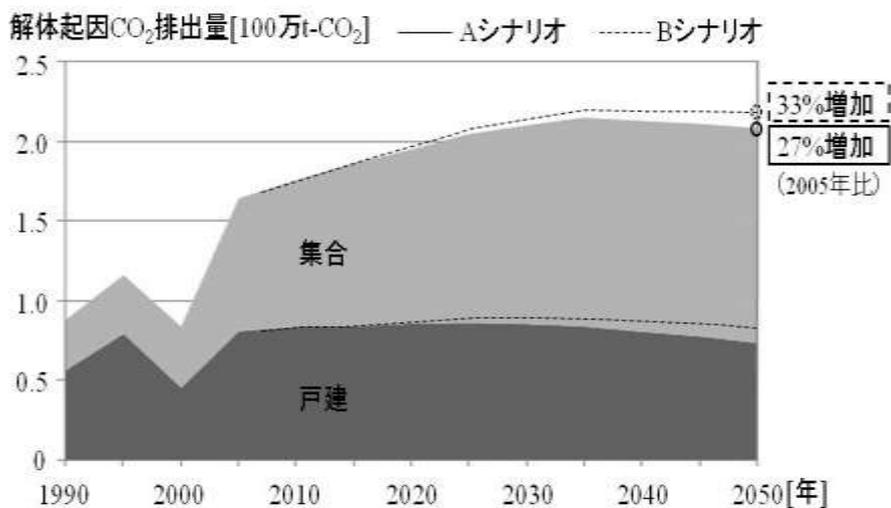
図18 都道府県別予測結果（全用途、電力固定シナリオ）

(2) 住宅起因CO₂排出量の予測結果1) 建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の予測a. 全国の建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の予測

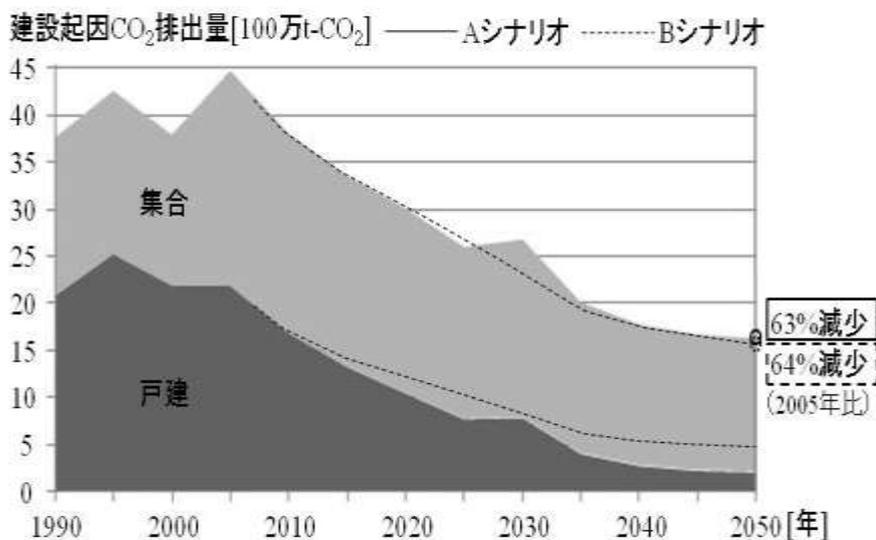
都道府県別の建設・改修・解体起因の CO₂ 排出量の 2050 年まで、無対策ケースでの予測を行った。

i. 解体起因 CO₂ 排出量

解体起因 CO₂ 排出量の予測結果を示す(図 19)。戸建起因の CO₂ 排出量は減少したが、集合起因の CO₂ 排出量が増加し、合計で 27%(A シナリオ)、33%(B シナリオ)増加した(2005 年比)。

図 19 解体起因 CO₂ 排出量の予測結果ii. 建設起因 CO₂ 排出量

建設起因 CO₂ 排出量の予測結果を示す(図 20)。戸建、集合起因の CO₂ 排出量は共に減少し、63%(A シナリオ)、64%(B シナリオ)減少した(2005 年比)。

図 20 建設起因 CO₂ 排出量の予測結果

iii. 改修起因 CO₂ 排出量

改修起因 CO₂ 排出量の予測結果を示す(図 21)。集合起因の CO₂ 排出量は増加したが、住宅起因の CO₂ 排出量が減少し、合計で 27%(A シナリオ)、33%(B シナリオ)減少した(2005 年比)。

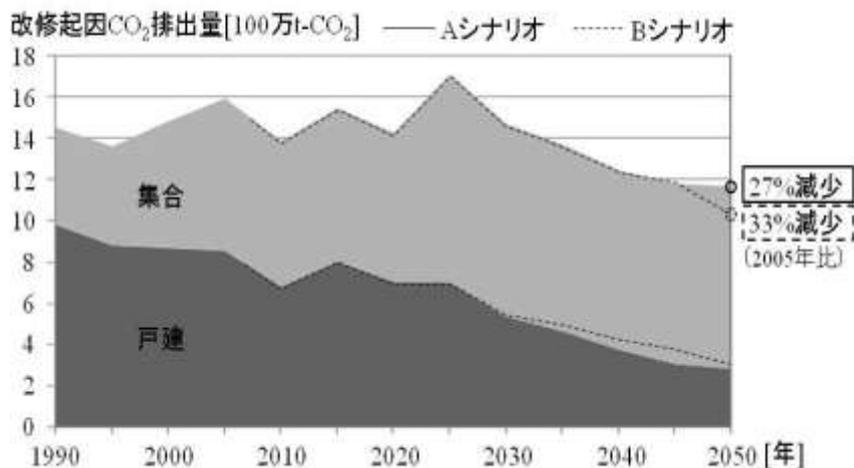


図 21 改修起因 CO₂ 排出量の予測結果

b. 都道府県別の建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の予測

図 22 に都道府県別の 2005 年と 2050 年 (A、B シナリオ) の比較結果を示す。A シナリオは、都市部において、人口の集中による床面積の増加から、CO₂ 排出量が多くなっている。また、B シナリオは、A シナリオと比べ、地方において、人口の増加による床面積の増加から CO₂ 排出量が増加している。ここで、A、B シナリオは両極端なケースを想定しているため、実際の CO₂ 排出量は 2 つのシナリオで提示された値の間に収まるものと考えられる。

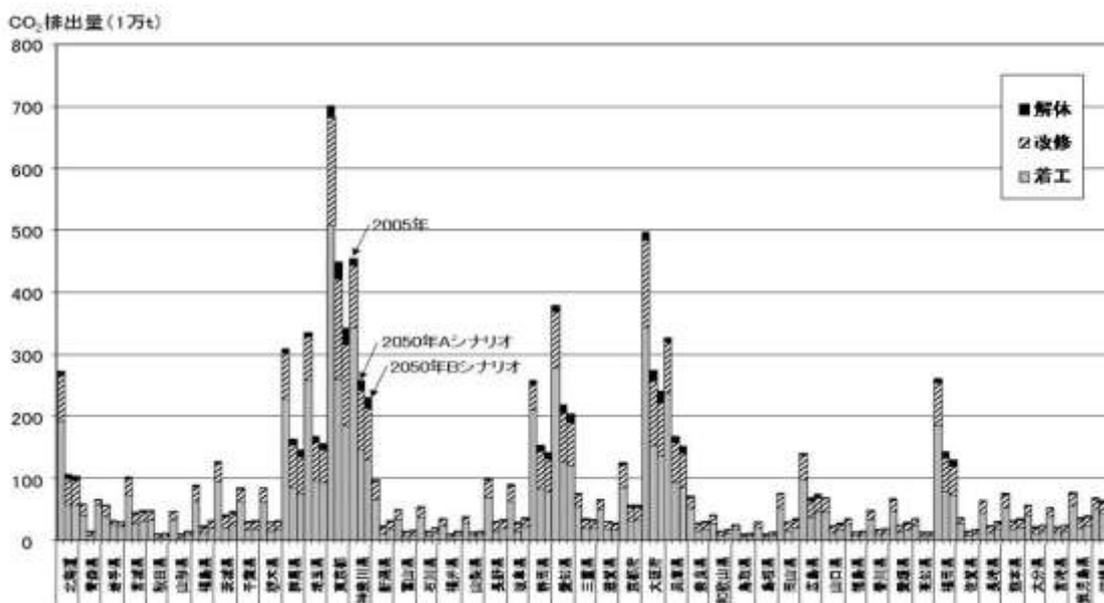


図 22 都道府県別の建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の予測結果

2) 運用起因 CO₂ 排出量の予測a. 全国の住宅の運用起因CO₂排出量の予測

全国の住宅のエネルギー使用用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を示す(図23)。電力のCO₂原単位が2005年以降変化せず(電気事業者の対策無し)、無対策ケースの場合は、2050年に5%増加する。2050年の電力のCO₂原単位が0.12 kg-CO₂/kWhまで削減されとした経済産業省超長期エネルギー技術ロードマップに基づくケースでは2050年には44%減となる。表9に示す住宅の対策を行ったケースでは、2050年に65%まで削減できるという結果が得られた。

表9 将来推計で仮定した省エネルギー対策の概要

	省エネルギー対策の内容
暖 冷 房	新築住宅の断熱強化(2020年までにすべての新築住宅が次世代省エネ基準を満たすものとした)
	既存住宅の断熱強化(2005年以降、毎年全住宅の1.0%が次世代省エネ基準を満たすように断熱改修されるものとした)
	省エネエアコンへの買替促進(2020年時点で全世帯平均の暖房COPが3.0から6.0へ、冷房COPが4.0から6.0へ、2050年時点で全世帯平均の暖房COPが4.0から8.0へ、冷房COPが6.0から8.0へ向上するものとした)
	灯油式から電気式の暖房機器への買換促進(2005年を基準として、電化率が2020年に1.5倍、2050年3倍になるものとした)
	暖房室温を2℃下げ、冷房室温を1℃上げる省エネ行動(2020年までに全世帯の30%で実行され、移行横ばいとした)
	暖房及び冷房の延べ運転時間を25%短縮する省エネ行動(2020年までに全世帯の30%で実行され、移行横ばいとした)
給 湯	電気温水器からヒートポンプ給湯機への買替促進(2020年時点までに完了、また、2050年までにCOP6.0に向上するものとした)。
	潜熱回収型給湯機への買替促進(2020年時点までに完了、熱効率は1.2倍に向上するものとした)
	灯油式から電気式の給湯機器への買換促進(2005年を基準として、電化率が2020年に1.5倍、2050年3倍になるものとした)
	省エネ行動の普及(①給湯温度を1℃下げる、②入浴回数を減らす。風呂給湯量を減らす。節水シャワーヘッドを使用する、③洗顔と炊事で湯を使うのを減らす。夏の洗顔・炊事には水を使うなどの省エネ行動が2020年には全世帯の50%で実行され、以降横ばいとした)
家 電 製 品	省エネ型冷蔵庫への買替促進(2005年を基準として、2020年には60%、2050年には70%、冷蔵庫の電力消費量が削減されとした)
	省エネ型テレビへの買替促進(2005年を基準として、2020年には50%、2050年には75%、テレビの電力消費量が削減されとした)
	省エネ行動の普及(①不使用時に家電のコンセントを抜く、②風呂の残り湯を洗濯に使う、③洗濯をまとめ洗いする。スピードコースで洗濯する、④廊下・浴室・洗面所の白熱灯から電球型蛍光灯に交換する、⑤温水洗浄便座のふたを閉める。温度設定を季節に合わせて調整するなどの省エネ行動が2020年には全世帯の50%で実行され、以降横ばいとした)
太 陽 熱 ・ 光	太陽熱給湯の普及(戸建住宅で4m ² /戸、集合住宅で2m ² /戸の太陽熱給湯器が2020年までに戸建で20%、集合住宅で2%、2050年までに戸建で40%、集合住宅で4%まで普及するものとした)
	太陽光発電(戸建住宅で4kW/戸、集合住宅で0.5kW/戸の太陽光発電が2020年までに戸建で10%、集合住宅で1%、2050年までに戸建で20%、集合住宅で2%まで普及するものとした)

注：その他、電力会社での努力分として、2010年の電力CO₂原単位は、電気事業者連合会の自主目標0.34kg-CO₂/kWh(1990年比20%削減)とした¹⁶⁾。なお2010年以降の公表値がないため、2050年までに1990年比60%削減まで対策が推進されるものとした。

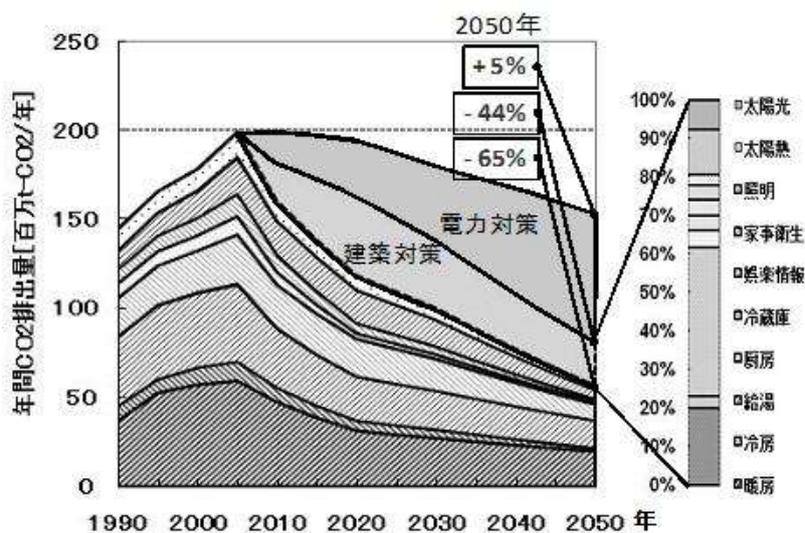


図23 全国の住宅CO₂排出量の予測結果(対策強化ケース)

b. 都道府県別の住宅の運用起因CO₂排出量の予測

47都道府県の住宅のエネルギー使用用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を示す(図24)。電力のCO₂原単位が2005年以降変化しない無対策ケース(電気事業者の対策無し)、2050年の電力のCO₂原単位が0.12 kg-CO₂/kWhまで削減されるとした経済産業省超長期エネルギー技術ロードマップに基づくケース(電力対策有り)、それに加えて表9に示す住宅の対策を行ったケース(電力対策+建築対策)において予測を行った。

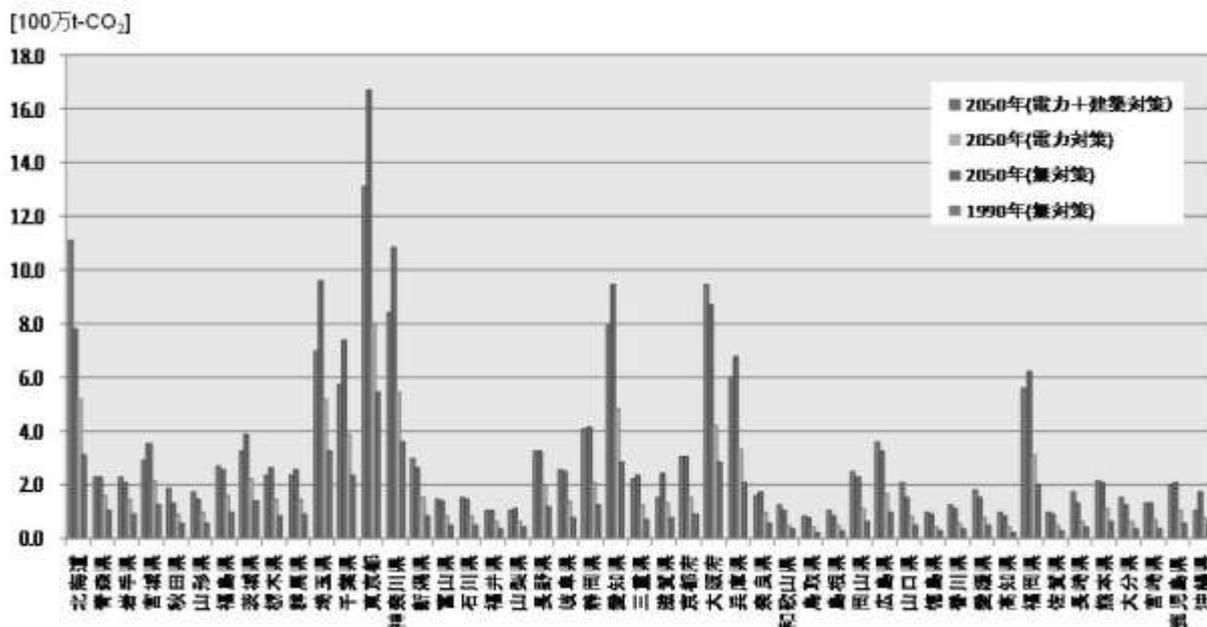


図24 都道府県別の住宅CO₂排出量の予測結果(対策強化ケース)

c. 代表的な都市における運用起因CO₂排出量の予測

代表的な都市として、札幌市、宇都宮市、広島市、那覇市のCO₂排出量の推計を行った。

i. 札幌市の住宅CO₂排出量の予測

(独)国立社会保障・人口問題研究所の予測と、札幌市の家族類型別世帯数の統計データを基に、札幌市の世帯数の将来推計を行った結果、図25に示すように、2005年に1990年比15%増となるのをピークに減少に転じ、2050年には1990年比23%減まで減少し続ける。

この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける札幌市内の住宅の用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を図26に示す。CO₂排出量は、2010年には1990比18%増という高いレベルに留まるものの2050年には46%減まで減少する。これに対し、表9に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比3%増に抑えられ、2050年には66%減にまで削減できるという結果が得られた。

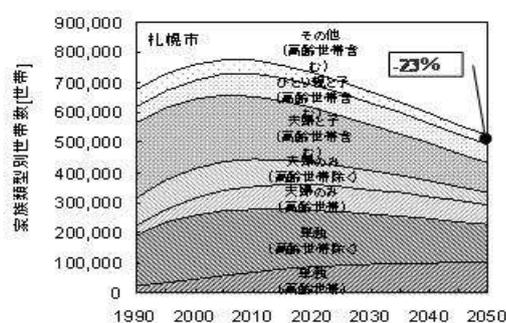


図25 札幌市の家族類型別世帯数の将来推計

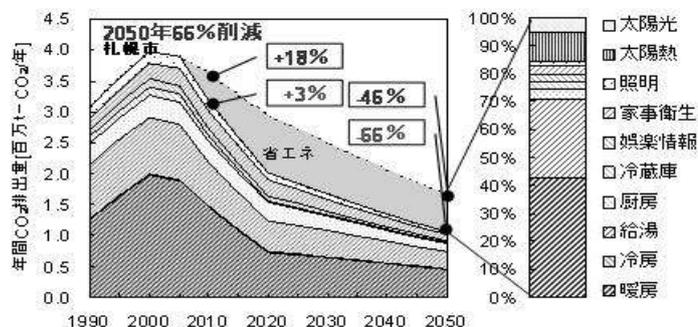


図26 札幌市の住宅CO₂排出量の予測結果 (対策強化ケース)

ii. 宇都宮市の住宅CO₂排出量の予測

宇都宮市の世帯数の将来推計結果を図27に示す。2020年に1990年比35%増になるまで増大を続け、2050年においても1990年比23%増に留まっている。この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける宇都宮市内の住宅の用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を図28に示す。CO₂排出量は、2010年には1990比31%増という高いレベルに留まり、2050年においても21%減に留まっている。これに対し、表9に示すような対策を強化したケースは、2010年には1990年比15%増に抑えられ、2050年には51%減にまで削減できるという結果が得られた。

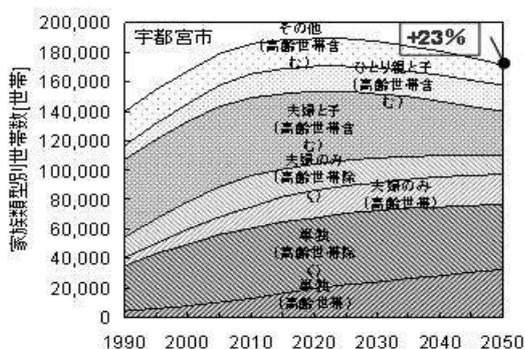


図27 宇都宮市の家族類型別世帯数の将来推計

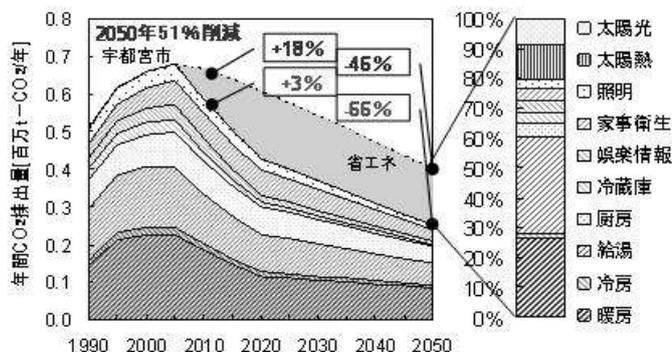


図28 宇都宮市の住宅CO₂排出量の予測結果 (対策強化ケース)

iii. 広島市の住宅CO₂排出量の予測

広島市の世帯数の将来推計結果を図29に示す。2010年に1990年比17%増となるのをピークに減少に転じ、2050年には1990年比12%減まで減少し続ける。この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける広島市内の住宅の用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を図30に示す。CO₂排出量は、2010年には1990年比18%増という高いレベルに留まるものの2050年には47%減まで減少する。これに対し、表9に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比4%減に抑えられ、2050年には68%減まで削減できるという結果が得られた。

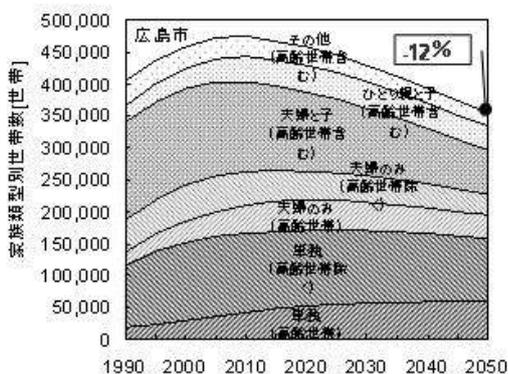


図29 広島市の家族類型別世帯数の将来推計

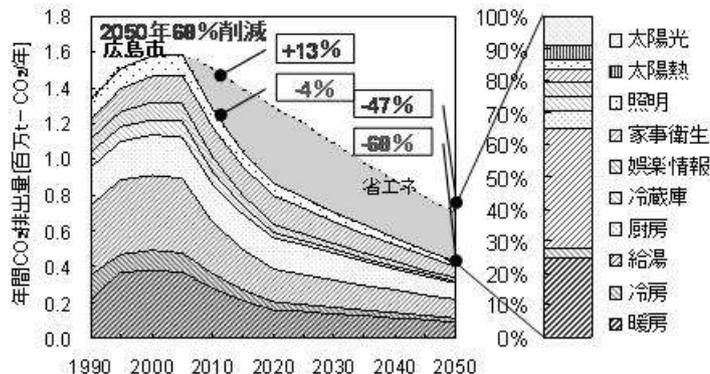


図30 広島市の住宅CO₂排出量の予測結果
(対策強化ケース)

iv. 那覇市の住宅CO₂排出量の予測

那覇市の世帯数の将来推計結果を図31に示す。2010年に1990年比42%増となり、2045年まで増大し続け、2050年でようやく減少に転ずるが1990年比64%増となる。この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける那覇市内の住宅の用途別CO₂排出量を2050年まで予測した結果を図32に示す。CO₂排出量は、2010年には1990年比31%増という大幅な増大し、2050年でも9%減に留まっている。これに対し、表9に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比16%増に留まり、2050年には46%減まで削減できるという結果が得られた。

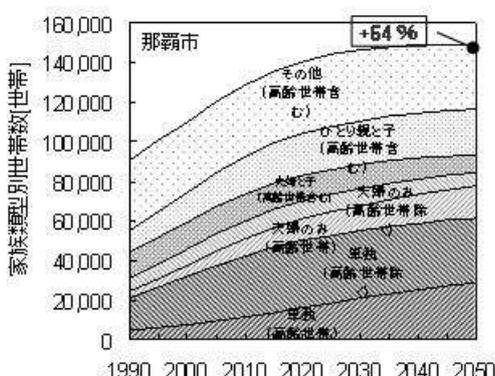


図31 那覇市の家族類型別世帯数の将来推計

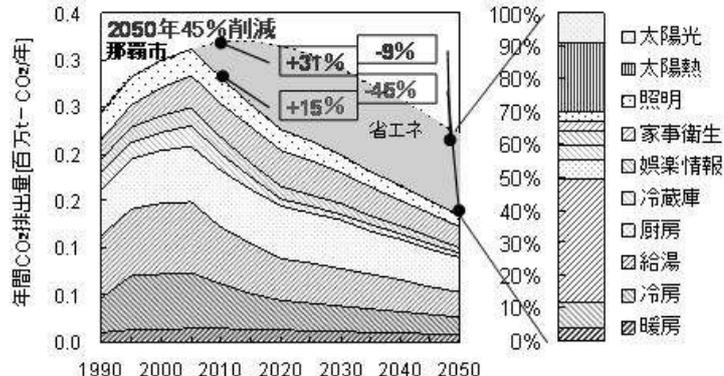


図32 那覇市の住宅CO₂排出量の予測結果
(対策強化ケース)

3) 住宅のライフサイクルを通じた CO₂ 排出量の 2050 年までの予測

1) で示した建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の予測モデルと、2) で示した運用起因 CO₂ 排出量の予測モデルを組み合わせることで、ライフサイクルを通じた CO₂ 排出量の予測が可能となる。図 33 に住宅の全ライフステージを通じた CO₂ 排出量の AB 中間シナリオ、無対策ケースの結果を示す。

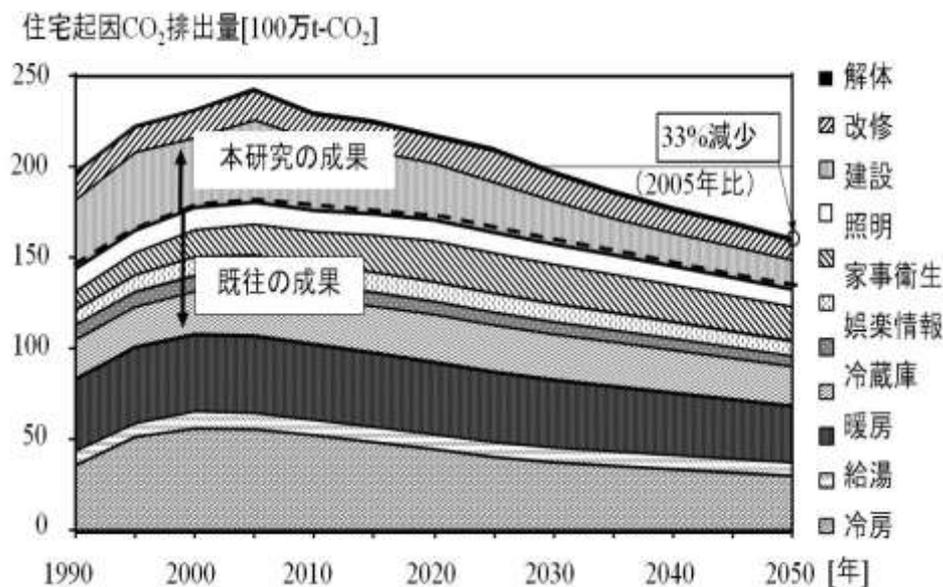


図33 全国のライフサイクルを通じたCO₂排出量の予測結果
(AB中間シナリオ、無対策ケース)

(3) まとめ

- 1) 業務用建築、住宅起因CO₂排出量の超長期予測モデルを開発し、それぞれに起因するCO₂排出量を2050年まで詳細に予測した。
- 2) 業務用建物、住宅のCO₂削減効果を示し、削減目標の達成に向けた対策の方向性を明確化した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

全用途、全ライフステージを対象とした業務用建築起因CO₂排出量の超長期予測モデル、住宅の全ライフステージを対象としたCO₂排出量の超長期予測モデルを開発した。これを併せることにより、わが国の建築分野における温室効果ガス削減目標の達成に向けた地球環境政策の判断材料を提供できるようになった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、グループ全体として京都議定書発効以降のわが国のCO₂排出削減目標策に寄与するとともに、一部は政府間気候変動パネルの評価に反映されるよう努める。

6. 引用文献

- 1) 脱温暖化2050プロジェクト：「日本の将来推計人口・世帯数DB」，2005.12
- 2) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課：「建築統計年報 昭和29年度版～平成17年度版」，1954～2005
- 3) 野城智也ら：「東京都中央区における事務所建築の寿命実態」，日本建築学会計画系論文報告集第413号，1990.7
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：「グリーン庁舎基準及び同解説」，2006.1
- 5) (社)日本建築学会：「建物のLCA指針」，2006.11
- 6) 東京電力・中部電力・関西電力・日建設計：「ビル空調熱源経済性評価プログラム (FACES)」，2003
- 7) (財)建築環境・省エネルギー機構：「建築物の省エネルギー基準と計算の手引」，2006.2
- 8) 総合資源エネルギー調査会：「今後のエネルギー政策について」，2001
- 9) 石原優ら：「家庭用エネルギー供給機器の温暖化対策費用効果分析」，エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，pp.297-300，2004
- 10) (財)エネルギー総合工学研究所：「平成17年度エネルギー環境総合戦略調査 超長期エネルギー技術ロードマップ報告書」，2006.3
- 11) 脱温暖化2050シナリオチーム：「建築物動態モデル (住宅)」，2007.2
- 12) 総務省：「住宅・土地統計調査」，H10,15
- 13) 建設工業経営研究会編：「建築工事原価分析情報」，大成出版，1997.4
- 14) SMASH for Windows Ver.2 ー住宅用熱負荷計算プログラムー，建築環境・省エネルギー機構，2000
- 15) SCHEDULE Ver2.0 ー生活スケジュール自動生成プログラムー，(社)空気調和衛生工学会，2000
- 16) 電気事業連合会：「電気事業における環境行動計画2006」，2006.9

7. 国際共同研究等の状況

本項目には、特記事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 伊香賀俊治，三浦秀一，外岡豊，下田吉之，小池万理，深澤大樹：「住宅のエネルギー消費量とCO₂排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発」，日本建築学会技術報告集第22号，pp.263-268，2005
- 2) 伊香賀俊治：「住宅および事務所ビルにおける温暖化対策の2050年までの予測」，地球環境，12(2)，pp.191-199，2007

<その他誌上発表 (査読なし)>

- 3) 伊香賀俊治：「建築における省エネルギーと温暖化対策」，エネルギー・資源，28(6)，pp.14-18，2007

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 小池, 伊香賀ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その5), 住宅内のエネルギー消費推計マクロモデルの改良」, 日本建築学会大会講演梗概集, 2005
- 2) 伊香賀, 三浦ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その6), 住宅の省エネルギー対策によるCO₂削減量の2020年までの予測」, 日本建築学会大会講演梗概集, 2005
- 3) 小池, 伊香賀ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その7), 世帯あたりエネルギー消費量の推計値と実測値の比較」, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2005
- 4) 伊香賀, 三浦ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その8), 断熱・家電製品・ライフスタイルの変更によるCO₂削減量」, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2005
- 5) 伊香賀, 三浦ほか:「民生家庭部門CO₂排出量と温暖化対策効果の都道府県別将来推計」, 第14回日本エネルギー学会大会発表論文集, 2005
- 6) 伊香賀, 三浦ほか:「住宅のエネルギー消費量とCO₂排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発」, 第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 2005
- 7) 小池, 伊香賀ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その9), インターネットを利用したCO₂排出量の2050年までの将来推計サービス」, 日本建築学会大会講演梗概集, 2006
- 8) 伊香賀, 吉野ほか:「住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究(その10), エネルギー消費量とCO₂排出量の2050年までの推計結果」, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2006
- 9) 伊香賀, 小池ほか:「日本の家庭からのCO₂排出量の2050年までの都道府県別逆予測」, 第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 2007
- 10) T. Ikaga: “Backcasting of Household CO₂ Emissions toward 2050 in Japan”, Proceedings of International Conference on Sustainable Building Asia, SB07 Seoul, 2007
- 11) 新谷圭右, 伊香賀俊治, 村上周三, 花木啓祐, 津田公平:「建築・都市のサステナビリティに関する研究(その1) 事務所ビル起因CO₂排出量の超長期予測モデルの開発」, 2007年度日本建築学会大会, 2007
- 12) 川久保俊, 新谷圭右, 伊香賀俊治, 村上周三, 花木啓祐, 津田公平:「建築・都市のサステナビリティに関する研究(その2) 事務所ビル起因CO₂排出量の都道府県別予測」, 2007年度日本建築学会大会, 2007
- 13) 新谷圭右, 伊香賀俊治, 村上周三, 津田公平:「建築・都市のサステナビリティに関する研究(その3) 事務所ビルのCO₂削減に関する環境効率の2050年までの予測」, 平成19年度空気調和・衛生工学会大会, 2007
- 14) 新谷圭右, 村上周三, 伊香賀俊治, 津田公平:「業務用建築起因CO₂排出量の2050年までの予測」, 第3回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 2008
- 15) 新谷圭右, 伊香賀俊治, 村上周三, 津田公平:「業務用建築起因CO₂排出量の超長期予測モデルの開発」, 日本建築学会関東支部発表会, 2008
- 16) 新谷圭右, 伊香賀俊治, 村上周三, 花木啓祐:「建築・都市のサステナビリティに関する研

究（その5） 業務用建築起因CO₂排出量の超長期予測モデルの開発」，2008年度日本建築学会大会，2008

17) 新谷圭右，伊香賀俊治，村上周三：「建築・都市のサステナビリティに関する研究（その6）業務用建築起因CO₂排出量の都道府県別予測」，平成20年度空気調和・衛生工学会大会，2008

18) 木本慶介，伊香賀俊治，花木啓祐，新谷圭右，野口宏明：「住宅の建設・改修・解体に起因するCO₂排出量の2050年までの予測」，第4回LCA学会研究発表会講演要旨集，2009

19) 木本慶介，伊香賀俊治，花木啓祐：「住宅の建設・改修・解体起因CO₂排出量の2050年までの都道府県別推計」，2009年度日本建築学会大会，2009

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし