

長寿命住宅での設備更新による省エネルギー 効果と費用負担の世代間公平性の評価

長井 幹之¹・山本 祐吾²・齊藤 修³・盛岡 通⁴

¹非会員 大阪大学大学院博士前期課程 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
E-mail: nagai@em.sec.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 博(工) 大阪大学大学院助教 工学研究科 (同上)

³正会員 博(農) 早稲田大学高等研究所助教 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

⁴正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

本研究では、多世代間にわたる長寿命化住宅における住宅機器および設備に対する省エネ投資に着目し、技術革新のパターンや省エネ投資の時期を考慮した住宅機器および設備の更新モデルを作成し、2世代間(60年)でのエネルギー消費量の削減効果と費用・便益を定量的に評価した。その結果、早期に省エネ投資することで、エネルギー消費量と総コストの削減が達成されることが明らかになった。一方、世代間で省エネ投資負担に不均衡が生じることが明らかとなり、1世代目に省エネ投資のインセンティブが働かないという問題が示された。また、こうした不均衡構造を緩和させ、経済合理的な省エネ投資を促進する仕組みによって、現在世代の省エネ投資に対するディスインセンティブを低減させる可能性も示唆された。

Key Words : *long-life housing, energy saving, equipments replacement, intergenerational unfairness*

1. はじめに

近年、フロー消費型からストック重視型社会への転換の流れを受け、民生家庭部門でのエネルギー消費行動の場となる住宅に対して「200 年住宅ビジョン」¹⁾の理念とその実現のためのロードマップが提示されている。住宅の長寿命化へ向けた取り組みが促進されている。他方、低炭素型の地域や都市を実現していこうとするとき、民生家庭部門での省エネルギー化の推進は、民生業務部門とともに中長期的な温暖化対策の中心的課題である。そのため、住宅の長期利用の過程で、時間経過とともに付帯するエネルギー機器・設備の性能劣化も進むため、高効率な省エネ型への置き換えを含めた適切かつ合理的な機器・設備更新が求められる。

しかしながら、一般にこうした省エネ投資には多額の初期費用がかかるため、投資回収に長い期間を要する場合には、投資は敬遠されがちである。とりわけ長寿命住宅においては、省エネ投資による便益を獲得する世代が、必ずしも費用を負担して投資した現在世代であるとは限らないため、省エネ投資に対する現在世代の選好は低くなりかねない。また、機器・設備の更

新後にさらに革新的な省エネ技術が市場に登場したときにも、それへの乗り換えを可能とするモデルがなければ、長寿命住宅における省エネ投資をより促すことは容易ではない。

坂東ら²⁾は、家庭用エネルギーシステムを対象に、従来型システムと省エネルギーシステムを設定し、コストや CO₂ 排出量、一次エネルギー消費量を比較し、初期コストや機器性能および電力・ガス料金が投資回収年数に与える影響を評価している。しかし、機器等の更新が多世代間にわたってもたらす効果の長期的な評価はなされていない。また、五十嵐³⁾や坂本ら⁴⁾は、住宅本体を対象に、一定期間におけるライフサイクルコストおよび環境負荷を評価し、通常の住宅との比較をおこなっているものの、住宅内部の設備機器類は評価対象となっていない。

そこで本研究は、長寿命住宅における住宅機器および設備に対する省エネ投資に着目し、それを阻害する要因を整理した上で、技術革新のパターンや投資の時期を考慮した更新モデルを複数作成し、2 世代間(60 年)でのエネルギー消費量の削減効果と費用・便益を定量的に評価することを目的とする。さらに、合理的

な省エネ投資を促進するためには、現在と将来の異なる世代間で費用と便益を衡平に分かち合うことが必要との視点に立って、現在世代の投資主体の費用負担を軽減しながらも、省エネ効果の受益が将来にわたって継続しうる仕組みについて評価・考察する。以上を通じて、住宅の環境共生を図る長寿命化と省エネ化について、これらの同時成立の可能性を明らかにする。

2. 住宅の省エネ投資を阻害する要因の整理

(1) 住宅装置に対する省エネ投資の阻害要因

現在、住宅の省エネ化の推進に向けて法制度や指針、誘導措置が策定されるなど、さまざまな取り組みが実施されている。しかし、あくまで住宅は個人の財産であるという観点から、規制的手法の適用が困難であるなど、多くの課題を抱えている。

住宅装置に対する省エネ投資のインセンティブを考えると、初期投資コスト、投資回収期間、投資回収の不確実性、の3つがキーワードとして挙げられる。住宅の新規購入の際には、非常に高額の支出が必要となるため、省エネ投資という付加的な要件が加わることは、購入者にとって大きな負担となる。また、投資回収期間の長期化は、金利や種々のリスクを増加させる上、時間割引率を考慮すると、さらに省エネ投資のインセンティブは低下すると考えられる。特に、想定される投資回収の不確実性に伴うリスクは、消費者の省エネ投資行動にネガティブな影響を与えるであろう。加えて、投資インセンティブ以外に、消費者の環境意識も省エネ投資の意思決定に影響を与える要因として挙げられる。

住宅の省エネ化に影響を与える要素は、Sardianou⁵⁾によっても指摘されており、これに上記から導出される融資・税・補助金の優遇、エネルギー価格、物価変動、の3つの社会経済的要素を加えた阻害要因を図-1に示す。

(2) 住宅の長寿命化において生じる問題

長寿命化設計された住宅は、従来のものより頑丈かつ高価なものとなろう。これに付加的に住宅の省エネ性を強化しようとする初期投資コストが増大するため、将来的に省エネ効果が便益として現れるとしても、消費者の負担ないし負担感が増す。また、その投資回収期間が長期化するほど、将来便益の現在価値は低く見積もられ、同時に投資回収の不確実性も大きくなる。

さらに、多世代にわたる長寿命住宅の使用を想定すると、住宅装置に対する省エネ投資によって利益を得

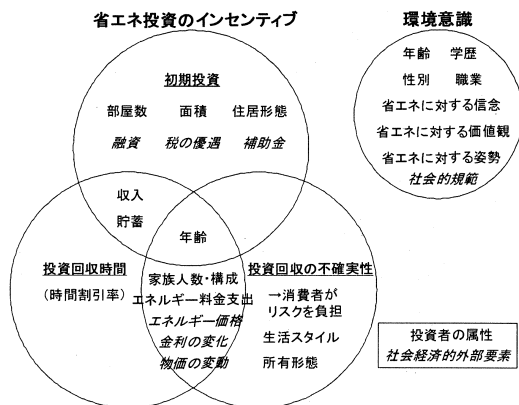


図-1 住宅の省エネ化を阻害する要因の構造

表-1 対象住宅の標準エネルギー消費量
(MJ/年・世帯)

暖房	冷房	給湯	照明	その他	計
18,711	3,999	16,892	10,867	32,640	83,109

るのは、実際に投資する現在世代だけでなく、その住宅を引き継ぐ将来世代にも含まれることになる。つまり、省エネ投資の費用負担者と投資効果の受益者が必ずしも一致しないケースが、現在と将来の世代間で生じる可能性があり、そのことが投資インセンティブの低下につながる要因の一つになると考えられる。

今後、住宅の長寿命化が図られていくと、前節で示した省エネ投資行動の阻害要因の構造は、より複雑になると言える。

3. 省エネ投資効果の算定条件

本研究では、住宅におけるエネルギー消費機器・関連設備を対象に、複数の省エネ投資パターンを作成し、2世代間（2008年から2068年までの60年）の期間内のエネルギー消費削減量、機器・設備更新に伴う初期コストおよびランニングコストを算定する。具体的な算定条件を以下に示す。

(1) 住宅機器・設備のエネルギー消費量

ここでは、NEDOによる標準エネルギー消費量⁶⁾（表-1）に基づいて、基準となる新築一戸建て住宅の設備と省エネ投資後の住宅設備、およびそれらの機器効率を設定した。表-2に、基準となる住宅機器・設備（ベースシステム）と、省エネ投資後の住宅機器・設備（モデルシステム）のシステム構成を示す。本研究では、省エネ投資の対象となる住宅機器・設備は、空調機器、給湯機器、断熱設備、換気設備とする。なお、

表-2 対象とする住宅機器・設備の一覧（基準年）

用途			ベースシステム		モデルシステム	
機器	空調	暖房	個別エアコン×3 石油ファンヒーター	COP : 2.97 効率 : 80%	ダクト式 HP	COP : 4.00
		冷房	個別エアコン×3	COP : 2.67	ダクト式 HP	COP : 3.50
	給湯		ガス給湯器	効率 : 75%	HP 式給湯器 ガス給湯器	COP : 3.57 効率 : 90%
	照明		通常機器	—	通常機器	—
	その他		通常機器	—	通常機器	—
設備	断熱		次世代省エネ基準	熱損失係数 : 2.7 W/m ² ・K	断熱強化	熱損失係数 : 1.8 W/m ² ・K
	換気		通常機械換気設備		熱交換型 換気システム	熱損失係数 : ×0.9

対象機器・設備の性能は、NEDOの報告書⁶⁾および山内設計室⁸⁾を参考にして、基準年（2008年）における数値を設定している。

(2) 機器・設備更新コスト

各機器・設備のエネルギー消費量から求められる運転コストと、機器・設備更新に伴う初期コストを算定した。具体的には、2008年現在の市場における機器・設備の性能とコストを参考に、ベースおよびモデルシステムの性能に応じて機器・設備コストを設定し、あわせて機器・設備の更新年数も外生的に与えた（表-3）。

また、評価期間内のエネルギー料金には2007年11月現在の東京における数値（表-4）を用い、期間内一定とした。

(3) 技術革新パターン

本研究では、評価期間が60年と長期にわたるため、対象機器や設備の性能は、その期間内の技術革新によって大きく向上することが予想される。そこで、エネルギー総合工学研究所の報告書⁹⁾等を参考に、2068年時点での機器・設備性能を設定した上で（表-5）、次の3つの技術革新パターンを設計した。

一つ目のパターンは、対象機器・設備の技術の向上が一定の割合で進み、性能が段階的に向上することを仮定した「通常モデル」である。二つ目は、期間の前期（1世代目）で技術革新が急速に進み、その後は停滞する「前期革新モデル」である。三つ目は、期間の前期に技術革新が停滞し、後期（2世代目）に急速に技術革新が進む「後期革新モデル」である。

(4) 省エネ投資ケース

省エネ投資の時期や採用するシステムの違いが省エネ効果に与える影響を明らかにするため、以下の4つの省エネ投資ケースを作成した。

a) ケース①：評価期間中に省エネ投資せず、ベース

システムから通常の機器・設備へ更新する。（ベースケース）

b) ケース②：住宅新築時にモデルシステムに省エネ投資し、以後段階的に機器・設備更新を進める。機器・設備の効率は、一定割合で向上する。

c) ケース③：住宅新築時にモデルシステムに省エネ投資し、以後技術革新が起こった際にさらなる省エネ投資をおこなう。

表-3 基準年における機器・設備コストおよび更新年数

		コスト (円)	更新 年数
ベース システム	個別エアコン	167,150	10年
	石油ファンヒーター	40,000	10年
	ガス給湯器	326,210	10年
	通常機械換気設備	250,000	20年
	次世代省エネ基準	57,170	60年
	合計	1,174,830	—
モデル システム	ダクト式 HP（熱交換型 換気を含む）	2,148,320	20年
	HP 式給湯器	662,650	20年
	断熱強化	553,350	60年
	合計	3,364,320	—

表-4 エネルギー料金

電気（月額）	都市ガス（月額）	灯油
1,365+22 円/kWh	1,083.6+122.19 円/m ³	96.1 円/l

表-5 2068年の機器・設備性能の上限値

ダクト式 HP	COP : 8.0
個別 HP エアコン	
石油ファンヒーター	効率 : 90%
HP 式給湯器	COP : 6.0
ガス給湯器	効率 : 95%

d) ケース④：住宅新築時には省エネ投資せず、技術革新が起こった際にモデルシステムに省エネ投資する。

なお、通常モデルでは評価期間内の技術革新を想定していない（一定割合での効率向上のみを想定している）ため、ケース①と②のみが省エネ投資ケースとして設定される。

4. 省エネ投資効果と世代間衡平性

(1) エネルギー消費量およびコストの評価結果

「前期革新モデル」における一次エネルギー消費量およびコストの経年変化を図-2、図-3に示す。図-2から、期間内に2回の省エネ投資をおこなうケース③において、エネルギー消費量が最も少なくなることがわかる。また、図-3では、住宅の新築初期に省エネ投資し、その後段階的に機器・設備更新をおこなうケース②が最もコスト面で優位となることが確認でき、その傾向は「通常モデル」および「後期革新モデル」でも同様であった。なお、前章で設定したモデルシステムは、NEDO報告書⁶⁾に記載の補助金要件を満たしているため、初期投資額の1/3が補助されるとしている。

これより、エネルギー消費量の面ではケース③が、コストの面ではケース②がもっとも優位となることが明らかとなった。つまり、ケース③では、住宅の新築初期に省エネ性能に優れた機器・設備を導入し、さらに技術革新の発生時に断熱性能の強化等に対して追加的な省エネ投資をおこなうことから、他のケースよりも機器・設備類のエネルギー消費量が小さくなる。また、省エネ対策の費用対効果、すなわち省エネ投資額あたりのエネルギー消費削減量で見ると、ケース②：0.62 MJ/円に対してケース③：0.93 MJ/円となり、ケース③ではケース②よりも効果的にエネルギー消費量の削減が見込めることがわかった。しかし、技術革新時の機器・設備類に対する追加的な投資コストが、それによるランニングコストの削減分に比べて大きくなるため、コスト面ではケース②に対して劣位になっている。一方、ケース②に着目すると、初期に省エネ投資することで、通常ケースであるケース①に比べて期間内のエネルギー消費量を約21%削減することが可能となり、同時にコスト削減の面でも有効となることが明らかになった。このことから、機器・設備類をより早い段階でより性能のよいものへと置き換えを進め、その後段階的に適切な機器へと更新をすることで、投資による省エネ効果が長期にわたって継続的に得られることを示している。

以上は、評価期間内の総エネルギー消費量と総コスト

トを評価したものであるが、ここで住宅新築時の購入者の視点に立った考察を加える。初期に省エネ性能に優れた機器・設備を導入し、以後投資による省エネ効果が長期にわたって継続的に得られ、期間内の総コストの面で最も優位となったケース②では、住宅初期投資の負担が非常に大きくなることに加え、ケース①に対して経済的に優位となる時期が初期投資から約50年後と遅く、投資回収期間は長期にわたる。そのため、評価期間トータルではケース②の方がケース①よりも優位となるものの、省エネ投資に対する購入者の選好は低くなると考えられる。

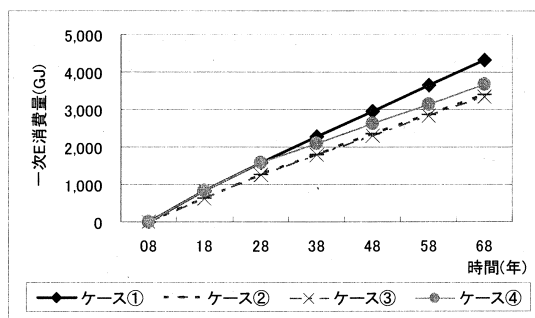


図-2 「前期革新モデル」における一次エネルギー消費量

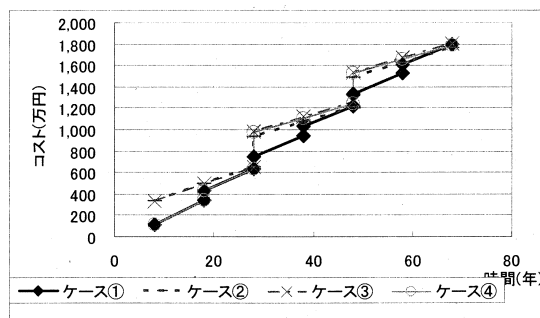


図-3 「前期革新モデル」における総コスト

(2) 設定条件の不確実性に関する考察

本研究での各設定条件には、いくつかの不確実性が含まれると考えられる。不確実性を有する要素としては、技術革新レベル、エネルギー料金、補助金が挙げられる。

補助金に関しては、それが制度的に交付されない場合においてもケース②が最も経済的に優位となったが、技術革新レベルに関しては、「前期革新モデル」において、技術革新発生時の追加的な省エネ投資コストが当初の設定値の92.5%以下となるような技術革新が起こると、ケース③が最も優位となる。なお、本稿での住宅機器および設備技術革新レベルは、当該年次のコ

ストを変化させることで設定されている。つまり、技術革新が起こることによる生産の拡大を想定し、それに伴う学習効果によって、技術革新が起こる場合のコストは、起こらない場合のそれと比べて、同等性能を有する機器の購入コストが低減される、という仕組みをとっている。一方、エネルギー料金については、「前期革新モデル」で評価期間中の電気、ガス、灯油の各エネルギー料金が設定値の 418%以上にならない限り、ケース③がケース②より優位となることはない。

以上から、技術革新に関する将来の不確実性は評価結果に影響を及ぼす可能性があるため、技術進化の動向を見極めながら採用ケースを検討する必要がある。しかし、エネルギー料金の将来的な乱高下が懸念される場合でも、ケース②の優位性は変わらないと言える。

(3) 世代間での受益・費用負担の衡平性に関する考察

図-4 および図-5 に、世代別の負担コストの経年変化を示す。ここでは、各設定条件の不確実性は考慮していない。

初期に省エネ投資をおこなうケースでは、明らかに 1 世代目の負担が大きくなり、1 世代目ではどのケースでも省エネ投資による大きな利益は見込むことができない。特に、初期に省エネ投資を行わず、技術革新発生時に投資をおこなうケース④では、投資時期が遅いことから、省エネ投資によるエネルギー消費量の削減効果が自らの世代では大きく現れず、1 世代目のコスト負担が 4 ケース中最大となる。それに対して、省エネ投資を行うケース②～④での 2 世代目では、省エネ投資による効果が同等に現れ、ベースケースよりも期間内で約 150 万円の費用負担が軽減されることがわかる。

このとき、1 世代目と 2 世代目のトータルでは投資回収が見込めるため、住宅の省エネ化ポテンシャルを有していると言える。しかしながら、現状の費用負担・受益構造では世代間で不衡平が生じ、1 世代目に省エネ投資のインセンティブが働かないため、1 世代目が積極的に省エネ投資をおこなうことは期待しづらい。

したがって、住宅の長寿命化を進める中で、低効率のエネルギー機器ストックが増大することなく、それを計画的に省エネ型のものへと置き換えていくためには、世代間の受益と費用負担の不衡平性を解消することが必要となる。同時に、初期投資の負担や投資回収期間の長期化などに対する購入者の抵抗感を軽減・緩

和し、省エネ投資をおこなう当該世代に明確なインセンティブを付与しうるシステムの構築が求められる。

そこで次章では、2 世代目で獲得が見込まれる利益を 1 世代目へと割り戻し、世代間で費用と便益を配分するメカニズムを構想し、それによる効果を試算する。

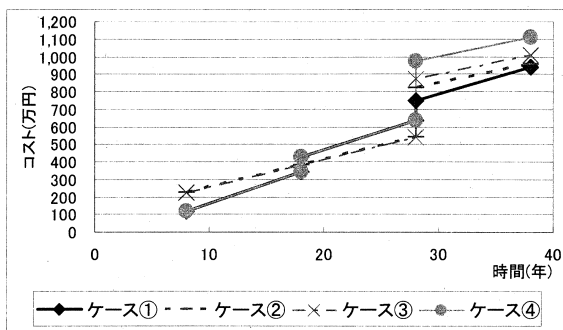


図-4 「前期革新モデル」における1世代目の負担コスト

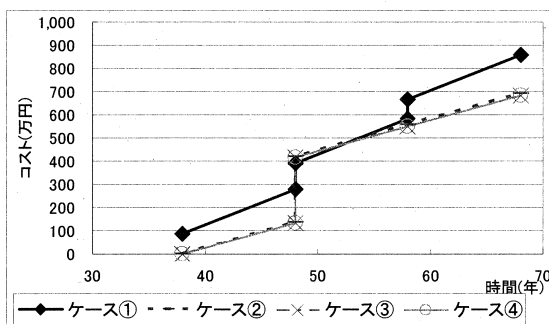


図-5 「前期革新モデル」における2世代目の負担コスト

5. 世代間での費用便益平衡メカニズムによる効果

モデルシステムの機器・設備更新コストがベースシステムと同等であれば、経済面での省エネ投資の阻害要因は回避され则认为られる。そこで、ベースシステムへの投資額からの増加分を外部セクターが一時的に負担し、消費者は毎年のエネルギー料金の削減額に応じてその一部を外部セクターに支払うことで、現在世代と将来世代、および外部セクターの各主体がwin-win関係を築くメカニズムを構想した。

すなわち、外部セクターが省エネ投資によって将来的に得られるであろう利益を現在に割り戻すことで、費用と便益を世代間で分担する仕組みであり、省エネ投資に対するディスインセンティブを低減させることを狙ったものである。

(1) 平衡メカニズムによる消費者コストの変化

費用便益平衡メカニズムを採用した場合、「前期革新モデル」における消費者の投資コストの経年変化は図-6～図-8のようになる。

メカニズムを導入させるケースでは、1世代目と2世代目のトータルでの支出はケース②より増加してしまう(図-6)。しかし、図-7および図-8から明らかにように、世代間における費用負担のアンバランスは解消される。ケース②では1世代目の費用負担が大きく、逆に2世代目が省エネによる利益を得るという世代間の不均衡性が見られたが、平衡メカニズムの採用によって、両世代ともに省エネ投資による一定の利益を得ることが可能となることが明らかになった。(表-5)

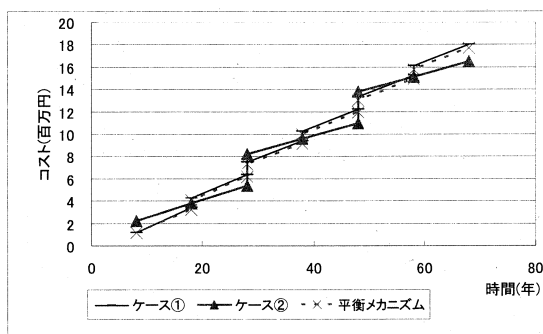


図-6 費用平衡メカニズム採用の際の総コスト

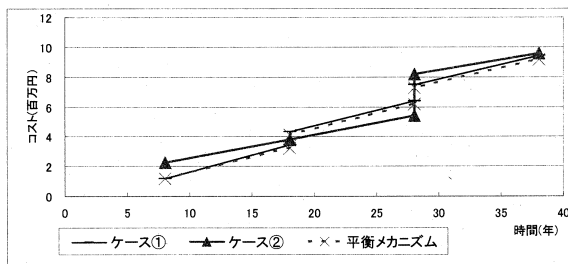


図-7 費用平衡メカニズム採用の際の1世代目の負担コスト

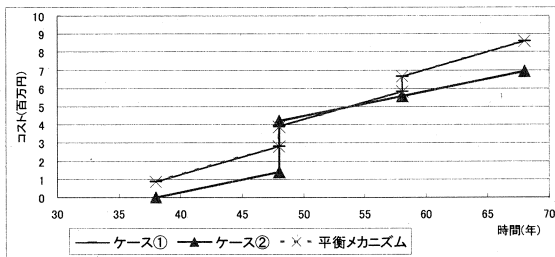


図-8 費用平衡メカニズム採用の際の2世代目の負担コスト

表-5 費用平衡メカニズム採用の際の利益

	第1世代	第2世代	トータル
ケース①との比較	275894	5030	280924
ケース②との比較	440770	-1644850	-1204080

(単位:円)

(2) 外部セクターの事業採算性

他方、ESCO的な活動をおこなう外部セクターが、平衡メカニズムの事業実施をおこなうか否かを判断するとき、資金の時間的価値を考える必要がある。時間的価値を加味した上で損失が発生する場合には、外部セクターは投資しないという意思決定を下すことになる。そこで、割引率を用いて将来的に発生する費用と便益の現在価値換算し、外部セクターの事業採算性を評価した。

割引率を考慮したときの収支を図-9に示す。割引率の値によって、投資に伴う費用と便益の現在価値が大きく変化することがわかる。投資による収支の現在価値が正の値を取るときに外部セクターが投資を決定するならば、割引率が約3.5%以下であることが条件となる。

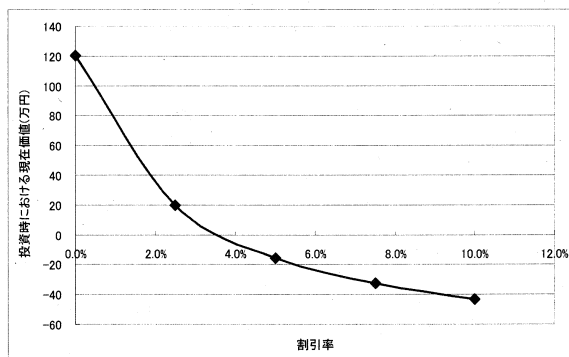


図-9 費用平衡メカニズム採用の際の2世代目の負担コスト

6. まとめ

本研究では、住宅の長寿命化を進める中で、住宅機器および設備に対する2世代間(60年)での合理的な省エネ投資行動について評価・考察した。

まず、省エネ投資行動の阻害要因として、初期投資コスト、投資回収期間、投資回収の不確実性、消費者の環境意識、および費用負担者と受益者の不一致が挙げられることが把握できた。次に、複数の省エネ投資

ケースや技術革新パターンを設定し、2008～2068年の期間におけるエネルギー消費量と世代別の費用・便益を定量的に評価した。その結果、早期に省エネ投資することで、エネルギー消費量と総コストの削減が達成されることが明らかになった。さらに、現在と将来の世代間で費用と便益を分かち合う仕組みを仮定すると、それを事業として担う外部セクター、現在世代および将来世代でwin-win関係を築くことが可能となり、現在世代の省エネ投資に対するディスインセンティブを低減させる可能性が示された。

今後、住宅産業が資源消費抑制と低炭素化の社会的要請に答えていくためには、住宅の長寿命化と省エネ化の双方を軸に据えた環境戦略が不可欠である。そのとき、住宅本体の断熱性や気密性、耐久性を高めることに加えて、住宅内部の装置・設備の運用マネジメントや更新計画にもサービスの領域を拡張し、住宅および住宅装置の包括的な管理を手がけていくことが重要となろう。本研究で得られた結果や知見は、こうした事業モデルの計画・評価や省エネ投資を促す制度設計において有用な情報になると考えられる。

なお、本研究で仮想的に介在させた費用便益平衡メカニズムには、機器・設備の技術革新レベルやエネルギー料金、割引率など不確実な要素が含まれる。したがって、今後こうしたメカニズムを事業として社会定着させ、長寿命住宅における省エネ投資を促進していくためには、技術の進化や社会経済状況の変化にも柔軟に対応しうるシステムづくりが重要となる。この点は今後の研究課題としたい。

参考文献

- 1) 自由民主党政務調査会：200年住宅ビジョン，2007。
- 2) 坂東茂，飛原英治：家庭用エネルギーシステムのライフサイクル評価，日本冷凍空調学会論文集，Vol.19，No.2，pp.133-141，2002。
- 3) 五十嵐健：ストック型社会に向けた住宅システムの研究－資源循環型住宅の経済性評価－，次世代システム研究所報，Vol.1，pp.48-59，2003。
- 4) 岡本久人，坂本圭，松本享：ストック型社会と市民生活～住宅関連支出と環境負荷を中心として～，次世代システム研究所報，Vol.1，pp. 38-47，2003。
- 5) Eleni Sardanou：Estimating energy conservation patterns of Greek households，Energy Policy，Vol.35，pp. 3778-3791，2007。
- 6) NEDO技術開発機構：平成19年度 住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業－住宅に係るもの－公募要領（一次公募），2007。
- 7) NEDO技術開発機構：平成19年度 住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業－住宅に係るもの－19年度システム集，2007。
- 8) 株式会社 山内設計室：高効率エネルギーシステム導入住宅の定期報告書によるエネルギー使用実態及び省エネ効果の分析，<http://www.tech.nedo.go.jp/PDF/100009405.pdf>（平成21年9月1日参照），2007。
- 9) エネルギー総合工学研究所：超長期エネルギー技術ロードマップ報告書，2006。

EVALUATING EFFECT OF EQUIPMENTS REPLACEMENT ON ENERGY SAVING AND INTERGENERATIONAL COST SHARING IN LONG-LIFE HOUSING SYSTEM

Motoyuki NAGAI, Yugo YAMAMOTO, Osamu SAITO and Tohru MORIOKA

In this paper, we focused on investment of energy saving for household equipments in the long-life house which extends between multi-generations. Firstly, we evaluated the effects of equipments replacement on energy saving based on several investment patterns. As a result, it was clarified that reduction in energy consumption and a total cost was achieved when cost for energy saving was invested at the early stage. Also, it was shown that the problem of the disproportionate cost burdens between generation for energy saving became apparent clearly, and incentive to the energy saving investment did not work at the first generation. Thus, we identified the feasibility of energy saving between two generations through an intergenerational cost sharing. The result showed that the disproportionate structure between two generations was removed. We also found that the cost sharing system could reduce the disincentive for the first generation to invest in energy saving.