

住宅用太陽光発電装置のCO₂削減効果
とユーザーコストの計測

中野 諭

2006年8月

Keio Economic Observatory Discussion Paper No. 102

住宅用太陽光発電装置のCO₂削減効果とユーザーコストの計測

中野 諭[†]

概要

わが国では、温暖化対策の1つとして、再生可能エネルギーや新エネルギー技術の導入が進められている。とりわけ、わが国における太陽光発電装置の普及率は、諸外国と比較して著しく高いが、この高い普及率を支えているのは、住宅用太陽光発電装置導入の際の補助金政策であると言われている。本稿では、これまでに経済産業省が行ってきた補助金政策が住宅用太陽光発電装置の普及に与える効果と実現されるCO₂削減効果を定量的に評価している。また、本稿で扱うのは住宅用太陽光発電装置のみであるが、様々な新技術導入に対する補助金政策に適用可能な評価方法の提案も行っている。

キーワード

住宅用太陽光発電装置、補助金政策、LCA、ユーザーコスト

1. はじめに

わが国における太陽光発電装置の普及率は、諸外国と比較して著しく高い(表 1)。この高い普及率を支えているのは、住宅用太陽光発電装置導入の際の補助金政策であると言われている。補助金政策が住宅用太陽光発電装置の普及に与える効果を評価するために、本稿では、ユーザーコストの理論を用いて、住宅用太陽光発電装置導入量と補助金政策の関係を明らかにする。また、太陽光発電装置の導入によってどの程度のCO₂が削減されるかを推計し、補助金政策とCO₂削減効果の関係も捉えている。

本稿では、まず住宅用太陽光発電装置の発電量当たりCO₂削減効果を推計する。太陽光発電装置の導入に当たっては、既存の発電インフラを利用するわけではなく、新たに装置を製造する必要がある。そのため、装置の運用時に既存の発電インフラ(ベースライン発電)によるCO₂排出量からどの程度CO₂が削減されるかを推計するだけでなく、装置の製造によって増加するCO₂排出量を考慮するライフサイクル的視点が不可欠である。2.1 節では、住宅用太陽光発電装置の製造におけるCO₂排出量を推計している。2.2 節では、2.1 節で求めた太陽光発電装置の出力当たりのCO₂排出量を発電量当たりに変換し、ベースライン発電からの発電量当たりCO₂排出量から差し引くことで、太陽光発電装置の発電量当たりCO₂削減効果を推計している。これに実際の装置導入量から推計される発電量を乗じることで、住宅用太陽光発電装置のCO₂削減量を時系列的に求める

ことができる(2.3 節)。

次に、住宅用太陽光発電装置のユーザーコストを推計し、ユーザーコストと導入量の関係を明らかにする。消費者が直面するコストを考えた場合、単に装置価格のみを捉えるのではなく、税金、補助金、割引率、経済的減価償却、装置価格の変化を考慮したユーザーコストを用いることが望ましいだろう。2.4 節では、装置価格と補助金政策の推移を基に、太陽光発電装置のユーザーコストを推計している。これに基づき、2.5 節では、ベースライン発電の電力価格と住宅用太陽光発電装置のユーザーコストの比、つまり太陽光発電の相対価格を用いて、太陽光発電の電力需要シェア関数を推定している。2.6 節では、太陽光発電装置の価格関数をコブ=ダグラス型に定式化し、推定している。

推計結果を 3.1~3.6 節で示した上で、補助金によって新規に導入される住宅用太陽光発電装置の量と太陽光発電装置によって削減されるCO₂排出量を結びつけ、補助金によるCO₂排出量の限界削減効果を計測している(4.1 節)。また、4 節ではその他にも若干のシミュレーションを行っている。

詳細な分析に入る前に、わが国の住宅用太陽光発電装置の導入状況とそれに対する補助金政策について概観したものが表 2 である。太陽光発電装置の導入に対する補助金の効果をCO₂の平均削減費用で評価すると、1994 年では 13 万円/t-CO₂であったのが、住宅用太陽光発電装置の普及にともない、2004 年には 7 千円/t-CO₂まで低減している。補助金のCO₂の平均削減費用は、11 年間平均では 2 万円/t-CO₂となっている。また、後に住宅用太陽光発電装置のユーザーコストと新規導入量の関係を示すが、住宅用太陽光発電装置導入の初期段階、つまり 1994 年頃の高い補助率によって家計の負担を軽減させたことが、住宅用太陽光発電装置の導入を促し、結果として他国と比較しても高い普及率に達することになったと考えられる。

表 1 : IEA Photovoltaic Power Systems Programme 参加国の太陽光発電累積導入量(MW)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
日本	19	24.3	31.2	43.4	59.6	91.3	133.4
ドイツ	5.6	8.9	12.4	17.7	27.8	41.8	53.8
アメリカ	43.5	50.3	57.8	66.8	76.5	88.2	100.1
オーストラリア	7.3	8.9	10.7	12.7	15.7	18.7	22.5
オランダ	1.3	1.6	2	2.4	3.3	4	6.5
IEA合計	110	136	164	199	245	314	396
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
日本	208.6	330.2	452.8	636.8	859.6	1132	
ドイツ	69.4	113.7	194.6	278	431	794	
アメリカ	117.3	138.8	167.8	212.2	275.2	365.2	
オーストラリア	25.3	29.2	33.6	39.1	45.6	52.3	
オランダ	9.2	12.8	20.5	26.3	45.9	49.1	
IEA合計	520	729	989	1334	1829	2596	

出所 : IEA (2005), "TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

- Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2004"

注 : IEA 合計は Photovoltaic Power Systems Programme 参加国合計である。

表 2 : わが国の住宅用太陽光発電装置の導入状況と補助金政策

	住宅用 導入量 (新規)	発電量 (新規)	家計投資額			CO ₂ 削減量 (新規)	平均 削減費用
			家計 負担額	補助金			
	万kW	GWh	億円	億円	億円	t-CO ₂	万円/t-CO ₂
1994(FY)	0.2	2.1	40	23	17	682.0	12.7
1995(FY)	0.4	4.2	68	39	29	1364.0	10.7
1996(FY)	0.7	7.4	84	47	37	2387.0	7.7
1997(FY)	2.0	21.0	208	178	30	6820.0	2.2
1998(FY)	2.4	25.2	245	168	77	8184.0	4.7
1999(FY)	5.8	61.0	539	402	137	19778.0	3.5
2000(FY)	7.4	77.8	622	414	208	25234.0	4.1
2001(FY)	9.1	95.7	683	583	100	31031.0	1.6
2002(FY)	14.1	148.2	1,001	856	145	48081.0	1.5
2003(FY)	17.4	182.9	1,201	1,010	190	59334.0	1.6
2004(FY)	20.0	210.2	1,340	1,245	95	68200.0	0.7
計	79.5	835.7	6,030	4,964	1,066	271095.2	2.0

出所 : 太陽光発電協会データ(住宅用太陽光発電装置の導入量およびシステム価格、補助金実績額)

家計投資額、家計負担額、CO₂削減量、平均削減費用は本稿で産出したものである。

注 : 1)発電量は利用率を 12%として算出したものである。

2)家計投資額は、太陽光発電装置の平均システム価格を導入量に乘じて算出している。

3)補助金は、住宅用太陽光発電装置の導入時に支払われた実績額である。

4)家計投資額から補助金を差し引いたものを実際に家計が負担する金額とした。

5)住宅用太陽光発電装置導入による CO₂削減量は、本稿で計測された結果である。

- 6)平均削減費用は、1tのCO₂を削減するのに何万円の補助金が投入されたかを示す指標である。
ただし、削減効果は装置が償却するまで続くので、耐用年数 20 年で割り引いている。

2. 評価の方法とデータ

2.1. 装置製造におけるCO₂排出量の評価

住宅用太陽光発電装置の出力当たりのCO₂排出量を推計する前提として、1つのモデルケースとして最大出力 3kWを想定する¹。また、太陽光発電装置のCO₂排出量は、運用時には発生しないため、装置製造時のみを算定する。そのCO₂排出量の推計には、産業連関分析のオープンモデルを用いている((1)式)。

(1)式は、太陽光発電装置の年換算CO₂国内排出量(e_m)の推計式であるが、最終需要は3つの部分に分けられる。1つは家計が投資する太陽電池本体の投資額(\mathbf{f}_1)であり、もう1つは太陽電池の投資額(\mathbf{f}_2)、そして残る1つはインバーターの投資額(\mathbf{f}_3)である。太陽電池は長期的に利用可能な耐久消費財であるため、最終需要を耐用年数で除して年換算値にするが、本稿ではすべて同じ耐用年数である($t_1 = t_2$)と想定している。太陽光発電装置製造によって誘発される生産量は、最終需要にレオンチェフ逆行列($\{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A}\}^{-1}$)を乗じることで求められるが、財の輸入に伴って発生する海外でのCO₂排出量は評価の対象としていないため、投入係数(\mathbf{A})から輸入分($\hat{\mathbf{M}}$)を差し引いている。太陽光発電装置の年換算CO₂国内排出量(e_m)は、装置製造によって誘発される生産量にそれぞれの経済活動部門のCO₂排出原単位(e_c)を乗じて推計される。

$$e_m = e_c \{ \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A} \}^{-1} \left\{ \frac{1}{t_1}(\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2) + \frac{1}{t_2}\mathbf{f}_3 \right\} \quad (1)$$

e_m : CO₂国内排出量 (スカラー)

e_c : CO₂排出原単位 (ベクトル)

$\{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}})\mathbf{A}\}^{-1}$: 産業連関表のレオンチェフ逆行列

\mathbf{f}_1 : 太陽電池本体の資本形成ベクトル(最大出力 3kW)

t_1 : 太陽電池の耐用年数 (スカラー)

\mathbf{f}_2 : 太陽電池設置 (配線, フレーム, 設置等) の資本形成ベクトル

\mathbf{f}_3 : インバーターの資本形成ベクトル

t_2 : インバーターの耐用年数 (スカラー)

推計に用いた最終需要の太陽電池データは、化学工学会CO₂研究会『太陽光発電技術の評価II』(1994)から抽出した多結晶型シリコンを用いた太陽電池の製造費用デー

¹ 導入される住宅用太陽光発電装置の実際の平均値とは異なるので、注意を要する。

タを 2000 年価格に調整している。また、インバーター価格は、NEDO技術開発機構ホームページより 2000 年の屋根置型 3kW 太陽光発電システム販売価格のデータを用いた。CO₂原単位データは基本的に『平成 12 年環境分析用産業連関表』(2005)を使用した²。(1) 式のその他の係数は、『平成 12 年産業連関表』(2004)を用いている。耐用年数は、20 年と 30 年の場合を想定した³。

2.2. 太陽光発電の kWh 当たり CO₂削減量の推計⁴

太陽光発電の発電量(kWh)当たり CO₂削減量は、既存のベースライン発電の発電量当たりの CO₂排出量の年平均値(e_b)から太陽光発電装置の発電量当たり CO₂排出量(e_p)を差し引くことで推計される((2)式)。その際、前節で求めた太陽光発電装置の最大出力当たりの CO₂排出量(e_m)を発電量当たり(e_p)に変換する必要があるが、太陽光発電装置の年間発電量(g_e)を導出するに当たって、利用率を 12%と想定した。したがって、出力 3kW の太陽光発電装置の年間発電量は、 $3(\text{kW}) \times 365(\text{day/year}) \times 24(\text{hour/day}) \times 0.12 = 3153.6(\text{kWh})$ と求められる。太陽光発電装置の発電量当たり CO₂排出量は、最大出力当たりの CO₂排出量(e_m)を年間発電量(g_e)で除することで算出される。

$$r_d = e_b - e_p \quad (2)$$

r_d : 太陽光発電の kWh 当たり CO₂削減量

e_b : 既存のベースライン発電の kWh 当たりの CO₂排出量 (年平均)

e_p : 太陽光発電装置の kWh 当たり CO₂排出量 (e_m/g_e)

g_e : 出力 3kW の太陽光発電装置の年間発電量 (想定 : 設備容量×12%)

e_b : 現在整備が進められている温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度の実施のための政省令によると、一般電気事業者による受電端 CO₂排出量は、391g-CO₂/kWh である(建設時の負荷は含まれていない)。

2.3. 住宅用太陽光発電装置による CO₂削減量

表 3 は、わが国における太陽光発電装置の導入量の推移を示したものである。1994 年度では 0.2 万 kW であった住宅用太陽光発電装置導入量は、2004 年度には 79.5 万 kW (累積) となり、急速に太陽光発電装置が普及していることが窺える。

表 2 と前節の方法で推計された太陽光発電の発電量(kWh)当たり CO₂削減量を用いる

² ただし、消費燃料の単位当たり炭素排出量は、現在整備が進められている温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度の実施のための政省令案に示される値で修正している。

³ 政府の試算等では、耐用年数を 20 年とすることが多い。

⁴ 太陽光発電システムの LCA は、本藤他(2000)、太陽光発電技術研究組合(2001)、山田・小宮山(2002)、新エネルギー・産業技術総合開発機構(2003)など多くの事例が存在するが、2000 年という現時点で最新の技術構造を表している産業連関表を用いた評価は、本稿がはじめてであろう。

ことで、これまでにわが国で導入された住宅用太陽光発電装置によって、どの程度のCO₂排出量が削減されたかを算定することができる。

表 3：わが国の太陽光発電装置導入量(万 kW)

	全導入量 (累積)	住宅用 導入量 (累積)	住宅用 導入量 (新規)
1993(FY)	2.4		
1994(FY)	3.1	0.2	0.2
1995(FY)	4.3	0.6	0.4
1996(FY)	6.0	1.3	0.7
1997(FY)	9.1	3.3	2.0
1998(FY)	13.3	5.7	2.4
1999(FY)	20.9	11.5	5.8
2000(FY)	33.0	18.9	7.4
2001(FY)	45.2	28.0	9.1
2002(FY)	63.7	42.1	14.1
2003(FY)	86.0	59.5	17.4
2004(FY)	113.2	79.5	20.0

出所：太陽光発電協会データ

注：住宅用新規導入量は、今期と前期の住宅用累積導入量の差である。

2.4. 太陽光発電装置導入のユーザーコストの推計

Hall and Jorgenson (1967) の研究で示されたユーザーコストの導出は以下のとおりである。まず、t 期における投資財価格 $q(t)$ は以下の式で表される。

$$q(t) = \int_t^{\infty} e^{-r(s-t)} c(s) e^{-\delta(s-t)} ds \quad (3)$$

ここで、 r は時間割引率、 $c(s)$ は s 期のユーザーコスト、 δ は減価償却率である。これは、「投資財の価格」が「将来の収益を割引いた価値」と一致するということを示している。これを t で微分すると以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(t)}{\partial t} &= -e^{-r(s-t)} c(t) e^{-\delta(s-t)} + r \int_t^{\infty} e^{-r(s-t)} c(s) e^{-\delta(s-t)} ds + \delta \int_t^{\infty} e^{-r(s-t)} c(s) e^{-\delta(s-t)} ds \\ &= -c(t) + q(t)(r + \delta) = \dot{q} \end{aligned} \quad (4)$$

これより、t 期における資本のユーザーコスト $c(t)$ は以下の式で表される。

$$c(t) = q(t) \left(r + \delta - \frac{\dot{q}}{q} \right) \quad (5)$$

また、吉川（1984）、吉岡（1989）では、 $q(t)$ 円の借り入れを行って投資財を購入する場合を想定し、1 期後の収益と返済額が等しいという条件からユーザーコストが導かれるという説明がなされている。なぜなら、この条件が満たれないならば、利潤機会なし損失が生じて裁定行動が起こるからである。たとえば、1 単位の投資財を価格 $q(t)$ 円で購入してレンタル市場に出し、 h 時間経過した後に売却したとしよう。レンタル収入を $\rho(t)$ とすると、 h 期後の収益は $\rho(t) + (1 - \delta)q(t + h)$ であり、かかった元利支払いは $(1 + r)q(t)$ なので、競争市場均衡においては

$$\rho(t) + (1 - \delta)q(t + h) = (1 + r)q(t) \quad (6)$$

が成り立つ。ここで、 h がきわめてゼロに接近するケースを考えれば

$$\rho(t) = q(t) \left(r + \delta + \frac{\dot{q}}{q} \right) \quad (7)$$

となる。完全競争市場ではユーザーコストがこの収益と一致するので、(5)式が導かれる。

このユーザーコストの理論を太陽光発電装置のケースに適用する。まず、太陽光発電装置の税抜き価格 q は次のように表される。

$$q = \frac{1}{1 + \nu} \{ i(\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3) \} \quad (8)$$

q : 消費税を含まない装置全体の投資財価格（出力 3kW あたり）

ν : 消費税率

i : i -order vector

また、太陽光発電装置の kWh あたりのユーザーコストは、消費税率 ν と補助金による補助率 sub によって次のように表される。

$$c_{u,t} = \frac{1}{g_e} (1 - sub_t)(1 + \nu_t) q_t \left[r_t + \delta - \{ \ln((1 - sub_{t+1})(1 + \nu_{t+1})q_{t+1}) - \ln((1 - sub_t)(1 + \nu_t)q_t) \} \right] \quad (9)$$

c_u : kWhあたりのユーザーコスト

sub : 補助金補助率

- r : 長期割引率(想定：住宅ローン金利⁵)
 δ : 経済的減価償却率 (economic rate of depreciation)
double declining method を用いて $\delta = 2/t_1$

2.5. ベースライン発電需要と太陽光発電需要のシェア関数の推定

ユーザーコストと太陽光発電需要との関係を捉えるために、家計の太陽光発電需要のシェア関数((10)式)を推定する。シェア関数には様々な関数形が考えられるが、本稿では対数線形に定式化した。説明変数は、ベースライン発電の受電端単価 p_b と太陽光発電装置のユーザーコスト c_u の比率、つまり太陽光発電の相対価格である。ここで注意を要するのは、対象とする電力需要(d_t^T)は、太陽光発電装置を導入していない家計に限定していることである。また、ベースライン発電による電力と太陽光発電による電力は homogeneous な財ではないと仮定する。

$$\begin{cases} w_t^p = \alpha_1 + \alpha_2 \ln \frac{c_{u,t}}{p_{b,t}} \\ w_t^p + w_t^b = 1 \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 w^p, w^b, c_u, p_b は、それぞれ太陽光発電需要の名目シェア、ベースライン発電方式による名目電力需要シェア、ユーザーコスト、ベースライン発電の受電端価格である。

被説明変数 w^p のデータは、表 2 で示した住宅用太陽光発電装置の新規導入量(万kW)から発電量を計算し、それと同じ期の総電力需要⁶との比を使用している。また、説明変数の c_u は、前節の方法で導出された太陽光発電装置のユーザーコストを、 p_b は『EDMC エネルギー経済統計要覧』(2005)に記載されている電灯用電力の価格データを用いている。

電力需要(d_t^T)に太陽光発電需要の名目シェア(w_t^p)を乗じ、それを太陽光発電装置のユーザーコストで除すことで t 期に新たに発生する太陽光発電による電力需要(d_t^p)が求められる。また、発電量ベースである太陽光発電による電力需要(d_t^p)に稼働時間($u_p = 365 \times 24 \times 0.12$ (利用率))を考慮すれば、出力ベースの住宅用太陽光発電装置の新規導入量(x_t)が導出される。

ここで、家計に導入される太陽光発電装置に関しては、1世帯につき出力3kWのものを1基導入すると仮定する。住宅用太陽光発電装置の新規導入量(x_t)を3kW(= o^d)で除すことで、新たに装置が導入された世帯数(n_t^h)を算出することができる。これに、電力需要の合計(d_t^*)を全国の総世帯数で除して求めた1世帯当たりの平均電力需要(d_t^d)を乗じたものを $t-1$ 期までの期間で合計すれば、前期までに太陽光発電装置が導入された家計

⁵ 日本銀行『金融経済統計』における都市銀行の住宅ローンを使用している。

⁶ ここでの総電力需要とは、その期に住宅用太陽光発電装置を導入した家計のみの総電力需要である。

による電力需要($\sum_i^{t-1} n_i^h d_i^A$)を算出することができる。そして、ひとたび太陽光発電装置が導入された家計による電力需要($\sum_i^{t-1} n_i^h d_i^A$)は、電力需要の合計(d_t^*)から差し引かれ、太陽光発電装置を導入していない家計による電力需要(d_t^T)が計算される。

$$d_t^p = \frac{w_t^p d_t^T}{c_u}$$

$$x_t = \frac{d_t^p}{u_p},$$

$$n_t^h = \frac{x_t}{o^A}$$

$$d_t^T = d_t^* - \sum_i^{t-1} n_i^h d_i^A$$

2.6. 太陽光発電装置の価格決定

太陽光発電装置の費用関数を、次のようなコブ=ダグラス型に定式化する。

$$c_p = \beta \prod_j p_j^{\gamma_j} x^\varepsilon e^m$$

ただし、 β は定数項、 p_j は要素価格、 x は生産量(生産規模)⁷、 t はトレンドをそれぞれ表している。したがって、この式では、 e^m によって一定率の技術進歩が表現されている。この費用関数のもとで、平均費用は、

$$\frac{c_p}{x} = \beta \prod_j p_j^{\gamma_j} x^{\varepsilon-1} e^m$$

となり、太陽光発電装置の価格 q は平均費用にマージン(m : マージン率)を加えたものとして表現される。

$$q = (1+m) \frac{c_p}{x} = (1+m) \beta \prod_j p_j^{\gamma_j} x^{\varepsilon-1} e^m \quad (11)$$

両辺の対数をとって

$$\ln q = \ln(1+m) \beta + \sum_j \gamma_j \ln p_j + (\varepsilon-1) \ln x + m$$

⁷ 実際には、公共用や産業用など住宅用とは別の用途に用いられる太陽光発電装置も生産量に含まれるべきである。

マージン率や要素価格が観測期間においてほとんど変化していないと想定すると、それらを定数とみなすことができるので、上式は以下のようにまとめられる⁸。

$$\ln q_{t+1} = \mu_1 + \mu_2 \ln x_t + \mu_3 t \quad (12)$$

来期の太陽光発電装置の価格が、今期の生産規模と技術進歩によって決定されると仮定し、(12)式のパラメータを推定する。

3. 推計結果

3.1. 装置製造におけるCO₂排出量の評価

(1)式に基づいて推計された住宅用太陽光発電システムの生産・流通プロセスにおけるCO₂排出量は、多結晶型シリコン太陽電池の年間生産規模 10MWの場合で、701.7t-CO₂(耐用年数 20 年)である。ここには、インバーターの生産・流通プロセスにおけるCO₂排出量も含まれている。

住宅用太陽光発電システムの生産・流通プロセスにおいてどのような財・サービスに関連するCO₂が排出されているかは付表を参照されたいが、ここでは生産・流通プロセス全体におけるCO₂排出量のみならず、生産プロセスをシリコンウェハ製造、セル化、およびモジュール化の3つに分けて、それぞれのCO₂排出量を示している。

本来、太陽電池の生産プロセスにおいては規模の経済性の効果が働くが、本稿では、生産規模 10MWの場合のCO₂排出量を本稿で扱う 3kWの排出量に変換する際に、CO₂排出量は生産規模と比例的に変化すると想定している。

その結果、住宅用太陽光発電システム(出力 3kW)の生産・流通におけるCO₂排出量は、耐用年数 20 年の場合で 210kg-CO₂、耐用年数 30 年の場合で 140 kg-CO₂となった(表 4)。

表 4：住宅用太陽光発電装置(出力 3kW)の生産・流通におけるCO₂排出量

e_m	kg-CO ₂ /3kW
耐用年数20年	230
耐用年数30年	153

3.2. 太陽光発電のkWh当たりCO₂削減量の推計

前節で推計された住宅用太陽光発電装置の出力当たりCO₂排出量を、年間発電量 3153.6kWhで除したものが、表 5 の(b)である。これを既存のベースライン発電のkWh当たりのCO₂排出量(表 5 の(a))から差し引くことで、太陽光発電のkWh当たりCO₂削減量(表 5 の(a)-(b))が求められる。太陽光発電のkWh当たりCO₂削減量は、耐用年数 20 年の場合で 324 g-CO₂、耐用年数 30 年の場合で 347 g-CO₂である。

⁸ 観測期間におけるマージン率や要素価格の変化については、データアベイラビリティの問題から本稿では取り扱わなかった。これらを含めた価格関数の推定は、今後の課題としたい。

表 5：住宅用太陽光発電のkWhあたりCO₂削減量

	(a) e_b	(b) e_p	(a)-(b)
	g-CO ₂ /kWh	g-CO ₂ /kWh	g-CO ₂ /kWh
耐用年数20年	391	67	324
耐用年数30年	391	44	347

表 6 によって太陽光発電のkWh当たりCO₂排出量と他の電源の排出量を比較すると、原子力発電の約 2~3 倍であるが、化石燃料を電源とする発電方式と比べ、はるかに少ないことが確認される⁹。

表 6：電力生産 1kWh当たりのCO₂排出量(g-CO₂/kWh)

	経常運転時	建設時	合計
SPS	0	20	20
SPS(ソーラーブリーダー)	0	11	11
石炭火力	1,222	3	1,225
石油火力	844	2	846
LNG火力	629	2	631
原子力	19	3	22

出所：『環境分析用産業連関表』(2001)

3.3. 住宅用太陽光発電装置によるCO₂削減量

表 3 で示される住宅用太陽光発電装置の導入量と表 5 の太陽光発電装置のCO₂削減量から、これまでにわが国に導入されてきた住宅用太陽光発電装置によるCO₂削減量を推計することができる(表 7)。

導入当初の 1994 年度時点では、住宅用太陽光発電装置による年間CO₂削減量が 680 t-CO₂(耐用年数 20 年)であったのが、2004 年度には、新規に 6.8 万t-CO₂(耐用年数 20 年)のCO₂排出量が削減され、累積ベースでは 27.1 万t-CO₂(耐用年数 20 年)もの年間CO₂排出量が削減されている。耐用年数 30 年で評価した場合は、1994 年度では年間CO₂削減量が 730 t-CO₂、2004 年度では新規ベースで 7.3 万t-CO₂、累積ベースで 29.0 万t-CO₂であった。

⁹ 表 6 の電源別CO₂排出量は、その推計に用いられたデータが本稿で用いたデータと年次が異なる点には注意が必要である。

表 7：住宅用太陽光発電装置による年間CO₂削減量(t-CO₂)

	耐用年数20年		耐用年数30年	
	CO ₂ 削減量 (累積)	CO ₂ 削減量 (新規)	CO ₂ 削減量 (累積)	CO ₂ 削減量 (新規)
1994(FY)	682.0	682.0	728.7	728.7
1995(FY)	2046.0	1364.0	2186.0	1457.4
1996(FY)	4433.0	2387.0	4736.4	2550.4
1997(FY)	11253.0	6820.0	12023.2	7286.8
1998(FY)	19437.0	8184.0	20767.4	8744.2
1999(FY)	39215.0	19778.0	41899.1	21131.7
2000(FY)	64449.0	25234.0	68860.2	26961.2
2001(FY)	95480.1	31031.0	102015.2	33154.9
2002(FY)	143561.1	48081.0	153387.1	51371.9
2003(FY)	202895.1	59334.0	216782.2	63395.1
2004(FY)	271095.2	68200.0	289650.2	72868.0

3.4. 太陽光発電装置導入のユーザーコストの推計

表 8 に住宅用太陽光発電装置導入のユーザーコストの推計結果を示した。同表には、住宅用太陽光発電システム価格を投資財価格として、3kW の住宅用太陽光発電装置投資額に対する補助金支給額の割合を補助率としてそれぞれ載せている。

太陽光発電装置の投資価格が年々減少するとともに、ユーザーコストも減少してきたが、2000 年度に補助金制度の変更があったため、1999 年度に一旦急激にユーザーコストが低下している。

補助金制度がなかった 1993 年度では太陽光発電装置導入のユーザーコストは約 4,800 ～4,900 円であり、ベースライン発電の受電端価格 24.9 円/kWh の 200 倍程度であった。それが、10 年後の 2003 年度には、ベースライン発電の受電端価格 21.5 円/kWh に対し、ユーザーコストが 30～50 円とほとんど同じ水準まで差が縮まっている。

表 8：太陽光発電装置導入のユーザーコストとベースライン発電の受電端価格

	耐用年数20年	耐用年数30年	投資財価格	補助率	電力単価
	円/kWh	円/kWh	万円/kW		円/kWh
1993(FY)	4,777.13	4,897.97	370	0.000	24.87
1994(FY)	392.86	428.79	200	0.450	24.76
1995(FY)	239.09	266.85	170	0.500	24.56
1996(FY)	63.73	86.59	120	0.417	24.16
1997(FY)	70.42	93.28	104	0.327	24.44
1998(FY)	147.28	169.92	102	0.333	23.33
1999(FY)	15.51	35.49	93	0.355	23.07
2000(FY)	68.67	89.98	84	0.238	23.08
2001(FY)	77.20	98.17	75	0.160	22.78
2002(FY)	65.16	85.47	71	0.141	21.84
2003(FY)	29.72	49.70	69	0.130	21.51
2004(FY)			67	0.067	

出所：電力単価は、『EDMC エネルギー経済統計要覧』(2005)に記載されている電灯用電力の価格

注：投資財価格とは、住宅用太陽光発電システム価格である。また、補助率とは、3kW の住宅用太陽光発電装置投資額に対する補助金支給額の割合である。

3.5. ベースライン発電需要と太陽光発電需要のシェア関数の推定

需要シェア関数の推定に入る前に、本稿では次のような想定をおいている。将来、太陽光発電装置の価格が低下することを、人々は過去の経験上予想している。したがって、人々が装置を購入する際に、将来の値下がりを見込んで行動をとっていると思われる。そのぶん、ユーザーコストが値下がりのない場合に比べて高くなることは、もっともだと思われる。しかし、ここで示してきた新古典派のユーザーコストの算定は、将来は完全予見であること、また太陽電池がいったん設置されてもきわめて容易に転売できることを前提として、言い換えれば完全競争を前提として導かれた式である。我々の計算したユーザーコストは、大きな乱高下を示しているが、太陽電池の購入量はそれに対応して乱高下しているわけではない。むしろ、順次、逡増してきていることが観測される。そこで我々は、人々は、装置の値下げが過去の経験からスムーズに行われると意識しているという仮定のもとで、ユーザーコストの補正を試みた。本稿では、装置価格を時間で回帰し、その理論値から装置価格の価格値下がり率を計算している。

住宅用太陽光発電の需要シェア関数((10)式)の推定結果は、表 9 に示す通りである。

表 9：住宅用太陽光発電の需要シェア関数

	coefficient	t-value	
α_1	0.0005	7.320	***
α_2	-0.0002	-4.729	***
R^2	0.737		

注) ***：有意水準 1%で有意

3.6. 太陽光発電装置の価格決定

住宅用太陽光発電装置の価格関数(12)式を推定した結果は、表 10 に示した。(11)式および(12)式から生産量に関する費用の弾力性を計算すると、 $\frac{\partial \ln c_p}{\partial \ln x} = \varepsilon = \mu_2 + 1 = 0.827$ となる。

これは、規模弾性 k の逆数であるので、 $k = 1.210$ となり、太陽光発電装置の生産では規模の経済性が働いていることを確認できる。

表 10：太陽光発電装置価格と装置の市場規模の関係

	coefficient	t-value	
μ_1	4.721	28.379	***
μ_2	-0.173	-1.934	*
μ_3	-0.005	-0.110	
R^2	0.919		

注) ***：有意水準 1%で有意、*：有意水準 10%で有意

4. シミュレーション：補助金の限界削減コストと導入ポテンシャル

4.1. 太陽光発電装置のCO₂削減に関する補助金の費用対効果

住宅用太陽光発電装置導入に対する補助金政策によって、太陽光発電装置の普及が進み、それがどの程度のCO₂削減の実現に繋がったかを評価するために、各年の補助率がそれぞれ 1%上昇した場合、あるいは 1%低下した場合にCO₂削減量がどのように変化するかというシミュレーションを行った。補助率の変化は住宅用太陽光発電装置のユーザーコストに影響を与え、表 9 で示される関係を通して、太陽光発電装置の新規導入量を変化させる。それとともに、表 7 の住宅用太陽光発電装置導入による年間CO₂削減量も変化する。

表 11、表 12 に耐用年数が 20 年の場合に補助率の変化が太陽光発電装置による年間CO₂削減量に与える影響を示した。補助率を上昇させる場合と低下させる場合で太陽光発電装置によるCO₂削減量に与える影響は非対称である。また、各年で補助率の変化がCO₂削減量に与える影響の大きさが異なっている。

表 12 によれば、2003 年度の累積ベースでの太陽光発電装置による年間CO₂削減量の変化率は、補助率が 1%上昇した場合で 1.3%、1%低下した場合で-2.6%である。各年の補助率をそれぞれ1%上昇させることは、1994～2003年度の10年間累積で約9億8,000万円の補助金の増額を意味する。また、同期間で累積したCO₂削減量の増分、つまり2003年度における累積ベースでの年間CO₂削減量の増分は、表 11 よりCO₂削減量(累積)における2003年度の1%増の値から基準の値を差し引いた約2,600t-CO₂である。したがって、太陽光発電装置が償却されるまでCO₂削減効果が続くことを考慮して、CO₂削減量当たりの補助金投入額を算定すると9億8,000万円÷2,600t-CO₂÷20(耐用年数)=1万9千円/t-CO₂である。この数値だけを見ると、CO₂削減コストが高いと判断されるかもしれないが、ここには新技術の導入当初に必要な高い補助金負担も含まれていることに留意されたい。

新規導入ベースでは、1995年度におけるCO₂削減量の変化率が、補助率が1%上昇した場合で19.14%、1%低下した場合で-42.31%と補助金の増減による影響が大きい。これも、太陽光発電装置の導入初期段階において補助金の果たす役割が大きいことを裏付けていると考えられる。

視点を変え、家計の費用負担、つまり住宅用太陽光発電装置のユーザーコストが1%変化した場合のCO₂削減量に対する影響を見る。その結果は、表 13、表 14 に示されるが、2003年度の累積ベースでの変化率は負担が増える場合で-0.69%であり、減る場合で1.38%である。

表 11：補助率の変化が太陽光発電装置による年間CO₂削減量に与える影響
(単位：t-CO₂、耐用年数が20年の場合)

	CO ₂ 削減量 (累積)			CO ₂ 削減量 (新規)		
	基準	1%増	1%減	基準	1%増	1%減
1994(FY)	682	743	621	682	743	621
1995(FY)	2,046	2,395	1,703	1,364	1,652	1,082
1996(FY)	4,433	5,020	3,856	2,387	2,625	2,153
1997(FY)	11,253	11,899	10,617	6,820	6,880	6,761
1998(FY)	19,437	20,131	18,754	8,184	8,231	8,137
1999(FY)	39,215	40,472	37,989	19,778	20,341	19,235
2000(FY)	64,449	65,928	63,004	25,234	25,456	25,015
2001(FY)	95,480	97,015	93,979	31,031	31,087	30,975
2002(FY)	143,561	145,140	142,016	48,081	48,125	48,037
2003(FY)	202,895	205,543	200,352	59,334	60,403	58,336
2004(FY)	271,095	-	-	68,200	-	-

注) 基準：観測値から算出した結果(再掲)、1%増：補助率が1%上昇した場合、
1%減：補助率が1%低下した場合

表 12：補助率の変化が太陽光発電装置による年間CO₂削減量に与える影響
(基準に対する変化率、耐用年数が 20 年の場合)

	CO ₂ 削減量 (累積)			CO ₂ 削減量 (新規)		
	基準	1%増	1%減	基準	1%増	1%減
1994(FY)	-	8.57%	-17.92%	-	8.57%	-17.92%
1995(FY)	-	15.74%	-34.08%	-	19.14%	-42.31%
1996(FY)	-	12.43%	-26.37%	-	9.50%	-19.81%
1997(FY)	-	5.59%	-11.41%	-	0.87%	-1.75%
1998(FY)	-	3.51%	-7.09%	-	0.58%	-1.16%
1999(FY)	-	3.15%	-6.33%	-	2.81%	-5.59%
2000(FY)	-	2.27%	-4.54%	-	0.88%	-1.75%
2001(FY)	-	1.59%	-3.18%	-	0.18%	-0.36%
2002(FY)	-	1.09%	-2.18%	-	0.09%	-0.18%
2003(FY)	-	1.30%	-2.56%	-	1.79%	-3.48%
2004(FY)	-	-	-	-	-	-

注) 基準：観測値から算出した結果、1%増：補助率が 1%上昇した場合、
1%減：補助率が 1%低下した場合

表 13：ユーザーコストの変化が太陽光発電装置による年間CO₂削減量に与える影響
(単位：t-CO₂、耐用年数が 20 年の場合)

	CO ₂ 削減量 (累積)			CO ₂ 削減量 (新規)		
	基準	1%増	1%減	基準	1%増	1%減
1994(FY)	682	557	808	682	557	808
1995(FY)	2,046	1,791	2,304	1,364	1,234	1,496
1996(FY)	4,433	4,046	4,824	2,387	2,255	2,520
1997(FY)	11,253	10,732	11,780	6,820	6,686	6,955
1998(FY)	19,437	18,777	20,104	8,184	8,045	8,324
1999(FY)	39,215	38,412	40,026	19,778	19,635	19,922
2000(FY)	64,449	63,500	65,408	25,234	25,088	25,382
2001(FY)	95,480	94,385	96,586	31,031	30,885	31,178
2002(FY)	143,561	142,316	144,819	48,081	47,930	48,233
2003(FY)	202,895	201,501	204,303	59,334	59,186	59,484
2004(FY)	271,095	-	-	68,200	-	-

注) 基準：観測値から算出した結果(再掲)、1%増：ユーザーコストが 1%上昇した場合、
1%減：ユーザーコストが 1%低下した場合

表 14：ユーザーコストの変化が太陽光発電装置による年間CO₂削減量に与える影響
(基準に対する変化率、耐用年数が 20 年の場合)

	CO ₂ 削減量 (累積)			CO ₂ 削減量 (新規)		
	基準	1%増	1%減	基準	1%増	1%減
1994(FY)	-	-20.26%	37.26%	-	-20.26%	37.26%
1995(FY)	-	-13.33%	25.21%	-	-10.04%	19.25%
1996(FY)	-	-9.14%	17.60%	-	-5.69%	11.13%
1997(FY)	-	-4.74%	9.32%	-	-1.99%	3.95%
1998(FY)	-	-3.46%	6.83%	-	-1.71%	3.41%
1999(FY)	-	-2.07%	4.12%	-	-0.72%	1.45%
2000(FY)	-	-1.48%	2.96%	-	-0.58%	1.16%
2001(FY)	-	-1.15%	2.30%	-	-0.47%	0.94%
2002(FY)	-	-0.87%	1.74%	-	-0.31%	0.63%
2003(FY)	-	-0.69%	1.38%	-	-0.25%	0.50%
2004(FY)	-	-	-	-	-	-

注) 基準：観測値から算出した結果、1%増：ユーザーコストが 1%上昇した場合、
1%減：ユーザーコストが 1%低下した場合

4.2. 政府の「地球温暖化対策推進大綱」の目標を達成した場合

政府の「地球温暖化対策推進大綱」においては、2010 年度に新エネルギーの導入によって 1,910 万klのエネルギー消費を削減するという目標が掲げられている。目安ではあるが、その内訳の 118 万klが太陽光発電の導入分として見込まれており、これは同発電システム 482 万kW分に相当する。また、太陽光発電協会ホームページによれば、482 万kWのうち、390 万kW(約 100 万台)が本稿の対象である住宅用太陽光発電装置、残りが非住宅用（公共・産業用）太陽光発電装置であるとしている¹⁰。

本稿で推計した住宅用太陽光発電装置の発電量当たりCO₂削減量を用いて、上で述べた住宅用太陽光発電装置の見込まれる導入量(390 万kW=3kW×130 万台)が達成された時点でのCO₂削減量を計測すると、耐用年数 20 年の場合で年間 133.0 万t-CO₂、耐用年数 30 年の場合で年間 142.1 万t-CO₂となった。

4.3. 一戸建て住宅すべてに太陽光発電装置を設置した場合

表 15 は、わが国の一戸建て住宅数を示したものである。建築面積や部屋数などの住宅属性や気象条件などの地域属性によって、家計の電力需要を満たすために必要な太陽光発電装置の出力規模は当然変化する。しかし、ここでは全国一律で一戸建て住宅 1 件当たりを設置する太陽光発電装置の出力を 3kW、その利用率が 12%であると仮定し、

¹⁰ これらの内訳は、経済産業省および太陽光発電協会によって示された目安であって、目標ではないことに注意されたい。

一戸建て住宅すべてにした場合のCO₂削減量を計測する。

一戸建て住宅のうち持ち家のみ太陽光発電装置を設置すると、その導入量は、3kW×24,245,400台＝約7,274万kWとなる。このとき、CO₂削減量は、耐用年数20年の場合で年間2480.3万t-CO₂、耐用年数30年の場合で年間2650.1万t-CO₂である。

また、借家を含むすべての一戸建て住宅に太陽光発電装置を設置すると、その導入量は、3kW×26,491,200台＝約7,947万kWとなり、CO₂削減量は、耐用年数20年の場合で年間2710.1万t-CO₂、耐用年数30年の場合で年間2895.5万t-CO₂となった。

表15：わが国の一戸建て住宅数(建築面積別・所有形態別)

一戸建 建築面積(9区分)	総数	持ち家	借家				
			総数	公営の借家	公団・公社 の借家	民営借家	給与住宅
総数	26,491,200	24,245,400	2,086,700	63,500	0	1,890,400	132,800
19 m ² 以下	51,100	19,300	31,900	100	-	31,000	800
20 ～ 29 m ²	479,500	322,300	157,100	4,100	-	149,000	4,000
30 ～ 39	1,361,900	1,015,100	346,800	18,500	-	318,600	9,700
40 ～ 49	2,177,500	1,799,700	377,700	12,200	0	349,400	16,200
50 ～ 74	8,852,600	8,093,700	758,900	22,800	-	680,700	55,400
75 ～ 99	6,376,600	6,114,900	261,700	4,900	-	231,300	25,400
100 ～ 124	2,985,100	2,909,500	75,600	600	-	67,300	7,700
125 ～ 149	1,958,000	1,920,300	37,700	100	-	32,900	4,700
150 m ² 以上	2,089,800	2,050,600	39,300	100	-	30,100	9,000
1 住宅当たり建築面積 (m ²)	86	88	58	49	48	57	78

出所：総務省『平成15年住宅・土地統計調査(全国編)』(2005)

6. おわりに

本稿では、ユーザーコストの理論を用いて、住宅用太陽光発電装置導入量と補助金政策の関係を明らかにした。また、太陽光発電装置の導入によるCO₂削減量を推計し、シミュレーションを通して補助金政策とCO₂削減効果の関係も捉えた。

このようなアプローチから補助金政策の費用対効果を捉えた研究は本稿がはじめてであり、それは温暖化対策に関する新たな政策評価ツールを提供するという意味で重要である。

本稿では政策評価のみならず、太陽光発電装置のCO₂の削減ポテンシャルの推計も行っている。わが国は補助金政策によって太陽光発電装置の普及率が高いと言われているが、シミュレーションの結果から判断すれば、いまだ太陽光発電装置の導入ポテンシャル、それによってもたらされるCO₂の削減ポテンシャルが高いと言えよう。

しかし、電力会社による余剰電力の買い取り制度の効果を考慮していないなど、本稿でじゅうぶん議論できなかった点もある。それらは、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] IEA (2005) "TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2004", Report IEA-PVPS T1-14:2005.
- [2] Jorgenson, D.W. (1963) "Capital Theory and Investment Behavior", *The American Economic Review*, Vol.LIII, May, pp.247-259.
- [3] Hulten, C.R., Wykoff, F.C. (1981) "The Measurement of Economic Depreciation", *Depreciation Inflation & The Taxation of Income from Capital*, The Urban Institute Press, pp.81-125.
- [4] 朝倉啓一郎・早見均・溝下雅子・中村政男・中野諭・篠崎美貴・鷺津明由・吉岡完治 (2001) 『環境分析用産業連関表』、慶應義塾大学出版会。
- [5] 化学工学会CO₂ 研究会 (1994) 『太陽光発電技術の評価II』。
- [6] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2003)、『即効的・革新的エネルギー環境技術開発に関する LCA 調査』、平成 14 年度調査報告書。
- [7] 総務省 (2004) 『平成 12 年産業連関表』、財団法人 全国統計協会連合会。
- [8] 総務省 (2005) 『平成 15 年住宅・土地統計調査(全国編)』、総務省ホームページ。
- [9] 太陽光発電技術研究組合 (2001)、『太陽光発電評価の調査研究』、(ニューサンシャイン計画) 平成 12 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書。
- [10] 中野諭 (2005) 『平成 12 年環境分析用産業連関表－推計方法および計測結果－』、KEO ディスカッションペーパー、No.98、慶應義塾大学産業研究所。
- [11] 本藤祐樹・内山洋司・森泉由恵 (2000)、『ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価 -最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響-』、電力中央研究所報告Y99009。
- [12] 山田興一・小宮山宏 (2002) 『太陽光発電工学』、日経 BP 社。
- [13] 吉岡完治 (1989) 『日本の製造業・金融業の生産性分析』、東洋経済新報社。
- [14] 吉川洋 (1984) 『マクロ経済学研究』、東京大学出版会。
- [15] NEDO技術開発機構ホームページ (<http://www.nedo.go.jp/>)
- [16] 太陽光発電協会ホームページ (<http://www.jpea.gr.jp/>)

補論：本稿における費用関数の導出

生産要素が 2 財(L と K)の場合のコブ＝ダグラス生産関数 $y = mL^{\theta_1} K^{\theta_2} e^{nt}$ から費用関数を導出する方法は、以下の費用最小化問題を解くことである。

$$\begin{aligned} \max \quad & C = p_L L + p_K K \\ \text{s.t.} \quad & y = mL^{\theta_1} K^{\theta_2} e^{nt} \end{aligned}$$

ラグランジュ関数は、

$$G = p_L L + p_K K + \lambda(y - mL^{\theta_1} K^{\theta_2} e^{nt})$$

費用最小化の1階の条件は、

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial L} = p_L - \lambda \theta_1 m L^{\theta_1 - 1} K^{\theta_2} e^{nt} = p_L L - \lambda \theta_1 y = 0 \dots\dots(*1) \\ \frac{\partial G}{\partial K} = p_K - \lambda \theta_2 m L^{\theta_1} K^{\theta_2 - 1} e^{nt} = p_K K - \lambda \theta_2 y = 0 \dots\dots(*2) \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} = y - m L^{\theta_1} K^{\theta_2} e^{nt} = 0 \dots\dots(*3) \end{cases}$$

1階の条件を目的関数に代入すると、

$$C = p_L L + p_K K = \lambda (\theta_1 + \theta_2) y \dots\dots(*4)$$

1階の条件(*1)の両辺を θ_1 乗、(*2)の両辺を θ_2 乗すると、

$$p_L^{\theta_1} L^{\theta_1} = \lambda^{\theta_1} \theta_1^{\theta_1} y^{\theta_1}$$

$$p_K^{\theta_2} K^{\theta_2} = \lambda^{\theta_2} \theta_2^{\theta_2} y^{\theta_2}$$

これらの辺々を乗すると、

$$p_L^{\theta_1} p_K^{\theta_2} L^{\theta_1} K^{\theta_2} = \lambda^{\theta_1 + \theta_2} \theta_1^{\theta_1} \theta_2^{\theta_2} y^{\theta_1 + \theta_2}$$

さらに、左辺は制約式(*3)より次のように変形できる。

$$p_L^{\theta_1} p_K^{\theta_2} m^{-1} y e^{-nt} = \lambda^{\theta_1 + \theta_2} \theta_1^{\theta_1} \theta_2^{\theta_2} y^{\theta_1 + \theta_2}$$

これを λ について解くと、

$$\lambda = m^{\frac{-1}{\theta_1 + \theta_2}} \theta_1^{\frac{-\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}} \theta_2^{\frac{-\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}} p_L^{\frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}} p_K^{\frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}} y^{\frac{1}{\theta_1 + \theta_2} - 1} e^{\frac{-nt}{\theta_1 + \theta_2}}$$

上式を(*4)に代入して、コブ=ダグラス型の費用関数が次のように導出される。

$$C = m^{\frac{-1}{\theta_1 + \theta_2}} (\theta_1 + \theta_2) \theta_1^{\frac{-\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}} \theta_2^{\frac{-\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}} p_L^{\frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}} p_K^{\frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}} y^{\frac{1}{\theta_1 + \theta_2}} e^{\frac{-nt}{\theta_1 + \theta_2}}$$

したがって、本稿における費用関数のパラメータとの対応は、次のようになる。

$$\beta = m^{\frac{-1}{\theta_1 + \theta_2}} (\theta_1 + \theta_2) \theta_1^{\frac{-\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}} \theta_2^{\frac{-\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}}$$

$$\gamma_L = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}, \quad \gamma_K = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\theta_1 + \theta_2}$$

$$\eta = \frac{-n}{\theta_1 + \theta_2}$$

ここでは、2財の場合で式を展開したが、一般化も可能である。

付表 1: 多結晶型シリコン太陽電池製造プロセスからの CO₂ 排出量(10MW, 耐用年数 20 年, インバータを含む)

(単位: t-CO₂)

直接効果	間接 1 次効果	間接 2 次効果	間接 3 次効果	間接 4 次効果
事業用発電	事業用発電	石炭製品	石炭製品	銻鉄
板ガラス・安全ガラス	自家発電	事業用発電	自家発電	自家発電
アルミニウム(含再生)	その他の窯業・土石製品	自家発電	事業用発電	事業用発電
熱可塑性樹脂	石油化学基礎製品	銻鉄	銻鉄	石油製品
研磨材	板ガラス・安全ガラス	石油製品	石油製品	石油製品
道路貨物輸送	石炭製品	4.97	4.97	1.19
その他の無機化学工業製品	脂防族中間物	4.52	2.35	脂防族中間物
その他のガラス製品	自家輸送(旅客自動車)	4.22	2.33	石油化学基礎製品
アルミ圧延製品	自家輸送(貨物自動車)	3.56	1.93	自家輸送(旅客自動車)
プラスチック製品	アルミニウム(含再生)	3.43	1.75	自家輸送(貨物自動車)
沿海・内水面輸送	自家輸送(貨物自動車)	2.77	1.54	洋紙・和紙
環式中間物	脂防族中間物	2.64	1.51	道路貨物輸送
無機顔料	熱可塑性樹脂	2.62	1.16	セメント
脂防族中間物	石油製品	2.51	0.94	沿海・内水面輸送
合成ゴム	道路貨物輸送	2.26	0.93	セメント
その他の金属製品	その他の有機化学工業製品	1.99	0.84	ソーダ工業製品
卸売	沿海・内水面輸送	1.49	0.68	石油化学系芳香族製品
ソーダ工業製品	廃棄物処理(産業)	1.39	0.61	その他の窯業・土石製品
その他の有機化学工業製品	環式中間物	1.36	0.58	環式中間物
炭素・黒鉛製品	企業内研究開発	1.02	0.57	板紙
圧縮ガス・液化ガス	プラスチック製品	0.93	0.52	粗鋼(転炉)
窯業原料鉱物	石油化学系芳香族製品	0.88	0.50	板紙
耐火物	石油化学系芳香族製品	0.73	0.28	粗鋼(転炉)
港湾運送	航空輸送	0.66	0.28	廃棄物処理(産業)
貨物運送取扱	航空輸送	0.62	0.26	熱可塑性樹脂
小売	その他の合成樹脂	0.61	0.25	熱可塑性樹脂
電球類	熱硬化性樹脂	0.57	0.23	航空輸送
電線・ケーブル	高機能性樹脂	0.57	0.21	熱間圧延鋼材
倉庫	炭素・黒鉛製品	0.57	0.21	熱間圧延鋼材
上水道・簡易水道	ガラス繊維・同製品	0.47	0.20	その他の無機化学工業製品
鉄道貨物輸送	研磨材	0.39	0.19	熱間圧延鋼材
原油・天然ガス	再生資源回収・加工処理	0.39	0.18	ハイヤー・タクシー
	ハイヤー・タクシー	0.37	0.18	ハイヤー・タクシー
	再生資源回収・加工処理	0.36	0.16	アルミニウム(含再生)
	その他のガラス製品	0.30	0.16	板ガラス・安全ガラス
	卸売	0.29	0.16	メタン誘導品
	分類不明	0.27	0.16	その他の合成樹脂
	冷間仕上鋼材	0.24	0.15	下水道
	建設補修	0.22	0.15	下水道
	下水道	0.21	0.14	合成ゴム
	アルミ圧延製品	0.18	0.14	卸売
	鉛・亜鉛(含再生)	0.16	0.12	合成ゴム
	塩	0.16	0.12	港灣運送
	セメント	0.15	0.11	分類不明
	無機顔料	0.15	0.11	染色整理
	不動産賃貸業	0.15	0.10	高機能性樹脂
	その他の化学最終製品	0.14	0.09	熱硬化性樹脂
	その他の金属製品	0.13	0.08	印刷・製版・製本
	その他計	2.67	2.21	印刷・製版・製本
その他計	その他計	158.37	104.40	アルミニウム(含再生)
合計	合計	355.68	209.93	熱硬化性樹脂
累積	累積	355.68	662.06	高機能性樹脂
		514.04	618.44	建設補修

1) 上位 50 位かつ排出量 0.01t-CO₂ 以上の財について表示。
 2) 「その他計」は上位 51 位以下の部門を合計したものであり、各波及段階ごとにその部門内訳は異なる。

付表 1: (続) 多結晶型シリコン太陽電池製造プロセスからの CO₂ 排出量(10MW, 耐用年数 20 年, インバータを含む)

(単位: t-CO₂)

	間接 5 次効果	間接 6 次効果	間接 7 次効果	間接 8 次効果	直接間接合計
銑鉄				銑鉄	
自家発電	2.27	銑鉄	銑鉄	自家発電	0.30
事業用発電	1.88	自家発電	自家発電	石炭製品	0.18
石炭製品	1.52	石炭製品	石炭製品	事業用発電	0.17
石油製品	1.44	事業用発電	事業用発電	石油製品	0.15
脂肪族中間物	0.38	石油製品	石油製品	自家輸送 (旅客自動車)	0.03
自家輸送 (旅客自動車)	0.22	脂肪族中間物	自家輸送 (旅客自動車)	洋紙・和紙	0.02
石油化学基礎製品	0.21	自家輸送 (旅客自動車)	脂肪族中間物	脂肪族中間物	0.02
洋紙・和紙	0.18	石油化学基礎製品	洋紙・和紙	石油化学基礎製品	0.02
自家輸送 (貨物自動車)	0.13	洋紙・和紙	自家輸送 (貨物自動車)	自家輸送 (貨物自動車)	0.01
道路貨物輸送	0.12	自家輸送 (貨物自動車)	道路貨物輸送	道路貨物輸送	0.01
粗鋼 (転炉)	0.10	道路貨物輸送	粗鋼 (転炉)	粗鋼 (転炉)	0.01
沿海・内水面輸送	0.09	粗鋼 (転炉)	粗鋼 (転炉)	自家輸送 (旅客自動車)	0.01
セメント	0.09	沿海・内水面輸送	粗鋼 (転炉)	その他の有機化学工業製品	0.01
その他の窯業・土石製品	0.08	セメント	セメント	沿海・内水面輸送	0.01
ソーダ工業製品	0.07	その他の窯業・土石製品	ソーダ工業製品	沿海・内水面輸送	0.01
石油化学系芳香族製品	0.07	ソーダ工業製品	石油化学系芳香族製品	沿海・内水面輸送	0.01
板紙	0.05	石油化学系芳香族製品	板紙	沿海・内水面輸送	0.01
環式中間物	0.04	板紙	廃棄物処理 (産業)	沿海・内水面輸送	0.01
航空輸送	0.04	環式中間物	廃棄物処理 (産業)	沿海・内水面輸送	0.01
熱可塑性樹脂	0.03	航空輸送	熱可塑性樹脂	沿海・内水面輸送	0.01
その他の有機化学工業製品	0.02	熱可塑性樹脂	その他の有機化学工業製品	沿海・内水面輸送	0.01
冷間仕上鋼材	0.02	その他の有機化学工業製品	フェロアロイ	沿海・内水面輸送	0.01
合成ゴム	0.02	冷間仕上鋼材		沿海・内水面輸送	0.01
その他の無機化学工業製品	0.02	合成ゴム		沿海・内水面輸送	0.01
フェロアロイ	0.02	その他の無機化学工業製品		沿海・内水面輸送	0.01
ハイヤー・タクシー	0.02	フェロアロイ		沿海・内水面輸送	0.01
その他の化学最終製品	0.02	ハイヤー・タクシー		沿海・内水面輸送	0.01
プラスチック製品	0.01	その他の化学最終製品		沿海・内水面輸送	0.01
塩	0.01	プラスチック製品		沿海・内水面輸送	0.01
化学肥料	0.01	塩		沿海・内水面輸送	0.01
鑄鉄品及び鍛工品 (鉄)	0.01	化学肥料		沿海・内水面輸送	0.01
下水道	0.01	鑄鉄品及び鍛工品 (鉄)		沿海・内水面輸送	0.01
卸売	0.01	下水道		沿海・内水面輸送	0.01
粗鋼 (電気炉)	0.01	卸売		沿海・内水面輸送	0.01
分類不明	0.01	粗鋼 (電気炉)		沿海・内水面輸送	0.01
その他計	0.32	分類不明		沿海・内水面輸送	0.01
合計	9.97	その他計	0.24	その他計	0.15
累積	692.97	合計	4.83	合計	2.28
		累積	697.80	累積	700.08
				その他計	0.11
				合計	1.06
				累積	701.13
				その他計	9.72
				合計	701.67
				累積	701.67

付表 2: シリコンウェハ製造プロセスからのCO₂排出量(多結晶型シリコン太陽電池,10MW,耐用年数20年)

(単位:t-CO₂)

	(単位:t-CO ₂)			
	直接効果	間接 1 次効果	間接 2 次効果	間接 3 次効果
事業用発電	185.43	18.48	4.71	1.66
研磨材	8.84	10.40	2.96	1.66
環式中間物	2.73	8.12	2.30	1.45
道路貨物輸送	2.58	3.01	0.78	1.16
無機材料	2.51	1.39	0.74	0.32
その他の無機化学工業製品	2.49	0.92	0.68	0.29
沿海・内水面輸送	2.21	0.86	0.56	0.25
その他の金属製品	1.18	0.72	0.37	0.23
ソーダ工業製品	0.72	0.69	0.31	0.22
炭素・黒鉛製品	0.53	0.66	0.28	0.21
卸売	0.32	0.59	0.26	0.15
窯業原料鉱物	0.06	0.58	0.24	0.13
耐火物	0.13	0.54	0.20	0.13
圧縮ガス・液化ガス	0.05	0.39	0.19	0.12
貨物運送取扱	0.03	0.38	0.18	0.09
港湾運送	0.02	0.35	0.16	0.09
倉庫	0.02	0.29	0.16	0.08
原油・天然ガス	0.01	0.26	0.12	0.07
事業用発電		18.48	4.71	1.66
自家発電		10.40	2.96	1.66
その他の窯業・土石製品		8.12	2.30	1.45
石炭製品		3.01	0.78	1.16
石油製品		1.39	0.74	0.32
自家輸送(旅客自動車)		0.92	0.68	0.29
自家輸送(貨物自動車)		0.86	0.56	0.25
廃棄物処理(産業)		0.72	0.37	0.23
石油化学系芳香族製品		0.69	0.31	0.22
道路貨物輸送		0.66	0.28	0.21
洋紙・和紙		0.59	0.26	0.15
ソーダ工業製品		0.58	0.24	0.13
その他の有機化学工業製品		0.54	0.20	0.13
沿海・内水面輸送		0.39	0.19	0.12
研磨材		0.38	0.18	0.09
石油化学基礎製品		0.35	0.16	0.09
洋紙・和紙		0.35	0.16	0.08
その他の無機化学工業製品		0.29	0.12	0.07
企業内研究開発		0.26	0.12	0.07
環式中間物		0.24	0.11	0.07
航空輸送		0.22	0.11	0.07
冷間仕上鋼材		0.22	0.10	0.06
熱硬化性樹脂		0.20	0.09	0.06
セラチン・接着剤		0.18	0.09	0.04
セメント		0.15	0.08	0.04
塩		0.15	0.08	0.04
鉛・亜鉛(含再生)		0.13	0.06	0.03
ハイヤー・タクシー		0.13	0.06	0.03
アルミニウム(含再生)		0.12	0.06	0.02
建設機修		0.12	0.05	0.02
合成ゴム		0.11	0.05	0.02
脂肪族中間物		0.08	0.05	0.02
卸売		0.08	0.04	0.02
熱間圧延鋼材		0.08	0.04	0.02
化学肥料		0.07	0.04	0.01
自然科学研究機関(産業)		0.07	0.04	0.01
分類不明		0.06	0.03	0.01
炭素・黒鉛製品		0.06	0.03	0.01
不動産賃貸業		0.06	0.03	0.01
銅・スズ(含銅鉛亜硫酸)		0.06	0.03	0.01
塗工紙・建設用加工紙		0.06	0.03	0.01
その他の化学最終製品		0.05	0.03	0.01
油脂加工製品		0.04	0.02	0.01
油路運送		0.04	0.02	0.01
港湾運送		0.04	0.02	0.01
下水道		0.04	0.02	0.01
その他の金属製品		0.04	0.02	0.01
金属製容器及び製缶板金製品		0.03	0.02	0.01
その他の鉄鋼製品		0.03	0.02	0.01
小売		0.03	0.02	0.01
鉄製品及び鍛製品(鉄)		0.03	0.02	0.01
その他計	0.02	0.74	0.65	0.35
合計	210.12	52.67	17.39	9.29
累積	210.12	262.79	280.18	289.47
				295.74
その他計				0.27
合計				6.26
累積				295.74

1)「上位 50 位かつ排出量 0.01t-CO₂ 以上の財について表示。」

2)「その他計」は上位 51 位以下の部門を合計したものであり、各波段階ごとにその部門内訳は異なる。

付表 2: (続) シリコンウェハ製造プロセスからの CO₂ 排出量(多結晶型シリコン太陽電池, 10MW, 耐用年数 20 年)

(単位: t-CO₂)

間接 5 次効果		間接 6 次効果		間接 7 次効果		間接 8 次効果		直接間接合計	
鋳鉄	1.14	鋳鉄	0.50	鋳鉄	0.20	鋳鉄	0.08	事業用発電	211.75
自家発電	0.47	石炭製品	0.25	石炭製品	0.12	石炭製品	0.05	自家発電	14.24
石炭製品	0.47	自家発電	0.21	自家発電	0.09	自家発電	0.04	その他の窯業・土石製品	11.40
事業用発電	0.38	事業用発電	0.17	事業用発電	0.08	事業用発電	0.04	研磨材	9.25
石油製品	0.07	石油製品	0.03	石油製品	0.01	石油製品		石炭製品	7.95
洋紙・和紙	0.05	自家輸送(旅客自動車)	0.02	自家輸送(旅客自動車)	0.01			鋳鉄	6.55
粗鋼(転炉)	0.05	洋紙・和紙	0.02					道路貨物輸送	3.80
脂肪族中間物	0.04	脂肪族中間物	0.02					環式中間物	3.17
脂防族中間物	0.03	粗鋼(転炉)	0.02					沿海・内水面輸送	3.10
ハルブ	0.03	道路貨物輸送	0.01					その他の無機化学工業製品	2.91
自家輸送(貨物自動車)	0.03	ハルブ	0.01					無機顔料	2.55
石油化学基礎製品	0.03	石油化学基礎製品	0.01					自家輸送(旅客自動車)	2.40
道路貨物輸送	0.03	自家輸送(貨物自動車)	0.01					石油製品	2.20
その他の窯業・土石製品	0.03	自家輸送(貨物自動車)	0.01					自家輸送(貨物自動車)	1.63
セメント	0.02	その他の窯業・土石製品	0.01					ソーダ工業製品	1.62
沿海・内水面輸送	0.02							その他の金属製品	1.24
板紙	0.01							石油化学系芳香族製品	1.07
ソーダ工業製品	0.01							洋紙・和紙	1.04
廃棄物処理(産業)	0.01							廃棄物処理(産業)	0.99
石油化学系芳香族製品	0.01							石油化学基礎製品	0.84
熱間圧延鋼材	0.01							その他の有機化学工業製品	0.75
	0.01							セメント	0.64
								脂肪族中間物	0.62
								炭素・黒鉛製品	0.61
								粗鋼(転炉)	0.50
								卸売	0.46
								航空輸送	0.39
								冷間仕上鋼材	0.38
								企業内研究開発	0.37
								熱間圧延鋼材	0.35
								窯業原料鉱物	0.31
								ハルブ	0.29
								熱硬化性樹脂	0.27
								ガラス繊維・同製品	0.26
								塩	0.23
								ハイヤー・タクシー	0.21
								セラチン・接着剤	0.19
								板紙	0.19
								合成ゴム	0.18
								アルミニウム(含再生)	0.18
								耐火物	0.17
								建設補修	0.15
								鉛・亜鉛(含再生)	0.15
								化学肥料	0.13
								その他の化学最終製品	0.12
								染色整理	0.12
								分類不明	0.11
								港湾運送	0.11
								不動産賃貸業	0.10
								圧縮ガス・液化ガス	0.10
その他計	0.17	その他計	0.12	その他計	0.11	その他計	0.06	その他計	2.65
合計	3.11	合計	1.43	合計	0.62	合計	0.27	合計	301.03
累積	298.85	累積	300.27	累積	300.90	累積	301.17	累積	301.03

付表 3: セル化プロセスからの CO₂ 排出量 (多結晶型シリコン太陽電池, 10MW, 耐用年数 20 年)

(単位: t-CO₂)

直接効果	間接 1 次効果	間接 2 次効果	間接 3 次効果	間接 4 次効果
事業用発電	事業用発電	石炭製品	石炭製品	石炭製品
アルミニウム (含再生)	自家発電	鉄鉄	自家発電	自家発電
その他のガラス製品	アルミニウム (含再生)	自家発電	事業用発電	事業用発電
その他の無機化学工業製品	石炭製品	1.45	3.95	1.42
脂肪族中間物	石炭製品	1.10	0.64	0.34
道路貨物輸送	自家発電	0.87	0.46	0.21
プラスチック製品	その他の窯業・土石製品	0.78	0.40	0.21
アルミ圧延製品	自家輸送 (旅客自動車)	0.75	0.37	0.18
その他の有機化学工業製品	熱可塑性樹脂	0.71	0.35	0.18
圧縮ガス・液化ガス	脂肪族中間物	0.50	0.29	0.15
沿海・内水面輸送	自家輸送 (旅客自動車)	0.46	0.23	0.11
卸売	自家輸送 (貨物自動車)	0.41	0.23	0.11
電球類	自家輸送 (貨物自動車)	0.36	0.23	0.10
小売	アルミニウム (含再生)	0.32	0.21	0.08
上水道・簡易水道	その他の有機化学工業製品	0.24	0.16	0.06
港湾輸送	石油化学基礎製品	0.21	0.14	0.05
	廃棄物処理 (産業)	0.21	0.12	0.05
	その他の有機化学工業製品	0.21	0.10	0.05
	沿海・内水面輸送	0.21	0.10	0.05
	再生資源回収・加工処理	0.21	0.09	0.05
	プラスチック製品	0.18	0.08	0.04
	高機能性樹脂	0.14	0.07	0.04
	企業内研究開発	0.13	0.07	0.04
	熱硬化性樹脂	0.11	0.07	0.03
	その他のガラス製品	0.08	0.06	0.03
	その他の非鉄金属地金	0.08	0.06	0.02
	航空輸送	0.08	0.05	0.02
	卸売	0.06	0.04	0.02
	ガラス繊維・同製品	0.06	0.04	0.02
	化学肥料	0.06	0.04	0.02
	可塑剤	0.06	0.04	0.02
	油脂加工製品	0.05	0.03	0.02
	ハイパー・タクシー	0.04	0.03	0.01
	建設補修	0.04	0.03	0.01
	分類不明	0.04	0.03	0.01
	洋紙・和紙	0.03	0.03	0.01
	石油化学系芳香族製品	0.03	0.02	0.01
	その他の化学最終製品	0.03	0.02	0.01
	鉛・亜鉛 (含再生)	0.03	0.02	0.01
	アルミ圧延製品	0.03	0.02	0.01
	環式中間物	0.03	0.02	0.01
	下水道	0.02	0.02	0.01
	自然科学研究機関 (産業)	0.02	0.02	0.01
	合成ゴム	0.02	0.02	0.01
	港湾輸送	0.02	0.02	0.01
	メタン誘導品	0.02	0.02	0.01
	不動産賃貸業	0.02	0.01	0.01
	機械修理	0.02	0.01	0.01
	無機鹽料	0.02	0.01	0.01
	圧縮ガス・液化ガス	0.02	0.01	0.01
その他計	その他計	0.27	0.33	0.28
合計	合計	38.78	33.41	11.01
累積	累積	108.55	141.96	152.97
		69.77		4.11
				157.08

1) 上位 50 位かつ排出量 0.01t-CO₂ 以上の財について表示。

2) 「その他計」は上位 51 位以下の部門を合計したものであり、各波及段階ごとにその部門内訳は異なる。

付表 3: (続) セル化プロセスからの CO₂ 排出量(多結晶型シリコン太陽電池, 10MW, 耐用年数 20 年)

(単位: t-CO₂)

間接 5 次効果		間接 6 次効果		間接 7 次効果		間接 8 次効果		直接間接合計	
自家発電	0.32	銑鉄	0.22	銑鉄	0.12	事業用発電	0.06	事業用発電	66.85
石炭製品	0.31	自家発電	0.15	自家発電	0.07	自家発電	0.03	自家発電	20.59
銑鉄	0.29	事業用発電	0.13	石炭製品	0.06	石炭製品	0.03	石炭製品	18.47
事業用発電	0.29	石炭製品	0.12	事業用発電	0.06	事業用発電	0.03	アルミニウム (含再生)	13.96
石油製品	0.07	石油製品	0.03	石油製品	0.01			銑鉄	10.38
脂肪族中間物	0.04	自家輸送 (旅客自動車)	0.02	脂肪族中間物	0.02	自家輸送 (旅客自動車)	0.01	その他のガラス製品	3.60
自家輸送 (旅客自動車)	0.04	自家輸送 (旅客自動車)	0.02	洋紙・和紙	0.02	自家輸送 (旅客自動車)	0.01	その他の無機化学工業製品	2.97
石油化学基礎製品	0.03	石油化学基礎製品	0.01	石油化学基礎製品	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	脂肪族中間物	2.73
洋紙・和紙	0.03	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	道路貨物輸送	2.02
自家輸送 (貨物自動車)	0.02	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.01	石油製品	1.72
道路貨物輸送	0.02	道路貨物輸送	0.01	道路貨物輸送	0.01	道路貨物輸送	0.01	その他の窯業・土石製品	1.45
セメント	0.02	セメント	0.02	セメント	0.02	セメント	0.02	自家輸送 (旅客自動車)	1.36
沿海・内水面輸送	0.02	沿海・内水面輸送	0.02	沿海・内水面輸送	0.02	沿海・内水面輸送	0.02	ソーダ工業製品	1.23
相銅 (転炉)	0.02	相銅 (転炉)	0.02	相銅 (転炉)	0.02	相銅 (転炉)	0.02	その他の有機化学工業製品	1.11
その他の窯業・土石製品	0.01	その他の窯業・土石製品	0.01	その他の窯業・土石製品	0.01	その他の窯業・土石製品	0.01	プラスチック製品	1.03
ソーダ工業製品	0.01	ソーダ工業製品	0.01	ソーダ工業製品	0.01	ソーダ工業製品	0.01	石油化学基礎製品	0.94
石油化学系芳香族製品	0.01	石油化学系芳香族製品	0.01	石油化学系芳香族製品	0.01	石油化学系芳香族製品	0.01	沿海・内水面輸送	0.93
板紙	0.01	板紙	0.01	板紙	0.01	板紙	0.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.91
								アルミニウム製品	0.79
								熱可塑性樹脂	0.77
								窯業・黒鉛製品	0.60
								廃棄物処理 (産業)	0.40
								洋紙・和紙	0.37
								圧縮ガス・液化ガス	0.35
								環式中間物	0.28
								再生資源回収・加工処理	0.26
								卸売	0.24
								セメント	0.20
								その他の合成樹脂	0.19
								航空輸送	0.19
								ハルブ	0.18
								企業内研究開発	0.18
								高機能性樹脂	0.17
								化学肥料	0.17
								板紙	0.17
								石油化学系芳香族製品	0.16
								その他の非鉄金属地金	0.12
								熱硬化性樹脂	0.12
								塩	0.11
								港湾運送	0.11
								ハイヤー・タクシー	0.10
								分類不明	0.08
								その他の化学最終製品	0.08
								ガラス繊維・同製品	0.07
								建設補修	0.07
								合成ゴム	0.07
								下水道	0.07
								メタン誘導品	0.07
								可塑剤	0.06
								電球類	0.06
その他計	0.14	その他計	0.11	その他計	0.10	その他計	0.05	その他計	1.43
合計	1.75	合計	0.86	合計	0.43	合計	0.20	合計	160.50
累積	158.83	累積	159.70	累積	160.12	累積	160.33	累積	160.50

付表 4: モジュール化プロセスからの CO₂ 排出量 (多結晶型シリコン太陽電池, 10MW, 耐用年数 20 年)

(単位: t-CO₂)

直接効果		間接 1 次効果		間接 2 次効果		間接 3 次効果		間接 4 次効果	
板ガラス・安全ガラス	49.89	事業用発電	21.27	自家発電	11.14	自家発電	5.02	自家発電	2.32
熱可塑性樹脂	10.32	自家発電	9.41	事業用発電	10.67	事業用発電	4.37	事業用発電	1.89
道路貨物輸送	3.59	板ガラス・安全ガラス	4.97	石炭製品	8.94	石炭製品	4.05	石炭製品	1.60
事業用発電	3.10	石油化学基礎製品	4.54	銑鉄	5.37	銑鉄	1.75	銑鉄	1.03
アルミ圧延製品	2.65	その他の窯業・土石製品	2.50	石油製品	2.47	石油製品	1.19	石油製品	0.55
プラスチック製品	2.71	自家輸送 (旅客自動車)	2.15	石油化学基礎製品	1.76	脂肪族中間物	0.84	脂肪族中間物	0.36
合成ゴム	1.99	ソーダ工業製品	2.10	脂肪族中間物	1.70	石油化学基礎製品	0.80	石油化学基礎製品	0.34
沿海・内水面輸送	0.68	熱可塑性樹脂	2.04	自家輸送 (貨物自動車)	1.14	自家輸送 (旅客自動車)	0.49	自家輸送 (旅客自動車)	0.23
卸売	0.65	自家輸送 (貨物自動車)	2.02	自家輸送 (旅客自動車)	1.01	自家輸送 (貨物自動車)	0.42	洋紙・和紙	0.20
電線・ケーブル	0.06	アルミニウム (含再生)	1.51	ソーダ工業製品	0.74	洋紙・和紙	0.38	自家輸送 (貨物自動車)	0.16
貨物運送取扱	0.05	石油製品	1.50	道路貨物輸送	0.73	道路貨物輸送	0.32	道路貨物輸送	0.14
小売	0.03	自家輸送 (貨物自動車)	1.20	環式中間物	0.66	ソーダ工業製品	0.27	バルブ	0.13
	0.03	その他の有機化学工業製品	1.19	その他の窯業・土石製品	0.55	石油化学系芳香族製品	0.27	石油化学系芳香族製品	0.12
		石油製品	1.07	熱可塑性樹脂	0.52	沿海・内水面輸送	0.26	沿海・内水面輸送	0.12
		環式中間物	0.68	板ガラス・安全ガラス	0.50	環式中間物	0.22	ソーダ工業製品	0.11
		プラスチック製品	0.64	沿海・内水面輸送	0.46	その他の窯業・土石製品	0.19	セメント	0.10
		板ガラス・安全ガラス	0.64	洋紙・和紙	0.46	板紙	0.18	板紙	0.09
		窯業原料鉱物	0.63	その他の有機化学工業製品	0.34	セメント	0.16	その他の窯業・土石製品	0.08
		企業内研究開発	0.62	石油化学系芳香族製品	0.34	廃棄物処理 (産業)	0.15	環式中間物	0.07
		廃棄物処理 (産業)	0.56	石油化学系芳香族製品	0.30	熱可塑性樹脂	0.15	廃棄物処理 (産業)	0.07
		その他の合成樹脂	0.48	アルミニウム (含再生)	0.23	バルブ	0.14	粗鋼 (転炉)	0.06
		高機能性樹脂	0.44	プラスチック製品	0.19	その他の有機化学工業製品	0.11	熱可塑性樹脂	0.05
		航空輸送	0.32	塩	0.16	航空輸送	0.08	航空輸送	0.04
		熱硬化性樹脂	0.29	企業内研究開発	0.14	塩	0.06	その他の有機化学工業製品	0.04
		その他の無機化学工業製品	0.29	航空輸送	0.14	塩	0.06	熱間圧延鋼材	0.03
		合成ゴム	0.26	その他の無機化学工業製品	0.13	板ガラス・安全ガラス	0.06	熱間圧延鋼材	0.03
		その他のガラス製品	0.20	その他の合成樹脂	0.13	プラスチック製品	0.06	塩	0.02
		ガラス繊維・同製品	0.19	高機能性樹脂	0.11	企業内研究開発	0.05	塩	0.02
		ハイヤー・タクシー	0.18	窯業原料鉱物	0.10	化学肥料	0.05	企業内研究開発	0.02
		可塑剤	0.17	その他の化学最終製品	0.10	メタン誘導品	0.05	その他の化学最終製品	0.02
		分類不明	0.17	メタン誘導品	0.10	その他の化学最終製品	0.05	化学肥料	0.02
		下水遺	0.15	化学肥料	0.10	メタン誘導品	0.04	冷間加工鋼材	0.02
		再生資源回収・加工処理	0.15	板紙	0.09	ハイヤー・タクシー	0.04	合成ゴム	0.02
		卸売	0.14	熱硬化性樹脂	0.08	熱間圧延鋼材	0.04	ハイヤー・タクシー	0.02
		洋紙・和紙	0.11	合成ゴム	0.08	冷間加工鋼材	0.04	メタン誘導品	0.02
		無機顔料	0.11	染色整理	0.08	熱間圧延鋼材	0.03	下水遺	0.02
		アルミ圧延製品	0.10	ハイヤー・タクシー	0.08	合成ゴム	0.03	下水遺	0.02
		その他の金属製品	0.09	セメント	0.08	相鋼 (転炉)	0.03	その他の合成樹脂	0.01
		不動産賃貸業	0.07	炭素・黒鉛製品	0.07	アルミニウム (含再生)	0.03	卸売	0.01
		熱供給業	0.07	ハルブ	0.07	高機能性樹脂	0.03	分類不明	0.01
		石炭製品	0.06	卸売	0.06	分類不明	0.03	香港運送	0.01
		その他の化学最終製品	0.06	分類不明	0.06	熱硬化性樹脂	0.03	不動産賃貸業	0.01
		建設補修	0.06	その他のガラス製品	0.06	熱硬化性樹脂	0.03	鉄製品及び鍛工品 (鉄)	0.01
		バス	0.06	ガラス繊維・同製品	0.05	港灣運送	0.03		
		その他の繊維工業製品	0.05	再生資源回収・加工処理	0.05	染色整理	0.03		
		印刷・製版・製本	0.05	可塑剤	0.04	不動産賃貸業	0.02		
		銅	0.05	不動産賃貸業	0.04	再生資源回収・加工処理	0.02		
		くん包	0.03	港灣運送	0.04	建設補修	0.02		
		金属製容器及び製缶板金製品	0.03	建設補修	0.04	窯業原料鉱物	0.02		
その他計	0.01	その他計	0.65	その他計	1.01	その他計	0.56	その他計	0.34
合計	75.79	合計	66.91	合計	53.59	合計	23.31	合計	10.56
累積	75.79	累積	142.70	累積	196.28	累積	219.60	累積	230.15

1) 「上位 50 位かつ排出量 0.01t-CO₂ 以上の財について表示。」

2) 「その他計」は上位 51 位以下の部門を合計したものであり、各波及段階ごとにその部門内訳は異なる。

付表 4: (続) モジュール化プロセスからの CO₂ 排出量(多結晶型シリコン太陽電池,10MW,耐用年数 20 年)

(単位: t-CO₂)

	間接 5 次効果	間接 6 次効果	間接 7 次効果	間接 8 次効果	直接間接合計		
自家発電	1.09	銑鉄	0.59	銑鉄	0.32	板ガラス・安全ガラス	55.44
事業用発電	0.85	自家発電	0.49	自家発電	0.22	事業用発電	42.88
銑鉄	0.85	事業用発電	0.39	事業用発電	0.18	自家発電	29.87
石炭製品	0.66	石炭製品	0.33	石炭製品	0.17	石炭製品	15.99
石油製品	0.24	石油製品	0.10	石油製品	0.04	熱可塑性樹脂	13.11
脂肪族中間物	0.15	脂肪族中間物	0.06	脂肪族中間物	0.03	自家輸送(旅客自動車)	10.20
石油化学基礎製品	0.14	石油化学基礎製品	0.06	自家輸送(旅客自動車)	0.02	銑鉄	7.67
自家輸送(旅客自動車)	0.11	自家輸送(旅客自動車)	0.05	石油化学基礎製品	0.02	道路貨物輸送	6.08
洋紙・和紙	0.10	洋紙・和紙	0.05	洋紙・和紙	0.02	石油製品	5.83
自家輸送(貨物自動車)	0.07	自家輸送(貨物自動車)	0.03	自家輸送(貨物自動車)	0.01	脂肪族中間物	5.17
ハルブ	0.07	ハルブ	0.03	道路貨物輸送	0.01	自家輸送(旅客自動車)	4.10
道路貨物輸送	0.06	道路貨物輸送	0.03	ハルブ	0.01	プラスチック製品	3.61
沿海・内水面輸送	0.05	粗鋼(転炉)	0.02	粗鋼(転炉)	0.01	その他の窯業・土石製品	3.40
セメント	0.05	沿海・内水面輸送	0.02	その他の窯業・土石製品	0.01	自家輸送(貨物自動車)	3.35
ソーダ工業製品	0.05	セメント	0.02	沿海・内水面輸送	0.01	ソーダ工業製品	3.30
粗鋼(転炉)	0.05	その他の窯業・土石製品	0.02	ハルブ	0.01	アルミ圧延製品	2.83
板紙	0.04	石油化学系芳香族製品	0.02	粗鋼(転炉)	0.01	合成ゴム	2.41
廃棄物処理(産業)	0.03	廃棄物処理(産業)	0.01	板紙	0.01	沿海・内水面輸送	2.26
環式中間物	0.03	板紙	0.01	自家輸送(貨物自動車)	0.01	環式中間物	2.06
航空輸送	0.02	航空輸送	0.02	自家輸送(貨物自動車)	0.01	アルミニウム(含再生)	1.79
熱可塑性樹脂	0.02	熱可塑性樹脂	0.02	粗鋼(転炉)	0.01	アルミニウム(含再生)	1.72
その他の有機化学工業製品	0.01	その他の有機化学工業製品	0.02	粗鋼(転炉)	0.01	洋紙・和紙	1.33
企業内研究開発	0.01	石油化学系芳香族製品	0.01	粗鋼(転炉)	0.01	洋紙・和紙	1.13
合成ゴム	0.01	廃棄物処理(産業)	0.01	粗鋼(転炉)	0.01	洋紙・和紙	0.91
冷間仕上鋼材	0.01	板紙	0.01	粗鋼(転炉)	0.01	洋紙・和紙	0.91
その他の化学最終製品	0.01	板紙	0.01	粗鋼(転炉)	0.01	洋紙・和紙	0.91
その他計	0.24	その他計	0.18	その他計	0.12	その他計	3.72
合計	5.11	合計	2.54	合計	1.23	合計	240.11
累積	235.26	累積	237.80	累積	239.03	累積	240.11