

太陽熱高反射塗料を用いた省エネルギーと CDM に関する研究

Study on Energy Conservation and the CDM Using a Solar Reflective Paint

奥村 清香 *・松橋 隆治 **・吉田 好邦 ***・井原 智彦 ****

Sayaka Okumura

Ryuji Matsuhashi

Yoshikuni Yoshida

Tomohiko Ihara

One of the measures that can achieve both the development of Asian nations and the restriction of energy consumption is a promotion of energy conservation. Moreover, the use of the Kyoto Mechanisms is effective for Japan that owes the accomplishment of a goal obligation by coming into effect the Kyoto Protocol.

Then, it pays attention to a solar reflective paint that is one of the energy conservation technology, and the Kyoto Mechanisms, particularly Clean Development Mechanism (CDM). In this study, the project that introduces a solar reflective paint to the surface of an office building in Bangkok is evaluated.

The amount of energy reduction and the amount of the CO₂ emission reduction in an office building are calculated by the heat load simulation. Moreover, the application possibility of this project as CDM is evaluated by the analysis of profitability. In this analysis, to consider the risk by secular change of profit, the Monte Carlo simulation is used.

Keywords: Energy Conservation, CDM, Solar Reflective Paint, Kyoto Mechanism, Bangkok

1. 序論

アジア諸国の発展に伴いエネルギー消費量が増加し、これに起因する CO₂ 排出量も増加している。今後も CO₂ 排出量の増加が予測され、エネルギー需要の抑制は早急に対処すべき課題である。ただし、アジア諸国にとって経済成長こそ優先すべき課題であり、エネルギー利用は欠かせない。これら双方を達成しうる有効な対策として、省エネルギーの促進が挙げられる。

また、京都議定書が発効し、日本は第一約束期間までに温室効果ガスを基準年比 6%削減するという目標の達成義務を負った。しかし日本のエネルギー効率は既に高く、国内のみでの削減は困難であり、国外での排出権獲得が目標達成にとって必要な手段である。中でも京都メカニズムの一つであるクリーン開発メカニズム (CDM) に着目する。

そこで本研究では、タイ王国の首都バンコクにおける業務ビルに太陽熱高反射塗料を導入した場合の省エネルギー効果の定量的評価を行う。また、国外での排出権獲得の一つの手段としてクリーン開発メカニズム (CDM) に着目し、この導入プロジェクトを CDM として実施した場合の収益性評価を実施する。

2. 前提となる技術と対象地域の概況

太陽熱高反射塗料（以下「高反射塗料」と呼ぶ。）は、日射反射率・長波放射率（本研究ではそれぞれ、0.90・0.90 を用いた）が高いことによって、本塗料塗布面の表面温度の低下を招き室内への侵入熱量を削減する。それによって冷房需要が削減され、冷房使用に伴う人工排熱と発電時に発生する CO₂ を削減することができる。この CO₂ 排出削減効果は特に高温な地域で顕著である。

対象国であるタイ王国は、年間通じて高温であるため高反射塗料導入による CO₂ 排出削減の高い効果が期待できる。また、CDM のホスト国になりうる議定書非附属書 I 国であることに加え、省エネルギーや CDM に対して積極的な姿勢を示している等、対象地域として妥当であると考えられる。

3. 高反射塗料導入による効果の評価

3.1 熱負荷シミュレーション

バンコクにおける業務ビル 1 棟の外表面（①屋根のみ・②屋根＋側壁）に高反射塗料を導入した場合の効果を定量的に算出すべく、熱負荷シミュレーションを実施する。用いた熱負荷シミュレーションツール EDSOHL¹⁾ は、気象・建築・スケジュールの条件入力に対して、熱平衡式を立て除去熱量を出力する。ここで、除去された熱量は全て冷房に起因し、バンコクの冷房はほぼ全て電力で賄われている。よって、通常外表面と高反射塗料導入時の除去熱量を比較すれば、塗料導入による削減冷房使用量とそれに伴う CO₂ 排出削減量が算出できる。

本シミュレーションにて用いる気象データは 2000 年度の

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻修士課程

〒113-8656 文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 4 号館

e-mail okumura@globalenv.t.u-tokyo.ac.jp

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻教授

*** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻助教授

**** (独) 産業総合技術研究所研究員

〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1

ものであり、建築仕様は電中研モデルビル(新築・中規模)²⁾を用い、スケジュールも電中研モデルビルの標準ケースを用いた。また、冷房設定温度は26℃とした。

図1はバンコクと那覇における熱負荷シミュレーションの結果である。年中高温のバンコクにおける高反射塗料導入による削減除去熱量は、四季のある那覇と対照的で、年間では那覇の約2.7倍である。また、削減除去熱量とそれより算出したCO₂排出削減量を表1に示す。年間CO₂排出削減量は那覇の約3倍となっており、効果の大きさが分かる。

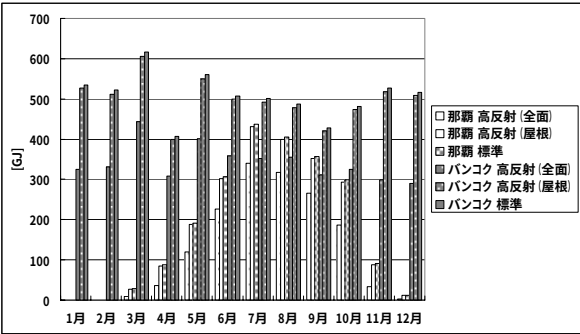


図1 バンコクと那覇における月別除去熱量

表1 高反射塗料導入の効果 (年間・ビル1棟)

	削減除去熱量 [GJ]		CO ₂ 排出削減量 [t-CO ₂]	
	屋根	屋根・側壁	屋根	屋根・側壁
バンコク	100	2,000	6.2	120
那覇	38	680	2.3	40

3.2 都市熱環境シミュレーション

3.1ではビル1棟を対象とし、対象ビルへの高反射塗料導入による周辺ビルへの進入熱量増大等の影響を考慮していない。そこでこれらを考慮すべく、当該街区の全ビルを高アルベド化(日射反射率を高く)した場合の熱負荷を、CM-BEM³⁾を用いた都市熱環境シミュレーションにより算出する。バンコクの年間の外気温度と同程度である夏季(7~9月)における東京23区で最も標準的街区を例に、冷房需要に与える影響が大きい、ビルの窓面積率・街区の天空率による高アルベド化効果の変化を調べる。

表2 日平均削減エネルギー量 [kWh/day・building]

導入面	天空率 窓面積率	b	c	d	e	f
		0.233	0.411	0.647	0.781	0.857
屋根	0.2	157	117	99	90	83
	0.3	149	117	95	88	83
	0.33(標準)	148	116	94	88	83
	0.4	146	112	94	89	84
屋根・側壁	0.2	241	197	173	166	158
	0.3	224	185	158	149	147
	0.33(標準)	220	181	152	146	145
	0.4	211	171	142	140	140

ビルの熱負荷は高アルベド化しない場合にも窓面積率・天空率の影響を受け、それぞれ高いほど消費エネルギー量が多い。高アルベド化した場合の削減エネルギー量を表2に示す。いずれの窓面積率・天空率においても、高アルベド化により消費エネルギー量が削減されている。

また、屋根+側壁を高アルベド化した場合の削減エネルギー量は、図2に示す通り窓面積率・天空率が低いほど大きい。これは、窓面積率が高いと、周辺ビルの反射日射による窓からの透過侵入熱が増大するためである。また天空率が低いと、単位体積当たりの空気と接するビル外表面積が大きくなり、都市気温の低下を招くことで、さらなる消費エネルギー量の減少に繋がる。

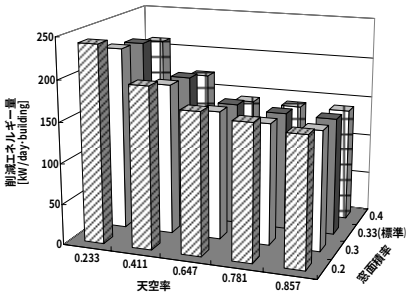


図2 街区の全ビルの屋根+側壁を高アルベド化した場合の日平均削減エネルギー量 (ビル1棟)

このように、ある街区に存在する全てのビルを高アルベド化した場合の熱負荷は、周辺ビルと影響を及ぼし合うため、窓面積率・天空率によって変化する。

3.3 窓面積率・天空率を考慮した高反射塗料導入効果

3.2より、ビルの熱負荷と高アルベド化の効果には窓面積率・天空率が影響することが分かった。したがって、3.1では日本のデータで代用している項目もあるため、求めた削減除去熱量やCO₂排出削減量は、当該地域の天空率やビルの窓面積率によって変わってくる。

表3 窓面積率による高アルベド化効果の変化

導入面	屋根			屋根・側壁		
窓面積率変化	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
削減除去熱量の差 [kWh]	1,250	250	0	5,250	1,500	-2,500
[(GJ)]	(-4.5)	(-0.9)	(0)	(19)	(5.4)	(-9.0)
削減電力量の差 [kWh]	418	83.6	0	1,760	502	-836
CO ₂ 排出削減量の差 [t-CO ₂]	0.28	0.055	0	1.2	0.33	-0.55

表4 天空率による高アルベド化効果の変化

天空率変化		0.23→0.41	0.41→0.65	0.65→0.78	0.78→0.86
屋根	削減除去熱量の差 [kWh]	-8,000	-5,500	-1,500	-1,250
	([GJ])	(-28.8)	(-19.8)	(-5.40)	(-4.50)
	削減電力量の差 [kWh]	-2,680	-1,840	-502	-418
	CO ₂ 排出削減量の差 [t-CO ₂]	-1.78	-1.22	-0.33	-0.28
屋根側壁	削減除去熱量の差 [kWh]	-9,750	-7,250	-1,500	-250
	([GJ])	(-35.1)	(-26.1)	(-5.40)	(-0.90)
	削減電力量の差 [kWh]	-3,260	-2,420	-502	-83.6
	CO ₂ 排出削減量の差 [t-CO ₂]	-2.16	-1.6	-0.33	-0.055

そこで3.1と3.2の結果より、窓面積率・天空率の変化に応じた、高反射塗料導入効果の変化を示す。表3では天空率を0.647、表4では窓面積率を0.33と固定し、効果の変化を示す。これらより、実際に高反射塗料を導入する際には、3.1の結果が表3と4の値程度変化する可能性があることを考慮する必要がある。

4. CDM としての実現可能性

4.1 CDM（クリーン開発メカニズム）とは

CDM とは京都メカニズムの 1 つで、途上国での GHG 排出削減事業で生じた排出削減量に基づくクレジット（CER）を、事業に貢献した先進国等が獲得できる仕組みである。日本の数値目標達成のため、活用したい仕組みである。

本研究では収益性の観点から高反射塗料導入が CDM として実現可能かを評価するが、資金的追加性が問題となる。これは、民間投資で実施する CDM では、CER を獲得して初めて利益が出る事業でなくてはならないということである。

4.2 内部収益率（IRR）の算出

収益性の指標として、プロジェクト実施の可否を判断する際にしばしば用いられる内部収益率（IRR）を用いる。初期投資を高反射塗料導入の費用（ただし、標準的な塗料の導入と比較した際の追加的費用とする）、ランニングコストを 0、プロジェクト期間を塗料耐久年数、収入を①:冷房費用削減額、②:CER 収入、③:①+②（CDM）、として式(1)(2)より算出し、表 5 に示す樹脂・導入面・CER 価格・電力料金等別に 3.1 の結果を用いて IRR を算出した。

$$\text{冷房費用削減額} = \text{削減除去熱量} \div \text{COP} \times \text{電力料金} \quad (1)$$

$$\text{CER 収入} = \text{CER 価格} \times \text{CO}_2 \text{ 排出削減量} \quad (2)$$

表 5 IRR 算出の諸条件設定

初期投資 [万円/1棟]	フッ素	296	19.2
	アクリル/ウレタン	174	11.2
	アクリルエマルジョン	129	8.33
電力料金 [Baht/kWh]		Industry 2.28	Households 2.4
CER価格 [\$ / t-CO ₂]		買手リスク負担 3.85	売手リスク負担 5.52
為替レート		[Baht/円] 0.372	[円/\$] 108.34
COP		2.99	

表 6 収入①の場合における IRR

樹脂	耐久年数	導入部位	Industry	Households
フッ素	20年	屋根・側壁	38%	41%
		屋根	30%	32%
アクリル/ウレタン	10年	屋根・側壁	65%	69%
		屋根	51%	53%
	7年	屋根・側壁	64%	67%
		屋根	48%	51%
アクリルエマルジョン	7年	屋根・側壁	88%	92%
		屋根	67%	71%
	5年	屋根・側壁	85%	90%
		屋根	63%	67%

表 6 は収入①の場合の IRR であるが、いずれも 30% 以上と高い値を示しており、収益性は十分である。よって、資金的追加性の議論より収入③のような CDM としては成立せず、一方収入②の場合の IRR は負の値を取り、これも実施不可能である。ただし、十分な収益性もあり CO₂ 排出削減効果も得られるプロジェクトであることが判明したので、積極的にバンコクの業務ビルに高反射塗料を導入すべきである。

4.3 モンテカルロシミュレーション

4.2 で算出した IRR は毎年の収入を一定と仮定したが、実際は電力料金が上昇する等といった経年変化する可能性が高い。そこで電力料金・CER 価格・為替レート・外気温（除去熱量）に幾何ブラウン運動を適用し、これらの経年変化とその不確実性を考慮した IRR をモンテカルロシミュレーションによって算出する。

(1) シミュレーション条件設定

モンテカルロシミュレーションを実施するに当たり、経年変化しないものの条件設定を表 7 に示す。また、経年変化する項目に幾何ブラウン運動を適用するが、その設定を表 8 に示す。表 8 の幾何ブラウン運動（ここで、幾何ブラウン運動は式(3)で示される）の期待上昇率 μ ・ボラティリティ σ は、電力料金・為替レート・外気温は過去データより設定し、CER 価格は先行研究⁴⁾の数値を採用した。

表 7 固定要素の設定

項目	設定
乱数発生回数 [万回]	1
自己資本比率 [%]	25
税率 [%]	30
プロジェクト期間	塗料耐久年数
返済期間	プロジェクト期間
返済方法	元利均等返済方式
残存簿価	0
取引コスト [%]	10
利子率 [%]	5
為替レート [円/\$]	108.34
CO ₂ 排出原単位 [kg-CO ₂ /kWh]	0.663
ランニングコスト [円]	0

表 8 変動要素の初期値・上昇率 μ ・ボラティリティ σ

項目	初期値	μ [%]	σ [%]
電力料金 [Baht/kWh]	Industry	2.28	4.62
	Households	2.4	4.59
CER 価格 [\$]		3.85	10
		5.52	23
為替レート [Baht/円]		0.372	6.32
外気温 [°C]		27.2	0.298
COP		2.99	0.509
			0

$$\frac{dx}{x} = \mu dt + \sigma \varepsilon \sqrt{dt} \quad (3)$$

(x : 変動要素, μ : 上昇率, σ : ボラティリティ, ε : 標準正規分布からの無作為標本, dt : 変動時間)

(2) シミュレーション結果

表 9 収入①の場合の IRR 期待値・標準偏差

樹脂	耐久年数		期待値		標準偏差	
			Industry	household	Industry	households
フッ素	20年	屋根・側壁	70%	75%	15%	14%
		屋根	45%	50%	14%	12%
アクリル/ウレタン	10年	屋根・側壁	124%	133%	23%	22%
		屋根	82%	89%	18%	17%
	7年	屋根・側壁	110%	119%	24%	22%
		屋根	67%	74%	20%	18%
アクリルエマルジョン	7年	屋根・側壁	168%	181%	29%	28%
		屋根	112%	121%	23%	21%
	5年	屋根・側壁	150%	162%	31%	29%
		屋根	91%	100%	25%	23%

表 9 は、モンテカルロシミュレーションを実施した結果得られた、収入①の場合の IRR 期待値と標準偏差の一覧で

ある。経年変化を考慮していない表 6 と比較すると、全てのケースにおいて期待値が高くなっている。しかし一方で、標準偏差は 12%以上とリスクも高くなっている。

図 3 は表 9 の中で最も期待値の低い、フッ素樹脂を用いた塗料を屋根のみに導入し家庭用電力を適用した場合の収入①の IRR であるが、14%以上に分布しており、4.2 と同様にプロジェクト形態は、民間企業による実施が適当である。

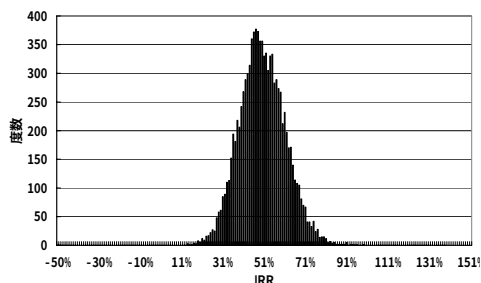


図 3 フッ素・屋根のみ・家庭用電力・収入①の IRR 分布

その他のケースに関しても標準偏差が大きい場合もあるが、期待値が非常に高く、十分な収益率である。また、収入②では期待値は負となり、収入③では①より高い収益率となるため、双方とも実現可能性は低い。

(3) ESCO 事業を想定した場合のシミュレーション結果

ただし収入①の場合には、塗料技術の浸透性とビル所有者の省エネ意識の低さが導入の妨げとなる可能性が高い。ここで、より現実的な実施形態として、包括的な省エネサービスを提供する ESCO 事業を考える。最大の特徴は、省エネ改修の費用を省エネによる経費削減分で賄う点である。ESCO 事業者の報酬を省エネメリットの 50%と設定すると、表 10 に示す通り IRR が負となるケースもある。中には 30%以上の高い期待値を示すケースもあるが、標準偏差が高く負の域にまで分布は及ぶ。したがって、ESCO 事業者としては投資し難いプロジェクトである。

表 10 収入①の IRR 期待値・標準偏差 (ESCO)

樹脂	耐久年数		期待値		標準偏差	
			Industry	Households	Industry	Households
フッ素	20年	屋根・側壁	1%	12%	46%	37%
		屋根	-28%	-18%	53%	50%
アクリル/ウレタン	10年	屋根・側壁	34%	42%	28%	20%
		屋根	-1%	10%	43%	36%
	7年	屋根・側壁	7%	18%	42%	33%
		屋根	-40%	-30%	48%	47%
アクリルエマルジョン	7年	屋根・側壁	52%	59%	23%	19%
		屋根	12%	22%	37%	28%
	5年	屋根・側壁	20%	31%	36%	27%
		屋根	-35%	-23%	46%	43%

そこで、ESCO 事業を CDM として実施する場合を想定し、収入③の IRR を表 11 に示す。表 10 と比較すると、全ケースで、CER 収入を加えることで期待値は大きくなり、標準偏差は小さくなっている。中には、CER 収入を加えても収益率が低く実施困難なケースもあるが、大半のケースでは IRR が負に分布することはなくなり、実現可能性は高くなる。

表 11 収入③の IRR 期待値・標準偏差 (ESCO・CER=3.85\$)

樹脂	耐久年数		期待値		標準偏差	
			Industry	Households	Industry	Households
フッ素	20年	屋根・側壁	24%	29%	22%	15%
		屋根	7%	12%	30%	26%
アクリル/ウレタン	10年	屋根・側壁	49%	54%	16%	14%
		屋根	22%	28%	24%	18%
	7年	屋根・側壁	28%	35%	26%	20%
		屋根	-12%	-3%	41%	35%
アクリルエマルジョン	7年	屋根・側壁	67%	73%	19%	17%
		屋根	32%	38%	22%	17%
	5年	屋根・側壁	41%	49%	24%	21%
		屋根	-8%	3%	38%	31%

あるケースにおける収入③の IRR 分布を、収入①と共に図 4 に示す。CER を含めると収益のある低リスクの事業となり、追加性の問題もクリアできるため、この場合には CDM として実施するのが適当である。

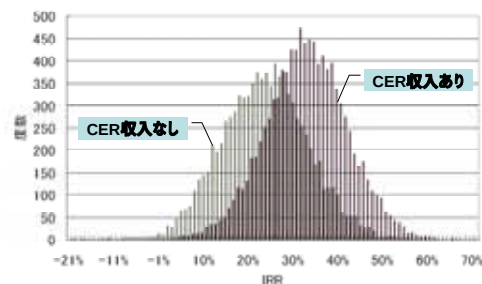


図 4 フッ素・屋根+側壁・家庭用電力・CER 価格 3.85[\$/t-CO₂]/収入①・収入③の IRR 分布

5. 結論

バンコクにおける 1 棟の業務ビルへの高反射塗料導入で、屋根+側壁の場合で年間約 120[t]の CO₂ 排出削減効果が得られる。ビルの窓面積率や天空率によって効果は変化するが、これらを考慮した場合にも、バンコク市内や気象条件の類似する国々への波及効果を考えると大きな効果である。

また、高反射塗料導入事業の収益率は非常に高いため、塗料の現地生産が開始され、技術が浸透すれば、市場原理による導入が進むと期待される。ただし、現時点では上述の条件が未達成であることから、ESCO 事業としての導入が現実的である。ESCO 事業者による実施で、収益率が低くリスク(標準偏差)の高い場合には、CDM として実施することによってリスク軽減と収益確保が可能となる。これは、排出権を得たい日本にとっても有意義な事業である。

本事業は CO₂ 排出削減と収益確保とを同時に達成できるものであり、本研究はその実現の一助となるであろう。

参考文献

- 1) 井原 智彦; 光高反射熱高放射塗料導入による建築-都市連成環境の環境改善効果の総合評価, 博士論文 (2003)
- 2) (財)電力中央研究所 有識者会議第 2 研究グループ; 事務所ビルの省エネルギーー東京都区部における可能量と必要コストの評価ー, 電力中央研究所報告書 (1995)。
- 3) 亀卦川 幸浩; 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 博士論文 (2001)。
- 4) 松橋 隆治ら; CDM, JI 活性化のための制度に関する研究。