

# 都市気象・ビルエネルギー連成モデルを 活用した建物緑化のライフサイクルCO<sub>2</sub>分析

山口 和貴<sup>1</sup>・山田 耕治<sup>2</sup>・川口 雅幸<sup>3</sup>・村山 和義<sup>3</sup>・井原 智彦<sup>4</sup>・玄地 裕<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

E-mail:yamaguchi.ka@tepeco.co.jp

<sup>2</sup>東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

<sup>3</sup>尾瀬林業株式会社 緑化環境本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里二丁目25-1)

<sup>4</sup>(独)産業技術総合研究所 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

各種の建物緑化技術を対象として、製造・運用段階におけるインベントリ分析と都市気象・ビルエネルギー連成シミュレーションによる空調負荷計算を組み合わせた手法を用いることにより、対策導入によるLCCO<sub>2</sub>排出量を分析した。各建物緑化を、無断熱または高断熱仕様の事務所および集合住宅に導入するシナリオを想定して評価した結果、多くの緑化技術について、導入対象となる建物の用途や断熱性能によっては、LCCO<sub>2</sub>が増加となることが示されたが、一年生つる植物を用いた登はん型壁面緑化については、製造・運用過程のCO<sub>2</sub>排出が小さく、夏季の窓面日射遮蔽により冷房負荷を効果的に削減する一方で、冬季の暖房負荷を増加させないため、考慮した範囲の全ての評価条件においてLCCO<sub>2</sub>削減が示された。

**Key Words :** rooftop greening, wall greening, LCCO<sub>2</sub>, air-conditioning load, urban heat island

## 1. はじめに

近年のヒートアイランド問題の深刻化に伴って、熱環境改善策として建物緑化の導入が検討されるようになってきたが、地球温暖化防止の観点から、導入によってCO<sub>2</sub>排出量が增大することは望ましくない。本研究では、各種の建物緑化工法を対象として、各工法の効果の特徴や適性を明らかにし、対策導入の指針を得ることを目的として、インベントリ分析と都市気象・ビルエネルギー連成シミュレーションを組み合わせた手法を用いることにより、ライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub>排出量を分析した。

## 2. 評価条件

### (1) 評価対象工法

評価対象として、屋上緑化および壁面緑化より各2種、計4種の工法を選定した。

#### a) インテンシブ屋上緑化(芝)

インテンシブ屋上緑化は、庭園型・管理型の工法で、自由な造園を行なえるが、十分な耐根システム、保水・排水層、客土の厚みと荷重が必要となる。本評価では、土壌厚20cmの芝緑化システムについて検討した。

#### b) エクステンシブ屋上緑化(セダム)

エクステンシブ屋上緑化は、省管理型の工法で、荷重も小さいが、造園の自由度は低く、植物はセダムや地被類等に限定される。本評価では、土壌厚10cmのセダム緑化システムについて検討した。

#### c) ユニット型壁面緑化

ヘデラなどの常緑性つる植物と植栽基盤が一体化したパネルユニットを、建物側面に設置した下地レールに並べて施工するタイプの壁面緑化工法。パネルの材料としては、合成樹脂や金属が用いられるが、本評価では、ステンレス製パネルを採用したシステム(図-1)について検討した。

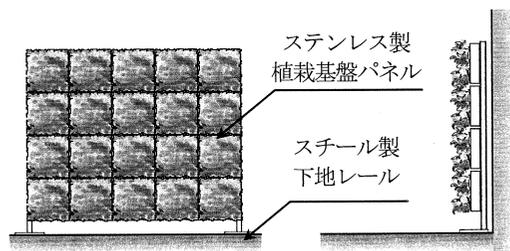


図-1 ユニット型壁面緑化の施工イメージ

#### d) 登はん型壁面緑化

アサガオ、ヘチマ、ゴーヤなどの一年生つる植物を、合成樹脂製ネットに巻き付き登はんさせて、窓面を含む側壁を覆わせるタイプの壁面緑化工法で、緑のカーテンとも呼ばれる。地植えの場合は灌水は不要だが、本評価では、プランタに植え、灌水を行うシステム（図-2）について検討した。

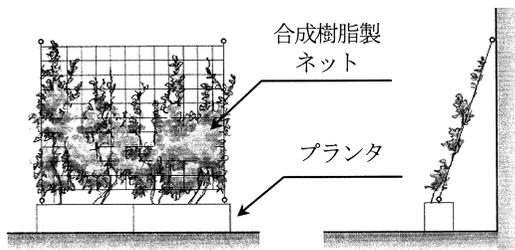


図-2 登はん型壁面緑化の施工イメージ

#### (2) 評価手法

評価範囲は、建物緑化の材料製造・運用段階および運用によって変化する空調需要とし、廃棄段階は除外した。材料製造・運用過程については、インベントリ分析により、空調需要の変化については、都市気象・ビルエネルギー連成モデル（CM-BEM）<sup>1)</sup>により分析し、機能単位として施工面積あたりのCO<sub>2</sub>排出量増減を評価した。

評価の空間スケールは、街区スケールとし、導入対象エリアは、中央区日本橋近辺のGISデータよりモデル化した事務所街区および都区部の低層団地を想定した集合住宅街区とした（表-1）。

表-1 導入対象街区および建物の諸条件

	事務所街区	集合住宅街区
建物寸法	東西：14.1m 南北：14.1m 高さ：平均18.1m	東西：36.5m 南北：10.0m 高さ：全棟12.0m
建物階高	3.4m	3.0m
窓面積率	33.0%	18.0%
グロス建蔽率	35.6%	30.5%

評価期間は1年間とし、材料製造段階のCO<sub>2</sub>排出量は耐用年数で割戻し、運用段階および空調需要に起因するCO<sub>2</sub>排出量については、2002年6月～2003年5月の東京管区気象台観測値を気象条件に用いて、通年値を計算した。

### 3. インベントリ分析

#### (1) 材料製造段階

特に断らない限り、各原材料のCO<sub>2</sub>排出原単位は、

JEMAI-LCA Pro<sup>2)</sup>によった。

屋上緑化は、インテンシブ型、エクステンシブ型ともに、土壌流出防止フィルター、保水・排水・通気パネル、耐根シートなどにより構成される。主な材質は、ポリエチレンなどの合成樹脂であり<sup>3)</sup>、耐用年数は10年<sup>4)</sup>とした。

ユニット型壁面緑化は、亜鉛めっき鋼製下地レール、ステンレス製パネル、ポリエステル不織布の土壌袋などにより構成される<sup>5)</sup>。材料は主として金属であり、耐用年数は30年<sup>4)</sup>とした。

登はん型壁面緑化は、ポリエチレン製ネットとGRC（ガラス繊維強化セメント）製プランタを用いるケースを想定し、耐用年数は、ネットが5年、プランタが10年とした。GRCのCO<sub>2</sub>排出原単位は、文献<sup>6)</sup>より、0.579 kg-CO<sub>2</sub>/kgを用いた。

以上の条件より算出した、各緑化工法の材料製造に伴う1年あたりのCO<sub>2</sub>排出量を図-3に示す。金属製で重量の大きい材料を用いるユニット型壁面緑化からのCO<sub>2</sub>排出量が最も大きく、特にCO<sub>2</sub>排出原単位の大きいステンレス部からの寄与が大きい。ポリエチレン製ネットを用いる登はん型壁面緑化は、耐用年数は短い材料が軽量なためCO<sub>2</sub>排出量は最も小さく、ユニット型壁面緑化の1割程度となった。屋上緑化については、素材重量の小さいエクステンシブ工法（セダム）からのCO<sub>2</sub>排出量は、インテンシブ工法（芝）の約3割程度となっている。

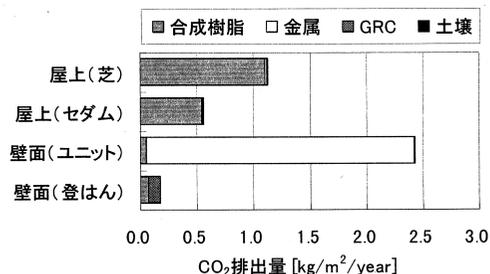


図-3 各建物緑化工法の材料製造に伴う1年あたりCO<sub>2</sub>排出量

#### (2) 運用段階

灌水には上水を使用することとし、水道水の使用およびポンプ動力に起因するCO<sub>2</sub>排出量を算出した。電力のCO<sub>2</sub>排出原単位はJEMAI-LCA Pro<sup>2)</sup>により、東京都の水道水のCO<sub>2</sub>排出原単位は文献<sup>4)</sup>より0.193 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>を用いた。

表-2に示す季節毎の必要灌水量<sup>3,9)</sup>および東京管区気象台の降水量観測値より、自然降水の不足分を人工灌水で補うものとして、年間灌水量を算出した。更に、この灌水量とポンプ揚程より、年間ポンプ動力を算出した。全揚程の計算にあたって、ポンプ効率<sup>4)</sup>は0.6、配管抵抗は0.15 m/m、配管圧力は入口・出口ともに20 m、実揚程は、

屋上緑化の場合は、建物高度、ユニット型壁面緑化の場合は、(建物高度+階高)×0.5とした(建物高度・階高は、表-1を参照)。登はん型壁面緑化については、プランタ地上設置を想定したため、揚水のためのポンプ動力は不要とした。

表-2 各緑化工法で必要となる1回あたり灌水量および頻度  
(春：3-5月，夏：6-8月，秋：9-11月，冬：12-2月)

	灌水量 [L/m <sup>2</sup> /回]	頻度
屋上緑化 (芝)	92	夏：毎日 春・秋：週2~3回 冬：週1~2回
屋上緑化 (セダム)	46	夏：2週に1回 秋~春：不要
壁面緑化 (ユニット)	春・夏：7.0 秋・冬：4.4	春・夏：毎日 秋・冬：1日おき
壁面緑化 (登はん)	春・夏：7.0 秋・冬：0.0	春・夏：毎日 秋・冬：不要

各緑化工法を事務所ビルに導入した場合について、以上の条件より算出した、運用段階における年間CO<sub>2</sub>排出量を図-4に示す(集合住宅に導入した場合については、建物高度に応じて、ポンプ動力に起因する電力分の寄与が小さくなる他は同様の結果である)。必要水量の小さいエクステンシブ屋上緑化(セダム)については、自然降水以外の灌水は不要との結果である。その他の工法についても、運用段階におけるCO<sub>2</sub>排出量は、材料製造段階の値と比べて1桁小さく、ライフサイクル全体への影響は小さいことが分かる。

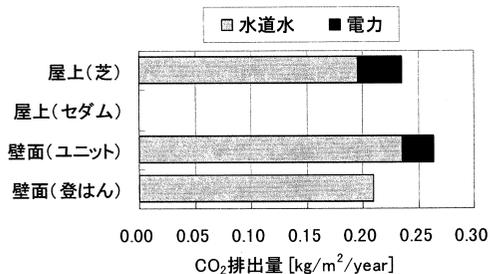


図-4 各建物緑化工法の運用に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量  
(事務所ビルに適用した場合)

#### 4. 都市気象・ビルエネルギー連成解析

##### (1) 計算条件

各工法の建物緑化を対象街区の全ての建物に同一条件で導入する場合を想定し、これに伴う年間の空調需要変化を都市気象・ビルエネルギー連成モデルCM-BEM<sup>1)</sup>に

よる通年計算結果より検討した。

CM-BEM計算における主な建物空調関係の設定を表-3に示す。空調期間については、日本冷凍空調工業会規格(JRA4046, JRA4048)より、空調時間、設定温度、機器構成は、街区調査やアンケート調査の結果などを基に設定した。空調の動力源は、ビル用マルチ(ビルマル)、空冷チラー、家庭用エアコンについては電気、吸収式冷温水機および家庭用燃焼系暖房機器については全てガスとして、CO<sub>2</sub>原単位は、それぞれJEMAI-LCA Pro<sup>2)</sup>、事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(環境省)による値を用いた。

表-3 空調関連の設定

		事務所	集合住宅
空調期間	冷房	4/16~11/8	6/2~9/21
	暖房	12/14~3/23	10/28~4/14
空調時間	冷暖	8:00~21:00 (休日は停止)	冷房：7:00~3:00 暖房：7:00~2:00
	設定温度	冷房 25℃ 暖房 20℃	25℃ 24℃
機器構成	冷房	ビルマル 28% (定格COP:2.58)	エアコン 100% (定格COP:5.03)
		空冷チラー 12% (定格COP:2.73)	
	吸収式 60% (定格COP:0.97)		
	暖房	ビルマル 35% (定格COP:3.15)	エアコン 35% (定格COP:5.33)
空冷チラー 5% (定格COP:2.18)		燃焼系 65% (定格COP:0.81)	
吸収式 60% (定格COP:0.94)			

緑化導入対象となる建物はRC造とし、街区毎に無断熱および高断熱の2段階の断熱仕様(表-4)を想定して計算を行った。窓については、全ての計算条件で、厚さ3mmの単板ガラスとした。

表-4 建外壁の熱抵抗設定値 [m<sup>2</sup>K/W]

		事務所	集合住宅
無断熱条件	屋上	1.22	0.49
	側壁	0.30	0.20
高断熱条件	屋上	8.50	1.62
	側壁	4.75	1.42

建物緑化を導入しない条件(ベースケース)のシミュレーション結果(図-5)によると、事務所ビルでは、冷房の割合が暖房に比べて大きいのに対し、集合住宅では暖房の割合が大きいことが特徴である。また、高断熱化によって暖房需要が大きく削減される一方で、冷房需要に対しては削減効果が小さく、冷房負荷の大部分は、窓面透過日射であることが示唆される。

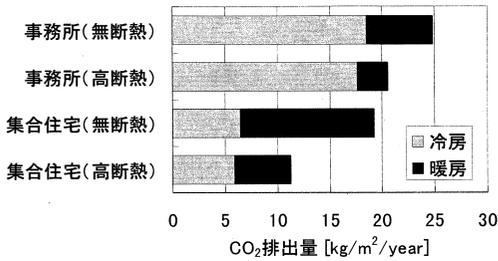


図-5 建物空調に伴う床面積当たり年間CO<sub>2</sub>排出量  
(建物緑化非導入時)

CM-BEM計算における緑化導入ケースの設定条件を表-5に示す。屋上緑化については、1日の蒸発量の季節最大値が、表-2に示した灌水量と一致するよう潜熱輸送コンダクタンスを調整し、表に示す蒸発効率(季節平均値)を得た。登はん型壁面緑化の日射遮蔽率は神奈川県庁舎における実測結果<sup>7)</sup>に基づき、快晴時の全天日射遮蔽率が約65%となるように設定した。なお、斜面日射量の計算には、Isotropicモデルを用い、直散分離には、晴天・曇天を問わないWatanabeモデル<sup>8)</sup>を採用した。

全ケースにつき、緑化された部分のアルベドは0.15(非緑化コンクリート面は0.2)とした。ユニット型壁面緑化については、パネル裏の表面温度が気温に等しいと仮定し、側壁面の放射冷却を妨げることによる保温効果を考慮した。

表-5 緑化導入ケースの数値実験設定

	効果(夏季/冬季)	導入範囲
屋上緑化(芝)	平均蒸発効率: 0.4/0.2 土壌層熱抵抗: 0.2 m <sup>2</sup> K/W	屋上面 50% (事務所)
屋上緑化(セダム)	平均蒸発効率: 0.01/0.00 土壌層熱抵抗: 0.1 m <sup>2</sup> K/W	86% (住宅)
壁面緑化(ユニット)	全天日射遮蔽率: 1.0/1.0 ボーエン比: 0.2/0.2	側壁南面全面 (窓面を除く)
壁面緑化(登はん)	直達日射遮蔽率: 1.0/0.0 ボーエン比: 0.2/-	側壁南面全面 (窓面を含む)

## (2) 計算結果

以上の設定条件を用いて、CM-BEMによる各建物緑化工法の導入ケースの通年計算を行い、緑化非導入時の計算結果(図-5)との差をとることにより、空調需要の変化に基づくCO<sub>2</sub>排出量増減を求めた(図-6)。

### a) 事務所街区

インテンシブ屋上緑化(芝)は、土壌層の断熱効果が働くため、冷房需要だけでなく暖房需要も減少し、通年CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず削減されるが、高断熱条件での削減量は小さくなっている。エクステンシブ屋上緑化(セダム)は、冷房需要が増加、暖房需要は減少して

おり、通年CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず増加する結果となった。これは、潜熱による冷却効果が極めて小さい反面、コンクリート面に比べてアルベドが小さいため、表面温度を上昇させる方向に作用するためである。

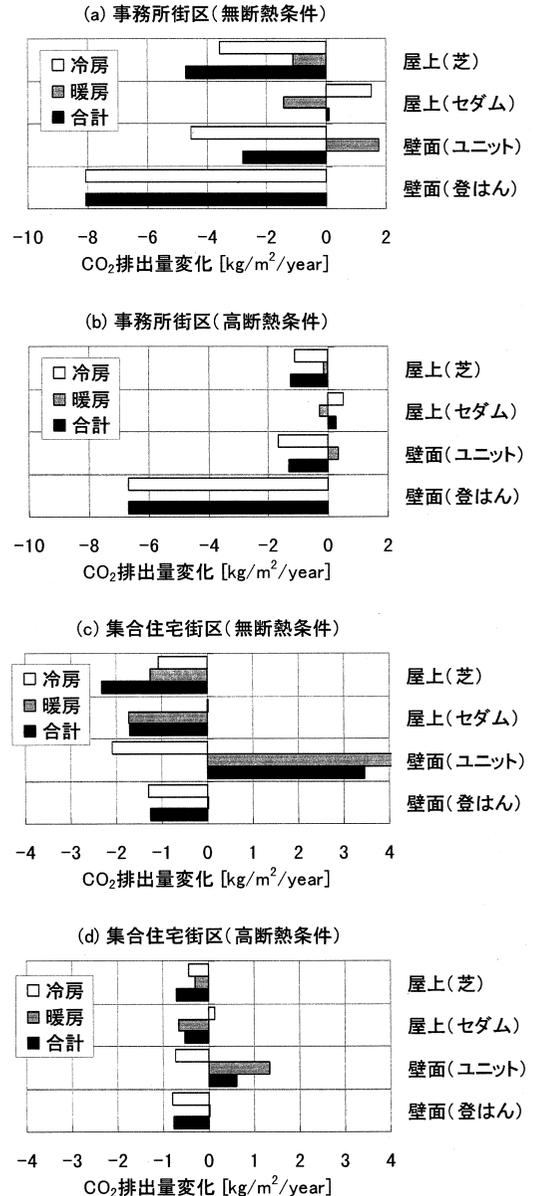


図-6 建物緑化導入による空調需要起源年間CO<sub>2</sub>排出量の変化

ユニット型壁面緑化は、冷房需要が減少、暖房需要は増加しており、通年CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず削減される結果となった。屋上緑化(芝)と同様に、高断熱条件での削減量は小さくなる。これに対し、登はん型壁面

緑化は、窓面透過日射を遮蔽する効果が大きいため、高断熱条件でも冷房需要が大きく削減される一方、一年生植物を用いるため暖房需要には影響がなく、断熱条件によらず、最大の年間CO<sub>2</sub>排出削減を示す結果となった。

## b) 集合住宅街区

インテンシブ屋上緑化（芝）は、事務所街区の結果と同様の傾向を示し、冷房需要・暖房需要ともに減少し、年間CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず削減されるが、事務所街区の結果と比べると、暖房需要削減分の寄与が大きい。エクステンシブ屋上緑化（セダム）は、事務所街区の結果と同様に、冷房需要が増加するが、暖房需要の減少量がこれを上回り、年間CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず削減される結果となった。

ユニット型壁面緑化は、冷房需要は減少するが、暖房需要を増加分がこれを大きく上回り、年間CO<sub>2</sub>排出は断熱条件によらず増加する結果となった。これに対し、登はん型壁面緑化は、事務所街区の結果と同様に、断熱条件によらず、年間CO<sub>2</sub>排出が削減される結果となった。

## 5. LCCO<sub>2</sub>評価結果

以上で検討を行った、材料製造段階、運用段階および空調需要変化に伴うCO<sub>2</sub>排出量増減を統合し、LCCO<sub>2</sub>排出量を算出した結果を図-7に示す。

### (1) 事務所街区

インテンシブ屋上緑化（芝）は、無断熱条件では、空調需要の削減効果が大きいため、LCCO<sub>2</sub>排出量も削減されるが、高断熱条件では、空調需要の削減効果が小さいため、LCCO<sub>2</sub>排出量が増加する結果となった。エクステンシブ屋上緑化（セダム）は、空調需要の削減効果が得られないため、断熱条件によらず、LCCO<sub>2</sub>排出量が増加する結果となった。

ユニット型壁面緑化は、空調需要は削減されるが、材料製造段階でのCO<sub>2</sub>排出量が大きく、LCCO<sub>2</sub>排出量は、無断熱条件では僅かに削減を示すが、高断熱条件では増加する結果となった。これに対し、登はん型壁面緑化は、空調需要削減効果が大きく、材料製造段階におけるCO<sub>2</sub>排出量も小さいため、断熱条件によらず、最大のLCCO<sub>2</sub>排出削減を示す結果となった。

### (2) 集合住宅街区

インテンシブ屋上緑化（芝）は、事務所街区の結果と同様の傾向を示し、LCCO<sub>2</sub>排出量は、無断熱条件では削減されるが、高断熱条件では増加する結果となった。エクステンシブ屋上緑化（セダム）も同様に、無断熱条件

では削減されるが、高断熱条件では増加する結果となった。

ユニット型壁面緑化は、空調需要の削減効果が得られないため、断熱条件によらず、LCCO<sub>2</sub>排出量が増加する結果となった。これに対し、登はん型壁面緑化は、事務所街区の結果と同様に、断熱条件によらず、年間CO<sub>2</sub>排出が削減される結果となった。

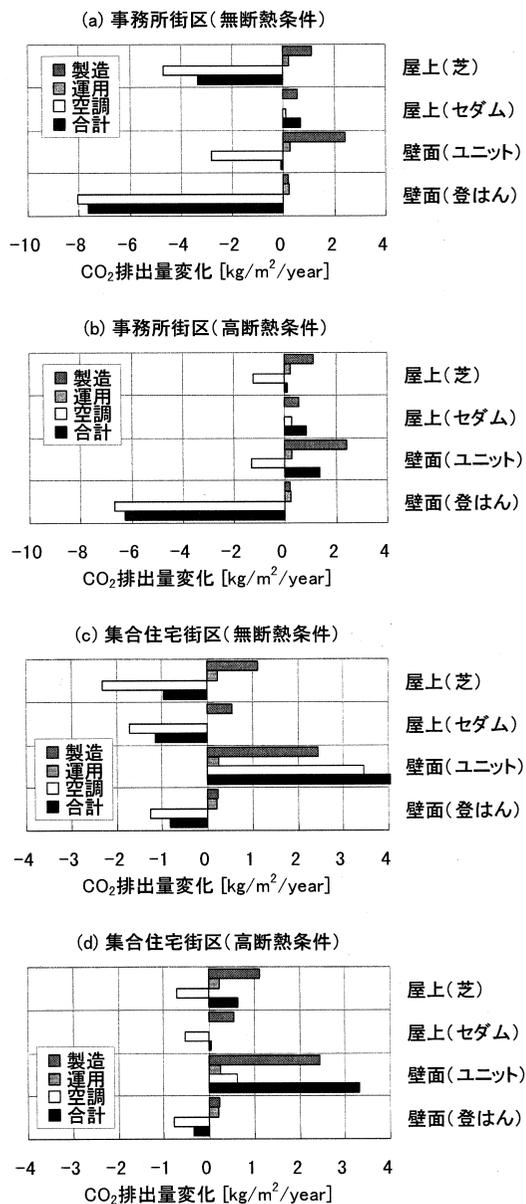


図-7 建物緑化導入ケースにおけるライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

## 6. 総括

各壁面緑化技術のLCCO<sub>2</sub>評価をまとめると、以下の評価結果が得られた。

### a) インテンシブ屋上緑化（芝）

街区によらず無断熱条件ではLCCO<sub>2</sub>減となったが、高断熱条件ではLCCO<sub>2</sub>増となった。これは、空調負荷の削減量に占める土壌層の断熱効果の寄与が大きいためである。土壌層による断熱効果は、冬季の暖房需要も削減する点で有利であるが、新築の高断熱ビルに導入する場合などは、材料製造・運用段階のLCCO<sub>2</sub>排出量が空調負荷の削減効果を上回らないよう、十分に配慮して設計を行うことが望まれる。

### b) エクステンシブ屋上緑化（セダム）

無断熱条件の住宅街区でのみではLCCO<sub>2</sub>減となり、その他の条件ではLCCO<sub>2</sub>増となった。これは、主として蒸散による屋上面の冷却効果がほとんど得られないことに起因しており、空調負荷削減対策としての位置付けは困難といえる。

### c) ユニット型壁面緑化

ユニット型壁面緑化は、無断熱条件の事務所街区でのみでLCCO<sub>2</sub>減となり、その他の条件ではLCCO<sub>2</sub>増となった。これは、材料製造段階のCO<sub>2</sub>排出量が大きいこと、窓面に適用できないため冷房需要削減効果が小さいこと、常緑性植物を用いるため暖房需要を増加させてしまうことなどが要因である。このため、空調負荷削減対策としてではなく、街路空間の熱環境改善策としての位置付けが適当といえる。

### d) 登はん型壁面緑化

本評価で考慮した全ケースでLCCO<sub>2</sub>削減となった。特に、事務所ビルへの導入が有効であり、高断熱ビルでも効果が大きい。これは、材料製造段階のCO<sub>2</sub>排出量が小さいこと、窓面への日射を遮蔽するため冷房需要削減効

果が小さいこと、一年性植物を用いるため暖房需要を増加させないことなどが要因で、ユニット型壁面緑化の特徴と対照的である。

本報告は、所与の条件下での特定の技術の評価結果であり、任意の条件下での同種の技術すべてにあてはまるものではないが、各工法の効果の特徴や適性を示すものであり、対策導入の指針として活用できると考えられる。今後は、経済性を含めた評価や、統合評価指標による熱環境改善効果を含めた評価を行うことが課題である。

## 参考文献

- 1) Ihara, T., et al: Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat island countermeasures and energy-saving measures, *Applied Energy*, 85-1, pp. 12-25, 2008.
- 2) 社団法人産業環境管理境界：JEMAI-LCA Pro, [http://www.jemai.or.jp/CACHE/lca\\_details\\_lcaobj6.cfm](http://www.jemai.or.jp/CACHE/lca_details_lcaobj6.cfm), 2009.
- 3) 田島ルーフィング：屋上緑化カタログ, 2006.
- 4) 玄地裕, 他：ヒートアイランド対策技術のライフサイクルアセスメント, 第23回エネルギー・資源学会発表会講演論文集, pp. 265-268, 2004.
- 5) 杉孝：壁面緑化資料, 2006.
- 6) 日本GRC工業会：GRCの環境負荷, <http://grc.gr.jp/site/dtpdf/grclca.pdf>, 2009.
- 7) 神奈川県環境科学センター：ヒートアイランド緩和対策の効果検証について（結果報告）, 2007
- 8) 渡辺俊行, 他：水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, No.330, pp. 96-108, 1983.

## LIFE CYCLE CO<sub>2</sub> EMISSION ANALYSIS OF BUILDING GREENEING METHODS UTILIZING AN URBAN CANOPY-BUILDING ENERGY MODEL

Kazuki YAMAGUCHI, Koji YAMADA, Masayuki KAWAGUCHI, Kazuyoshi MURAYAMA, Tomohiko IHARA and Yutaka GENCHI

LCCO<sub>2</sub> emissions of various building greening methods were studied by inventory analysis and air-conditioning load calculation using an urban canopy-building energy model. Multiple scenarios where each greening method was applied to buildings with different uses and thermal insulation performances were evaluated, and the result showed that many of the greening methods increased LCCO<sub>2</sub> emissions depending on conditions of the buildings. However, it was indicated that a wall greening method using annual vine plant reduced LCCO<sub>2</sub> emissions for all the scenarios considered in this study, which is mainly attributable to large reductions in cooling demands and little influence on heating demands.