

ライフサイクル CO₂ 評価に基づいた都市環境の整備計画に関する一考察

A Study on the Planning and Design of Urban Environment Based on Life Cycle CO₂ Evaluation

藤村 修平* 市村 恒士**

Shuhei FUJIMURA Koji ICHIMURA

Abstract: Development of a low-carbon city is one alternative being considered to address global warming. In addition, evaluation of the effectiveness of life cycle CO₂ (hereafter, LCCO₂) in reducing CO₂ emissions is currently being examined with interest in a number of sectors. In consideration of the current interest in these areas, this study sets out to discuss a method for LCCO₂ evaluation in urban areas, and considers means for planning and design of urban environments and landscape planting based on LCCO₂ evaluation. More specifically, several urban models differing in terms of urban environment planning and design (such as land use and land cover on landscape planting) were considered and evaluated in terms of LCCO₂. The following results were observed: 1) the LCCO₂ evaluation method utilized in this study was shown to be applicable to various urban models; 2) under basic conditions the urban model demonstrated that LCCO₂ within the non-built coverage area was estimated to be about 158.1t-C/ha; 3) where the urban model's tree crown cover area was expanded to reduce the amount of LCCO₂, the maximum reduction rate of LCCO₂ in the non-built cover area was estimated to be about 28.8%; and 4) where land use in the urban model was changed to reduce the amount of LCCO₂, the rate of LCCO₂ reduction in the non-built coverage area ranged from an estimated 83.0% to 117.0%.

Keywords: life cycle CO₂ evaluation, low-carbon city, urban environmental planning and design, land use, urban landscape planting

キーワード: LCCO₂ 評価, 低炭素型都市, 都市環境の整備計画, 土地利用, 都市緑化

1. 背景及び目的

近年, 地球温暖化問題が懸念される中, その主な原因とされる温室効果ガス, 特に二酸化炭素 (以下, CO₂) の削減が社会全体に対して求められ, 「低炭素型都市の構築」が期待されている^{1)~3)}。

特に造園分野においては, 低炭素型都市の構築にあたり, その他の建設分野とは異なり「自然や緑」を対象にしているという独自性を活かし, CO₂ 吸収固定効果をもつ植物や, いわゆる「緑のリサイクル」によって発生する木チップ等の低炭素型の自然素材を利用する等, 自然や緑を活用した低炭素型都市の構築のあり方について様々な検討を行う必要がある。

このような状況の中, 造園分野においては, 地球温暖化防止に向け, 都市の緑の CO₂ 吸収固定効果や緑のリサイクル等に着目した各種の研究^{4)~10)}などを蓄積してきた。

他方で, CO₂ 排出削減に向けた取り組みの1つとして様々な分野においてライフサイクル CO₂ (以下, LCCO₂) 評価の重要性が認識されている。都市を直接的に整備する建設業においても建築分野, 土木分野 (道路等) に対する LCCO₂ 評価に関する研究^{11)~13)}などが行われ, 建設業者が建築等の各分野, 空間において LCCO₂ 評価に基づき計画・設計を進めるようになってきている。

造園分野においても, 都市公園 (住区基幹公園) に対する LCCO₂ 評価に関する研究^{11)~14)}が行われている。

一方, これらの研究^{11)~14)}では, 緑の CO₂ 吸収固定に着目した既往研究とは異なり, 都市公園内の植栽状況等の変化のみならず, 園内の歩道の自然素材への変更 (木チップ化等) や遊具等の施設の変更等の, 人工的な施設の変更も含めた CO₂ の削減シナリオを設定し, それらの削減シナリオによる整備計画の変化が CO₂ 削減に及ぼす影響等を明らかにしている。また, これらの知見を活用することにより都市公園のみならず人工的な施設が中心となる建築・土木空間を含む都市や街区等に対する LCCO₂ 評価の手法への応用, 展開の可能性も示唆している^{11)~14)}。

都市における自然や緑 (植物や自然素材等) は, 都市公園に留

まらず, 住宅地の庭等の建築の外構空間や, 街路樹のように道路にも存在可能である。したがって, 都市公園のみならず, 建築, 土木に関わる空間も一体的に捉え, 都市や街区等に対する LCCO₂ 評価に基づき自然や緑を活用するための「土地利用や土地被覆のあり方 (以下, 都市環境の整備計画)」について検討する必要があると考えられる。

ここで, 建築, 土木, 及び緑地の各々の空間を含む都市や街区等を対象とした LCCO₂ 評価に関する研究を整理すると, 実在のニュータウンを対象に, 産業連関表方式や個別積み上げ方式を組み合わせた評価方式を用い, CO₂ 排出要因の整理やその抑制方法の整理, 各種の CO₂ の削減シナリオによる CO₂ 削減効果について評価を行った研究^{15)~16)}, 土地利用等の区分に関連する十数個の各工種別の CO₂ 排出量の原単位を既往研究から導きだし, その原単位をベースに複数の実在するニュータウン等の建設時のみの CO₂ 排出量を推定した簡易的な評価手法の構築に関する研究¹⁷⁾等がみられる。

これらの研究により, 都市等を対象とした LCCO₂ 評価手法の考え方や計画・設計への応用可能性に関する研究蓄積が進んできたと考えられる。また, これらの研究の流れを整理すると, 特に都市や街区等におけるニュータウン整備や都市の再整備を視野に, 精度が高い一方で複雑な評価手法から, プランナーが土地利用計画等の構想 (計画・設計の初期段階) において実際に活用できるような評価手法の開発へとシフトしてきたことが理解できる。

一方, 造園分野の独自性として必要となる自然や緑を活用した低炭素型の都市環境の整備計画に資する知見として, 前述した既往研究^{4)~10)}などでは, 主に都市に自然, 緑を導入することによる CO₂ 吸収固定効果等が明らかになってきたが, 例えば, 一般に LCCO₂ の発生量の大きい建築・道路等の人工的な土地被覆や土地利用に関して自然や緑を優先的に導入あるいは自然や緑に置換することによる都市全体としての CO₂ 削減効果の解明や, 利用とのバランスを考慮すれば自然や緑と共存可能な建築以外の空間

* 北海道農業協同組合中央会

** 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域

(以下、非建ぺい地)の環境整備を行うことによるLCCO₂削減の可能性等については殆ど検討されていない。

そこで本論文では、これまでの都市や街区等におけるLCCO₂研究の流れを踏まえながら、自然や緑を活用した低炭素型都市の構築においてプランナー等が土地利用等の計画・設計の初期段階において活用可能で、かつ建築、土木、及び緑地の各々の空間を含む都市や街区等を想定した簡易的なLCCO₂評価手法を構築すること、自然や緑の活用を変化させたモデル住区に対し構築したLCCO₂評価手法を実行すること、その評価に基づき低炭素型都市の構築における自然や緑を活用した都市環境の整備計画の可能性について検討することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 都市におけるLCCO₂評価手法の構築

本研究では、産業連関表方式と個別積み上げ方式を組み合わせた方式を用いた既往研究¹⁾¹¹⁾¹⁷⁾などを参考にしつつ、独自のLCCO₂評価手法を構築した。その基本的な考え方は以下の通りである。

まず、自然や緑を活用した都市環境の整備計画を検討することを留意し、様々な土地利用や土地被覆等が異なる区分(以下、土地利用区分)を設定し、その土地利用区分における単位面積当たりのLCCO₂等、LCCO₂に関する原単位(以下、原単位)を把握した。

次に、LCCO₂評価の評価対象となるモデル住区を設定し、各土地利用区分の面積等のデータ(以下、土地利用データ)を整理した。そして、原単位と土地利用データを乗じることでLCCO₂を推定した。以下に詳細を示す。

1) 土地利用区分の設定

本研究では、自然や緑を活用した都市環境の整備計画を検討する際に望ましいと考えられる土地利用区分を設定するため、特に樹冠被覆地(樹木、森林等)や各土地被覆における自然素材(芝、木チップ等)の導入等を想定しながら、既往研究¹⁷⁾及び区画整理事業の指導手引き(札幌市)等を参考に土地利用区分を設定した。

2) 各土地利用区分における原単位の整理

各土地利用区分における原単位を把握するため、各土地利用区分に対応した原単位に関する文献調査^{1)⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯}を実施した。

実際には、文献調査で得られた原単位等をもとに、本研究においては、都市の更新期間50年(一般的な公園の更新期間)を踏まえながら、各土地利用区分における単位面積当たりのLCCO₂等を算出した。

(2) モデル住区(基準タイプ及び削減タイプ)に対するLCCO₂評価の実行

本研究の都市におけるLCCO₂評価に基づいた都市環境の整備計画の基本的な考え方を以下に示す。

まず、LCCO₂評価の評価対象としてモデル住区(基準タイプ及び削減タイプ)を設定し、各タイプの土地利用データを整理した。

次に、モデル住区(基準タイプ及び削減タイプ)に対するLCCO₂評価を実行し、各々のLCCO₂や、削減タイプの基準タイプに対するLCCO₂削減率(以下、CO₂削減効果)等を推定した。

以上より、低炭素型都市の構築における自然や緑を活用した都市環境の整備計画の可能性等について検討した。

1) モデル住区(基準タイプ及び削減タイプ)の設定

本研究では、都市におけるLCCO₂評価を実行するにあたり、建築、土木、及び緑地が一体的に存在する空間であること、都市の各土地利用の構成等を考慮する必要があるため比較的容易に多様な土地利用が計画できることを条件に以下のようなモデル住区を設定した。

まず、モデル住区は、近隣住区論¹⁹⁾、国勢調査²⁰⁾等をもとに、1つ近隣住区を想定し、総面積1km²、計画人口10,000人、1人当たりの延べ床面積41.3m²/人と設定した。

次に、モデル住区において札幌市等での住区計画における各土地利用の適正配置や、近隣住区論¹⁹⁾等を文献調査し、評価の基準となるモデル住区(以下、基準タイプ)を設定し、その土地利用データを整理した。

基準タイプの土地利用データを整理すると、建築空間は、ネット建ぺい率40%(グロス建ぺい率24.7%)、アスファルト舗装15%(建築空間当たり)、草地・芝地・裸地45%(建築空間当たり)、樹冠被覆率10.5%(建築空間当たり)となり、道路空間は、幹線道路(両側植栽)9.4%、準幹線道路7.5%、区画道路17.5%となり、公園・緑地空間は、街区公園1ha(1人当たり1m²)、近隣公園2ha(1人当たり2m²)、地区公園1ha(1人当たり1m²)、樹冠被覆率(公園・緑地空間)20%となっている。

さらに、基準タイプを踏まえ、自然と緑を活用しながら高いCO₂削減効果が期待できる土地被覆や土地利用を大きく変更させたシナリオ(以下、削減シナリオ)を設定し、それぞれの削減タイプの各土地利用データを整理した。

実際には、削減シナリオとして、削減シナリオAは、樹冠被覆地を拡大するシナリオ、削減シナリオBは、土地被覆の素材を変更(土地被覆の自然素材化:利用に影響しない範囲でアスファルト部分を木チップ化)するシナリオ、さらに、削減シナリオCは、

表-1 各土地利用区分の原単位

土地利用区分		原単位	備考	
土地利用	土地被覆等	kg-C/m ²		
建 ぺ い 地	建築物	木造2階建て戸建住宅	1,595.8 (11)注1)	
		RC造4階建て集合住宅	7,549.6 (11)注1)	
		RC造8階建て集合住宅	15,099.2 (11)注1)	
	エン ト ラ ン ス 駐 車 場 等	草・芝地、裸地	0	
		アスファルト舗装	5.68 (18)	
		木チップ舗装	0.06 (14)	
		樹冠被覆地	-11.26 (6)	
	非 建 ぺ い 地	幹 線 道 路	車道 アスファルト舗装	50.12 (17)注2)
			木チップ舗装	0.06 (14)
			歩道 街路樹付きアスファルト舗装	38.40 (5)14)17)注3)
街路樹付き木チップ舗装			-5.99 (5)14)17)注3)	
準 幹 線 道 路		車道 アスファルト舗装	48.82 (17)注2)	
		木チップ舗装	0.06 (14)	
		歩道 街路樹付きアスファルト舗装	37.20 (5)14)17)注3)	
		街路樹付き木チップ舗装	-7.19 (5)14)17)注3)	
区 画 道 路		車道 アスファルト舗装	48.54 (17)注2)	
		アスファルト舗装	48.54 (17)注2)	
	木チップ舗装	0.06 (14)		
	歩道 街路樹付きアスファルト舗装	35.45 (5)14)17)注3)		
	街路樹付き木チップ舗装	-8.94 (5)14)17)注3)		
公 園 ・ 緑 地 空 間	街区公園	5.84 (14)		
		樹冠被覆地	-11.26 (6)注4)	
	近隣公園	4.31 (1)		
		樹冠被覆地	-11.26 (6)注4)	
	その他都市公園	5.84 (14)		
	樹冠被覆地	-11.26 (6)注4)		
	森林等	-13.78 (6)		

*※全ての項目において炭素換算を実施:原単位(kg-C/kg)=文献調査により得た原単位(kg-CO₂/kg)×(12/44)

*※エントランス・駐車場等(建築)のアスファルト舗装、砂利、木チップ舗装は、把握可能であった資材生産過程に排出されるLCCO₂量としてのみ計上した(したがって、木チップ舗装における腐敗による炭素の放出等は、考慮していない)。また、草地・芝地・裸地に関する原単位が不明であり、LCCO₂は考慮しないものとした。

注1) 原単位(kg-C/m²)=LCA指針による基準値の基準値(kg-C/m²)等 ※建築物は、2.4及び8階建てとし、便宜的に建ぺい地1m²あたりとした

注2) 原単位(kg-C/m²)=建設工事過程における原単位(kg-C/m²)等+維持修繕工事における原単位(kg-C/m²・年)等×ライフサイクル期間50(年) ※アスファルト舗装の維持管理に関する設計は、ライフサイクル期間に2度の打ち換えとした

注3) 原単位(kg-C/m²)=建設工事過程における原単位(kg-C/m²)等+(維持修繕工事における原単位(kg-C/m²・年)等+年平均二酸化炭素吸収・固定量(kg-C/m²・年)×ライフサイクル期間50(年))

注4) 原単位(kg-C/m²)=樹冠被覆地あたりの原単位(kg-C/m²) ※樹冠被覆地は、樹冠被覆率20%以上とした

土地利用を変更（想定する人口とそれに対応する延べ床面積等は変化させずに建築物を高層化、また、道路等を削減し発生した余剰地を樹冠被覆地に変更）するシナリオを設定した。

具体的に、削減シナリオ A（樹冠被覆地の拡大）では、樹冠被覆率（エントランス・駐車場等）を 100%に増加すること、準幹線道路・区画道路に街路樹を両側に植栽すること、樹冠被覆率（公園・緑地空間）を 80%に増加することが変更点となっている。

削減シナリオ B（土地被覆の素材の変更）では、利用に影響が少ない建築の駐車場（エントランス・駐車場等の一部）をアスファルト舗装から木チップ舗装にすべて変更すること、同様に準幹線道路・区画道路の歩道部をすべて木チップ舗装とすることが変更点となっている。

削減シナリオ C（建築物の高層化（土地利用の変更））における「中層型住居」では、建築物を 4 階建て RC 造集合住宅にし、区画道路を削減すること、「高層型住居」では、建築物を 8 階建て RC 造集合住宅にし、区画道路及び準幹線道路を削減することが変更点となっている。

2) モデル住区（基準タイプ及び削減タイプ）に対する LCCO₂ 評価の実行

構築した LCCO₂ 評価手法をモデル住区（基準タイプ及び削減タイプ）に適用し、LCCO₂ や CO₂ 削減効果等を推定した。

実際には、基準タイプ及び削減タイプの土地利用データに原単位を乗じて LCCO₂ を推定し、基準タイプ及び削減タイプの都市全体の LCCO₂、非建ぺい地の LCCO₂、及び削減タイプの都市全体の CO₂ 削減効果、非建ぺい地の CO₂ 削減効果等を推定した。

3. 結果及び考察

(1) 都市における LCCO₂ 評価手法の構築

各土地利用区分の原単位を整理した結果を表-1 に示す。
まず、土地利用区分をみると、建築空間に関しては、木造 2 階建て戸建住宅、RC 造 4 階建て集合住宅、RC 造 8 階建て集合住宅、及びエントランス・駐車場等（草・芝地・裸地、アスファルト舗装、木チップ舗装、及び樹冠被覆地）の 7 区分に、道路空間に関しては、大きく幹線道路、準幹線道路、及び区画道路に分け、各々を車道のアスファルト舗装、歩道のアスファルト舗装、木チップ舗装、街路樹付きアスファルト舗装、及び街路樹付き木チップ舗装の 14 区分に、公園・緑地空間に関しては、街区公園、近隣公園、その他都市公園、及び森林等の 4 区分に設定した²¹⁾。

次に、各土地利用区分における原単位をみると、建築空間に関しては、木造 2 階建て戸建住宅 1,595.8kg-C/m²、RC 造 4 階建て集合住宅 7,549.6kg-C/m²、RC 造 8 階建て集合住宅 15,099.2kg-C/m² 等²²⁾、道路空間に関しては、幹線道路（車道：アスファルト舗装）50.12kg-C/m²、幹線道路（歩道：街路樹付きアスファルト舗装）38.40kg-C/m²、準幹線道路（車道：アスファルト舗装）48.82kg-C/m²、準幹線道路（歩道：街路樹付きアスファルト舗装）37.20 g-C/m²、区画道路（車道：アスファルト舗装）48.54kg-C/m²、区画道路（歩道：街路樹付きアスファルト舗装）35.45kg-C/m² 等²³⁾、公園・緑地空間に関しては、街区公園 5.84g-C/m²、近隣公園 4.31kg-C/m²、その他都市公園 5.84kg-C/m²、森林等 13.78kg-C/m² 等が把握された。

以上より、各土地利用区分の原単位をみると、建築空間では、建築物の原単位が特に大きいこと、道路空間では、幹線道路から区画道路の順で原単位が小さいこと²⁴⁾、公園・緑地空間では、各種の公園が正の値（排出側）であること等が把握された。

(2) モデル住区（基準タイプ及び削減タイプ）に対する LCCO₂ 評価の実行

設定した基準タイプの土地利用データを整理した結果を、表-2 及び表-3 に示す。また、設定した基準タイプ及び削減タイプ

表-2 基準タイプの土地利用データ

土地利用区分	土地利用	土地被覆等	基準タイプ			備考		
			面積 ㎡	各種 土地被覆 %	各種 土地用途 %		全体	
建ぺい地	建築物	木造2階建て戸建住宅	246,656	100.0%	40.0%	24.7%	11)	
		RC造4階建て集合住宅	0	-	0.0%	0.0%	11)	
		RC造8階建て集合住宅	0	-	0.0%	0.0%	11)	
		計	246,656	100%	40.0%	25%		
	建築空間	エントランス 駐車場等	草・芝地、裸地	277,488	75.0%	45.0%	27.7%	
			アスファルト舗装	92,496	25.0%	15.0%	9.2%	18)
			木チップ舗装	0	0.0%	0.0%	0.0%	14)
			樹冠被覆地	104,832	28.3%	10.5%	12.1%	6) 注1)
		計	369,984	100%	60%	37%		
		小計	616,640	-	100%	62%		
非建ぺい地	幹線道路	車道 アスファルト舗装	46,848	50.0%	13.6%	4.7%	17)	
		木チップ舗装	0	-	0.0%	0.0%	14)	
		歩道 街路樹付きアスファルト舗装	46,848	50.0%	13.6%	4.7%	5) 17) 注1)	
		街路樹付き木チップ舗装	0	-	0.0%	0.0%	5) 17) 注1)	
	計	93,696	100.0%	27.3%	9.4%			
	準幹線道路	車道 アスファルト舗装	44,736	60.0%	13.0%	4.5%	17)	
		アスファルト舗装	29,824	40.0%	8.7%	3.0%	17)	
		木チップ舗装	0	-	0.0%	0.0%	14)	
		歩道 街路樹付きアスファルト舗装	0	-	0.0%	0.0%	5) 17) 注1)	
		街路樹付き木チップ舗装	0	-	0.0%	0.0%	5) 17) 注1)	
		計	74,560	100.0%	21.7%	7.5%		
	区画道路	車道 アスファルト舗装	109,440	62.5%	31.9%	10.9%	17)	
		アスファルト舗装	65,664	37.5%	19.1%	6.6%	17)	
		木チップ舗装	0	-	0.0%	0.0%	17)	
歩道 街路樹付きアスファルト舗装		0	-	0.0%	0.0%	5) 17) 注1)		
街路樹付き木チップ舗装		0	-	0.0%	0.0%	5) 17) 注1)		
計		175,104	100.0%	51.0%	17.5%			
小計		343,360	-	100.0%	34.3%			
公園・緑地空間		街区公園	10,000	-	25.0%	1.0%	14)	
	樹冠被覆地	0	-	0%	0%	6)		
	近隣公園	20,000	-	50.0%	2.0%	1)		
	樹冠被覆地	0	-	0%	0%	6)		
	その他都市公園	10,000	-	25.0%	1.0%	14)		
	樹冠被覆地	0	-	0%	0%	6)		
	森林等	0	-	0%	0%	6)		
	小計	40,000	-	100.0%	4.0%			
合計	1,000,000	-	100%	100%				

注1) 街路樹、樹冠被覆地に関しては、道路・公園・建築（空閑地）面積とは別途に計上した。また、街路樹は、基準タイプにおいて両側の歩道に植栽し、47.9%（道路総面積当たり）の樹冠被覆率と設定した。なお、公園の樹冠被覆地は、同様に20%（公園面積当たり）の樹冠被覆率と設定した。また、街路樹付きアスファルト舗装は、アスファルト舗装のLCCO₂原単位から街路樹のCO₂吸収固定量を減じた値とした。

各々のモデル住区の土地利用データ及びLCCO₂評価を実行した結果を表-4 に示す。

1) 基準タイプに対する LCCO₂ 評価の実行

基準タイプに対する LCCO₂ 評価を実行した結果、都市全体の

表-3 モデル住区における基準タイプ及び削減タイプの概要

土地利用区分	基準タイプ	削減タイプ		
		削減シナリオA (樹冠被覆地の拡大)	削減シナリオB (土地被覆の素材の変更)	削減シナリオC (建築物の高層化)
建築物	建築物			・建ぺい率60% (中層型住居) ・建ぺい率80% (高層型住居)
	エントランス 駐車場等	・建ぺい率40%		
道路空間	幹線道路	・駐車場15% (/建築空間) ・樹冠被覆率17%	・樹冠被覆率100%に増加	・駐車場を木チップ舗装に変更
	準幹線道路	・車・歩道共にアスファルト舗装 ・街路樹が両側に植栽	・街路樹を両側に植栽	・歩道部を木チップ舗装に変更
	区画道路	・車・歩道共にアスファルト舗装	・街路樹を両側に植栽	・歩道部を木チップ舗装に変更
公園・緑地空間	街区公園	・樹冠被覆率20%	・樹冠被覆率80%に増加	
	近隣公園	・樹冠被覆率20%	・樹冠被覆率80%に増加	
	その他都市公園 (森林等)	・樹冠被覆率20%	・樹冠被覆率80%に増加	・余剰地を森林に更新

※削減シナリオCにおいて、居住空間の高層化による建ぺい地の削減に伴い生じる非建ぺい地（建築空間の駐車場・エントランス等）の土地利用比率は、基準タイプの建築空間と同様に設定した。また、人口及び1人当たりの延べ床面積等は変更せず、「中層型住居」は、4階建てRC造集合住宅、ネット建ぺい率60%、グロス建ぺい率12.3%とし、「高層型住居」は、8階建てRC造集合住宅、ネット建ぺい率80%、グロス建ぺい率6.2%として設定した。

LCCO₂は 4,094.5t-C/ha であること、非建ぺい地の LCCO₂は 158.1t-C/ha であり、非建ぺい地の LCCO₂が都市全体の 3.9%を占めること等が把握された。

2) 削減タイプに対する LCCO₂ 評価の実行

各削減シナリオに基づいた削減タイプに対する LCCO₂ 評価を実行した結果を、以下に示す。

削減シナリオAに基づいた削減タイプでは、都市全体の LCCO₂は 4,048.8t-C/ha であり、都市全体の CO₂削減効果は 1.1%であること、非建ぺい地の LCCO₂は 112.6t-C/ha であり、非建ぺい地の CO₂削減効果は 28.8%であること等が推定された。

削減シナリオBに基づいた削減タイプでは、都市全体の LCCO₂は 4,012.2t-C/ha であり、都市全体の CO₂削減効果は 2.0%であること、非建ぺい地の LCCO₂は 76.0t-C/ha であり、非建ぺい地の CO₂削減効果は 51.9%であること等が推定された。

削減シナリオC「中層型住居」に基づいた削減タイプでは、都市全体の LCCO₂は 9,382.9t-C/ha であり、都市全体の CO₂削減効果は-129.2%であること、非建ぺい地の LCCO₂は 25.5t-C/ha であり、非建ぺい地の CO₂削減効果は 83.0%であること等が推定された。

削減シナリオC「高層型住居」に基づいた削減タイプでは、都市全体の LCCO₂は 9,343.9t-C/ha であり、都市全体の CO₂削減効果は-128.2%であること、非建ぺい地の LCCO₂は 26.8t-C/ha であり、非建ぺい地の CO₂削減効果は 117.0%であること等が推定された。

4. おわりに

以下では、本研究で得られた結果を整理しながら、本研究で構築した LCCO₂ 評価手法や、その評価結果に基づき低炭素型都市の構築における自然や緑を活用した都市環境の整備計画の可能性等について述べる²⁵⁾。

まず、本研究で構築した LCCO₂ 評価手法について整理する。

本研究では、自然や緑を活用した都市環境の整備計画への応用、特に土地利用等の計画・設計の初期段階において活用可能で建築、土木、及び緑地の各々の空間を含む都市や街区等を想定した簡易的な LCCO₂ 評価手法の構築を試みた。その結果、現段階では未だ試行段階ともいえるが構築した評価手法に基づき、設定したモ

デル住区（基準タイプ及び削減タイプ）に対する LCCO₂ を推定することが可能であった。また、都市環境の整備計画の異なる複数のモデル都市に対し適用可能であり、各々の削減シナリオによる CO₂削減効果等も明らかになったことから、本研究で構築したような LCCO₂ 評価手法が、自然や緑を活用した低炭素型の都市環境の整備計画の検討等へ応用可能であることが示唆された。

次に、本研究の LCCO₂ 評価の結果に基づき、低炭素型都市の構築における自然や緑を活用した都市環境の整備計画の可能性について整理する。

本研究では、土地利用の変更をせずに自然や緑を活用した土地被覆の変更による非建ぺい地の CO₂ 削減効果の観点から都市環境の整備計画を検討した結果、樹冠被覆地の拡大に着目した削減シナリオA（基準タイプの樹冠被覆率 15.8%を 49.2%に変更）により CO₂ 削減効果は 28.8%となること、土地被覆の素材の変更に着目した削減シナリオB（基準タイプの駐車場と準幹線道路・区画道路の歩道部におけるアスファルト舗装を木チップ舗装にすべて変更）により CO₂ 削減効果は 51.9%となること、樹冠被覆地の拡大及び土地被覆の素材の変更（削減シナリオA+削減シナリオB）を最大限に実施することで、都市全体の CO₂ 削減効果は 3.1%程度見込めることが把握された。また、土地利用の変更（想定する人口等は変化させずに建築物を高層化し、道路等を削減し発生した余剰地を樹冠被覆地に変更）に伴う都市全体に対するグロス建ぺい率と非建ぺい地の CO₂ 削減効果の関係性を検討した結果、グロス建ぺい率が低層型 24.7%、中層型 12.3%、及び高層型 6.2%において、非建ぺい地の CO₂ 削減効果は、中層型 83.0%、高層型 117.0%となること等が把握された。

これらのことより、低炭素型都市の構築における自然や緑を活用した都市環境の整備計画の可能性等について整理すると、土地利用を変化させずとも緑化可能地への樹冠被覆地の拡大や土地被覆の自然素材への変更が CO₂ 削減に一定程度有用（都市全体で 3.1%程度削減）であること、非建ぺい地の LCCO₂は、利用の影響が少ない空間（駐車場や一部道路の歩道）において半分程度（全アスファルト面積比で約 25%）でも木チップ等の低炭素型の素材を使用することで 50%程度の CO₂ 削減効果が見込めること、同様に建築物の高層化（土地利用の変更）によって非建ぺい地の LCCO₂は 100%程度の CO₂ 削減（カーボンフラット）が見込め

表一4 モデル住区の土地利用データとLCCO₂及びCO₂削減効果

土地利用区分		原単位 (kg-C/m ²)	基準タイプ		削減タイプ						
					削減シナリオA (樹冠被覆地の拡大)	削減シナリオB (土地被覆の素材変更)	削減シナリオC(建築物の高層化)				
土地利用	土地被覆等		面積(m ²)	LCCO ₂ (kg-C)	面積(m ²)						
					削減シナリオA	削減シナリオB	削減シナリオC(中層型住居 (余剰地森林))	削減シナリオC(高層型住居 (余剰地森林))			
建 べ い 地	建 築 物	木造2階建て戸建住宅	1,595.81	246,656	393,616.1	246,656	246,656	0	0		
		RC造4階建て集合住宅	7,549.60	0	0.0	0	0	123,328	0		
		RC造8階建て集合住宅	15,099.20	0	0.0	0	0	0	61,664		
		計	-	246,656	393,616.1	246,656	246,656	123,328	61,664		
建 築 空 間	エ ン ト ラ ン ス 等	草・芝地、裸地	0	277,488	0.0	277,488	277,488	61,664	11,568		
		アスファルト舗装	5.68	92,496	525.4	92,496	0	20,560	3,856		
		木チップ舗装	0.06	0	0.0	0	92,496	0	0		
		計	-	369,984	-655.0	369,984	369,984	82,224	15,424		
		(樹冠被覆地)	-11.26	104828.8	-1180.4	295,984	104,832	20,966	7,862		
	小計	-	616,640	392,961.1	616,640	616,640	205,552	77,088			
非 建 べ い 地	道 路 空 間	幹 線 道 路	車道	アスファルト舗装	50.12	46,848	2,348.2	46,848	46,848	46,848	46,848
			歩道	木チップ舗装	0.06	0	0.0	0	0	0	0
			街路樹付きアスファルト舗装	38.40	46,848	1,799.0	46,848	46,848	46,848	46,848	
			街路樹付き木チップ舗装	-5.99	0	0.0	0	0	0	0	
		計	-	93,696	4,147.2	93,696	93,696	93,696	93,696		
	準 幹 線 道 路	車道	アスファルト舗装	48.82	44,736	2,184.0	44,736	44,736	44,736	0	
		歩道	アスファルト舗装	48.82	29,824	1,456.0	0	0	29,824	0	
		木チップ舗装	0.06	0	0.0	0	29,824	0	0		
		街路樹付きアスファルト舗装	37.20	0	0.0	29,824	0	0	0		
		街路樹付き木チップ舗装	-7.19	0	0.0	0	0	0	0		
		計	-	74,560	3,640.0	74,560	74,560	74,560	0		
	区 画 道 路	車道	アスファルト舗装	48.54	109,440	5,312.2	109,440	109,440	0	0	
		歩道	アスファルト舗装	48.54	65,664	3,187.3	0	0	0	0	
		木チップ舗装	0.06	0	0.0	0	65,664	0	0		
		街路樹付きアスファルト舗装	35.45	0	0.0	65,664	0	0	0		
街路樹付き木チップ舗装		-8.94	0	0.0	0	0	0	0			
	計	-	175,104	8,499.5	175,104	175,104	0	0			
	小計	-	343,360	16,286.8	343,360	343,360	168,256	93,696			
公 園 ・ 緑 地 空 間	街区公園	5.84	10,000	58.4	10,000	10,000	10,000	10,000			
	樹冠被覆地	-11.26	0	0.0	375	0	0	0			
			(2000)		(8000)	(2000)	(2000)	(2000)			
	近隣公園	4.31	20,000	86.2	20,000	20,000	20,000	20,000			
	樹冠被覆地	-11.26	0	0.0	750	0	0	0			
			(4000)		(16,000)	(4000)	(4000)	(4000)			
	その他都市公園	5.84	10,000	58.4	10,000	10,000	10,000	10,000			
	樹冠被覆地	-11.26	0	0.0	375	0	0	0			
		(2000)		(8000)	(2000)	(2000)	(2000)				
	森林等	-13.78	0	0.0	0	0	586,192	789,216			
	小計	-	40,000	203.0	40,000	40,000	626,192	829,216			
合計		-	1,000,000	409,450.9	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000			
都市全体のLCCO ₂ (t-C/ha)				4,094.5	4,048.8	4,012.2	9,382.9	9,343.9			
都市全体のCO ₂ 削減効果				-	1.1%	2.0%	-129.2%	-128.2%			
非建べい地のLCCO ₂ (t-C/ha) (都市全体に対する非建べい地のLCCO ₂)				158.1 (3.9%)	112.6	76.0	25.5	-26.8			
非建べい地のCO ₂ 削減効果				-	28.8%	51.9%	83.0%	117.0%			

ること、また、非建ぺい地のカーボンフラットに向けては都市全体に対するグロス建ぺい率を18%程度(ネット建ぺい率で30%程度(※基準タイプ:40%))となるように、低層型住居と中層型住居を共存させながら余剰地に可能な限りの緑化を行う必要性があること等が示唆された。

なお、シナリオC(建築物の高層化)では、都市全体のCO₂削減効果が大きな負の値となったが、これは建築物の構造変更(RC化)による影響が大きい。この結果を踏まえると、都市全体のCO₂削減に向けては、建築物の高層化(土地利用の変更)を伴わず、低層のまま可能な限り自然や緑を活用することが一つの方向性といえる。一方で、建築物の高層化(土地利用の変更)による非建ぺい地のCO₂削減効果は上述したとおりであり、建築物の高層化(土地利用の変更)は、建築物の構造変更(RC化)による影響を除けば、造園分野の独自性をより発揮しながら都市全体のCO₂削減効果が期待できる方向性と考えられる。したがって、本研究における土地利用区分で設定できなかった「木造」の中・高層化住居等のLCCO₂等を整理し、改めて建築物の高層化による都市全体のCO₂削減効果について検討することが望まれる。

今後、自然や緑を活用した低炭素型都市の構築に向けては、LCCO₂評価を適用しながら、本研究のモデル都市のように都市の各空間を一体的に捉え、環境への配慮と利用とのバランスを考えつつ、実際の各土地被覆や用途地域(建ぺい率や容積率)の変更等も視野に入れながら自然や緑を取り入れ、都市の更新・再整備等(区画整理事業やコンパクトシティ化等)を展開することが期待される。また、研究上の課題として、本研究で構築したLCCO₂評価手法は、上述したとおり応用性等が期待される一方、未だ試行段階ともいえるものであり、今後、実際に計画・設計への応用に向けては、一部上述した再検討の余地があると考えられる「開発前の条件、都市空間のスケール、及び土地利用区分の設定」や、「原単位の精査」に関わる継続的な調査・研究が望まれる。

補注及び引用文献

- 1) 市村恒士, 奥優一(2009): 都市公園に対するライフサイクルCO₂評価に関する研究: ランドスケープ研究72(5), 605-610
- 2) 国土交通省(2010): 低炭素都市づくりガイドラインの概要 <http://www.mlit.go.jp/crd/city_plan/teitanso.html>, 2011.8.10更新, 2009.10.30参照
- 3) 新田敬師(2010): 低炭素都市づくりガイドラインについて: 都市緑化技術77, 6-9
- 4) 市村恒士(2006): 樹冠被覆面積にもとづく都市緑地の二酸化炭素固定量の推定に関する研究: ランドスケープ研究, 69(5), 613-616
- 5) 市村恒士, 柳井重人, 丸田頼一(2000): 街路樹の二酸化炭素固定量の推定に関する研究, 環境情報科学論文集14, 267-272
- 6) Koji ICHIMURA and Daiki YATEGASHI(2007): Study of Estimating the Amount of Carbon Storage and Sequestration in Urban Green Spaces Based on Tree Crown Cover Area in Hokkaido. Journal of Environmental Information Science: Vol.35(5), 29-36
- 7) 市村恒士, 黒澤和隆(2005): 都市林の二酸化炭素固定効果に関する研究 -北海道帯広市「帯広の森」を事例として: 日本建築学会環境系論文集597, 81-87
- 8) 市村恒士, 岡田孝幸, 柳井重人, 丸田頼一(1999): 都市公園における樹木の二酸化炭素固定効果に関する研究: 日本都市計画学会学術研究論文集34, 1-6
- 9) 半田真理子, 手代木純(2005): 地球温暖化防止に資する都市緑地の評価: 都市緑化技術56, 81-87
- 10) 八重樫大樹, 市村恒士(2008): 都市緑地における樹木を中心とした炭素循環モデルに関する研究 -北海道札幌市を事例として: 環境情報科学論文集22, 91-96

- 11) 日本建築学会(2006): 建物のLCA 指針〜温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール〜: 日本建築学会, 178pp
- 12) 岡本英清・酒井寛二・漆崎昇(1993): 土木工事における炭素排出量の推定: 第1回地球環境シンポジウム講演集, 93-98
- 13) 酒井寛二, 漆崎昇, 相賀洋, 下山真人(1996): 建物のライフサイクル二酸化炭素発生量とその抑制方策に関する研究: 日本建築学会計画系論文集484, 105-112
- 14) 市村恒士, 細川一昂(2010): ライフサイクルCO₂評価に基づいた都市公園の整備計画に関する研究: ランドスケープ研究73(5), 459-464
- 15) 谷口孚幸, 伊藤武美, 有浦幸隆(1994): 都市スケールにおける二酸化炭素排出量の推定方法: 環境システム研究22, 249-254
- 16) 伊藤武美, 花木啓祐, 本多博(1996): 二酸化炭素排出抑制技術・システムのニュータウン建設への適用: 環境システム研究24, 250-259
- 17) 伊藤武美, 花木啓祐, 本多博(1997): ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討: 環境システム研究25, 379-384
- 18) 財団法人建設物価調査会(2008): 建設工事標準歩掛 改訂45版: 建設物価調査会積算委員会, 1160-1169
- 19) 日笠端(1986): 都市計画(第2版), 共立出版, pp.186
- 20) 札幌市(2006): さっぽろ統計情報-平成17年国勢調査- <<http://www.city.sapporo.jp/itoukei/kanko/kokuchou.html>>, 2011.4.14更新, 2009.10.30参照
- 21) 本研究の土地利用区分は、「一般的な土地利用計画(近隣住区理論や道路構造令等)で用いられる区分であること」、「想定する削減シナリオに対応できる土地利用区分であること」、「削減シナリオ等に基づく土地利用の変化がLCCO₂の影響を与える区分であること(=土地利用区分により原単位が異なること)」を考慮し検討した。実際には、本研究では、建築、土木及び緑地の各々の空間を含むLCCO₂評価手法を構築することも踏まえ、土地利用区分は、建築空間、土木空間(道路)、公園・緑地空間の3つの空間を意識し、建築空間は、原単位や利用の考え方も全く異なる「建築物」と「エントランス・駐車場等」の外部空間の2区分、道路空間は、近隣住区理論等でも用いられかつ既往研究で原単位が異なった「幹線道路」「準幹線道路」及び「区画道路」の3区分、公園・緑地空間は、道路空間同様に、近隣住区理論等で用いられ既往研究で原単位が異なった「街区公園」、「近隣公園」、「その他の公園」及び「森林」の4区分とした。
- 22) 建築物の原単位は、評価ツール¹⁰⁾をもとに、評価ツールに記載されている基準値を用いて設定した。基準値の建築物とは、木造戸建て住宅に関しては、延べ床面積134m²、RC造集合住宅に関しては、延べ床面積7,583m²である。さらに、アスファルト舗装の原単位は、参考文献¹⁰⁾をもとに、アスファルト舗装8サンプルの各種舗装工に関する100m²当たりのCO₂排出量の平均値(炭素換算)を算出した。
- 23) 道路の維持管理におけるCO₂排出量を算出した既往研究²⁰⁾等をもとに、維持管理の手法をライフサイクル期間において、打ち換えを2回行う計画で設定した。街路樹の樹冠被覆地に関する原単位の算出は、既往研究⁹⁾をもとに、道路44サンプル(両側植栽のみ対象)の道路幅員平均8.9m、植栽密度183本/km、平均樹冠幅5.4m、樹木1本当たりの樹冠被覆面積23.3m²から、平均的な樹冠被覆率を47.9%と設定した。
- 24) これらの原単位の相違は、引用文献¹⁰⁾に詳細が記されていないため相違の根拠は不明であるが、道路構造令の構造基準にあるように、道路構造がアスファルト工事においても幹線道路(2層)と準幹線道路(1層)と異なり、これらの違いが原単位に影響を与えたものと想定される。
- 25) なお、以下の考察等は、本研究で用いたモデル住区の設定条件に基づいた限定的なものであり、商業・業務地域や鉄道等を含めた都市一般を議論したものではない。
- 26) 天野耕二, 牧田和也(2000): 舗装道路の建設と維持修繕に伴う環境負荷とコストのライフサイクル評価: 土木学会論文集657, 57-64