

都市基盤の再構築におけるLCAの役割：都市生活排水・廃棄物処理システムを事例として

松本 亨¹・左 健²

¹正会員 博(工) 北九州市立大学助教授 国際環境工学部環境デザイン学科
(〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

²非会員 博(工) 北九州市立大学研究員 国際環境工学部環境デザイン学科

本研究では、都市基盤の再構築におけるLCAの役割、限界、限界への対処方法について考察した。具体的には、都市生活排水および廃棄物処理システムを対象に、技術や施設の組み合わせによる15ケースについて、LCAを実施し比較した。それをベースに、2050年までを対象にライフサイクルシミュレーション(LCS)を実施し、趨勢ケースと対策シナリオを比較できることを示した。さらに、環境側面以外の評価基準との総合評価として階層化意思決定法(AHP)を適用し、感度解析を試みた。最後に、都市基盤が都市の物質フローに与える影響を分析するために、LCAと物質フロー分析(MFA)の効果的連携と、その体系的表現としての都市マテリアルフローコスト会計について解析例を示した。

Key Words: *life cycle assessment (LCA), life cycle simulation (LCS), analytic hierarchy process (AHP), Material flow analysis (MFA), material flow cost accounting (MFCA)*

1. はじめに：今後の社会基盤整備とLCA

社会資本ストックの更新：我が国の社会資本ストックの年増加率を見ると、1990年代は5%台で推移しているが、1972年の15%をピークに、高度成長期に急速な増加を続けてきた。1998年と1953年の社会資本ストック額の比は約27倍である(実質価格比)。高度成長期に急速に整備された社会資本ストックが近い将来更新期を迎え、膨大な更新費用が必要となることが指摘されている¹⁾。これは、一義的には維持更新に対してどのような経済的対応をとるかという問題として議論されているが、どのような技術と物質を、どのタイミングで更新するのかという資源・環境問題でもある。

人口減少と人口配置の変化：2000年の日本の総人口1億2,693万人に対して、2002年の予測では、中位推計によると2006年に1億2,774万人でピークに達した後、以後長期の人口減少過程に入るとされ、2050年にはおよそ1億60万人になるものと

予測されている²⁾。低位推計では2050年に9,203万人と予想されている。さらに、少子化、高齢化といった変化の他、限られた大都市への人口集中と、それ以外の都市の人口減少が予想される。

環境制約と循環型社会形成：資源の枯渇、最終処分場の残余年数の逼迫、地球温暖化等の環境制約に対応する形で、循環型社会形成が模索されている。都市基盤も、再生材料の積極利用という面と、静脈系インフラにおける単なる衛生処理から資源循環システムの一端を積極的に担う形への転換という面でこれに大きく関わっている。

以上は、短期的あるいは中長期的に社会基盤(都市に限れば都市基盤)をめぐる生ずる大きな変化要素であり、来るべき変化に対応するためのシステムの思考と展望に基づく戦略的検討が求められている。こうした問題意識のもと、本論では、都市の有機性資源循環システムを担う排水及び廃棄物処理インフラを対象として、その再構築の際に考慮すべき環境要素とLCAの役割を考察する。

2. 都市基盤の再構築と意志決定におけるLCAの役割

都市基盤を、なるべく環境負荷の小さい方法でそのニーズを満たすような整備が求められている。そのため、個々の構造物、その建設技術、あるいは構造物の総体によって成立する社会システムが地球環境的にどのような意味を持つかを、ライフサイクルの視点から評価することは大きな社会的要請になっている。

土木構造物を対象とするLCAの特徴を、製品を対象とするLCAとの比較においてあらためて整理すると、以下ようになる³⁾。

- ①施設の寿命が20～30年あるいはそれ以上と長いこと、
- ②工場において製造される規格品と異なりオーダーメイドの面が大きいこと、
- ③実際に発生する環境負荷及びそれによる環境影響の地属性 (site-specific) が大きいこと、
- ④構造物の整備によって他の社会システムに影響を及ぼすこと、
- ⑤代替案の間で得られる便益も異なるため機能単位の統一ができないことがほとんどであること、

⑥環境影響評価という既存の制度、さらには今後導入が検討されている戦略的環境アセスメントとの関係でLCAが議論されること。

以下に、①～⑤への対応として必要となる課題と対処について整理する(⑥は別稿に譲る)。なお、次章以降は、以下の(1)～(4)に対応する形で、都市生活排水・廃棄物処理システムを事例とした分析を紹介する。

(1) 技術評価：②、③、④(上記①～⑤に対応)

基本的にはLCAで対処可能であるが、②は主にLCI(ライフサイクルインベントリ分析)、③は主にLCIA(ライフサイクル影響評価)におけるデータ収集の業務量増大につながっている。

④の性質により、LCAの際のシステム境界を、評価対象の都市基盤に限定できないケースが往々にしてある。例えばある地域のある施設の建設によって環境負荷が発生するが、その結果、間接的に他の地域、施設からの環境負荷が低減するといったことが考えられる。資源化施設を対象とする場合の廃棄物処理システム全体への影響、交通インフラを対象とする場合の交通システム全体への影響はこれにあたる。

表-1 評価範囲とケース設定

		I			II			III			IV			V	
		I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	II-3	III-1a	III-1b	III-2a	III-2b	III-3a	III-3b	IV-1	IV-2
廃棄物	ごみの収集・輸送	選択1: 生ごみ有り													
	ごみ焼却(R)	選択2: 生ごみ無し													
	ごみ灰輸送(R)														
	灰処分の焼却(R)														
	ごみ発電(R)	選択1: 生ごみ有り・従来効率													
生ごみ	焼却に伴うCO ₂ 、N ₂ O	選択2: 生ごみ無し・従来効率													
	分別(I+R)	選択1: 単純手分別													
		選択2: 生ごみ乾燥機													
		選択3: DP	選択3-1: 直接DP												
			選択3-2: 固液分離DP												
			選択3-3: 浄化槽付DP												
	収集・運搬(R)	選択1: 湿生ごみ													
		選択2: 乾燥生ごみ													
		選択3: 固液分離DPから回収した乾燥固形分													
		選択4: 浄化槽汚泥													
リサイクル(R)		浄化・懸液の濃縮・輸送(A)													
		発酵(B)													
		重合(C)													
		熱化焼達のコンポスト化													
		化学プラによる代替効果													
		化肥による代替効果													
		選択1: PLA化	熱化(A)												
			発酵(B)												
			重合(C)												
			熱化焼達のコンポスト化												
下水	管渠(R)	化学プラによる代替効果													
	ポンプ場(R)	化肥による代替効果													
	下水処理(R)	選択1: 全量焼却・埋立													
		選択2: リサイクル	製造負荷												
			化肥による代替効果												
			製造負荷												
			化肥による代替効果												
			製造負荷												
			電気にによる代替効果												
			電気にによる代替効果												
下水	汚泥処理(R)	選択(A)-1: セメント原料化													
		選択(A)-2: 消化ガス化・発電													
		リサイクル(A)	選択(A)-3: 消化ガス化+BTX・水素化・発電												
			選択(A)-4: 消化ガス化・ガス溶融化												
			残余汚泥の焼却・埋立(B)												

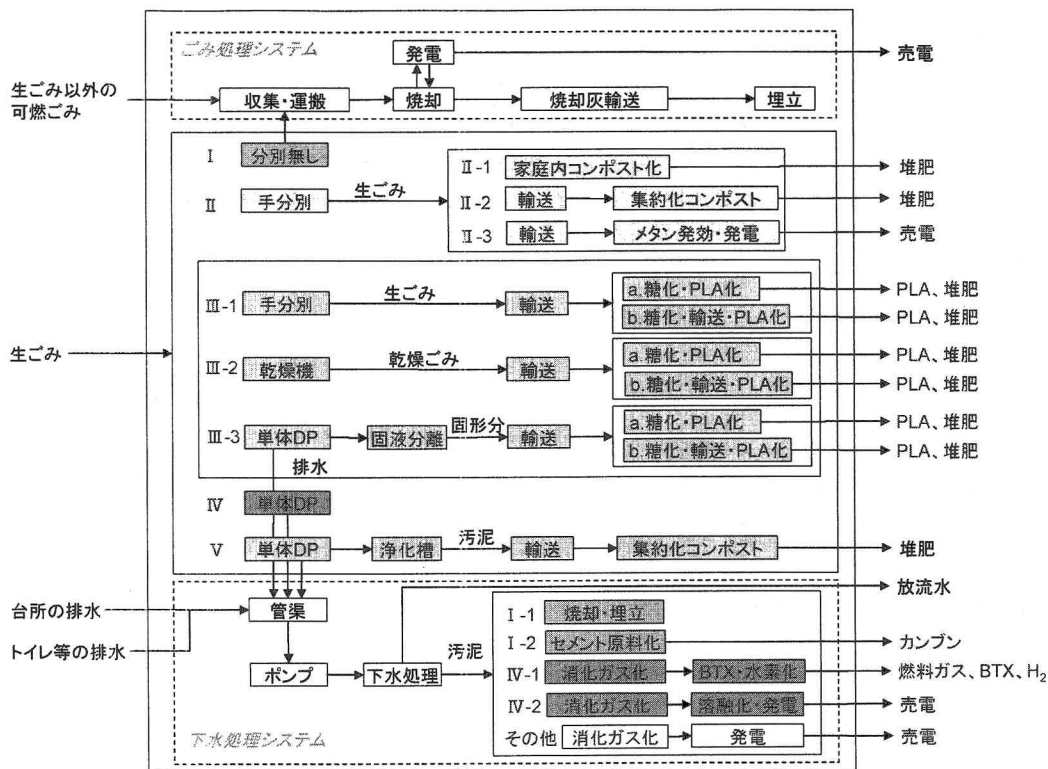


図-1 評価対象システムとシステム境界

(2) 時間依存パラメータの扱い：①

ここでいう時間依存パラメータとは、都市基盤の需要に影響を与える変数、都市基盤に関わる技術進歩、都市基盤整備による影響変数、LCIの原単位変化、LCIAの際のウェイト等を指す。

廃棄物処理施設を例にとると、明らかにライフサイクルは長い、運用・廃棄段階においても現在の技術を想定した評価しか行われない。また、再資源化シナリオを描いたところで、それが代替する製品は現実には時代と共に変化する。さらに、施設の需要も現実には一定ではないが一般には所与のものとして評価する。しかし、現実の社会における都市基盤の需要と供給を念頭に置いたとき、LCAにおいても評価対象を取り巻く外部条件の変化を評価に取り込むことが不可欠である。

(3) 環境側面以外の評価基準との総合化：⑤

ある施設の建設によって、それが存在しなかった場合に比べてさまざまなベネフィット（経済波及効果、時短効果、コストダウンなど）が発生する効果は大きく、また施設によってその効果は通常異なる。これが比較対象施設間の機能単位の統一

を難しくさせる要因である。そのため、環境側面のみならず、都市基盤整備に求められている本来の機能によって実現されるベネフィットとともに総合判断できるしくみが求められる。最近では費用便益分析¹¹⁾や、環境効率による評価が試みられている。

(4) 都市全体の物質フローへの影響：④

施設単位のLCIはミクロレベルの物質フロー分析(MFA)であると考えられるが、さらに大きいメゾスケール、マクロスケールの物質フローの中に施設単位のLCIを位置づけることは可能である。そにより、ある施設がより広いスケールの物質フローに及ぼす影響を表現することが可能となる。

3. 技術評価としてのLCA

都市の排水及び廃棄物処理システムをめぐる今後の都市基盤再構築を想定してLCAを実施した。想定したシステムは、表-1に示すような焼却処理を基調としたシステム(I.現状維持システム)、有

タを考慮したライフサイクルシミュレーション (LCS)

人口等刻々と変化する外部条件のもとで、都市基盤システムに係わる環境負荷を適切に評価するには、初期条件を所与として分析を行う従来のLCAでは限界がある。それは、2章でも触れたような、都市基盤の需要に影響を与える変数、都市基盤に関わる技術進歩、都市基盤整備による影響変数、LCIの原単位変化、LCIAの際のウェイト等の変化をいかに取り込むかという課題である。そこで、3章でLCAによる技術評価を行った結果をベースとして、評価対象となる都市基盤システムに大きな影響を及ぼす社会フレームの変化を組み入れた分析とするためにLCSの手法を適用した。これは、現実的なシナリオを扱うことができることが大きなメリットであり、都市基盤の最適更新スケジュールの算出が視野にある。

具体的には、浄化槽付ディスポーザーを趨勢(BaU: Business as Usual)シナリオとして設定し、それとの比較のもと新たに設定する都市基盤システムの導入シナリオについて比較評価を行う。動的変化を扱う社会フレームとして具体的には、人口、世帯数及び世帯人員数、1人あたり床面積、戸建/集合別構造種別床面積人口を扱い、これらをもとにディスポーザー普及人口や下水道システムへの流入水量・水質等を予測した。ディスポーザー排水の下水道システムへの放流方法と、汚泥(または固液分離後の固体分)の処理・再資源化技術によって、表-2に示すような3つのシナリオを想定した。なお、各シナリオで想定されている都市環境システムの導入による環境負荷の各年値は、従来型の静的LCAを実施した結果がもとになっている。

図-3にLCSの結果を示す。2000年時点では

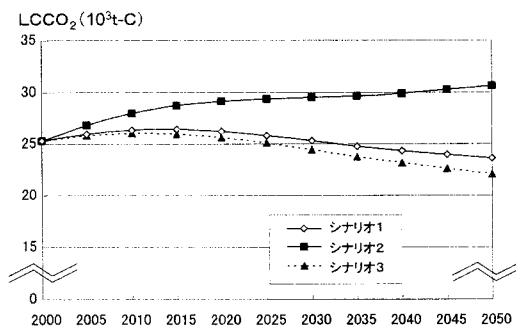


図-3 LCSによるLCCO₂の結果

のシナリオも浄化槽付ディスポーザーが人口比で約5%の普及を想定しているが、その後の変化は各シナリオの設定による。シナリオ2は人口減少という社会的条件の設定にもかかわらず増加傾向にある。他の2つのシナリオも人口の減少トレンドほどにはCO₂が減少していない。

5. 複数の手法・指標を統合化させることによるLCAの応用

(1) 環境側面以外の評価基準との総合化：AHPの適用

都市基盤システムが本質的に機能単位の統一が困難であること、それに対して都市基盤がもたらすベネフィットも評価し、費用便益分析や効率指標で評価する試みがあることは2章で述べた。

ここでは別の手法の実施例として、多目的意思決定法のうち階層化意志決定法(AHP: analytic

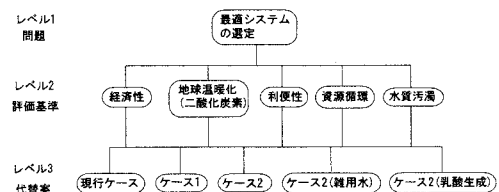


図-4 AHPのための階層図

表-3 評価基準別比較

	現状	ケース1	ケース2	ケース2(雑用水)	ケース2(乳酸)	単位
地球温暖化(CO ₂)	23	24	28	28	23	kg-C/年/人
経済性	42	45	46	45	42	千円/年/人
水質汚濁(TOD)	26,849	31,153	21,904	21,898	22,107	g/年/人
利便性	△	○	○	○	○	
資源循環	1,468	2,973	646	646	16,457	万円/年

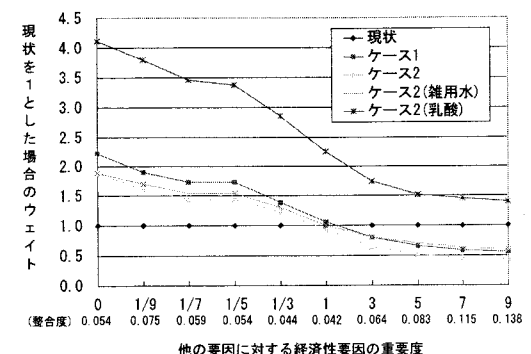


図-5 感度分析の結果

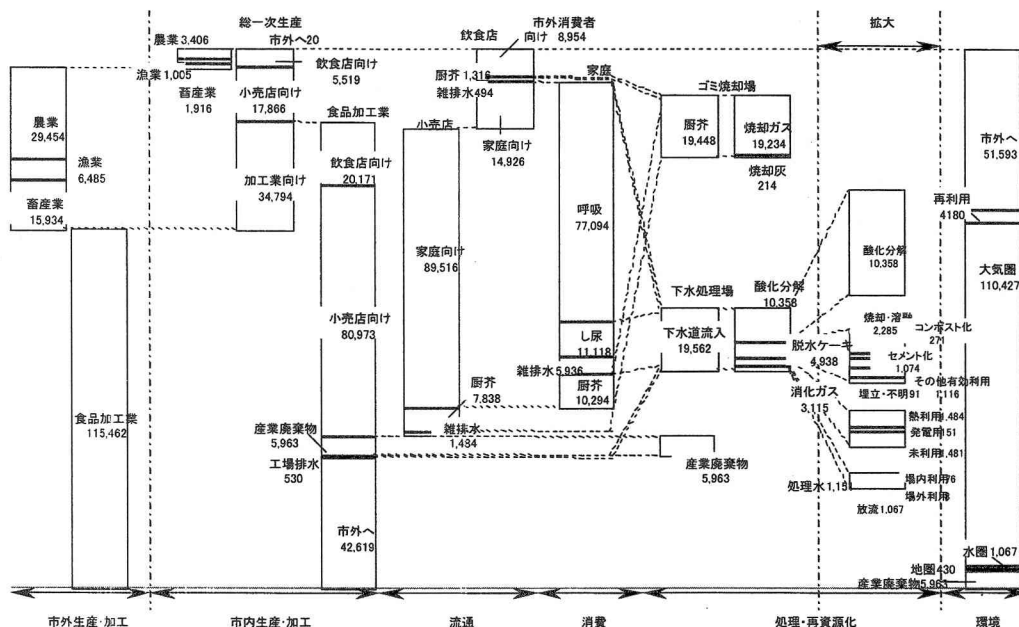


図-6 食物由来の炭素フロー (t-C/年: 福岡市)

hierarchy process) を用いて、複数の評価基準から意志決定を行った事例を紹介する⁷⁾。

評価対象としている都市基盤はここまでと同様である。評価基準として利用したのは、LCAによって算出した気候変動への環境負荷 (CO₂)、水域環境負荷 (TOD) のほか、経済性としてライフサイクルコスト (LCC)、再資源化可能量として資源循環性と、生活者にとっての利便性を加えてAHPを実施した、図-4が階層図、表-3が評価基準別比較である。資源循環性は単純な量ではなく、付加価値(製品単価)の違いを考慮した。また、生活者の利便性については生ゴミに対する煩わしさからの解消を重視して設定した。

図-5は、その他の要因に対する経済要因のウェイトを横軸にとり、現行システムの総合ウェイトを1.0とした場合のその他のケースの総合ウェイトを縦軸にとり、経済要因のウェイトを、他の基準間の重要度を一定としておいてパラメトリックに変化させた結果を表している。この図では、横軸が1.0のラインを堺に、これより上にあるケースは採用されるべきと判断される。結果をみると、ケース2(乳酸生成)以外は、他の要因に対する経済要因のウェイトが1と3の間から右側において現行システムが有利となっている。つまり、経済要因を若干重視した場合以降である。

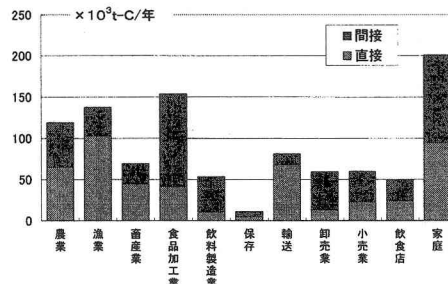


図-7 食品に付随した都市の直接及び間接CO₂排出量 (福岡市)

(2) 都市全体の物質フローへの影響分析

都市基盤システムが都市全体の物質フローに及ぼす影響を分析するために、ここでは都市内フードシステム全体の炭素循環を定量化することを試みた⁸⁾。そこで対象とした物質フローは、①食品由来の炭素フロー、②フードシステムに付随する化石燃料消費と包装材(紙、プラスチック)の投入による炭素フロー、③フードシステムに付随して間接的に投入される化石燃料等の有機物、つまり直接投入物質に付随して投入される物質・エネルギーによる炭素フローである。

なお、フードシステムという用語は、通常生産者から消費者までの食品流通を指すが、ここでは消費者の下流、つまりし尿の形で排泄される部分

表-4 フードシステムに関わるマテリアルフローコストマトリクス (物量表示: 福岡市)

福岡市の食生活のコスト (1997年、t-CG/yr)	マテリアル・コスト			システム・コスト	輸送・廃棄コスト										計	割合	
	食料	エネルギー	包装材		一般廃棄物処理					産業廃棄物処理							
					輸送コスト		処理コスト			排水処理		産業廃棄物処理					輸送コスト
製品	576,227	137,933	438,294	-	345,574	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	921,801	64%
加工品の市外へ	127,638	42,639	84,999	-	75,947	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	203,585	14%
市内人口摂取	66,713	7,082	59,631	-	53,806	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	120,519	8%
市内人口摂取	381,876	88,212	293,664	-	272,242	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	654,118	45%
ロス	295,074	179,551	115,523	-	108,169	64,955	23,880	516	23,364	18,392	22,683	295	22,388	468,198	32%		
市内農業	6,879	3,466	3,413	-	2,809	N.A.	N.A.	-	-	-	N.A.	N.A.	N.A.	9,688	1%		
市内畜産業	12,937	9,005	3,932	-	2,193	N.A.	N.A.	-	-	-	N.A.	N.A.	N.A.	15,130	1%		
市内漁業	0	0	0	-	0	N.A.	N.A.	-	-	-	N.A.	N.A.	N.A.	0	0%		
市内食品製造業	9,314	6,493	2,821	-	5,902	2,735	-	-	-	411	2,324	42	2,282	17,951	1%		
移・輸入食品分	205,078	131,350	73,728	-	66,610	22,861	-	-	-	2,502	20,359	253	20,106	294,549	20%		
流通業	5,581	3,163	2,418	-	1,918	1,353	145	27	119	1,208	-	-	-	8,852	1%		
外食産業	16,046	7,742	8,304	-	7,938	826	444	82	362	382	-	-	-	24,809	2%		
家庭	39,240	18,332	20,908	-	20,799	14,497	608	112	495	19,889	-	-	-	74,535	5%		
包装材	46,891	-	-	46,891	N.A.	5,545	977	179	798	-	4,588	N.A.	N.A.	52,438	4%		
紙	26,541	-	-	26,541	N.A.	4,361	151	28	123	-	4,210	N.A.	N.A.	30,902	2%		
プラスチック	20,351	-	-	20,351	N.A.	203	174	32	142	-	30	N.A.	N.A.	20,554	1%		
缶類	0	-	-	0	N.A.	661	636	119	518	-	25	3	22	661	0%		
瓶類	0	-	-	0	N.A.	319	16	1	15	-	304	7	296	319	0%		
計	918,192	317,484	553,817	46,891	453,743	70,500	24,857	695	24,162	18,392	27,251	295	22,388	1,442,435	100%		
割合	64%	22%	38%	3%	31%	5%	2%	0%	2%	1%	2%	0%	2%	100%			

と、厨芥類として廃棄される固形廃棄物とその処理・処分までを含んだ意味として使用している。

上記①の炭素フローを解明した結果を、図-6に示す。②、③の炭素フローに関しては、食料生産、加工、流通、調理、排水及び廃棄物処理・処分の各プロセスのLCCO₂を推計することで求めた(図-7)。排水及び廃棄物処理・処分のプロセスというのは、ここまで扱ってきた都市基盤のLCAの結果を用いることができる。

さらに、都市のフードシステムの生産過程から廃棄・処分過程までの一連の物質フローと、それに付随するエネルギーや包装材の投入構造の関係をシステムティックに捉えるために、マテリアルフローコスト会計(MFCA)を都市に適用した⁹⁾。近年、国内素材産業の製造ラインを対象としたMFCAの導入実験が複数行われている¹⁰⁾が、このMFCAを都市の資源循環構造を表現するためのツールとして適用することは、製造業のみならずそれにより提供される製品が社会システム全体にもたらす影響を評価対象とすることを意味し、「究極のMFCA」とも表現される。結果を表-4に示す。ここでは、排水及び廃棄物処理プロセスは処理コストとして扱っているが、3章でLCAを実施したような様々な施設・技術をサブシステムとして評価し、それをメインシステムにフィードバックするような解析を行うことで、MFAと都市基盤LCAのリンクをより有機的に行うことが可能と考えている。

6. 到達点と今後の課題

図-8に、3～5章の各種評価手法の関係を整理する。これにより、都市基盤の再構築に際してLCAの果たせる役割と限界、限界に対処するためにLCAを中心として複数の評価手法・指標を組み合わせることで対処する試みについて述べた。再度整理すると以下ようになる。

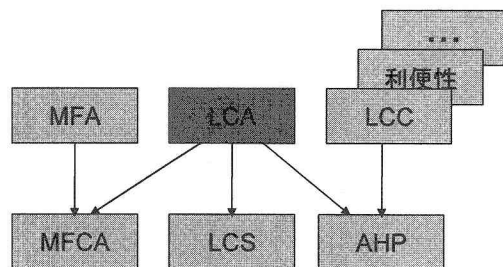


図-8 LCAと本稿で取り上げた各種評価手法の関係

- 1) 導入スケジュールや時間依存パラメータを、より現実に即して複雑にシミュレーションすることは、LCAは得意ではない。そこでLCSの手法を採用することで、弾力的かつ現実的シナリオを扱うことが容易になる。なお、一般的なLCSではLCIデータとのリンクを必須としないが、本稿の評価事例ではLCIデータをリンクさせる形でLCSを実施している。ただし、LCI原単位の変化までは扱っていない。
- 2) 代替案との間で機能単位の統一を行うことが本質的にできない都市基盤のLCAでは、ベネフィットについても評価し、費用便益分析や環境効率指標、多目的意思決定法等を利用することで対象可能である。
- 3) 都市全体のMFAとLCAをリンクさせることで、都市基盤がより広い範囲に及ぼす環境影響を議論できる。LCAのシステム境界は代替案との比較可能性の中で議論されるため、都市や国といった地理的境界とは通常一致しない。そのためある一定の地理的境界におけるMFAとLCAをリンクさせることで、その地理的境界の物質フローに与える影響を表現できる。さらにその体系的表現として環境会計が有効であることも示した。

課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- 1) 現時点では、手法間で扱う技術や施設のシナリオが完全に一致していないので、その統一が必要である。
- 2) LCSにおいて、更新スケジュールをシナリオとして比較するためには累積的環境負荷の違いを見ることで可能となる。
- 3) 環境会計にも多様な形式があるため、MFCAに限定せず、目的に応じて使い分けするか、より望ましい形態を提案することでLCAとの有効な連携を模索する必要がある。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費委託事業生活者ニーズ対応研究「平成10～12年度 都市ゴミの生分解性プラスチック化による生活排水・廃棄物処理システムの構築（代表：井村秀文名古屋大学大学院教授）」、「平成13～15年度 都市ゴミの高付加価値資源化による生活排水・廃棄物処理システムの構築（代表：白井義人九州工業大学教授）」における著者らの一連の成果をベースにしている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省国土交通政策研究所：今後の社会資本整備についての基礎的研究，p. 1，2002
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の全国将来推計人口（平成14年1月現在），2002
- 3) T. Matsumoto, J. Zuo, and H. Imura: Life Cycle Assessment for the Decision Making Tool in Urban Environmental Planning and Infrastructure, The 3rd Civil Engineering Conference in the Asian Region, pp.529-532, 2004
- 4) 国土交通省：ディスプレイ普及時の影響判定の考え方（案），pp.65-68，2002
- 5) 松本 亨，石崎美代子，中山裕文，井村秀文：外部条件の変化を考慮したライフサイクル評価手法－長寿命型住宅の普及シミュレーションへの適用－，環境システム研究論文集，Vol. 29，pp.75-84，2001
- 6) 松本 亨，石崎美代子，左 健，島岡隆行：家庭系食品廃棄物の再資源化技術導入シナリオへのライフサイクルシミュレーションの適用，環境システム研究論文集，Vol.31，pp.125-132，2003
- 7) 松本 亨，鮫島和範，井村秀文：ディスプレイ導入による家庭の生ゴミ処理・再資源化システムの評価，環境システム研究論文集，Vol. 28，pp.9-19，2000
- 8) 松本 亨，岩尾拓美，大迫洋子，井村秀文：都市の有機物資源循環システムの評価に関する研究，環境システム研究論文集，Vol. 28，21-32，2000
- 9) 松本 亨，左 健，岩尾拓美：都市の有機物資源循環構造を記述するマテリアルフローコスト会計の提案，環境システム研究論文集，Vol.30，pp.305-313，2002
- 10) 國分克彦，中竈道靖：マテリアルフローコスト会計，日本経済新聞社，254pp.，2002

ROLE OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN RECONSTRUCTION OF URBAN INFRASTRUCTURE: CASE STUDY ON WASTE AND WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS IN URBAN

Toru MATSUMOTO and Jian ZUO

In this paper, roles of LCA, limit of LCA, and countermeasures to the limit of LCA in reconstruction of urban infrastructure was examined. Concretely, LCA and comparative analysis based on LCA results were carried out for urban waste and wastewater treatment systems by 15 different combinations of technologies and facilities. Based on the LCA results, life cycle simulation (LCS) was implemented until 2050 to compare Measure Scenario with BaU (business as usual) case. In addition, analytic hierarchy process (AHP) was applied as a comprehensive evaluation tool integrating environmental and non-environmental aspects/criteria, and sensitivity analysis was tried. Finally, to analyze the effect of urban infrastructure on the material flows of the urban area, an analysis case was shown for effectively linking LCA and material flow analysis (MFA) and systematically describing the linkage by the way of urban material flow cost accounting.