

環境・移動性能を考慮した effective speed指標を用いた交通機関の評価

河合 一輝¹・加藤 博和²

¹学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-2(651))

E-mail:kkawai@urban.env.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学准教授 大学院環境学研究科 (同上)

E-mail:kato@genv.nagoya-u.ac.jp

過度の自家用車依存から脱却し、乗合交通機関へ転換する試みが様々な地域で意図されている。乗合交通機関は、社会や環境に与える負荷が小さい一方で、移動者にとっての性能が劣ることが多い。交通機関が持つ各種の性能を評価する手法が、交通体系のあり方を検討するために必要である。

本研究では、移動にかかる時間に社会的費用を合わせて、速度の次元で定量化するeffective speed指標を用いて、交通機関を評価する手法を構築し、実際の地域で評価を行う。その結果、評価対象では、自動車の速度が遅い状況において、新設交通機関を利用した方がeffective speedの値が大きくなることが分かった。

Key Words : *Effective Speed, Life Cycle Assessment, Mobility Performance, Public Transport*

1. はじめに

モータリゼーションは、自家用自動車の普及・利用の増加と都市域拡大の相乗効果により、自動車が生活に必要なものになっていく過程である。その結果、モビリティが飛躍的に高まり、経済発展の原動力や QOL 向上の 1 つとなった一方で、渋滞や交通事故の増加といった QOL 低下の要因となり、さらに大気汚染や騒音等の局地環境問題、そして二酸化炭素 (CO₂) 排出の増加が生じることとなった。そのため、過度の自動車依存からの脱却を意図した交通システムへの転換を目指す政策がとられている。

その大きな柱として、環境負荷の小さい乗合型大量交通機関への転換が位置づけられていることが多い。これによって、自動車の使用抑制と渋滞緩和による CO₂削減が期待されるものの、乗合交通機関の利用者が少ないと、自動車の方が 1 人当たりの環境負荷量が少なくなること考えられる。一方、交通機関には輸送量等の客観的な移動性能だけでなく、快適性等の主観的な移動性能も求められる。例えば、乗合交通機関を利用するためには、駅までのアクセスに時間がかかることや、発着時刻が固定され応時性に欠けていることなど、利用者の視点から見た主観的な移動性能に劣っている点が見られる。このような交通機関の持つ様々な性能を総合的に評価する方法が、交通体系を検討するために必要である。

また、性能に比べ運賃が高い場合、それを負担するための別の活動(労働など)が必要になることも注意しなければならない。超音速機コンコルドは従来の飛行機の 2 倍以上の速度で移動できたが、100 人ほどしか運べず、運賃が従来の飛行機の 10 倍程度という高額であったために、現在では運行が廃止されてしまった。このように、交通機関の性能を享受するための利用者負担を評価する必要もある。

そこで本研究では、交通機関の持つ様々な性能を統一的に評価する方法として、移動にかかる時間と移動費用を速度の次元で評価する「effective speed指標」を基に、交通機関の性能を合わせて評価できるように再定義し、適応することを目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

(1) 交通機関の移動性能に関する既往研究

交通機関の移動性能の代表的な要素として所要時間あるいは旅行速度がある。天野ら¹⁾は所要時間と運行頻度を考慮した積み上げ所要時間指標を定義し、この指標を重力モデルに適用することで、交通利便性比較をよりの確に行えることを明らかにした。波床ら²⁾はこの指標をもとに、運行頻度を考慮した期待サービス速度を速度相当のサービス水準指標として定義し、自動車交通と公共

交通との両方が整備される場合のパフォーマンスの比較を行う手法を開発した。しかし、これらの研究ではサービス水準として、速度や運行頻度といった客観的な指標のみを考慮している。

交通機関の移動性能としては安全性や快適性といった主観的な性能も考えられる。森川ら³⁾は潜在・主観的要因を選択モデルに組み込む手法を構築し、線形構造方程式モデルを用いることで、選択行動に快適性や利便性が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。武藤ら⁴⁾はこのモデルをもとに、休日における幹線交通利用動向に焦点を当て、旅行者が持つ主観的意識要因を考慮した選択行動特性に関する分析を行っている。しかし、これらの研究では休日の観光という限定的な移動目的のみを扱っている。

益田ら⁵⁾は交通機関の性能を安全性やプライバシーといった 10 項目に分類し、通勤や観光等の利用手段ごとに「性能値」として定量化した。これにより、移動目的ごとに重視する項目が異なることを数値として示したが、交通状況を DID 人口密度で表現するというマクロ的な評価であり、各交通機関の評価を詳細に行うことができない点が課題として残っている。

(2) 交通機関の環境性能に関する既往研究

交通機関の環境性能を評価する有力手法として LCA (Life Cycle Assessment) がある。LCA とは、商品の原材料調達から生産、流通、使用、廃棄に至るまでのライフサイクルにおける投入資源、環境負荷及びそれらによる地球や生態系への潜在的な環境影響を定量的に評価する考え方で、ISO14040 シリーズにより標準化されている。

交通機関を対象とした LCA 研究は 1990 年代から数多く行われており、交通機関ごとの環境負荷量を比較することで状況に応じた最適な交通機関の評価が行われている。例えば、長田ら⁶⁾は中量旅客輸送手段に LCA を適用し、感度分析を行うことで需要量に応じた最適な旅客輸送手段の比較を行った。伊藤ら⁷⁾は乗用車と乗合輸送機関の輸送人キロあたり CO₂ 排出量の推定を行っている。また、輸送密度や運行本数といった運行状況に応じた研究や電気自動車の導入や発電効率の向上といった技術革新を考慮した研究も行われている。例えば金井ら⁸⁾は、需要量により運行本数や混雑率といった運行状況を決定するだけでなく、環境技術の進歩のトレンドを考慮した都市内旅客輸送機関のライフサイクル CO₂ を推計している。

(3) effective speed 指標に関する既往研究

effective speed 指標とは、Tranter⁹⁾によると利用者が感じる交通機関の性能として、移動時間だけでなく、利用にかかる費用を獲得するのに必要な時間を加え、速度に換算して表した指標である。

Tranter⁹⁾は自動車、バス、自転車を対象に、交通機関の利用費用として走行費用(運賃)、駐車料金等を求め、これらの利用費用の収入に占める割合から交通機関の利用時間を推定した上で effective speed を算出し、キャンベラにおけるバスや自転車の優位性を検証している。また、Crozet¹⁰⁾は交通機関の利用費用として走行費用(運賃)だけでなく大気汚染等の環境費用も含めて、在来線鉄道、バス、自動車、高速鉄道を対象に effective speed を算出することでモビリティ政策の優先順位を決定できている。しかし、これらの研究では運賃等の客観的な要素のみを考慮しており、快適性等の主観的性能及び低炭素性等の環境性能といった要素は考慮できていない。

(4) 本研究の位置づけ

以上のように effective speed 指標を用いた交通機関の評価は有効性が高いものの、運賃等の客観的な要素を費用として評価することが一般的であり、交通機関を総合的に評価するのに必要な利用者が享受できる主観的移動性能や、環境性能などの社会的費用が十分に組み込まれていない。そこで、本研究では、これらの費用を時間に換算して effective speed 指標に組み込み、交通機関の評価に用いることを試みる。

3. 環境・移動性能を考慮した effective speed 指標の評価手法

(1) effective speed 指標の定式化

Crozet は effective speed を式(1)で定義している。

$$V_g = \frac{1}{\frac{1}{V} + \frac{k}{w}} \quad (1)$$

V_g : effective speed [km/h], V : 旅行速度 [km/h], k : 1km あたり費用(運賃) [円/km], w : 1時間あたり賃金 [円/h]

式(1)では、運賃を 1 時間あたりの賃金で除することで時間価値を算出している。これに、移動性能、及び社会が被る様々な負荷を時間価値に変換・算入して組み入れ、effective speed を式(2)として再定義する。

$$V_g' = \frac{1}{\frac{1}{V} + \frac{k_{per} + k_{env}}{w}} \quad (2)$$

V_g' : 環境性能と移動性能を考慮した effective speed [km/h], k_{per} : 移動性能の 1km あたり費用 [円/km], k_{env} : 環境性能の 1km あたりの費用 [円/km],

(2) 交通機関の状況設定

交通機関の環境性能や移動性能は交通状況に応じて変

化する。例えばラッシュ時において、自動車は渋滞により旅行速度が低下し環境性能や移動性能が低下する。一方で、公共交通機関は、混雑により移動性能が低下する。また、移動の目的や時間帯、人数、経路といった移動場面によって利用者が求める移動性能が変化することが考えられる。本研究においては、これら交通状況と移動場面の双方について条件を予め設定し評価を行う。

(3) 移動性能の評価

a) 移動費用の算定

人 km あたり移動費用を式(3)として算出する。また、移動性能値は式(4)として移動性能項目間の重みに交通機関の移動性能項目の水準を乗ずることで算出する。

$$k_{per} = \frac{m_{per}}{l} \tag{3}$$

$$m_{per} = \sum (w_{per} \times s_{tra}) \tag{4}$$

m_{per} : 移動性能値[円/人 km], l : 移動距離[人 km],
 w_{per} : 移動性能の性能項目間の重み, s_{tra} : 交通機関の性能項目の水準

b) 移動性能の項目

移動性能の評価項目は、益田ら⁹⁾が定めた速達性や定時性などの 10 項目とする(表-1)。各項目間の重みは、益田らが 2012 年に行ったアンケートを基にコンジョイント分析によって算出された値を用いる。このアンケートは移動目的、移動距離、移動人数の各場合において調査が行われている。この重みはどの項目の次元にも変換可能であるが、本研究では費用の単位(円)を用いる。

(4) 環境性能の評価

a) 環境費用の算定

人 km あたり環境費用は、LCA の考え方にに基づき、運行時の CO₂ 排出のみだけでなく、車両や交通機関の駅や軌道といったインフラ施設の製造から廃棄までのライフサイクルにわたる CO₂ 排出で評価を行う。この結果を、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)をもとに統合化することで貨幣換算を行い、この値を利用費用とし、式(5)として算出する。

$$k_{env} = \frac{LC_CO_2 \times I_{CO_2}}{n_{people} \times l_{people} \times LT} \tag{5}$$

LC_CO_2 : ライフタイムにわたる総 CO₂ 排出量[kg-CO₂/60年], I_{CO_2} : CO₂ の統合化係数[円/ kg-CO₂], n_{people} : 需要量[円/ kg-CO₂], l_{people} : 移動距離[人km], LT : ライフタ

イム[60年]

b) ライフサイクルCO₂算定における仮定

本研究では、交通機関(システム)について、それを構成する「インフラ本体構造物」、「インフラ付帯構造物」、「車体」それぞれのライフサイクル全体にわたる環境負荷を合計したシステム全体(System Life Cycle Environmental Load : SyLCEL)で評価する。交通機関のライフタイムは60年とし、ライフサイクルの3段階(製造、供用、廃棄)のうち廃棄段階の環境負荷量は微小のため、今回は考慮しない。また、既存交通機関を対象とする場合は、インフラ施設はあらかじめ存在しているため、インフラ建設部分は考慮せず、インフラ維持、車両製造、車両走行の3段階を考慮する。一方、新設交通機関を対象とする場合は、インフラ建設、インフラ維持、車両製造、車両走行の4段階をすべて考慮する。

また、自動車をガソリン自動車(GV)、ガソリンハイブリッド自動車(HEV)、燃料自動車(FCV)、電気自動車(EV)の4種類に区分し、自動車交通量を各種自動車の保有率を用いて配分する。

CO₂排出原単位は、LRTが表-2、BRTが表-3、路線バスが表-4、自動車が表-5で表されるものとする。原単位式中のvは平均旅行速度[km/h]である

表-1 移動性能の項目

大項目	性能項目	算出方法
基本性能	速達性	目的地までの所要時間[分]
	定時性	遅延が起りうる可能性 [遅延あり : 1, 遅延なし : 0]
	スペース	1人当たり占有面積[m ²]
付随性能	応時性	時間の選択可能性 [選べる : 1, 選べない : 0]
	着席可能性	移動時の着席可能性 [座れる : 1, 座れない : 0]
	アクセス	乗車場所までの距離[m]
安全性	事故遭遇率	移動時に事故に遭遇する確率[%]
	犯罪遭遇率	移動時に犯罪に遭遇する確率[%]
	プライバシー	移動時のプライバシー [プライバシーあり : 1, プライバシーなし : 0]
費用	費用	目的地までの運賃[円]

表-2 LRTのCO₂排出原単位

車両製造CO ₂ ¹¹⁾ [t-CO ₂ /両]	58.2
軌道建設CO ₂ ¹¹⁾ [t-CO ₂ /km]	1,020
電停建設CO ₂ ¹¹⁾ [t-CO ₂ /箇所]	14.4
LRT走行時電力消費原単位 ¹¹⁾ [kWh/編成km]	1.5

表-3 BRTのCO₂排出原単位

車両製造CO ₂ ⁹⁾ [t-CO ₂ /両]	27.1
道路舗装CO ₂ ⁹⁾ [t-CO ₂ /km]	23.0
電停建設CO ₂ ¹¹⁾ [t-CO ₂ /箇所]	14.4
ディーゼルバスの燃料消費量 ¹²⁾ [ml/km]	$FC_b = \frac{976.9}{v} - 4.5v + 0.037v^2 + 299.7$

表-4 路線バスのCO₂排出原単位

車両製造CO ₂ ⁹⁾ [t-CO ₂ /両]	27.1
ディーゼルバスの燃料消費量 ¹²⁾ [ml/km]	$FC_b = \frac{976.9}{v} - 4.5v + 0.037v^2 + 299.7$

表-5 自動車のCO₂排出原単位

GV車両製造CO ₂ ⁸⁾ [t-CO ₂ /台]	3.2
HEV車両製造CO ₂ ⁸⁾ [t-CO ₂ /台]	3.7
FCV車両製造CO ₂ ⁸⁾ [t-CO ₂ /台]	5.6
EV車両製造CO ₂ ⁸⁾ [t-CO ₂ /台]	6.0
GVの燃料消費量 ⁸⁾ [g-CO ₂ /台km]	$E_{GV} = \frac{1051.20185}{v} - 2.40935v + 0.02115v^2 + 174.4735$
HEVの電力消費量 ⁸⁾ [g-CO ₂ /台km]	$E_{HEV} = (-0.002v^2 + 0.0061v + 0.3062) \times E_{GV}$
FCVの燃料消費量 ⁸⁾ [km/l]	$E_{FCV} = -0.0048v^2 + 0.5665v + 11.386$
EVの電力消費量 ⁸⁾ [km/kWh]	$E_{EV} = -0.0044v^2 + 0.3532 + 2.3721$

4. 環境・移動性能を考慮したeffective speed指標の評価結果

(1) ケーススタディ

自動車から乗合交通機関への利用転換策の中、LRT (Light Rail Transit) やBRT (Bus Rapid Transit) が国内外で注目を集めている。そこで、対象とする区間として、路線バスと自動車があるところに、新設交通機関としてLRTまたはBRTが整備されることを想定する。

本研究では栃木県宇都宮市と芳賀町を運行予定であるLRT路線を対象とする。この路線はJR宇都宮駅を中心

に東西方向への基幹路線を整備することにより、公共交通網改善と自家用車依存脱却を図るために計画された。そのうち現在LRTの整備が行われようとしている区間は、JR宇都宮駅からショッピングセンターであるベルモール、芳賀工業団地を通り本田技研北門までを結ぶ約15kmである。

本研究ではLRTでなくBRTで運行した場合を仮に想定した計算も行う。LRTと同じ路線を走行すると仮定し、1日あたりの輸送量も同じとする。BRTの運行本数と導入編成数は、LRTとBRTの輸送定員の比をLRTの運行本数と編成数に乗ずることで算出する。表-6に、想定されている本数等の運行水準を示す。

表-6 LRT, BRTの運行水準

	LRT (平日)	LRT (休日)	BRT (平日)	BRT (休日)
線路長[km]	14.6			
運行本数[本/日]	256	216	510	430
最速列車の 表定速度[km/h]	23.4	19.9	20.0	
停留所[箇所]	19			
輸送量[人/日]	16,318	5,648	16,318	5,648
導入編成数[編成]	17		34	
車両重量[t/編成]	37.0		14.0	
定員[人/編成]	座席定員：53 立席定員：102		座席定員：27 立席定員：51	

(2) 移動場面の設定

移動場面として通勤と買い物を取り上げる。移動人数は1人(単独移動)とする。通勤は朝のピーク時間帯にJR宇都宮駅から芳賀工業団地まで移動することを想定する。また、買い物は日中にJR宇都宮駅からベルモール前まで移動することを想定する。通勤時の交通機関の水準を表-7、買い物時の交通機関の水準を表-8にそれぞれ示す。

表-7 通勤時の交通機関の水準

交通機関	LRT	BRT	路線バス	自動車
移動距離[km]	14	14	17	12
旅行速度[km/h]	22	20	12	12
混雑率[%]	122	100	100	

表-8 買い物時の交通機関の水準

交通機関	LRT	BRT	路線バス	自動車
移動距離[km]	3.0	3.0	4.3	3.0
旅行速度[km/h]	20	20	18	30
混雑率[%]	10	10	10	

(3) 移動費用

移動性能の水準と移動性能項目間の重みの値 (表-9) より、人kmあたり移動費用を算出する (図-1)。

移動費用はどちらの移動目的においても自動車が最も少ない結果となった。この理由として、自動車は他の交通機関と比べ応時性や1人当たりのスペースに優れていることが挙げられる。また、買い物時にはLRTやBRTの費用が大きくなっている。これは、買い物時にはアクセスの重みが大きいため、アクセス距離が大きいLRTやBRTの費用が大きくなったと考えられる。

特に、自動車では付随性能や安全性の項目でマイナスの値をとっている。これは、自動車が応時性やプライバシーを有していることによる。

表-9 移動性能項目間の重み

	通勤	買い物
移動時間[円/分]	8.41866	5.553452
遅延[円/遅延]	272.89	60.93
スペース[円/m ²]	-269.77	-94.45
応時性[円/時間を選べる]	-338.28	-111.51
着席可能性[円/座れる]	-345.14	-45.07
アクセス[円/m]	0.31	0.21
事故遭遇率[円/%]	209.22	68.68
犯罪遭遇率[円/%]	4,310.92	1,400.86
プライバシー[円/%]	-103.29	-36.41
費用[円/円]	1.00	1.00

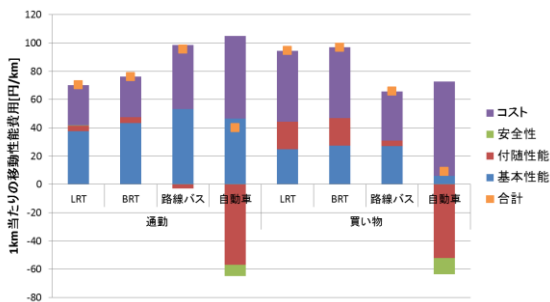


図-1 1kmあたり移動費用

(4) 環境費用

各交通機関の1人あたり平均乗車キロと輸送量 (表-10) を設定し、人 km あたり環境費用を算出する (図-2)。

環境費用は、各交通機関とも走行時に発生する費用が高くなっており、自動車が最大となっている。

表-10 1人あたり平均乗車キロと輸送量

交通機関	LRT	BRT	路線バス	自動車
平均乗車キロ[km]	4.3		3.4	15
輸送量[人/日]	13,000		5,500	30,000

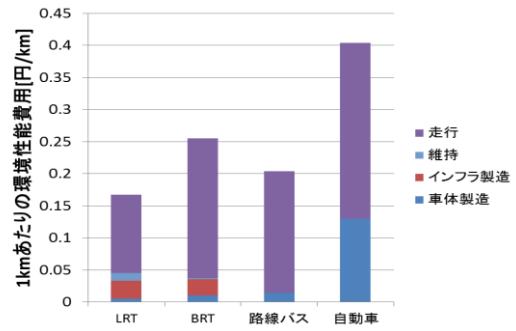


図-2 1kmあたり環境費用

(5) effective speed指標の算定

図-1, 図-2 の結果を式(2)に代入することで effective speed 指標による評価を行う。ここで比較のため、交通機関の費用として a) なし (旅行速度), b) 運賃のみ (式(1)), c) 移動費用並びに環境費用 (式(2)) のそれぞれを想定して算出する (図-3)。

1時間当たりの賃金は、厚生労働省の賃金構造基本統計調査における、栃木県の従業員10人以上の企業についての平均年収を年間実労働時間で除した値 (2389円) を使用する。

算定の結果、通勤時はLRTがどの場合においても最大となっている。各交通機関の移動費用の差が買い物時に比べ小さいため、移動速度の差が大きく影響している。また、買い物時は自動車がどの場合においても最大となっている。この理由として、自動車は旅行速度が大きいだけでなく移動費用が最も小さいことが挙げられる。

どちらの移動場面においても、自動車は応時性や着席可能性が寄与し、移動費用が運賃よりも低額となっているために速度が逆転することによって、移動性能を考慮した場合、自動車の effective speed が大きくなっている。

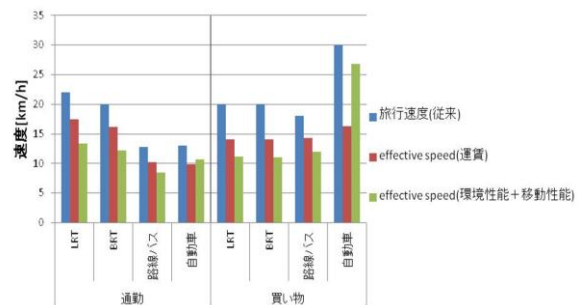


図-3 effective speed 指標算定結果

(6) 賃金水準による感度分析

以上では賃金水準を固定して評価を行ったが、次に通勤を対象に賃金水準を変え、それに伴って変化する effective speed 指標の値を図-4に示す。1時間当たりの賃金が900円よりも低い場合は自動車が最大となっており、900円よりも高い場合はLRTが最大となっている。賃金

が低い場合は交通機関の利用にかかる費用の影響が強くなるため、旅行速度が小さくても effective speed が大きくなることによる結果である。

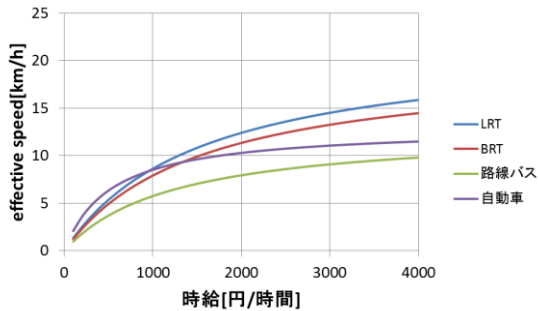


図4 賃金水準による effective speed の変化

5. まとめと今後の課題

本研究では、交通機関の性能として費用や所要時間のみならず移動性能や環境性能を考慮に入れた effective speed 指標を定義し、乗合交通機関(LRT, BRT, 路線バス)と自動車について算出を行った。主な結果として以下が得られた。

- (1) 移動性能の影響の方が環境性能の影響よりかなり大きいことも寄与し、自動車の effective speed が他の交通手段よりも高い結果となった。
- (2) 移動性能を考慮した場合、自動車は応時性や着席可能性が寄与し、経費が運賃よりも低額となっているために effective speed が大きくなる。一方、渋滞時には、LRT や BRT を利用した方が、effective speed の値が高くなる。

一方、残された主な課題は以下の通りである。

- (1) 環境費用が移動費用に比べかなり小さい値をとるため、移動性能の影響が大きくなってしまった。このような傾向は従来より貨幣評価による統合評価の結果によく見受けられ、低炭素社会実現のために CO₂排出量の削減を行わなければならないということが反映できない。そのため、他の形で環境影響を評価することも検討する必要がある。
- (2) 本研究では交通状況や移動場面を固定して分析を行った。他の移動場面や交通状況によっては最適交通機関が変化する場合がある可能性があり、その評価が必要である。

参考文献

- 1) 天野光三, 中川大, 加藤義彦, 波床正敏: 都市間交通における所要時間の概念に関する基礎的研究. 土木計画学研究・論文集, 9, pp.69-76, 1991.
- 2) 波床正敏, 塚本直幸: 都市交通空間における公共交通のパフォーマンスおよび自動車交通との相互作用に関する基礎的考察, 土木計画学研究・講演集, 29, pp.599-608, 2005.
- 3) 森川高行, 佐々木邦明: 主観的要因を考慮した非集計離散型選択モデル, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.115-124, 1993.
- 4) 武藤雅威, 柴田宗典, 日比野直彦: 主観的意識に着目した休日の幹線交通機関選択行動に関する研究, 運輸政策研究, 6(4), pp.2-11, 2004.
- 5) 益田悠貴, 加藤博和, 柴原尚希, 伊藤圭: 目的及び使い方に応じた旅客輸送手段の環境効率指標の提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, pp.167-176, 2012.
- 6) 長田基広, 渡辺由紀子, 柴原尚希, 加藤博和: LCA を適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価, 土木計画学研究・論文集, 23, pp.355-363, 2006.
- 7) 伊藤圭, 加藤博和, 柴原尚希: 乗車人数を考慮した地域内旅客輸送機関のライフサイクル CO₂ 排出量比較, 地球環境研究論文集, Vol.18, pp.37-43, 2010.
- 8) 金井洸, 加藤博和, 柴原尚希, 森本涼子: 技術水準と需要の長期変化を考慮できる都市内旅客輸送手段のライフサイクル CO₂ 推計, 第 10 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.200-201, 2015.
- 9) Tranter, P.: Effective speeds: car costs are slowing us down. Canberra, Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, 2004.
- 10) Crozet, Y.: Performance in France: From appraisal methodologies to ex-post evaluation, International Transport Forum Discussion Paper, 2013.
- 11) 渡辺由紀子, 長田基広, 加藤博和: LRT システム導入の環境負荷評価—代替輸送機関との比較と環境効率の適用—, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No.3, pp.246-254, 2006.
- 12) 大城温, 森下雅行, 並河良治, 大西博文: 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数, 土木技術資料 Vol.43 No.11, pp.50-55, 2001.

(?)

EVALUATION OF TRANSPORT MODE BY THE EFFECTIVE SPEED INDICATOR CONSIDERING ENVIRONMENT AND MOBILITY PERFORMANCE

Kazuki KAWAI, Hirokazu KATO