

IV—16 モータルエネルギーからみた通勤輸送システムの評価に関する研究

北海道大学 工学部 正員 〇佐藤 馨一

, , 学生員 田村 亨

, , 正員 五十嵐日出夫

1. はじめに

1977年9月、アメリカ合衆国連邦議会予算局 (The Congressional Budget Office) は、上院環境公共事業委員会に、「都市交通とエネルギー：各種交通モードのエネルギー節約の可能性」(Urban Transportation and Energy: The Potential Savings of Different Modes)と題する報告書(以下、CBORレポートと呼ぶ)を提出した。CBORレポートの目的は2つあり、そのひとつは代替可能な幾つかの交通機関が必要とするエネルギー量を明確にすることであり、いふひとつは国会で審議されるべき燃料節約のための種々の計画が、都市交通の燃料消費量に及ぼす影響を調査することであったり。

この報告書は従来の考え方と異なる幾つかの結論を含んでおり、とくに「大都市における鉄道輸送は一般に考えられているほどエネルギー節約に貢献できない」という結論に対しては、米国内の鉄道界、交通学者は勿論、我国においても多くの反響、反論を引き起した。この報告書での従来のなかった考察は、車両や軌道、構造物を製造、建設するのに要するエネルギー量を積算していることであり、また、交通機関を利用するためのアクセスエネルギーの計算をしていることである。CBORレポートの結論をそのまま我国のエネルギー政策に反映させることはできないとしても、交通部門におけるエネルギー節約の可能性を客観的に評価しようとする考え方はきわめて示唆に富むものである。

運輸調査局による「各種交通機関のライフサイクルエネルギーからみたエネルギー消費効率」と題したレポートは、CBORレポートに基づいて我国の都市交通エネルギーの消費実態を取りまとめたものである。本研究はこのレポートに掲載されている種々の数値を用いて、札幌市の通勤輸送システムをエネルギー節約の立場から評価しようとするものである。

2. CBORレポートによるエネルギー消費効率の評価システム

エネルギーの消費効率を示す一般的な指標は、車両の単位距離当りの推進エネルギーを、平均乗客数で割った値が採用されている。しかし交通機関のエネルギー消費効率を総合的に評価するためには、推進エネルギーの外に、車両製造や交通路の建設、さらにその維持管理のために費やされるエネルギーも考慮に入れる必要がある。その他に都市交通計画の立場からは、公共交通機関へのアクセスエネルギーや、交通路の迂回性を考慮した door to door のエネルギー消費率をも考えなければならない。このような見地からCBORレポートでは図1に示すように、都市交通エネルギーを構成する9つの基本エネルギー要素を取り出し、それらを組み合わせた4ステップからなるエネルギー効率評価システムを提案した。

(1) 走行エネルギー-集約度 (運行エネルギー) : Energy Intensiveness

最も頻繁に用いられている方法であり、車両の単位輸送距離(車両キロ)当りの推進エネルギーを平均乗客数で除いて求める。

(2) ラインホールエネルギー: Line - Haul Energy

ラインホールエネルギーとは、車両の推進エネルギーの他に交通路の建設、車両製造、駅の運営および車両の整備に用いられるエネルギーを含めたものであり、総合輸送エネルギーともいう。

i) 維持管理エネルギー

推進エネルギーに比べると消費量は少ないが、他の用途に比べれば相対的にウエイトが高いので、交通機関

別のエネルギー比較を行う際には含める必要がある。

ii) 建設エネルギー

トンネルの掘削や資材の製造、運搬等交通施設の建設には、大量のエネルギーが必要となる。建設エネルギーの消費は1回限りのものであり、施設の耐用期間内における利用回数に応じて配分すれば、一般的にはそれほど重要な要素ではなくなる。しかし、その重要度は交通機関によって異なるので、これを無視した場合、各交通機関の比較に際して誤った結論を導く恐れがある。

iii) 車両製造エネルギー

建設エネルギーと同様、1度限りの消費であり、しかも車両は比較的長い耐用年数をもつので、車両キロ当りの値は相対的に小さい。また、各交通機関の効率比較においても、結果を左右する程重要ではない。

iv) モーダルエネルギー : Modal Energy

アクセスと迂回に消費されるエネルギーと、ラインホールエネルギーとを結合させてエネルギー効率を評価するのが、モーダルエネルギーという考え方である。

i) アクセスモード

短距離トリップの場合、通常は、公共交通機関の駅まで徒歩で行き、目的地近くの駅で降り、目的地まで歩いて行くというパターンがとられる。しかし、中長距離トリップの場合には、公共交通機関の駅へ行くのにバス、または乗用車が利用されることが多い。したがって、中長距離トリップの人キロ当りの消費エネルギーは、主たる交通機関よりもアクセス交通機関の方が大きくなりがちなる傾向が生れる。

ii) アクセス路長比率

ある典型的なトリップのうち、アクセス部分の距離の占める比率をいう

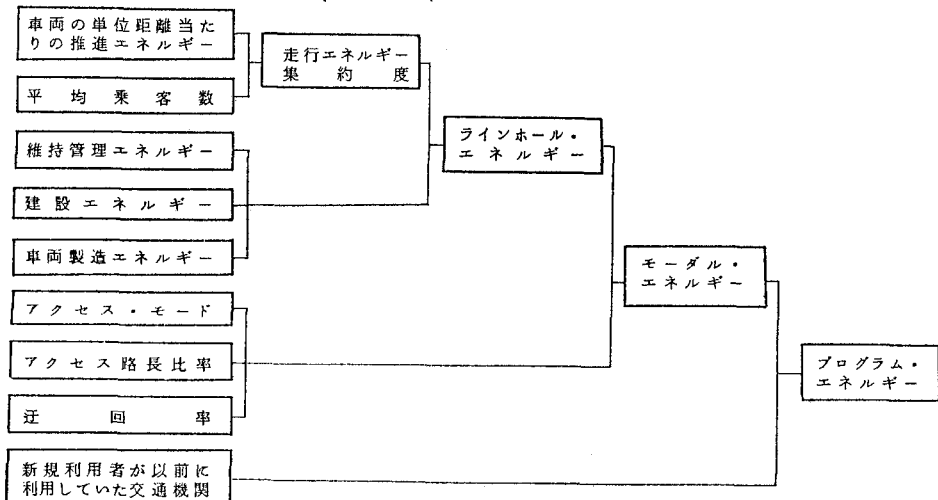
iii) 迂回率

エネルギー効率の比較のためには、余分な非生産的な乗車距離を調整しなければならない。非生産的な乗車区間を必要とする交通機関は、迂回性を考慮しない場合にはエネルギー効率の比較では有利になる。

(*) プログラムエネルギー : Program Energy

エネルギー効率のよい交通機関の振興計画は、エネルギー効率の悪い交通機関から、効率の良い機関へ利用者を転換させることを目指している。プログラムエネルギーは新システムの開業に伴う交通機関全体のエネルギー消費効率を考え、その新システムがもたらす省エネルギー性を評価するシステムである。

図-1 エネルギー消費効率の評価システム



3. 総合輸送エネルギー

札幌市における通勤輸送システムのエネルギー消費効率を評価するためには、まず最初に各種輸送システムの総合輸送エネルギーを算出しなければならない。総合輸送エネルギーは運行エネルギー、維持管理エネルギー、建設エネルギー、車両製造エネルギーを合計したものであり、輸送システムによってその値は種々変化する。筆者らはかつてCBOLレポートが発表されたとき、独自に総合輸送エネルギーを算出しようと試みたことがある。しかし、維持管理エネルギーや建設エネルギーを算出するためには、種々の内部資料や複雑多岐にわたる建設歩掛から油脂消費量を求めなければならず、その試みは断念せざるをえなかった。参考文献(2)は運輸省および日本国有鉄道が組織をあげて作成したものであり、その資料価値はきわめて高いものである。したがって、本研究においては参考文献(2)によって算出された総合輸送エネルギー値を用いて、札幌市における各種輸送システムのエネルギー消費効率を算出することにした。ただし、参考文献(2)では地下鉄についての記載がないので、CBOLレポートに記載されている San Francisco 州、BART の地下部（オープン・カット工法区間）の値を参考に地下鉄の建設エネルギーを試算した。表-1はその結果をとりまとめたものである。

表-1 総合輸送エネルギー 注-1

項目	総合輸送エネルギー (kcal/車キロ)					② 平均乗車人員 (人/車)	① 人キロ当り 総合輸送 エネルギー (kcal/人キロ)	人キロ当り 運行エネルギー (kcal/人キロ)
	運行 エネルギー	維持管理 エネルギー	建設 エネルギー	車両製造 エネルギー	① 合計			
地下鉄	4810	1400	600	170	6930	注-2 52	130	90
(百分率)	100	30	12	4	146			
バス(大型)	3420	730	30	220	4400	15.8	280	216
(百分率)	100	21	1	6	128			
自家用乗用車	980	120	10	110	1220	1.4	870	700
(百分率)	100	12	1	11	124			

注-1) 運輸調査局、各種交通機関のライフサイクルエネルギーからみたエネルギー消費効率、調査研究報告199から一部修正の上、引用

注-2) 地下鉄東西線昭和60年度実績

表-1からわかるように、1人キロ当りの運行エネルギーは地下鉄の90(kcal/人キロ)に対して、自家用乗用車は700(kcal/人キロ)と約8倍にわたっていることがわかる。維持管理や建設エネルギーを考慮した総合輸送エネルギーでも、地下鉄の130(kcal/人キロ)に対して、自家用乗用車は870(kcal/人キロ)と約7倍になっている。このことから地下鉄や国電などの高速軌道輸送システムは、自家用乗用車に比較して7～8倍程度のラインホールエネルギー効率を有していることがわかる。CBOLレポートでもラインホールエネルギー効率についてはほぼ同様の結果を示している。それにもかかわらず、「大都市における鉄道輸送は一般に考えられているほどエネルギー節約に貢献できない」としたのはなぜだろうか。その回答はモータルエネルギーまでを考慮してエネルギーの消費効率を算出したことにある。そこで本研究においては、札幌市白石区もみじ台地区を例として現在延長工事の行なわれている地下鉄東西線が、都市交通のエネルギー節約にどれ位寄与しているかをモータルエネルギーをもって評価することにした。

4. モータルエネルギーの算出

一般に地下鉄を利用する場合、そのアクセスとしてバス、乗用車、二輪車、徒歩等の交通手段が用いられている。また、バスのみを利用する場合でも徒歩アクセスが伴っている。都市交通計画の立場から通勤輸送システムのエネルギー効率を評価する場合には、主要交通機関のみならず、アクセスを含め発地から着地への全トリップを考慮しなければならない。CBOLレポートではモータルエネルギー(door to door エネルギー)を式(1)によって算出している。ただし、バスまたは乗用車を主モードとするトリップについては、徒歩アクセスのみが使われるとし、そのエネルギー消費は0と仮定している。

$$M_j = C_j \{ f A_j + (1-f) L_j \} \quad (1)$$

ただし、 M_j : モードjの人キロ当りのモータルエネルギー (Door to Door Energy)

A_j : モードjの人キロ当りのアクセスエネルギー

$$A_j = \sum_{i=1}^n K_i E_i \quad (2)$$

ここで

n : アクセスモードの数

K_i : アクセスモードiを利用する旅客の比率 (アクセス分担率)

E_i : アクセスモードiが消費する人キロ当りのエネルギー

C_j : モードjの迂回率 (モードjのトリップ全体の長さ/乗用車でモードjと同じトリップした長さ)

f : アクセス路長比率 (アクセス交通の長さ/全路長)

L_j : モードjの人キロ当りの総合輸送エネルギー消費率

以上の定式化から、2つの輸送機関を乗り継ぐ場合のモータルエネルギーは次のように書き下すことができる。

$$\begin{aligned} \text{モータルエネルギー} &= (\text{アクセス路長比率} \times \text{アクセス交通手段の総合輸送エネルギー消費率}) \\ &+ (\text{主要輸送機関路長比率} \times \text{主要輸送機関の総合輸送エネルギー消費率}) \end{aligned}$$

さて、それでは札幌市白石区もみじ台地区から札幌市都市部(市役所本庁舎周辺)へ通勤するトリップを例として、そのモータルエネルギーを算出してみよう。用いた資料は昭和55年8月に実施した「都市内公共交通機関乗継システム策定調査報告書」である。調査の内容その他については文献(3)を参照されたい。

(1) ケースI: 現状の場合(地下鉄東面線が延長されていない時)

通勤輸送モード i) バスまたは自家用車と地下鉄の乗継ぎ

ii) 直行バス

iii) 自家用乗用車

① アクセスエネルギー

式(2)で示したように、アクセスエネルギーは $A_j = \sum_{i=1}^n K_i E_i$ で求められることができる。ここで K_i はアクセス分担率であり、もみじ台地区におけるアクセス分担率は表2に掲げたとおりである。

表2 アクセス分担率(札幌市もみじ台)

	徒歩	バス	乗用車	その他
分担率	0	81%	19%	0

E_i (アクセスモードiの人キロ当りの総合輸送エネルギー) は、表1に示したとおりバスが280 (Kcal/人キロ) 乗用車が870 (Kcal/人キロ) である。したがって、地下鉄の人キロ当りのアクセスエネルギー A_j は次のように算出される。

$$A_j = 0.81 \times 280 (\text{Kcal/人キロ}) + 0.19 \times 870 (\text{Kcal/人キロ}) = 392 (\text{Kcal/人キロ})$$

② モータルエネルギー (Door to Door エネルギー)

モータルエネルギー(式(1))から求めることができる。ここで、アクセス路長比率 f はバスおよび乗用車によるアクセス路長を、全路長で除したものである。札幌市もみじ台地区から地下鉄白石駅までの距離が13.1 Km、地下鉄白石駅から大通駅まで4.2 Km あるので、アクセス路長比率 f は以下になる。

$$f = 13.1 / (13.1 + 4.2) = 0.76$$

札幌市の場合、主要幹線道路の下に地下鉄が建設されているので、その迂回率 C_j はほぼ1.0とみなすことができる。したがって、地下鉄のモータルエネルギーは次のようになる。

$$\begin{aligned} M_j &= 1.00 \times \{ 0.76 \times 392 (\text{Kcal/人キロ}) + 0.24 \times 320 (\text{Kcal/人キロ}) \} \\ &= 329 \approx 330 (\text{Kcal/人キロ}) \end{aligned}$$

表3はもみじ台地区における現状の通勤輸送システムのモータルエネルギー値を示したものである。

表3 ケースⅠにおけるモータルエネルギー

通勤輸送システム	モータルエネルギー
地下鉄の乗継ぎ	330 (kcal/人キロ)
直行バス	280 "
自家用乗用車	870 "

(2) ケースⅡ：地下鉄東西線が厚別（国鉄新札幌駅）まで延長された場合

ケースⅠにおいては、地下鉄の乗継ぎトリップのモータルエネルギーが、直行バスより大きいという結果が得られた。これは地下鉄の乗継ぎにバスおよび乗用車を利用しているためであり、しかもアクセス路長比率が高いためである。さてケースⅡは東西線の延長工事が完成した場合におけるもみじ台地区のモータルエネルギーを算出しようとするものである。なお、モータルエネルギーの算出にあたって必要とされるアクセス分担率は、すでに地下鉄の導入されている札幌市北區新琴似地区の値を用いることにした（表4参照）

表4 アクセス分担率（札幌市新琴似）

	徒歩	バス	乗用車	その他
分担率	17%	70%	13%	0

① アクセスエネルギー

もみじ台地区におけるケースⅡの場合のアクセスエネルギーは、表4のアクセス分担率を用いると次のようになる。

$$A_f = 0.17 \times 0 + 0.70 \times 280 \text{ (Kcal/人キロ)} + 0.13 \times 870 \text{ (Kcal/人キロ)} = 309 \text{ (Kcal/人キロ)}$$

② モータルエネルギー（Door to Door エネルギー）

地下鉄東西線が厚別まで延長されたとき、アクセス距離は地下鉄厚別駅（仮称）までの約1kmとなるので、アクセス路長比率 f は次のようになる。

$$f = 1.0 / (1 + 16.3) = 0.06$$

地下鉄のモータルエネルギー（式4）に従って算出すると

$$M_f = 1.00 \times \{ 0.06 \times 309 \text{ (Kcal/人キロ)} + 0.94 \times 130 \text{ (Kcal/人キロ)} \} \\ \approx 140 \text{ (Kcal/人キロ)}$$

となる。

バスおよび自家用乗用車については、アクセスエネルギーは0と仮定しており、またバスの迂回率も1.0（迂回しない）としたので、いずれも総合輸送エネルギーがそのままモータルエネルギーとなる。以上の結果をとりまとめると表5のようになる。

表5 ケースⅡにおけるモータルエネルギー

通勤輸送システム	モータルエネルギー
地下鉄の乗継ぎ	140 (kcal/人キロ)
直行バス	280 "
自家用乗用車	870 "

5. 考察

札幌市における地下鉄は都市輸送システムの基幹として都市活動を支えているとともに、省エネルギーの観点からきわめて重要な役割を果たしていることが明らかになった。しかしながら、都市交通計画上の配慮なしに地下鉄を建設しても、何ら省エネルギー対策にならないことに注意する必要がある。本研究で示した〔ケースⅠ〕

【ケースⅡ】の差異はまさにこのことを証明するものであり、東西線の延長によって地下鉄のエネルギー効率は2倍以上も高くなることが明らかになった。CBOLレポートで「大都市における鉄道輸送は一般に考えられているほどエネルギー節約に貢献できない」とした結論の根拠もここにある。表6はアクセス交通の日米比較を示したものである。この表からも明らかなようにアメリカの場合、鉄道ネットワークの整備がなされていないため、鉄道へのアクセス距離が長く、かつ、アクセス手段に占める乗用車の比率が高いことから、アクセス交通のエネルギー消費がきわめて多くなっている。

これに対して日本の鉄道の場合には（首都圏）、鉄道自体のエネルギー効率が非常に高く、ネットワークの完備によりアクセス距離が短く、しかもアクセス手段の大部分が歩行とバスで占められているため、Door to Door エネルギーから見て、鉄道の効率の方が高くなる。

表6 アクセス交通の日米比較 注)

米 国 (CBOLレポート)			日 本 (首都圏)		
アクセス比率	アクセス路長比率	迂 回 率	アクセス比率	アクセス路長比率	迂回率
重鉄道(新) R ₁ 歩 行 20% バ ス 10% 乗 用 車 70%	18%	1.3	通勤鉄道 歩行等 75.6% バ ス 22.8% 乗用車 1.6%	3%	1.1
近 効 鉄 道 R ₂ 歩 行 15% バ ス 5% 乗 用 車 80%					
	($\frac{\text{アクセス路長}}{\text{全経路長}}$)	($\frac{\text{経路長}}{\text{乗用車経路}}$)			

注) 参考文献(2)より引用

我國の種類別エネルギー最終需要構造をみると、運輸部門でガソリンの99%を、軽油は64%消費している。石油資源の有限性が強く叫ばれ、早ければ1980年代の半ばにはエネルギー不足が発生するといわれている今日、一次エネルギーとして石油製品を直接消費する運輸部門の省エネルギー対策は、今後とも強かに推進されるものと考えられる。その意味で運輸部門の省エネルギー対策は、運行エネルギーの効率化のみで実現できるものではなく、広く都市交通計画の立場から考察すべきである」というCBOLレポートの指摘はきわめて貴重である。本研究に使用した数値は、札幌市の実情に即して修正する必要があることは事実である。しかしながら、省エネルギー対策の観点から、札幌市における通勤輸送システムの一応の評価はなしたものと考えられる。今後は徒歩トリップのエネルギー評価法を確立するとともに、新システムの導入によってもたらされる省エネルギー効果すなわちプログラムエネルギーからの評価を行う所存である。

参考文献

- 1) The Congressional Budget Office; Urban Transportation and Energy, The potential Saving of Different Modes, 1977年9月
- 2) 運輸調査局; 各種交通機関のライフサイクルエネルギーから見たエネルギー消費効率, 調査研究報告NO199, 1980年3月
- 3) 田村亨, 佐藤繁一, 五十嵐日出夫; 交通機関選択モデルの地域移動性に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集07号, 1987年2月
- 4) 運輸省; 運輸白書, 昭和44年版, 1979年12月