

2114 複数路線電力量合計値制約下の列車運転計画における 乗客利用時間最小化に関する考察

学 [土] ○溝口 肇 (東京大)

正 [電] 宮武 昌史 (上智大)

正 [土] 布施 孝志 (東京大)

A Study on Train Scheduling to Minimize Trip Time of Passengers under Restricted Electrical Energy Use of Traffic Artery Group

Hajime MIZOGUCHI, The Univ. of Tokyo 7-3-1, Hongo, Bunkyo Ward, Tokyo Met.

Masafumi MIYATAKE, Sophia Univ.

Takashi FUSE, The Univ. of Tokyo

In this paper, a method on train scheduling to minimize trip time of passengers under restricted electrical energy use of multi arteries is investigated. It enables us to determine not only running time for each interstation and the number of trains but also the amount of energy distributed to every artery.

Keywords : train scheduling, energy saving

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震は、首都圏に走行網を持つ鉄道に対して深刻な影響を与えた。さらに、この地震とそれに起因する津波の影響で多数の原子力発電所が使用不能となり、首都圏全体が電力不足に陥る危険性が生じた。このため、同9月9日に電力使用制限令が解除されるまでの期間、鉄道各社は運用される列車の数を削減する他、空調・照明設備の省エネルギー化やエスカレーターの停止等の対策を行い、同制限令の遵守に努めた。しかし、列車間隔が一定でなく列車待ち時間が大幅に増加したケースや、優等列車が削減され拠点間の速達性が大幅に損なわれたケースが多く見られた。

電気鉄道における、いわゆる節電の方法は多岐にわたる。ここで注目すべきは、電気鉄道の電力消費特性であり、消費電力の瞬間最大値が、時間あたり消費電力量の平均値と比して遥かに大きいという性質である。電力供給網における大規模停電を防ぐためには、電力の瞬間最大値を抑制することが望ましい¹⁾。ところが、現状では瞬間最大値に対して規制を設けることが困難である。そのため2011年に発動された電力使用制限令では、時間あたり消費電力量の超過はその罰則の対象であるが、消費電力の瞬間最大値の超過は罰則の対象とされていない。これらの現状を踏まえ、本研究では時間あたり消費電力量を削減する手法に着目した。筆者ら²⁾はこれまで、単一の路線が時間あたり消費電力量を一定値以下に制限された場合に関して、全乗客の利用時間期待値合計を最小化する手法を開発した。

本稿では、複数路線の使用電力量が一定値以下に制限された場合に対する、上記手法の適用可能性について述べる。また、これによって得られる解が持つ傾向を分析

することにより、どの路線にどの程度の電力量を割り振るか、について方向性を与える。

2. 定式化

ここでは、全ての列車が各駅停車であり全ての列車の行き先が統一されている全 Q 路線の鉄道において、時間あたり消費電力量の合計を一定値以下に制限されたケースを想定する。途中駅での折り返しあるいは分岐がなければ、放射状・環状いずれの路線に対しても適用可能である。ただし本稿では説明の都合上、放射状の路線については、下り列車が始発駅を発車してから上り列車として同じ駅に戻り、再び下り列車として発車するまでを一周とみなし、外回り線のみを有する環状路線として扱う。

路線 h を、駅を K_h 個有する環状路線であると定義する。この路線の各区間および各駅に対しては時計回りに付番を行う。ここで、区間 $i(i \leq K_h - 1)$ は駅 i と駅 $i+1$ の間、区間 K_h は駅 1 と駅 K_h の間とする。まず、区間 i に対する1秒あたり需要を a_{hi} [人/秒]、駅 i で停車する列車に対する1秒あたり需要を b_{hi} [人/秒]、路線のすべての区間に対し1秒間に発生する需要の合計を I_h [人/秒]とする。外回り線・内回り線が存在する場合、本稿で用いられる値はそれぞれ別々に定義・計算されるものとする。ここで定義された a_{hi} 、 b_{hi} 、 I_h と路線ODデータの関係は以下のようになる。駅 m から n までの間の1秒間に発生する需要の数を OD_{hmn} [人/秒]とすると、

$$a_{hi}^{out} = \sum_{(m < n) \cap (m \leq i < n) \cap (n < m) \cap (i < n, m \leq i)} OD_{hmn}^{out} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$a_{hi}^{in} = \sum_{(n < m) \cap (n \leq i < m) \cap (m < n) \cap (i < m, n \leq i)} OD_{hmn}^{in} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$b_{hi}^{out} = \sum_{(m < n) \cap (m \leq i < n) \cap (n < m) \cap (i < n, m \leq i)} OD_{hmn}^{out} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$b_{hi}^{in} = \frac{\sum OD_{hmi}^{in}}{(n < m < n < m) \wedge (m < n \wedge (i < m < n < i))} \quad (4)$$

$$I_h^{out} = \frac{\sum OD_{hmi}^{out}}{1 \leq m \leq K_h \wedge 1 \leq n \leq K_h \wedge m \neq n} \quad (5)$$

$$I_h^{in} = \frac{\sum OD_{hmi}^{in}}{1 \leq m \leq K_h \wedge 1 \leq n \leq K_h \wedge m \neq n} \quad (6)$$

となる。ただし、out は外回り線の値を、in は内回り線の値をそれぞれ表す。次に、区間 i の走行所要時間を T_{hi} [秒]、駅 i の停車時間を t_{hi} [秒]、各区間を走行するにあたって必要な電力量を W_{hi} [kWh]、路線 h 全体の時間あたり消費電力量を C_h [kWh/h]、路線 h で運用される列車の編成数を N_h [編成]、路線 h の 1 列車における冷房照明等補機が時間あたりに消費する電力量を θ_h [kWh/h]とする。

なお本研究では、駅での停車時間 t_{hi} は列車運転計画によらず一定であるという仮定を採用する。また既往研究²⁾では、列車の走行とは直接関係のない部分で消費される時間あたり電力量について、考慮して計算可能としたが、本稿では簡単のためすべて 0 とみなすものとする。

2.1 目的関数

ここでは、最小化する対象である、乗客の利用時間期待値を、列車が走行している時間、列車が停止している時間、列車を待つ時間の期待値、これら 3 つの和で表す。ここでは、これらの値は時間あたり需要で乗じた形で表すものとする。最小化する対象である、時間あたり需要に対する利用時間期待値の総和は、

$$J = \sum_h \left\{ \sum_i (a_{hi} T_{hi}) + \sum_i (b_{hi} t_{hi}) + \frac{I_h \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{2N_h} \right\} \quad (7)$$

と表せる。左から、列車が走行している時間、列車が停車している時間、乗客が列車を駅で待つ時間に関する項の順である。このうち列車を待つ時間については、列車時間間隔の半分を期待値として用いているが、この列車時間間隔は、路線を周回するのにかかる時間を列車編成数で除することによって求めることができる。単位時間あたり需要[人/秒]に時間[秒]を乗じた形で表されるため、この値は人数を表す。その人数は、ある時刻において列車に乗っている人数ならびに駅で列車を待つ人数を、全列車全駅にわたって合計したものを表す。

2.2 制約条件

次に、時間あたり消費電力量に関する制約条件に関して立式する。時間あたり消費電力量の複数路線にわたる合計値を、ある一定量以下に制限する必要があることから、その制約条件は次式で表される。

$$C \geq \sum_h C_h = \sum_h N_h \left\{ \frac{3600 \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} + \theta_h \right\} \quad (8)$$

さて、これらの式を解くことで得られる列車運転計画では、時間あたり電力量の制限がない場合の列車運転計画と比較して、列車編成数は減少するとは限らず、むしろ増加する可能性が残る。列車の速度を落とすことによって減じた電力量を列車の運用増に充て、乗客の列車待ち時間を減らす解が考えられるためである。ここで、列車編成数が大きく増加した場合、保有する列車の数を超える解が出力される可能性があり、このような事態は防ぐべきである。その一方で、例えば同一の規格を有する車両を用いている場合に、路線間で車両を融通できる可能性があるなど、それぞれの路線に対し列車編成数の最

大値を設けることが必要であるとは限らない。これらの状況を考慮し、路線を車両等の制約条件を考慮しいくつかの集合に分類する。全 P 個の集合に対しては付番を行い、 g 番目の集合を G_g とする。ここで、1 ないし 0 のいずれかの値を取る δ_{gh} を定義し、路線 h が集合 G_g に含まれるとき 1 であり、そうでないとき 0 であるとする。集合 G_g について、その集合に含まれるすべての路線の列車編成数の総和がとりうる最大値を N_{0g} とおくことにより、制約条件は以下のように表すことができる。

$$N_{0g} - \sum_h \delta_{gh} N_h \geq 0 \quad (9)$$

2.3 解とその考察

前述の目的関数と制約条件をまとめると、時間あたり消費電力量の複数路線にわたる合計値制約下で乗客の利用時間期待値を最小化する問題は以下のように得られる。

$$\min J, \text{ s.t. } C \geq \sum_h \left\{ \frac{3600 N_h \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} \right\},$$

$$N_{0g} - \sum_h \delta_{gh} N_h \geq 0 \quad (10)$$

各関数は微分可能性の要求などに応じて、適宜関数をなめらかに接続するなどのしかるべき処置が施されているものとする。ここで内生変数は、各区間の走行所要時間、各区間を走行する際の消費電力量、列車編成数であるが、 W_i は T_i の関数であり、 $\partial W_i / \partial T_i < 0$ 、 $\partial^2 W_i / \partial T_i^2 > 0$ であると仮定することによって、内生変数の個数を減じたとみなし計算する。この解は 0 以上の数を成分に持つ未定乗数 μ_1 ならびに $\mu_{2g} (1 \leq g \leq P)$ を用いて、

$$L = J - \mu_1 \left\{ C - \sum_h \left\{ \frac{3600 N_h \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} \right\} \right\} - \sum_g \mu_{2g} (N_{0g} - \sum_h \delta_{gh} N_h) \quad (11)$$

とおくことにより、Kuhn-Tucker の定理から以下のように得られる。

$$\frac{\partial L}{\partial T_{hi}} = a_{hi} + \frac{I_h}{2N_h} + \frac{3600 \mu_1 N_h}{\{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})\}^2} \left\{ \frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} \sum_i (T_{hi} + t_{hi}) - \sum_i W_{hi} \right\} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial N_h} = -\frac{I_h \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{2N_h^2} + \mu_1 \left\{ \frac{3600 \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} + \theta_h \right\} + \sum_g \mu_{2g} \delta_{gh} = 0 \quad (13)$$

$$\mu_1 \frac{\partial L}{\partial \mu_1} = -\mu_1 \left\{ C - \sum_h N_h \left\{ \frac{3600 \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} + \theta_h \right\} \right\} = 0 \quad (14)$$

$$\mu_{2g} \frac{\partial L}{\partial \mu_{2g}} = -\mu_{2g} (N_{0g} - \sum_h \delta_{gh} N_h) = 0 \quad (15)$$

この解は μ_{2g} がすべて 0 である場合とそれ以外の場合とで 2 通りに分かれる。まず μ_{2g} がすべて 0 である場合、

$$C_h = N_h \left\{ \frac{3600 \sum_i W_{hi}}{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})} + \theta_h \right\} = \frac{I_h \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{2N_h} \mu_1^{-1} \quad (16)$$

$$\frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} = -\frac{1}{3600} \left(\frac{2C_h}{I_h} a_i + \theta_h \right) \dots\dots\dots (17)$$

である。式(17)より、各路線に割り振る時間あたり電力量が決定されれば、各区間の所要時間ならびに消費電力量は一意に定まる。一方、(16)によれば、各路線の時間あたり消費電力量は、路線に対する需要および路線の列車間隔の双方に比例するよう配分される。換言すれば、各路線の時間あたり消費電力量は、その路線における全ての駅で列車を待つ乗客人数総和の期待値に比例する。

ここで数値計算上問題となるのは、何らかの初期値を与えた上で(16)と(17)を交互に繰り返し演算する必要性が生じることである。その上、この繰り返し演算によって、解が必ずしもある値に収束するとは限らない。次章の数値計算においても、計算結果は初期値に強く依存し、二つの解が交互に出力されるケースも存在した。本稿では、数値計算によって解が求められるかどうかにかかわらず、式(16)および(17)を満たす W_{hi} , T_{hi} , N_h , C_h をそれぞれ W_{hi}^* , T_{hi}^* , N_h^* , C_h^* と表記する。

一方、1 つ以上の μ_{2g} が正の値をとる場合、 $\mu_{2g} > 0$ を満たす全ての g について

$$N_{0g} - \sum_h \delta_{gh} N_h = 0 \dots\dots\dots (18)$$

が成立する。これを満たす路線グループでは、可能な限り多くの列車を走行させることが、時間最小化につながる。以後、(18)を満たす路線グループの数を p 、これら p 個のグループに含まれる路線の数の合計が q 個であるとする。このとき一次方程式系(18)では、式の個数 p に対し内生変数の個数が q であるから、 $p > q$ の場合解が存在しない可能性がある。本稿では、同一の路線が 2 つ以上のグループに属する場合について考慮しないことによって、 $p > q$ となる事態を排除する。

さて、 μ_{2g} のうち 1 つ以上の値が正の値をとる場合、以下の関係式が成立する。

$$\frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} = \frac{C_h}{3600 N_h} - \frac{\sum_i W_{hi} \left(a_{hi} + \frac{I_h}{2N_h} \right)}{\frac{I_h \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{2N_h} - N_h \sum_g \mu_{2g} \delta_{gh}} \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu_1 = \frac{\left(a_{hi} + \frac{I_h}{2N_h} \right) \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{C_h - 3600 N_h \frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}}} \dots\dots\dots (20)$$

$$C_h = \left\{ \frac{I_h \sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{2N_h} - N_h \sum_g \mu_{2g} \delta_{gh} \right\} \mu_1^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

また、これらを連立することにより、

$$\frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} = \frac{1}{3600} \left[\frac{C_h}{N_h} - \left(a_{hi} + \frac{I_h}{2N_h} \right) \left\{ \frac{\sum_i (T_{hi} + t_{hi})}{N_h} \right\} \mu_1^{-1} \right] \dots\dots\dots (22)$$

$$\begin{aligned} & \left(\sum_g \mu_{2g} \delta_{gh} \right) \left[\sum_j (W_{hj}) - \frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} \left\{ \sum_j (T_{hj} + t_{hj}) \right\} \right] N_h^2 \\ & + a_{hi} \left(\sum_j W_{hj} \right) \left\{ \sum_j (T_{hj} + t_{hj}) \right\} N_h \\ & + \frac{I_h}{2} \left\{ \sum_j (T_{hj} + t_{hj}) \right\}^2 \frac{\partial W_{hi}}{\partial T_{hi}} = 0 \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

も同時に得られる。これらは、 μ_{2g} がすべて 0 であるとき、(16)および(17)と一致する。 μ_{2g} がすべて 0 である場合と同様、これらを満たす解は必ずしも数値計算で求めることができるとは限らないが、現状では以下に記す方法を用いることにより、数値計算を行うものとする。

まず W_{hi}^* , T_{hi}^* , N_h^* , C_h^* を計算し、 μ_{2g} が 0 とならない路線グループを特定する。この時点で未知数は媒介変数 p 個と列車編成数 q 個である。一方、 p 個のグループそれぞれに対して式(18)が成立し、列車編成数が定まっていなかった q 個の路線に対し式(23)が成立することから、式のと未知数の個数が一致する。したがって、(18)および(23)を連立することで、これらの変数を計算によって求めることができる。ただし、式(23)の各係数はそれぞれ W_{hi}^* , T_{hi}^* , C_h^* をもとに計算されるものとする。このとき求められた N_h , μ_{2g} は、必ずしも式(21)を満たすとは限らないため、これを満たす W_{hi} , T_{hi} , C_h を探索する必要がある。具体的には、(22)を満たす μ_1 を探索すれば、 W_{hi} , T_{hi} , C_h を計算できる。このように、(18)・(23)と(22)の間の繰り返し演算によって解を求めることは可能であるが、その解がある値に収束するとは限らない。特に、式(23)が二次方程式であるため、解が複数存在する可能性が残る。

なお、これらすべての計算結果について、集合の個数 P ならびに路線数 Q が 1 である場合、既往研究²⁾にて解が一意に定まることが示されている。この解は、「あるべき走り方の概要は、(1)編成両数の減、(2)駅間走行時間の僅かの延長、(3)列車の削減の順¹⁾」に対し、乗客利用時間の観点から明確な根拠を与えた。なぜなら、上記の解は、駅間走行時間を変更し列車の数を削減しない解と、駅間走行時間と列車の数を同時に変更する解のみを出力するためである。換言すれば、運転曲線等を再検討することなく列車を削減する列車運転計画は、ほぼ例外なく乗客に対し必要以上の負担を課す。多路線系統の解について、一意性の証明は困難であるのが現状だが、上記の結果と同一の性質を持つ解が現れると予想される。

3. 数値例

ここでは、環状路線 A と非環状路線 B の 2 路線を用いて数値計算を行う。路線 A は 29 駅を有する総延長 34.5km の路線であり、一般の通勤電車を想定し全長 220m、質量 296.4t の列車が走行するものとする。一方、路線 B は全 19 駅を有する総延長 14.3km の路線であり、一般の地下鉄電車を想定し全長 96m、質量 164.8t の列車が走行するものとする。路線 A の外回り線および内回り線、ならびに路線 B に対し、それぞれの消費電力量を 15%削減した場合に発生する乗客の利用時間期待値増分と、これらすべての路線の消費電力量合計を 15%削減した場合に発生する同増分を比較し、複数路線を一体とみなすことによる時間短縮効果を検証する。

電力量の制限のなかった場合、路線 A には内回り・外回り線にそれぞれ 15 編成の列車が運転され、周回の所要時間は 3600 秒、このうち駅での停車時間は 1120 秒であったとする。また同様の場合、路線 B には 25 編成の列車が運転され、周回の所要時間は 4500 秒、このうち駅などでの停車時間は 1620 秒であったとする。これらの場合における駅間の走行時間は、「等エネルギー増分則³⁾」に従い分配されるものとする。換言すれば、時間あたり使用電力の制限がなかった場合の同電力量は、周回等所要時間の制約下で最小化されていたものとみなす。

ここでは比較のため、時間あたり消費電力量の制限に際して、各区間の消費電力量および所要時間を変動させ

Table 1 Results of numerical examples

	Number of trains	Round-trip time (sec)	Reduced energy (%)	Incremental trip time (person)
Case1	15.00, 15.00, 25.00	3600, 3600, 4500	0.000, 0.000, 0.000	0.000, 0.000, 0.000
Case2	12.75, 12.75, 21.25	3600, 3600, 4500	15.00, 15.00, 15.00	421.4, 421.4, 333.6
Case3x	16.96, 16.97, 26.06	3771, 3768, 4685	15.00, 15.00, 15.00	231.0, 230.2, 238.2
Case4x	15.00, 15.00, 25.00	3687, 3686, 4644	15.00, 15.00, 15.00	259.0, 260.0, 241.1
Case3y	16.61, 16.52, 28.53	3789, 3786, 4622	19.00, 18.80, 2.08	333.5, 344.3, -68.78
Case4y	15.00, 15.00, 25.00	3696, 3697, 4588	16.10, 16.56, 10.66	285.0, 296.7, 116.5
Case4y'	15.02, 14.98, 25.00	3695, 3698, 4588	16.14, 16.52, 10.66	286.5, 295.2, 116.5

ず、列車編成数を 15%削減した場合に関しても計算する。ちょうど 15%削減された列車編成数が整数とならないケースにおいて、昨年は 15%を超える割合の列車が削減されたが、この場合の乗客利用時間期待値は、列車をちょうど 15%削減したと仮定して計算した場合よりも必ず大きくなる。列車編成数を整数に限定することによって発生する利用時間期待値の増大が、定量評価に与える影響を取り除くことを目的に、列車編成数が整数とならない場合に関しても、四捨五入等せずそのままの値を用いる。

なお、乗客の質量に関しては、計算の簡略化のため、時間あたり電力量の制限がなかった場合の乗車率を用いて計算した。また、引き上げ線への入線等、 a_{hi} が 0 となる区間に関して、提案手法では解を与えるのに困難を伴うことから、これらの区間では列車運転計画に関係なく、同一の W_{hi} および T_{hi} を用いるものとする。

計算結果については、Table 1 および Fig 1 の通りである。Case1 は時間あたり電力量の制限がなかった場合に相当し、Case2 は各線で列車を 15%削減した場合に当たり、Case3x は列車編成数の制約なしで提案手法を用いて各線の電力量を 15%削減した場合を示し、Case4x は Case3x に対し、各線の列車編成数が Case1 のそれを超えないという制約条件を加えて計算したものである。したがって上記の 3 つは、各線の時間あたり消費電力量を独立とみなし、それぞれ 15%削減する場合に相当する。一方、以降の計算は、路線 A と路線 B の時間あたり合計消費電力量を 15%削減するという条件の下で行われる。このうち Case3y に対しては列車編成数の制約を加えず、Case4y' および Case4y に対しては、列車編成数が Case1 のそれを超えないという条件を加える。ただし、Case4y では Case4x と同様に、それぞれの列車編成数に対して最大値制約を加え、Case4y' では路線 A の外回り線の列車編成数と内回り線のその合計に対して制約を加える。なお、Table 1 に列記された 3 つの数値は、左から路線 A の外回り線、路線 A の内回り線、路線 B の順であり、Fig.1 では、3 つの数値を合計した上で、列車を削減する Case2 と比べて乗客の利用時間の増分をどの程度抑えることが可能であるか、その割合を求めた。

提案手法によれば、Case3x および Case4x のように、電力量制約の存在に関わらず列車編成数を増した場合、乗客の利用時間期待値は最小化され、列車を削減した場合と比べてその増分は半分程度にまで圧縮可能である。鉄道の運行情勢を考慮し、列車編成数に対して制約をかけた場合、増分削減効果は 5%程度減少する。一方で、たとえば Case3y と Case4y を比較すると、各路線にそれぞれ同じ割合だけ電力量を削減させるよりも、その合計を削減する条件下で各路線に電力量を割り振る方が、増分削減効果が高いと分かる。値が Case3x と Case4y でほぼ同一であることから、列車編成数の制約によって減少する提案手法の効果は、多数の路線を一体とみなし、その消費電力量合計を削減することによって、補うことが

できると考えられる。なお、Case4y と Case4y' で値がほぼ同一であることから、ほぼ同一の線形を持つ路線間で車両等の融通を行っても、それほど効果がないことが読み取れる。

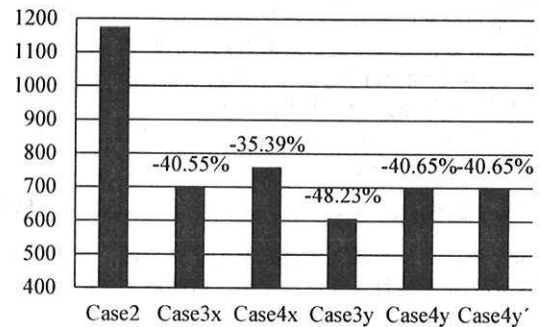


Fig.1 Incremental Trip Time of Passengers

4. 結論

時間あたり消費電力量の複数路線にわたる合計値を制限された場合、各路線にどの程度の電力量を割り振ることが乗客の負担最小化につながるか、その傾向を明らかにした。列車編成数の制約がない場合については、各路線に割り振られる電力量が、駅で列車を待つ乗客数の期待値に比例することが判明した。また、駅間走行時間の変更と列車の削減について、前者が後者に対し優先することを乗客の利用時間の観点から明らかにした。

鉄道は低炭素社会の実現を目的に 2030 年までに消費電力量を 2 割削減するよう要請されている⁴⁾。一方、鉄道は輸送効率が高く省エネルギー化を推し進めることは合理的ではないという意見も根強い。本研究で W_{hi} はエネルギーであったが、これを CO₂ 排出量とみなすことによって、各交通機関にどの程度の排出量ないし需要を割り振るか、検討することも可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 曾根悟：長期的節電要請に対する電気鉄道のモデルチェンジの提案，JREA，pp.36253-36260，2011
- 2) 溝口肇，宮武昌史，布施孝志：使用電力制限下の列車運転計画における乗客利用時間最小化に関する考察，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-12-044，2012
- 3) 宮武昌史：省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル，電気学会論文誌 D，131 巻 6 号，pp.860-861，2011
- 4) 国土交通省：エコレールラインプロジェクト推進検討会議，http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo04_hh_000035.html，2012