

計画停電が首都圏鉄道ネットワークの利便性に及ぼした影響のモデル分析

藤田 亮祐¹・柳沼 秀樹²・福田 大輔³

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: r.fujita@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋 2-13-14 マルヤス機械ビル 5 階)

E-mail: yaginuma@doro.co.jp

³正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

本研究では、首都圏鉄道ネットワークを対象に、計画停電による鉄道事業者への節電要請に伴う運行頻度削減が、鉄道旅客の利便性に及ぼした影響を分析した。最小費用 Hyperpath アプローチに基づいて鉄道旅客の経路選択行動を表現し、計画停電前後での一般化費用の変化を計測することで計画停電の影響を把握した。その結果、都心郊外で路線網が比較的充実している地域を出発地とする旅客の一般化費用は微増にとどまるが、路線密度の低い山間部を出発地とする旅客は大きく増加する傾向が見られ、地域により計画停電の影響が偏在することが確認された。運行頻度削減に限らず、本研究で適用した手法は、非平常時における交通ネットワークの頑健性を評価する上で、新たな指標となると期待される。

Key Words : *Hyperpath, route choice behavior, Planned Electric Power Failure, Great East Japan Earthquake*

1. はじめに

(1) 背景と目的

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、直接の被災地である東北地方のみならず、首都圏をはじめとする関東地域にも間接的に甚大な被害を与えた。そして、福島第一原子力発電所の被災に伴う電力供給能力の大幅な低下により、関東圏では地震発生から数カ月間にわたり計画停電が実施された。特に、計画停電実施当初の数週間は、首都圏における市民生活や産業活動に多大な混乱をもたらした。その中でも、計画停電による鉄道事業者の輸送サービス水準の低下は、首都圏住民に最も影響を及ぼしたものの一つと考えられる。

計画停電開始当初において、鉄道事業者の対応に混乱が見られたものの、概ね定常状態に収束して以降は、「列車運行頻度の削減」、「相互直通運転の中止」、「優等列車の停止」の主に 3 つの方法で節電対応が実施された¹⁾。鉄道路線の運休や運行頻度の大幅な低下の結果、一部の旅客は普段の通勤経路とは異なる迂回路の利用を余儀なくされた可能性がある。

東日本大震災がもたらした経済損失について幾つかの試算が行われている。震災による経済損失は、構造物の倒壊等による直接的経済損失と、震災によって生産活動が制限されることにより生じる間接的経済損失に大別される。しかし、大多数の鉄道旅客が被った鉄道

ネットワーク(以降、NW とする)における利便性の低下に着目した間接的経済損失の分析は見られない。震災の教訓を今後の鉄道計画、とりわけ近い将来に発生すると危惧されているエネルギー危機の状況での適切な鉄道オペレーション²⁾に資するためにも、首都圏鉄道 NW 全体で利便性低下がどの程度生じたのかを適切に把握することが重要と考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、計画停電に伴う首都圏都市鉄道サービス水準の低下が鉄道利用者の利便性に与えた影響の定量的な評価を行うことを目的とする。計画停電前後での鉄道旅客の経路選択行動の変化を明示的に考慮するために、Hyperpath 概念に基づく一般化費用算出モデルを用いた利便性評価を行う。なお、Hyperpath 概念に基づいて一般化費用を算出する手法は、倉内ら³⁾による京都のバス路線網における旅客の利便性評価への適用例が存在する。本研究では、これを首都圏鉄道ネットワークの利便性評価へと適応させる。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

鉄道をはじめとする公共交通機関は、運行頻度もしくは時刻表に基づいてサービスが提供されており、乗り場における待ち時間の存在が自動車交通と大きく異なる。すなわち、自動車はサービス形態が連続的であるのに対して、公共交通機関は離散的であると言えよう。このことから、鉄道を含む公共交通機関ネットワークの経路

選択問題は、道路ネットワーク上での自動車の経路選択問題と異なる体系で記述される必要がある。計画停電による鉄道事業者の運行頻度の削減と利便性の低下を扱う上で、この点は重要であると考えられる。Spiess and Florian⁴⁾は、待ち時間に起因する不確実性を考慮した公共交通機関の経路選択問題をモデリングしている。具体的には、頻度ベースで運行される公共交通を対象に、利用者が期待所要時間を最小にする「Strategy」もしくは「Hyperpath」と呼ばれる経路選択肢群を選択すると仮定した乗客配分モデルを構築している。

本研究では、首都圏鉄道ネットワークに対して Hyperpath 概念に基づく公共交通の経路選択モデルを適用し、計画停電時の鉄道旅客の一般化費用の変化を定量的に評価する。具体的には、倉内ら³⁾と同様に、Spiess and Florian⁴⁾が提案した頻度ベース乗客配分モデルを首都圏鉄道ネットワークにおいて実装し、OD ペア毎に出力される一般化費用について、運行頻度削減前後での変化分を算出するシステムを開発する。その上で、計画停電実施時の代表的な時点毎の鉄道運行状況を再現し、先述のモデルを適用することにより、計画停電が緩和されていく過程で鉄道利用者の一般化費用がどのように変化したのかを試算・評価する。

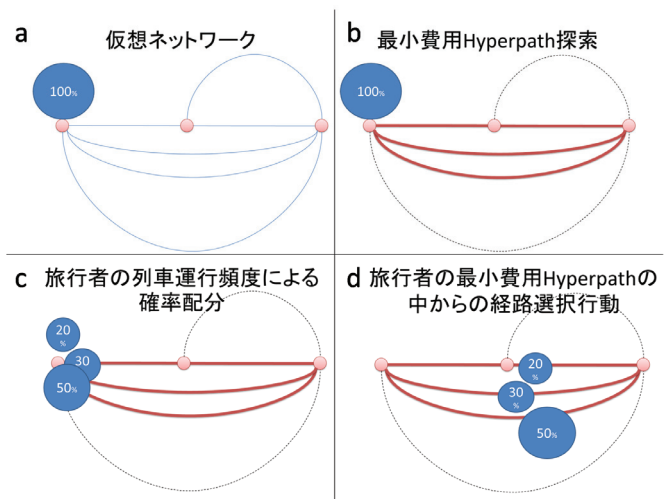
Spiess and Florian⁴⁾が示したモデルを用いることにより、公共交通機関の特性や、計画停電実施時の人々の鉄道利用行動の特徴を考慮した分析を行うことができ、首都圏鉄道ネットワークにおける計画停電実施の段階別・地域別の鉄道利用者の一般化費用の変化を評価することが可能となる。ここで提案する方法を用いることで、今後同様の状況が起きた際に起こり得る首都圏鉄道 NW 全体の利便性低下の状況を事前に推察することが可能になると共に、より一般的にも交通ネットワークにおける脆弱な要素の検出・評価を行うことが可能になると期待される。

2. Hyperpath 概念に基づく鉄道利用者の一般化費用の算出手順

(1) Hyperpath の定義

Hyperpath とは、頻度ベース運行がなされている鉄道 NW において、利用者が出発地から目的地までに利用可能な経路群（乗車方法の組み合わせ）を意味する。分析を行うに当たり、以下に示す前提条件を仮定する。

- 鉄道路線は頻度ベースでサービスが提供され、車両の到着時間間隔は運行頻度の逆数を平均とするポアソン分布に従う。
- 利用者は対象鉄道 NW に対して十分な知識（NW 形状、各路線の運行頻度、乗車時間）を有する。
- 利用者は出発駅にランダムに到着する。



図—1 Hyperpath の例

- 利用者は、Hyperpath 集合の中から期待一般化費用を最小にする Hyperpath を選択する。

具体例として、図—1 に示す仮想 NW(図中 (a) に該当) を例に説明する。

Hyperpath に基づく鉄道経路選択モデルでは、期待最小費用 Hyperpath に含まれる経路のみを用いて乗客が目的地まで向かうことを仮定する。一般化費用は、乗車時間と待ち時間の重み付き線形和で構成され、この期待一般化費用を最小化する経路群が最小費用 Hyperpath である (図—1 (b)). これは公共交通に特有の特徴である待ち時間の影響を考慮した利用者行動規範を定式化したものである。

最小費用 Hyperpath は経路群であり、Hyperpath に含まれるどの経路が実際に選ばれるのかを決定する必要がある (図—1 (c)). 運行頻度が高い路線、同じ出発地からおなじ目的地を目指す場合には多くの旅行者が利用することになる (図—1 (d)). すなわち、Hyperpath に含まれる要素リンクの選択確率は運行頻度に比例して定まることとなる。

本研究では、利用者が移動中に得られる情報は、「ノードでの待ち時間中にどの路線が次にやってくるか」という情報のみであると仮定する。すなわち、列車での移動中にモバイル端末などで遠隔的に他路線の運行情報を得られるようなケースは想定していない。但し、計画停電が実施されている中での首都圏鉄道ネットワークにおいては、このような状況は全く起こり得ないものではないと考えられる。

(2) 一般化費用の定式化

Hyperpath p はノード集合 I_p 、リンク集合 A_p 、経路分岐確率 T_{ap} 、 $H_p = (I_p, A_p, T_{ap})$ によって表現すること

ができる。また、Hyperpath p の一般化費用の期待値 g_p は以下のような式で表わすこととする。なお、本研究では、旅行時間並びに駅での待ち時間の重み付き線形和によって一般化費用を定義している。運行頻度の増加による乗車時間の増加や、混雑増大の不効用の考慮については今後の課題である。

$$g_p = \phi \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} t_a + \psi \sum_{i \in I_p} \frac{\beta_{ip}}{F_{ip}} \quad (1)$$

ここで、

t_a : リンク a の乗車時間,
 ϕ : 乗車時間に関する時間価値パラメータ,
 ψ : 待ち時間に関する時間価値パラメータ,
 α_{ap} : Hyperpath p におけるリンク a の通過確率,
 β_{ip} : Hyperpath p におけるノード i の通過確率,
 $\frac{1}{F_{ip}}$: ノード i における期待待ち時間,

である。

式 (1) の右辺第一項は乗車時間による費用、第二項は待ち時間に関する費用を表している。 F_{ip} は連結頻度 (combined frequency) と呼ばれるもので、 $1/F_{ip}$ は Hyperpath p に含まれるノード i における期待待ち時間を表しており、リンク a の運行頻度 f_a を用いると式 (2) のような関係がある。

$$\frac{1}{F_{ip}} = \frac{1}{\sum_{a \in A_p} f_a} \quad (2)$$

式 (1) で表わされる期待一般化費用を最小化するような Hyperpath を求めれば、それが与えられた OD ペアで移動を行う利用者の最適な経路群である。

(3) Spiess and Florian アルゴリズム

Spiess and Florian⁴⁾ は、最小費用 Hyperpath 探索、ローディングの手順をまとめている。

まず、目的地ノードからすべての出発地ノードに対して最小費用 Hyperpath $\bar{A}^*$ を計算し、各ノード $i \in I$ から目的地ノード r までの期待総旅行時間 u_i^* を計算する。次に、すべての出発点から目的地まで、交通需要 (トリップ) を最小費用 Hyperpath に従ってネットワークに配分する。ここで t_a はリンク a の乗車時間である。

Part 1: 最小費用 Hyperpath 探索

1.1 (初期化)

$u_i := \infty, i \in I - \{r\}; u_r := 0;$
 $f_i := 0, i \in I;$
 $S := A; \bar{A} := \emptyset$

1.2 (リンクの生成)

もし $S = \emptyset$ ならば *STOP*
 でなければ以下の条件を満たす $a = (i, j) \in S$ を見つける
 $u_j + t_a \leq u_{j'} + t_{a'}, a' = (i', j') \in S;$
 $S := S - \{a\}$

1.3 (ノードラベルの更新)

もし $u_i \geq u_j + t_a$ ならば

$$u_i := \frac{f_i u_i + f_a (u_j + t_a)}{f_i + f_a},$$

$$f_i := f_i + f_a, \bar{A} := \bar{A} + \{a\};$$

ステップ 1.2 に戻り、繰り返す

Part 2: 最小費用 Hyperpath に従い交通需要を配分

2.1 (初期化)

$$V_i := g_i, i \in I;$$

2.2 (ローディング)

すべてのリンク $a \in A$ に対して、

$$\text{もし } a \in \bar{A} \text{ ならば } v_a := \frac{f_a}{f_i} V_i,$$

$$V_j := V_j + v_a,$$

でなければ $v_a := 0$

ここで、

u_i : ノード i から目的地までの期待所要時間

f_i : ノード i で選択され得る全てのリンクの連結頻度

V_i : ノード i の Volume $\rightarrow i$ に入ってくる

すべてのリンク Volume と i 発の需要の和

g_i : ノード i から目的地ノード r に向かう交通需要

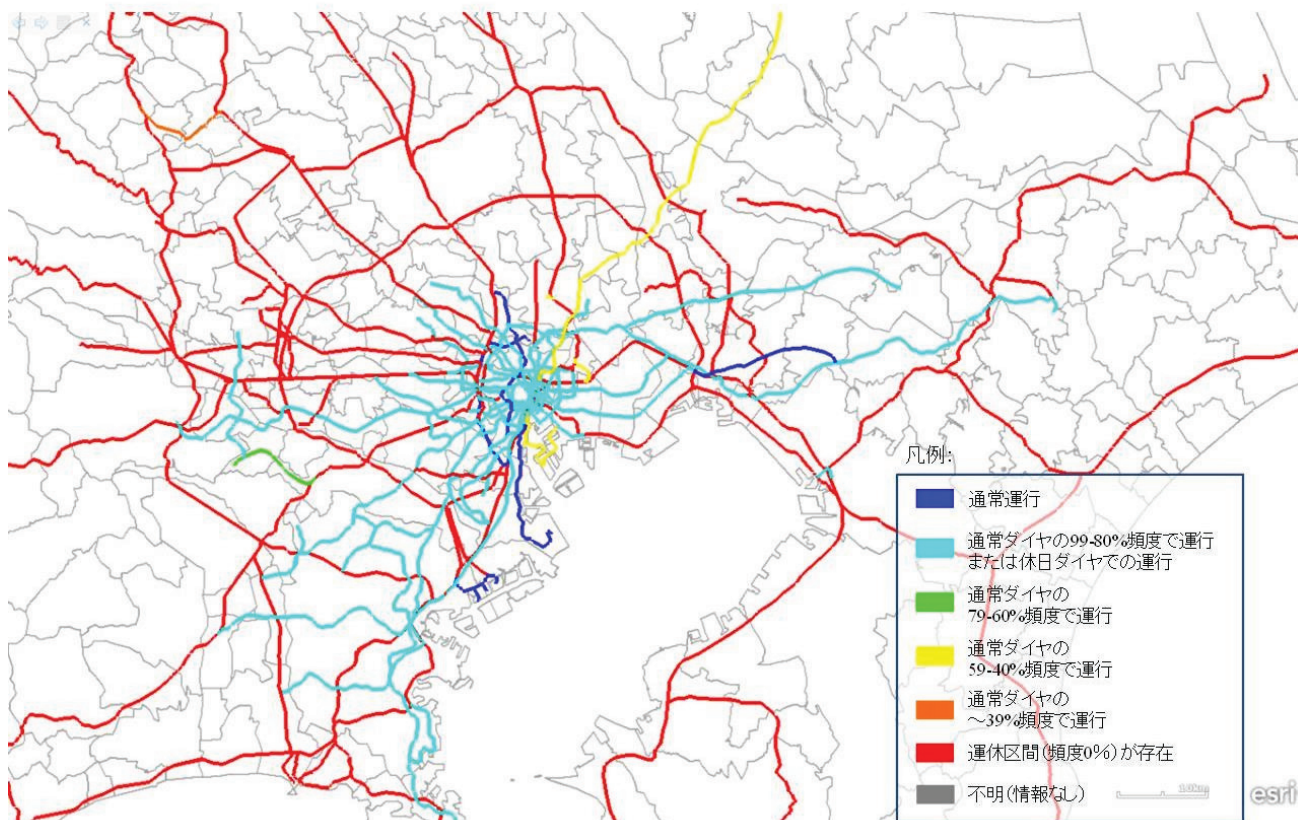
v_a : リンク a の Volume

ステップ 1.1 でノードラベル u_i を目的地ノードを除くすべてのノードで無限大に設定する。補助変数 $f_i, i \in I$ は 0 に設定する。集合 S は未調査のリンクを格納するために使用し、 $\bar{A}$ は最小費用 Hyperpath を発見するために使われる。

ステップ 1.2 では、まだ調査されていないすべてのリンクの中から、目的地にもっとも近いリンクを選択する。このとき考える時間 $u_j + t_a$ は、ノード i での待ち時間を含まない、ノード i から目的地までのリンク上での乗車時間である。もしこの時間が現在ノード i と関連付けられている u_i よりも小さかった場合、リンク a は最小費用 Hyperpath を含むため、 u_i と f_i は、ステップ 1.3 で与えられた式に従って更新される。すべてのリンクが調査されたらこのアルゴリズムは終了する。

最小費用 Hyperpath を求める際に、各ノードから目的地ノードへの、すなわち OD ペア毎の期待旅行時間が出力される。この期待旅行時間に時間価値パラメータを用いて貨幣換算したものが一般化費用であり、本研究ではこの段階で出力される一般化費用を利用する。

Part2 では鉄道利用者のローディングを行う。得られた最小費用 Hyperpath に交通需要を配分していく。ここで、ノード i を通る各リンクの頻度 f_a を線形に足し合わせたものを、連結頻度 (combined frequency) f_i と定義する。Spiess and Florian⁴⁾ のローディング手法は、リンク a を通る交通量 (Volume) は、 a の頻度 f_a とその出発ノード i における連結頻度 f_i との比率に基づい



図一3 3月18日時の鉄道運行状況 (出典：柳沼ら⁶⁾)

表一2 運行頻度削減割合不明路線の運行頻度設定値

対象日 (2012 年)	3/14	3/17	3/18	3/24
運行頻度設定値 (%)	50	60	65	75

れていないものが存在していたことに配慮する必要がある。一般化費用を定量的に評価するためには、そのような路線にも何らかの具体的な値を設定する必要がある。そのような路線に関しては、運行頻度が一律で削減されたものと仮定し、その具体的な運行頻度の割合は、その日時に運行本数の削減を行っている全路線の運行頻度の平均値をもって与えるものとする。それらの具体的な値は表一2に示す通りである。

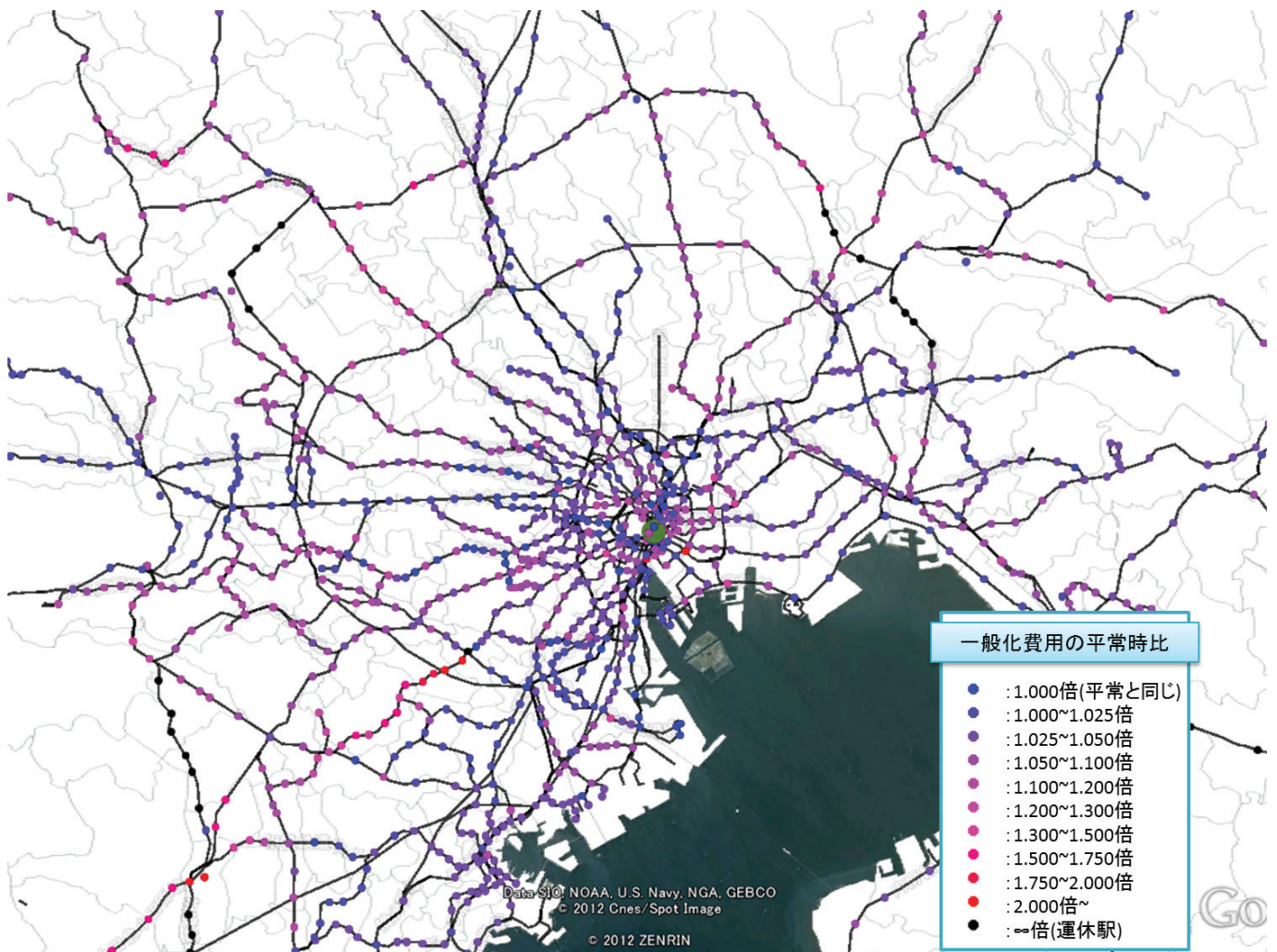
また、相互直通運転の中止は、ある列車が他路線へ乗り入れる際に、その列車を同一列車と見なさず、違う列車としてモデルシステムに入力することによって表現する。例えば、日比谷線と直通運転を実施している東横線において、「東急東横線菊名駅を出発し東急東横線中目黒駅を経由し、中目黒駅を境に東京メトロ日比

谷線に乗り入れ東京メトロ日比谷線北千住駅に向かう列車」は、路線の境界線となる中目黒駅において、「東急東横線菊名駅発、中目黒駅着の列車」と、「東京メトロ日比谷線中目黒駅発、北千住駅着の列車」の2つの列車に分割することで表現する。

(2) 計算条件の設定

Hyperpathに基づく鉄道経路選択モデルで出力される一般化費用は、ODペア毎に定まる。多くの鉄道利用者への影響を把握するためには、利用者の多いODペアについての一般化費用を対象に分析することが効果的であると考えられる。本研究では「東京」「新宿」「横浜」「埼玉」「千葉」の5駅を目的地ノード(D node)とし、それ以外の全ての駅を出発地ノード(O node)とするODペアの一般化費用の増加分について試算する。

一般化費用を算出する際には時間価値を予め設定する必要がある。時間価値については、Kato et al.⁷⁾によって推定された $\phi = 35.90$ 円/分、 $\psi = 44.60$ 円/分という値を用いる。



図一4 3月18日の一般化費用の増加割合 目的地：東京駅 出発駅：それ以外の全駅

(3) 一般化費用変化分の試算結果

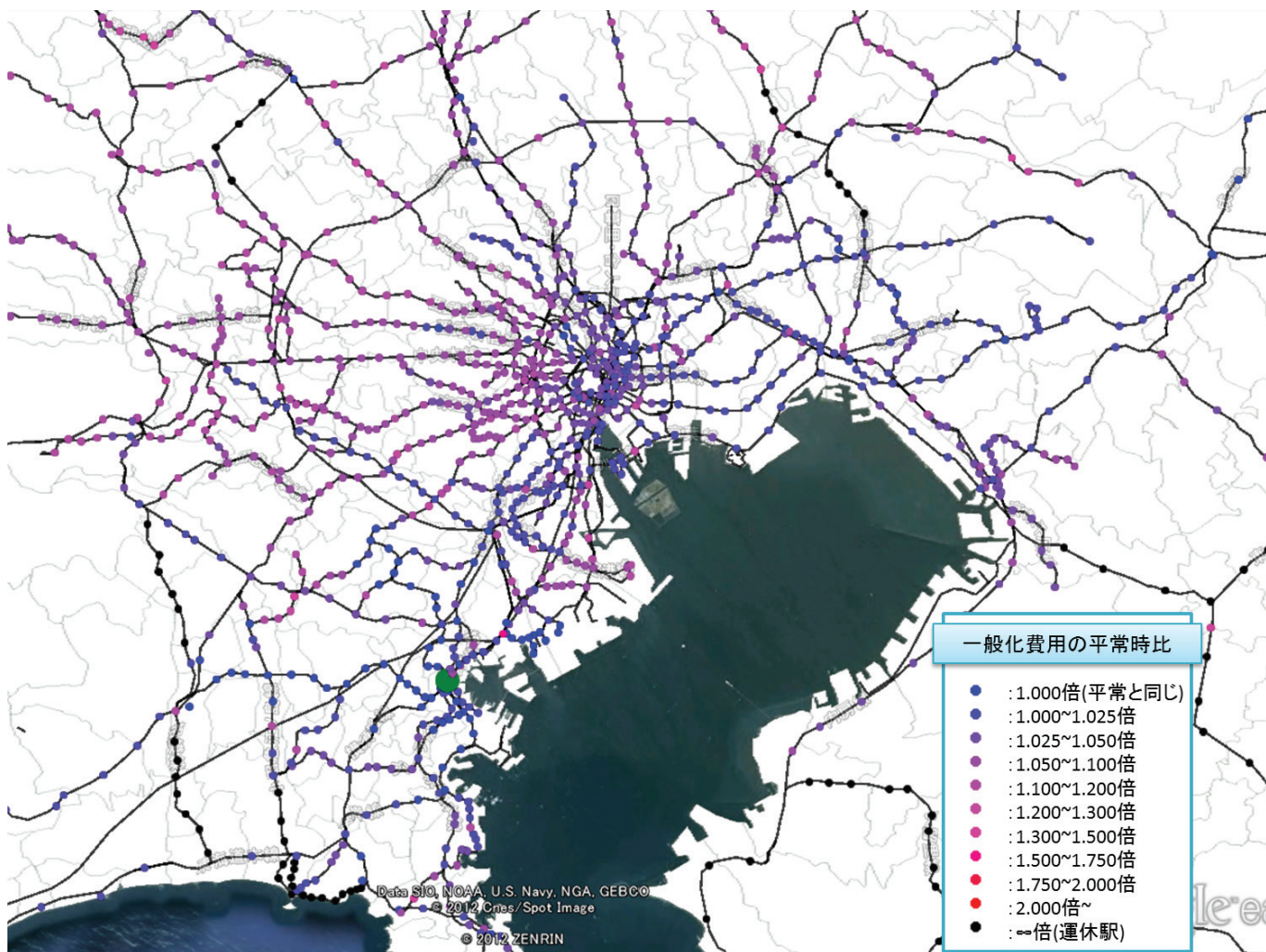
2.(4)で示した計算手順を踏まえ、「東京駅」「新宿駅」「横浜駅」「大宮駅」「千葉駅」を目的地ノードとする利用者が、3月14日、17日、18日、24日時点において一般化費用がどの程度増加したのか算出する。紙面の都合に3月18日時点での「東京駅」、「横浜駅」を目的地とする利用者の、出発駅別一般化費用の増加割合を図一4、図一5に記載する。

(4) 結果の考察

図一4、図一5より、運行頻度の減少は待ち時間の増加をもたらし、結果として一般化費用の増加に寄与するため、乗り換え回数の多い遠方の駅からの鉄道利用者ほどより大きな影響を被ると考えられる。また、乗り換え回数が多いということは、その分だけ多くの路線を経由して移動するということであり、ある路線の運休が一般化費用の増加として影響を与える場合、近隣よりも遠方の駅からの鉄道利用者の方がその影響が

大きくなる。よって、そのような遠方の鉄道利用者の方が節電要請に伴う鉄道輸送サービスの低下によって相対的に大きな影響を受けてしまう。

特にこれらの図において注目すべきは、全ての鉄道方面においてそのような同一の傾向が示されているわけではない点である。一般化費用は、図一4で深緑のドットで示された目的地である東京駅を中心に、おおよそ同心円状に増加傾向にあることが示されている。しかし、完全に同心円状に増加しているわけではなく、地域(方面)や路線によって多少バラツキが見られる。例えば、東京湾沿岸部の駅は概ね一般化費用の増加がそれほど顕著ではなく、その一方で内陸方面に向かえば向かうほど、一般化費用の増加割合は上昇している。これは、東京湾沿岸部には複雑な鉄道ネットワークが整備されていることから最小費用 Hyperpath のネットワーク構成が大きくなっているものと推察される。すなわち、迂回経路となりうる鉄道経路選択肢の多さがネットワークの強靱性として現れていることが示唆される。一方、



図一5 3月18日の一般化費用の増加割合 目的地：横浜駅 出発駅：それ以外の全駅

単一路線のみの運行が多い内陸方面の路線は、複雑なネットワークを構築していないため迂回経路を選択する余地が少なく、その結果、最小費用 Hyperpath のネットワーク構成も相対的に小さくなり、一般化費用を大きく増加させてしまっていると推察される。

(5) 最小費用 Hyperpath の変化

鉄道利用者の期待最小費用 Hyperpath が計画停電実施時にはどのように変化したのかを視覚化し、経路選択行動の変化が実際にどう変化したのかを確認する。図一6は、大宮駅を出発し横浜駅を目的地とする乗客にとっての最少費用 Hyperpath である。計画停電が首都圏鉄道 NW に最も大きな影響を与えた3月14日の Hyperpath には、平常時には利用経路として使われることがほとんどない経路(東急東横線 渋谷ー横浜 当)も含まれている。これは、平常時には最短と考えられていた経路が運行状況の悪化により一般化費用が増大し、最小費用 Hyperpath から外れたことを意味している。

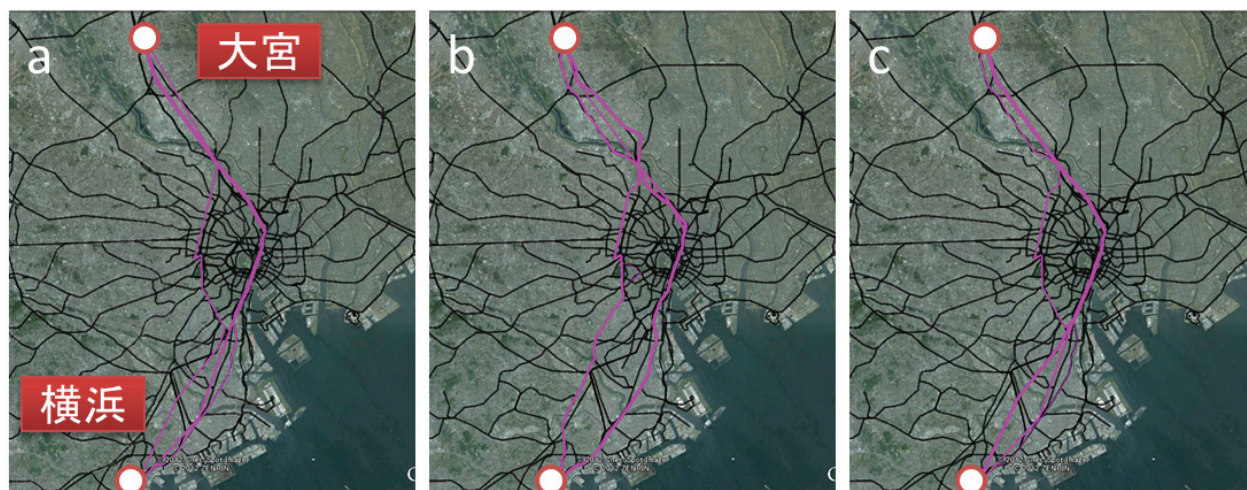
4. おわりに

本研究では、首都圏鉄道 NW を対象に、計画停電に伴う鉄道事業者への節電要請が、鉄道利用者の利便性に及ぼした影響のモデル分析を行った。具体的には Spiess and Florian⁴⁾ の最小費用 Hyperpath アプローチに基づいて、利用者の経路選択行動を表現し、一般化費用がどのように変化していったのかを試算・視覚化した。Hyperpath すなわち経路群の計画停電前後での変化に着目することにより、普段は利用されない迂回経路の利用も考慮した上で一般化費用を算出している点で、実際の利用者行動により即した試算を行うことができたと考えている。

鉄道車内混雑の増加による不効用の考慮、計画停電時の運行状況のよりの確な再現、鉄道 NW のより忠実な再現、などを行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 福田大輔: 計画停電が首都圏鉄道輸送サービスに及ぼし



図—6 大宮駅—横浜駅間旅行者の Hyperpath の変化 (a：平常運行時 b：3月14日 c：3月24日)

た影響, 都市計画, Vol. 60, pp. 48–51, 2011.

- 2) 株式会社ライテック・財団法人運輸政策研究機構: 節電対策のための企業等の勤務形態変更が鉄道輸送に与えた影響に関する調査報告書, 2012.
- 3) 倉内文孝・嶋本寛・王萍・飯田恭敬: 最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, pp. 755–761, 2006.
- 4) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal strategy: A new assignment model for transit network, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 23, pp. 83–102, 1989.
- 5) Yaginuma, H., Fukuda, D., Schmoecker, and J-D.: A large scale application of a hyperpath-based railway assignment model considering congestion effects to Tokyo Metropolitan Area, *Proceedings of the 15th HKSTS International Conference*, pp. 495–502, 2010.
- 6) 柳沼秀樹・瀬尾亨・石井良治・福田大輔: 計画停電が首都圏の鉄道運行に及ぼした影響の空間的把握, 第 66 回土木学会年次学術講演会概要集, CD-ROM 2011.
- 7) Kato, H., Kaneko, Y., and Inoue, M.: Comparative analysis of transit assignment: Evidence from urban railway system in the Tokyo Metropolitan Area, *Transportation*, Vol. 37, pp. 775–799, 2010.