

超高速リンクの整備が都市間交通ネットワークに及ぼす影響のシミュレーション

奥村 誠¹・大窪和明²・石山 翔³・Tirtom HUSEYIN⁴

¹正会員 東北大学教授 東北アジア研究センター (〒980-8576 仙台市青葉区川内41)
E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助教 東北アジア研究センター (〒980-8576 仙台市青葉区川内41)
E-mail:okubo@cneas.tohoku.ac.jp

³非会員 仙台市 (〒980-8671 仙台市青葉区国分町3-7-1)
E-mail:ishiyama@cneas.tohoku.ac.jp

⁴非会員 東北大学大学院博士課程後期 工学研究科土木工学専攻〒980-8576 仙台市青葉区川内41)
E-mail:htirtom@gmail.com

中央リニアに代表される超高速リンクの追加が都市間交通ネットワークに及ぼす影響を、(1)ODごとの旅客の経路の選別と選択行動、(2)リンクごとの利用旅客数に見合った事業者の頻度設定行動、という2つの行動の相互作用からなるプロセスにしたがって追跡する方法を提案する。このとき、新規路線との代替、補完関係はODごとに異なり、あらかじめあるリンクがどちらの影響を受けるかを確定できないという問題があることを指摘する。本論文では、中央リニアの整備がもたらす影響のシミュレーション結果を示す。

Key Words : *Set of Inter-city Routes, Route Choice Behavior, Inter-city Transport Service Network*

1. はじめに

(1) 本研究の背景

新幹線をはじめとする我が国の都市間交通ネットワークの整備は着実に進められてきたが、今後国内の交通需要が頭打ちで大きな増加が見込めないため、不採算の航空路線の減便や廃止が行われる状況にある。

そんな中、JR 東海が中央リニアを整備し 2027 年に現在の 98 分の東京-名古屋間を 40 分で、2045 年に現在の 157 分の東京-大阪間を 67 分で結ぶサービスを開始すると発表した。中央リニアは鉄道との乗り継ぎが便利で、東京-名古屋-大阪の沿線相互の旅客を集めるだけでなく、東日本と西日本間の長距離旅客の経路の一部として利用される可能性が高い。その結果、中央リニアと代替関係になる航空路線は路線の縮小、廃止に追い込まれる危険性がある。一方、中央リニアに接続する補完路線の増強などが必要になる可能性もある。

各交通機関の事業者が長期的なサービスの提供を計画する上では、中央リニア整備後に長期的に確保できる旅客数とそれに見合うサービスレベルの水準を把握してお

くことが望ましい。

例えば鉄道は路線のサービスレベルを変更するためには事前に車両や線路などの施設を準備する期間が必要となるという技術的特徴がある。将来の各路線のサービスレベルが予め把握できれば、新しい車両を準備してスムーズに路線頻度を上昇させることが可能となり、また、頻度の減少が見込まれる路線では他の路線に転用できる車両を利用することで無駄な投資を防ぐことができる。一方、政府には、限られた財源で全国の都市間交通ネットワーク維持を行うことが期待されている。このような支援の優先順位を付けるためには、将来のネットワークのサービスレベルに関する情報を得ることが望まれている。

(2) ポジティブ・フィードバックの存在

中央リニアのような超高速リンクを整備したことによる影響は、以下の順序にしたがって波及していくと考えられる。まず超高速リンクを含んだ経路が新たに選択肢として加わった中で旅客の経路選択が行われ、これまで利用されていた代替経路の分担率は低下する。その結果、

代替経路に含まれるリンクの旅客が減少するので、事業者は採算性の確保のために頻度を減らさざるを得なくなる。それが当該リンクを含む経路のサービスレベルの低下を招き、更なる旅客の減少をもたらし、更なるリンクの頻度の減少につながっていく。一方、超高速リンクに直接つながるリンクは、新たな経路として使われるようになるため旅客数が増え、頻度を上昇させることができる。それが更なる旅客数の増加へと発展していく。その結果、利用されるリンクはさらに利用されるようになり、利用されなくなったリンクはますます利用されなくなる。

このように旅客の選択行動と事業者のサービスレベルの提供行動の間には、相互に影響を強めあうようなポジティブ・フィードバックがある。一般にポジティブ・フィードバックをもつシステムでは最初に起こった変化が時間を通じて拡大してゆくため、少数の者が全てのパイを占有して生き残り、他は絶滅してしまうという「独り勝ち」という結果に陥ることが知られている。

(2) 都市間交通サービスネットワークの特徴

都市間交通サービスネットワークにおける旅客と事業者との間に生じる相互作用を捉える上で、次の2つの重要な特徴がある。

a) 多くの旅客が複数のリンクを含む経路を利用している。

1つの事業者がサービスレベルを改善させたとしても、旅客が選択する経路全体としてのサービスレベルが改善しない限り旅客は増加しない。従って、事業者が自らのサービスレベルの変化に対する旅客数の変化を予測することは困難である。

b) 多様な OD ペアを持つ旅客から構成される旅客数に応じて、事業者はサービスレベルを決定する。

旅客は多様な OD ペアを持つためリンク間の代替または補完関係を簡単には決めることができず、影響の正負も不確定である。

これらのメカニズムは都市間交通サービスネットワークを把握する上で重要な特徴であるものの、取り扱いの複雑さから従来の研究では扱われてこなかった。しかし、近年の全国幹線旅客純流動調査¹⁾等の都市間交通に関するデータが整備されるとともに、旅客の複数リンクを含む経路の選択行動に関する研究が進んでいる。全国幹線旅客純流動調査から得られるデータにおいては、旅客の出発地から目的地への移動が完結するまでを1トリップとしている。これはリンクごとに1トリップを計上している総流動調査からは得られなかった情報である。全国幹線旅客純流動調査を利用することによって、真の出発地と目的地に関する情報が把握できるようになり、複数リンクを含むような経路選択に関する研究が進み始めている。

本研究では、全国幹線旅客純流動調査を活用することによって上記のような特徴を持つ都市間交通サービスネットワークにおける旅客と事業者との相互作用を捉える。

2. 旅客と事業者の相互作用のモデル化

(1) モデル化の前提

都市間交通の中で多くを占める仕事目的の旅客が重視するサービス指標として頻度を取り上げる。一方、運行に一定の費用がかかる以上、低運賃で旅客を集める戦略を長期的に継続することは難しい。本研究では、国土レベルで長期に起こる構造的変化に着目するので、運賃は現行のレベルと大きな差異はないものと仮定する。

なお、中央リニアの整備は、長期的には人口や産業の立地をもたらす可能性があり、OD交通量の構造を変化させる可能性があるが予測が容易ではない。本研究ではまず国内の交通需要が頭打ちとなっている状況下において、中央リニアを含む経路と既存の経路との間で起こる限られた旅客の取り合いを分析することが重要であると考え、OD交通量は変化しないものと仮定する。

(2) モデルの定式化

旅客の経路選択行動を選別過程と選択過程に分けてモデル化した木村らの研究¹⁾に倣って、旅客の経路選別行動および経路選択行動のモデル化を行う。

a) 選別行動モデル

考慮すべき経路が無数にある選別過程では、旅客は「代替案を規定する各属性の値に関して最低でもこれだけの属性値を持たねばならない」という基準が決まっており、全ての属性に関して基準が満たされた場合に限り、その代替案が選別される」というような非補償型の意思決定を行っていると考えられる。

LOS 指標ごとの許容水準は旅客によってばらつきがあり、そのばらつきがロジスティック分布に従い確率的に変動すると仮定すると、旅客が経路 l を選別する確率は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Pr(\delta_l = 1) &= \Pr(Z_{lk} - \bar{Z}_k + v_{lk} \geq 0, \forall k) \\ &= \prod_k \Pr(Z_{lk} - \bar{Z}_k + v_{lk} \geq 0) \\ &= \prod_k \frac{1}{1 + \exp[\omega_k (\bar{Z}_k - Z_{lk})]} \end{aligned} \quad (1)$$

δ_l : 経路選別判定指標 (経路 l が利用されているとき 1 をとり、そうでないとき 0 をとる変数)

Z_{lk} : 経路 l の k 番目の LOS 指標値

\bar{Z}_k : k 番目の LOS 指標値の最低許容水準

v_{lk} : ランダム項 (スケールパラメータ ω_k のロジスティック分布に従うと仮定)

b) 選択行動モデル

前述した選別段階で既に特定の属性が劣るため利用できない経路は除外されているため、この選択段階では旅客は複数の属性を同時に考慮する補償型の意思決定を行っていると考えられる。そこで、最も一般的な補償型の選択モデルであるロジットモデルを用いて表す。

$$P_{od}^l = \frac{\exp V_{od}^l}{\sum_{j \in J_{od}} \exp V_{od}^j} \quad (2)$$

$$V_{od}^l = \beta_1 Z_{od}^{1l} + \beta_2 Z_{od}^{2l} + \dots + \beta_k Z_{od}^{kl} \quad (3)$$

V_{od}^l : OD od の経路 l の効用
 Z_{od}^{kl} : OD od の経路 l の k 番目 LOS 指標値
 β_k : パラメータ , J_{od} : OD od の選択肢集合

c) 頻度調整モデル

事業者がリンクの旅客数に応じて、リンク頻度を調整する行動のモデル化を行う。事業者はリンクの旅客数を正確に予測することはできないが、実際の旅客数に応じて継続的に提供が可能な頻度のレベルを経験的に把握していると考えられる。それを旅客数の線形モデルとして航空、新幹線、新幹線を除く鉄道の3種類に分けて設定する。

$$adjf_m = An_m + B \quad (4)$$

$$n_m = \sum_{od} \delta_{od}^{lm} n_{od}^l \quad (5)$$

$adjf_m$: 調整頻度, n_m : リンク m の旅客数 (人/年)
 n_{od}^l : OD od の経路 l の旅客数 (人/年)
 A, B : パラメータ

δ_{od}^{lm} : OD od の経路 l がリンク m を利用するダミー

d) 経路頻度モデル

経路の頻度をその中に含まれるリンクの中で最も低い頻度を基にして推定する。経路距離も考えた線形モデルを、航空リンクを1本含む経路、航空リンクを2本含む経路、鉄道経路の3種類に分けて作成する。

$$freq_l = \alpha \cdot minf_l + \beta \cdot length_l + \gamma \quad (6)$$

$freq_l$: 経路 l の1日当たり頻度, $length_l$: 経路距離
 $minf_l$: 1日当たりの最小頻度, α, β, γ : パラメータ

(3) モデルの推定結果

モデルの推定は全て2005年の全国幹線旅客純流動調査から必要なデータを抽出して行った。

a) 選別行動モデル

選別行動モデルを、往復の年間旅客数が5000人以上の194地域間ODペアを対象に、500人以上使用されている経路を判別するように推定した結果を表1に示す。これより、頻度の少ない経路、OD距離に対して所要時間が長い経路が選別により除外されるが、 t 値の大小関係から頻度の影響力がより強いことが分かる。また、尤度比は0.201であり、一般的なロジットモデル等の適合

度の基準から見ると十分なレベルである。

表1 選別行動モデルの推定結果

	推定値		t値	
	所要時間/距離	\bar{Z} 1.62	$\bar{\omega}$ -1.13	6.71
頻度	\bar{Z} 11.7	$\bar{\omega}$ 0.234	49.0	37.8
	尤度比	0.201		
対象OD数	4049			
対象経路数	30428			

b) 選択行動モデル

選択行動モデルは選別行動モデルと同じODデータをさらに旅行目的と距離帯で分割した上で、方向別に別のデータと見なして推定した。その結果を表2、表3に示す。距離帯の違いや目的の違いによらず、直観と合致した符号のパラメータ推定値が得られ、尤度も大きい。

表2 選択行動モデルの推定結果 (仕事目的)

	500km~1000km		1000km以上	
	推定値	t値	推定値	t値
所要時間(ラインホール)	-0.0302	-2899.8	-0.0258	-2021.8
アクセス・イグレス時間	-0.0140	-1334.6	-0.00839	-385.2
運賃	-0.000109	-1006.8	-0.000235	-999.0
頻度	0.0344	1257.1	0.00979	180.3
尤度比	0.460		0.754	
対象OD数	1030		460	
対象経路数	2109		913	

表3 選択行動モデルの推定結果 (観光, 私有・帰省目的)

	500km~1000km		1000km以上	
	推定値	t値	推定値	t値
所要時間(ラインホール)	-0.0162	-1391.7	-0.0152	-1583.0
アクセス・イグレス時間	-0.00684	-452.5	-0.00674	-413.9
運賃	-0.000129	-729.9	-0.000170	-700.2
頻度	0.0333	719.8	0.00662	120.0
尤度比	0.342		0.443	
対象OD数	1030		460	
対象経路数	1796		880	

c) 頻度調整モデル

頻度調整モデルは、都道府県間の断面に着目して最小二乗法により推定した。結果を表4に示す。どの交通機関においても旅客数が多いほど頻度は高くなるという結果が得られた。新幹線と新幹線を除く鉄道の決定係数は列車の編成車両の違いなどを考慮していないことが影響し0.122, 0.077と低い。しかし、反復計算で強い影響を持つ航空リンクの決定係数は0.870と高かったため、表4の結果を用いて計算を行うこととする。

表4 頻度調整モデルの推定結果

	航空		鉄道(新幹線)		鉄道(その他)	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
定数項	2.34	12.4	27.0	3.87	17.5	3.54
旅客数	5.34E-06	33.2	2.90E-07	1.90	3.15E-06	2.10
決定係数	0.870		0.122		0.077	
対象路線数	167		28		55	

d) 経路頻度推定モデル

経路頻度推定モデルは頻度調整モデルと同様のデータを用いて最小二乗法により推定した。その結果を表5に示す。モデルの決定係数が0.957, 0.909, 0.870と高く、モデルの当てはまりは良いことが分かる。

表5 経路頻度モデルの推定結果

	航空1路線		航空2路線		鉄道	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
定数項	0		0.0		-0.185	-14.9
平均最小頻度	0.727	839	0.6	764	1.12	263
経路距離	1.55E-04	-21.8	-7.32E-05	-31.9	-7.70E-04	-144
決定係数	0.957		0.909		0.870	
対象経路数	55296		113403		17399	

(4) 相互作用の反復計算手順

前述のモデルを利用し、旅客行動と事業者行動の相互作用を以下の手順で計算する。

- step1. 初期経路頻度の計算
各リンクの2005年時点の頻度に基づき経路頻度モデルから初期経路頻度を計算する。
- step2. 利用する可能性のある経路の選別
各経路の頻度を用い、選別行動モデルを適用し選別確率が0.10以上の経路を選別する。
- step3. 旅客の経路選択
選別行動で残った経路に対して、選択行動モデルを適用して仕事目的と観光、私用・帰省目的に経路の選択確率を求める。それらに旅行目的別OD旅客数をかけ、集計して経路旅客数を算出す
- step4. リンク旅客数の計算
経路旅客数を各リンクに割り振り、リンク旅客数を算出する。
- step5. 事業者の頻度調整行動
リンクの旅客数を頻度調整モデルに適用して求めた頻度を用いて、その1/2だけリンクの頻度を調整する。
- step6. 収束判定
以上のstep2からstep5までを繰り返す。頻度の更新量が全てのリンクについて0.001以下となった場合に収束と見なして反復計算を終了する。

4. 中央リニア整備の影響分析

(1) 分析の手順

中央リニアは2027年に東京一名古屋間が、2045年に名古屋ー大阪間が開業する。本章では、前述の相互作用モデルを使用してこの2つの整備段階において都市間交通サービスネットワークがどのように変化するかを主要都市間のOD交通に着目して分析する。対象とするODは北海道4地域と沖縄以外の都府県の49地域間のODであり、頻度の反復計算は都道府県間を跨ぐリンクについて行う。(a)中央リニアが整備される前の整備新幹線の開業を考えたネットワーク、(b)東京一名古屋間開業時のネットワーク、(c)東京ー大阪間で全線開業時のネットワークの3者に対して反復計算を行い、リンクの頻度の差異を求める。

整備新幹線の頻度の初期値は2005年時点の新幹線リンクの平均値を代入した。中央リニアの運賃は現在の東海道新幹線の運賃から+1,000円となるよう設定し、頻度は品川,名古屋,新大阪のみに停車する特急運行を100(本/日)とし、1県に1個ずつの各駅に停車する運行は30(本/日)として、繰り返し計算の中では更新せずに固定値として扱うこととした。

(2) 東京一名古屋間の部分開業の影響

東京一名古屋間の中央リニア部分開業の影響を見るため、(b)での反復計算による頻度と(a)での反復計算による頻度の差を見る。航空リンクを図1に、鉄道リンクを図2に示す。

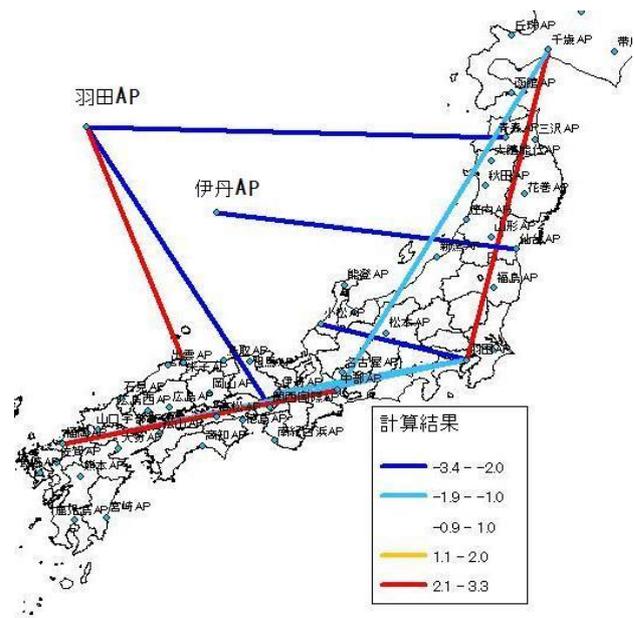


図1 東京一名古屋間の開業の影響 (航空リンク)

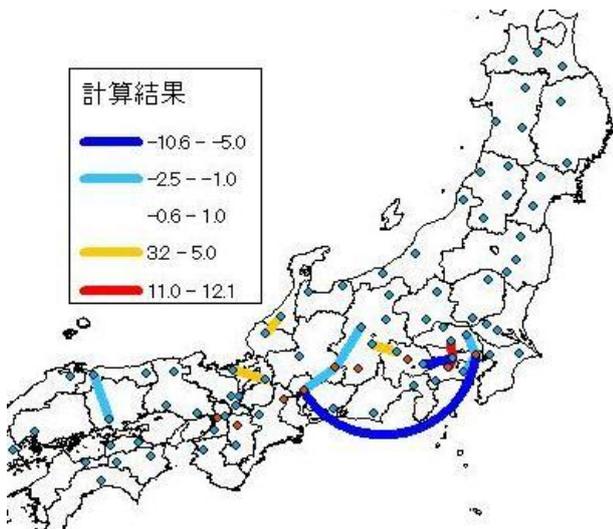


図2 東京—名古屋間の開業の影響（鉄道リンク）

図1より、千歳—羽田便の頻度が増加し千歳—中部便が減少していることから、北海道—中部間の移動が、航空リンク1本を利用する経路から羽田便とリニアを乗り換える経路に変化することが分かる。中部—福岡便の増加と羽田—福岡便の減少から、同様にリニアを乗り継ぐ経路へと変化することが分かる。また、羽田—小松便の減少と図2の敦賀—米原、金沢—福井間の鉄道頻度の増加から、関東—北陸間の移動が、航空を利用する直行経路からリニアと鉄道を名古屋で乗り継ぐ経路に変化することが分かる。さらに羽田—伊丹便、羽田—関西国際便が減少していることから、関東—関西圏でもリニアと鉄道を乗り継ぐ経路が多く利用されることが分かる。

図2から、東京—名古屋間を結ぶ東海道新幹線の「のぞみ」のリンクの頻度が最も大きく低下する一方で、「ひかり」や「こだま」のリンクでは頻度の変化は見られない。この結果は、現在JR東海が発表している、東海道新幹線から「のぞみ」の本数を減らし、「ひかり」と「こだま」による運用体系に変更するという方針が合理的であることを示している。また、中央リニアと完全に平行する八王子—大月、松本—多治見、多治見—名古屋の在来線特急リンク頻度が減少する。

(3) 名古屋—大阪間の開業の影響

中央リニアの名古屋—大阪間の延伸の影響を調べるため、(c)の反復計算による頻度と(b)の反復計算による頻度の差を計算した航空リンクを図3に、鉄道リンクを図4に示す。

図3より羽田と伊丹・関西空港の間の便のほか、羽田と中国・四国を結ぶ航空便の頻度が軒並み下がっている。図4の中国・四国地方における鉄道リンクの頻度が増加していることから、関東と中国・四国間の移動におい

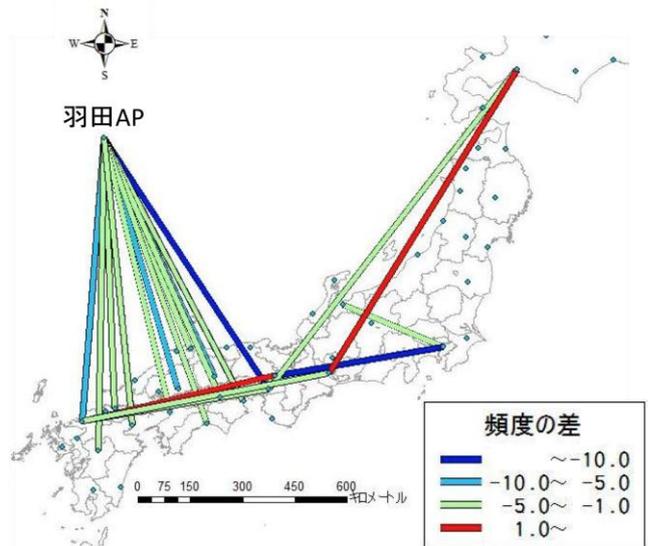


図3 名古屋—大阪間の開業の影響（航空リンク）

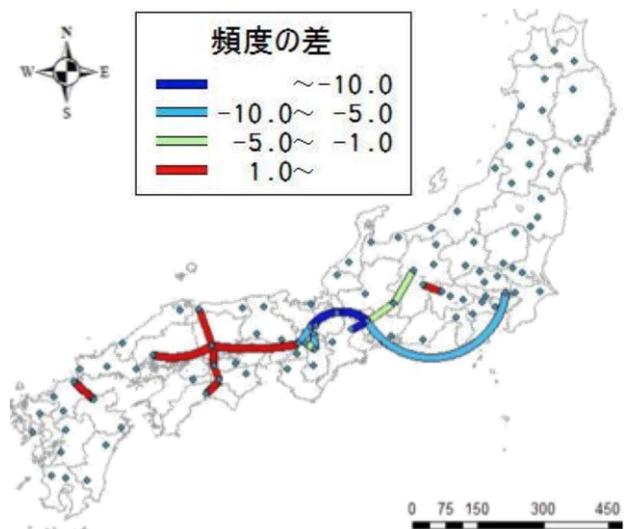


図4 名古屋—大阪間の開業の影響（鉄道リンク）

て航空路線を利用する直行経路から鉄道と中央リニアを乗り継ぐ経路に変化することが分かる。羽田—福岡便と羽田—熊本便が減少し、伊丹—福岡便が増加して、図4で小倉—中津の鉄道の頻度が増加していることから、関東と九州との間の移動航空路線を利用する直行経路から、航空路線とリニアを利用する経路へと変わり、その航空路線が伊丹—福岡便に集約されたことが読み取れる。また、東京—名古屋間開業段階で頻度が減少した千歳—中部便の頻度が反転して増加している。図4の中央リニアの沿線地域に着目すると、在来鉄道リンクの頻度の減少が進んでいるが、蕨崎—上諏訪間では大阪以西への旅客がリニア経由に転換して頻度が上昇する。さらに東海道新幹線では「のぞみ」リンクの頻度が低下する一方で、「ひかり」や「こだま」にあたるリンクでは頻度の変化は見られなかった。つまり、中央リニアと東海道新幹線

の「ひかり」, 「こだま」は競合関係にはないことが確認できた。

5. おわりに

本研究では, 中央リニアのような超高速リンクが整備されたことを契機とした都市間交通サービスネットワークの変化の構造について, 旅客行動と事業者行動間に作用するポジティブ・フィードバックと都市間交通サービスネットワークの複雑さを考慮した分析を行う方法を提案し, 中央リニアが東京-名古屋間で開業する段階と東京-大阪間で全線開業する段階における各リンクの頻度の分析を行った。

その結果, 中央リニアの整備は東京-大阪に近い地域のみならず, 北海道から九州までの全国的な都市間交通サービスネットワークに影響をもたらすことが分かった。

今後の課題として 3 章のモデルの精度の向上のほか, 反復計算の解の一意性に対する検討, 人口や産業の立地変化に伴う OD 交通量変化の内生化などが挙げられる。

謝辞: 本論文は, 平成21年度~24年度日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)「国土交通マネジメントのための都市間交通分析方法論の確立」の成果の一部である。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木村裕介・奥村誠(2009): 都市間旅客の利用可能経路とその選択に関する研究, 土木計画学研究・講演集, vol.39, no.352.
- 2) 福田大輔, 森地茂: 選択枝の選別過程に関する実証比較分析: 交通手段選択行動を対象として, 土木計画学研究・論文集, vol.19, No.3, pp.375-381, 2002
- 3) 加藤直樹, 茨木俊秀, 三根久: 無向グラフの第 K 最短単純路を求める $O(Kn^2)$ アルゴリズム, 電子通信学会論文誌, Vol.J61-A, No.12, pp.1199-1206, 1978.
- 4) 栢元淳平: 都道府県間総流動データに基づく純流動量の推定方法, 広島大学修士論文, 2003.

(2011.5.6受付)

SIMULATION OF A STRUCTURAL CHANGE OF INTER-CITY TRANSPORTATION SERVICE NETWORK AFTER THE DEVELOPMENT OF NEW HIGH-SPEED SERVICE LINKS

Makoto OKUMURA, Kazuaki OKUBO, Sho ISHIYAMA and Titom HUSEYIN

We have to know the influences of adding new super high-speed links like Chūō MAGLEV, in order to sustain inter-city transportation service in the decreasing trend of demand after now. This paper analyzes the influences of adding Chūō MAGLEV through the positive feedback between passengers and transportation operators. We focus on the changes of sustainable frequency of each link, altered by the Chūō MAGLEV. The result of simulations shows that Chūō MAGLEV has positive and negative effects not only along the line but other lines nationwide.