

需要予測に基づいたアメリカにおける 磁気浮上式鉄道の路線案の検討

三浦 英俊, 鳥海 重喜

米国における将来の磁気浮上式鉄道の需要予測を試みる。はじめに交通流動調査データから米国の長距離交通について概観する。続いて旅行者の交通機関選択をロジットモデルによって記述して磁気浮上式鉄道の需要予測を行う枠組みを作成する。需要予測にあたっては磁気浮上式鉄道に与えるロジットモデルパラメータが問題となる。なぜなら磁気浮上式鉄道は2010年現在中国上海において唯一営業運転されているのみであり、米国における将来の磁気浮上式鉄道のパラメータを既存のデータから直接推定することは困難だからである。本稿では幅を持った値としてパラメータを与える。

キーワード：磁気浮上式鉄道，リニアモーターカー，ロジットモデル，需要予測

1. はじめに

地球温暖化への世界的な関心の高まりと2008年に始まった原油価格高騰は、アメリカの交通機関が石油エネルギーからの脱却をはかるきっかけを与えたようだ。2009年4月にアメリカ政府は米国の主要都市間を結ぶ将来の高速鉄道網計画を発表した[5]。この計画は経済対策であると同時に自動車と航空に大きく依存するアメリカ交通の再編成をねらっている。

ただしアメリカの高速鉄道への取り組みはこのときから始まったものではない。すでに1998年には磁気浮上式鉄道開発計画 (Maglev Deployment Program) が決定されており、現在まで次の7つのプロジェクトが進められている (図1)[3][4]。

- ボルティモア-ワシントン
- ペンシルベニア
- アトランタ-チャタヌーガ
- カリフォルニア-ラスベガス
- ロサンゼルス近郊 (ロサンゼルス-オンタリオ空港)
- ロサンゼルス近郊 (サンタクラリタ-アーバイン)

● サンディエゴ

プロジェクトのうちいくつかは路線案や停車駅の提案、需要予測なども行われており、ウェブサイトで見ることができる。2009年発表の高速鉄道網計画にはこれらも一部含まれており、将来のアメリカの高速鉄道はフランス TGV やわが国の新幹線を含む従来型鉄道だけでなく、磁気浮上式鉄道も視野に入れている。

磁気浮上式鉄道 (リニアモーターカー, Magnetic levitation, Maglev と略される) は、国内では JR 東海が東京-名古屋間に2025年開業を目指していることで注目されている時速 500 km 超が可能な高速公共交通機関である。

しかしながら現在のアメリカでは旅客輸送における鉄道の役割は日本では考えられないほど小さい。1995年に実施されたアメリカの地域間交通流動調査 American Travel Survey によれば、75 マイル (およ

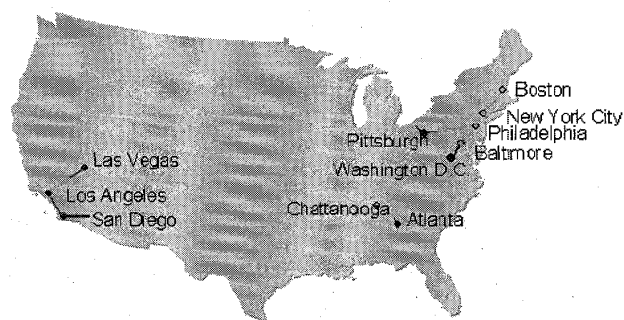


図1 アメリカにおける磁気浮上式鉄道構想 (文献[3]より引用)

みうら ひでとし

明海大学 不動産学部

〒279-8550 浦安市明海1-2

とりうみ しげき

中央大学 理工学部

〒112-8551 文京区春日1-13-27

そ 120 km) を上回るような長距離の移動における鉄道の分担率は1%に満たない。長距離移動において鉄道シェアが17%程度ある日本とは交通体系が大きく異なる。また、American Travel Survey は長距離移動だけを対象としており、標本抽出率は全世帯の0.1%程度に過ぎない。これらの理由から将来の高速鉄道や磁気浮上式鉄道がどのくらいの利用者を獲得できるのか、適切な予測を行うことは容易ではない。

本稿では American Travel Survey に基づいてアメリカの旅行者の交通機関選択について概観し、それらをロジットモデルによって記述する。このロジットモデルに将来の磁気浮上式鉄道を追加すれば将来の需要を予測する枠組みとなるが、それは先に述べた理由によって精緻な予測が可能なモデルではない。ここでは磁気浮上式鉄道のロジットモデルパラメータとして複数の値を設定し、パラメータの値にかかわらず利用者数が多数獲得できる路線案を探索する。このときの路線案は終着駅となる2都市のみを与えることとして途中駅は考慮しない。なるべく多くの利用者を獲得するためにはどの2都市を磁気浮上式鉄道で結べばよいか？ この問題であればいくつかの路線案を提示することが可能である。

2. 使用するデータ

2.1 American Travel Survey

アメリカの都市間交通流動調査 American Travel Survey は日本における全国幹線旅客純流動調査に相当する[1][2]。1995年以降に新しい調査は実施されていないため、2010年現在アメリカの長距離交通の詳細を知ることのできる最新の調査である。

調査対象世帯は8万世帯(抽出率は全世帯の0.1%。約20万人が対象)で、1年間の世帯構成員全員の全トリップを調査する。世帯全員の75マイル(およそ120 km)を超える1年間の全トリップが調査対象となる。調査は四半期ごとに電話調査によって実施される。目的地や使用した交通機関だけでなく所得、年齢、人種など世帯や個人の属性データも収集される。

この調査では個人単位の旅行の詳細が分かるパーソントリップデータも提供される。1995年のパーソントリップデータには140,720件のデータが収められている。それぞれのデータには、出発地、目的地、旅行目的、利用交通機関が記載されている。本稿では出発地および目的地が州名しか判明しないデータは除外し、出発地目的地の州名と都市名がともに明示された

表1 日米の代表交通機関*の分担率

	航空	鉄道	バス	乗用車	その他
米国	28.8%	1.0%	2.4%	66.4%	1.4%
日本	5.5%	17.2%	2.1%	74.7%	0.5%

*代表交通機関とは、1つのトリップで複数種類の交通機関を使用したとき、最も主要な交通機関のことを指す。

129,136 データを使う。年間交通総量を推定するための重みが含まれているので、これをトリップごとに掛けて1年間の都市間 OD 推定データを得る。

表1は日米の代表交通機関分担率の比較である。日本のデータは2005年に実施された第4回全国幹線旅客純流動調査による[6]。アメリカでは短距離については乗用車、長距離になると航空を選択する旅行者が多く、300 km程度の旅行で鉄道が大きな役割を果たす日本とは異なっている。

なお1トリップあたりの起点から終点までの平均距離は、アラスカおよびハワイなど島嶼部を端点とするトリップを除外して720 kmであった。日本は150 kmである。この差は国土の面積の違いだけでなく、アメリカの調査が75マイル以上の移動を対象としているのに対して、日本は「都道府県間にまたがる通勤・通学を除いた移動」を調査対象としていることが一因となっている。120 km以上のトリップだけを対象として日本のトリップ平均長を計算し直すと、アメリカの半分程度である333 kmとなった。

2.2 航空データ

アメリカ合衆国内の航空定期便運行データとして米国運輸省 Bureau of Transportation Statistics が提供する2009年5月の Market Airline Traffic Data を使った。アメリカの国内航空路線別に乗客が利用した人数を集計したものであり、旅行者が利用可能な航空路線を知ることができる。

2.3 鉄道データ

アメリカの鉄道は線路などインフラ設備を保有する企業と車両保有および運行を行う企業が異なる「上下分離方式」となっている。長距離列車は公共企業体アムトラックによって運転されており、2009年8月現在33種類の列車がある。路線の多くは1日1便の運行であり、なかには週に3便しかないものがあるなど運行頻度は日本に比べると少ないが、アムトラックは長距離の移動を可能とするほとんど唯一の鉄道会社であって、分析において無視することはできない。分析ではこれらの路線および停車駅データを使う。

3. アメリカの都市間移動における鉄道の利用

American Travel Surveyによると、旅行者が鉄道を選択した割合が50%を超える都市ペアは43ペアであり、都市ペア数全体の0.3%にあたる。それらのうち鉄道利用旅行者数が最大なのはワシントン-ニューヨーク間の年間あたり24.7万人、1日にならずと680人である。両都市間の距離はおおよそ300kmであるから東京と名古屋と同じくらい離れている。全体に占める鉄道の分担率は12%である。

アメリカ全体の鉄道利用者数は年間374万人。これは東海道新幹線（東京-大阪）の2009年の利用者数1億4,900万人の2.5%に相当する。

磁気浮上式鉄道は高速で快適な公共交通機関として従来の鉄道と航空の中間に位置することが期待され、これまでの航空の役割をかなり奪い取るに違いない。しかしアメリカでは鉄道のシェアは日本のみならずヨーロッパ諸国と比べてもかなり低い。それゆえアメリカにおいて将来の磁気浮上式鉄道が、その性能に見合うだけの利用者を十分に獲得できるのかどうか、注意深く予測しなければならない。

4. ロジットモデル

ロジットモデルを使用して、アメリカ国内旅行者の航空、鉄道、バス、乗用車の交通機関選択を記述する。この節で述べるモデルは文献[7]の枠組みを利用する。

都市*i*から都市*j*へ移動する利用者は、代表交通機関として航空、鉄道、バス、乗用車、その他の交通機関のいずれかをロジットモデルに従って選択すると仮定する。目的地までの距離（大圏距離）と交通機関の利用のしやすさを表す出発地から駅・空港までのアクセス距離および駅・空港から目的地までのイグレス距離を使用して交通機関選択確率を推定する。記号を以下のように定める（図2）。

- d_{ij} : 地域*i*の代表点から地域*j*の代表点への大圏距離。単位はキロメートル。
- a_{ij} : 航空を利用する場合には、地域*i*および*j*の代表点から空港までのアクセス・イグレス距離合計が最小となり、かつ定期便がある空港ペアを使うと仮定する。定期便がある空港ペアのうち、地域*i*および*j*の代表点からのアクセス・イグレス距離合計が最小となる空港ペアを取り出す。このときのアクセス・イグレス距離

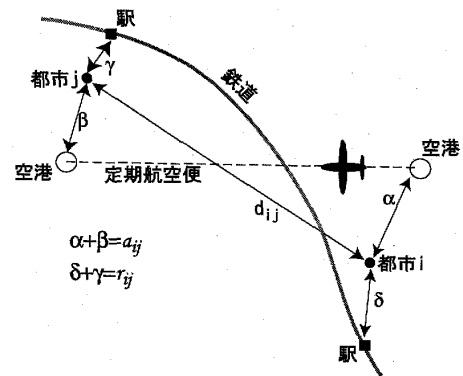


図2 記号説明図

合計を a_{ij} とする。単位はキロメートル。

- r_{ij} : 地域*i*の代表点から最も近い鉄道駅までのアクセス距離と地域*j*の代表点から最も近い鉄道駅までのイグレス距離。単位はキロメートル。

- Q_{ij} : 地域*i*から地域*j*への旅行者総数。

地域*i*から地域*j*へ移動する旅行者が交通機関*k* ($k=1$:航空, 2 :鉄道, 3 :幹線バス, 4 :乗用車, 9 :その他)を選択する確率を p_{ijk} と置く。これらは次のような構造を持っているものとする。

$$p_{ijk} = \frac{e^{V_{ijk}}}{e^{V_{ij1}} + \dots + e^{V_{ij4}} + e^{V_{ij9}}} \quad (1)$$

V_{ijk} は交通機関*k*を選択して地域*i*から*j*へ旅行する旅行者の効用を示すものであり、交通機関別に以下のように与える。 θ_{kl} はパラメータである。 k は交通機関、 l は 1 : 定数項, 2 : 距離, 3 : アクセス/イグレス距離を表す。

$$V_{ij1}(\text{航空}) = \theta_{11} + \theta_{12}d_{ij} + \theta_{13}a_{ij}, \quad (2)$$

$$V_{ij2}(\text{鉄道}) = \theta_{21} + \theta_{22}d_{ij} + \theta_{23}r_{ij}, \quad (3)$$

$$V_{ij3}(\text{幹線バス}) = \theta_{31} + \theta_{32}d_{ij}, \quad (4)$$

$$V_{ij4}(\text{乗用車}) = \theta_{41} + \theta_{42}d_{ij}, \quad (5)$$

$$V_{ij9}(\text{その他}) = \theta_{91} + \theta_{92}d_{ij}, \quad (6)$$

代表点間距離 d_{ij} は利用交通機関の料金および利用時間の代替として使用し、交通機関ごとに異なるパラメータ θ_{k2} を与える。 $Q_{ij}p_{ijk}$ は地域*ij*間を交通機関*k*を利用する移動人数推定値を与える。このモデル設定の特徴は選択可能な経路や路線を列挙したのちにそれぞれに設定するのではなく、交通機関ごとに1つしか与えないことである。いわゆる「赤バス青バス問題」として例示される IIA (independence from irrelevant alternatives) 特性を回避し、かつロジットモデルの構造を単純にするためのものである。

5. ロジットモデル推定結果

ロジットモデルパラメータは、定数項パラメータ θ_{k1} のいずれかを固定しても一般性を失うことがないことを利用し、航空の定数項 $\theta_{11}=0$ と固定する。最尤推定法によってパラメータを推定した(表2)。定数項 θ_{k1} は乗用車が最も高く、その他を除けば鉄道が最も低い。表1に示した交通機関別の分担率と同じ順序である。目的地までの距離のパラメータ θ_{k2} は利用距離が長い航空や鉄道は高く、幹線バスや乗用車は低い。アクセス/イグレスに関するパラメータ θ_{k3} は航空よりも鉄道が低い。日本のデータで推定した場合は鉄道のほうが値が高かった。このとき鉄道駅は空港に

表2 パラメータ θ_{kl} 推定値

$k \setminus l$	1(定数)	2(目的地までの距離)	3(アクセス/イグレス)
1(航空)	0(固定)	0.00404	-0.0108
2(鉄道)	-1.67	0.00218	-0.0211
3(幹線バス)	-0.98	0.00149	
4(乗用車)	2.29	0.00161	
9(その他)	-2.25	0.00294	

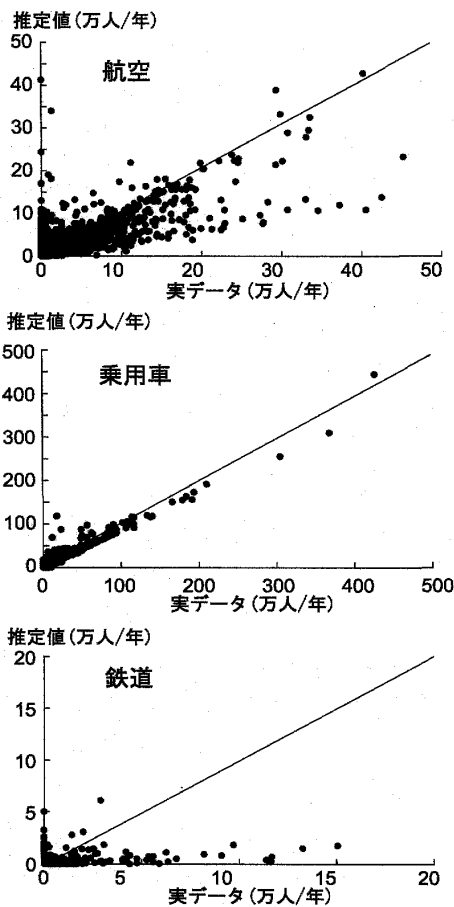


図3 実データと推定値の散布図(図中の直線は実データ=推定値を示す)

おける手続きなどに必要な時間が不要で他の交通機関からの乗り換えが航空よりも容易であることを反映したものであると解釈したが、アメリカでは日本と異なり空港における手続きが鉄道よりも容易なのであろう。

図3は横軸に2都市間旅行者数実データ、縦軸にロジットモデルによる推定値 $Q_{ij}p_{ijk}$ を与えて、航空と乗用車および鉄道の推定精度を散布図として比較したものである。航空と乗用車は比較的あてはまりがよい。鉄道は実データの傾向をほとんど再現できていない。ここに省略したバスとその他についても同様である。ただし交通機関別の年間利用者推定人数合計 $\sum_{ij} Q_{ij}p_{ijk}$ は、すべての交通機関について実データの値を0.1%未満の誤差率で再現できた。

6. 利用者数が最大となる磁気浮上式鉄道の建設位置

東京-大阪間に計画されているリニア中央新幹線の需要予測を試みた文献[7]では、磁気浮上式鉄道が鉄道と同程度のアクセス利便性があり、航空と同程度の魅力を持った乗り物になることを仮定して、鉄道と航空のロジットモデルパラメータを利用して将来の磁気浮上式鉄道のパラメータを推定した。モデルに使用するすべての交通機関のパラメータ推定値の信頼性が高く、利用交通機関別の旅行者数がロジットモデルによって精度良く再現できたことを根拠としていた。しかしアメリカでは航空と乗用車を除いては実データの再現性が低いため、同じやり方で磁気浮上式鉄道のパラメータを与えたとしても得られる結果に信頼を置くことはためらわれる。そこで磁気浮上式鉄道のパラメータを固定することなく、その他を含む5種類の交通機関のパラメータの推定値の上限と下限を範囲として複数の値を与える。

磁気浮上式鉄道を利用する旅行者の効用 V_{ij5} を次のように与える。

$$V_{ij5} = \theta_{51} + \theta_{52}d_{ij} + \theta_{53}m_{ij}. \quad (7)$$

磁気浮上式鉄道を含めた交通機関の選択確率 P_{ijk} は

$$P_{ijk} = \frac{e^{V_{ijk}}}{e^{V_{ij1}} + \dots + e^{V_{ij4}} + e^{V_{ij5}} + e^{V_{ij9}}}, \quad (8)$$

とする。磁気浮上式鉄道は従来の鉄道と同様に駅を経由して利用されるから、それに伴うアクセス/イグレス距離が旅行者の効用を左右すると仮定する。 m_{ij} は地域 i の代表点から最も近い磁気浮上式鉄道駅までの大圏距離と地域 j の代表点から最も近い磁気浮上式鉄道駅までの大圏距離である。単位はキロメートルとす

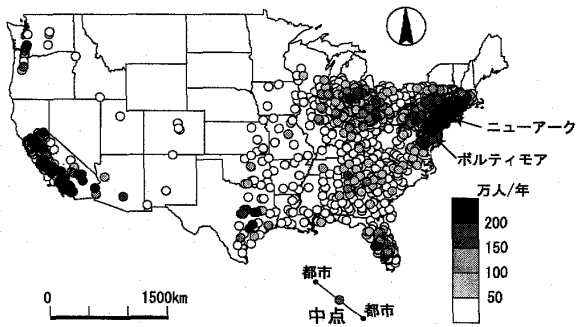


図4 $\theta_{51}=2.29$, $\theta_{52}=0.00149$, $\theta_{53}=-0.0211$, $l_{max}=500$ km のときの路線別推定利用者人数 (都市ペアの中点を図示した)

る。言うまでもなく $Q_{ij}P_{ijk}$ は地域 i から j へ交通機関 k を利用して移動した人数となる。

θ_{51} , θ_{52} , θ_{53} は表2の θ_1 , θ_2 , θ_3 の上限下限を参考にして次の範囲内の値として与える。

$$-2.5 \leq \theta_{51} \leq 2.5 \quad (9)$$

$$0.001 \leq \theta_{52} \leq 0.005 \quad (10)$$

$$-0.025 \leq \theta_{53} \leq -0.005 \quad (11)$$

American Travel Survey のトリップデータ端点である162都市を終着駅の候補として、途中駅のない磁気浮上式鉄道の路線計画案を作る。路線長の上限を l_{max} とする。任意のパラメータセットと路線長上限 l_{max} に対して、最も利用者数の多い磁気浮上式鉄道路線計画案すなわち都市の集合を探索する。

例えば $\theta_{51}=2.29$, $\theta_{52}=0.00149$, $\theta_{53}=-0.0211$ とすれば、それは定数項パラメータは乗用車、目的地までの距離のパラメータは幹線バス、アクセス/イグレスパラメータは鉄道にそれぞれ相当するパラメータを与えたことになる。ここで $l_{max}=500$ km としたとき1,703の都市ペアが路線案として得られる。図4は1,703の都市ペアを結んだ線分の中点を利用者予測数別に表したものである。北東部と南西部の路線案が利用者を多く獲得できることが示されている。このとき最も利用者の多い路線案はニューアーク-ボルティモアとなる。この計算だけでここに磁気浮上式を作ることが妥当であるとはいえない。しかし他のパラメータの組合せの場合にも両都市間を結ぶ路線の利用者が最も多いという結果が幾たびも出たならば、この案は建設計画の候補になりうるだろう。

7. 利用者数が最大となる磁気浮上式鉄道の建設位置の探索

θ_{51} を間隔0.5, θ_{52} を間隔0.001, θ_{53} を間隔0.005

表3 駅数2, 路線長上限500 km のときの利用者数最大となる路線案

路線	出現回数	路線長 (km)
1 ニューアーク-ボルティモア	30	262
2 ニューヨーク-ワシントン	21	332
3 ニューアーク-ワシントン	17	318
4 ジャージシティー-ワシントン	1	323
5 ロサンゼルス-ラスベガス	114	361
6 ロサンゼルス-サンノゼ	37	489
7 ロサンゼルス-サンディエゴ	55	179
合計	275	

表4 駅数2, 路線長上限1,000 km のときの利用者数最大となる路線案

路線	出現回数	路線長 (km)
ニューアーク-ボルティモア	26	262
ニューアーク-ワシントン	16	318
ニューヨーク-ワシントン	15	332
ニューアーク-デイトン	3	858
ミドルセックス-デイトン	1	829
ジャージシティー-ワシントン	1	323
ミドルセックス (NJ)*-トレド	1	769
ロサンゼルス-ラスベガス	95	361
ロサンゼルス-オークランド	59	547
ロサンゼルス-サンディエゴ	55	179
ロサンゼルス-サンフランシスコ	3	559
合計	275	

*ニュージャージー州ミドルセックス

にそれぞれ変化させる。合計 $11 \times 5 \times 5 = 275$ 通りのパラメータセット別に利用者数が最大となる磁気浮上式鉄道路線の終着駅都市ペアを列挙する。

最初に路線長上限 $l_{max}=500$ km とする。表3は275のパラメータセットごとに年間利用者数が最大となった路線計画案の出現回数と路線長を示す。7つの路線案のうち1から4は東海岸にある。ニューアーク、ニューアーク、ジャージシティーのいずれかと南側の都市としてボルティモアまたはワシントンを結ぶ路線案となっている。これらのうちニューアーク-ボルティモアが最も出現回数が多い。そのほかの3つはすべて西海岸都市ロサンゼルスを終着駅とした路線である。7つの案の中でロサンゼルス-ラスベガス路線の出現回数が最も多い。この路線について275組のパラメータセットによる年間利用者数予測を見ると、最小は4万人、最大は2,300万人、算術平均は260万人、中央値は120万人であった。

表4は路線長の上限 l_{max} を1,000 km に延ばしたときの結果である。東海岸地域ではトレド、デイトンとニュージャージー州ミドルセックスが出現した。ただしそれぞれ出現回数は3回以下にすぎない。上限500 km の時に最も出現回数の多かったニューアーク-ボルティモアの出現回数が最も多いことには変わりはない。

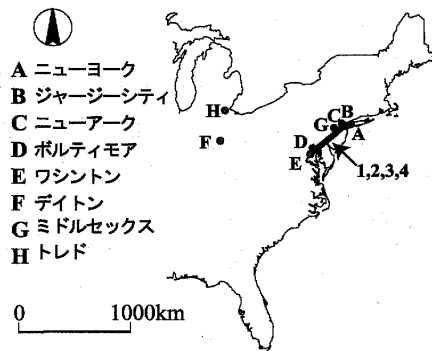


図5 駅数2, 路線長上限500 kmのときの路線案(東海岸, 図中の番号は表3の路線案に対応する)

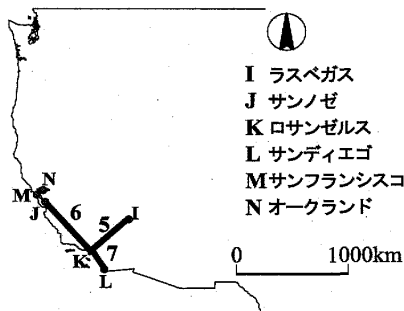


図6 駅数2, 路線長上限500 kmのときの路線案(西海岸, 図中の番号は表3の路線案に対応する)

ニューヨーク-ワシントン, ニューアーク-ワシントンも同様に現れている。

これらの分析から, 東海岸ではニューヨークもしくはニューアークを終着駅として固定し, もう一方の終着駅を適切に選択すればよいことが分かった。西海岸では $l_{\max}=1,000$ km とすると 500 km の場合のサンノゼを終着駅とする案は消滅し, 代わりにオークランドまたはサンフランシスコまで建設する路線案が出現した。

8. おわりに

本研究ではロジットモデルを使用してアメリカの磁気浮上式鉄道路線案について検討した。磁気浮上式鉄道にさまざまなロジットモデルパラメータの組合せを与えて最も利用者の多い路線案を探索し, ニューアーク-ボルティモアやロサンゼルス-ラスベガスなどいくつかの路線案を提示した。ここで検討したいずれも路

線案は1節で紹介した1998年の磁気浮上式鉄道開発計画, あるいは2009年発表の計画と重なるものである。

使用したデータ American Travel Survey は1995年とかなり前のものであり, 長距離移動に限定したデータであること, さらに標本の数が必ずしも多くないなどいくつかの問題はあるが, アメリカ全土を統一したデータで比較検討することによって客観的な路線候補を提示することができた。

利用者数の予測には幅があることを念頭に置きつつ, そのうえで実行可能なプロジェクトとして磁気浮上式鉄道の建設と運行が可能な路線位置についてより詳しく見ていくことが今後の課題である。

参考文献

- [1] Bureau of Transportation Statistics, <http://www.transtats.bts.gov/>, 2010年3月アクセス。
- [2] Bureau of Transportation Statistics, Research and Innovative Technology Administration, 1995 American Travel Survey United States Profile, 1995, 2010年3月アクセス。
- [3] R. Budell and W. Buss, Transrapid Maglev Projects in the U. S. A., Proceeding of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Dresden, Germany, <http://www.maglev2006.de/Topic1.htm>, 2010年3月アクセス。
- [4] US Maglev Coalition, <http://www.usmaglevcoalition.com/>, 2010年3月アクセス。
- [5] The White House, President Obama, Vice President Biden, Secretary LaHood Call for U. S. High-Speed Passenger Trains, http://www.whitehouse.gov/the_press_office/President-Obama-Vice-President-Biden-Secretary-LaHood-Call-for-US-High-Speed-Passenger-Trains/, 2009年4月16日発表, 2010年3月アクセス。
- [6] 国土交通省, 全国幹線旅客流動調査, <http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/index.html>, 2010年3月アクセス。
- [7] 三浦英俊, ロジットモデルを用いたリニア中央新幹線の需要予測, オペレーションズ・リサーチ, 54(7), 419-428, 2009。