

リニア中央新幹線開通後の東海道新幹線の停車駅についての数理的 研究

M2015SS002 神宮司和樹

指導教員：三浦英俊

1 はじめに

2027年に東京と名古屋の間にリニア中央新幹線が開通する予定となっている。リニア中央新幹線が開通すると、東京-名古屋間のはぞみで約90分かかっていた移動時間が約40分で移動可能となるので、これまで直行移動手段としてのぞみを利用していた多くの人が、リニア中央新幹線を利用するようになると思われる。東京-名古屋の直行移動の手段としてのぞみの需要が減ることで、東海道新幹線の輸送力に余裕ができると考えられる。輸送力に余裕ができることを活かし、ひかりやこだまの運転回数や停車回数を増やすことが可能となるだろう。東京-名古屋間のひかりの停車パターンの種類を増やすことで、この区間の地域の利便性を高めることができる。このようにリニア中央新幹線開通後は、ひかりやこだまの運転本数を増やすことでこれまでとは違った東海道新幹線の利便性を生み出すことができるのではないかと考えられている。

本研究では、利用者の短縮時間が最大となる東海道新幹線の停車駅パターンについて研究を進める。

2 鉄道路線モデル

ここでは、過去の研究[1][2]で使用された急行列車の停車駅モデルをもとに新たに整数計画問題として定式化をして、急行駅の停車駅の配置を考える。本研究では東海道新幹線ひかりの停車駅を対象としているが、モデルの説明では一般的な鉄道路線モデルとして、「ひかり」、「こだま」ではなく急行列車、普通列車として説明をする。定式化をするモデルは、1路線に複数種類の急行列車が走っていて乗り換えをしないときのモデル、乗り換えを考慮したときのモデルの2種類である。本研究で考慮する乗り換えは、急行列車から普通列車と普通列車から急行列車の乗り換えのみを考慮することとし、急行列車から急行列車の乗り換えはしないものとする。

2.1 鉄道モデルの仮定

鉄道モデルに以下のような仮定をする。

- すべての駅に停車する普通列車がある。
- 急行・普通間の乗り換えはしない。
- 急行列車は、両端の駅1と駅Nに必ず停車し、中間駅 $2, \dots, N-1$ のうち k 駅を選んで停車する。
- 急行列車は、1駅通過するごとに時間 t だけ旅行時間が短縮される。
- 旅行者の待ち時間、乗り換え時間については考慮し

ない。

- 旅行者は旅行時間が最小となる列車の組み合わせを選ぶ。

2.2 記号の定義

$$x_{hk} = \begin{cases} 1 & h \text{ 番目の駅は第 } k \text{ 種類の急行の停車駅} \\ 0 & \text{それ以外の場合} \end{cases}$$
$$a_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{第 } k \text{ 種類の急行を使って駅 } i \text{ から駅 } j \text{ まで移動} \\ 0 & \text{それ以外の場合} \end{cases}$$

t : 1駅通過するときの短縮時間
 K : 急行列車の種類の総数
 N : 駅の総数
 n : 急行駅の停車駅数の上限(下限)
 q_{ij} : 駅 i から j までの移動人数
 S_{ijk} : 第 k 種類の駅 i から駅 j まで急行列車を利用したときの通過駅数

2.3 通過駅数・短縮時間について

急行駅の駅 i から駅 j まで移動するときの短縮時間を下の図1を使って考える。

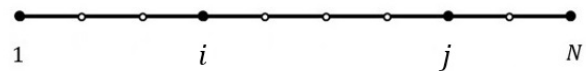


図1 鉄道路線モデル

駅 i と駅 j の間には $j-i-1$ 個の駅が存在する。2駅間の急行列車の停車駅数は、以下のように表すことができる。

$$\text{急行列車の停車駅数} = \sum_{h=0}^j x_{hk} - \sum_{h=0}^i x_{hk} - 1$$

これより、急行駅の駅 i から駅 j まで移動するときの通過駅数は以下ようになる。

$$\text{通過駅数} = \left((j-i-1) - \left(\sum_{h=0}^j x_{hk} - \sum_{h=0}^i x_{hk} - 1 \right) \right)$$

よって、第 k 種類の駅 i から駅 j まで急行列車を利用したときの通過駅数 S_{ijk} は以下のように書くことができる。

$$S_{ijk} = \left((j-i-1) - \left(\sum_{h=0}^j x_{hk} - \sum_{h=0}^i x_{hk} - 1 \right) \right) x_i x_j$$

この通過駅数に1駅通過ごとのときの短縮時間 t をかけることで、急行駅の駅 i から駅 j までの短縮時間を計算することができる。この短縮時間は駅 i 駅と駅 j がともに急行の停車駅となった場合のみ計算され、どちら一方でも急行の停車駅にならない場合は短縮時間は0とならなければならない。

3 整数計画問題の定式化

3.1 乗り換えなし・急行列車が複数種類の場合の定式化

乗り換えなしの場合の短縮時間合計の最大にする急行列車の停車駅を求める整数計画問題の定式化をする。出発駅から目的駅まで移動するのに複数の急行列車を使うことができず、1種類の急行列車しかを使えないとする。急行の種類数の総数 $K = 1$ とすれば1種類、 $K = 2$ とすれば2種類の急行列車が走っているとことを表す。この K を1, 2, 3... と変化させて、以下の整数計画問題を解く。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N t q_{ij} S_{ijk} a_{ijk} \\ \text{s.t.} \quad & S_{ijk} \leq \left((j-i-1) - \left(\sum_{h=0}^j x_h - \sum_{h=0}^i x_h - 1 \right) \right) \\ & S_{ijk} \leq M x_{ik} \\ & S_{ijk} \leq M x_{jk} \quad (M \text{ は十分に大きい数値}) \\ & \sum_{h=1}^N x_{hk} \geq n, \quad \sum_{k=1}^K a_{ijk} \leq 1 \\ & x_{hk} = \{0, 1\}, \quad a_{ijk} = \{0, 1\} \end{aligned}$$

制約式のうち、 a_{ijk} の合計が1以下であるという制約は駅 i から駅 j まで移動は1種類の急行列車しかを使えないという仮定を表している。また、 M を使うことで2.3節の S_{ijk} を線形で表すことができ、 x_{ik} , x_{jk} が両方1のときは S_{ijk} の値は通過駅数になり、どちらかが0になったときは S_{ijk} が0になり計算される短縮時間も0になる。以上により、1つの路線に複数の急行列車が走っているときの急行列車の停車駅の配置を求めることができる。

3.2 乗り換えを考慮した場合の定式化

次に、乗り換えを考慮した場合の急行列車の停車駅配置を求める定式化を考える。こちらも急行列車の種類数の総数 $K = 1$ とすれば、急行列車が1種類の場合のみ計算できるので、急行列車が複数の場合のみ定式化をする。乗り換えは、普通列車から急行列車、急行列車から普通列車のみを考慮する。また、先と同じように、駅 i から駅 j まで移動は複数の急行列車を使わず、1種類の急行列車しかを使えないとする。乗り換えを考慮した場合と前節までの乗り換えを考慮しない場合の移動方法について図1を使って説明をする。図2の駅 l と駅 m を急行列車の停車駅とするとき、駅 i から駅 j までの移動方法について

- ・乗り換えを考慮しない場合： i から j まで普通列車で移動
- ・乗り換えを考慮する場合： i から l まで普通列車、 l から m まで急行列車、 m から j まで普通列車で移動

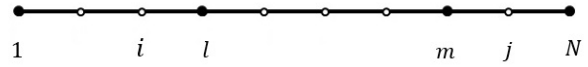


図2 鉄道路線モデル2

前節までの乗り換えなし場合の移動方法は、出発駅と目的駅の両方が急行の停車駅であるときのみ急行を利用し、どちらか一方でも急行の停車駅でないときの移動はすべて普通列車を利用するという移動方法だった。乗り換えを考慮する場合の移動は、出発駅と目的駅の両方が急行列車の停車駅でなくても、出発駅と目的駅の間に急行列車の停車駅が2つ以上あれば急行列車が利用できる範囲は急行列車を利用することができる。乗り換えを考慮すると、前節のような路線全体の短縮時間合計を最大にする定式化は難しいので、急行列車は始発駅である1番目の駅と終着駅である N 番目の駅以外に2つの駅に停車するときの短縮時間合計が最大になるような停車駅を考える。以上の条件と0-1変数 z_{ik} , z_{jk} , w_{lmk} を用いて定式化した式は以下のようである。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N q_{ij} T_{ijk} \\ \text{s.t.} \quad & T_{ijk} = \sum_{i \leq l < m \leq j} t(m-l-1)x_{lk}x_{mk} \\ & T_{ijk} \leq M z_{ik}, \quad T_{ijk} \leq M z_{jk} \\ & T_{ijk} \leq M a_{ijk} \quad (M \text{ は十分に大きい数値}) \\ & z_{ik} \leq 1 - \frac{1}{3} \left(\sum_{h=2}^{i-1} x_{hk} \right), \quad z_{jk} \leq 1 - \frac{1}{3} \left(\sum_{h=j+1}^{N-1} x_{hk} \right) \\ & \sum_{h=2}^{N-1} x_{hk} = 2, \quad \sum_{k=1}^K a_{ijk} \leq 1 \\ & w_{lmk} \leq x_{lk}, \quad w_{lmk} \leq x_{mk} \end{aligned}$$

出発駅を駅 i 、目的駅を駅 j 、急行列車の停車駅を駅 l 、駅 m とすると、急行列車を利用するときは間に駅 i と駅 j の間に駅 l 、駅 m が両方ともあるときである。これを言い換えると、急行列車を利用するときは2番目の駅から駅 $i-1$ までと駅 $j+1$ から $N-1$ 番目の駅までに駅 l 、駅 m が一つもないときであるとなる。2番目から駅 $i-1$ までと駅 $j+1$ から $N-1$ 番目の駅までの急行の停車駅数をそれぞれ計算し、両方が0になったときは z_{ik} , z_{jk} がそれぞれ1になる短縮時間が計算され、どちらか一方でも1以上になった場合は z_{ik} , z_{jk} のどちらかが0になり短縮時間が計算されないような式になっている。

以上、2つのモデル実際の東海道新幹線に当てはめ、短縮時間合計を最大にする東海道新幹線ひかりの停車駅配置を求める。

4 急行列車の通過 1 駅あたりの短縮時間の推定

現在、東海道新幹線の東京-名古屋間には合計で 6 駅、7 駅、8 駅通過するひかりと、9 駅通過するのぞみが運行している。この 6 駅通過、7 駅通過、8 駅通過、9 駅通過する場合の 4 通りそれぞれの東京-名古屋間の所要時間を調べ、こだまとの所要時間との差を取り、1 駅あたりの短縮時間を推定する。通過する駅数が同じだが、所要時間が異なる場合は、所要時間の平均値を求め、その平均値をその通過駅数の所要時間とする。

x_i を通過する駅数、 y_i をこだまとの所要時間の差の平均値 (分) とすると各 (x_i, y_i) の値はそれぞれ、 $(x_1, y_1) = (6, 32)$, $(x_2, y_2) = (7, 40.5)$, $(x_3, y_3) = (8, 54)$, $(x_4, y_4) = (9, 65)$ となった。この値を $y = tx$ の直線で近似をする。それによって近似された直線の傾き t を駅通過するごとの短縮時間とする。通過する駅数が 0 のときは短縮時間も 0 となる。つまり $x_i = 0$ のときには $y_i = 0$ とする必要がある。そのためには近似する直線の切片は 0 にしなければならない。そのため $y = tx$ の直線で近似をする。 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, 4$ の値を下の式に代入する。

$$T = \sum_{i=1}^4 (tx_i - y_i)^2$$

上の式の T が最小となるような t を求める。その t の値を 1 駅通過するごとの短縮時間として、モデルに適用して東海道新幹線のひかりの停車駅の配置を考える。 T を最小にする t の値を求めた結果、 $t = 6.489$ となった。この結果より、東海道新幹線の東京-名古屋間の短縮時間合計を最大にするようなひかりの停車駅を求めるときの、1 駅通過するごとの短縮時間 $t = 6.489$ として、東海道新幹線のひかりの停車駅の配置を考える。

5 駅間移動人数の推定

モデルを東海道新幹線に当てはめて問題を解くためには駅間移動人数 q_{ij} を推定する必要がある。ここでは、駅間移動人数の推定方法の説明と具体例として東海道新幹線の駅の一部を使って説明をする。

5.1 推定方法

地域 k から地域 l までの移動人数を Q_{kl} とする。地域 k の中には駅 i, j があり、地域 l には駅 n, m がある。それぞれの地域の中の代表点から駅までの直線距離を調べ、最も近い駅を調べる。地域 k の中で駅 i が最も近い代表点の人口の合計として P_{ki} 表す。地域 k の中で駅 j が最寄り駅の代表点の合計を P_{kj} とする。地域 l も同様に P_{ln} , P_{lm} とする。これらを使い、それぞれの駅間利用人数 q_{in} , q_{im} , q_{jn} , q_{jm} を推定する。それぞれの推定式は以下のようである。

$$q_{in} = Q_{kl} \frac{P_{ki}P_{ln}}{P_{ki}P_{ln} + P_{ki}P_{lm} + P_{kj}P_{ln} + P_{kj}P_{lm}}$$

$$q_{im} = Q_{kl} \frac{P_{ki}P_{lm}}{P_{ki}P_{ln} + P_{ki}P_{lm} + P_{kj}P_{ln} + P_{kj}P_{lm}}$$

$$q_{jn} = Q_{kl} \frac{P_{kj}P_{ln}}{P_{ki}P_{ln} + P_{ki}P_{lm} + P_{kj}P_{ln} + P_{kj}P_{lm}}$$

$$q_{jm} = Q_{kl} \frac{P_{kj}P_{lm}}{P_{ki}P_{ln} + P_{ki}P_{lm} + P_{kj}P_{ln} + P_{kj}P_{lm}}$$

上の式よりそれぞれの駅間利用人数 q_{ij} を推定する。

5.2 具体例

2010 年の全国幹線旅客純流動調査 [3] をもとに、市町村間の鉄道利用者数を推定し、さらに新幹線各駅間の利用人数を推定した。一例として、全国幹線旅客純流動調査の東京 23 区地域から愛知県豊田地区の移動人数から東京都 23 区にある東京駅、品川駅、愛知県豊田地区にある三河安城駅、名古屋駅それぞれの駅間移動人数を求める。各地域を市町村別の小地域に分ける。各市町村の代表点は役所とする。各代表点からの最寄りの駅調べ、それぞれの駅の代表点の人口の合計を調べる。東京 23 区を地域 k 、豊田地区を地域 l 、東京駅、品川駅、三河安城駅、名古屋駅をそれぞれ駅 i , 駅 j , 駅 m , 駅 n すると、各駅人口 P_{ki} , P_{kj} , P_{lm} , P_{ln} は、 $P_{ki} = 6760540$, $P_{kj} = 2496085$, $P_{lm} = 1781157$, $P_{ln} = 1690011$ となる。

また、2010 年の全国幹線旅客純流動調査の東京都 23 区と愛知県豊田地区の鉄道での移動人数は年間約 1213000 人である。移動人数 $Q_{kl} = 1213000$ となる。移動人数 Q_{kl} と表 1 の人口の合計の値を 5.1 で述べた推定式に当てはめ各駅間移動人数を推定した結果、 $q_{im} = 454586$, $q_{in} = 431324$, $q_{jm} = 167839$, $q_{jn} = 159251$ となった。このようにして、東海道新幹線が通っている地域間移動人数と人口を使い、東海道新幹線の各駅間移動人数を推定する。

6 東海道新幹線の最適な停車駅配置

6.1 乗り換えなしの場合

乗り換えを考慮しない場合のモデルで計算をして、短縮時間合計が最大になるようなひかりの停車駅の配置を求める。ひかりの種類を 1 種類、2 種類、3 種類と増やしていったとき、短縮時間はどのように変化するか、リニア開通前の駅間移動人数で同じ計算をしてひかりの停車駅を求めたときと比較して、リニア中央新幹線開通前と開通後ではどのような変化があるかということを検証をする。ひかりの種類総数 K を 1, 2, 3 の 3 つの場合で計算した結果、ひかりが 1 種類のとときの停車駅は、東京駅、品川駅、新横浜駅、名古屋駅と現在ののぞみと同じ停車駅になるという結果になった。2 種類にしたときの停車駅は 1 パターン目はのぞみと同じ停車駅となり、2 パターン目はのぞみの停

車駅に加え新富士駅、静岡駅、浜松駅、三河安城駅に停車するという結果となった。3種類にしたときの停車駅は、1パターン目はのぞみと同じ停車駅となった。2パターン目はのぞみの停車駅に加え、三島駅、浜松駅、三河安城駅に停車し、3パターン目は新富士駅、静岡駅、掛川駅に停車するという結果になった。

短縮時間合計の値を推定した駅間移動人数の合計で割り、1人当たりの短縮時間(分)を求め、リニア中央新幹線開通前と後の結果以下のようにになった。

表1 リニア開通後と前の1人あたりの短縮時間の比較

| ひかりの種類数 | リニア後 | リニア前 |
|---------|----------|----------|
| 1 | 27.22(分) | 31.10(分) |
| 2 | 31.47(分) | 35.72(分) |
| 3 | 35.17(分) | 37.93(分) |

1人当たりの短縮時間はリニア中央新幹線開通前に比べてリニア中央新幹線開通後は短縮時間が小さくなるという結果となった。その理由としては、リニア中央新幹線開通前の駅間移動人数で東京駅、品川駅から名古屋駅への移動人数が非常に多いということが考えられる。東京から名古屋への移動はどの駅を通過しても旅行時間が短縮される。本研究では、リニア中央新幹線開通後は東京から名古屋への直行移動がすべてリニア中央新幹線を利用するとしているので、東海道新幹線での東京から名古屋の移動は名古屋以西へ移動する人のみになっている。これにより、リニア中央新幹線開通後の短縮時間合計が小さくなり、1人当たりの短縮時間も小さくなっていると考えられる。

6.2 乗り換え考慮したときの場合

乗り換えを考慮するときの短縮時間合計を最大にするひかりの停車駅の配置を考える。乗り換えを考慮するときのモデルは両端に必ず停車し、その両端以外に2駅停車するというモデルになっている。そこで、連続している東京駅、品川駅、新横浜駅の3駅を1駅として考えて、東京駅、品川駅、新横浜駅と名古屋駅には必ず停車して、それ以外に2駅停車するときの停車駅配置を考える。 K はひかりの種類を表しているので、この K を1, 2, 3, 4と増やしたときに、それぞれひかりの停車駅はどのようになるか、短縮時間合計はどれくらいか計算をする。計算結果を停車駅数を6駅に固定したときの乗り換えを考慮しないときに計算した短縮時間と、今現在走っている停車駅数が6駅のひかりのこだまと比べたときの短縮時間と比較をする。計算した結果、東京駅、品川駅、新横浜駅、名古屋駅以外の停車駅は、ひかりが1種類のとときの停車駅は小田原駅と三河安城駅となった。ひかりが2種類のとときの停車駅は1パターン目は同じで2パターン目の停車駅は三島駅と静岡駅に停車する。ひかりが3種類のとときの停車駅は1パターン目は同じで2パターン目の停車駅は三島駅と新富士駅に停車し、3パターン目の停車駅は静岡駅と浜松駅という結果

のなった。乗り換えを考慮したときとしないときの1人当たりの短縮時間(分)は結果以下のようにになった。

表2 乗り換えありとなしの1人あたりの短縮時間の比較

| ひかりの種類数 | 乗り換えあり | 乗り換えなし |
|---------|----------|----------|
| 1 | 25.10(分) | 22.72(分) |
| 2 | 28.60(分) | 25.55(分) |
| 3 | 33.21(分) | 27.24(分) |
| 4 | 33.43(分) | 28.54(分) |

乗り換えを考慮した場合としない場合の結果を比較すると、乗り換えを考慮した場合の方が1人当たりの短縮時間が約7分短縮されるという結果になった。乗り換えを考慮した場合はひかりが停車しない駅からの移動やひかりが停車しない駅への移動するときでも出発駅と目的駅の間ひかりの停車駅が2つ以上あればひかりを利用し、短縮時間が計算される。しかし、乗り換えを考慮しない場合は出発駅と目的駅の間ひかりが停車しなかったら、ひかりを利用せずにこだまのみを移動に使い駅を通過しないので、短縮時間が計算されない式になっている。この違いによって乗り換えを考慮した場合のひかりの停車駅配置の方が旅行時間が多く計算され、短縮される時間も大きくなるという結果になったと考えられる。

7 おわりに

今回、駅を通過することで得られる短縮時間に注目をして東海道新幹線の停車駅の配置について研究をした。乗り換えを考慮せずにひかりの種類を増やしていったときの停車駅の配置について、ひかりの種類を1種類、2種類、3種類の3つのパターンで計算をした結果、どの場合でものぞみと同じ東京駅、品川駅、新横浜駅、名古屋駅に停車するというパターンが出てきた。この結果から、名古屋以西への移動のことを考えて、リニア中央新幹線を開通した後ものぞみを残した方が良いということが言えるだろう。本研究では急行列車から普通列車、普通列車から急行列車の乗り換えのみを考慮したが、より現実に近づけるために急行列車から急行列車への乗り換えも考慮する必要があるので、その定式化をすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 武藤克徳, 渡辺涼太:『利用者の旅行時間を最小にする急行列車停車駅の割り当ての最適化』, 南山大学情報理工学部情報システム数理学科 2013 年度卒業論文, (2014)
- [2] 堀晃輔, 篠田太郎:『利用者の短縮乗車時間合計を最大にする追い越しあり急行列車の最適停車駅配置』, 南山大学情報理工学部情報システム数理学科 2014 年度卒業論文, (2015)
- [3] 国土交通省, 全国幹線旅客純流動調査:
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html