

# 横断交通路による距離短縮効果の定量的評価方法

三浦 英俊

複数の国家や地域にまたがるような横断交通路は、広い地域に影響を及ぼすだけでなく、多額の建設費が必要となる。その効果の地理分布を示すことができれば、建設位置や費用分担の決定を行うにあたり、利害関係者間の合意形成に役立つ知見が得られるであろう。本稿では、1990年に開通した中国とカザフスタンを結ぶ鉄道を例として、横断交通路の及ぼす影響の範囲と大きさを図示することによって効果の視覚化を試みる。

キーワード：横断交通路モデル，ユーラシア・アジア鉄道網，効果の等高線図示

## 1. はじめに

20世紀には、我が国だけでも青函トンネルをはじめとして、本四架橋、東京湾横断道路など巨大インフラストラクチャーが建設され、それまで大きく迂回をせざるを得ない道のを大幅に改善した。複数の国家や地域にまたがるような横断交通路は、広い地域に影響を及ぼすだけでなく、多額の建設費が必要となる。その効果の地理分布を示すことができれば、建設位置や費用分担の決定を行うにあたり、利害関係者間の合意形成に役立つ知見が得られるであろう。これら横断交通路の及ぼす影響の範囲と大きさを図示することによって、効果の視覚化を試みるのが本稿の目的である。横断交通路が建設される前と後の交通路ネットワークを比較して、その効果を詳細に調べることは可能であるが、ここではその効果の地理的な広がり注目し、簡単なモデルを用いて横断交通路の効果の地理分布について考察する(図1)。

## 2. ユーラシア・アジアの鉄道網と横断交通路モデル

モデルの実例であるユーラシア・アジアの鉄道網について簡単に紹介する。ロシア、中央アジア CIS 諸国から中国にわたるユーラシア大陸北部各国の主たる鉄道路線は図2に示すとおりである。地域の範囲は東西7000 km、南北4500 km、図に示した鉄道の路線総延長は約82000 kmである。これらのうち図2中央に位置する中国のウルムチからカザフスタンのアクトガイを結ぶ814 kmの鉄道は1990年に開通した新路線

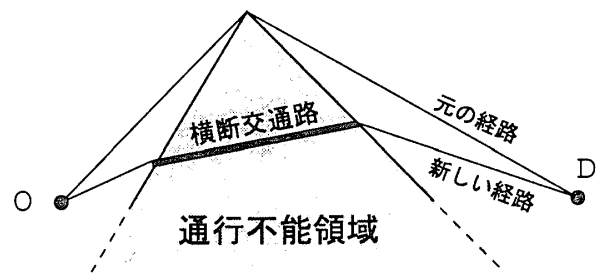


図1 横断交通路モデル

である。この鉄道はユーラシア・ランドブリッジ計画と呼ばれるユーラシア・アジアにおける交通網・通信網・パイプラインなどのインフラストラクチャー整備計画の一部を成している。路線の開通により中国から中央アジアおよびヨーロッパ方面への鉄道輸送は蘭州-アクトガイを経由することによって、シベリア鉄道経由よりも大幅に距離が短縮されることが期待される。以下ではこのウルムチ-アクトガイ間の鉄道路線を例に用いながら、横断交通路の効果の地理分布を描く方法について述べる。

図2の地域のうち、ゴビ砂漠からヒマラヤ山脈にかけての地域は鉄道が少なく、中央を古のシルクロードに沿って東西に蘭州からアクトガイに路線が敷設されているのみである。そこで図2の平面上にクラスノヤルスクを端点とし蘭州を通る線分、同じくクラスノヤルスクを端点としアクトガイを通る線分を描き、この線分に挟まれた地域を通行不能領域とする横断交通路モデルを考える(図3)。議論を簡単にするための便宜上、通行不能領域は下に無限に広がっているものとする。

クラスノヤルスクの位置を  $Q$ 、アクトガイ、蘭州の位置をそれぞれ  $H_1$ 、 $H_2$  とする。 $H_1$ 、 $H_2$  のクラスノヤルスクからの距離を  $h_1$  および  $h_2$ 、横断交通路の長

みうら ひでとし  
明海大学  
〒279-8550 浦安市明海8



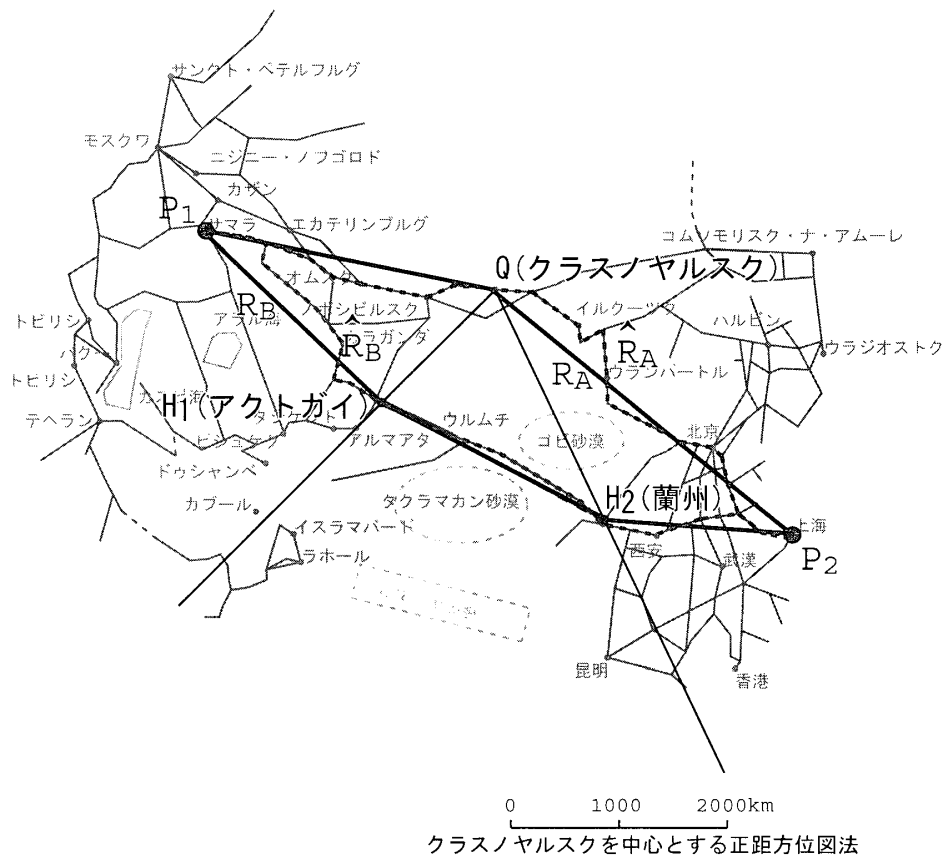


図4 横断交通路モデル

さを  $H_1H_2=h$  とする。通行不能領域の外では直線距離によって移動が可能であるが、通行不能領域内部は  $H_1$  から  $H_2$  に至る横断交通路のみ通行可能とする。このモデルの目的は、鉄道を使った場合の距離をいくつかの直線距離の和を用いて近似することによって、横断交通路の移動距離短縮効果を簡便に図示することにある。

横断道路モデルの上で新路線利用による短縮の大きさを調べるために、図4のように経路を定義する。通行不能領域の両側の2点間の経路のうち、 $Q$  を経由する条件で最短の折れ線経路を  $R_A$  とし、 $H_1H_2$  間を経由する条件で最短の折れ線経路を  $R_B$  とする。鉄道網ネットワーク上の経路に限定した同条件の最短経路を  $\hat{R}_A, \hat{R}_B$  とする。また折れ線経路  $R_A, R_B$  の長さを  $d_A, d_B$ 、対応する鉄道網上の経路  $\hat{R}_A, \hat{R}_B$  の長さを  $\hat{d}_A, \hat{d}_B$  とする。

### 3. 横断交通路の距離短縮効果

#### 3.1 ネットワークモデルとの比較

横断交通路モデルを描いた地図の図法は、クラスノヤルスクを中心とする正距方位図法である。この図法で描いた平面上の二つの折れ線経路の距離  $d_A, d_B$  を

用いて距離の比較を行うにあたり、これらに対応する地球球面上の距離との誤差を検証する。なぜならば、地球を半径 6370 km の球体と仮定した場合の距離と比較すると、任意の2点間について  $Q$  経由の移動距離  $d_A$  は正確であるが  $d_B$  は球面上の距離と誤差があるからである。そこで中国、ロシア、中央アジア諸国の407都市から  $H_1$  および  $H_2$  までの距離を計測したところ、常に球面上の距離のほうが長い、その誤差は最大で2.4%であることが分かった。すなわちユーラシア・アジア程度の広がりのある地域であっても、正距方位図法上での直線距離は地球面上の大門距離との誤差は最大でも2.4%程度で抑えられる。

次に折れ線経路距離と、鉄道網ネットワークにおける距離を比較して、実際の鉄道網に対する横断交通路モデルの妥当性を検証する。対象地域の主要36都市間の2都市ペアのうち、経路  $R_A$  が  $Q$  を通る折れ線になる182ペアについて二つの横断交通路モデルにおける折れ線距離  $d_A$  および  $d_B$  とネットワーク距離  $\hat{d}_A, \hat{d}_B$  を計測し図5にプロットした。それぞれ原点を通る回帰直線を計算して平均的な両者の比を求めると、

$$\text{ネットワーク距離} = 1.22 \times \text{折れ線距離}$$

であった。決定係数はおよそ0.86である。決定係数

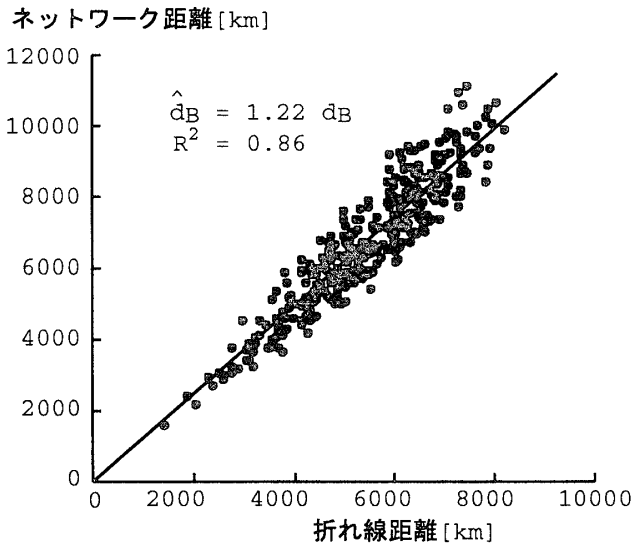


図5 横断道路モデルと鉄道網の経路距離の比較

および図5の散布図の分布から、図2程度の比較的粗い主要鉄道路線網であっても、横断交通路モデルにおける折れ線経路距離とネットワーク経路の距離にはおおよそ比例関係があると言ってよいだろう。

同じ182都市ペアについて、折れ線距離とネットワーク距離の差  $d_A - d_B$  をネットワークにおける距離差  $\hat{d}_A - \hat{d}_B$  と比較すると、両者の関係は図6のようになった。回帰直線と決定係数を求めたところ、

$$\begin{aligned} & \text{ネットワーク距離の差} \\ & = 1.41 \times \text{折れ線距離の差} + 587 \\ & \quad (\text{決定係数 } 0.94) \end{aligned}$$

であった。上式を用いて横断交通路モデルにおける二つの折れ線距離の差  $d_A - d_B$  からネットワーク上の距離差を推定することができる。しかし折れ線経路距離の差の比較には注意が必要である。例えば、 $d_A - d_B = 0$  であった場合であっても、ネットワーク上ではクラスノヤルスクを経由する経路のほうがおおよそ平均的に600 km程度長いのである。このように、横断交通路モデル上の折れ線距離の差はネットワーク距離の差よりもかなり小さく算出される。

### 3.2 横断交通路による距離短縮有効領域

横断交通路建設の効果の影響が及ぶ範囲を図示する。出発点に対して横断交通路を利用することによって短縮される目的地が存在するとき、この出発点は横断交通路の効果があると考えられる。このような出発点の全体を「横断交通路による距離短縮効果がある地域」と見なして、距離短縮効果のない地域との境界線を求めよう。

図7のように、任意の2点のうち  $H_2$  と比べて  $H_1$

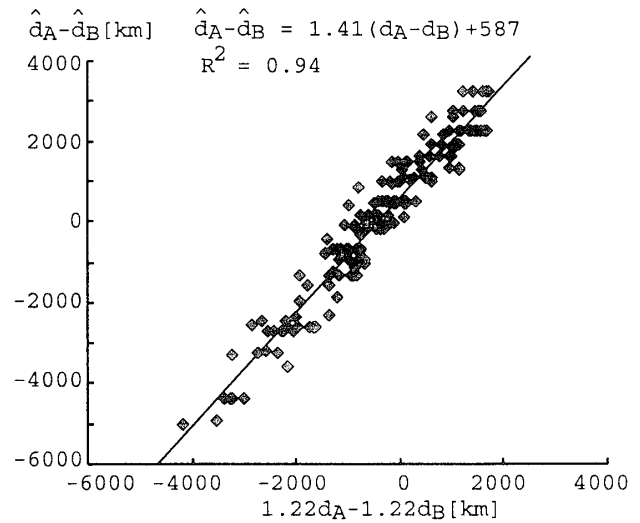


図6 二つの経路の距離差の散布図

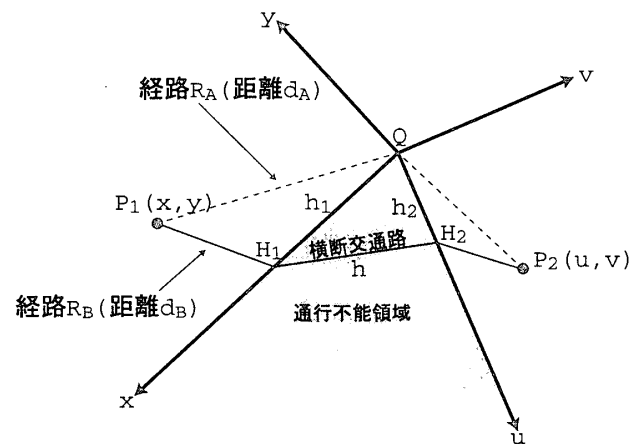


図7  $H_2$ を原点とする  $P_2$ の座標表示

までの移動距離が短いほうの点を  $P_1$ 、そうでない点を  $P_2$  とする。このとき横断交通路完成前の2点間の経路  $R_A$  が直線になる場合には、明らかに横断交通路を使用する経路  $R_B$  は  $R_A$  よりも長くなるので、考察の対象外としてよい。以下では、 $R_A$  が点  $Q$  を経由する折線になる場合についてのみ考える。

横断交通路による距離短縮効果がある地域に  $P_1$  が位置するとき、横断交通路を渡り終わった直後の  $H_2$  への移動距離は、横断交通路を利用した到達距離が  $Q$  を経由した場合よりも常に短い。よってこの条件を満たす  $P_1$  全体の境界線上の点は、 $Q$  を経由した対岸の  $H_2$  までの距離  $P_1Q + h_2$  と横断交通路を利用した距離  $P_1H_1 + h$  が等しい点である。図7のように、 $Q$  を原点として線分  $QH_1$  と平行および垂直になる  $xy$  直交座標系を用いて  $P_1$  の位置を表すと、境界線上の  $P_1$  の座標  $(x, y)$  は  $P_1Q + QP_2 = P_1H_1 + H_1H_2 + H_2P_2$  より

$$\sqrt{x^2+y^2}+h_2=\sqrt{(x-h_1)^2+y^2}+h \quad (1)$$

となり,

$$\frac{(2x-h_1)^2}{(h-h_2)^2}-\frac{4y^2}{(h_1^2-(h-h_2)^2)}=1 \quad (2)$$

を得る.  $h_1+h_2>h$ ,  $h_1, h_2, h>0$  より上式で  $(h_1^2-(h-h_2)^2)>0$  だから, 上式を描くと  $Q$  と  $H_1$  からの距離の差が一定  $h_2-h$  となる双曲線を得る.

同様に  $P_2$  の位置を  $Q$  を原点とする  $uv$  座標系を用いて表して, 横断道路による距離短縮効果がある地域を有する  $P_2$  の境界線の方程式を求めると,

$$\frac{(2u-h_2)^2}{(h-h_1)^2}-\frac{4v^2}{h_2^2-(h-h_1)^2}=1 \quad (3)$$

となる.

図3における境界線を描くと図8ようになる. 境界線よりも通行不可能領域寄りの地域は, 対岸に横断交通路を利用すると距離が短縮される地域が存在する. モスクワ, サクト・ペテルブルグをはじめとしてロシアの主要都市がほとんど含まれている. 一方東側は, シベリア東部, 中国東北部, モンゴルが含まれておらず, これらの地域には新路線の効果はない. このことから, ウルムチ-アクトガイ間の新路線は, 中国全土から中央アジアおよび西シベリア以西のロシアへの輸

送距離を大きく改善することが期待できると言えるだろう.

### 3.3 短縮距離の等高線表示

この節では, 出発地点を固定して, 横断道路を利用した場合の最短距離  $d_B$  を利用しない場合の距離  $d_A$  と比べた短縮距離の等高線を図示する. すなわち  $d_A$  に対する  $d_B$  の短縮距離を  $r$  として

$$P_1Q+QP_2-r=P_1H_1+h+H_2P_2 \quad (4)$$

を満たす目的地の等高線である.  $P_1$  を固定して定数となる  $P_1H_1, P_1Q, h$  をまとめて定数  $t_1=P_1H_1+h-P_1Q$  と置くと, 式(4)を満たす  $P_2$  の座標  $(u, v)$  は以下の式で表される.

$$\frac{(2u-h_2)^2}{(t_1+r)^2}-\frac{4v^2}{h_2^2-(t_1+r)^2}=1. \quad (5)$$

これは  $Q$  および  $H_2$  から  $P_2$  までの距離の差がちょうど  $t_1+r$  となる  $P_2$  の軌跡を表す双曲線を表す.  $P_2$  を固定した  $P_1$  の距離短縮差等高線も同様にして求めることができる.

式(5)において,  $P_1$  を固定し,  $t_1$  を定数として扱うことにする:

$$t_1=P_1H_1+h-P_1Q \\ =\sqrt{(x-h_1)^2+y^2}+h-\sqrt{x^2+y^2}. \quad (6)$$

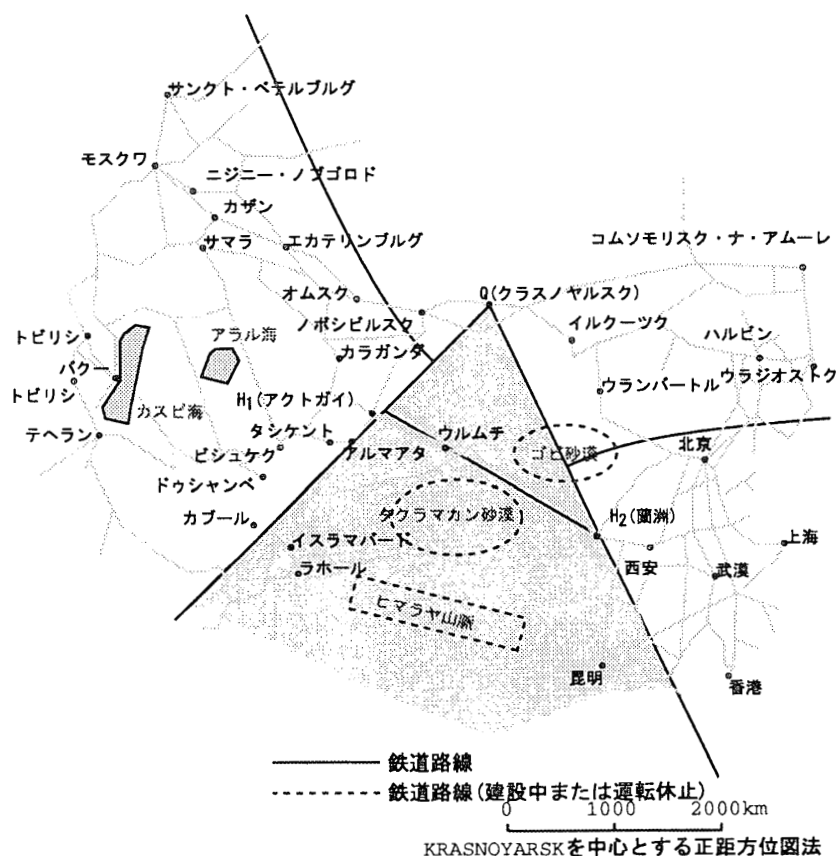


図8 新路線の効果の及ぶ範囲

上式で任意の  $r$  について  $t_1$  が一定であるように  $P_1$  の座標  $(x, y)$  を動かした軌跡を描いてみよう。描かれた軌跡の上にある点に対する短縮距離差の等高線 (式 (5)) は常に一定である。なぜならば、この軌跡上の点は式(4)を満たす任意の  $P_2$  (すなわち初めの  $P_1$  に対して二つの折れ線距離の差が  $r$  となる目的地点) に対して、同じく式(4)を成立させるからである。よって定数  $t_1$  を  $x, y$  を用いて書き直したとき、式(4)を満たす  $x, y$  を座標とする点は全て式(5)で表される等短縮線を持つ。そのような点の全体を表す式を  $T_1 = t_1 - h$  として求めると、

$$\frac{(2x - t_1)^2}{T_1^2} - \frac{4y^2}{t_1^2 - T_1^2} = 1 \quad (7)$$

となる。上式は  $H_1$  までの距離から  $Q$  までの距離の差が  $T_1$  となる双曲線の方程式である。式中に  $r$  が入っていないことから、式(7)で得られる軌跡上の地点を出発点とすると、任意の  $r$  について全て同じ距離短縮差等高線を持つことが明らかである。

#### 4. ユーラシア・アジア鉄道網への適用

前節までに求めた等高線を使った図示の例として、

中国上海を起点とした距離短縮差等高線、および上海と同じ等高線を持つ地点の軌跡を図9に示す。通行不能領域の西側の曲線は、上海を端点とした短縮距離差等高線である。南部の中央アジア諸国の都市ほど短縮効果大きい。シベリア鉄道沿線の都市については新路線による短縮効果はない。キルギスタン、タジキスタンへの短縮効果が最も大きく、およそ 750 km 以上の短縮が期待されることが分かる。

通行不能領域東側の点線は、上海を端点にしたときと同じ等高線を得る地点を結んだ軌跡である。前節で述べたように、実線上の任意の点を端点にしたときの差の等高線の分布が任意の  $r$  について上海と同じである。上海とおおよそ同じ短縮効果がある地域は、図9に示すように、上海近郊地域というよりは、むしろ、上海と同程度の緯度の地域に広がっていることが分かる。同様に図10到北京の等高線図を示す。上海と比較して、横断交通路の効果は小さく、最大でも 250 km 程度の短縮しか望めない。ロシア国内で短縮される地域はほとんどなく、カスピ海・アラル海以南の諸国への交通がやや改善される。

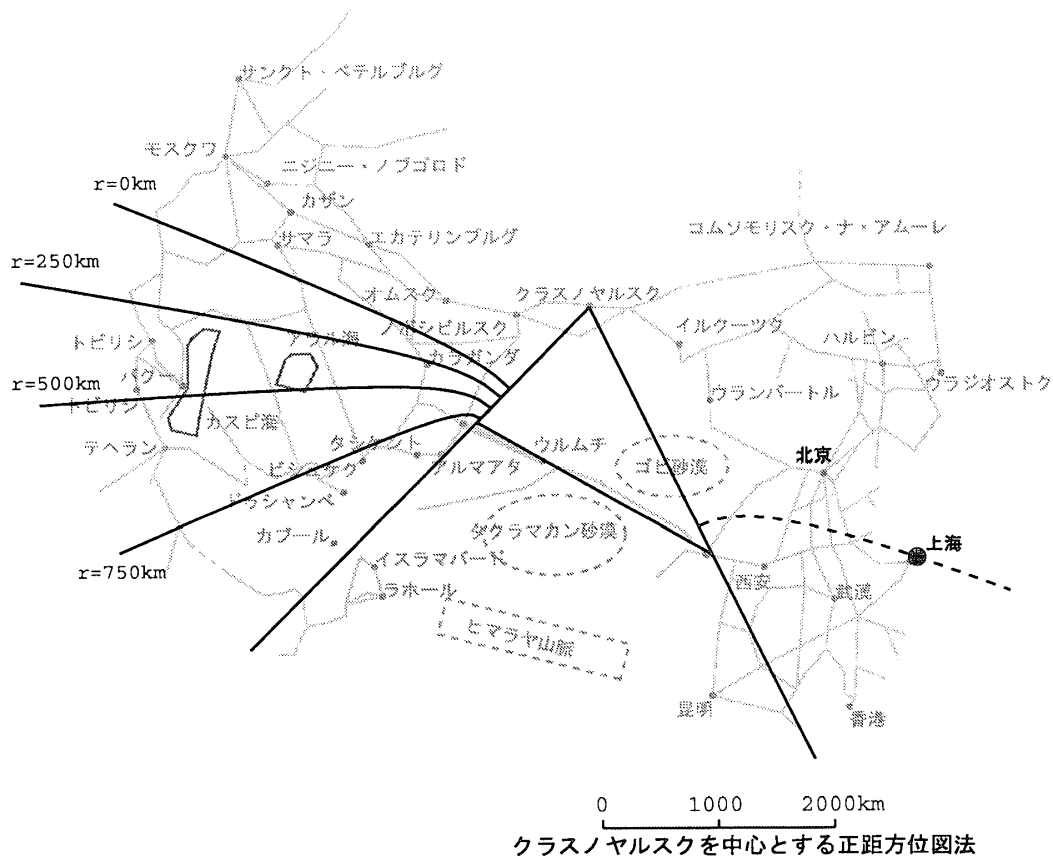


図9 上海を起点とした短縮距離差等高線 (実線) と上海と同じ短縮距離差等高線を持つ点の軌跡 (点線)

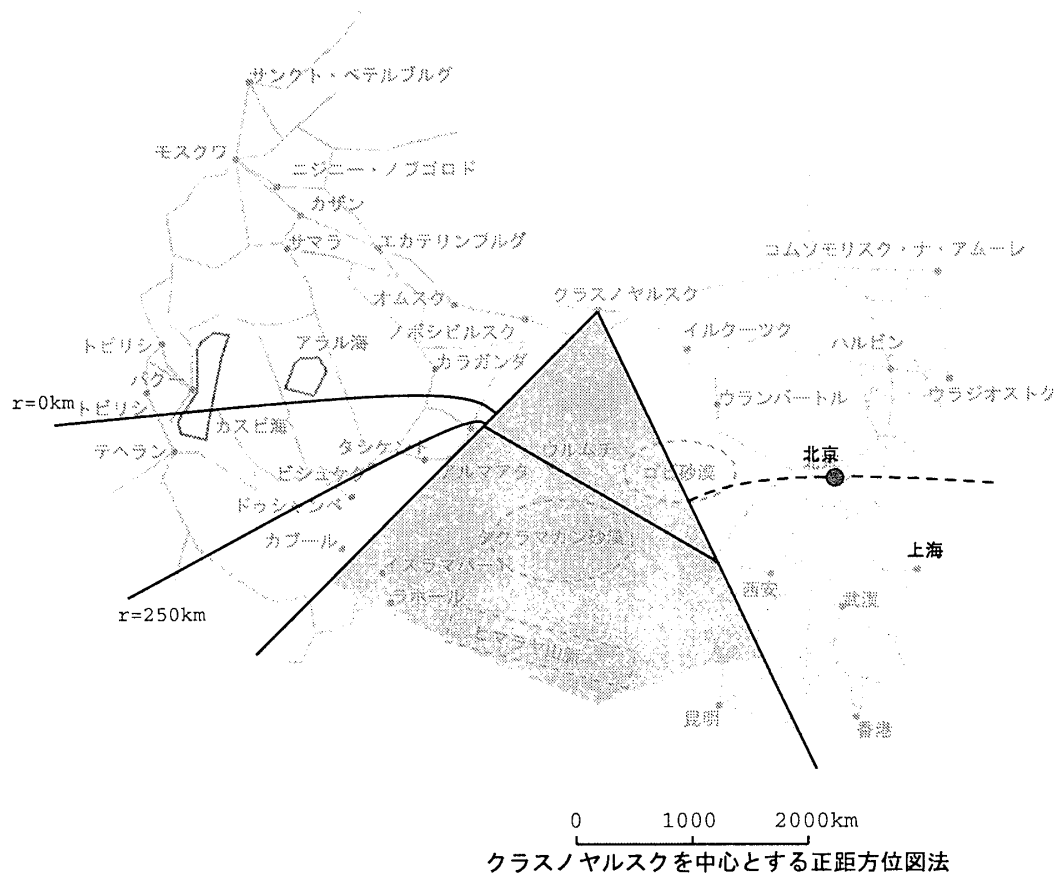


図10 北京を起点とした短縮距離差等高線（実線）と北京と同じ短縮距離差等高線を持つ点の軌跡（点線）

## 5. おわりに

本稿では、簡単なモデルを用いて横断交通路の及ぼす影響の範囲と大きさを図示する方法について述べた。このモデルは、上に述べた鉄道以外にも可能である。マレー半島クラ地峡に計画されている運河は、マラッカ海峡を通過せずに中東地域と東アジアを結ぶことのできる航路として期待されている。モデルを運河の距離短縮効果を調べるために利用することもできるであろう。ただし節3.1で比較したように、ネットワーク距離に対する誤差はかなり大きいので、描かれた等高線分布図は効果のおおよその地理分布を把握するには十分であろうが、詳細な検討は、ネットワーク距離を計測しなければならない。

なお、本稿では短縮距離差の等高線を描くことを中心に述べたが、短縮される距離の比率の等高線を描く

ことも可能である。

本原稿をまとめるにあたって、日本 OR 学会と日本グローバル・インフラストラクチャー研究財団との共同研究部会「グローバル・プロジェクトの OR」のメンバーの方々から多くの貴重な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Overseas Timetable, May-June 2001, Thomas Cook.
- [2] 大澤義明 (1986)：橋の本数と迂回の関係について，日本都市計画学会論文集，No. 21, pp. 241-246.
- [3] 田中健一，栗田治 (2001)：扇形都市における横断道路の最適配置モデル，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集，pp. 112-113.
- [4] 三浦英俊 (2002)：横断道路の数理モデル，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，pp. 164-165.