

さまざまな時間地図とその特徴

—ユーラシア大陸鉄道網を対象として—

Several Time Maps and their Features

—Focused on Railway Networks in Eurasia Continent—

古藤 浩

KOTOH Hiroshi

In this study, I show several time maps using new concepts, and discuss their usefulness. For showing examples of time maps, I pick up the times required by railways of the Eurasia Continent.

As usual, For making time maps, the multi-dimensional scaling method was applied, which was proposed by Torgerson 1952. However, this method has two problems. One is that, we can hardly understand the true times required from the time map, and the other is that the topological structure is often broken in the time map by that method, hence we sometimes mislead the time map. I focus on the former problem and propose new time maps.

I consider time maps based on the multi-dimensional scaling method. Then, I show two new ideas of time maps which partially indicate exact times required (between several cities). These time maps are worth using because the precision of them are as not being inferior compared with the time map using the multi-dimensional scaling method.

Futhermore, I show simple shape time maps which are one dimension type, elliptic type, and 8 character type. These time maps are valid for evaluating the transportation network and effect of new railways.

1. はじめに

本研究では、新しい概念によるいくつかの時間地図を示し、それらによって得ることのできる知見について議論する。本稿での時間地図の適用データとしてユーラシア大陸の鉄道による所要時間を取り上げる。また新しい鉄道の開通によってどのように時間地図が変化するかも、実例を通して論ずる。

所要時間による都市間の位置関係を考えると、ある種の地図を私たちは考える。それをここでは時間地図と呼び考えよう。一都市対複数都市の見地による時間地図は作成が容易であり、よく作られてきた。しかし複数都市対複数都市で時間地図を作ろうとすると、通常二次元(紙)の上には納まらず、何らかの近似手法によって紙上に納めるほか方法はない。そこで様々な表現技術が考えられてきた。それらは多次元にあふれてしまう情報をある限られた次元の中に表現する方法なので、多次元尺度構成法と呼ばれている。その先駆けとして有名なのはTorgerson [1952] による、位置決定問題を固有値問題に置き換えて解く方法で、現在では古典的多次元尺度構成法と呼ばれている。

多次元尺度構成法は心理学における認知距離の図解などの目的で多用されている。真の所要時間がわかっている時間地図での応用や近年の多次元尺度構成法の技術については、清水 [1992] 等に詳述されているが、どこまで真の所要時間が時間地図からわかるか不明快・位相構

造が崩れて地図としてわかりにくくなる、といった問題がある。そこで本研究ではその前者の問題に注目して新しい時間地図の提案を行う。なお、清水 [1992] では後者の問題に対応する新しい時間地図の提案もしている。

本研究では、2章で複数都市間の関係を表現するときの基本となる多次元尺度構成法について簡単に説明し、それによるユーラシア大陸の時間地図を示す。また新規鉄道の開通による所要時間短縮の効果が時間地図にどのように現れるかも考察する。さらに時間地図上で国境線を考えたとき、それがどのように表されるかにも触れる。

次に3章では部分的な正確さを持つ新しい概念による時間地図を二種類提示する。

さらに4章、5章では別な考え方による新しい時間地図、一次元・楕円・八の字型といった単純な形に都市を配置する時間地図を示し、その意味を考察する。

2. 多次元尺度構成法と鉄道網の整備による時間地図の変化

2.1 ユーラシア大陸鉄道網データについて

利用するデータはユーラシア大陸のアジアを主とした7首都および主要都市（72都市）間の鉄道網データである。そこでは84本の都市間を結ぶ鉄道リンクが存在す

る。なお、インドの都市は他国と連続グラフにならないので入っていない。主要都市の基準は人口など都市規模に関するものだけでなく、広域的な視点の中で地方拠点と位置づける都市が選ばれている。ただし、対象地域内の首都でKiyev (UKRAINE)、Kishinev (MOLDOVA)、Tallinn, Riga, Vilnius (バルト3国)、大都市でSankt Peterburg (RUSSIA) は対象都市群に含めなかった。全都市のリストを表3（最終ページ）に示す。

対象地域は図1に表される。図1は都市間の測地線距離（大圏距離）に関する誤差が最小になるよう都市を配置したもので、○は人口300万人以上の大都市、●は首都、実線は鉄道の存在を示す。また、都市間を結ぶ線は当該都市間を直接結ぶ鉄道の存在を意味する。

大都市はヨーロッパ側と中国国内に集中していることがわかって。なお、これ以降すべての時間地図での凡例は図1と同じとする。

2.2 多次元尺度構成法による時間地図

前章で紹介したTorgerson [1952] による古典的な多次元尺度構成法では都市群の中での基準となる都市を決める必要がある。しかし、基準とする都市によって結果が変わり、一意ではないという欠点を持つ。そこで近來は電子計算機の発展に伴い、より単純なわかりやすい考え

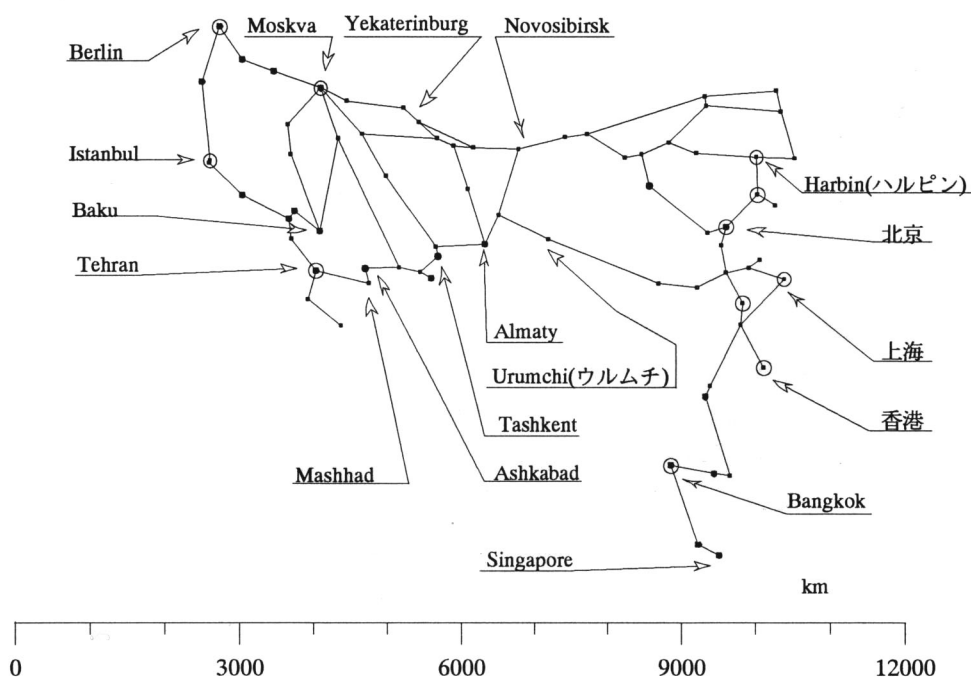


図1 対象地域と鉄道網

方による多次元尺度構成法が多用されるようになっている。

それは最小2乗法に基づく多次元尺度構成法であり、以下のように定式化できる。

$$\min. S = \sum_{i < j}^n (t_{ij} - d_{ij})^2$$

$$d_{ij} = \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2} \quad (1)$$

ここで、 t_{ij} : 都市 i, j 間の所要時間,
 d_{ij} : 都市 i, j 間の時間地図上の距離,
 $(u_i, v_i), (u_j, v_j)$: 都市 i, j の時間地図上の座標値,
 $i, j = 1, 2, \dots, n$.

ここで推定すべき未知数は (u, v) である。この問題は非線形計画問題なので、本研究では準ニュートン法を用いて都市位置の決定を行った（茨木、福島（1991）を利用）。

ユーラシア大陸鉄道網のデータでは都市の組み合わせ数は2556なので、式（1）の計算は2556ペアに関する計算となる。

時間地図を評価する場合、それがどの程度正確に所要時間を表現しているか知る必要がある。まず考えられるのは地図上の距離と所要時間に関する決定係数である。しかし、ある程度以上の精度が期待できる時間地図では決定係数がどれも1に近く、差がわかりにくい。そこで最小化の目的関数である残差二乗和をデータ数 n で割り平方根をとった標準誤差 E :

$$E = \sqrt{\frac{S}{n}}$$

にも注目することとした。もしも誤差の大きさの分布が正規分布に従うならば「図上の距離 $\pm 2E$ 」の時間を考えれば、95%の都市間の所要時間を把握できることになる。なお参考として、論文の末尾の表2に所要時間の誤差が最大となっている都市間の誤差の値も記した。

まず時間地図を評価するときの「最悪の」基準を得るために、メルカトル図法による地図を相似変換して都市間の距離を最もよく表すことを考える。別な表現をすれば、メルカトル図法の緯度・経度に対応して最も適当な所要時間のスケールをつける。すなわち2556の都市間のペアに対してスケール（唯一の未知数）を決定する。この計算による地図では方位は意味をなさない。この結果の時間地図は形は一般に見るメルカトル図法の地図と同

じなので略するが、緯度・経度における1度が1.45時間となった。緯度・経度による実際の距離は地球面上における位置によって異なるのでその解釈は難しいが、日本に適用するにもそれほど無理がない数値と感じられる。例えば、山形市－仙台市間は緯度が同じで経度の差が0.5度程度なので、この時間地図上での所要時間は43分程度となる。一方、決定係数は0.61、標準誤差は40.25時間となった。つまり、誤差を二日程度見込まなくてはならないので、実際的にはメルカトル図法は時間地図として役に立たないといえよう。

次に測地線距離に関する図1の地図に、唯一の未知数として適当なスケールを与え、時間地図とすることを考える。この場合、100kmが2.77時間（逆に言えば平均時速36.0 Km/hour）となった。そして、決定係数が0.82、標準誤差が26.15時間となり、時間地図としてみると測地線距離に注目した図1の方がメルカトル図法よりもはるかに正確ということが判った。

以上をふまえ、最小2乗法に基づく多次元尺度構成法（式(1)）によって都市位置を決定した時間地図を示すと、それは図2になる。図2をみると鉄道で最も時間がかかるのはIstanbul－Singapore間と一目で理解できる。またモスクワの交通利便性が高いことは、位置が図1に比べより内側になったことから確認できる。一方、中国は鉄道網が整備されており、まとまった地域となっていることも理解できよう。ここでの決定係数は0.99、標準誤差は6.31時間で、先にあげた二つの地図に比べるとはるかに精度が高い。

2.3 新規鉄道の開通による時間地図の変化

ところで1996年にMashhad (IRAN)－Ashgabad (TURKMENISTAN) 間の鉄道が開通した。これによって両都市間の鉄道による所要時間は劇的に短くなったことは間違いない。もちろん近接する他都市間にも同様の効果が考えられる。そこで、ここでは1996年以前の時間地図を作成し、その効果を吟味する。

Mashhad－Ashgabad間の鉄道が開通する以前の多次元尺度構成法（式（1））による時間地図は図3になる。こちらで最も所要時間が長いのはMashhad－Singapore間であった。IRAN国にとってこの鉄道の存在がユーラシア大陸とのつながりの上で重要な意味を持つだろうことは図2と図3の比較からよくわかる。なお、図3での標準誤

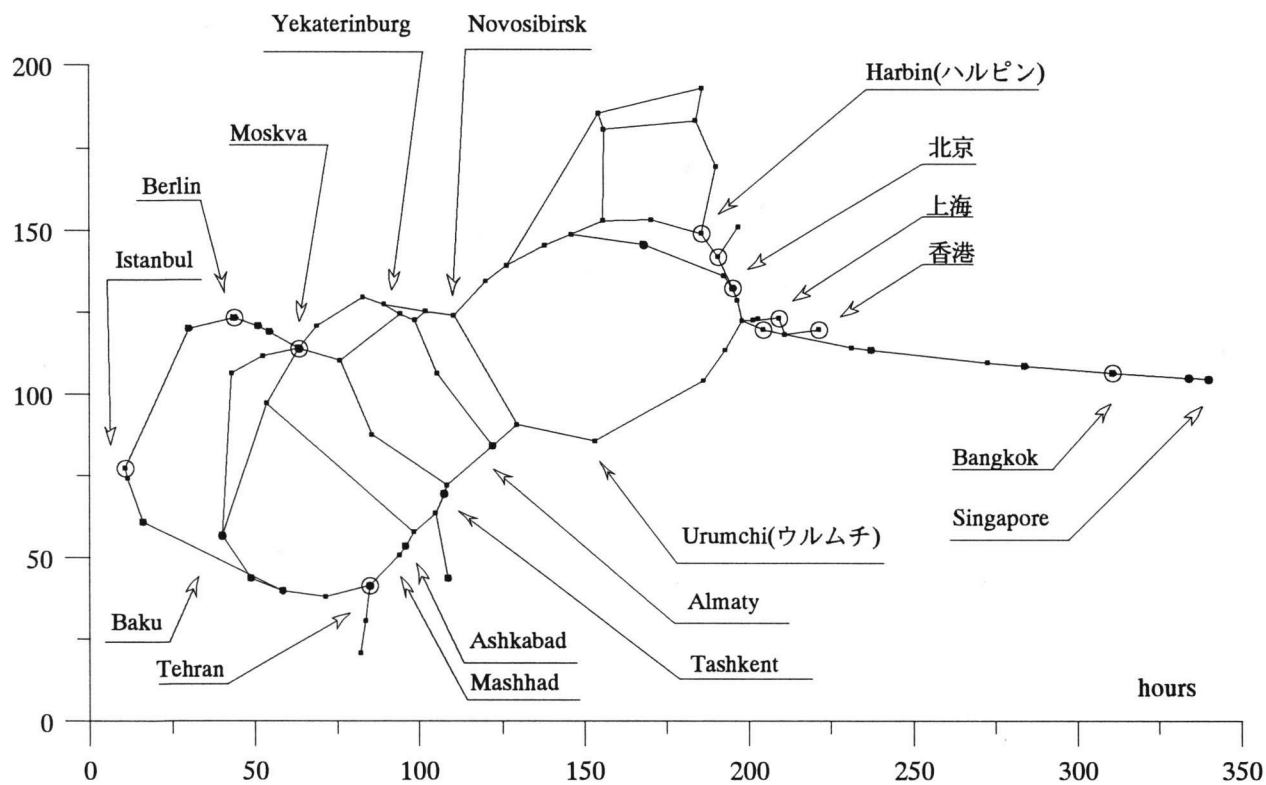


図2 多次元尺度構成法による時間地図（1997年）

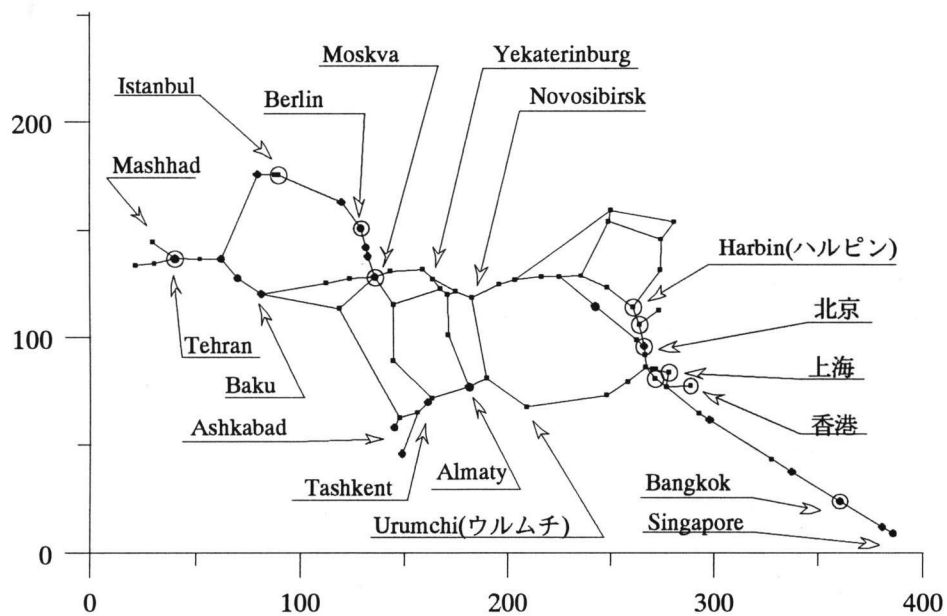


図3 多次元尺度構成法による時間地図（1995年）

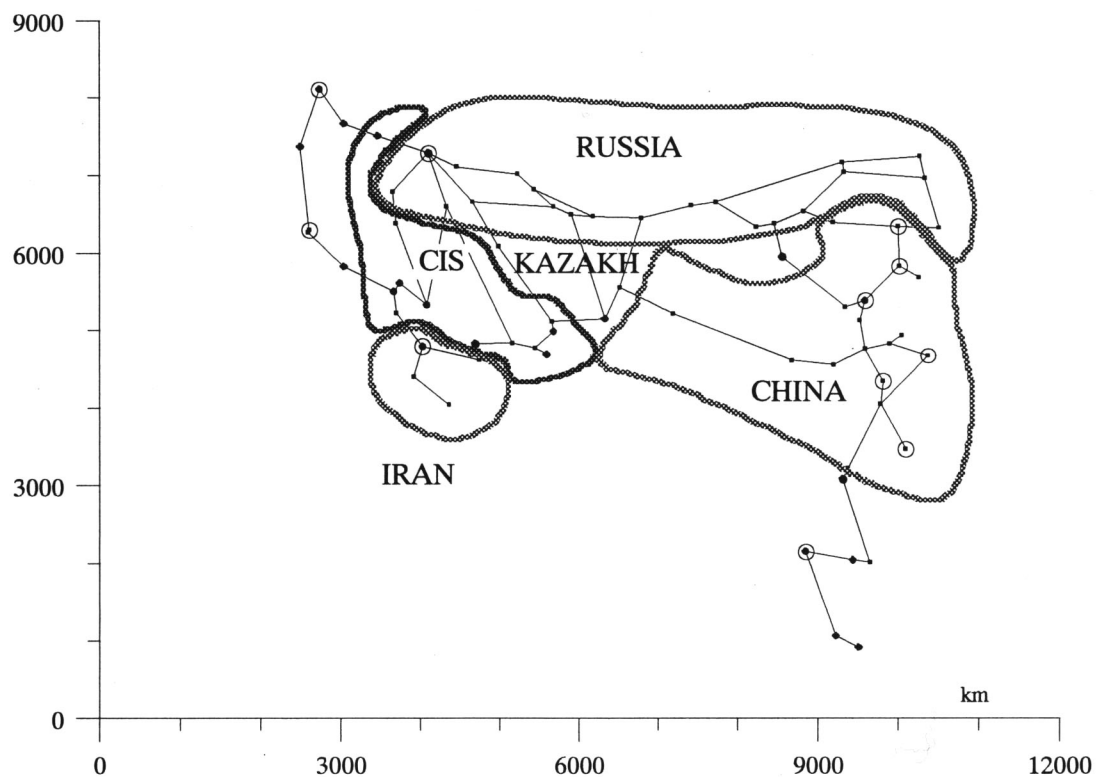


図4 一般の地図 (国境線付き)

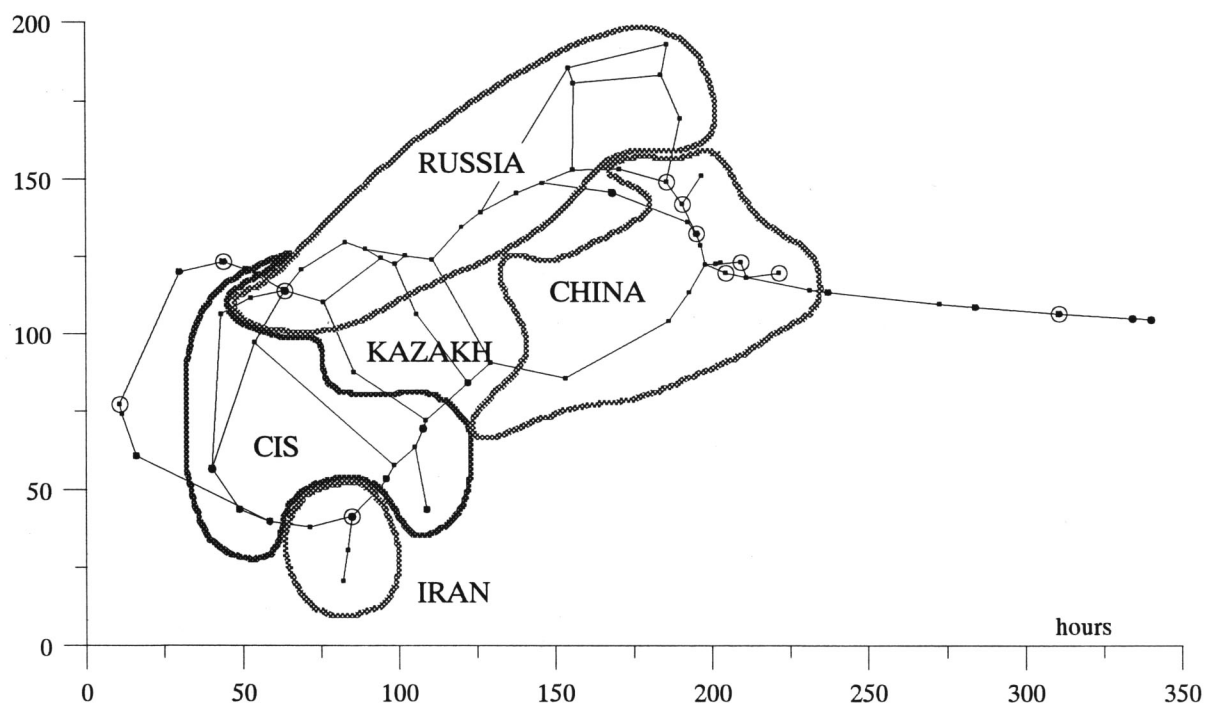


図5 多次元尺度構成法の結果に国境線を入れる

差は5.71時間で、鉄道の整備の結果、時間地図としての精度はわずかに悪くなったことがわかる。

2.4 時間地図に国境を入れる

見慣れている物理的な地図と比較すると、図2や図3はずいぶん歪んでいるので、各都市関係の全体像を十分理解するのに時間がかかる。そこで、フリーハンドによるが、国境線を入れた結果を図4・図5に示す。ここから、たとえばCIS地域が不便であることがうかがえる。著者にとって、ロシアのシベリア鉄道は所要時間がかか

る印象が強いが、このようにみると、それほどかかるとはいえない。面積が広いための著者の先入観によるようである。むしろ、たくさんの国に分かれているCIS諸国の鉄道の未整備が問題のようだ。

3. 部分的に正確な時間地図

3.1 軸線付きの多次元尺度構成法

ここでは、地域で中心となるような鉄道路線に注目し、その路線内では正確に所要時間が表されるように位置を

表 1 軸線に属する都市と隣接都市間所要時間

軸線順序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
都市NO (表3)	61	1	2	3	4	34	5	6	7	8	38	37
都市名	Buda- pest	Berlin	War- saw	Minsk	Mos- cow	Goliki	Perm'	Yekate- rinburg	Omsk	Novos- ibirsk	Aktgai	ウルム チ
左の都市からの 所要時間		770	393	188	505	392	856	341	705	483	1437	1205
軸線順序	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
都市NO (表3)	36	35	24	25	26	27	28	29	69	70	72	71
都市名	蘭州	西安	鄭州	武漢	長沙	憑祥	Hanoi	Ho Chi Minn	Phnom Penh	Bang- kok	Kuala Lumpur	Singa- pore
左の都市からの 所要時間	1954	529	259	358	347	1123	330	2040	660	1570	1381	356

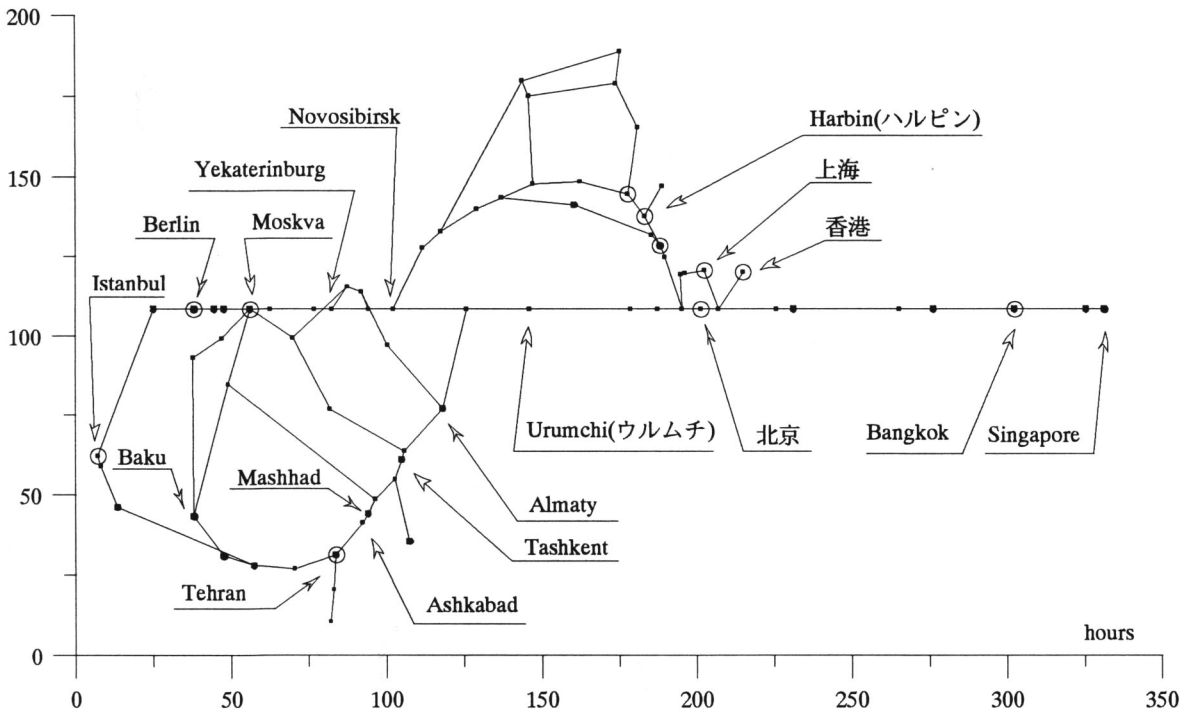


図 6 軸線付きの多次元尺度構成法

与え、その他の都市の位置は多次元尺度構成法に従って決定する時間地図を作成する。

正確に所要時間を示させる路線を「軸線」と名づけ、軸線を持つ時間地図を「軸線付きの多次元尺度構成法による時間地図」と呼ぶことにする。

まず、図2等を検討した結果から、Budapest - Singapore間の24都市を結ぶ都市を軸線と決めた。これらの都市については位置を所与とし、軸線内のどの二都市をとっても所要時間は正確に表されている。逆に言うとそうなるように軸線となる都市群を決めたともいえる。軸線に属す都市のリストを表1に示す。

都市の総数は72なので、変数として位置を求める都市数は48となり、前章での多次元尺度法の場合に較べて、その数は3分の2となる。そして、48都市について式(1)を適用して、位置を求めた結果が図6である。決定係数は0.984、標準誤差は7.81時間となった。

標準誤差は図2の場合に比べ2割ほど悪くなったとわかる。しかし、一般の地図を時間地図に転用した場合に比べれば、はるかに小さな標準誤差なので、価値がある

地図と言えよう。図6では、横に伸びるBudapest (Berlinの左) からSingaporeまでの直線上の都市間の所要時間は正確に表されている。ただし、時間地図の2カ所で線の交差(実際には交差していないのに交差してしまったもの)が現れたので誤解を招く危険性がある。

3.2 視覚化時間距離網の時間地図～ネットワーク上に限定した位置関係

ここでは、古藤(1995, 1996a, 1996b)による視覚化時間距離網の考えを応用した方法を提示する。視覚化時間距離網はリンク上に限定して正確に時間距離を表す図を作る考えである。直接辺で結ばれている都市間の時間距離が一目でわかるだけでなく、直接には辺で結ばれてなくても、任意の都市間の所要時間は、都市間を結ぶ最短の辺長の和で(ただし経由する都市での待ち時間は入っていない)わかるという特長を視覚化時間距離網は持つ。

本章では視覚化時間距離網の考え方を緩和し、リンク(鉄道)のある都市間に限定して、最小2乗法を用いた多次元尺度構成法の計算をおこない、リンク(鉄道)で示

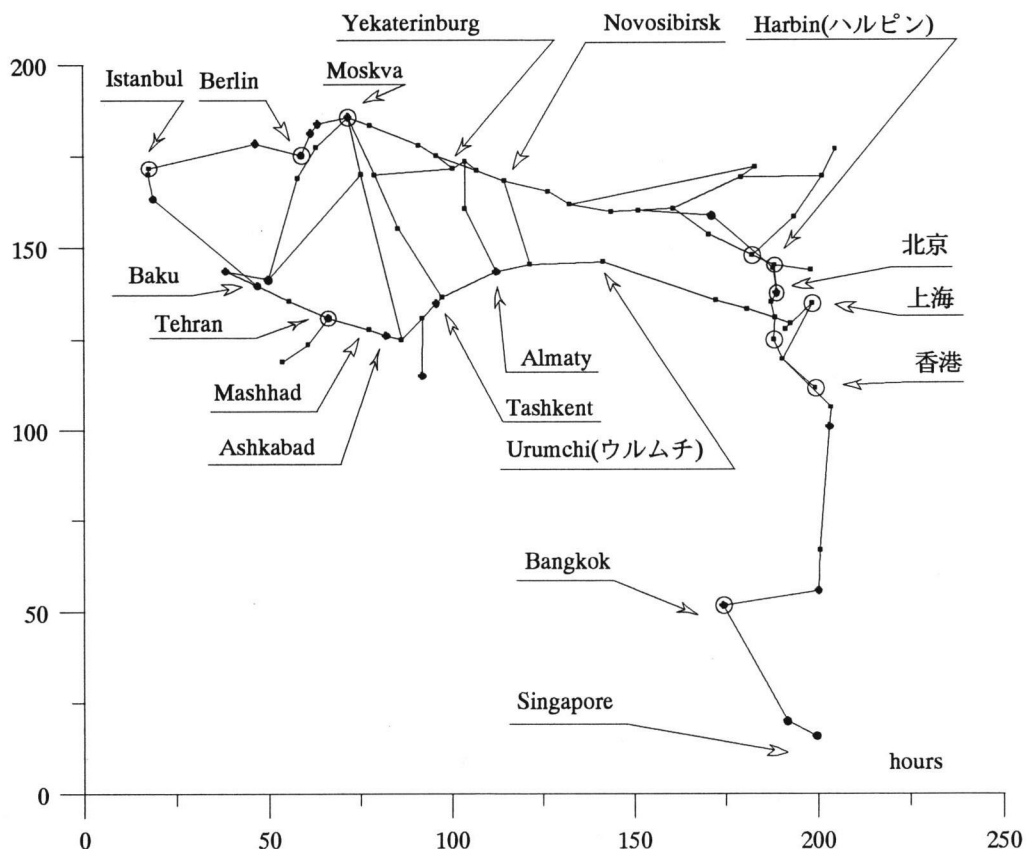


図7 視覚化時間距離網によるユーラシア時間距離地図

される都市間の所要時間はできる限り正確に表すように計算する。すなわちリンクの集合を L として最小化問題は次のようになる。

$$\min. S = \sum_{(i,j) \in L} (t_{ij} - d_{ij})^2$$

この問題を解いた結果得たのが図7である。結果として $S=0$ 、つまり標準誤差 E も0分となった。図7では、最短経路のリンクの長さを足しあげることによって、任意の二都市間の正確な所要時間を得ることができる。ただし、図7ではリンクに沿った長さのみ意味があり、2都市間の直線距離は無意味であることに注意されたい。

なお、リンク数は83（72都市間の最短所要時間考える上で、意味のない鉄道が一本あったので図1等より一

本少ない）であった。図7ではKhabarovsk等西シベリア地域や、Istanbulの所要時間から見た立地の悪さがわかる。

4. 単純化時間地図～一次元時間地図とその活用

多次元尺度法の考えを応用して一次元上に都市の位置を決定することもできる。すなわち目的関数は

$$\min. S = \sum_{i < j}^n (t_{ij} - |x_i - x_j|)^2$$

として、数直線上に都市の位置 x_i を与えるわけである。二次元上に配置した時間地図に比べ、所要時間の精度が落ちるが、各都市の位置を一つの数値で与えるので、都

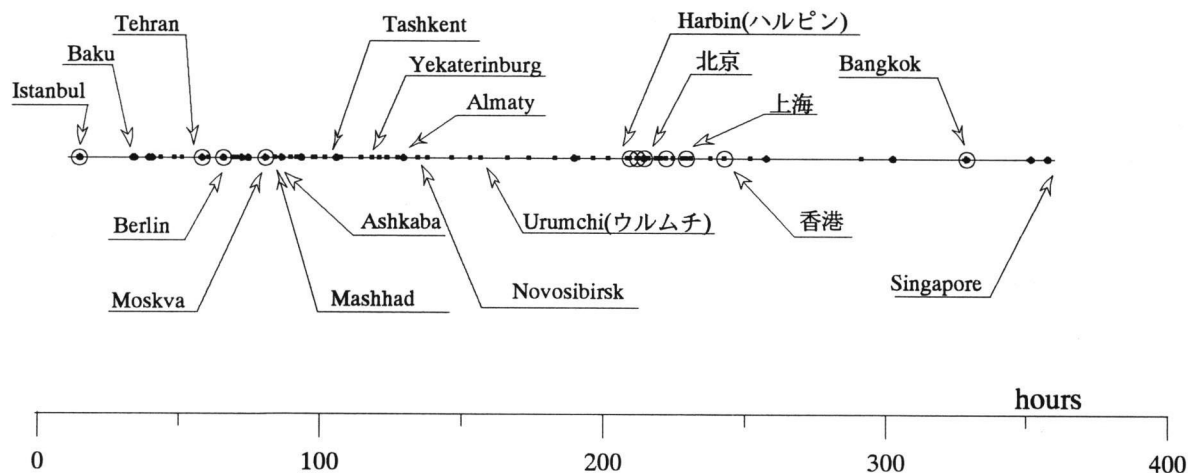


図8 一次元時間地図

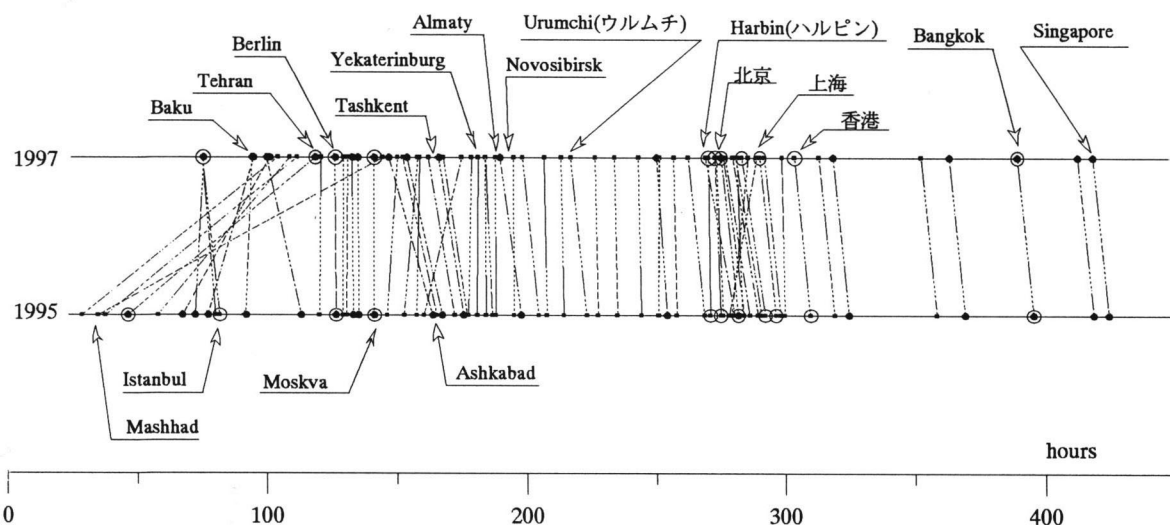


図9 一次元時間地図による鉄道路線開通効果の視覚化

市間関係の把握には便利といえよう。その結果は図8で与えられ、ここで相対的に位置が中央にある都市ほど対象地域の中でのアクセスが便利であるといえる。なお、決定係数は0.92、標準誤差は21.99時間となった。つまり、この図の方がメルカトル図法や測地線距離について最良にした地図(図1)よりも時間地図としては精度がよい。

Mashhad-Ashgabad間の鉄道がない時点での一次元時間地図を作ると、標準誤差は18.42時間となり当該鉄道の開通によって標準誤差が大幅に悪くなったことが判る。すなわちこれは、鉄道網が2次元的、平面的になるほど、一次元の地図で表すことの無理が大きくなっていくことを示していると思われる。

一次元の地図を平面の上で表すときには次元に余裕があるので、二時点間の比較が分りやすくてできる。すなわち図9のように1995年と、Mashhad-Ashgabad間開通後の1997年との地図を並べ、同じ都市を線でつなげばどの都市が新路線の恩恵を受けているのかを知ることができる。図9ではMashhad, TehranといったIRANの都市の位置が大きく内側へと変化していることがわかる。

5. 単純化時間地図のバリエーション

一次元時間地図は最も単純化した時間地図と位置付けられるが、これと2章・3章で示した二次元的な時間地

図との中間的な時間地図も考えることができる。

(a) 楕円時間地図

図10は楕円上に都市を配置した時間地図である。この地図を考える発端は一次元の時間地図を二直線にしたら?という考え方であり、ここで楕円の長軸を無限に伸ばせば二直線と同様のこととなるので、これは二直線の考え方も含んでいる地図といえる。関数は媒介変数 θ を用いて

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = b \sin \theta \end{cases}$$

と書ける。係数の推定は、多次元尺度構成法の場合(式(1))と同じであるが、時間地図上での距離 d_{ij} を

$$d_{ij} = \sqrt{(a \cos \theta_i - a \cos \theta_j)^2 + (b \sin \theta_i - b \sin \theta_j)^2}$$

とおき、係数 a, b, θ_i ($0 \leq \theta_i < 2\pi; i=1, \dots, 72$)を推定した。推定結果は初期値に影響されて安定しないので図10の結果が最良という保証はない。結果としては、短軸が58.3時間、長軸が425.0時間の楕円となった。IstanbulとSingaporeが両端となったのは一次元時間地図と同じであるが、RUSSIAの都市が北側に、中国の都市が南側に配置されることとなったのは、所要時間に関するまとまりを考え

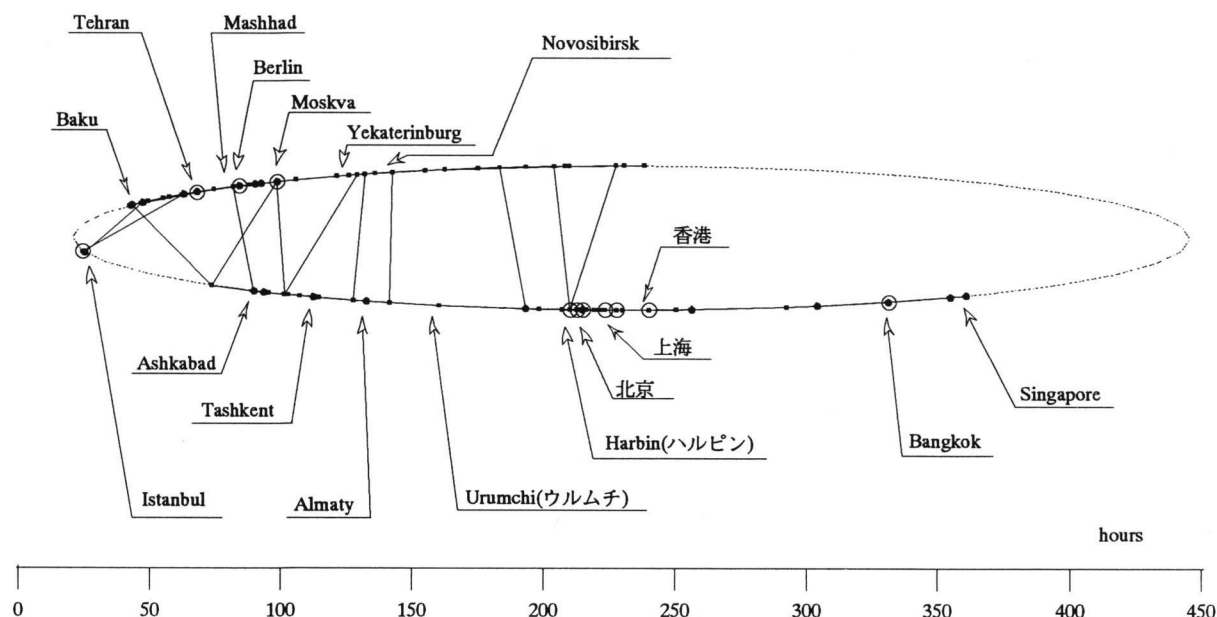


図10 楕円時間地図

る上で興味深い。なお、この地図での決定係数は0.93、標準誤差は17.3時間となった。図2の地図に比べれば精度は悪く問題にならないが、一次元時間地図よりは2割程度精度が上がっている。

(b) 八の字(∞)型時間地図

図11は八の字型(∞)の曲線上に都市を配置した時間地図である。この曲線は楕円の数式を少し変化させれば得ることができる。所要時間におけるユーラシア大陸の「十字路」を求めたいという考え方からこの関数を取り上げた。関数形は媒介変数 θ を用いて

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = b \sin 2\theta \end{cases}$$

と表される。係数の推定は、楕円の場合と同様に式(1)を用いるが、ここでは時間地図上での距離 d_{ij} を

$$d_{ij} = \sqrt{(a \cos \theta_i - a \cos \theta_j)^2 + (b \sin 2\theta_i - b \sin 2\theta_j)^2}$$

とおき、係数 a, b, θ_i ($0 \leq \theta_i < 2\pi; i=1, \dots, 72$)を推定した。ここでも推定結果は初期値に影響されて安定せず、従って図11の結果が最良という保証はない。結果では、短軸が91.7時間、長軸(横方向の差し渡し)が408.3時間

となった。IstanbulとSingaporeが両端となったのはこれまでの単純化時間地図と同じである。地域の十字路に当たる場所には北京が位置した。ただし、都市の配置を見ると十字路口というより三叉路といった方がよいように見える。鉄道で東南アジア方面に行くためには中国を通らざるを得ないことが反映されているといえよう。

なお、この地図での決定係数は0.93、標準誤差は17.09時間となり、精度は楕円時間地図よりもわずかによい程度といえる。しかし最悪の誤差の値では楕円時間地図がほぼ100時間であるところ、こちらは76時間とかなり優越している(表2参照)。

6. ま と め

以上でユーラシア大陸の鉄道網による所要時間をデータとした都市位置関係の表現結果を示した。そして新規に鉄道を建設したときの地域への効果を視覚化した結果について示し、またいくつかの単純化した時間地図のアイデアも実例とともに提示した。以上による推定結果のまとめを表2に示す。二次元の標準的な多次元尺度構成法の精度がよいのは当然であるが、実用的な価値は今回新たに提示した軸線付きの時間地図、視覚化時間距離網、一次元時間地図にもかなりあると思っている。

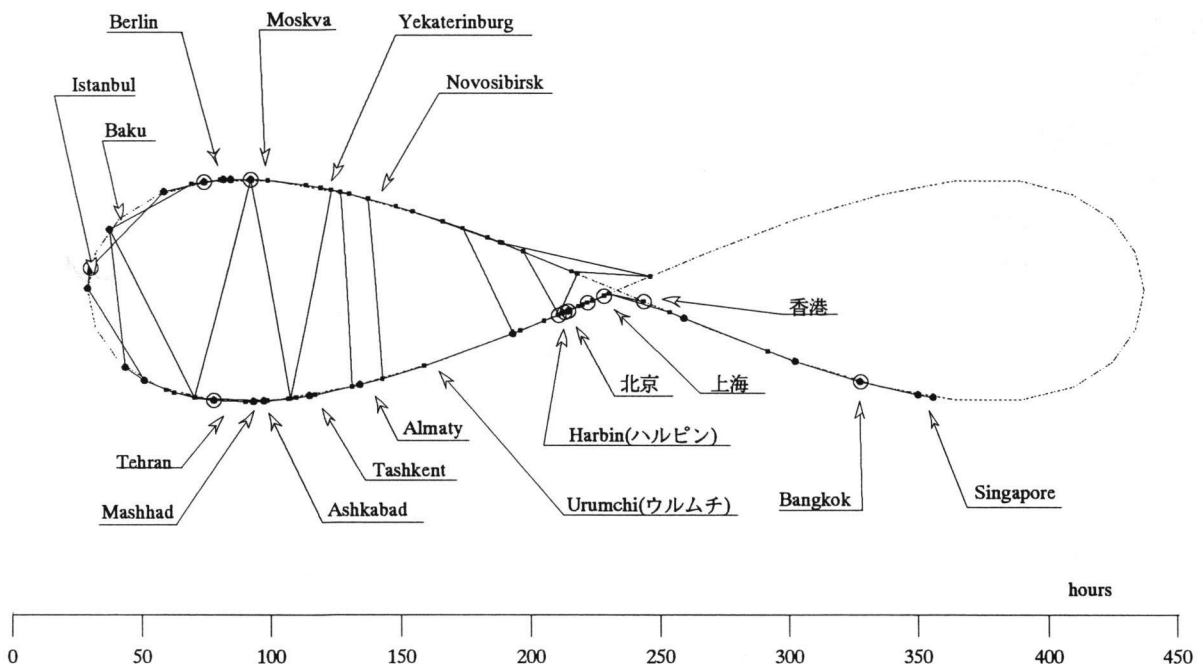


図11 八の字型時間地図

また、楕円や八の字曲線等の時間地図は地形的なものとの整合性など、価値を発揮する場合・用途・条件について考えていけばより可能性が開けるかもしれない。

謝 辞

本研究はインフラストラクチャー問題研究部会(主査：柳井浩先生(慶應義塾大学))において頂いた、多くのコメントやアイデアが大変参考になった。また軸線付き時間地図のヒントは腰塚武志先生(筑波大学)から頂いた。ここに深く感謝の気持ちを申し上げます。

参考文献

- 1) 茨木俊秀、福島雅夫(1991):FORTRAN 77 最適化プログラミング、岩波書店。
- 2) 小池聖一郎(1998):ユーラシア鉄道網のマクロの評価モデル、慶應義塾大学理工学研究科修士論文要旨。
- 3) 古藤 浩(1995):時間距離網による都市連関構造の視覚化、都市計画論文集、No.30、pp.553-558。
- 4) 古藤 浩(1996):時間距離網の視覚化と地域構造分析―東北地方の都市連関構造―、東北芸術工科大学紀要、Vol. 3、pp.94-103。
- 5) 古藤 浩(1997):地域構造と視覚化時間距離網、GIS ー理論と応用、vol. 5、No. 2、pp.1-10。
- 6) 古藤 浩(1999):ユーラシア大陸鉄道網における時間距離と主要都市の位置関係―多次元尺度構成法による表現、インフラストラクチャー問題に関する基礎研究、1998年度中間報告。
- 7) 古藤 浩(2000):さまざまな時間地図によるユーラシア大陸鉄道網の把握、インフラストラクチャー問題に関する基礎研究、1999年度中間報告。
- 8) 栗田治、小池聖一郎(1999):ユーラシア鉄道網の特性分析、インフラストラクチャー問題に関する基礎研究、1998年度中間報告。
- 9) 清水英範(1992):時間地図の作成手法と応用可能性、土木計画学研究論文集、No.10、pp.15-29。
- 10) 東京大学教養学部統計学教室編(1994):人文・社会科学の統計学、東京大学出版会。
- 11) Torgerson(1952): Multidimensional Scaling : I, Theory and Method. Psychometrika, Vol.17、pp. 401-419。
- 12) 森口他(1956): 数学公式 I 微分積分・平面曲線、岩波書店。

表 2

地図名	図番号	標準誤差(hour)	決定係数	最悪誤差(hour)	96年以前標準差(hour)
メルカトル図法		40.25	0.61	161.81	—
測地線距離	図 1	26.15	0.82	121.00	39.58
単純な多次元尺度構成法	図 2	6.31	0.99	38.88	5.71
軸先付きの多次元尺度構成法	図 6	7.70	0.97	58.21	—
視覚化時間距離網 (推定精度の意味が他の地図とは異なる)	図 7	0	1	0	—
一次元	図 8	21.99	0.92	109.35	18.42
楕円時間地図	図10	17.30	0.93	99.67	—
八の字型時間地図	図11	17.09	0.93	76.53	—

表 3

NO	都市名	NO	都市名	NO	都市名	NO	都市名	NO	都市名	NO	都市名	NO	都市名
1	Berlin	2	Warsaw	3	Minsk	4	Moskva	5	Perm'	6	Yekaterinburg	7	Omsk
9	Krasnoyarsk	10	Taishet	11	Irkutsk	12	Ulan-Ude	13	Khabarovsk	14	Vladivostok	15	ハルビン
17	Chita	18	Ulan Bator	19	大同	20	北京	21	シェンヤン	22	平壤	23	石家荘
25	武漢	26	長沙	27	憑祥	28	Hanoi	29	Ho-Chi Minn	30	上海	31	香港
33	徐州	34	Goliki	35	西安	36	蘭州	37	ウルムチ	38	Aktogai	39	Almaty
41	Samarkand	42	Ashkabad	43	Tbilisi	44	Dushanbe	45	Arys	46	Okt'abr'skil	47	Samara
49	Petropaul	50	Kurgan	51	Mashhad	52	Tehran	53	Kerman	54	Esfahan	55	Tabriz
57	Yereban	58	Khark'kov	59	Ankara	60	Izmit	61	Budapest	62	Istanbul	63	Tynda
65	Komsomol'sk-na-Amure	66	Charjew	67	Saratov	68	Baku	69	Phnom Penh	70	Bangkok	71	Singapore
												72	Kuala Lumpur