

# 目的地までの所要時間を考慮した時間地図の作成

鈴木 宏典<sup>\*1</sup> 佐藤 正人<sup>\*1</sup>

## Development of Time-Distance Map Integrated with Travel Time Information

Hironori Suzuki<sup>\*1</sup> and Masato Satoh<sup>\*1</sup>

**Abstract** - In general, conventional traffic information for traveler is given as a real distance-map together with some levels of traffic congested states. Usually, each level has given a different color and is illustrated on the conventional distance map. In addition, travel time information, which is one of the most important information for traveler's route choice behavior is solely provided by its numerical data only. These conventional ways of providing the traffic information are not very helpful for driver's decision-making especially for the route choice behavior because they are consisted by the mixture of isolated information such as "distance-map", "congested level" and "travel time data". This research attempts to develop a Travel-Time-Distance map (TDM) in which the travel time between origin-destination (OD) pair is illustrated as the numeric distance on the map. Given the travel time information of each OD pair, the Shimizu-Inoue (S-I) method is used to transform the conventional map into the TDM for a part of the Tokyo Metropolitan Expressway. Numerical analyses showed that the S-I method was successful in integrating the congested level and the travel time into a conventional map to draw the TDM.

**Keywords:** time-distance map, travel time, driver assistance system and route choice behavior

### 1. はじめに

現在、都市内・都市間を問わず順次高速道路が開通し、ドライバにとってより豊富な経路選択が可能となっている。経路選択の際に重要となる道路混雑状況や所要時間情報は、カーナビゲーションシステム（以下、カーナビ）やスマートフォンからドライブ中にも容易に取得できるようになってきた。これらの交通情報は、一般的な地図（以下、距離地図）の上に、色分けされた混雑状況が提示され、あるいは所要時間情報はその数値がテキストで提供されることが一般的である。

しかしながら、交通情報が「距離地図＋混雑状況」として二重化されているがゆえに、仮に所要時間が数値で与えられたとしても、「目的地までの所要時間最小化」という戦略を考えたとき、ドライバは直感的に効率の良い経路を認識することが難しい場面もある。

そこで本研究では、ドライバに直感的な経路選択を促すことを念頭におき、交通情報を従来の二重の「距離地図＋混雑状況」ではなく、目的地までの所要時間を距離で一元的に表現した「時間地図」で表す試みを行う。

### 2. 先行研究の整理

清水<sup>[1]</sup>によると、「時間地図」と呼ばれる初期の時間地図は、ある一地点に着目しそこを中心として複数の地点までの所要時間を距離に置き換えて地図を歪めたものであった。したがって、中心以外の点間の距離はその妥当性は必ずしも担保されず、用途は非常に限定されていた。

そこで清水<sup>[1]</sup>は、多次元尺度構成法（Multi-dimensional Scaling, 以下 MDS）をベースに、他地点間の距離指標が与えられた時、この位置関係を最も適切に表現する時間地図の作成手法を複数提案した。MDS では、時間地図上の地点間距離と所与の所要時間の差分を目的関数として設定し、これを最小にするように地点の座標を決定する非線形最小二乗問題を解く。しかし、MDS は全ての地点間の所要時間を必要とするだけでなく（後にこれを完全ネット型時間地図と定義<sup>[2]</sup>）、変換後の位相が破壊されるため利便性が高いとは言えなかった。その後、清水・井上<sup>[2]</sup>は、完全ネット型時間地図ではなく一部の地点間の所要時間のみで構成する時間地図（以下、部分ネット型時間地図）を前述の非線形最小二乗問題として定式化し、これを Levenberg-Marquardt 法（以下、L-M 法）を応用した汎用手法（Shimizu-Inoue 法、以下 S-I 法）で解いた。そして、L-M 法に比べて精度が高いことや地点の相対的な位置関係が極端に乱れにくい手法であることを示した。

清水・井上<sup>[2]</sup>は鉄道を対象とし、鉄道の高速化による日本全土の所要時間の短縮効果を視覚的に表現した、いわば「静的な時間地図」を作成した。このため、地点間の所要時間に上り・下りの別は無く、更新は十年単位である。これに対し、本研究の対象は自動車であり、ある起終点（Origin-Destination, 以下 OD）間の時々刻々と変化する所要時間を S-I 法を用いて「動的な所要時間地図」として表現する。O から D 方向のみの所要時間を利用し、更新は新しい所要時間情報が得られる数分単位を想定する。時々刻々と変化する交通状況に応じて時間地図を更新し、これをスマートフォンやカーナビで動的に提供して、ドライバの適切な経路選択を促すことに資する。

<sup>\*1</sup>: 日本工業大学 工学部機械システム学群

<sup>\*1</sup>: Department of Mechanical System Engineering, Nippon Institute of Technology

### 3. S-I 法

#### 3.1 非線形最小二乗問題の定式化

ある OD ペアの起点と終点の時間地図上の位置座標をそれぞれ  $(x_o, y_o)$ ,  $(x_d, y_d)$ , 所要時間を  $t_{od}$  ( $o=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $d=0, 1, 2, \dots, n$ ) とする. ただし,  $(x_0, y_0)$  の座標は既知とし, 未知の座標は  $o=1, 2, \dots, n$ ,  $d=1, 2, \dots, n$  とする. また, 所要時間が与えられた OD の集合を  $L$  とする. ここでは, 部分ネット型時間地図を作成するため,  $L$  は全ての OD の組み合わせを対象としなくてよい. この時, 時間地図上の OD 間距離と与えられた  $t_{od}$  の差分が最も小さくなるように  $(x_o, y_o)$ ,  $(x_d, y_d)$  を決定すれば良い. したがって, (1) 式 of の非線形最小二乗問題として定義できる.

$$\min J = \sum_{od \in L} \left( t_{od} - \sqrt{(x_d - x_o)^2 + (y_d - y_o)^2} \right)^2 \quad (1)$$

#### 3.2 S-I 法による解法

S-I 法では, 時間地図上の OD ペアの座北方位角が距離地図上のそれと極力乖離しないようなアルゴリズムが組まれている. 例えば, 東京を起点, 札幌を終点とした場合, OD のベクトルは北東方向になるが, 時間地図でもこのベクトルが同方向になり, 距離地図上の地点の位置関係が破壊されるのを極力防ぐ.

最終的に, S-I 法で定義される非線形最小二乗問題は, (2) 式のように定義される.

$$\min J = \sum_{od \in L} \left[ \left( t_{od} \sin \theta'_{od} - (x_d - x_o) \right)^2 + \left( t_{od} \cos \theta'_{od} - (y_d - y_o) \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここに,  $\theta'_{od}$  は時間地図上の OD ペア  $od$  の座北方位角  $\theta_{od}$  の近似値である. (2) 式は, OD 所要時間の正弦と余弦が, それぞれ時間地図上の  $x$  軸,  $y$  軸方向の差分と限りなく等しくなるように地点の座標を定めることを示している. (2) 式は  $x$  軸,  $y$  軸方向それぞれ独立して解いても構わないため, (3) 式のように分割する.

$$\begin{cases} \min J_x = \sum_{od \in L} \left( t_{od} \sin \theta'_{od} - (x_d - x_o) \right)^2 \\ \min J_y = \sum_{od \in L} \left( t_{od} \cos \theta'_{od} - (y_d - y_o) \right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式のそれぞれの式を未知数  $x_o$  (または  $x_d$ ), 及び  $y_o$  (または  $y_d$ ) で偏微分してそれを 0 と置いて等式を得る. O か D のいずれで偏微分して 0 と置いても等式は同一である.

$$\begin{cases} \frac{\partial J_x}{\partial x_o} = 0 \Leftrightarrow 2 \sum_{od \in L} \left( t_{od} \sin \theta'_{od} - (x_d - x_o) \right) \cdot (-1) = 0 \\ \frac{\partial J_y}{\partial y_o} = 0 \Leftrightarrow 2 \sum_{od \in L} \left( t_{od} \cos \theta'_{od} - (y_d - y_o) \right) \cdot (-1) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

各起点  $o$  ( $=1, 2, \dots, n$ ) に着目し, 結合している終点  $d$  に対して既知の  $t_{od}$  と  $\theta'_{od}$  を (4) 式のそれぞれに与えれば,  $x$

座標,  $y$  座標それぞれ  $n$  本の等式が得られる. 未知数  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  及び  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  と等式の数が一致しているため, 未知数の集合をそれぞれ  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  及び  $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$  として, (5) 式の行列計算で未知数が求められる.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C}_x, \quad \mathbf{y} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C}_y \quad (5)$$

ここに,  $\mathbf{A}$  は式 (4) の  $x_o, x_d$  及び  $y_o, y_d$  の係数行列,  $\mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y$  は  $t_{od}$  と  $\sin \theta'_{od}$  及び  $\cos \theta'_{od}$  を含む式 (4) の定数項の係数行列である. ただし, 前述した通り,  $(x_0, y_0)$  の座標は既知の値を常に入力する.

図 1 に計算手順を示す. 初期設定として,  $t_{od}$  を準備し, これと距離地図上の各 OD ペアの座北方位角を  $\theta'_{od}$  として  $\mathbf{A}, \mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y$  を計算する. 次に, (5) 式により  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{y}$  を求める. 得られた  $(x_o, y_o), (x_d, y_d)$  は時間地図上の座標であり, この値から座北方位角  $\theta_{od}$  を計算する. 前ステップの  $\theta'_{od}$  と現ステップの  $\theta_{od}$  の誤差が収束条件を満たせば計算を終了させ, そうでない場合は  $\theta_{od}$  を  $\theta'_{od}$  として改めて  $\mathbf{A}, \mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y$  を計算し, 収束するまで繰り返し  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{y}$  を求める.

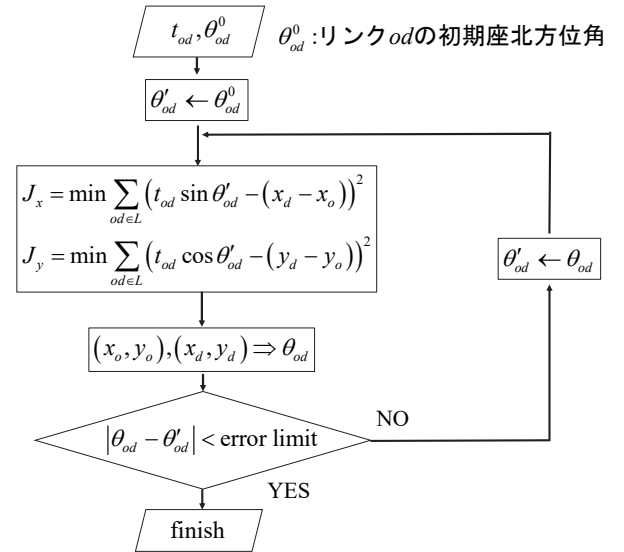


図 1 S-I 法による計算手順<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 Computation Procedure by the S-I Method.

### 4. 数値計算例

#### 4.1 対象道路ネットワークと経路

図 2 に示す首都高速道路の一部を対象とした. 起点を 6 号三郷線の三郷 JCT, 終点を 3 号渋谷線の用賀とする. 小菅, 江戸橋 JCT を経由して都心環状線から用賀に至る経路 (経路 A) と, 小菅から中央環状線に入り熊野町と大橋 JCT を経由して用賀に至る経路 (経路 B) の 2 つを設けた.

三郷, 小菅, 江戸橋, 熊野町, 大橋, 用賀, 葛西の 7 地点の座標は図 2 に示す経度と緯度で与えた. 江戸橋を  $(x_0, y_0)$  とし, この座標は常に所与とした. OD ペアの所要時間  $t_{od}$  は図 2 でリンクが結合された OD のみに与え, 矢印方向の所要時間とした. 表 1 に OD 所要時間を示す.

## 4.2 シナリオ

経路 A と経路 B の走行距離はほぼ同一であるが、時間地図の再現性を検証するため、以下のシナリオを設けた。

シナリオ 1：経路 A の所要時間を 90 分、経路 B を 40 分とするシナリオ

シナリオ 2：経路 A の所要時間を 50 分、経路 B を 90 分とするシナリオ

各シナリオに対し、所要時間の変化が時間地図に適切に反映されるかを評価する。

## 4.3 収束判定

繰り返し計算 1 ステップ毎に位相が入れ替わることが確認されたため、前 2 ステップと当該ステップでの地点座標を参照し、(6)式が満たされた段階で収束とした。図 1 の収束条件とは異なるが、本質的には同一である。

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \left( x_i^{(k)} - x_i^{(k-2)} \right)^2 + \left( y_i^{(k)} - y_i^{(k-2)} \right)^2 \right)}{n}} < 1.0 \times 10^{-3} \quad (6)$$

ここに、 $x_i^{(k)}$  は第  $k$  回目の繰り返し計算の地点  $i$  の  $x$  座標を表す。

## 4.4 計算結果

図 3~4 にシナリオ別の時間地図を示す。まず、両図とも一部を除いて 7 地点の位置関係は大きく破壊されていないことが確認された。

シナリオ 1 において (図 3)，経路 B では小菅から大橋 JCT までは直線的に移動し用賀に至る経路が示された。一方、経路 A では小菅から江戸橋まで大橋 JCT を遥かに超えて移動し、U ターンする形で大橋 JCT に戻り用賀に至る経路が示された。所要時間の長い経路 A が遠回りであることを直感的に理解できる時間地図が得られた。これとは逆に、シナリオ 2 では (図 4)，所要時間の長い経路 B が明らかに遠回りとして表現される時間地図が作成された。これらの結果から、ドライバに対して効率的な経路選択を促しやすい、所要時間を適切に反映した時間地図が作成できることを確認した。

## 4.5 評価

図 5~6 に、横軸に OD ペアの実所要時間(分)、縦軸に時間地図上の直線距離(分)をプロットしたグラフを示す。シナリオ 1 では  $R^2=0.9893$ ，シナリオ 2 では  $R^2=1.000$  と良好な結果が得られた。表 2 に、各経路の実際の所要時間と時間地図上の直線距離を含む各種統計量を比較する。シナリオ 1 の経路 B では 5 分ほど時間地図上の直線距離が長くなったが、それ以外では両者は完全に一致した。

計算時間は処理速度 1.20 GHz の CPU で 51 ms (シナリオ 1)，5 ms (シナリオ 2) であり、収束までの計算回数はそれぞれ 55 回、23 回であった。計算プログラムには、単純な行列計算の繰り返しのみで複雑な計算は含まれていない。計算コストは非常に小さく、ネットワークが拡大しても実時間処理には十分耐え得ると判断できる。

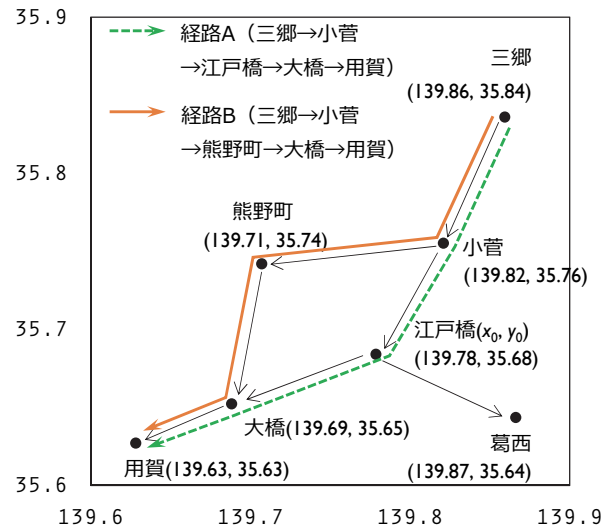


図 2 対象とする道路ネットワークと地点  
Fig. 2 Road Network and Waypoints for Evaluation.

表 1 OD の所要時間  
Table 1 OD travel time.

| 終点<br>起点 | 江戸橋        | 三郷 | 小菅 | 熊野町        | 大橋         | 葛西 | 用賀 |
|----------|------------|----|----|------------|------------|----|----|
| 江戸橋      |            |    |    |            | 20<br>(15) | 12 |    |
| 三郷       |            |    | 10 |            |            |    |    |
| 小菅       | 50<br>(15) |    |    | 10<br>(40) |            |    |    |
| 熊野町      |            |    |    |            | 10<br>(30) |    |    |
| 大橋       |            |    |    |            |            | 10 |    |
| 葛西       |            |    |    |            |            |    |    |
| 用賀       |            |    |    |            |            |    |    |

単位:分, ( ) 内はシナリオ 2, 他は全シナリオ共通

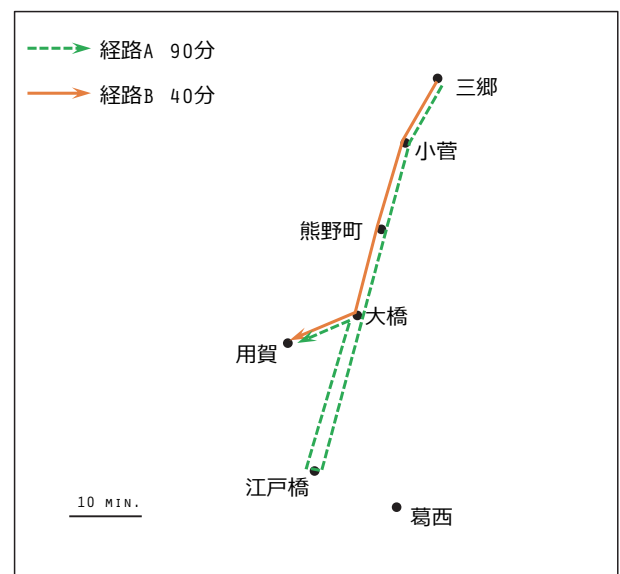


図 3 シナリオ 1 の時間地図  
Fig. 3 Travel Time Distance Map for Scenario 1.

## 5. おわりに

鉄道整備に伴う所要時間の変化を時間地図で表現した S-I 法を活用し、本稿では、目的地までの複数の経路の所要時間差を視覚的に表現する時間地図の作成を試みた。首都高速道路の一部の地点を対象とし、仮想の所要時間情報を与え、複数のシナリオで時間地図を作成した。この結果、地点の位相はほぼ維持され、所要時間の長短が時間地図上の距離の長短として顕著に反映されることを確認した。また、その精度や実時間を想定した計算速度も十分確保されていた。

これにより、距離地図に混雑状況を重ねる形で二元的に表されていた従来の交通情報が、時間地図で一元的に表現可能となることが明らかとなった。時間地図をスマートフォンの地図アプリやカーナビ等で逐次提供すれば、ドライバに対して直感的に時間効率の高い経路選択を促すことができ、今後さらに道路ネットワークが拡充する中で、動的な交通の分散に資することが期待される。

今後は、対象ネットワークをさらに拡大して検証を行うと同時に、時間地図の提供に対するユーザの官能評価や受容性を評価する。

## 参考文献

- [1] 清水: 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 (1992).
- [2] 清水・井上: 時間地図作成問題の汎用解法; 土木学会論文集 No. 765/IV-64, pp.105-114 (2004).

表 2 各種統計量の比較  
Table 2 Statistics for Computation.

| 経路             | シナリオ 1 |           | シナリオ 2 |    |
|----------------|--------|-----------|--------|----|
|                | A      | B         | A      | B  |
| 走行距離 (km)      | 40     | 41        | 40     | 41 |
| 所要時間 (分)       | 90     | <u>40</u> | 50     | 90 |
| 時間地図上の直線距離 (分) | 90     | <u>45</u> | 50     | 90 |
| 重相関係数 $R^2$    | 0.9893 |           | 1.000  |    |
| 収束回数 (回)       | 55     |           | 23     |    |
| 計算時間 (ms)      | 51     |           | 5      |    |

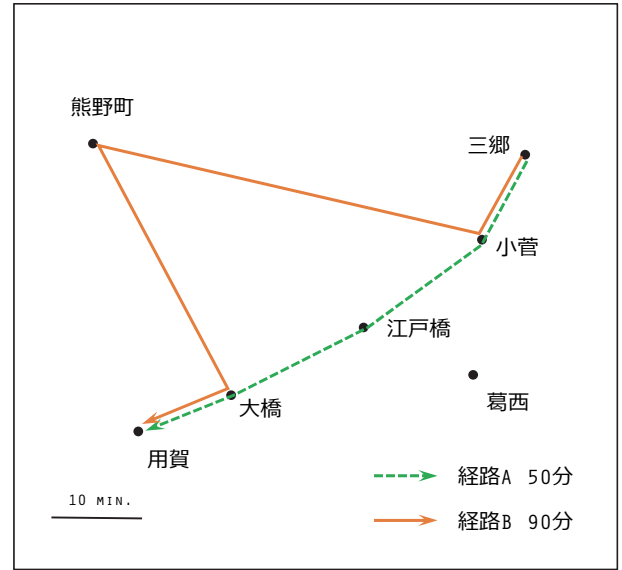


図 4 シナリオ 2 の時間地図  
Fig. 4 Travel Time Distance Map (Scenario 2).

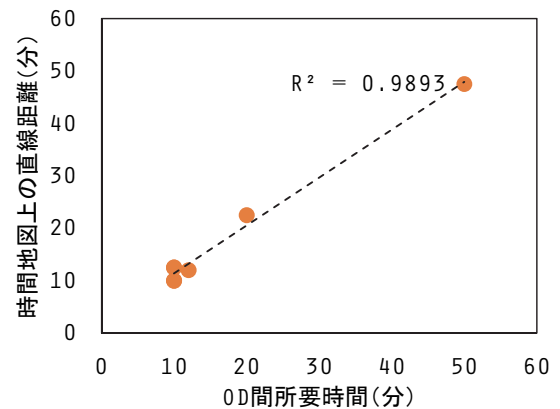


図 5 OD 間所要時間と時間地図上の距離の比較  
Fig. 5 OD Travel Time vs. Time Distance (Scenario 1).

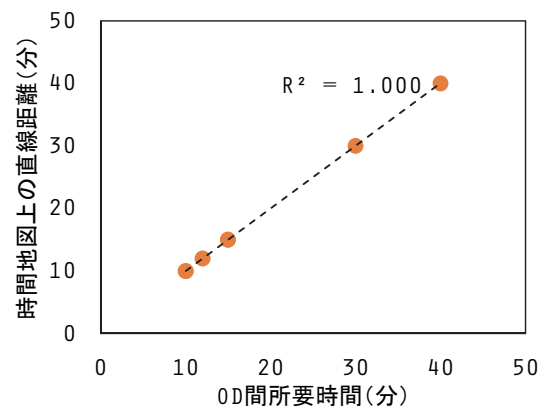


図 6 OD 間所要時間と時間地図上の距離の比較  
Fig. 6 OD Travel Time vs. Time Distance (Scenario 2).