

第3章 プローブカーデータ利用技術の開発

3.1 交通行動分析用データへの変換

プローブカーデータが提供する車両走行軌跡は緯度・経度などの座標情報であり、この情報のみでは車両がどの路線を走行しているかを判断することはできない。もちろん、正確な走行ルート情報を用いなくても、ゾーン内で発生する急発進・急加速データの集計や、前章で示したようなゾーン間旅行時間など分析可能な項目は多い。しかし、プローブカーデータの優位性である“時々刻々と変化する交通状況の把握”や、調査対象者の記憶に基づかない“詳細な走行経路に関する情報の取得”などには、走行経路特定作業は必要不可欠である。つまり、プローブカーデータを詳細な交通行動分析用データとして利用するためには、DRM データ上におけるプローブカーの走行位置を特定する作業が必要となる。本節ではこのようなデータ変換方法について説明を行う。

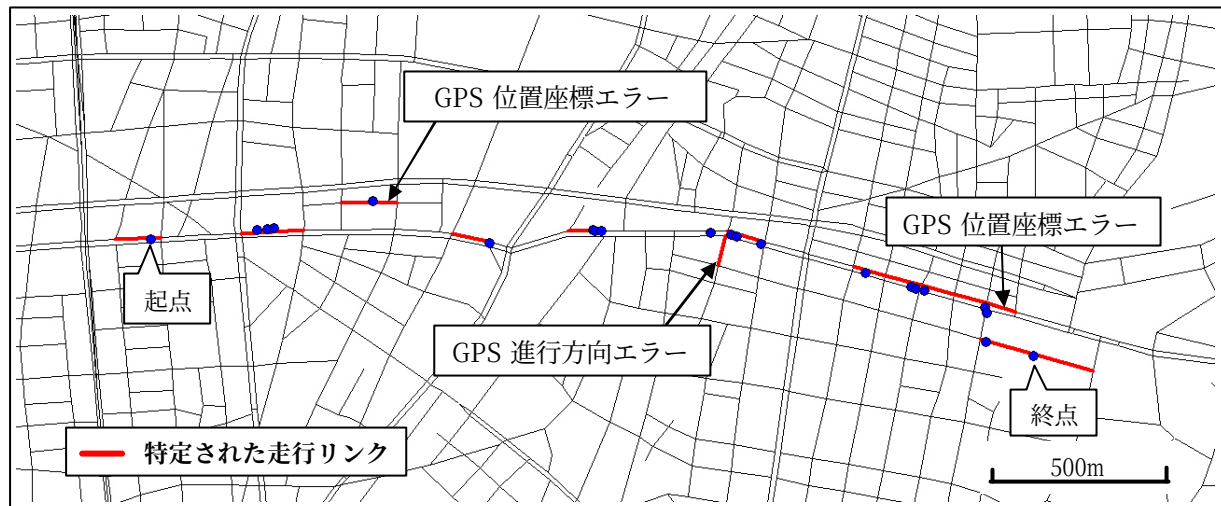
3.1.1 近接リンク法

前章でも述べたが、本研究で使用するプローブカーデータは、センターサーバにデータを蓄積する際に走行路線を特定する作業を行っている。ここで用いられる手法は非常に簡単なものであり、処理に要する時間が非常に少ない反面、問題点も多い。この手法を本研究では“近接リンク法”と呼び、以降にその特徴や問題点を述べる。

近接リンク法は車両の走行経路を特定するわけではない。プローブカーが提供する車両位置座標と進行方向の情報を用いて、DRM リンクの中から最も近いリンクを抽出し、抽出されたリンク上に走行位置を暫定的に特定するものである。しかし、GPS により測定された位置座標は数 m～十数 m 程度の誤差を含み、また進行方向についても必ずしも正確ではないことが知られている（機械システム振興協会，2000）。このため、この手法で特定された走行路線は特定ミスを含むことが多い。図 3-1 は、近接リンク法により特定されたプローブカーの走行路線を示しているが、走行路線の特定ミスが多く発生しており、特定された走行リンクをつなぎ合わせても走行経路とはならないことが容易に分かる。

近接リンク法の利点としては、処理速度が速いことが挙げられる。これは、プローブカーからデータが送信される毎に、その位置座標や進行方向を用いて即座に、かつ各データを独立に扱って走行リンクを特定するため、リアルタイムにデータ処理を行うことが可能である。また、本研究で使用するプローブカー車載機にも含まれるように、車載機にカーナビゲーションシステムが装備されている場合は、車両位置座標が DRM リンク近くに補正されている（ただし、カーナビゲーションシステムで用いられる DRM データに関する情報は公開されておらず、また、必ずしも分析者が使用する DRM データとは同一ではないため、カーナビゲーションシス

テムによる補正によっても、分析者が使用する DRM リンク上にプローブカーの車両位置座標が重なるとは限らない)。このため、カーナビゲーションシステムにより車両位置座標を補正することが可能な場合は、近接リンク法によっても走行路線を比較的正しく特定できる。



(車両 ID1002, トリップ : 2002/1/3 13:27:59~13:35:41)

図 3-1 近接リンク法による走行リンクの特定

走行路線が特定されれば、走行経路を特定することが困難であっても主要交差点間旅行時間など、ある一定の距離を持つ主要道路区間の通過旅行時間を算出することは可能である。図 3-2 は、近接リンク法により特定された走行リンク情報を用いる場合の主要道路区間の旅行時間算出方法を示している。プローブカーデータは必ずしも交差点通過時刻を提供しないため、上流側交差点への流入前後のプローブカー位置情報とその時刻、そして下流側交差点への流出前後の位置座標とその時刻を用いて、上流側・下流側交差点通過時刻を算出する必要がある。

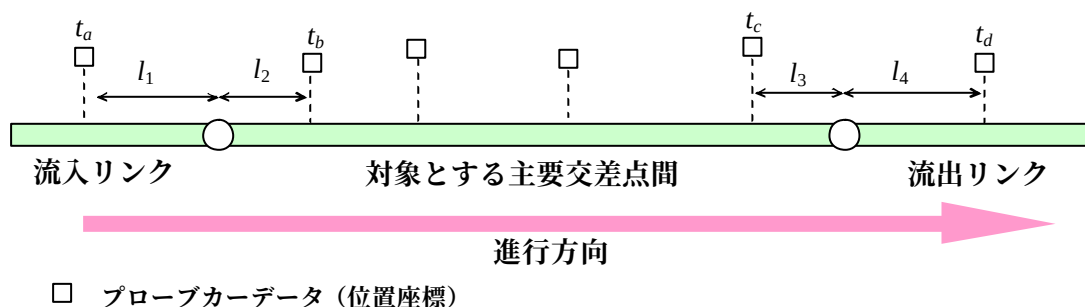


図 3-2 近接リンク法による走行リンクの特定

このとき流入時刻 T_{in} , 流出時刻 T_{out} はそれぞれ以下の式で表される。

$$T_{in} = (t_a * l_2 + t_b * l_1) / (l_1 + l_2) \quad (3.1)$$

$$T_{out} = (t_c * l_4 + t_d * l_3) / (l_3 + l_4) \quad (3.2)$$

ここに、 t_a (t_b) は上流側交差点への流入直前（直後）のデータ送信時刻、 t_c (t_d) は下流側交差点への流入直前（直後）のデータ送信時刻、 l_1 (l_2) は t_a (t_b) のデータの上流側交差点までの距離、 l_3 (l_4) は t_c (t_d) のデータの下流側交差点までの距離である。

したがって、対象交差点間の通過旅行時間は式(3.1)、(3.2)の差分として算出できる。

ここで、図 3-3 に名古屋市内の主要交差点間における通過旅行時間の算出例を示す。近接リンク法に用いた DRM データは、(財) デジタル道路地図協会の基本道路網 ver.1200（平成 12 年 3 月出版）である。この DRM データには、すべての幹線道路（県道・指定市市道以上）と 5.5m 以上の幅員をもつその他の道路が含まれる。また、旅行時間の変化を交通量の変化と比較するため、トラフィックカウンターデータより集計された時刻別交通量を同時に示す。トラフィックカウンターデータは愛知県警より借用した 2002 年 1 月～3 月のデータであり、5 分間隔の断面交通量（単一車種）である。ここでは、比較のプロブカーデータの通行回数が多く、また名古屋市中心部の幹線道路である桜通線（桜通大津交差点～丸の内交差点）を対象とした。この図より、早朝ではプロブカーから得られる旅行時間は若干ばらついているものの、その他の時間帯では交通量の変化に応じて旅行時間が変化していることが見て取れる。

近接リンク法では走行リンク特定ミスが多く発生するものの、比較的長い実験期間にわたってデータ収集を行い、また主要幹線道路の通過旅行時間等であれば比較的精度よく算出することが可能であることを示した。しかし、これは主要道路区間を対象とする場合のみである。次項では、近接リンク法による分析の限界や、より詳細なマップマッチング手法の必要性について述べる。

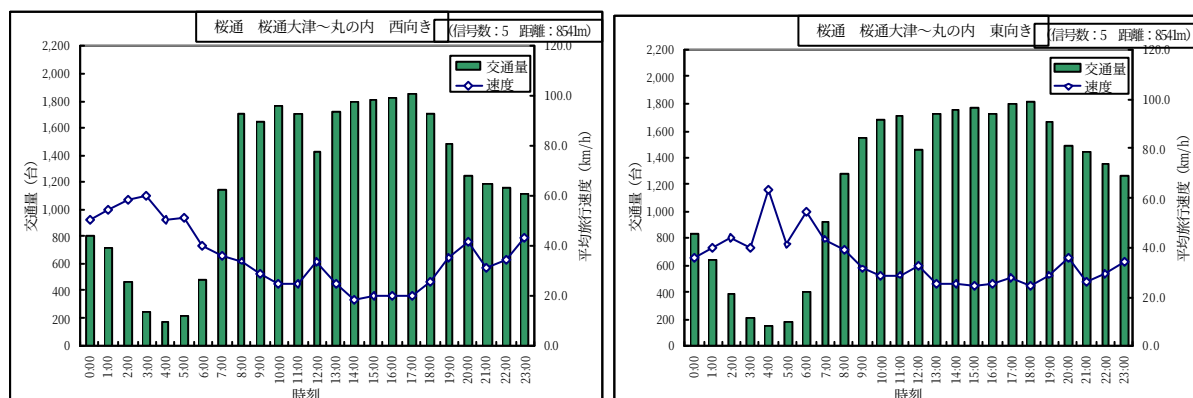


図 3-3 プロブカーデータより得られる旅行時間

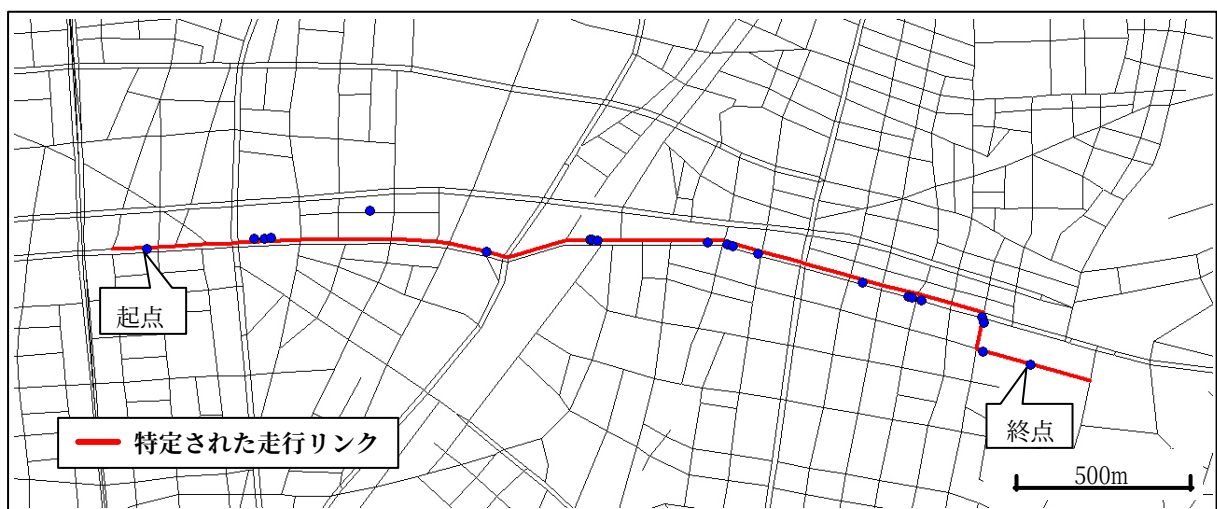
3.1.2 より詳細なマップマッチング手法の必要性

近接リンク法では、都心に位置する幹線道路区間であれば旅行時間情報を比較的多く、また

比較的精度良く収集することが可能である。ここで、対象道路区間が都心部に位置する必要性はプローブカーの通過回数による。近接リンク法により特定された走行リンク情報は、前述のように特定ミスが多く含まれる。対象道路区間通過中に他の区間への特定ミスが発生すると、旅行時間情報を算出することができない。したがって、走行リンク特定ミスの発生を考慮して、十分な走行回数が確保できる道路区間でのみ旅行時間情報を収集できる。また、プローブカーが対象区間を一度に通過する必要がある。これは、対象区間を部分的に通過する車両については、流入（出）時刻を算出できないためである。さらに、近接リンク法の情報からは経路情報を取得することはできない。

以上のような理由により、プローブカーデータを有効に利用するための走行経路特定手法が必要となる。プローブカーが提供する走行軌跡を連続する通過リンクからなる走行経路情報へと変換することができれば、経路上に存在するすべてのリンクについてその通過旅行時間を算出することが可能となる。本研究では、このように改めてプローブカーの走行経路を特定する作業を“マップマッチング”と呼ぶ。ここで、近接リンク法もプローブカーの走行路線を DRM 上に特定する点においてはマップマッチングと呼ぶことができる。したがって本来であれば、近接リンク法もマップマッチング手法の 1 つとして定義し、走行経路を正しく特定する作業は別の名称で呼称されるべきである。しかし、走行経路の特定は交通行動分析において特に重要であり、また呼び名による混乱を避けるため、本研究では“マップマッチング”を“走行経路の特定”と定義する。

図 3-4 にマップマッチング処理により特定された走行経路情報を示す。前項で示した図 3-1 と比較して、トリップ中に通過したすべてのリンクについて正しく特定されていることが分かる。このように、マップマッチングによりプローブカーが走行した経路が把握可能となり、トリップ中に経験した右左折回数や走行距離、幹線道路利用率なども算出可能となる。



(車両 ID1002, トリップ : 2002/1/3 13:27:59~13:35:41)

図 3-4 マップマッチングによる走行リンクの特定

このような走行経路の特定作業は、交通工学分野以外にもカーナビゲーションに関する研究領域や GIS に関連した研究領域においてもマップマッチングと呼ばれ、これまでも多くの研究が行われてきた。交通工学以外の研究分野におけるマップマッチングは、GPS と一体的に DRM へとリアルタイムに行われることが多く、これらの技術はすでにカーナビゲーションシステムにおいて実用化されている。名古屋実証実験で用いられたプローブカー車載機のうち Type2 車載機は、カーナビゲーションシステムを用いてその位置情報の精度を向上させている。したがって、データ送信時においてカーナビゲーションシステム内では、既にその走行路線や路線上の走行位置は把握されている。しかし、カーナビゲーションシステム内で使用しているデータやシステムに関する情報は一般には公開されておらず、車両が走行する路線についての情報のみならず、使用している電子地図データについてさえ分析者は知ることはできない (White et al., 2000)。このような背景の下、交通工学の分野においてもプローブカーによる実験が行われ始めた当初よりその必要性が高まり、これまでもプローブカーデータを対象としたマップマッチング手法の提案が行われている。これらの詳細は次節で示す。

第 2 章で示したように、情報のリアルタイム性を確保するために既存の通信ネットワークを介して情報を伝達する場合、頻繁な通信は実験費用を高額にしてしまう。このため、名古屋実証実験のようにイベントベースの通信方式を採用するか、もしくは比較的間隔の長い一定時間周期にするなどして通信回数を削減する必要がある。このようにして取得された車両の位置座標は、走行中であれば位置座標間の距離が長くなってしまい、走行経路を特定する際にカーナビゲーションシステム内で行われている手法をそのまま用いることができない。名古屋実証実験で取得されたデータでもその送信位置間の距離は最大で 300m と長く、信号などによる停止が発生しない場合は 300m 間隔で連続したデータが取得されることになる。さらに、走行中に送信エラーが発生すればその間隔は 600m 以上離れてしまうことになる。このように、イベントベースでデータ送信を行うプローブカーの走行軌跡は、走行経路を特定する際のデータ密度の観点からも問題が生じる。また、名古屋都市圏のように都市高速道路の整備された都市においては、一般道路上に立体的に配置された都市高速道路は位置座標が一般道路とほぼ一致しており、プローブカーにより得られる車両位置座標のみからではどちらの路線を走行しているかを判別することが難しい。そこで次節において、本研究で用いるプローブデータからその走行経路を DRM データ上に特定する手法を開発する。

3.2 マップマッチングアルゴリズムの開発

ここでは、本研究で用いるプローブカーデータをマップマッチングするための手法を開発する。そこで、既存のマッチング手法についてレビューすることでそれらの問題点を明確にした後、本研究で適用可能なマップマッチング手法についての検討を行う。

3.2.1 既存のマップマッチングアルゴリズム

前述の通り、マップマッチングとはプローブカーが GPS を用いて取得した車両位置座標を用いて、DRM 上にその走行経路や路線上の車両位置を特定する作業である。一般に GPS は使用者が任意に位置座標取得間隔を設定でき、カーナビゲーションシステムで使用されるマップマッチング手法は 1 秒間隔の位置動態情報を用いてマップマッチングを行っている。さらに、カーナビゲーションシステム内には自立航法システム（Dead Reckoning System）が装備されており、車両の進行角や前輪ホイールの回転速度などを基に、たとえ GPS が位置測位エラーを起こしても車両走行位置を特定し続けることができる（White, 2000; Greenfeld, 2002; Quddus, 2003）。しかし、カーナビゲーション内で適用されているマップマッチング手法や DRM データなどの詳細な情報は外部から閲覧することが難しい。

交通工学の分野で行われるマップマッチングは、プローブカーなどの走行軌跡を求めるために適用されており、リアルタイムな状況下でのマップマッチング手法についてはそれほど行われていない（小島・羽藤, 2004）。これまでに交通工学の分野で開発された代表的なマップマッチング手法には、国土交通省により開発された PROLIMAS（Makimura et al., 2002）、および朝倉らの手法（朝倉ら, 2000；Asakra and Hato, 2001）がある。ここではそれぞれの目的や使用データ、マッチング手法についてレビューした後、本研究で用いるプローブカーデータへの適用上の問題点を整理する。

a) PROLIMAS

国土交通省により開発されたマップマッチング手法として、PROLIMAS（Probe car Link Matching System）がある。プローブカーとして使用された車両は 20 台のタクシーと 20 台のトラックであり、実験期間は平成 12 年 5 月～平成 13 年 8 月である（「測量」編集委員会・GPS 小委員会編, 2002）。カーナビゲーションシステムに接続した車載システム内にメモリ機能を搭載し、これに車両の 1 秒間隔の時刻や位置座標、走行速度、進行方法を蓄積している。これにより取得されたデータを、DRM 全道路網（すべての幹線道路と幅員 3.0m 以上のその他の道路）上に以下の手順によりマップマッチングを行っている。

- <Step 1> プローブカーデータから、車両進行方向に急な変化が生じる間のデータをマップマッチング対象データとして抽出する
- <Step 2> 抽出されたマップマッチング対象データにおいて、進行方向が変化した座標間を直線で結び、これを仮ルートとする
- <Step 3> 仮ルートから半径 30m に含まれる DRM リンクを抽出する
- <Step 4> 抽出されたリンク集合内で最短経路探索（最短距離経路探索）により走行経路を特定する

Makimura et al. (2002) はこの手法により処理されたプローブカーデータからリンク通過旅行

時間を算出することで、都市圏レベルの走行速度の変化や渋滞損失、燃料消費等を空間的に分析している。ここで、2 分以上の走行停止が発生した場合は、その地点前後でそれぞれマップマッチング処理を行っている。

ただし、この手法では経路特定の際の最短経路は距離によって行われており、都市高速道路のオンランプからオフランプまでの経路と一般道路経路が完全に並行する区間で、かつ、ランプ通過により距離的に遠回りする区間では一般道路に特定されてしまうといった欠点がある。また、使用されたデータは 1 秒間隔で取得されており、本研究で使用するデータのようにデータ送信間隔が最大 300m と長い場合には、30m 範囲のリンク集合からは正確な車両軌跡が特定できない。さらには、この手法ではタクシーをプローブカーとしていながら、実車時と空車時の区別をしていない。これは、データ取得間隔が 1 秒と短く、また <Step 1> において進行方向が大きく変化する地点を抽出することで、走行経路を部分的にマップマッチングしているためである。空車時のタクシーは明確な目的地を持たず、乗客を探しながら走行する、いわゆる“ながし”走行を行い、同一地点を比較的短い時間に何度も走行する場合が発生する。数十秒や数百メートル間隔のデータ取得からは何度も通過する地点に多くの位置座標が発生し、特定された経路が実際の走行経路とは異なる場合が発生してしまうことも、本研究で使用するプローブカーデータに用いる場合の問題の 1 つとして挙げられる。

b) 朝倉ら (2000) の方法

朝倉ら (2000) は PHS による位置座標特定システムを利用して、2 分間隔でデータ取得を行っている。このシステムにより個人の位置座標情報やデータ取得時刻を収集し、センター側システムに蓄積される。実験期間は 1998 年 11 月 3 日～16 日の 14 日間であり、10 名の被験者により収集された。朝倉らはこのデータより対象個人のトリップデータを抽出し、その利用経路の特定を試みている。マップマッチングに関する基本的な手順は以下の通り。

<Step 1> トリップデータを抽出する

<Step 2> 各データ送信位置から一定距離（閾値 D ）に含まれるリンクを抽出する

<Step 3> 抽出されたリンク集合内において、起点・終点間で最短経路探索を行う

<Step 4> Screening 法により複数の経路を抽出し、個人の位置座標と経路との距離が許容範囲内にある経路のうち、OD 間の距離が最短となる経路を利用経路として特定する

ここで、Screening 法とは OD 間においてコストの小さい順に経路を列挙する方法である (D'Este, 1997; 大草ら, 1999)。この方法では、 $k+1$ 番目の経路を探索する際に k 番目経路から逸れるリンクに着目し、逸れたリンクから終点までをつなぎ合わせることで $k+1$ 番目経路を探索する。また、位置座標と経路のずれは式(3.3)で表される。

$$\sum_i^I d_i / I \quad (3.3)$$

ここに、 d_i は位置座標と経路の距離、 I は位置座標数である。

朝倉らの研究では、利用経路を特定するとともに個人の1日の活動データを取得することを目的としている。論文内においては特に滞在位置や滞在時間の特定に焦点が当てられており、経路特定精度については十分な検証を行っていない。しかし、データ取得間隔が長いという点においては本研究で用いるデータと共通しており、また候補となる経路集合を複数探索した後、尤もらしい経路を利用経路として特定する考え方は、都市高速道路と一般道路が立体的に並行する場合にも適用可能であると考えられる。ただし、立体的に並行する路線からどちらかを走行路線として特定する際には、位置座標のみを用いるのではなく何らかの修正が必要である。また、朝倉らは <Step 2> で用いられた閾値 D を小さく設定するとトリップを結ぶ経路が抽出されなくなり、大きく設定すると特定精度が下がるため、滞在地点特定方法（連続する位置座標が D 以内であれば、“滞在”と見なす）とも整合する値を設定する必要があると述べている。したがって、閾値 D の設定方法についても、何らかの修正が必要であると考えられる。

3.2.2 アルゴリズムの開発と精度検証

a) アルゴリズムの開発

ここでは、名古屋実証実験で収集されたデータをマップマッチングするための手法についての検討を行う。そこで、名古屋実証実験でのプローブカーデータをマップマッチングする際に問題となる点を以下にまとめる。

- ・データ送信間隔が最大で 300m と長い
- ・都市高速道路と一般道路が立体的に配置された区間が主要区間を形成している（図 3-5）
- ・走行経路は必ずしも距離的に最短であるとは限らない。例えばループ状の都市高速ランプや一般道路についても距離的に遠回りする経路を走行する場合がある

本研究では、マップマッチング後のデータを経路選択行動分析用データとしても使用することを前提としているため、実車中のデータを極力分割せずに処理することを念頭に置く。しかし、トリップ中に5分以上の走行停止が発生した場合は、そこで何らかの目的を果たしたと見なしてトリップを分割した。また、マップマッチングに使用した DRM データは、都市高速道路（名古屋高速道路2号東山線）の延伸に対応するため、前章とは異なり（財）日本デジタル地図協会出版の DRM 基本道路網 ver.1500（平成15年3月出版）を用いた。



図 3-5 名古屋高速道路と国道 41 号の立体配置区間

本研究では、これらの特徴を持つデータを対象とした場合のマップマッチング手法として、朝倉らのマッチング手法を基本とし、これを立体路線区間に対応可能な手法へと改良する。これは、Screening 法を用いることで複数の探索経路を対象とするためより車両走行軌跡に近い経路を特定でき、またデータ送信間隔が長い場合も適用しやすいためである。

複数経路を探索する手法は、Screening 法以外にも幾つか提案されている。各リンクとそこへ流入するリンクの組み合わせを考慮して最短経路以外の経路を探索する手法（杉本・加藤，1985；大西・加藤，1992）や、遺伝的アルゴリズムを用いて複数経路を探索する手法（稲垣ら，1999；井上，2001）が提案されている。経路探索手法として現在最もよく用いられ、また最も効率的である手法は Dijkstra 法（ラベル確定法）である（土木学会，1998）。この手法は計算速度が速く、大規模で複雑なネットワーク上でも高速度で最短経路の探索が可能である。しかし、最短経路のみが抽出され、それ以外の経路については抽出されない。各リンクとその流入リンクの組み合わせを用いる方法では、膨大なネットワークを対象とする本研究では、計算に必要なメモリ容量が足りなくなる恐れがある。また、遺伝的アルゴリズムを用いる方法は、計算時間が長くなり膨大なトリップを扱うことは困難である。Screening 法は Dijkstra 法により探索された最短経路から分岐するリンクと終点ノードをつなぐ手法であるが、Dijkstra 法の特長により（起点ノードを探索開始ノードとした場合）起点からすべてのノードへの最短コストと最短経路を記憶することが可能である。したがって、終点ノードを探索開始ノードとして進行方向とは逆向きに探索計算を行えば、起点から終点までの最短経路とともに、すべてのノードから終点までの最短経路が算出できる。したがって、Screening 法では Dijkstra 法による探索計算は 1 度だけであり、その後は既に計算されたすべてのノードから終点までの最短経路情報を組み合

わせることで複数経路を探索することができる。

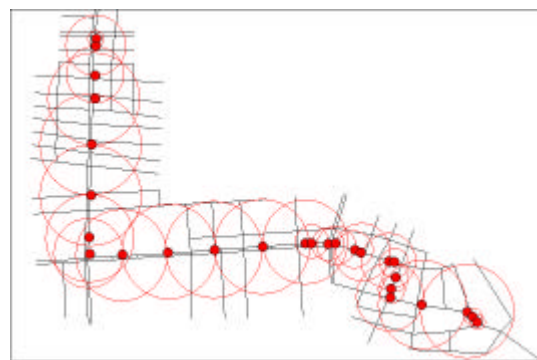
このとき、本研究で提案するマップマッチングアルゴリズムの基本手順は以下のようになる。

- <Step 1> トリップデータ（乗客が乗車してから降車するまでのデータ）を抽出する
- <Step 2> 抽出した車両位置座標について、位置座標と前後遠いほうの位置座標間の距離を半径とする円に含まれるリンクを抽出し、対象リンク集合とする
- <Step 3> 対象リンク集合内で経路探索を行う
- <Step 4> 探索された経路に対して Screening 法を行い、複数経路を抽出する
- <Step 5> 最も位置座標に近い経路を利用経路として特定する

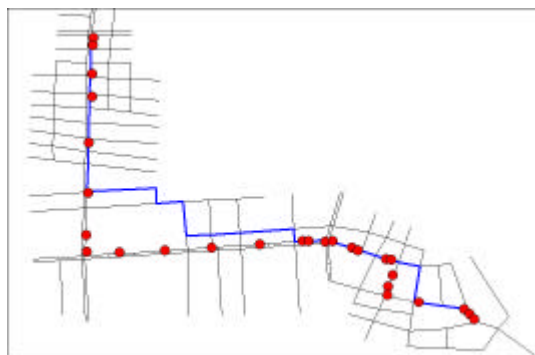
図 3-6 は、ここで示したマップマッチングの基本的な流れを示している。<Step5> の経路特定指標は朝倉らと同様に式(3.3)で表され、特定される経路は式(3.3)により算出される値が最も小さい経路としている。また、<Step2> において抽出範囲を前後車両位置座標間隔により変更している。これは、サブネットワークとして抽出されるリンク数を減らすことで計算負荷を軽減するためである。また、都市高速道路の高架下では頻繁に位置測位エラーが起き、データ取得間隔が広がる。このような場合は、前後の位置座標の midpoint を仮位置座標として補間している。



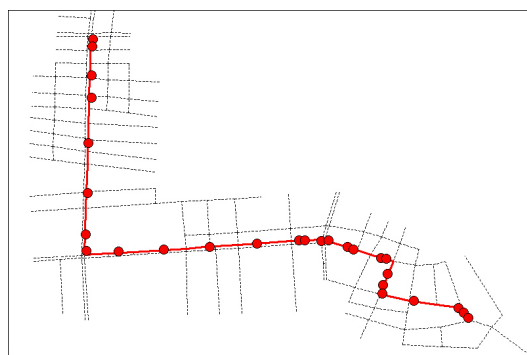
<Step 1> トリップデータの抽出



<Step 2> 対象リンク集合の抽出



<Step 3> 経路探索



<Step 4> Screening 法による経路抽出

<Step 5> 走行経路の特定

図 3-6 マップマッチングの基本的な流れ

また、<Step3> と <Step4> で用いるリンクコストは、マップマッチング精度の変化を分析するため、車両位置座標、リンク長、走行速度について、以下のように3通りの組み合わせにより設定した。

リンクコスト①：リンク長

$$\text{探索経路} = \min \sum_i \text{link}_i \quad (3.4)$$

ここに、 link_i はリンク i のリンク長である。

リンクコスト②：リンク長×位置座標距離

$$\text{探索経路} = \min \sum_i (\text{link}_i \times \bar{d}_i) \quad (3.5)$$

ここに、 $\bar{d}_i$ はリンク i から最も近い車両位置座標までの距離とする。

リンクコスト③：リンク長×位置座標距離×速度ウェイト

$$\text{探索経路} = \min \sum_i (\text{link}_i \times \bar{d}_i \times w_i) \quad (3.6)$$

ここに、 w_i は速度ウェイトとする。

リンクコスト①を用いる場合は通常の最短経路探索と同じであり、朝倉らの手法とほぼ同様の探索手法となる。リンクコスト②の $\bar{d}_i$ は各リンクから最も近い車両位置座標までの距離であり、車両位置座標から垂線が引けないリンクについては車両位置座標に近いノードまでの距離としている。リンクコスト③の速度ウェイトは、表 3-1 に示す立体区間の各路線（名古屋都市高速道路 1 号楠線、国道 41 号）の時間帯別走行速度（データ送信時における走行速度）を基に、trial-and-error により最もマッチング精度が高くなる値に定めた。

表 3-1 に示された各道路区間の走行速度は、立体区間を通過したプローブカーデータを抽出し、目視によりどちらの道路区間を走行しているかを特定した上で作成している。これにより、16～18 時台で名古屋駅→名古屋空港方向の名古屋高速道路で速度低下が見られる。また、名古屋高速道路上の走行速度の変化は一般道路と比較して大きく、特に夕方のピーク時には大きく低下する。このため表 3-2 に示すように、設定した速度ウェイト w_i は夕方のピーク時とその他の時間帯や、またプローブカーの走行速度を考慮して高速道路リンクのコストを増減するように設定された。

表 3-1 名古屋高速道路と国道 41 号における走行速度の変化

道路種別	トリップの方向	指標	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	総計
名古屋高速道路	名古屋駅→空港	平均速度 (km)	71.2	72.3	72.4	79.7	78.0	75.0	75.0	76.0	78.0	75.7	59.3	61.0	55.0	80.0	0.0	0.0	0.0	72.2
		最高速度 (km)	75	83	82	89	78	75	80	83	78	80	64	61	55	80	0	0	0	89
		最低速度 (km)	68	66	66	67	78	75	71	69	78	72	52	61	55	80	0	0	0	52
		サンプル数	5	12	11	3	1	1	6	2	1	3	4	1	1	1	0	0	0	52
	空港→名古屋駅	平均速度 (km)	0.0	0.0	64.0	76.0	0.0	72.0	0.0	73.0	72.5	74.0	0.0	78.5	72.5	77.5	74.7	80.6	0.0	75.9
		最高速度 (km)	0	0	64	86	0	72	0	75	87	83	0	100	86	83	89	97	0	100
		最低速度 (km)	0	0	64	66	0	72	0	72	58	66	0	64	66	69	65	69	0	58
		サンプル数	0	0	1	2	0	2	0	3	2	4	0	4	4	4	6	10	0	42
R 41 号	名古屋駅→空港	平均速度 (km)	51.1	33.7	36.3	12.3	20.6	8.0	22.9	35.3	24.2	11.3	9.5	0.0	9.5	0.0	0.0	45.0	0.0	31.6
		最高速度 (km)	72	58	58	14	44	8	30	61	25	11	10	0	10	0	0	45	0	72
		最低速度 (km)	13	11	7	11	8	8	16	20	24	11	10	0	10	0	0	45	0	7
		サンプル数	8	7	8	2	5	1	5	5	2	1	1	0	1	0	0	1	0	47
	空港→名古屋駅	平均速度 (km)	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	52.3	53.0	56.5	54.8	49.0	36.0	45.8	47.0	56.0	57.8	49.3	64.0	51.9
		最高速度 (km)	0	0	11	0	0	58	53	58	58	50	36	52	47	61	75	62	64	75
		最低速度 (km)	0	0	11	0	0	47	53	55	51	47	36	36	47	52	27	12	64	11
		サンプル数	0	0	1	0	0	3	1	2	4	3	1	5	1	4	12	9	1	47

表 3-2 設定した速度ウェイト w_i

タピーク時間帯 (16:00~19:00)

対応するプローブカーの走行速度が 50km 以上の下り方向、都心環状高速道路リンク	0.1
対応するプローブカーの走行速度が 30km 未満の高速道路リンク	10.0
その他	1.0

それ以外の時間帯

対応するプローブカーの走行速度が 80km 以上の高速道路リンク	0.1
対応するプローブカーの走行速度が 60km 未満の高速道路リンク	10.0
その他	1.0

b) マッチング精度の検証

ここでは、リンクコスト①~③を用いた場合のマッチング精度について、以下に示す 2 式で算出される指標を用いて検証を行う。

$$\text{リンク正解率 (\%)} = \{\text{マッチング結果の正解リンク数} / \text{現実経路リンク数}\} \times 100 \quad (3.7)$$

$$\text{距離正解率 (\%)} = \{\text{マッチング結果の正解リンク距離} / \text{現実経路距離}\} \times 100 \quad (3.8)$$

精度検証のための現実経路は、対象 OD ペアにおける任意の 200 トリップについて、それぞれ手作業により利用経路として尤もらしいと思われるリンク列を作成している。リンクコスト①~③を用いた場合の走行経路特定精度を表 3-3 に示す。この結果から、リンク長のみをコス

トとした手法と比較して、車両位置座標からの距離をリンクコストに組み込んだ場合の方が走行経路の特定精度が30%程度高くなり、さらに混雑時の速度低下を考慮してリンクウェイトを導入した場合のほうがさらに10%以上高くなることが分かる。ここで、リンクコスト①ではリンク正解率の方が距離正解率よりも高いのに対して、リンクコスト③では距離正解率の方が高くなっている。これは、ここでの分析が名古屋空港と名古屋駅間のトリップを対象としており、名古屋高速道路を利用するトリップが多く含まれるためである。名古屋高速道路を構成するリンクは1つのリンク長が一般道路リンクよりも長いいため、リンクコスト③を用いることにより、高速利用トリップが適切に高速道路経路にマッチングされ、リンク正解率の向上率よりも距離正解率の向上が大きくなっているものと考えられる。なお、ここで検証の対象としたODペアは都市高速道路の立体区間をもち、また利用可能経路集合も多いため、対象エリア内でも最も走行経路特定が困難なODペアである。従って、その他のODペアにおいては、より特定精度が高くなると考えられる。

表 3-3 リンクコスト別マッチング精度

	リンクコスト①	リンクコスト②	リンクコスト③
リンク正解率	53.0%	80.3%	92.5%
距離正解率	47.2%	84.0%	94.2%

ここで示した手法のマッチング精度が100%に達しない理由には、以下の原因が挙げられる。

- ・ 曲り角付近でデータ送信がなく、車両がどこで曲がったかの判別が難しい場合
- ・ 車両が幅員 5.5m 未満の細街路を走行した場合
- ・ 高速道路上で、車両が完全に停止するような渋滞が発生した場合

これらの問題は、仮に目視によりデータをチェックしても、プローブカーがどの経路を走行したかを特定することが難しい。このため、このような問題を解決するためには以下のようなハード的な変更についても検討すべきである。

- ・ 方向指示器作動時をデータ送信トリガとする
- ・ 全道路網上でマッチングを行う
- ・ 高速道路走行中フラグをデータに追加する

3.3 データ蓄積方法の提案

3.3.1 マップマッチング処理の概要

前節ではプローブカーデータのマップマッチング手法を提案し、データ送信間隔が長い場合でも比較的高精度にマップマッチングが可能であることを示した。マップマッチング処理によ

り、それまでは車両位置座標の連続データであったプローブカーデータを、走行経路データおよび経路上の車両走行位置情報へと変換することが可能となる。ここで、車両走行位置情報は、特定された経路上に各車両位置座標から垂線を引くことで特定可能となる。本研究で作成したマップマッチングシステムでは、車両走行位置特定作業に合わせて 3.1.1 における近接リンク法でのリンク旅行時間算出方法として示した式(3.1)、(3.2)と同様の方法により、特定された走行経路上にあるすべてのリンクについて流入時刻および流出時刻を算出し、各リンク旅行時間を出力している。

マップマッチング処理後に出力されるデータフォーマットを表 3-4 に示す。出力データには、経路データとトリップデータがあり、前者は主に走行経路やリンク通過旅行時間情報を、後者は主に車両 ID 番号やトリップ開始・終了時刻についての情報が含まれる。分析にその他の情報が必要な場合は、車両 ID 番号、プロット時刻を用いてマップマッチング処理前のデータを参照することで取得可能である。

表 3-4a マッチング処理後のプローブカーデータ（経路データ）

トリップ SQno.	構成リ ンク数	node1	node2	方向 *1	リンク 長(m)	路線情 報*2	通過旅行 時間 (sec)	送信 回数	送信時刻 (×送信回数)	
1	58	4700304	4700409	0	63	9000	12.86	3	20020121040806	...
1	58	4700361	4700409	1	105	5050	25.43	0		
1	58	4700361	4700562	0	62	5050	10.11	1	20020121040847	
...										

*1 方向=0 のとき node1→node2 に通過、方向=1 の時 node2→node1 に通過 *2 道路種別番号×1000+路線番号

表 3-4b マッチング処理後のプローブカーデータ（トリップデータ）

トリップ SQno.	車両 ID 番号	出発時刻	到着時刻
1	1025	20020121040806	20020121042501
2	1032	20020201220239	20020201221505
...			

表 3-5 に、全実験期間中（9 ヶ月間）に観測されたトリップ数を車載機タイプ別に示す。Type2 車載機を搭載したプローブカーから収集されたトリップは約 341 万トリップであるのに対し、Type1 および Type3 車載機を搭載した車両から収集されたトリップは約 256 万トリップであった。ここで、Type1,3 車載機を搭載した車両台数（915 台）は、Type2 車載機を搭載した車両数（655 台）より多いにもかかわらず、観測されたトリップ数が少なくなっている。これは、トリップの集計に際して、実車フラグにより乗客が乗車中である情報が得られる場合であっても、

途中連続して4プロット以上のデータ異常の発生により車両位置情報が欠損している場合はそこでトリップを分割していることや、また5プロット以上連続して実車フラグが観測されなければマップマッチングの対象としなかったためである。第2章でも示したように、Type1, 3 車載機からは位置測位エラーが多く発生しているため、トリップ数が少なく観測される結果になっている。

表 3-5 実験期間（9 ヶ月間）に観測されたトリップ数

車載機 Type	観測トリップ数
Type1, 3	2,558,135
Type2	3,412,952

このような非常に多くのトリップに対してマップマッチング処理を行うためには、効率よく処理する必要がある。このため本研究では、第3回PT調査小ゾーンを用い、図3-7に示すフローに沿ってマッチング処理を行っている。

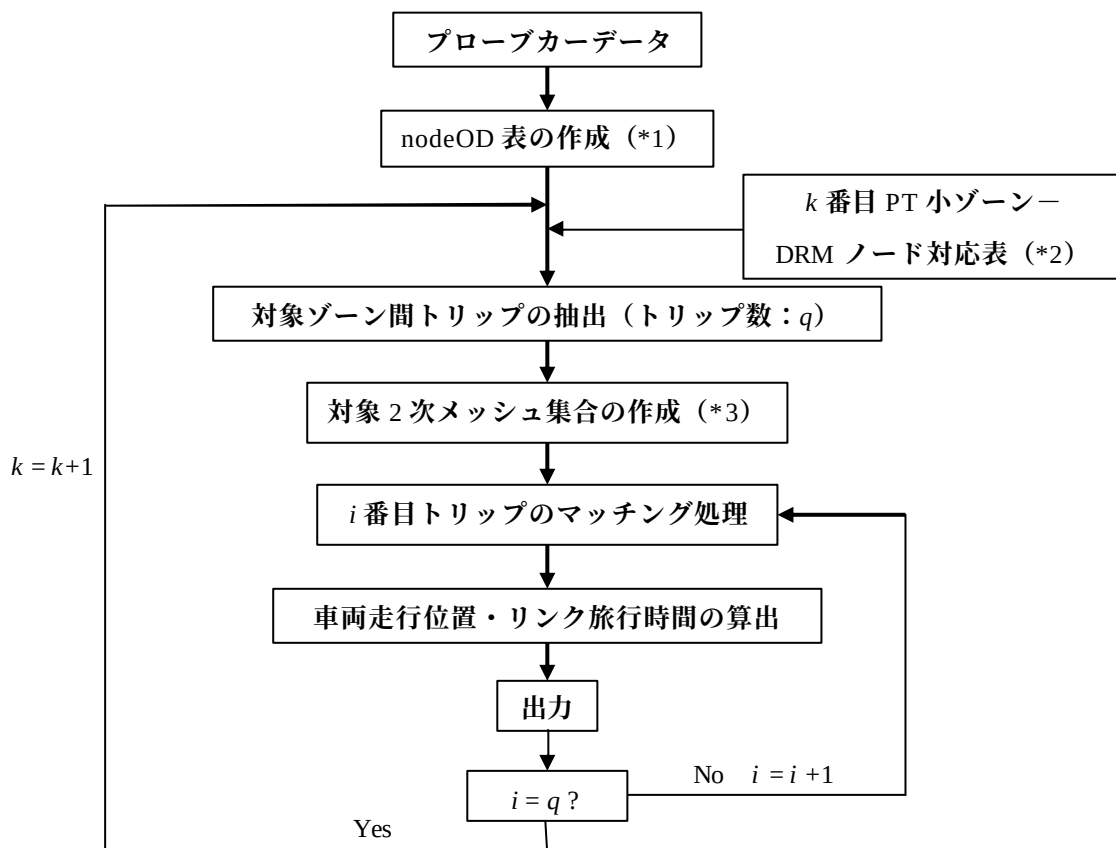


図 3-7 マップマッチング処理フロー

ここで nodeOD 表（図中*1）とは、プローブデータより観測されたトリップについて、その起点、終点を DRM ノードで表現するデータベースである。この際、トリップの起点座標および終点座標に最も近いノード番号を、便宜的に起点ノードおよび終点ノードとしている。このノード番号はマップマッチング処理を効率的に行うために用いられ、実際の走行ルートの起終点ノードとは必ずしも一致しない。nodeOD 表にはこれら以外にも、プローブカーの車両 ID やトリップの出発、到着時刻、プロット数、トリップが通過する 2 次メッシュ番号等が情報として蓄積されている。また、PT 小ゾーン-DRM ノード対応表（図中*2）は、各 PT 小ゾーン内に位置する DRM ノードを集計したものであり、これを用いて nodeOD 表に含まれるトリップが、どの小ゾーン間のトリップであるかを確認することが可能となる。対象 2 次メッシュ集合（図中*3）は、マップマッチング対象となるサブネットワーク作成を効率的に行うために作成されるものであり、対象ゾーン間トリップで出現するすべての 2 次メッシュ番号（オンラインによる近接リンク法により付加された情報）を集計しリストアップするものである。この処理フローにより、観測されたすべてのトリップの内、同じような起終点を持つトリップごとに処理を行っていくことが可能となる。同じような起終点を持つトリップは利用するリンク集合が重なり合っているため、マップマッチング処理に必要なリンク集合を抽出する作業に要する時間を短縮することができ、全体としての処理速度を向上させることが可能となる。

Makimura et al. (2002) では PROLIMAS の処理速度について、1 ヶ月分のデータを 4 枚の 2 次メッシュ（リンク数：84,946）を対象とし、4 台の PC（CPU：PentiumIII、メモリ 512MB）を使用して約 1 週間要するとある。本研究では、図 3-8 に示す 24 枚の 2 次メッシュ（往復合計リンク数：149,042（片方向リンク数：83,159）、ノード数：57,827）を対象とし、3 台の PC（CPU：PentiumIV 3.2GHz、メモリ 2GB）を用いてマップマッチング処理に要した時間はおおよそ 3 ヶ月であった。ただし、PROLIMAS では 40 台のプローブカーの内タクシーとトラックがそれぞれ 20 台であり、タクシーに対しては、実車と空車の区別なく処理している。また Makimura et al. (2002) では、タクシーは 1 日に約 300km 走行し、トラックは約 40km 走行するとある。仮に 40 台すべてがタクシーとし、実車時と空車時の走行距離の割合が同じとした時、プローブカーを 655 台、実験期間を 9 ヶ月に拡大すると、実車データのみを処理するために必要な期間は約 74 週間となる。一方、本研究で開発したシステムでは、655 台・9 ヶ月のタクシーについて実車データのみを処理に約 12 週間で要したことから、使用した PC の能力を割り引いても、本研究で開発したシステムの処理効率がかなり高いものであることが分かる。

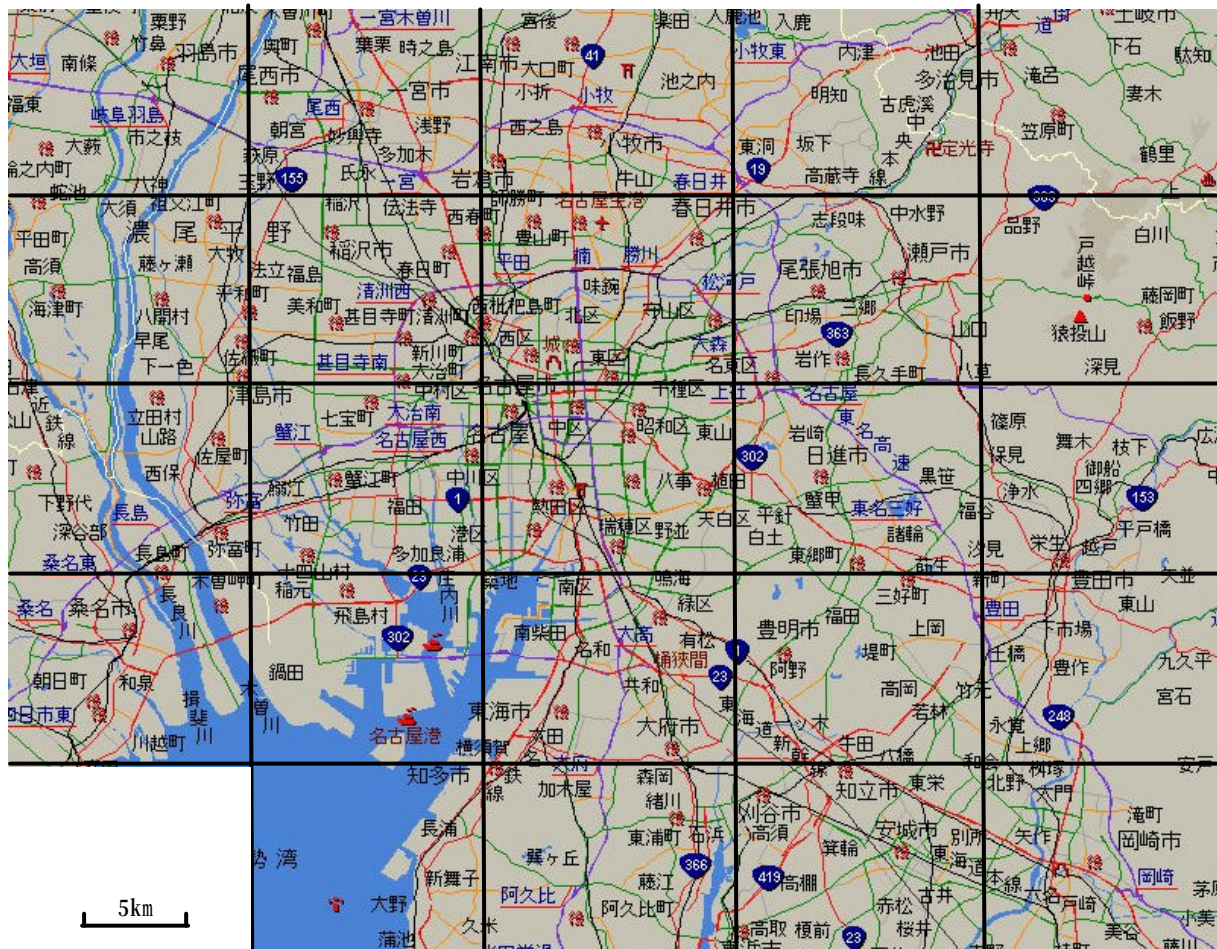


図 3-8 マップマッチング対象エリア

2002 年 11 月に Type2 車載機を搭載したプローブカーにより収集されたデータのうち、実車中のデータについて、近接リンク法を用いた場合の各リンクの通過回数とマップマッチング処理による通過回数を集計した。図 3-9 に名古屋市周辺での通過回数を示す。ここで、近接リンク法による処理後のデータからは、1 回以上連続して同じリンクが特定された場合に 1 回の通過として集計した。また、マップマッチング処理後のデータからは、各リンクが期間中に発生したトリップによる通行回数が集計されている。

図より、マップマッチング後のデータからは各リンクの通過回数が連続的に集計されているのに対して、近接リンク法によるデータの通過回数は郊外部で断続的に観測されていることが分かる。これ以外にも、3.1 で示したように近接リンク法を用いる場合は、対象区間のみならず流入・流出リンク上での観測が必要であり、実際には図に示すほどのリンク旅行時間情報を取得することは不可能である。このことから、マップマッチング処理により、プローブカーデータを有効に利用することが可能となるといえる。

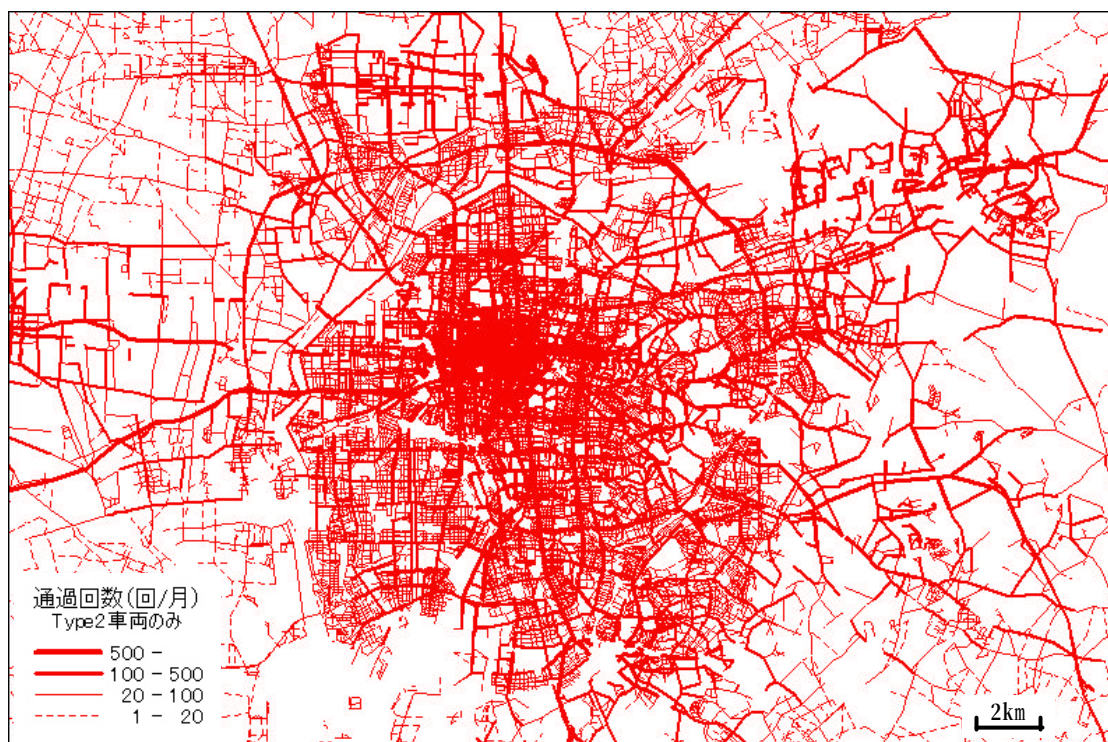


図 3-9a 近接リンク法による観測通過回数



図 3-9b マップマッチングデータによる観測通過回数

3.3.2 データ蓄積方法

ここでは、マップマッチング処理後のプローブカーデータの蓄積方法について提案を行う。表 3-5 に示したように、マップマッチング処理されたプローブカーデータには経路データとトリップデータがある。これらのファイルは、PT 調査小ゾーンペアの内トリップが確認されたゾーンペアごとに出力されており、ファイル数、データサイズは表 3-6 に示すとおりである。

表 3-6 マップマッチング処理後のプローブカーデータの概要

実験期間	トリップデータ		経路データ	
	ファイル数	データサイズ	ファイル数	データサイズ
第 1 期 (3 ヶ月)	41,463	64.5MB	41,463	2.43GB
第 2 期 (6 ヶ月)	51,817	126MB	51,817	5.18GB

これらのデータは、このままの状態でもドライバーが選択した経路についての情報であり、経路選択行動分析には有用なデータ形式である。しかし、交通状況の変化など断面交通データとして用いるためには、リンク単位に通過回数や時刻別平均旅行時間などを集計し直す必要がある。膨大なデータを集計するには多くの時間が必要であり、4 章で説明する旅行時間予測や、5 章で説明する経路選択行動分析における、任意の経路の旅行時間を算出するためのデータベースとして用いるには、より適切なデータ形式により蓄積する必要がある。そこで本研究では、表 3-7 に示すようなデータ形式に集計し直すことで断面交通データとして蓄積する。この蓄積データベースを、以降“リンクコストテーブル”と呼ぶ。この蓄積方法は、マップマッチング処理後のプローブカーデータを蓄積する方法の 1 つの考え方である。

表 3-7 断面交通データとしての蓄積データベースイメージ（リンクコストテーブル）

2 次メッシュ No.	node1	node2	道路種別	リンク長 (m)	交通規制コード *1	リンク方向	時間帯 1 *2 (0:00 - 0:05)		時間帯 2 (0:05 - 0:10)		...
							通過回数	平均旅行時間 (sec)	通過回数	平均旅行時間 (sec)	
523657	29001	29025	9	17	0	0	101	4.45	81	3.32	...
523657	29001	29025	7	112	0	1	18	7.58	4	6.82	...
523657	29003	29012	4	200	4	0	98	12.58	48	11.44	...
523657	29006	29028	3	136	5	0	42	8.22	21	8.08	...
...											
523667	14001	14013	4	68	0	0	9	20.39	12	23.11	...

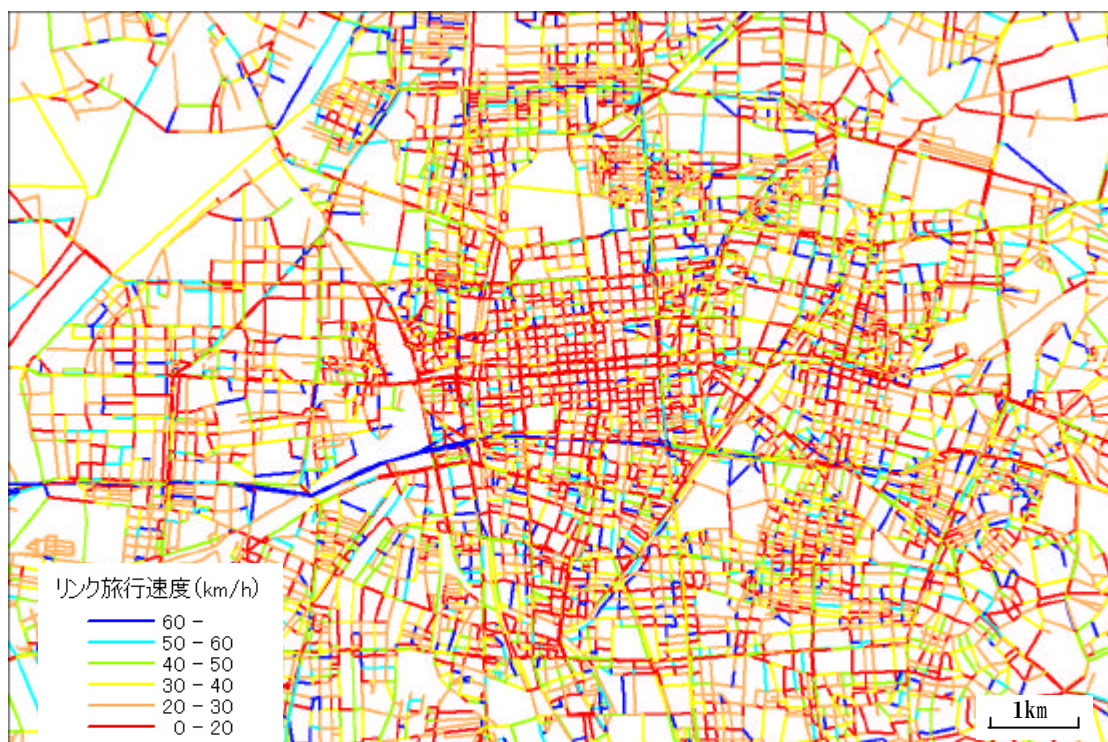
*1 規制種別コードとは、リンクの通行規制情報（一方通行情報など）を示す

*2 時間帯は 1 日を 5 分間隔に分割し、時間帯 1～時間帯 288 まで設定した

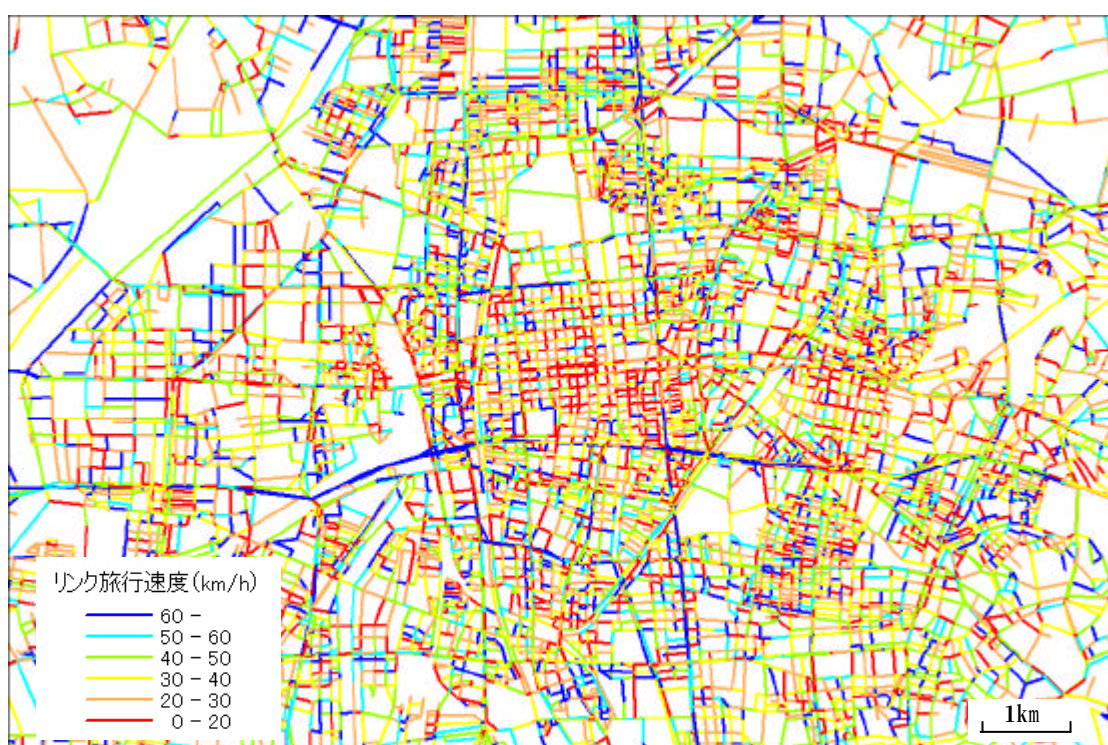
ここで、リンクコストテーブルは各リンクの 5 分間隔平均旅行時間情報を蓄積しており、観測されたプローブカーの通過回数や通過旅行時間の分散値(表 3-7 には示していない)を含む。テーブルの種類は、曜日別(月、火、・・・、日&祝)、天候別(降水量 1mm 以上、未満)として 14 種類を作成した。

蓄積データベースは、対象エリア内の断面交通データとして利用可能である。2.1.1 でも述べたように、道路交通センサスやトラフィックカウンターデータなど従来の断面データは幹線道路のみを対象とし、ごく限られた地点でのみデータ収集を行っている。ここで、これら従来データでは幹線道路網を均質な区間(主要交差点間など均質であると考えられる区間)に分割し、各区間上の代表地点のみにおいてデータ収集を行っている。したがって幹線道路網上のほぼすべての区間で交通量や通過旅行速度などの断面交通データが得られるが、すべてを網羅的に観測しているわけではない。これに対してプローブカーデータは各断面の観測回数は従来データより少ないものの、広いエリアでの旅行時間情報を利用することが可能となる。図 3-9b にも示したように、プローブカーを用いることで対象エリア内のほぼすべての交通情報を取得可能であることが分かる。ただし、断面データとは異なり時間的に連続しておらず、また非常に稀にしかプローブカーが通過しないリンクにおいては観測データ数が少なくなるといった問題点もある。もちろん実験を長く行えば、交通量の少ない郊外のリンクにおいてもある程度の通過回数が得られ、比較的安定した旅行時間情報を得ることは可能である。

ここで、前節で作成した蓄積データベースを基に、マップマッチング処理されたプローブカーデータが断面交通データとして利用可能であることを示す。図 3-10 は、名古屋市中北部における各リンクの通過旅行時間を示している。ここで、晴天時・金曜日のリンクコストテーブルから 18:00~18:05、0:00~0:05 のカラムを使用した。もちろんすべてのリンクにおいて、この時間帯にプローブカーの通過が観測されるわけではないため、欠損データについては隣接する時間帯から旅行時間データを補間している。この図から、夕方のピーク時間帯である 18:00 では旅行速度が低く、また深夜 0:00 では高くなっている様子が見て取れ、交通混雑が時刻によって変化している状況が把握できる。このように、任意の時刻、任意のリンクにおける交通状況の変化に関する情報を、蓄積データから取得することが可能であることが分かる。



金曜日、晴天時、18:00 のリンク旅行速度



金曜日、晴天時、0:00 のリンク旅行速度

図 3-10 蓄積データによる旅行時間変化情報

3.4 本章のまとめ

本章では、プローブカーの車両位置座標と DRM の近接リンク情報のみを用いる近接リンク法によるデータ利用上の非効率性を問題意識として、さらに走行速度とトリップの起終点情報を用いることで走行経路を精度良く特定するマップマッチング手法を開発した。そして、マップマッチング処理により出力されたプローブカーデータの交通データとしての蓄積方法を提案した。

プローブカーデータは車両の走行軌跡や、データ送信時の走行速度や加速度、ワイパー作動状況などの情報を有しており、これだけでも有用な分析が可能である。前章で示したように、ゾーン間の旅行時間情報を収集することが可能であるし、例えば、路線バスや走行路線が決められた試験車両などをプローブカーとする場合には走行経路を特定する必要はなく、また走行位置は車両位置座標から走行経路に垂線を引くことで確認することができる。しかしこのような場合は、プローブカーの利点であるより広範囲にわたるエリアでのデータ収集や、ドライバーの経路選択データの収集が行えないばかりか、利用可能なデータ量自体も少なくなってしまう。本研究で使用するプローブカーデータのように、日常的なトリップを繰り返すタクシーや、もしくはトラックや商用車をプローブカーとした方が多くの面で効率的であり、この場合はプローブカーの走行軌跡を特定するためのマップマッチング処理が必要となる。

これまでに、多くのマップマッチング手法がカーナビゲーションや GIS の分野で研究されているが、これらはいずれも車載機内に適用されるものであり、車両位置情報も 1 秒間隔のデータを利用することが多い。しかし、交通工学の分野で用いられるプローブカーデータはカーナビゲーション内で使用しているデータ情報を付加することが難しい上、通信コストや収集データ量の点で頻繁なデータ送信が行えない場合が多く、これによりデータ送信間隔が長くなるといった問題もある。提案した手法は、送信エラーや GPS エラーによりデータ送信間隔が 1km 程度まで広がっても、走行経路を特定することができる。また、走行速度情報を用いた速度ウェイトをリンクコストとして導入することや、Screening 法により特定される走行経路を修正することで、走行経路特定が困難な道路区間を有する OD ペアにおいても 94% 程度の経路特定精度があることを示した。さらに、提案する手法では完全に正確な経路を特定できない理由について考察し、高速道路走行フラグや右左折フラグなど車載機側のハード的な改良の必要性を論じた。また、提案したマップマッチング手法のデータ処理速度はこれまでに提案された手法と比較しても十分な処理速度を有しており、膨大なプローブカーデータに対しても十分実用的なシステムとして利用することができる。またこれにより、交通状況の変化に関する情報やドライバーの経路選択行動の分析用データを作成することが可能である。このように、マップマッチング処理を行うことで、プローブカーデータを有効に活用することができる。本研究では交通行動分析を対象とするため行わないが、急加速・急減速情報を用いて道路ネットワーク上の危険箇所を抽出したり、交通渋滞発生要因の分析や交通渋滞による経済的な損失額の計測を行

うことも可能となり，すでにこのような取り組みも行われつつある（Ueta, 2003）．

しかし，本研究で開発したマップマッチング手法において用いられる速度ウェイト w_i は，trial-and-error により定められた ad hoc な値であり，より整合性の高いウェイト値の検証が必要である．さらに，本研究で提案したマップマッチング手法はセンターサーバに蓄積されたデータを用いることを前提としており，トリップの起終点情報が与件の場合にのみ適用可能である．しかし，近接リンク法がデータをセンターサーバへの蓄積と同時に行われているように，オンラインによる走行経路特定手法は，より多くのデータ処理や効率的なデータ利用に際しては必要であると考えられる．これまでに，プローブカーデータを用いたオンラインによるマップマッチング手法の研究は著者の知る限り行われていないが，今後はより効率的なデータ処理と利用価値の高いデータ作成を目指して，オンラインでの処理が可能な手法を開発する必要がある．

第3章 参考文献

- 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳 (2000) PHS による位置情報を用いた交通行動調査手法, 土木学会論文集, No.653, IV-48, pp.95-104.
- 稲垣潤, 長谷川美紀, 北島秀夫 (1999) 遺伝的アルゴリズムを用いた経路探索における複数経路候補の決定法, 電子情報通信学会論文誌, D- I, Vol. J82-D- I, No.8, pp.1102-1111.
- 井上祐介 (2001) 遺伝的アルゴリズムを用いた複数経路探索法, 高知工科大学学士学位論文.
- 大草裕二郎, 朝倉康夫, 羽藤英二 (1999) Screening 法による観光周遊ルート集合の抽出, 土木計画学研究・講演集, No.22 (1), pp.397-400.
- 大西啓介, 加藤誠巳 (1992) 交差点内コストを考慮した道路網における経路探索の手法とそのマルチメディア型経路案内システムへの応用, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.7, pp.970-979.
- 機械システム振興協会 (2000) ITS プローブカーシステムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書.
- 小島英史, 羽藤英二 (2004) プローブパーソンデータによるオンラインマッチングアルゴリズム, 土木計画学研究・講演集, Vol.29, CD-ROM.
- 杉本克行, 加藤誠巳 (1985) 有向ネットワークにおいて閉路を含まない k 個の最短経路を求めるための手法, 情報処理学会論文誌, Vol.26, No.2, pp.356-364.
- 「測量」編集委員会・GPS 小委員会編 (2002) GPS が交通調査を変える～プローブカーによるパラダイムシフト～, GPS フロンティア, pp.13-20.
- 中京都市圏総合都市計画協議会 (1993), 第3回中京都市圏パーソントリップ調査報告書
- 土木学会編 (1998) 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 丸善.
- Asakura, Y. and E. Hato (2001) Rethinking Urban Travel Measurement, Asia GIS, CD-ROM.
- D’Este, G (1997) Hybrid Route Choice Procedures in a Transport Network Context. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.2, No.3, pp.735-752.
- Greenfeld, J.S. (2002) Matching GPS Observations to Locations on A Digital Map, Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, CD-ROM.
- Makimura, K., H. Kikuchi, S. Tada, Y Nakajima, H. Ishida and T. Hyodo (2002) Performance Indicator Measurement Using Car Navigation Systems, 81th Transportation Research Board, CD-ROM.
- Quddus, M.A., W.Y. Ochieng, L. Zhao and R.B. Noland (2003) A general map matching algorithm for transport telematics applications”, *GPS Solutions Journal*, 7 (3), pp.157-167.
- Ueta, M. (2003) Road Management Practice Utilizing Probe Vehicles, Proceedings of 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, CD-ROM.
- White, C.E., D. Bernstein and A.L. Kornhauser (2000) Some Map Matching Algorithms for Personal

Navigation Assistants, *Transportation Research Part C* 8, pp.91-108.

