

カープローブデータによる渋滞ボトルネック検出方式の提案と評価  
Bottleneck Detection Method Using Probe Car Data

秋山 高行† 大橋 洋輝† 山本 正明† 佐藤 暁子†  
Takayuki Akiyama Hiroki Ohashi Masaaki Yamamoto Akiko Sato

## 1. はじめに

東南アジア新興国では、経済発展に伴い、都市部への急激な人口集中・交通量の増大が起きている。これに対し、道路、鉄道などの交通インフラの整備が間に合っておらず、交通渋滞が深刻化している。先進国では、同様に交通渋滞が慢性的な社会問題となっているが、交通インフラが十分に整備されているため、それら既存インフラを有効活用し、渋滞解消が求められている。

渋滞を解消するためには、まずは、対策すべき交通渋滞を特定し、その後、発生原因を特定することが必要である。交通渋滞とは、単位時間あたりに通行可能な交通量（交通容量）を上回る交通量（交通需要）が流入する場合に発生するものである。そのため、交通容量、交通需要、交通需要の超過時刻のそれぞれを特定する必要がある。一般的に、交通容量を交通需要が超過する箇所をボトルネックと呼ぶ。交通容量は静的な変数であるが、交通需要は動的な変数であるため、時間的・空間的な計測が必要である。

従来では、5～10年おきに実施される交通調査や市民からの要望によって、対策すべき交通渋滞を特定している。しかし、こうした方法では、時間的・空間的に変化する交通渋滞現象を把握することは困難であり、交通現象を常時観測する手法が求められている。近年の ITS (Intelligent Transport System: 高度交通システム) の実用化を受けて、道路に設置されたカメラや VICS (Vehicle Information and Communication System) による道路観測データや、GPS が搭載された車両からの情報を活用して、各道路の混雑状況を可視化するプローブ技術が実用化されている[1][2]。

しかしながら、ITS を活用して交通渋滞原因を把握し、交通渋滞を解消しようとする試みは、未だ実用化されていない。従来では、特定の道路に対して、車両の走行速度の不連続性を抽出してボトルネック箇所を検証する1次元的な解析が実施されており[4]、道路ネットワーク上での交通渋滞の伝搬を解析する面的な解析を実施した研究は未だ存在しない。

本論文では、道路の混雑状況を時間的かつ空間的に分析し、渋滞現象の時空間的な伝搬に基づいて、各渋滞現象のボトルネック箇所と発生時刻を検出する方式について述べる。道路ネットワークを活用し、道路上の混雑状況を一つの交通渋滞として捉え、交通渋滞の発生メカニズムに基づき、交通渋滞のボトルネックを検出することを實現した。北京市のタクシープローブデータを評価用データとして利用し、1週間分のデータに対して2350秒の計算時間で検出することができた。検出結果を北京市の渋滞問題に取り組んでいる清華大学の実務者の分析結果と突き合わせ、方式の有効性を確認した。

## 2. 関連研究

プローブ技術を活用して、道路の混雑状況を計測するには、従来は超音波感知器やループコイル、画像センサを用いるのが一般的である。いずれも路上に設置される固定センサであり、多大なインフラコストがかかるため、カバーエリアは主要道路に限られている。これに対して、GPS の普及と無線通信の発達が可能としたインフラレスの計測手段が、プローブカーシステムである[1]。

プローブカーは道路上を走行する自動車そのものをセンサとして、位置、速度などの車両データを、無線通信を介して交通情報センタにアップリンクする。交通情報センタでは、多数の車両から収集されたデータを道路上の速度や旅行時間を表すデータに加工し、交通情報として保持する。プローブカーとして専用の車両を走らせる場合もあるが、自家用車、タクシー、バス、ロードサービス車両などを計測車両として活用するのが一般的である。また、近年では、普及が進んでいるスマートフォンに搭載されている GPS 情報を活用する取り組みも行われている。

プローブカーシステムにより算出した交通情報を活用して、交通の円滑化に役立てる研究もされている。交通の円滑性を示す代表的な指標として、損失時間がある。損失時間は、渋滞が無い場合の旅行時間と実際の旅行時間の差を一定区間毎に算出し、その損失時間に当該区間の交通量を乗じ、合算したものを総損失時間として算出する[3]。従来では、渋滞対策箇所の抽出に、評価区間における損失時間の大小を比較しながら、優先度明示し、活用している。また、市民の苦情や道路工事情報に基づき、事前に定めた交差点の前後の旅行速度の変化を見ることでボトルネックであることを確認する。他に、評価区間の最適な長さに関する研究もされている[3]。このような研究では、事前に調査対象区間が設定されており、調査対象区間を一定期間にプローブカーを走行させ、データ収集・分析を実施している。つまり、従来では、ボトルネック箇所は事前に定めるのが一般的であり、プローブカーなどの ITS は追加調査として使われている。

本研究では、大量に収集したプローブデータから算出された各道路リンクの渋滞情報から、ボトルネック箇所を自動的に検出するアプローチを取る。このアプローチによれば、実データによって、渋滞を引き起こしているポイントが明確になり、効率の良い追加調査・渋滞対策を実施することが可能になる。同様のアプローチを取る研究として、交通情報を解析し、日常的に渋滞している箇所を抽出する技術が提案されている[5]。これは、過去のプローブ交通情報を解析して、時間・日ごとに回帰性のある渋滞箇所を検出する。しかしながら、前述したように、渋滞のボトルネックとは、交通量が交通容量を超過する箇所であり、必ずしも、常時渋滞している箇所とは一致しない。そのため、交通渋滞現象を空間的・時間的に解析し、深刻な渋滞に発展しているボトルネック箇所と渋滞の起点となる時刻を知ることが、渋滞解消策

† (株)日立製作所中央研究所, Hitachi, Ltd., Central Research Laboratory

を検討する上では重要となる。

本研究では、道路の混雑状況を時間的かつ空間的に分析し、各渋滞現象のボトルネック箇所と発生時刻を検出する方式について述べる。道路ネットワークを活用し、道路上の混雑状況を一つの交通渋滞として捉え、さらに、交通渋滞の発生メカニズムをモデル化することで、交通渋滞のボトルネックを検出することを実現する。

### 3. 提案方式

本章では、道路ネットワークを活用し、道路上の混雑状況から交通渋滞のボトルネックを検出する方式について説明する。まず、渋滞の発生メカニズムについて説明し、続いて、メカニズムに基づくボトルネック検出方式の概要について述べる。

図 1 は、交通渋滞の典型的な発生過程を時間変化で示した図である。交通渋滞とは、時間あたりに流入する交通量が、時間あたりに捌ける交通量、つまり、流出可能な交通量（一般的に交通容量と呼ばれる）を超過した場合に、超過した流入交通量は速度低下や待ち状態が発生し、それが交通容量の低下を誘引し、さらなる超過交通量を生み出し、待ち行列を延長する現象である。流入交通量が交通容量を超過している間は、渋滞が伸長し続け、流入交通量が交通容量を下回ると、流出交通量は平常時と同等になり、渋滞長が短くなり、渋滞が解消される。ボトルネックとは、流入交通量が交通容量を超過した箇所、時刻を指し、上記のメカニズムから、渋滞リンクの先頭がボトルネックとなっていることが分かる。図 1 から、各時刻における渋滞長では実際の渋滞影響範囲を特定できないことが分かる。渋滞は、発生時間中に影響する車両数が問題になるため、時間的・空間的に解析することが求められる。

そのため、本研究では、渋滞先頭となる箇所を抽出し、各先頭箇所に対して、渋滞を引き起こす影響を考慮した重要度を算出し、対策が必要な優先順位付けを実施することを提案する。道路ネットワークは一般的なネットワークと同様、リンクとノードから構成され、リンクが道路、ノードが交差点のような道路の結節点を指す。渋滞情報はリンク毎の旅行速度として算出されるため、本提案方式における分析単位もリンクとノードとなる。

重要度は、図 1 の発生メカニズムに基づき、渋滞発生時間・渋滞長を考慮した (1) 式にて表現する。道路ネットワーク上の各ノードに関して、本研究では、(1) 式に基づき、算出する。

$$S_{\text{node}} = \frac{\sum_{t=ts}^{te} (c_{\text{nodes}}(t))}{te-ts} \dots (1)$$

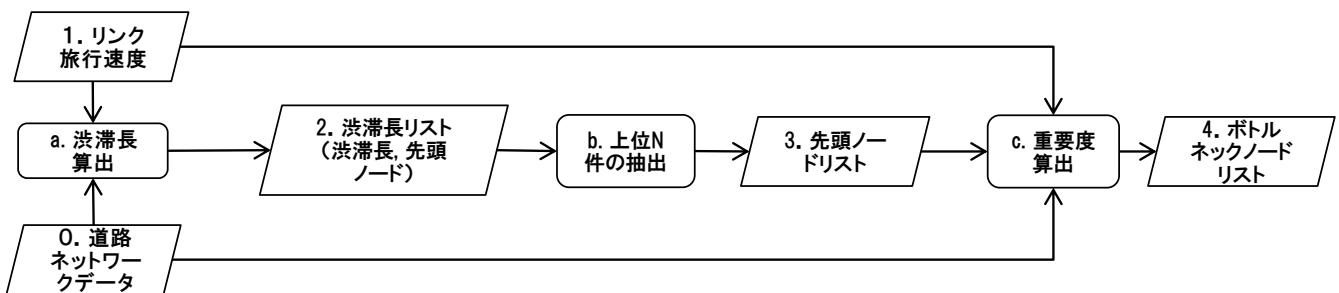


図 2. 提案方式 1 でのボトルネック検出の処理フロー

ここで、 $S_{\text{node}}$  はノード毎の重要度を示し、 $C_{\text{node}}$  はノードを先頭とする渋滞の時刻  $t$  における渋滞長、 $t_s$  は計算対象時間の最初の時刻、 $t_e$  は計算対象時間の最後の時刻を示す。これは、渋滞開始から渋滞終了までの渋滞長の積分値を計算することと同等である。この指標により、発生した渋滞の空間的な影響度と時間的な影響度の双方を考慮することができる。

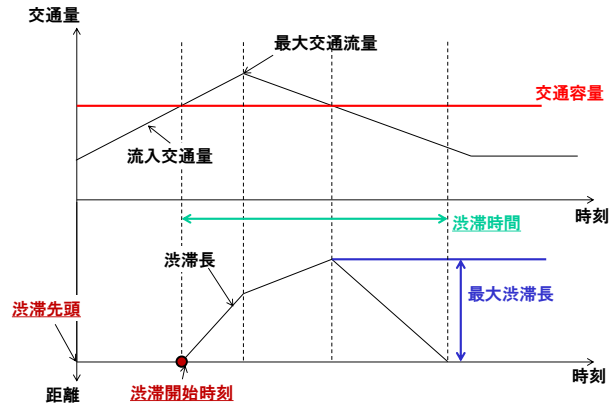


図 1. 渋滞発生過程の概略  
(上図：流入交通量の時間変化，下図：交通量の時間変化に対する渋滞長の時間変化)

次に、計算機上で重要度に基づきボトルネックノードを検出する処理フローについて述べる。直接的には、 $S_{\text{node}}$  を全ノードに対して算出することで、対象とする道路ネットワーク上で対処すべきノードを明らかにすることができる。しかし、対象とする範囲が広くなればなるほど、計算対象ノード数が大量となり、また、対象となる時間が 1 か月から 1 年単位となるとさらに対象となる時間領域が大きくなるため、計算時間が非常に膨大になる。そこで、本研究では、計算時間を短縮するように図 2 の処理フローにて実装する。

まず、プローブから算出された道路混雑情報は、各道路リンクに対する旅行速度として格納されているため、道路ネットワークに基づき、渋滞リンクを関連する渋滞として一つのリンク列にまとめる。この処理のイメージを図 3 に示す。渋滞リンクを基点として、隣接するリンクを探索し、隣接しているリンクが渋滞リンクであれば、さらに探索し、渋滞リンクでなければ、探索が終わるような再帰的な処理である。この際に、探索終了時のノードが先頭ノードであれば、渋滞の先頭ノードとして格納しておく。また、接続しているリンク長を足し合わせた

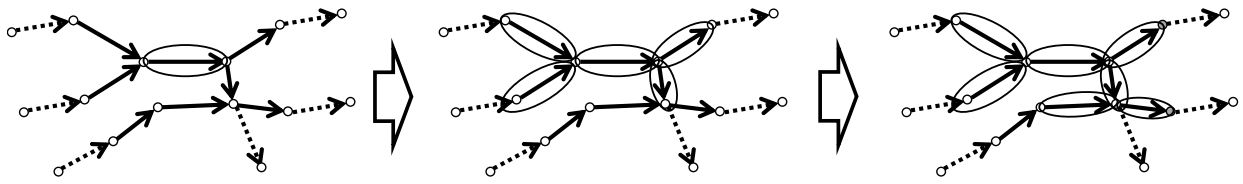


図3. 道路ネットワーク上での渋滞リンク探索の処理イメージ  
(実線：渋滞リンク，破線：非渋滞リンク)

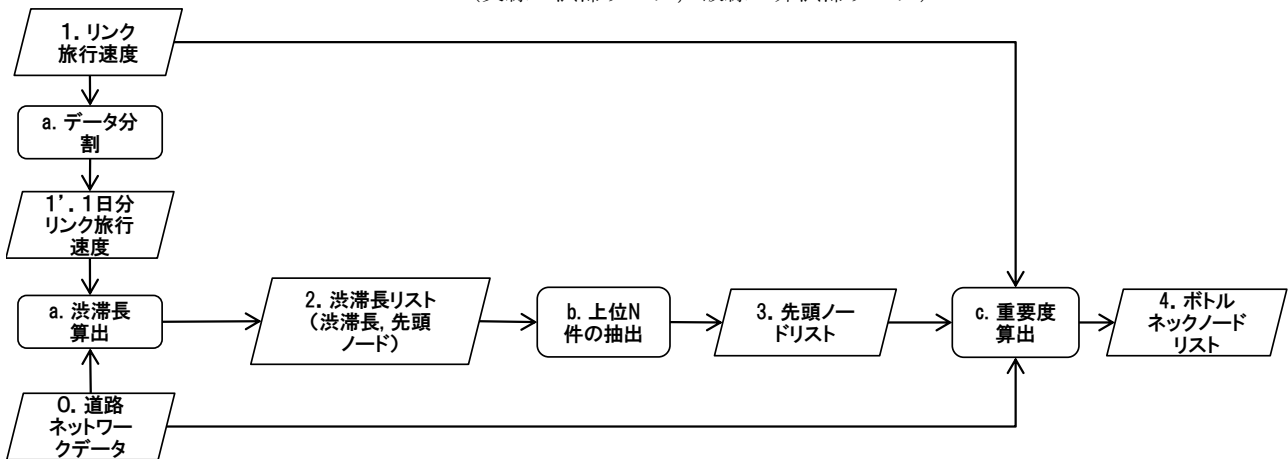


図4. 提案方式2でのボトルネック検出の処理フロー

ものを渋滞長として格納する。この処理をプローブデータに格納されている時刻すべてに対して実行する。この際、渋滞長が長く渋滞時間が長いものの中で重複して抽出され過ぎないようにするために、リンクの重複を許さない形で渋滞長リストを作成する。

抽出された渋滞長リストから、上位 N 件の渋滞先頭ノードを取り出し、それぞれについて、プローブデータに格納された期間中で (1) 式の重要度を算出する。算出された重要度に基づき、ボトルネックノードの優先順位付けされたリストを出力する。重要度算出時に、渋滞リンクを再度探索する必要があるため、提案方式では、渋滞長リストから予め渋滞への影響が大きいノードを抽出することで、計算時間の短縮を実現している。

従来の交通調査が前提としているように、渋滞の発生する傾向が 1 週間単位で同様であれば、プローブ情報を全て計算する必要はなく、1 週間の内でいずれか 1 日のみを計算することで、定常的に渋滞原因となる箇所は抽出できるものと考えられる。そこで、さらに計算時間を低減する方式として、渋滞長リストをプローブ情報の一部のデータのみで抽出し、抽出されたノードの重要度を算出し、ボトルネックノードを算出する方式 (提案方式 2) も提案する。処理フローを図 4 に示す。

次章にて、それぞれの提案方式を実データに適用した結果について述べる。

#### 4. 評価実験

##### 4.1 データセットと実行環境

北京市のタクシープローブデータを使用した。対象エリアは北京市北西部の 10 km×7km のエリアとした。対

象エリア内の道路ネットワークには、リンクが 1990 含まれていた。プローブデータには、計測時刻、メッシュコード、リンクタイプ、リンク番号、リンク長、旅行時間、旅行速度、が含まれている。本研究では、渋滞時の旅行速度は時速 10 km 以下であるとして計算を行った。

データ収集期間は 2012 年 4 月 15 日から 4 月 21 日の 1 週間である。この中で、旅行速度が時速 10 km 以下のリンクは合計で 934495 であった。

計算に使用した計算機のスペックを表 1 に示す。

表 1. 計算機のスペック

OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-2600K (RAM 16.0 GB, 3.40GHz)

##### 4.2 適用結果

まず、提案方式により重要度を計算し、上位 20 件を抽出した結果を図 5 に示す。比較対象として、接続性は考慮せずに各リンクの渋滞時間を計算し、渋滞時間の長い上位 20 件のリンクのノードを並べたものを図 6 に示す。提案方式で抽出された上位 8 件のボトルネックノードと、渋滞時間のみでの上位 8 件のノードを比較した表を表 2 に示す。

表 2 から、優先度での順位とリンクの渋滞長のみでの順位は異なることが分かる。これは、渋滞している時間の長い道路が広範囲に広がる深刻な渋滞を引き起こしている道路というわけではないことが原因であると考えられる。また、渋滞時間が長いリンクであっても、需要が交通容量を大きく上回らなければ、他の道路へ影響が及ぶこともないために、提案方式のように、渋滞の広範囲

に渡る伝搬を考慮する方式が、単純なリンクごとの渋滞時間で集計するよりも、対策の優先度という点で有効であるとも考えられる。

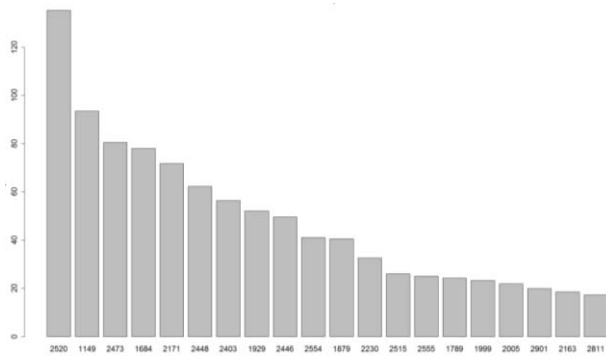


図5. 提案方式1による優先度の計算結果上位20ノード (縦軸: 優先度 (平均渋滞長), 横軸: ノード)

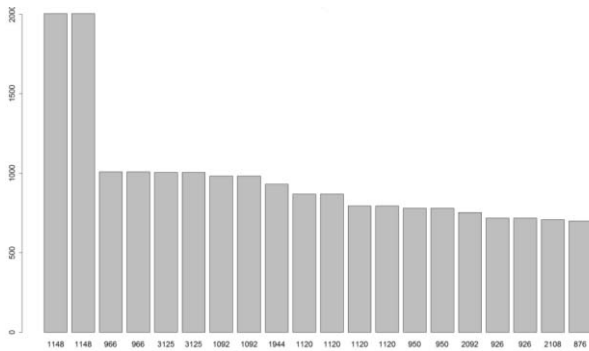


図6. ノード毎のリンク渋滞時間 (縦軸: 渋滞時間[回数], 横軸: ノード番号)

表2. 重要度ランキングの比較

順	提案方	リンク渋滞
1	2520	1148
2	1149	966
3	2473	3125
4	1684	1092
5	2171	1944
6	2448	1120
7	2403	950
8	1929	2092

次に、計算時間の比較結果を表3に示す。提案方式1では、全探索する方式よりも6.6倍高速にボトルネックノードを抽出できることが分かった。渋滞の絞り込みを一日分のプローブデータを利用して実施する提案方式2が最も計算時間が短い。しかし、表4に示されるラン

キングの推移から、毎日の重要度上位のボトルネックノードが異なることがわかった。一方、1週間の渋滞リンク数の推移(図7)を見ると、1週間で全体の渋滞リンク数に大きな変化は無いことが分かる。つまり、交通需要の総量については日々変化が少ないが、渋滞する箇所は日々異なることが分かる。これは、交通利用者の生活行動の日々の変化や利用する交通利用者が日々異なるということが原因であると考えられる。本研究では、1週間分のプローブデータを扱っているが、現実的には1年単位のプローブデータの解析が必要になることを考えると、データのサンプリングを工夫することや、全データを使って高速に計算する手法が必要になると考えられる。

表3. 計算時間の比較 (単位: sec)

提案方式1	提案方式2	全ノード探索
2350	438	15488

表4. 日ごとの重要度ランキングと全ノードで探索した場合のランキングの比

15	16	17	18	19	20	21
2255	2255	2520	550	2255	2520	2255
2520	2520	1149	2520	1968	2473	1968
1968	2403	2473	2711	1894	1684	2711
2711	1702	2403	2474	2473	1620	2171
2474	2446	1702	2403	2474	1929	713
2429	551	2446	1636	1930	1570	1702
729	2397	2309	2397	2448	2446	1940
1351	2381	2400	2399	2064	2397	1951

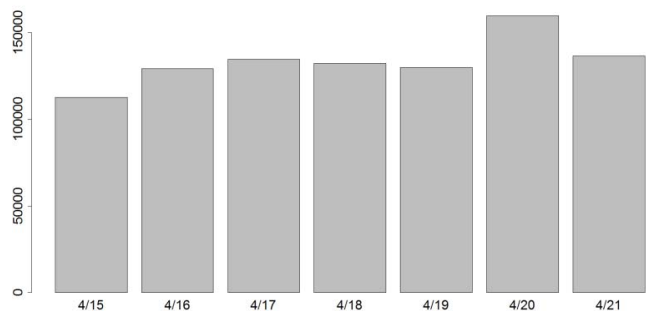


図7. 1週間の渋滞リンク数の推移 (縦軸: 渋滞リンク数, 横軸: 日にち)

次に、提案方式1により抽出されたボトルネックノードから生成される渋滞の傾向について述べる。ボトルネックノード(2520)における渋滞長の時間変化を図8に示す。1週間の結果を日別のグラフとして表示している。平日は、夕方に渋滞長のピークが来ており、帰宅

に伴う交通需要が高くなって渋滞長が長くなっているものと思われる。金曜日の夕方に帰宅需要が集中し、最も渋滞長と時間が長くなっている。ボトルネックノードを起点として発生する渋滞は、毎日同様に発生するのではなく、日々異なる傾向を持っていることが分かる。これは、表4の結果からも導き出される結果である。これは、プローブのように交通渋滞を常時連続的に観測することによって明らかになる事実であり、このようなデータでなければ、交通需要の日々の変化に対する交通容量の管理はきめ細やかに出来ないと考えられる。さらに、プローブデータを分析することによって、日中の渋滞が発生する時刻を明らかにすることができ、交通需要のピーク時刻を検出することができることも分かった。この結果を用いて、流入交通量を時間的・空間的にバランスよく分散させる方法に役立てられるものと考えられる。

最後に、システム上で抽出されたボトルネックノードが現実に対策すべきボトルネックなのかどうかについて検証した結果を述べる。清華大学・交通研究所の陸所長に現地調査と交通工学的な観点からボトルネックノードについて検証していただいた。清華大学交通研究所では、北京市内の交通渋滞解消に向けたコンサルティングを請け負っており、既に様々な交通調査を実施している。ここで言う交通調査とは、人手による交通量観測などを指しており、調査により抽出された交通渋滞箇所を図9に示す。

この中で、提案方式により抽出されたボトルネックノードは、図中の8番であった。提案方式により、従来の手法により抽出されるボトルネックノードを検出できた。しかし、他のボトルネック箇所は、提案方式で抽出されたボトルネックノードと異なっている。これは、今回使用したプローブデータが1週間分であったためとも考えられるが、今後、詳細な検証を実施する予定である。

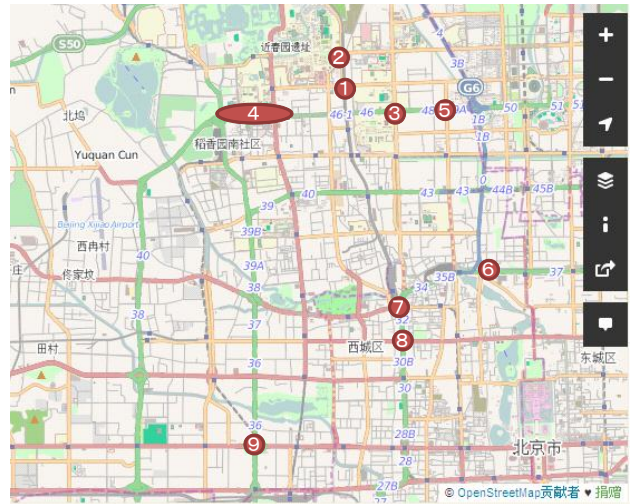


図9. 清華大学で抽出した渋滞ボトルネック箇所  
(8番ノードが2520)

最後に、渋滞の原因分析について述べる。本方式で抽出したボトルネックノード2901を、清華大学が現地調査した結果を図10に示す。図10は、自動車や自転車、歩行者が相互に衝突し、それぞれの流れを妨げている様子を表している。このように、交通工学の実務者たちは、交通渋滞・交通異常の原因を現地調査により抽出する。例えば、車両と車両の衝突や歩行者と車両の衝突が渋滞を引き起こす。こういった原因の追究は、プローブデータのみからは判別が困難であり、今後は、プローブデータから現地調査すべき箇所を抽出し、効率よくすることが重要になると考える。また、プローブデータ以外にも道路に設置されたカメラ画像などを利用して、渋滞原因の考察・渋滞解消策の提示まで機械的に支援する方式を考慮する予定である。

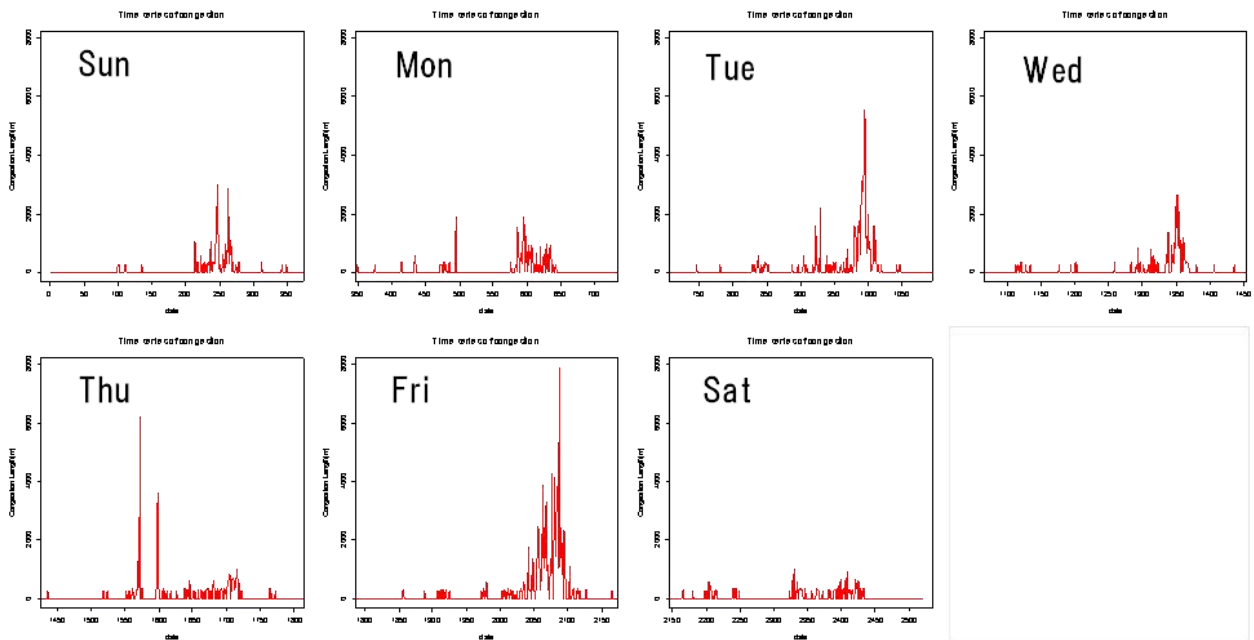


図8. ボトルネックノード2520における1週間の渋滞長の時間変化  
(横軸：時刻, 縦軸：渋滞長[m])





図 10. 渋滞を引き起こす原因の考察

## 5. 結論と今後の課題

本論文では、従来のプローブ技術をさらに発展させ、交通渋滞解消に貢献することを目的として、道路の混雑状況を時間的かつ空間的に分析し、渋滞現象のボトルネック箇所と発生時刻を検出する方式を提案した。プロトプログラムを開発し、北京市のタクシープローブデータで算出した道路混雑情報を評価用データとして利用した結果、1週間分のデータに対して 2350 秒の計算時間で検出することができた。さらに、検出結果を北京市の渋滞問題に取り組んでいる清華大学の分析結果と突き合わせ、提案手法によって抽出されたボトルネック箇所の 1 つが清華大学の抽出した結果と同様であることを確認した。これにより、交通情報システムの交通計画・渋滞解消の実務への適用を可能とする見通しを得た。

本研究で検討したボトルネック検出方式には、以下の課題が残されている。

### (1) 検出されたボトルネックのさらなる検証

本研究では、北京市の 1 週間分のタクシープローブデータを利用して、検出結果を評価した。一つのボトルネックに関して、清華大学の分析結果と合うことを確かめたが、他に抽出されたボトルネックに関してのさらなる詳細な検討は未だ実施していない。こうした抽出結果の

違いを明らかにすることで、本提案方式の本質的なボトルネックの抽出可能性を追求する必要がある。また、渋滞は様々な要因が複雑に絡み合っているため、北京市のみならず、他のより多数の都市・プローブデータによって検証を行う必要がある。また、交通工学的な検証を北京市以外の都市でも実施する必要があると考えられる。今後、様々なフィールドで技術適用性の検証を行い、実務への適用可能性の検討を進める予定である。

### (2) 渋滞解消に向けた取り組みへの支援

本研究では、渋滞の原因箇所と時刻を検出する技術を実現した。しかし、実際に渋滞を解消するためには、原因の究明、原因に対して解決策の検討、解決策の実現可能性の評価、解決策の実行というプロセスが現行業務では必要である。これらの業務プロセスを ITS により改善するためには、各プロセスでの ITS により収集されたデータを活用して支援する必要がある。今後、交通渋滞解消の実務を詳細に理解してノウハウが十分に蓄積されている中国・清華大学と具体的な交通渋滞問題に取り組む中で、各プロセスを支援することができる技術を見出し、技術の確立を今後目指す。

## 参考文献

- [1]Wang, W., Fushiki, T., Zhang, H., Kimita, K., and Mizuta, H.: A Probe Car System for Beijing, Proc. 12th World Congress on ITS, CD-ROM (2005).
- [2]上坂克己・門間俊幸・橋本浩良・松本俊輔・大脇鉄也: 「道路交通調査の新たな展開 ～5 年に 1 度から 365 日 24 時間へ～」, 土木計画学研究・講演集 Vol. 43, 2011. 5.
- [3]門間俊幸・橋本浩良・河野友彦・上坂克己: 「常時観測データを用いた新たな道路サービスレベル指標に関する研究」, 土木計画学研究・講演集 Vol. 43, 2011. 5.
- [4]水木智英・橋本浩良・門間俊幸・上坂克己・中西雅一: 「常時観測データを用いた渋滞状況の動的変化に関する分析～ボトルネック交差点とその影響範囲の特定～」, 土木計画学研究・講演集 Vol. 45, 2012. 5.
- [5]Man Li, Yuhe Zhang, Wenjia Wang: Analysis of Congestion Points based on Probe Car Data, Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, October 3-7, 2009..
- [6]H. Wang, H. Lenz, A. Szabo, J. Bamberger, and U. Hanebeck, "WLAN-Based Pedestrian Tracking Using Particle Filters and LowCost MEMS Sensors," Proceedings of Workshop on Positioning, Navigation and Communication, pp. 1- 7, 2007.