

シミュレーションモデルのリンク容量値の自動調整

東京大学国際産学共同研究センター 教授 桑原雅夫

1. はじめに

本研究は、シミュレーションモデルに内在するリンク交通容量パラメータ値を、観測された交通城今日の再現性が最大になるように、自動調整するアルゴリズムを提案することを目的とする。

パラメータ自動調整に関するこれまでの研究成果としては、古川、桑原の研究[1]がある。この研究では、観測リンク旅行時間を再現するようにリンク容量値を自動調整したモデルであり、Point-Queue モデルを用いて、リンク容量値の修正方向と修正幅を決めながら、自動調整するアルゴリズムであった。具体的には SOUND モデルを首都高速道路ネットワークに適用した場合の容量値の自動調整を試みている。この研究では、パラメータの修正方向とステップ幅の決定に計算時間を大幅に短縮できる Point-Queue モデルを用いており、新規性が認められたものであった。ところが、同時に同じパラメータ値を用いた場合でも、SOUND モデルの出力と Point-Queue モデルの出力には当然違いがあるため、Point-Queue モデルで決定したパラメータの修正が、SOUND モデル本体として必ずしも適切ではない場合があることが、問題点として指摘されていた。

そこで、本研究では Point-Queue モデルの採用を止め、そのかわり交通工学的な知見を援用してパラメータ値の修正方向と修正幅を決めることを試みるものである。本稿では、まず自動調整アルゴリズムの概要を説明し、次に 104 リンクで構成されるテストネットワークにおける自動調整結果、および東京 23 区（リンク数約 6000）の実ネットワークへの適用結果について、現段階までの中間結果を報告するものである。

2. 容量値調整方法の概要

2.1. 容量値の設定方法

シミュレーションモデルによってさまざまなリンク容量値の設定方法が考えられるが、本研究では次のように、あるリンクから流出容量値を直進、左折、右折の方向別に設定できるものとする：

$$m^k = \text{リンク } i \text{ の流出方向 } k \text{ の容量値, } k = 1 \text{ (直進), } 2 \text{ (左折), } 3 \text{ (右折)} .$$

2.2. アルゴリズム概要

リンク容量値の調整は、観測された方向別リンク交通量とリンク旅行時間に、シミュレーションのそれら両者がともに合致するように調整する。観測されている交通状況を再現するためには、リンク旅行時間の再現性だけを確保したのでは不十分である。その理由は、リンクに流入する交通量が観測交通量よりも少ない（多い）場合であっても、そのリンク容量値が実際の値よりも小さく（大きく）設定されていれば、たとえリンク交通量が異なっても旅行時間を観測値と等しくすることが可能だからである。逆に、リンク交通量を観測値と一致させても、リンク容量値の設定によっては旅行時間が観測値と大きくずれてし

まう可能性がある。よって、現況の交通状況を再現するためには、リンク交通量とリンク旅行時間の両者を同時に観測値と合致させるように、容量値を調整することが必要である。

(1) 旅行時間再現のための調整

たとえば、リンク i の旅行時間のシミュレーション値が観測値と一致していない場合であっても、そのリンクの容量値を修正すべきかであるかどうかは、すぐには定かにはならない。その理由は、そのリンクの交通状態が、そのリンクの容量値によって決められているとは限らないからである。仮に、シミュレーション旅行時間が観測値よりも大きい場合を考えると、次の 3 とおりの理由が考えられる：

- (a) 当該リンク i の容量が小さすぎたために、旅行時間が大きく出ている。
- (b) 当該リンク i よりも下流のリンク容量値が小さすぎたために、渋滞が下流から延伸して当該リンクの旅行時間も大きく出ている。
- (c) 当該リンク i よりも上流のリンク容量値が大きすぎたために、当該リンクに過大な交通量が流入して、当該リンクの旅行時間が大きく出ている。

この場合、当該リンク容量を修正すべき場合は、(a) の場合だけであり、(b)、(c) の場合には代わりに下流あるいは上流のリンク容量値を修正すべきである。(a) の場合は、当然ながら当該リンク i が、シミュレーション上で渋滞の先頭リンク（ボトルネックリンク）になっている場合である。このように、シミュレーション上でボトルネックリンク（渋滞先頭のリンク）でないリンクの容量は、その時の交通状態に対してクリティカルに効いていないので、容量値を変化させるべきでない。

したがって、着目するリンクが観測上とシミュレーション上においてボトルネックリンクであるかどうかの組み合わせで、容量値の調整を次のように整理することができる：

	シミュレーション上のボトルネックリンクである	シミュレーション上のボトルネックリンクではない
観測上のボトルネックリンクである	当該リンクの上流の混雑程度に合わせて、リンク容量を調整し上流の渋滞程度を観測値に近づくように調整する	当該リンクのリンク容量を減少させてボトルネックになるように調整する
観測上のボトルネックリンクではない	リンク容量を増加させて、シミュレーション上でボトルネックとならない方向に調整する	容量値の調整不要

(2) リンク交通量の再現性のための調整

上記 (1) で述べたように、ボトルネックリンク以外のリンク容量値は、旅行時間にも交通量にも影響を与える度合いが小さいので、リンク交通量の再現性確保についてもボトルネックリンクに着目する。

あるリンク i には、観測交通量、シミュレーション交通量という 2 種類の交通量が存在するが、これらを次のように書く：

$$f_{ik}^{sim} = \text{リンク } i \text{ 方向 } k \text{ のシミュレーション上の交通量}$$

$$f_{ik}^{obs} = \text{リンク } i \text{ 方向 } k \text{ の観測上の交通量}$$

これらと現在設定されている容量値 m^k との3種類の大小関係によって、次のようにリンク容量値を調整する：

$m^k > f_{ik}^{sim} > f_{ik}^{obs}$	リンク容量を減少させる
$m^k > f_{ik}^{obs} > f_{ik}^{sim}$	調整不要
$f_{ik}^{obs} > m^k > f_{ik}^{sim}$	リンク容量を増加させる

(3) リンク容量値の調整範囲

道路幾何構造により、実現可能なリンク容量値の上限と下限は、おおよそ決めることができるので、各方向別のリンク容量値についても上限と下限を設定し、その範囲で調整を行う。

2.3. ボトルネックリンクの判定方法

前節の容量値の調整方法では、どのリンクがボトルネックであるのかをまず特定しなければならない。まず、リンク旅行時間に基づいて次のように各リンクの渋滞・非渋滞を判定する：

$$T_{ik}^{obs}(t) \leq TF_i^k \quad \text{for all } k \text{ and } t, \quad \text{リンク } i \text{ は非渋滞 (観測)}$$

$$T_{ik}^{sim}(t) \leq TF_i^k \quad \text{for all } k \text{ and } t, \quad \text{リンク } i \text{ は非渋滞 (シミュレーション)}$$

ここに、

$$T_{ik}^{obs}(t) = \text{リンク } i \text{ の方向 } k \text{ の時間帯 } t \text{ における観測上の平均旅行時間}$$

$$T_{ik}^{sim}(t) = \text{リンク } i \text{ の方向 } k \text{ の時間帯 } t \text{ におけるシミュレーション上の平均旅行時間}$$

$$TF_i^k = \text{リンク } i \text{ の方向 } k \text{ の自由旅行時間}$$

次に、ボトルネック判定を

「リンク i は渋滞 かつ その下流に接続するすべてのリンクが非渋滞」

の場合に、リンク i をボトルネックリンクと定義する。このボトルネック判定を、観測旅行時間およびシミュレーション旅行時間に基づいて行い、それぞれにおけるボトルネックリンクを特定する。

2.4. リンク交通量の評価方法

リンク交通量は時間帯ごとに変化するため、上記で定義した f_{ik}^{sim} 、 f_{ik}^{obs} を次のように、対象時間帯の中の最大交通量として評価する：

$$f_{ik}^{sim} = \text{Max}_t [f_{ik}^{sim}(t)]$$

$$f_{ik}^{obs} = \text{Max}_t [f_{ik}^{obs}(t)]$$

ここに、 $f_{ik}^{obs}(t)$ = リンク i の方向 k の時間帯 t における観測上の交通量
 $f_{ik}^{sim}(t)$ = リンク i の方向 k の時間帯 t におけるシミュレーション上の交通量

3. 仮想ネットワークへの適用

このアルゴリズムを 104 リンクで構成される仮想ネットワークに適用し、評価を行う。

3.1. ネットワークと OD 需要

ネットワークは以下のような格子状のグリッドネットワークである。すべてのリンクは同じ幾何構造で、片側 3 車線でリンク長は 500m である。ただし、リンクの終端の 100m 区間には専用右折レーンと専用左折レーンが追加されているので、その区間の合計車線数は、片側 5 車線である。

交通需要としては、起点ノード 1、終点ノード 11 という 1 OD を扱う。OD 交通需要の時間変化は、次のように 1 時間ごとに 1000:2400:1000:1000:1000 [台/時] と 5 時間にわたって変化させている。また、時間帯 t は、1 時間帯に設定した。

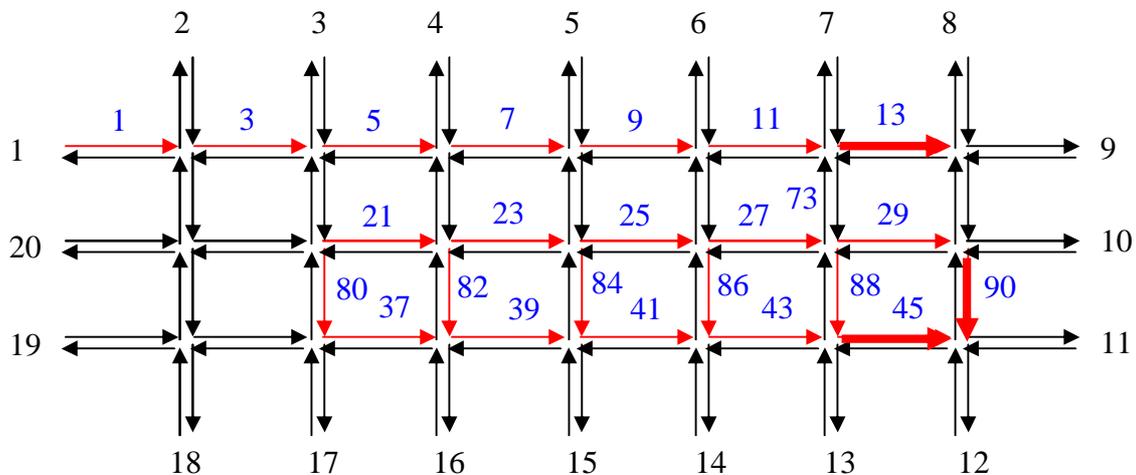


図 1 仮想ネットワーク (太い赤矢印 = ボトルネックリンク)

3.2. 経路選択モデル

経路選択モデルは、Dial 配分用い以下のような選択モデルとした。

$$\begin{aligned}
 \text{一般化費用} &= \text{経路上自由流旅行時間[秒]} \times 0.0 \\
 &+ \text{同時刻和経路旅行時間[秒]} \times 1.0 \\
 &+ \text{経路通行料金[円]} \times 60 \quad \div 60.0[\text{円/分}] \\
 &+ \text{経路上左折回数} \quad \times 30.0[\text{秒}] \\
 &+ \text{経路上右折回数} \quad \times 30.0[\text{秒}]
 \end{aligned}$$

$$\text{ロジット感度パラメータ} = 0.005$$

さらに、本研究で用いた SOUND モデルでは、経路選択を 5 分に 1 回行わせている。

3.3. 容量値の調整実験

観測旅行時間の作成にあたっては、すべてのリンクの流出容量値を次のように設定した：

- 左折容量値 = 600 [台/時]
- 直進容量値 = 800 [台/時]
- 右折容量値 = 400 [台/時]

また，パラメータ調整の容量の変動幅の制約として，上記容量値の 75% から 125% の範囲を許容範囲とし，初期値は観測上のボトルネックリンクについては許容幅の下限である 75% の容量値とし，その他のリンクについては上限である 125% の容量値とした．

以上のような設定で，SOUND モデルを実行して観測リンク旅行時間を作成すると，上図のようになる．すなわち，赤矢印のリンクが渋滞リンク（旅行時間が自由旅行時間よりも長いリンク）であった．

本適用実験においては，容量値の調整は，直進・左折・右折の方向に独立には行わずに，方向別の容量値の比率は初期値の比率に固定している．すなわち，たとえば左折容量をある量だけ調整すると，直進容量と右折容量も，方向別の容量値の比率が初期値に等しくなるように連動して変化する設定である．

アルゴリズムの適用結果が図 2，3，4 に示されている．丸プロットは，旅行時間のみに基づいて容量値を調整した結果であり，ひし形プロットは，旅行時間と交通量の両者を用いて調整した結果である．これらの図の縦軸評価値は次のように定義される：

$$\text{リンク旅行時間差の絶対値の平均 [秒]} = \sum_{i,k} \left| \sum_t \{ T_{ik}^{sim}(t) - T_{ik}^{obs}(t) \} \right| / N$$

$$\text{リンク交通量差の絶対値の平均 [台 / 時]} = \sum_{i,k} \left| \sum_t \{ f_{ik}^{sim}(t) - f_{ik}^{obs}(t) \} \right| / N$$

$$\text{総旅行時間差 [台秒 / 時]} = \sum_{i,k,t} \left| T_{ik}^{sim}(t) \cdot f_{ik}^{sim}(t) - T_{ik}^{obs}(t) \cdot f_{ik}^{sim}(t) \right| / N$$

これらのリンク i 、ターン方向 k 、時間帯 t の総和は，リンク旅行時間 $\{ T_{ik}^{sim}(t) - T_{ik}^{obs}(t) \}$ あるいはリンク交通量 $\{ f_{ik}^{sim}(t) - f_{ik}^{obs}(t) \}$ に差がある場合だけについて加算したものであり、 N はそれらの場合の総数である。

両方の結果ともに，旅行時間，交通量，総旅行時間（リンク交通量*リンク旅行時間の和）の観測値とシミュレーション値の差は，数回の繰り返し計算で大幅に改善されているが，その後の改善はあまりない．また，旅行時間だけでなく，交通量も利用して調整したほうが，若干結果がよい．

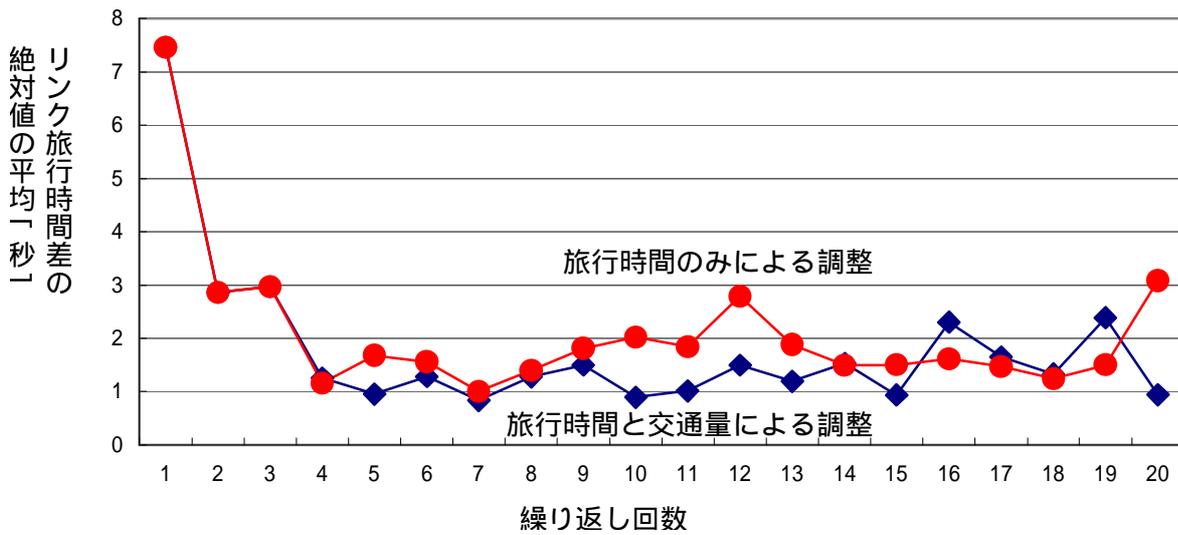


図2 繰り返し回数とリンク旅行時間差の絶対値の平均 [秒/時]

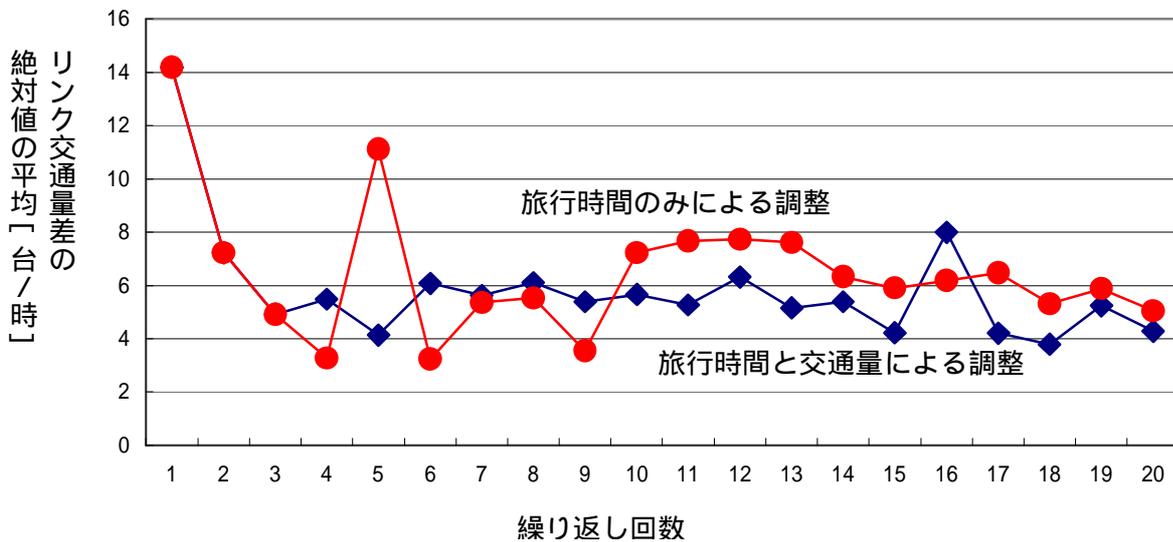


図3 繰り返し回数とリンク交通量差の絶対値の平均 [秒/時]

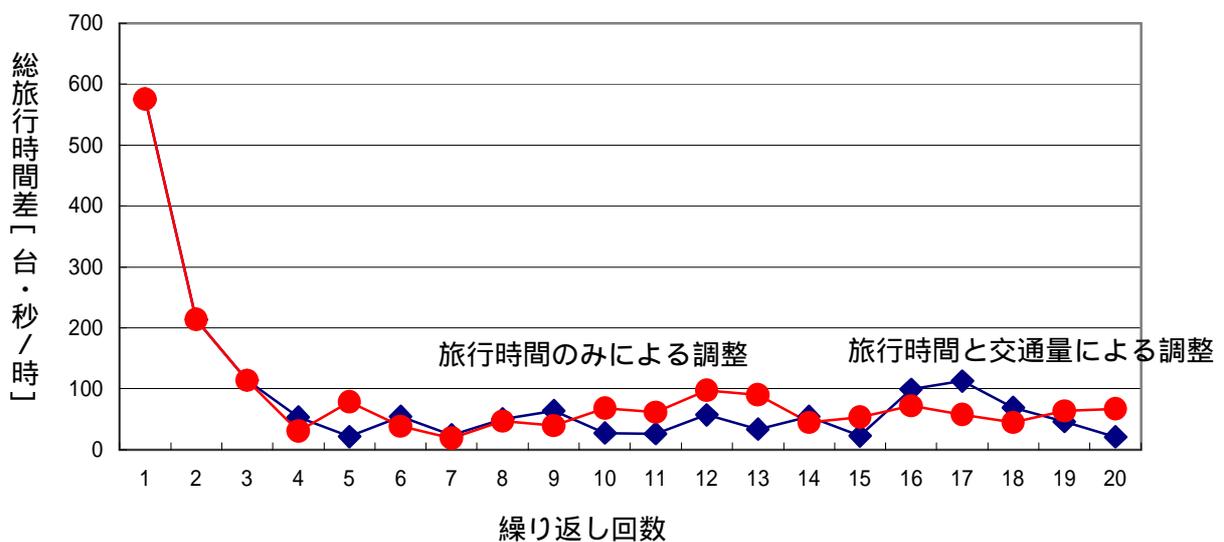


図4 繰り返し回数と総旅行時間差 [秒/時]

図5は、渋滞リンク(方向別)ごとの、調整後の容量値を表したものである。リンク容量値については、今回の実験の正しい容量値は 3400 [台/時] であるが、旅行時間と交通量を用いた調整後は、ボトルネックリンクであるリンク 45 と 90 を除いて、ほぼこの値に収束している。図6は、渋滞リンク(方向別)ごとの、旅行時間誤差を表したものである。最大でも5時間帯で70秒程度とまずまずの結果である。図7, 8は、同じく渋滞リンク(方向別)ごとの、交通量誤差と総旅行時間誤差をあらわしているが、初期容量値を用いた結果と比べるとかなりの改善が見られる。

今回の調整結果をどのように理解すればよいのかを知るために、ランダムにいくつかのリンクを取り出して、それらのリンク容量値を真値 3400 [台/時] から -1 [台/時] だけ、減少させた場合に、どのくらいの旅行時間の絶対誤差が発生するのかを調べてみると、渋滞リンクにおける平均の絶対誤差が約 3 秒であった。このことを考慮すると、今回の調整結果がかなり妥当であることがいえる。

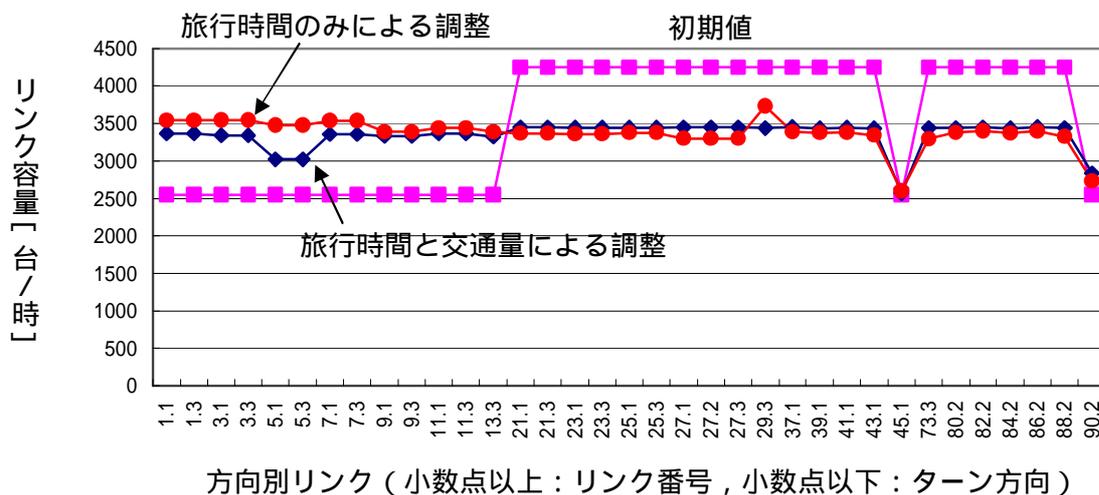


図5 リンク別・流出方向別の容量値

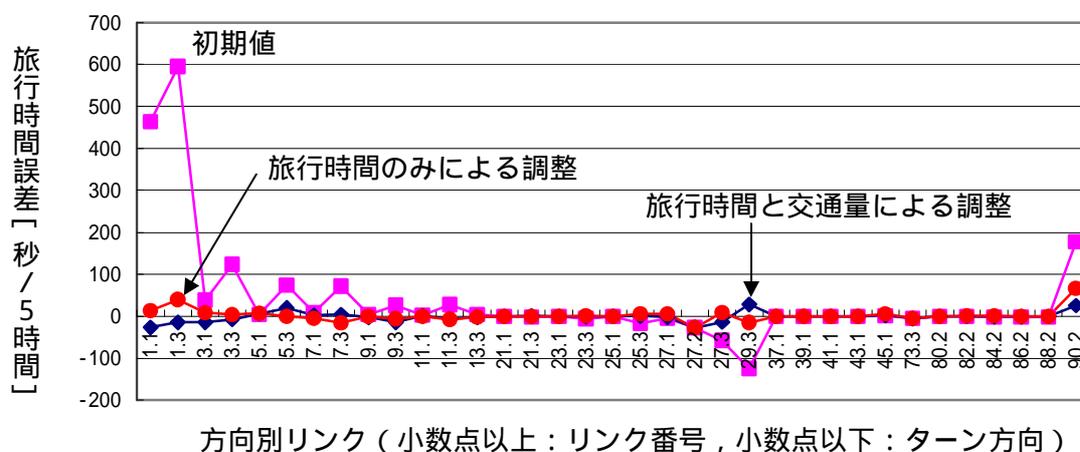
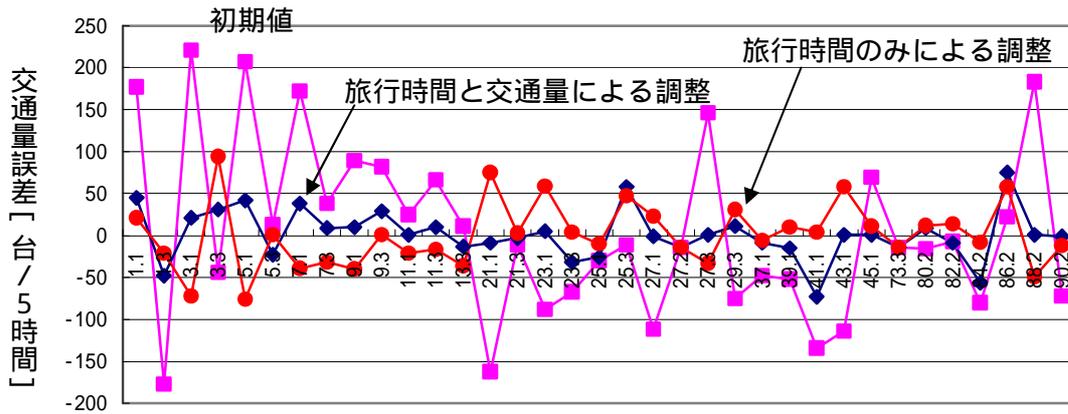
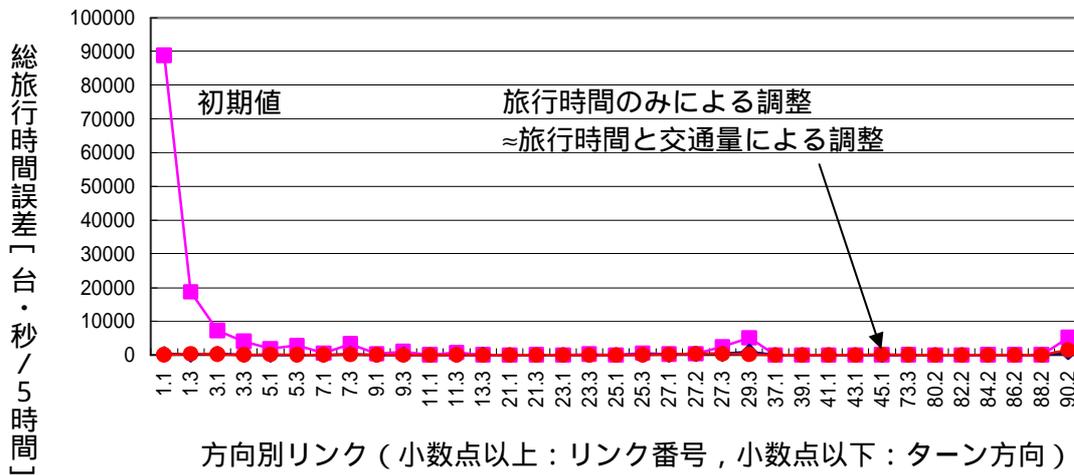


図6 リンク別・流出方向別の旅行時間誤差



方向別リンク (小数点以上：リンク番号，小数点以下：ターン方向)

図7 リンク別・流出方向別の交通量誤差



方向別リンク (小数点以上：リンク番号，小数点以下：ターン方向)

図8 リンク別・流出方向別の総旅行時間誤差

図9，10は，リンク1のクリティカルな方向である直進交通量について，リンク旅行時間とリンク交通量の時間変化を見たものである．実線が観測値で，破線が旅行時間と交通量に基づいて調整した容量を用いたシミュレーション結果である．初期値に比べると，シミュレーション結果が非常によく観測値を再現できていることがわかる．

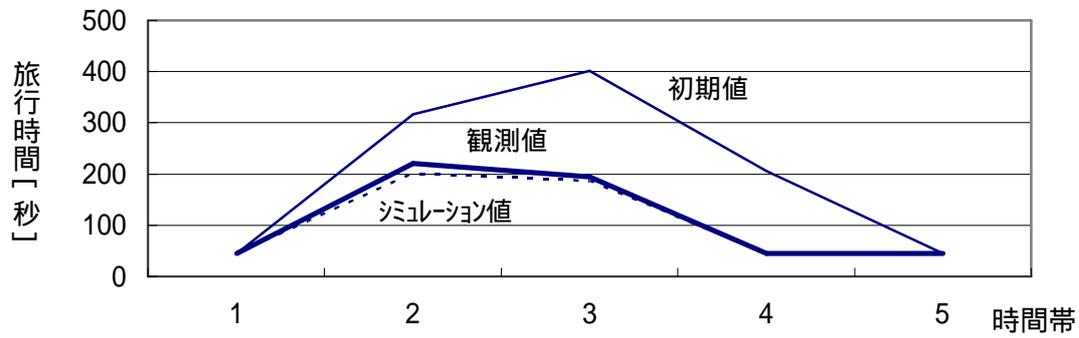


図9 リンク1直進方向の旅行時間の観測値(太実線)とシミュレーション値(破線)

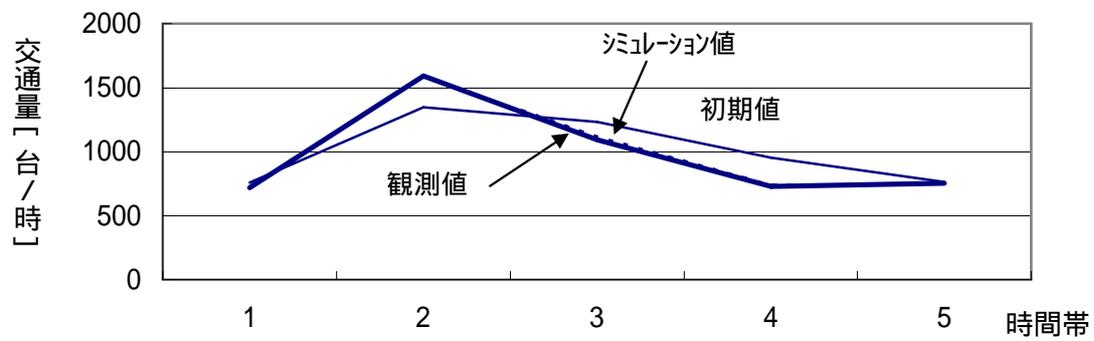


図10 リンク1直進方向の交通量の観測値(太実線)とシミュレーション値(破線)