

## 1. 本ドキュメント概要

S4 による交通流シミュレーションについて、「シミュレーションモデルの標準検証プロセス～Verification」(<http://www.jste.or.jp/sim/manuals/VfyMan.pdf>) で示される verification プロセスを適用した結果を報告する。

はじめに S4 の交通シミュレーション機能の概要について説明したのち、以下の Verification プロセスの各項目の検証結果を記載する。なお、信号機など S4 に実装されているものとは異なる仕様を前提としている項目については検証していない。

検証内容	章番号
車両の発生と交通量保存	3
ボトルネック容量	4
渋滞の延伸と解消およびショックウェーブの伝播速度	5
合分流部分の容量と合分流比	6
経路選択行動	7

## 2. S4 の交通シミュレーション機能の概要

S4 はエージェントベースモデルによって交通シミュレーションを行う。シミュレータは入力として道路 NW データと OD を与えられる。道路 NW のリンクは設定の長さ(デフォルトでは 500m)以下になるように等分したサブリンクに分けられ、サブリンクの間およびリンクとリンクの間にはポイントキュー(FIFO)が設けられる。エージェントは与えられた OD に従って生成され、ネットワークのリンク上を目的地に向かって移動する。

シミュレーションは離散的な時間ステップ(デフォルトでは 1sec)単位で処理が行われる。

各ステップにおいて、各エージェントについて以下を繰り返し行う：

- (i) サブリンクの移動
- (ii) 経路選択・キューへの追加
- (iii) キューからの取り出し

## 2.1. サブリンクの移動

リンクにはリンク容量、自由流速度、ジャム密度から定まる Q-K 関係が定義されている。この Q-K 関係を  $Q=VK$  に基づいて変形した V-K 関係を用いて、その時間ステップのエージェント移動距離を算出し、エージェントを移動させる。

注意: サブリンク内の密度がジャム密度に達すると、V-K 関係によりそのサブリンク内の車両の速度がすべて 0 になり、それ以降車両が一切移動できなくなってしまう。このようなスタックを起こさないようにするために、実際にはエージェントの移動速度は少なくとも指定の最低移動速度(デフォルトでは 5km/h)で行われるようにしている。

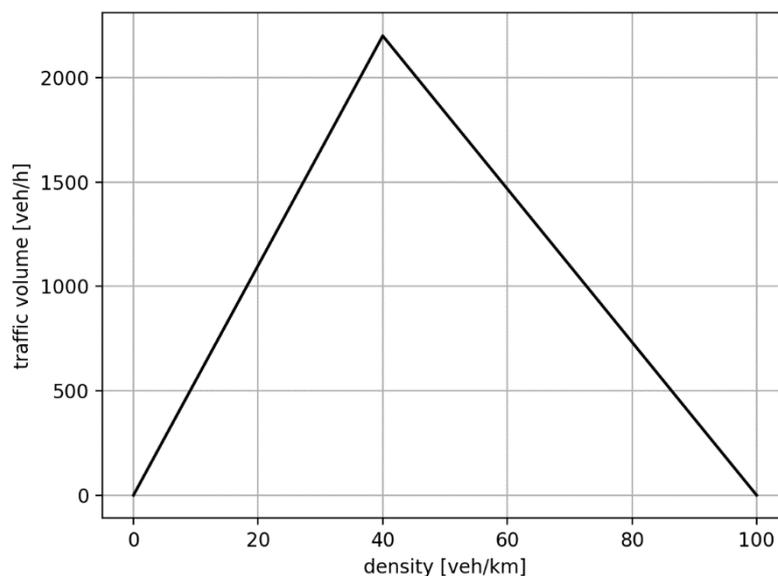


図 1 Q-K 関係

## 2.2. 経路選択・キューへの追加

エージェントがリンク端に到達すると次に進入するサブリンクを選択し、そのサブリンクと現在のサブリンクの間にあるキューに入る。次のサブリンクの選択は、現在位置がリンク内の場合は直下流のサブリンクを、現在位置がリンクとリンクの境界(ノード)の場合は以下に述べる経路選択ロジックに基づいて行う。

経路選択ではコストの小さい経路を高い確率で選択する。コストは混雑を考慮した所要時間と利用料金にそれぞれ一定の係数をかけて足し合わせて算出する。混雑を考慮した所要時間は移動時間(=リンク長/リンクの現在速度)にキューの待ち時間の予測値を加えて算出する。現在の混雑状況をコストに反映させるために、コスト計算は指定した時間間隔で再計算される。

### 2.3. キューからの取り出し

進入先サブリンクの密度から Q-K 関係に従って流入可能量を算出する。複数のサブリンクが同一のサブリンクに接続している(合流部である)場合、各上流キューからの流入可能量は合流比を考慮して算出される。

キューにエージェントが存在するあいだ、キューからの累積流出台数に流入可能量を加算していき、それがキュー先頭のエージェントの大きさに達するたびに取り出しを行う(エージェントの大きさは離散的なため、端数を適宜管理して累積流出台数が合うようにする)。

### 3. 車両の発生と交通量保存

#### 3.1. 車両の発生

##### 概要

シミュレーションモデルの車両発生の機能を検証する。以下を確認する。

- モデルで仮定している発生パターンが達成されているか
- 乱数系列により、仮定したパターンから大きく乖離することはないか

##### 検証内容

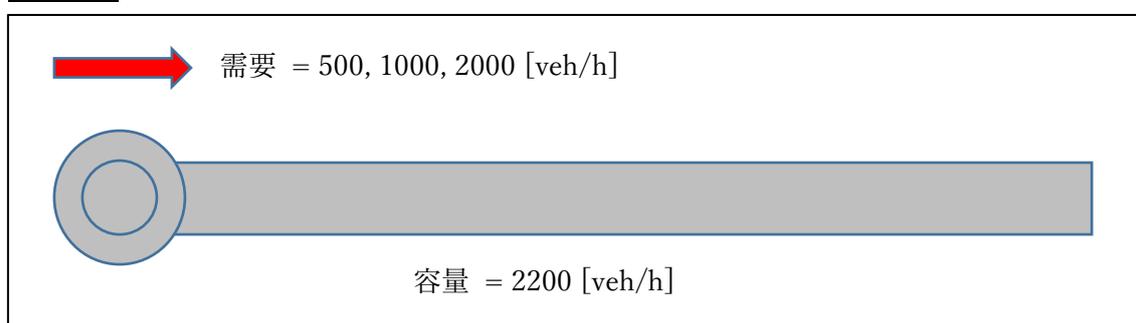


図 2 道路

- NW:

上図のように容量 2200veh/h のリンクを用意する。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]	合流比
リンク	2200	55	100	1.0	-

- 需要:

{500 or 1000 or 2000 } veh/h の交通需要を与える。図中リンクの最上流部分（左端）で、指数分布に従う車両間隔で車両を発生させる。

- 想定される結果:

発生間隔が指数分布に従っており、1h の総発生量が設定した需要になっている。

- 確認方法:

車両の発生間隔と発生台数を観測し、適切な台数の車両 が指定したパターン(指数分布ランダム)で出現するか確認する。それぞれの設定で乱数を変えて 5 回ずつ試行する。

### 3.1.1. 結果：500 台の場合の発生時間間隔

以下の通り、指数分布に従う分布となる。黒線は平均 500/3600 の指数分布の確率密度関数を表す。

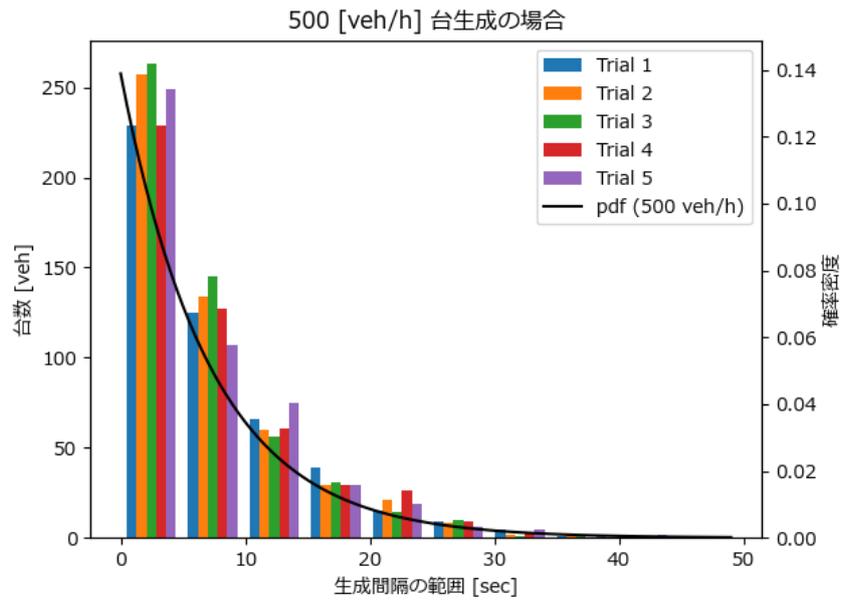


図 1 生成間隔(500 台)

### 3.1.2. 結果：1000 台の場合の発生時間間隔

以下の通り、指数分布に従う分布となる。

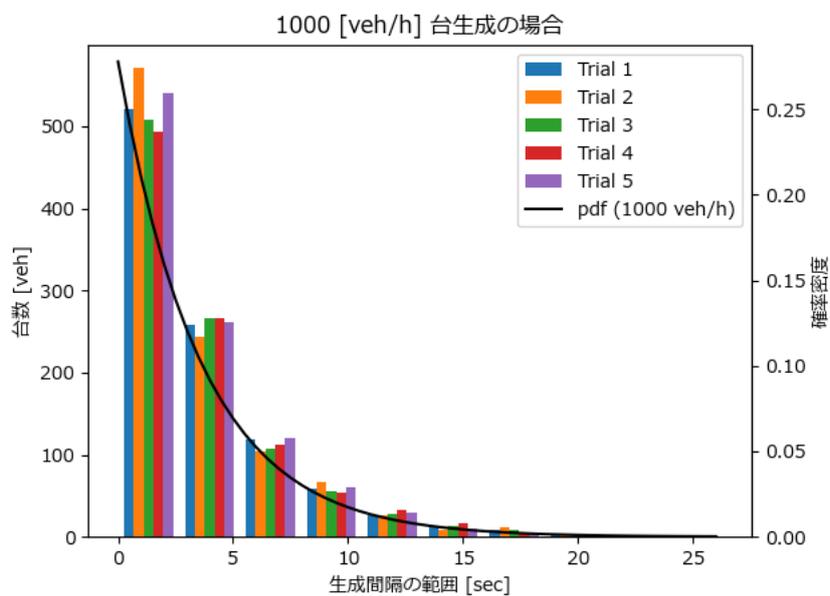


図 2 生成間隔(1000 台)

### 3.1.3. 結果：2000 台の場合の発生時間間隔

以下の通り、指数分布に従う分布となる。

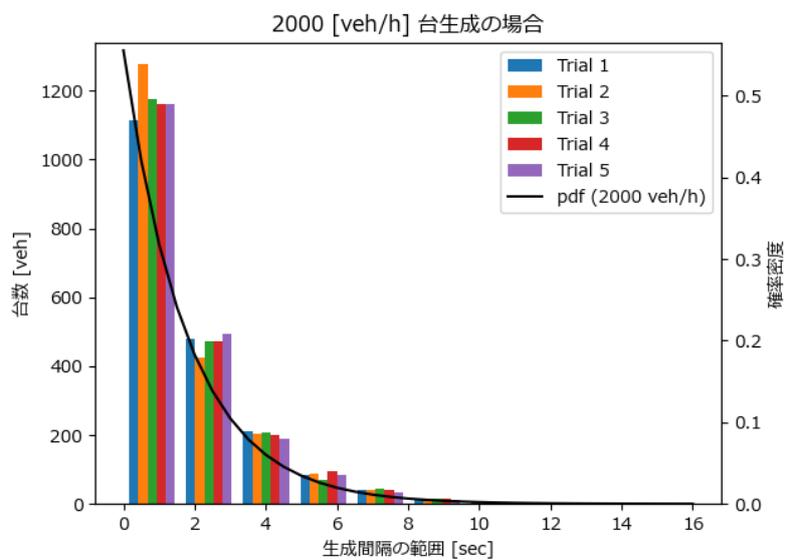


図 3 生成間隔(2000 台)

### 3.1.4. 結果：総発生台数

以下の通り、設定した需要に応じた台数の車両が発生している。

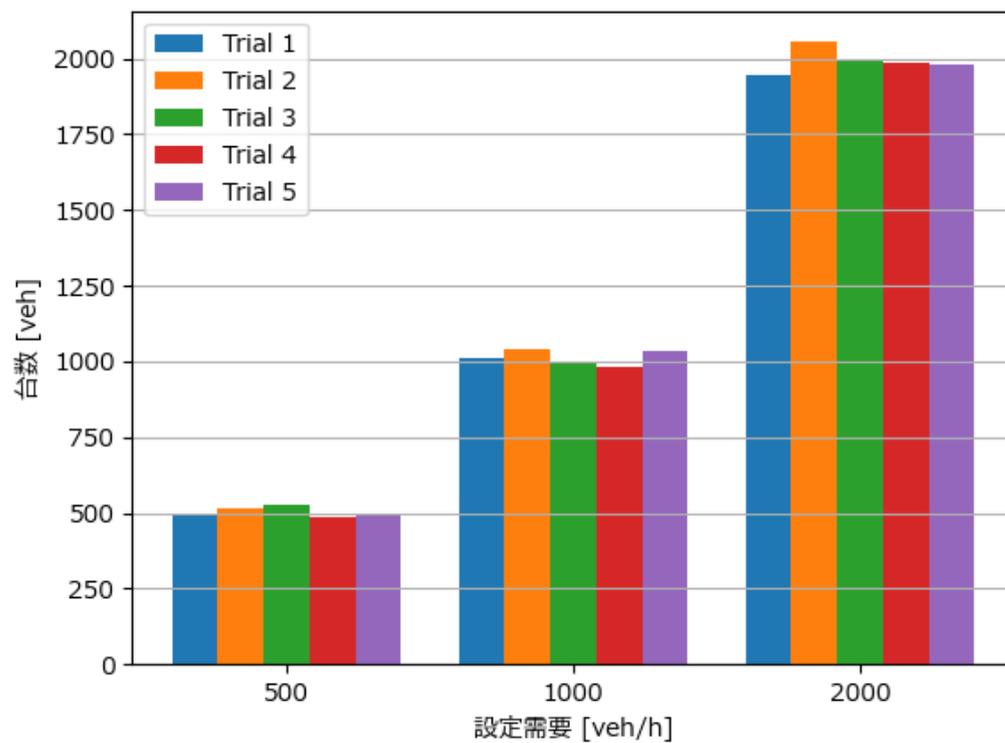


図 4 総発生台数

### 3.2. 交通量保存

#### 概要

スタディエリア内側の渋滞がネットワーク外部に延伸した状態で、到着する車両がエリア外の渋滞末尾に追加され、最終的に設定した需要が消滅することなくすべて流入しているか確認する。

#### 検証内容



図 7 道路

- NW:

上図のように容量 2200veh/h のリンクを用意する。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]
リンク	2200	55	100	1.0

- 需要

最初の 1h は 4400veh/h で、それ以降は全く車両が発生しない交通需要を与える。図中リンクの最上流部分（左端）で、車両を等間隔で発生させる。

- 想定される結果:

リンク容量分の交通がネットワークに流入する。

- 確認方法:

リンクへの累積流入量を観測し、流入曲線の傾きがリンク容量になっていることを確認する。

### 3.2.1. 結果

以下の通り、設定のリンク容量で流入していることが確認できる。

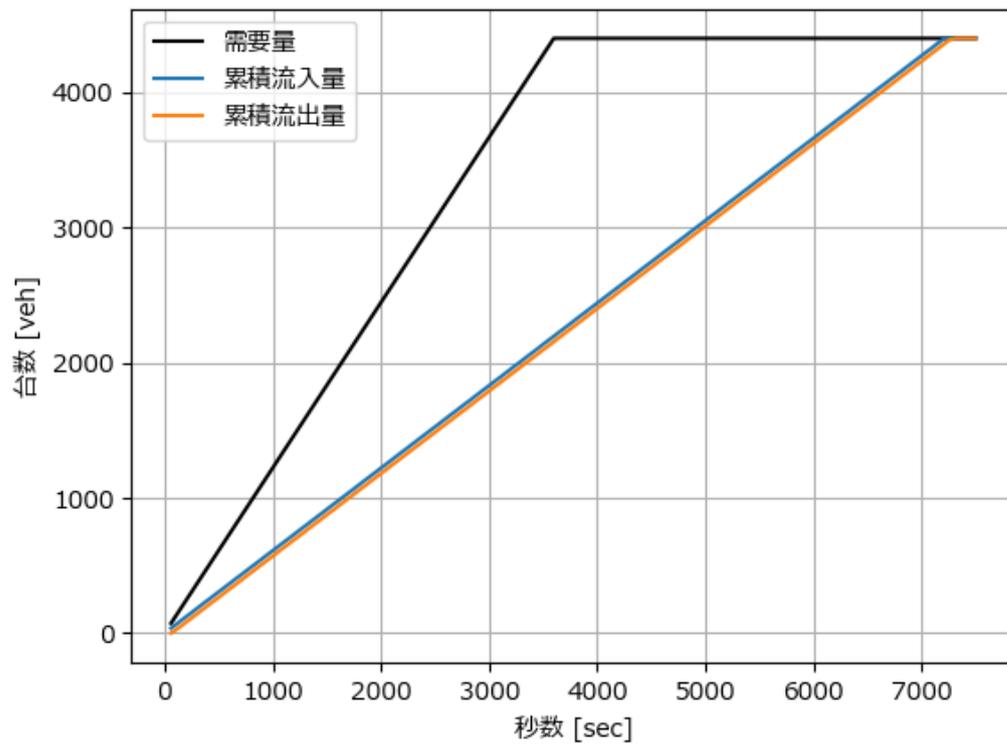


図 8 累積交通量

#### 4. ボトルネック容量

##### 概要

ボトルネック容量の再現性の確認を行う。

##### 検証内容



図 9 下流にボトルネックがある道路

- NW:  
上図のように容量 2200veh/h のリンクの先に容量 {800 or 1000 or 1200}veh/h のリンクを接続する。  
リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]
上流リンク	2200	55	100	2.5
ボトルネック	800 or 1000 or 1200	20 or 25 or 30	100	1.0

- 需要:  
1500veh/h の交通需要を与える。図中リンクの最上流部分（左端）で、車両を等間隔で発生させる。
- 想定される結果:  
1h のボトルネックへの累積流入量がボトルネック容量になっている。
- 確認方法:  
上流のリンクを通過する時間を考慮して、 $t=3600+164s$  時点でのボトルネックへの累積流入量が設定したボトルネック容量になっていることを確認する。

#### 4.1. 結果

以下の通り、設定のボトルネック容量だけボトルネック部分へ流入していることが確認できる。

ボトルネック設定容量	t=3764 時点のボトルネックへの累積流入量
800[veh/h]	790
1000[veh/h]	989
1200[veh/h]	1192

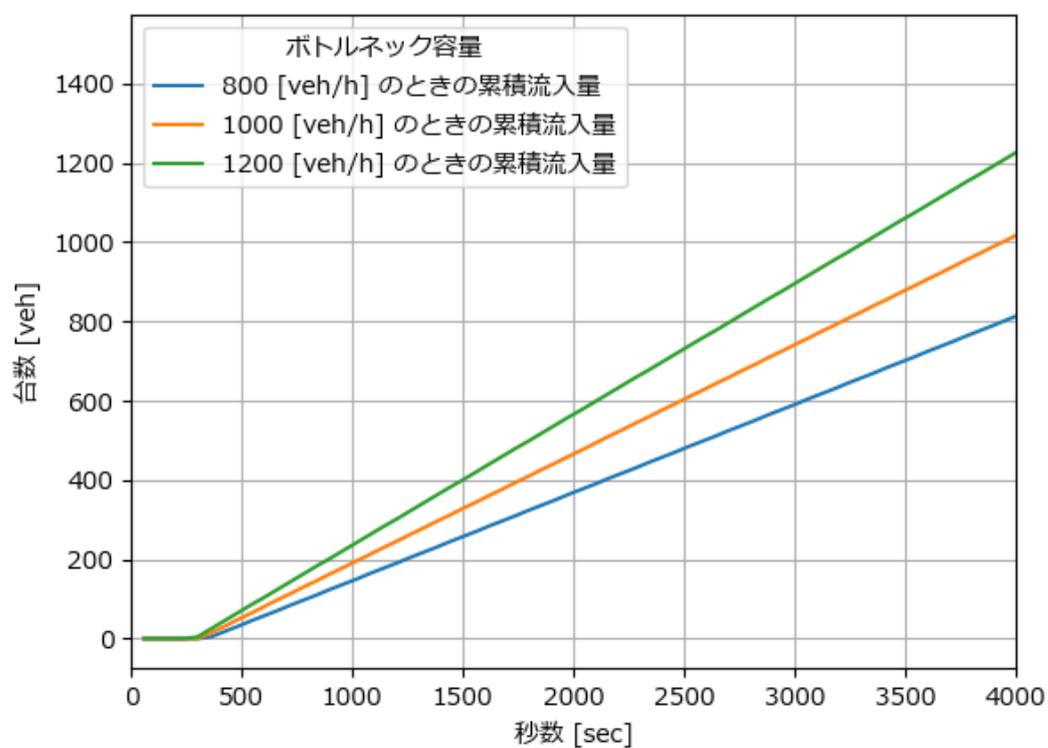


図 10 累積流入量

## 5. 渋滞の延伸と解消およびショックウェーブの伝播速度

### 概要

ボトルネックを含む単路部において、

- 需要がボトルネック容量を上回り、渋滞が延伸する状況
  - 需要がボトルネック容量を下回り、渋滞が上流から解消していく状況
- について、渋滞の延伸と解消が再現されるか確認する。

### 検証内容

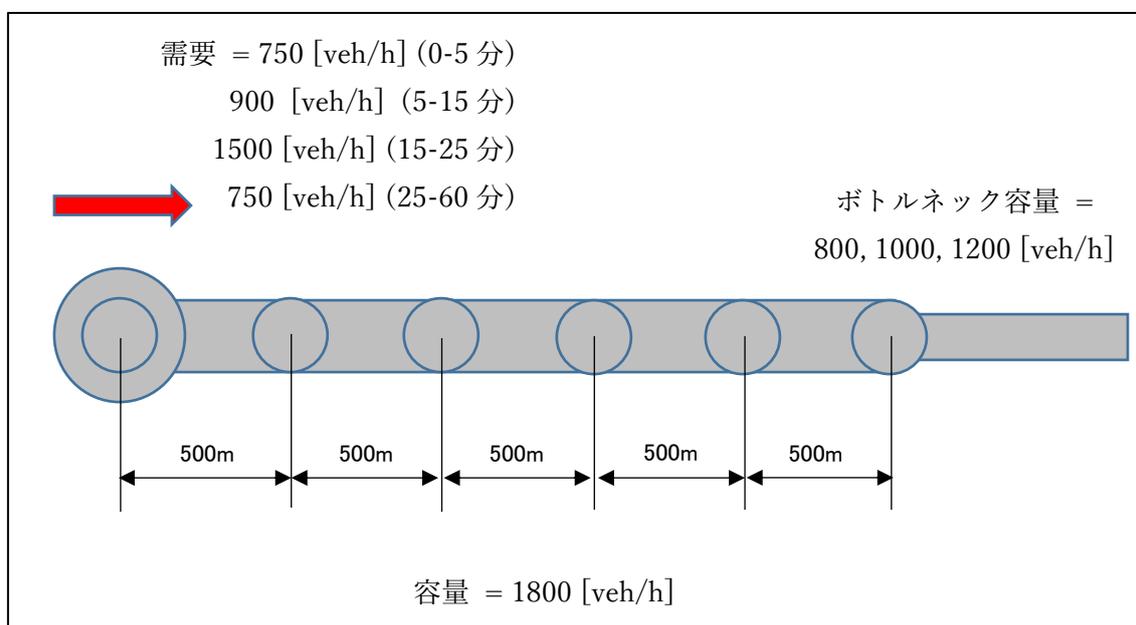


図 11 下流にボトルネックがある道路

- NW:  
 上図のように 5 つのノードをリンクで直線状につなぐ。各リンクは 500m で容量は 1800veh/h とする。一番下流のノードにさらに容量 {800 or 1000 or 1200}veh/h のリンクを接続する。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]
上流リンク 1-5	1800	45	100	0.5
ボトルネック	800 or 1000 or	20 or 25 or	100	1.0

	1200	30		
--	------	----	--	--

- 需要:  
シミュレーション開始後から
  - 0~5min: 750veh/h
  - 5~15min: 900veh/h
  - 15~25min: 1500veh/h
  - 25~60min: 750veh/h
 となるように与える。図中リンクの最上流部分(左端)で、車両を等間隔で発生させる。
- 想定される結果:  
モデルに与えた Q-K 関係から求められるショックウェーブの伝播速度に従って、渋滞が発生・延伸・解消する。
- 確認方法:  
渋滞が発生・延伸・解消していく様子を各リンクの流出交通量を観測して確認する。

5.1. 結果：ボトルネック容量=800 [veh/h]の場合

結果と理論値は以下の通りである。

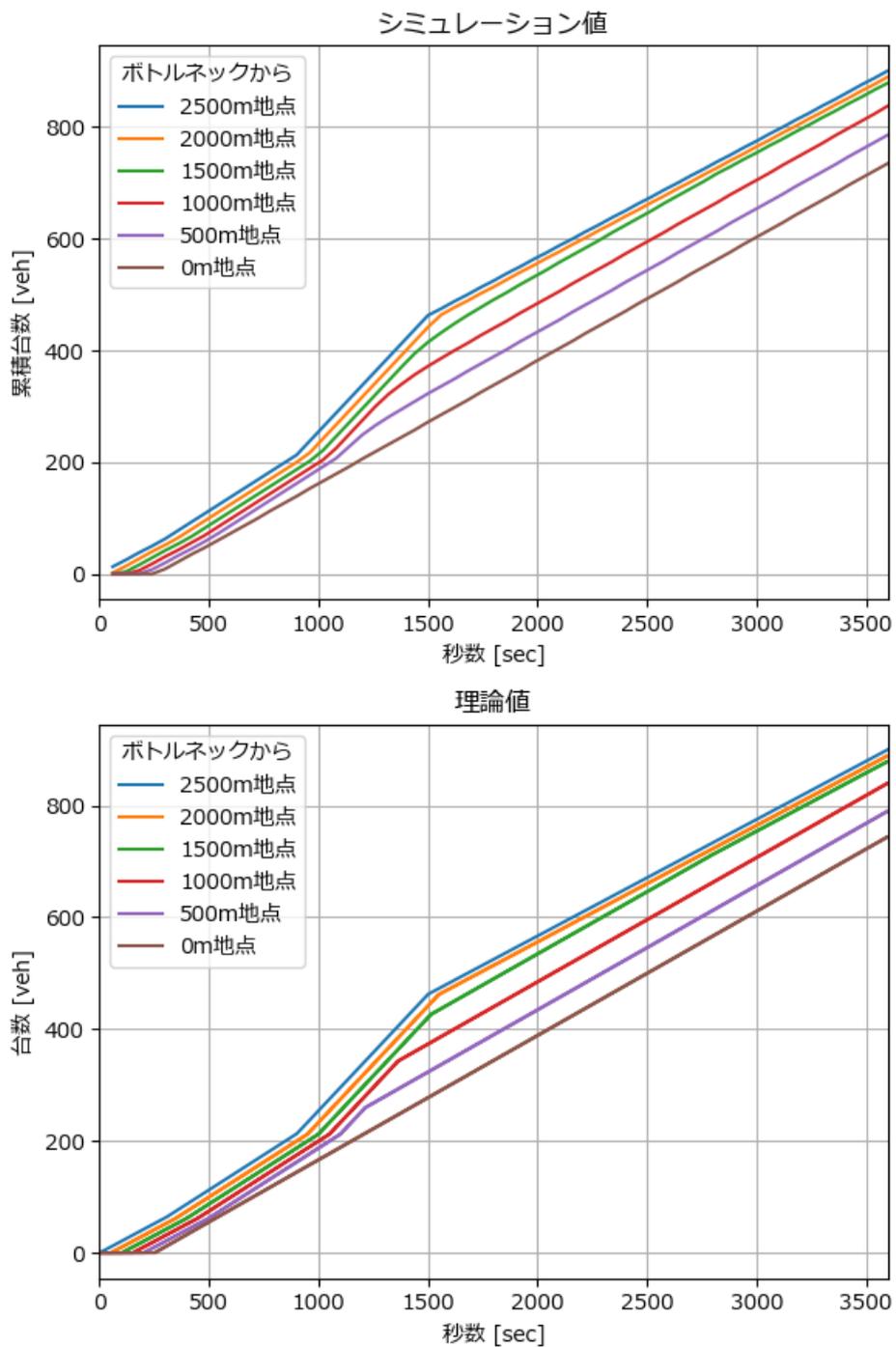


図 12 各地点の累積交通量(容量=800 [veh/h])

5.2. 結果：ボトルネック容量=1000 [veh/h]の場合

結果と理論値は以下の通りである。

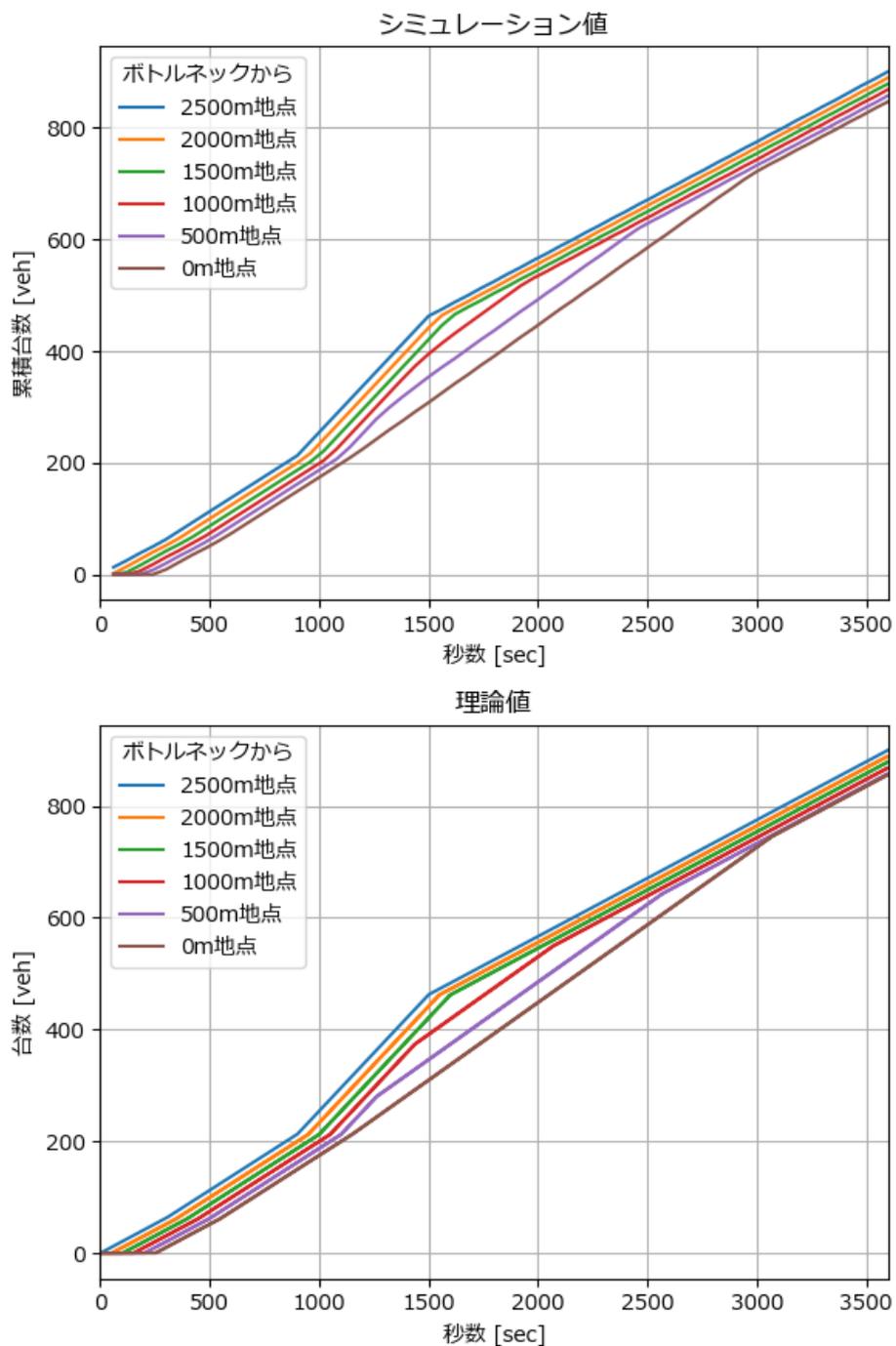


図 13 各地点の累積交通量(容量=1000 [veh/h])

### 5.3. 結果：ボトルネック容量=1200 [veh/h]の場合

結果と理論値は以下の通りである。

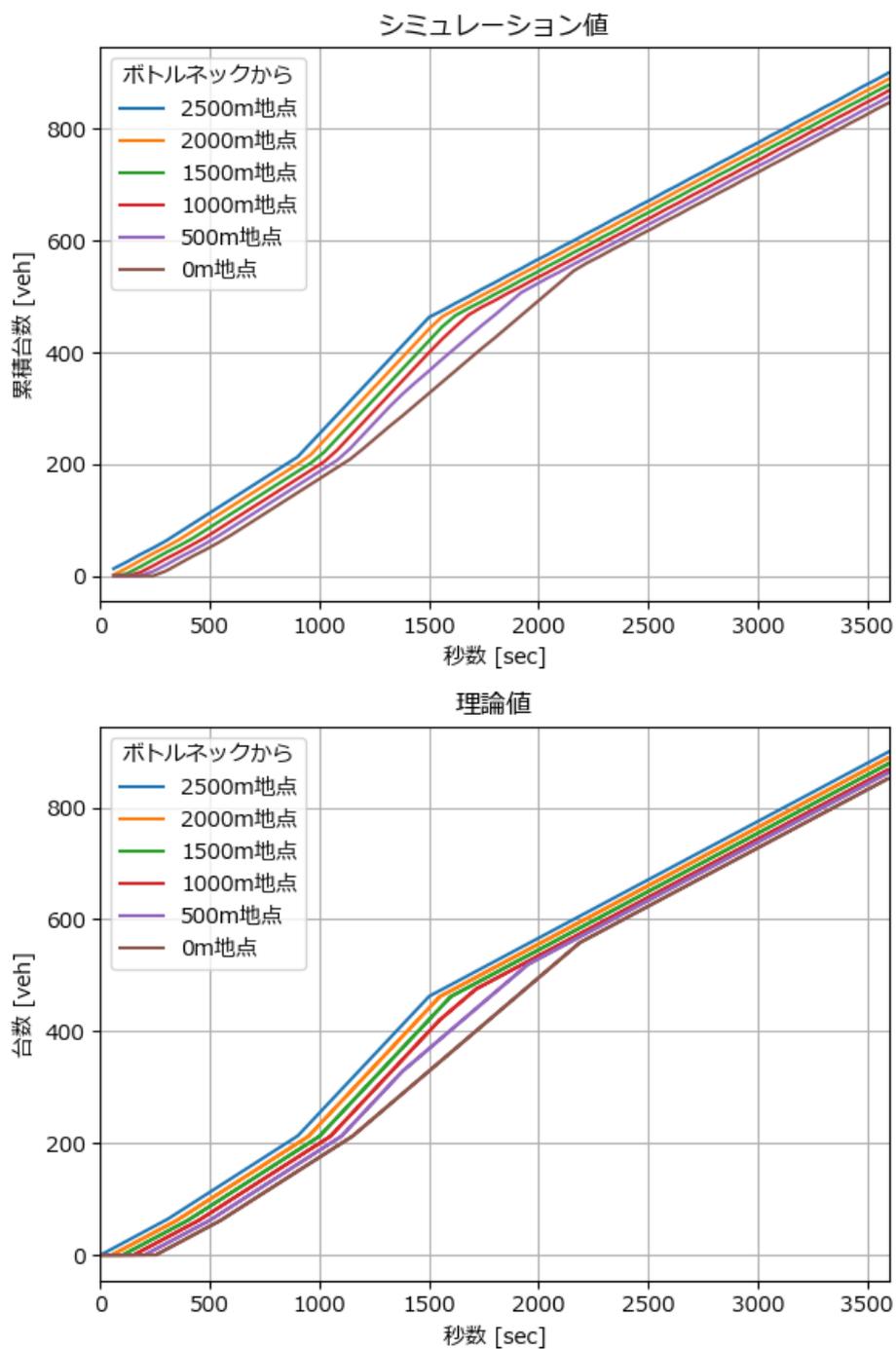


図 14 各地点の累積交通量(容量=1200 [veh/h])

## 6. 合分流部の容量と合分流比

### 6.1. 合流部の容量と合流比

#### 概要

合流部の容量と合流比が設定に従っているかどうかを確認する。

#### 検証内容

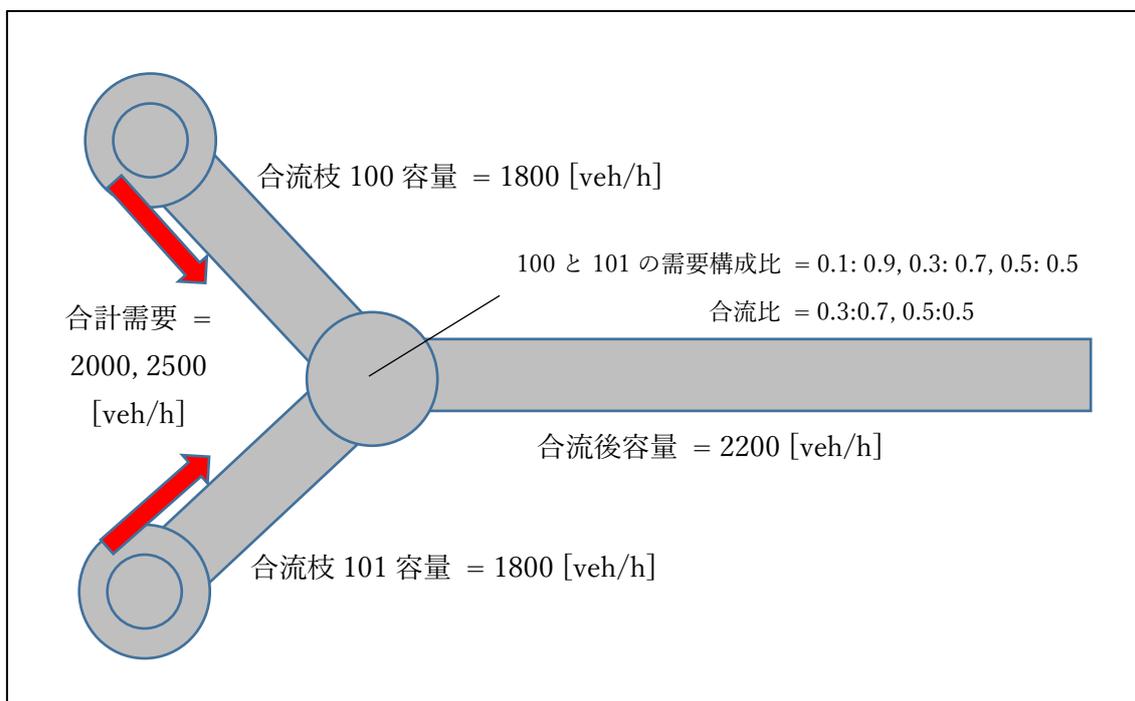


図 15 合流する道路

- NW:

上図のように容量 1800veh/h のリンク 2 本 に容量 2200veh/h のリンクを接続する。  
合流比を {0.3:0.7 or 0.5:0.5} とする。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]	合流比
合流枝 a	1800	45	140	1.0	0.3 or 0.5
合流枝 b	1800	45	140	1.0	0.7 or 0.5
合流後リンク	2200	55	140	1.0	-

- 需要:  
交通需要を合計 {2000veh/h or 2500veh/h}、合流枝からの需要構成比を {0.1:0.9 or 0.3:0.7 or 0.5:0.5}に設定して発生させる。図中リンクの最上流部分（左端）で、車両を等間隔で発生させる。
- 想定される結果:  
合流部の通過交通量が、リンク容量と合流比から求まる理論値になっている。
- 確認方法:  
各合流枝リンクからの 1h の累積流出量を確認する。

●  
6.1.1. 結果：合流比=0.3:0.7 のケース

理論値は以下の通りである。行ラベルは合計需要、列ラベルは需要構成比を表す。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
2000veh/h	2000 台 (200 台:1800 台) 渋滞無し	2000 台 (600 台:1400 台) 渋滞無し	2000 台 (1000 台:1000 台) 渋滞無し
2500veh/h	2200 台 (250 台:1950 台) 101 が渋滞	2200 台 (660 台:1540 台) 両方が渋滞	2200 台 (950 台:1250 台) 100 が渋滞

以下の通り、理論通りの渋滞が発生し、台数も近い値になる。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
2000veh/h	2000 台 (200 台:1800 台) 渋滞無し	2000 台 (600 台:1400 台) 渋滞無し	2000 台 (1000 台:1000 台) 渋滞無し
2500veh/h	2191 台 (250 台:1941 台) 101 が渋滞	2198 台 (659 台:1539 台) 両方が渋滞	2197 台 (947 台:1250 台) 100 が渋滞

6.1.2. 結果：合流比=0.5:0.5 のケース

理論値は以下の通りである。行ラベルは合計需要、列ラベルは需要構成比を表す。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
2000veh/h	2000 台 (200 台:1800 台) 渋滞無し	2000 台 (600 台:1400 台) 渋滞無し	2000 台 (1000 台:1000 台) 渋滞無し
2500veh/h	2200 台 (250 台:1950 台) 101 が渋滞	2200 台 (750 台:1450 台) 101 が渋滞	2200 台 (1100 台:1100 台) 両方が渋滞

以下の通り、理論通りの渋滞が発生し、台数も近い値になる。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
2000veh/h	2000 台 (200 台:1800 台) 渋滞無し	2000 台 (600 台:1400 台) 渋滞無し	2000 台 (1000 台:1000 台) 渋滞無し
2500veh/h	2193 台 (250 台:1943 台) 101 が渋滞	2192 台 (750 台:1442 台) 101 が渋滞	2200 台 (1100 台:1100 台) 両方が渋滞

## 6.2. 分流部の容量と分流比

### 概要

分流率によって分流部の容量が変化することを確認する。

### 検証内容

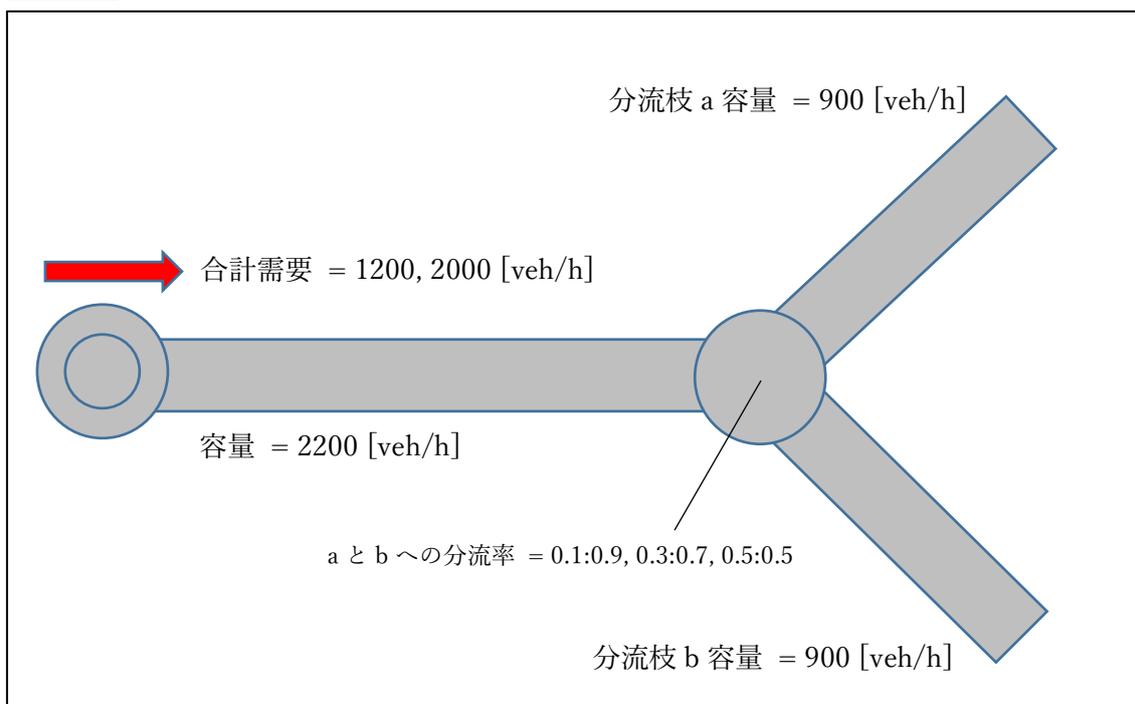


図 16 分岐する道路

- NW:

上図のように容量 2200veh/h のリンクの先に容量 900veh/h の 2 本の分流枝リンクを接続する。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]
分流部上流リンク	2200	55	140	2.0
分流枝 a	900	22.5	140	1.0
分流枝 b	900	22.5	140	1.0

- 需要:

交通需要は {1200 or 2000}veh/h、需要構成比(=分流枝への分流率)を {0.1:0.9 or 0.3:0.7 or 0.5:0.5} に設定して発生させる。図中リンクの最上流部分(左端)で、車両を等間隔で発生させる。

- 想定される結果:  
分流部の通過交通量が、リンク容量と分流率から求まる理論値になっている。
- 確認方法:  
各分流枝リンクへの 1h の累積流入量を確認する。

### 6.2.1. 結果

理論値は以下の通りである。行ラベルは合計需要、列ラベルは需要構成比を表す。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
1200veh/h	1000 台 (100 台:900 台) 渋滞	1200 台 (360 台:840 台) 渋滞無し	1200 台 (600 台:600 台) 渋滞無し
2000veh/h	1000 台 (100 台:900 台) 渋滞	1286 台 (386 台:900 台) 渋滞	1800 台 (900 台:900 台) 渋滞

以下の通り、理論通りの渋滞が発生し、台数も近い値になる。

	0.1:0.9	0.3:0.7	0.5:0.5
1200veh/h	996 台 (100 台:896 台) 渋滞	1200 台 (360 台:840 台) 渋滞無し	1200 台 (600 台:600 台) 渋滞無し
2000veh/h	997 台 (100 台:897 台) 渋滞	1281 台 (385 台:896 台) 渋滞	1794 台 (897 台:897 台) 渋滞

## 7. 経路選択行動

### 概要

提示された経路コストに従って経路選択されていることを確認する。

### 検証内容

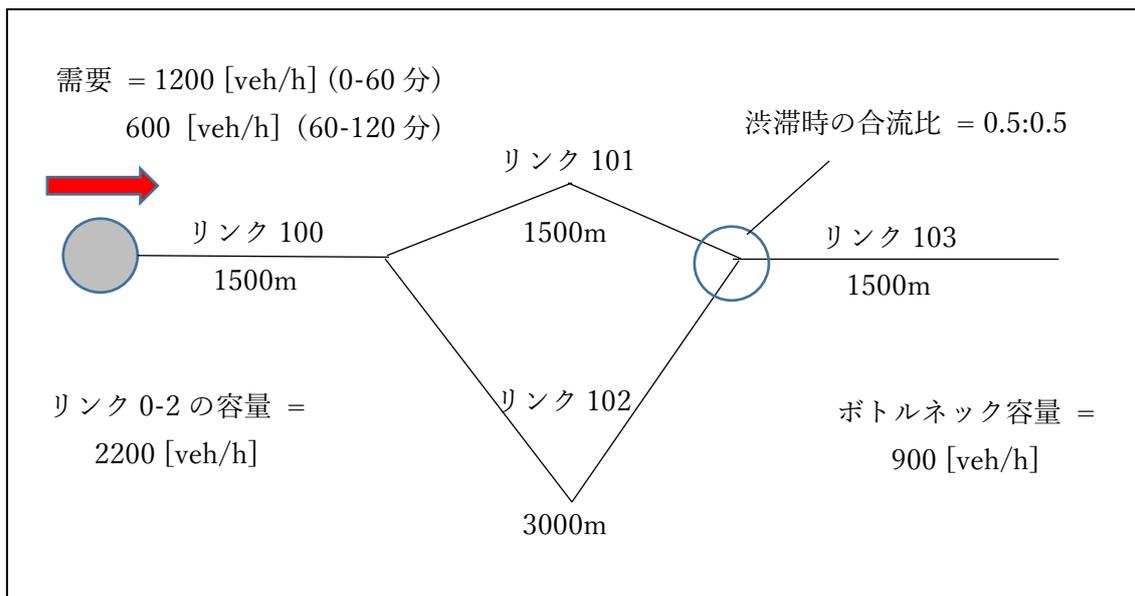


図 17 分岐して合流する道路

- NW:

上図のように途中で2つに枝分かれし、その後合流するNWを用意する。合流後部分がボトルネックになるように容量を900veh/hとし、その他は容量1800veh/hとする。渋滞時の合流比は0.5:0.5とする。

リンクの設定値は以下の通り:

	リンク容量 [veh/h]	自由流速度 [veh/km]	ジャム密度 [veh/km]	リンク長 [km]	合流比
リンク 100	1800	45	100	1.5	-
リンク 101	1800	45	100	1.5	0.5
リンク 102	1800	45	100	3.0	0.5
リンク 103	900	22.5	100	1.5	-

- 需要:

交通需要は初めの1hは1200veh/h、次の1hを600veh/hとする。図中リンクの最上流部分(左端)で、車両を等間隔で発生させる。

- 経路選択ロジック:

300s ごとに経路計算を行う。また、エージェントは最短路を確率 1 で選ぶようにする。

- 想定する結果:

シミュレーション開始直後は短いリンク 101 が選択されるが、需要量が多いためリンク 101 で混雑が発生する。そのためある時点からは長いリンク 102 も選択されるようになる。

- 確認方法:

リンク 101 とリンク 102 の累積流入量を観測する。本検証では理論値との比較は行わない。

### 7.1.1. 結果

交通量の推移は以下のようになった。交互に特定の経路に交通が集中する、いわゆるハンチング現象が起きていることが伺える。経路再計算によってコストが更新されるので、エージェントが経路選択時に参照する経路コストとエージェント自身が経験する経路コストにタイムラグがありハンチングが生じる。

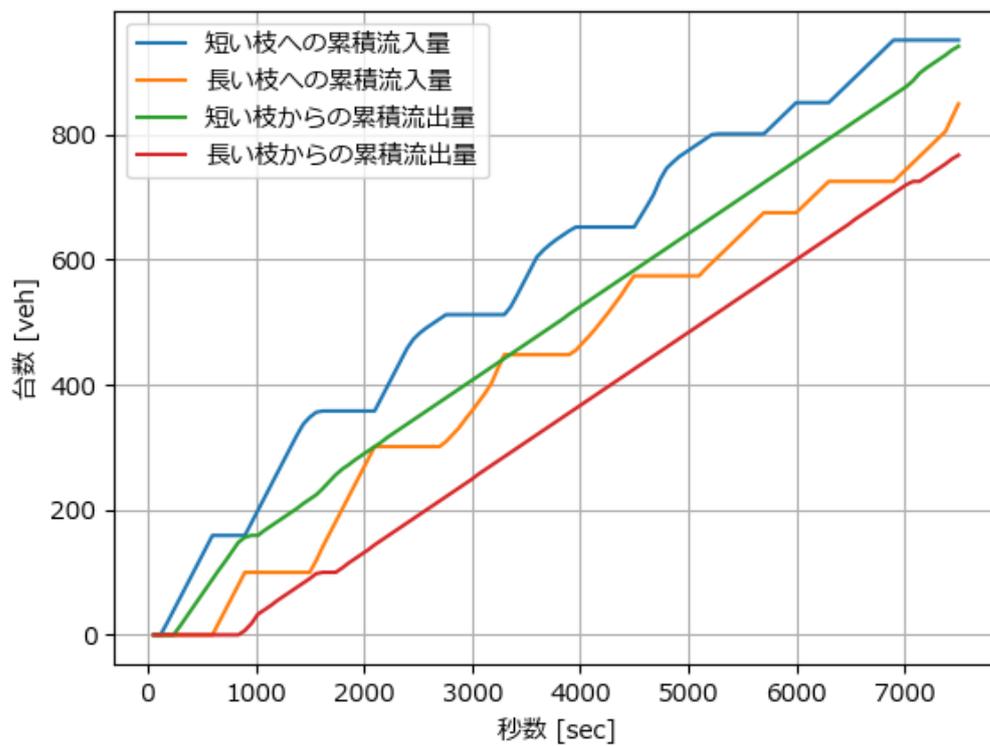


図 18 累積交通量