

Kinematic Wave 理論に基づく工事・事故時の交通規制による影響の簡易評価シミュレーションの開発

高橋浩司*¹ 堀口良太*¹
(株)アイ・トランスポート・ラボ*¹

道路ネットワークにおける工事や事故の影響を時間損失等の円滑化指標で評価するために、動的交通流シミュレーションを利用する機会が増えている。しかしながら広域なネットワークにおいて、工事に伴う車線規制区間や規制時間帯を適正に決めたり、様々な箇所での事故の影響を評価したりする目的では、様々な条件の組み合わせで多数の評価を行う必要があり、多くの計算時間を要するため実用性が損なわれる。本研究では、工事や事故がない状況を想定した条件下での動的交通流シミュレーションの計算結果を元に、Simplified Kinematic Wave 理論に基づいた、車線規制による渋滞状況の時間的空間的な変化を短時間で評価可能にするマクロ交通流シミュレーションを開発した。東京 23 区の道路ネットワークをモデルケースとして車線封鎖を行った場合の渋滞の延伸や下流での交通量の減少再現について動作確認を行った。

Development of a quick traffic simulator with Kinematic Wave Theory to evaluate the impact of incidental lane closures

Koji Takahashi*¹ Ryota Horiguchi*¹
i-Transport Lab. Co., Ltd. *¹

To evaluate the impacts of incidents and constructions with respect to network efficiency, dynamic traffic simulation is often used. However, the high computational burden of simulation will be crucial, especially in case that the network size becomes large, to estimate the impacts from various incident pattern within practical time constraint. In this study, we developed a quick traffic simulator to evaluate the impacts of incidental lane closures. The simulator initially elaborates the time-varying queueing condition of each link based on well calibrated result of dynamic traffic simulation assuming no incidental situation. Then it accepts the incidental lane closure patterns parameterized with capacity drop ratio and closure duration. The propagation of queue forming to upstream and flowrate reduction to downstream is calculated in sufficiently short time with the Simplified Kinematic Wave Theory. The reproducibility of the congestion propagation is verified through the simulation study with the road network in Tokyo 23 wards.

Keyword: *Kinematic Wave Theory, lane closure, incident, road construction, traffic simulation*

-
1. はじめに
渋滞による影響は旅行者の時間的損失だけでなく、都市機能の円滑な運行、環境負荷の増加など様々な悪影響を及ぼす。このため、工事による車線閉鎖や片側交互交通等の規制が必要な場合は、規制時間帯や閉塞車線数等に留意して、時間損失をできるだけ

け抑えることが重要である。同様に、車線閉塞を伴う事故についても、円滑化の観点から事故処理にかかる時間の適正化が検討される必要がある。

一般に、工事や事故の影響を時間損失等の円滑化指標で評価するためには、動的交通流シミュレーションが使われる。これは、交通流理論に基づいて数ミリ〜数秒毎に車両位置を更新することに加え、数十秒〜数分の周期で全ネットワークの渋滞状況を踏まえた経路探索計算を行うことで、各車両が目的地へ到達するための経路更新を行うものだが、これらに要する計算時間はネットワークの拡大に伴い増加する。数千〜数十万ノードの規模の道路ネットワークを対象とした場合、1日分のシミュレーション計算に数時間〜10数時間を要することもあり、数多くの工事・事故のパターンを設定して、繰り返し計算することは、現実的な方法とは言い難い。

本研究では、広域道路ネットワークにおける、工事・事故等による車線閉塞の影響を短時間で評価できる簡易シミュレーション手法の開発を目的としている。これは、工事・事故等の影響がない標準的な交通状態を想定した動的交通流シミュレーションの結果データをもとに、Simplified Kinematic Wave 理論[1][2][3]に基づいて、工事・事故パターンとして指定する所定の箇所・時間帯で区間容量が低下した場合の影響を渋滞の時間・空間伝播を考慮しながら評価するものである。

2. 簡易評価シミュレーションの動作ロジック

2-1 簡易評価シミュレーションの規制影響評価手順

従来の規制影響の評価では、様々な規制箇所、車線規制の形態、規制時間等で定義される規制パターンを1ケースとして動的交通流シミュレーションを行い、その結果から渋滞損失等の評価指標を計算する。また、その評価結果を受けて規制パターンを修正し、目的の評価結果が得られるまで計算を繰り返す。動的交通流シミュレーションのみで評価する場合の評価方法を図1に示す。この方法は、数秒毎の車両移動計算と数分毎の経路探索計算に長い時間を要する上、規制開始前のプレランや、規制の影響をあまり受けない地域に対しても同じ計算を繰り返す必要があるため効率が悪い。

本研究で開発するマクロ交通流シミュレーションを用いた規制影響評価方法を図2に示す。この方法では最初に車線規制がないと想定した条件下で、一度動的交通流シミュレーションによって交通状況を計算し、その結果を「ベースケース」としてマクロ

交通流シミュレーションへの入力とする。マクロ交通流シミュレーションはベースケースの各リンクペアの流入出累積交通量を用いて、規制パターン毎の影響評価を行う。本研究で開発したマクロ交通流シミュレーションにおいては5分〜15分区切りでの交通量を計算するため、計算量が少ない。また、経路探索計算を行わず、規制影響を受けないリンクは計算の対象外となるため、効率的な評価が可能である。

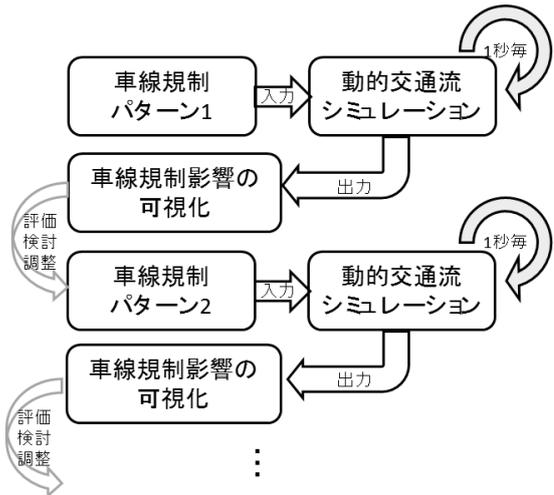


図1 動的交通流シミュレーションによる複数の車線規制パターンの影響評価手順

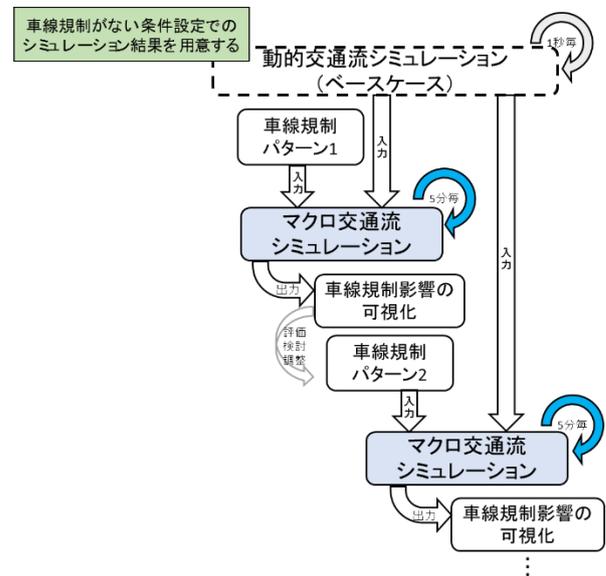


図2 マクロ交通流シミュレーションを用いた複数の車線規制パターンの影響評価手順

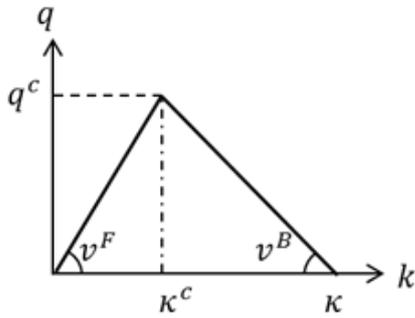


図 3 流率と密度の関係図

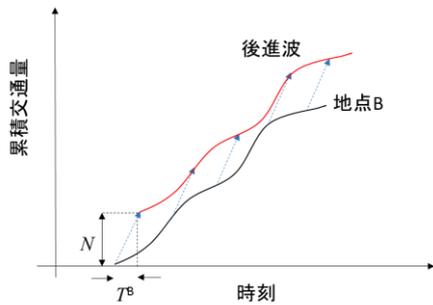


図 4 各車両の渋滞延伸を考慮した地点 A の累積交通量の最大値

2-2 Simplified Kinematic Wave 理論の概要

Simplified Kinematic Wave (以下, SKW) 理論[2]は区間の流率 q と密度 k の関係を図 3 のように直線近似された Fundamental Diagram (以下, FD) で表し, 区間下流端で発生したショックウェーブが区間上流端に伝播する時点を交通量累積図上で図式的に求め, 区間内の車両密度を FD に従って管理する手法である. SKW 理論では, FD は図 3 に示したとおり, ジャム密度 κ , forward wave (以下, FW) 速度 v^F 及び backward wave (以下, BW) 速度 v^B での 3 つのパラメータで表される.

SKW 理論では, 地点 B からの BW が上流の地点 A に到達する時間 T^B は

$$T^B = (v^B)^{-1}L$$

で表される. また, 下流端から BW 速度で移動する視点で観測できる交通量の最大値は

$$N = \kappa L$$

で表される. これは, 図 4 の様に地点 A の累積交通量は地点 B の累積交通量を右方向に T^B , 上方向に N だけシフトした曲線を越えることはできないことを意味している.

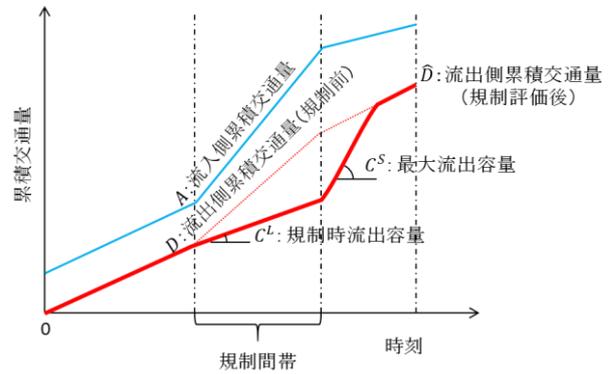


図 5 車線規制時の流出側累積交通量の変化

2-3 Simplified Kinematic Wave 理論のマクロ交通流シミュレーションへの適用

2-3.1 流出量減少の下流への伝播

本シミュレーションでは, 交通量に変化した地点を起点として, そのショックウェーブを計算することで他のリンクへの影響を評価する. そのためにはまず, 規制リンクでの交通量の変化を計算する. 事故または工事によって車線数が減少または道路が閉塞するとき, 当該リンクの交通容量が低下する. 交通需要がリンクの交通容量を上回る場合, リンクは車両を捌ききれなくなり, 渋滞として上流方向に滞留させる. 本シミュレーションでは指定リンクの下流端で車線規制が行われたとして, 流出側の累積交通量を単位時間当たりの交通容量で評価する. 累積交通量の評価は 5 分~15 分毎に行う. 車線規制によって交通容量が C^L に低下し, 渋滞が発生する時の, 流出側累積交通量の変化を図 5 に示す. 規制によって流出容量が低下するとき, 単位時間当たりの流出量が減少し, 流出側累積交通量の勾配は C^L となる. 規制解除時刻以降は交通容量が回復し, 渋滞として滞留していた車両が最大流出容量で流出する. この車両流出は本来の交通需要の量に達するまで継続する.

交通規制によって規制リンクの流出側交通量が減少したとき, 下流リンクの流入側累積交通量に変化する. 流入側累積交通量の前進波を考慮したとき, 流出側の累積交通量の最大値は各車両の下流端への到達時間によって制限される. 図 6 に流入側累積交通量の前進波を考慮した流出側累積交通量の操作の概略図を示す. 流入側累積交通量の前進波が各時刻における本来の流出側累積交通量を下回る場合, 流出側累積交通量を更新する.

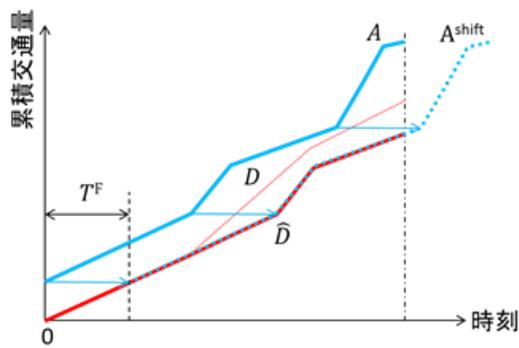


図 6 流入交通量減少による流出側累積交通量への影響

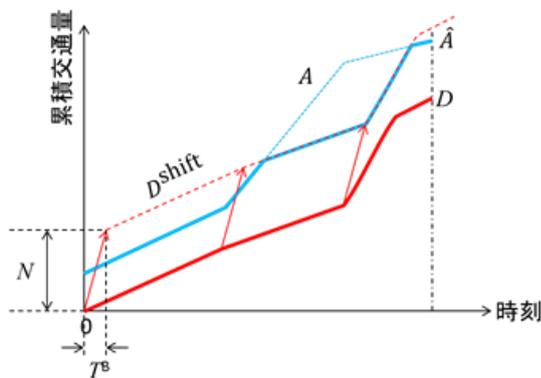


図 7 BW の考慮した流入累積交通量の制御

2-3.2 渋滞延伸の上流への伝播

本リンクの流出側累積交通量が更新された場合、その累積交通量から BW の影響を評価する。流入側累積交通量の最大値は上流端への渋滞到達時間と車両存在可能台数によって制限される。図 6 に流出側累積交通量の BW を考慮した流入側累積交通量操作の概略図を示す。流出側累積交通量の BW が各時刻における本来の流入側累積交通量を下回る場合、流入側累積交通量を更新する。

2-4 隣接リンクへの影響伝播

車線閉塞リンクで流入（流出）側累積交通量に変化した場合は、流入（流出）方向に接続するリンクの流出（流入）側累積交通量が変わるため、このリンクの待ち行列状態を SKW 理論で再計算する。同様の計算をさらに流入（流出）方向に接続するリンクに対して行い、全リンクの累積交通量の変化がなくなるまで繰り返し行う。再計算を行う際に、流入側累積交通量と流出側累積交通量が共に変化していた場合、以下の順番で累積交通量の再計算を行う。

- 1) 流入側累積交通量を基に FW 達時刻を考慮して、流出側累積交通量を更新する。
- 2) 各時刻の最大流出容量を考慮して、流出側累積交通量を更新する。
- 3) 更新後流出側累積交通量を基に BW の到達時刻を考慮して、流入側累積交通量を更新する。

2-5 合分流部での交通量変化の分配

他のリンクへの伝播の影響を表し、複数の事故影響を同時に計算するために、リンクの交通量は上流端、下流端における他のリンクとの接続関係であるリンクペアによって管理した。図 8 にネットワークと対応する交通量のイメージ図を示す。リンク C の流入側交通量 A^C および流出側交通量 D^C は

$$A^C = q^{AC} + q^{BC}$$

$$D^C = q^{CD} + q^{CE}$$

で表される。このリンクペアの要素にはリンクセントロイド間の交通量も含まれる。交通量の変化が他のリンクへ伝播した場合は、交通量の変化量は各方向への交通量の比率に応じて分配する。流入側の交通量の変化が上流リンクに伝播する場合は

$$\hat{q}^{AC} = \hat{A}^C \frac{q^{AC}}{q^{AC} + q^{BC}}$$

$$\hat{q}^{BC} = \hat{A}^C \frac{q^{BC}}{q^{AC} + q^{BC}}$$

とし、流出側の交通量の変化が下流リンクに伝播する場合は

$$\hat{q}^{CD} = \hat{D}^C \frac{q^{CD}}{q^{CD} + q^{CE}}$$

$$\hat{q}^{CE} = \hat{D}^C \frac{q^{CE}}{q^{CD} + q^{CE}}$$

とする。ここで、 \hat{q}^{CD} 、 \hat{q}^{CE} 、 \hat{q}^{CD} 及び \hat{q}^{CE} は変化後の各リンクペア交通量であり、 \hat{A}^C 、 \hat{D}^C は C リンクの変化後の流出交通量をそれぞれ表す。

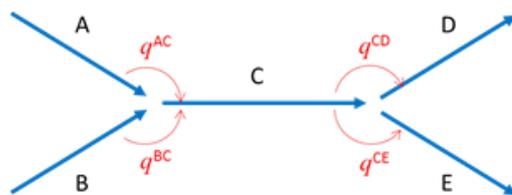


図 8 リンクの接続状態と各リンクペアに関する交通量のイメージ図

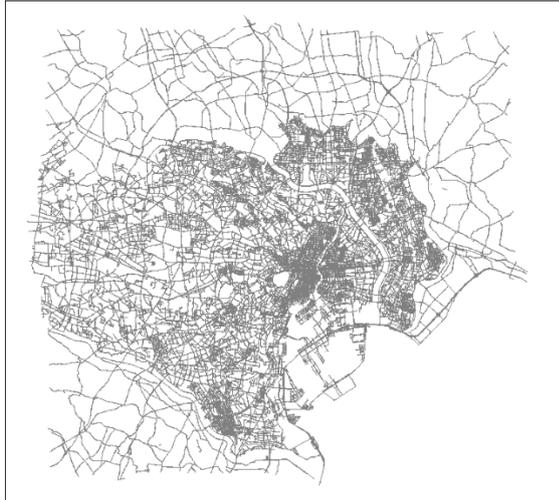


図 9 検証に使用するネットワーク図

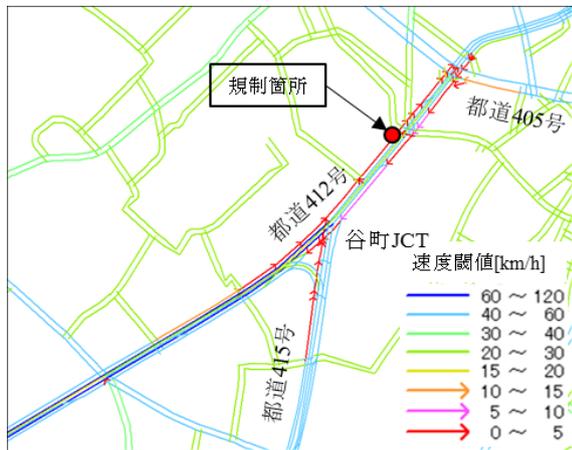


図 10 谷町 JCT 周辺における 8 時 00 分の交通状況と検証のための規制箇所

表 1 規制情報一覧

規制情報	パラメータ
リンク	都道412号線上り方向
時間帯	8:00~11:00
規制時流出容量	600[PCU/h]

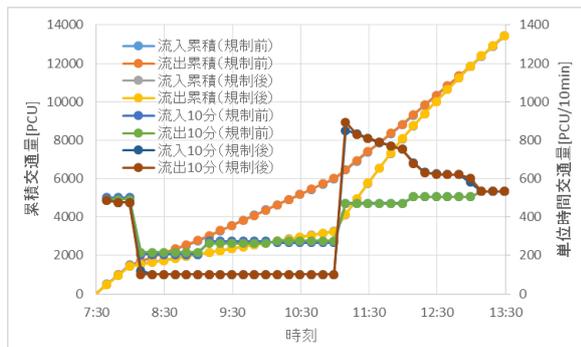


図 11 規制リンクの交通量の変化

3. 検証

3-1 ベースケースの作成

マクロ交通流シミュレーションでは経路選択を行わないため、事故影響評価を行う際にはマクロ交通流シミュレーションで読み込むネットワークパラメータだけでなく、ベースケースの再現精度が評価の正確さに影響を及ぼすため、本研究では、既往研究[4]で精度検証がなされている東京 23 区における現況再現ケースをベースケースとして利用した。これは、動的交通流シミュレーションとして、市販ソフトウェアである SOUND[5]を使用したものである。検証に使用するネットワーク図を図 9 に示す。使用した道路ネットワークのノード数は 8,752 個、リンク数は 91,942 本である。

3-2 交通量変化の比較

ここでは、特定リンクに対して車線規制を行った場合の交通量の変化と渋滞の延伸を評価した。渋滞の延伸状況は区間の車両存在台数から算出される区間密度を基に、区間速度によって評価した。規制箇所は単位時間当たりの交通量が多く、渋滞が発生しやすいリンクを対象とし、流出容量を低下させた場合の影響を評価した。規制評価を行う前のベースケースにおいて、午前 8 時に速度低下が確認された都道 412 号線と都道 415 号線の合流部（谷町ジャンクション下道路）周辺の交通状態と、規制を行うリンクの場所を図 10 に示す。都道のの上り方向では都道 412 号線と都道 405 号線の交差点をボトルネックのとして渋滞していることが確認出来る。本検証での規制条件は表 1 通りとした。図 11 に車線規制リンクにおけるベースケースと規制影響評価後の交通量を示す。本検証では交通量評価の単位時間を 10 分とした。車線規制リンクでは規制開始の 8 時から規制解除の 11 時の時間では単位時間当たりの流出量が 100PCU/10min となっている。規制解除後は車両が本来の交通需要に達するまで、高い流率で流出している。ここで、流率がリンクで定義された最大流出容量から低下しているのは、規制解除後に流出した車両が下流のリンクで滞留してしまい、規制を解除したリンクの流出容量がボトルネックリンクの流出容量に制限されてしまっているためである。図 12 に規制前と規制後における都道 412 号線リンクの速度コンター図を示す。縦軸が地点であり下方向がリンクの上流方向、横軸が時刻である。車線規制リンクで渋滞が発生し、時間経過で上流に延伸する現象を再現している。また、この車線規制が原因で下

流リンクの交通量が減少することで、規制時間帯に本来発生していた渋滞が現れなくなっており、規制解除後には滞留していた車両の影響を受けて渋滞が発生している。

3-3 計算時間の評価

本研究で開発したマクロ交通流シミュレーションでは、短時間で規制の影響を評価可能であることが大きな利点である。intel i7 5820K (6 コア 3.30GHz) の CPU と、64GB のメインメモリを搭載した PC 環境において、ネットワークパラメータやリンクペア交通量の取得に 60 秒程度の時間を要しているものの、規制影響の評価に要する時間は 1 秒未満であった。メモリ使用量は 4.95GB であった。本研究で作成したマクロ交通流シミュレーションは一度初期情報を読み込めば繰り返し評価する性能に秀でている。

4. まとめ

本研究では Simplified Kinematic Wave 理論に基づく交通流と渋滞の延伸を評価することで、事故や工事による車線規制に対して、その影響が短時間で時間的、空間的に評価可能なマクロ交通流シミュレーションを開発した。東京 23 区をモデルとして、特定リンクで車線規制が行われた場合の交通流への影響を評価し、上流リンクへの渋滞の延伸や、規制リンクの交通量低下による下流リンクでの渋滞の消失と

規制解除後の渋滞の発生を再現した。マクロ交通流シミュレーションは、規制影響の評価計算だけであれば 1 秒未満の僅かな時間で評価可能であり、非常に効率的な指標評価が可能になった。

謝辞 本研究は、総務省平成 29 年度「IoT サービス創出支援事業」の「リアルタイム車載カメラ画像等 IoT を用いた迅速な災害時対応と配送支援モデル事業」(代表：アジア航測 石井邦宙)における取り組みである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory, Transportation Research Part B, Vol.27, No.4, pp.281-287, 1993.
- [2] Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part II: Queueing at freeway bottlenecks, Transportation Research Part B, Vol.27, No.4, pp.289-303, 1993.
- [3] Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part III: Multi-destination flows, Transportation Research Part B, Vol.27, No.4, pp.305-319, 1993.
- [4] 大口敬, 力石真, 飯島護久, 岡英紀, 堀口良太, 田名部淳, 毛利雄一:首都圏 3 環状都市高速道路における交通マネジメント方策, 第 55 回土木計画学研究発表会(春大会)講演集, 2017.06
- [5] 桑原雅夫, 吉井稔雄, 森田謙之, 岡村寛明: 広域ネットワーク交通流シミュレーションモデル SOUND の開発, 生産研究, Vol.48, No.10, pp.49-52, 1996.

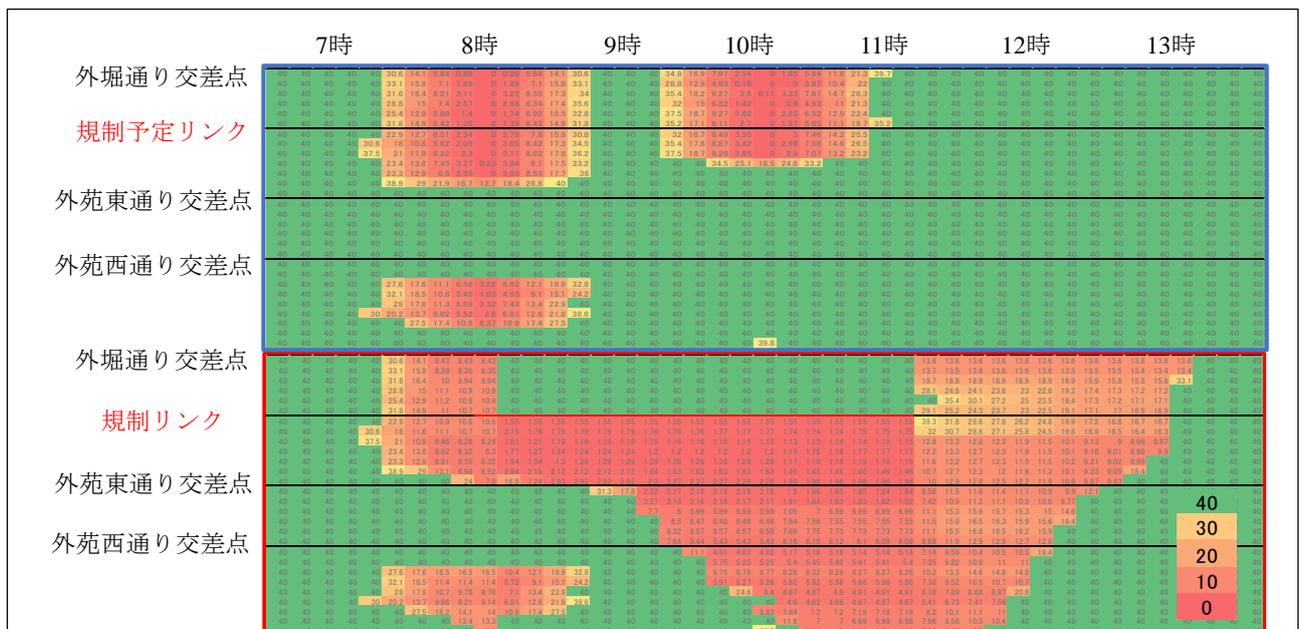


図 12 都道 412 号線上り方向の速度コンター図
(上図：車線規制影響評価前，下図：車線規制影響評価後)