

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32714

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K12540

研究課題名（和文）計測結果に基づいた実用的交通流物理モデルの開発と高速道路交通流での評価

研究課題名（英文）The modification of the car-following model through the introduction of the measured traffic flow characteristics and the evaluation of the highway traffic flow prediction by this model

研究代表者

中根 一郎 (Nakane, Ichiro)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：30221451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：交通流の動画計測と4台の車両にRTK-GPSを搭載した計測を行い、速度、速度差、加減速度、車間距離、遅れ時間等に関する定量的な知見を得た。そして、この結果に基づいた追従挙動モデルによる計算から以下の から の知見も得た。渋滞相への転移には、マクロな条件として 車両密度が閾値を超えること、ミクロな条件として 追従走行時にオーバーシュートが発生することと 後続車両が加速度の限界を持つことが必要である。加えて、 反応遅れ時間の長いドライバーの連続が相転移の核となるとともに渋滞をひどくしており、同様に、ドライバーの個性によるランダムな曖昧さのために決定論的な現象にならず複雑化していると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

渋滞はCO2の排出増加にも繋がるため、局所の経済的問題のみならずグローバルな環境問題でもある。このような渋滞問題解決の一助として、我々は交通流モデルによるシミュレーションに期待している。ただし、現段階では定性的な渋滞予測は可能であるものの、定量的に正確な予測には至っていない。そこで、我々は定量的な渋滞予測が可能なモデルの作成を目指し、交通流の計測結果を基にした車両追従モデルの作成を試みた。そして、作成したモデルを用いて渋滞のシミュレーションを行い、渋滞の形成・解消のプロセスを評価・分析するとともに、有効な渋滞解消手段の検討も行った。なお、本研究の成果は、自動運転技術開発に対しても有用である。

研究成果の概要（英文）：We measured the traffic flow by using the video analysis and RTK-GPS, and formed the car-following model through these measurements to quantitatively predict the traffic flow at a practical level. As a result of these measurements, we analyzed the quantitative characteristics of the vehicle velocity, velocity difference, acceleration, deceleration, following distance, delay time, and so on. We cleared that the high vehicle density, overshoot, acceleration limit are the necessary conditions for the transition to the congestion phase. In addition, we also cleared that the trigger of the phase transition is a series of drivers that are insensitive to changes in the following distance and drive slowly. In the traffic flow, the randomness of each driver complicates the phenomenon.

研究分野：流体力学

キーワード：交通流 交通渋滞 追従挙動モデル モデル化 数値シミュレーション 非線形力学 環境工学 複雑系

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

交通渋滞の発生は、二酸化炭素の排出増加と化石燃料消費にも直結することから、国や地域の経済損失だけにとどまらず、地球規模の環境問題と言える。例えば我が国では、総二酸化炭素排出量のうち運輸部門の占める割合が 20.4%となっており、そのうち 88.0%は自動車からの排出とされている⁽¹⁾。特に渋滞により速度が 1/4 になると、エネルギー消費量が約 2.5 倍になるとともに、環境への負荷が約 2 倍になると試算されている⁽²⁾。また、渋滞による損失は年間 38.1 億人時間（国民 1 人当たり年間約 30 時間、費用換算で約 12 兆円/年）にもものぼるとされており⁽³⁾、東名高速道路においては、渋滞損失時間が 162.1 万人・時間/年、12 時間当たりの渋滞損失額が約 800 万円になる路線すらある⁽⁴⁾。

このため、渋滞の緩和・解消策として我々が着目したのが、数理・物理モデルによるシミュレーションを中心とした交通流予測である。特に、リアルタイムの渋滞状況予測を実用レベルにまで高め、ナビゲーションシステムや移動体通信と組み合わせることを可能とすれば、非常に有益な渋滞回避情報サービスになるものと考えられる。

なお、交通流においては、これまでも様々なモデルが提案され、シミュレーションも盛んに行われている。しかしながら、渋滞相への相転移のメカニズム等に関しては、定性的な予測にとどまっており、例えば、高速道路渋滞で見受けられる“明示的な道路構造によらず発生する自然渋滞への相転移とその解消”を実用レベルで定量的に予測することはできていない。

実際、研究代表者らも、最も単純な片側一車線道路（県道）を対象とし、交通流の計測、計測結果の評価とこれに基づくモデルの作成、ならびに、作成したモデルによるシミュレーションとその評価を行っていた。その結果、渋滞の発生と遅れの蓄積（渋滞相への転移）は、過冷却解除や乱流遷移と言った物理的な相転移と同様であること。つまり、マクロな量（車両密度）が閾値を超えることを必要条件として、ミクロな挙動（車両の追従走行挙動に伴うオーバーシュートと後続車両の加速の限界）により、渋滞相への転移が発生することを明らかにした。ただし、車両が停止するような渋滞の発生はシミュレーションにも現れるものの、渋滞解消までに要する時間等は、実現象の 10 分の 1 以下程度と判断され全く一致していなかった。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究課題では、渋滞を実用的、定量的にシミュレートできる交通流数理・物理モデルの構築を目的としている。そして、このようなモデル化を可能とするためには、交通流を詳細に計測し、この結果を基にしてモデルを作成するのが近道であると考えている。そこで、上記目的を達成するために、計測、モデル化、予測結果評価の各段階における目標を、下記の通りとして定めた。なお、このような人の運転挙動の詳細な計測は、近い将来の完全自動運転技術の実現においても重要であると考えている。

- (1) モデル化にあたっては、計測結果から普遍性・相似性を見出すことが重要であり、これを可能とする計測を実施することが、計測の目標となる
- (2) 上記において、普遍性・相似性を見出すことを計測の目標としたが、自己駆動粒子である車両では、ニュートン粒子に比べ、場における普遍性・相似性が現れづらいと考えられる。しかしながら、車両のミクロ挙動は、車間距離や速度差に応じて物理的な運動を繰り返しているだけであるから、平均挙動に関しては普遍性・相似性が現れると考えられる。従って、本研究の追従挙動モデルでは、計測により算出された平均挙動に実際に起こりうる程度のランダムさを加えるモデル化を試みる。これが、モデル作成の目標となる
- (3) 実際の高速道路渋滞との比較によってシミュレーション結果を評価し、提案するモデルを実用的に予測可能なレベルにまで引き上げるための修正を繰り返すことが評価の目標となる

3. 研究の方法

目的とする”交通流を実用レベルで定量的にシミュレートできる数理・物理モデル作製”が、計測結果に基づいたものであることから、時間と手間をかけるべきは、モデル作製の基盤となる計測データの採取・分析である。このため、本研究課題は、これまでに記録した首都高速道路 4 号線赤坂出口付近の動画を解析することからスタートした。動画解析においては、DIPP-Motion V を使用して自動追尾を試みた。動画解析中の状況を図 1 に示す。



図 1 DIPP-Motion V による交通流動画解析の状況

図 1 より分かる通り、本研究で使用した動画には若干の歪みが存在する。そこで、この画像の

歪みに関しては、実際の高速道路上の距離を実測した上で2次射影変換を用いて補正している。また、やはり同図より分かる通り、車両の大きさは、点ではなく、小型乗用車でも60×20ピクセル程度の面積を有することから、自動追尾のマークのずれてしまうことが多々発生した。従って、このマークのずれを肉眼で観察・確認し、修正しながら解析を行った。ただし、このような確認と修正を行っても、マークのずれが車両長さの数%程度未満の場合、このずれを見逃すこともあり、計測精度が問題となった。特に問題となったのが、渋滞での静止時における反応遅れ時間である。これは、渋滞の中で、前車、自車ともに停止している状態から、前車が動き出してから自車が動き出すまでに要する時間であり、この時間の存在が渋滞の解消を遅くしていると考えられ、非常に重要な量となる。しかしながら、動画像解析では、前車、自車ともに、その動き出す瞬間を定めることが難しく、精度と客観性が問題となった。

上記の経緯から、動画像解析の終了後、計測法をRTK-GPSを用いる方法に改めた。RTK-GPSでは、条件が整えば1cmの分解能を持つとされている。このため、研究代表者勤務校に基地局も設置した。計測に際しては、RTK-GPSを搭載した4台の車両を連れ、間に他の車両が入らないような状態で走行させた。計測結果の1例を下図2に示す。図2において、赤、緑、青、紫の各色のマークが4台の車両位置であり5Hzのサンプリングレートでの計測を行っている。図2より、RTK-GPSの精度が大凡確認できる。



図2 RTK-GPSにより計測された4台の車両の位置

4. 研究成果

(1) 提案するモデルの概要

前記の動画像解析とRTK-GPSを用いた計測により、車間距離、速度、速度差、加速度、反応遅れ時間等を算出し、これを基にして追従挙動モデルを作成した。作成した追従挙動モデルの1例を以下に示す。本研究課題が提案するモデルにおいては、一般性を持たせるため無次元化(上付き添え字*)しているが、この際の各参照値は道路の条件(主に最高速度)によって異なる。

提案する車両追従モデルでは、まず、車間距離 Δx^* だけの関数である速度関数 G^* (図3参照)から、自車速度 V^* を仮に決定する。ただし、速度関数は速度差の正負($\Delta V^* > 0$ 、 $\Delta V^* < 0$)により異なる関数としている。これは、計測結果に基づいているためであるが、これにより、後記するメカニズムでオーバーシュート(今後O.S.と略す)が発生する。次に、計測結果において加減速度の上限 a^*_{max} 、 a^*_{min} が存在していたことから、下式(1)により加減速度 a^* を算出した上で、上下限を超えないように下式(3)で条件判断し、次の時間ステップの加減速度を決定する。そして、算出される加減速度を下式(4)に代入し、得られた速度を次の時間ステップの自車速度として与える。このように加減速度として、次時間ステップの変化量を与えるのは、あくまで物理現象として、ニュートンの運動法則に基づかせるためでもある。なお、下式(1)~(4)では煩雑さを避けるため*を省略している。

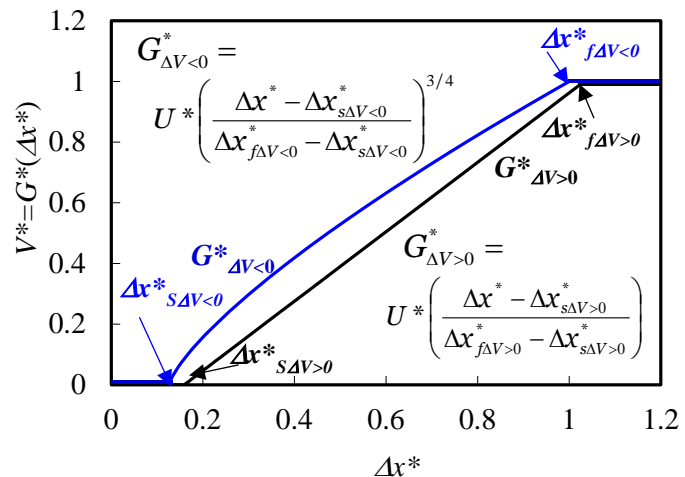


図3 本研究課題で提案する速度関数 G^*

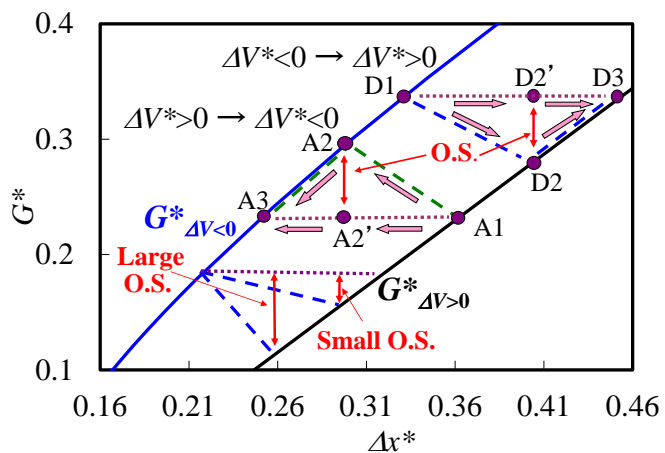


図4 オーバーシュート発生メカニズムの模式図

このように加減速度として、次時間ステップの変化量を与えるのは、あくまで物理現象として、ニュートンの運動法則に基づかせるためでもある。なお、下式(1)~(4)では煩雑さを避けるため*を省略している。

$$a(t + \Delta t) = \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - G(\Delta x(t))}{\Delta t} = \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\text{ただし、 } \Delta x(t + \Delta t) = \Delta x(t) + \Delta V(t)\Delta t \quad (2)$$

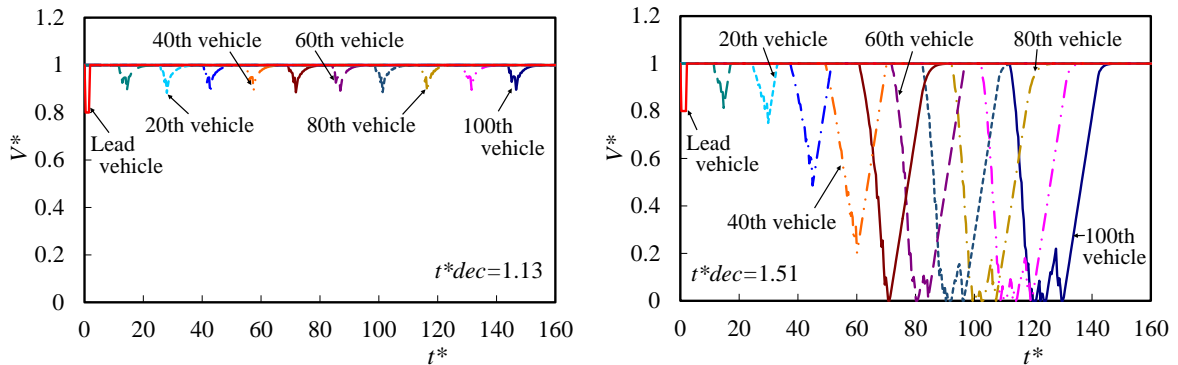
$$\left. \begin{aligned} -a_{\min} &\leq \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \leq a_{\max} \Rightarrow a(t + \Delta t) = \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \\ \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - V(t)}{\Delta t} &< -a_{\min} \Rightarrow a(t + \Delta t) = -a_{\min} \\ a_{\max} &< \frac{G(\Delta x(t + \Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \Rightarrow a(t + \Delta t) = a_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{上記を踏まえ、次時間ステップの速度は右式となる。 } V(t + \Delta t) = V(t) + a(t + \Delta t)\Delta t \quad (4)$$

ここで、図4に示すO.S.の発生原理も概説する。同図においても、黒色実線が車間距離の広がっている $\Delta V^* > 0$ の場合の速度関数、青色実線が車間距離の詰まっている $\Delta V^* < 0$ の場合の速度関数である。このため原則として、 $\Delta V^* > 0$ の場合には黒色実線上の速度のみを取り、 $\Delta V^* < 0$ の場合には青色実線上の速度のみを取るものとする。つまり、青色実線と黒色実線により囲まれた領域の内部や外部の値は取らず、線上の値のみを取るものとする。このルールに従うと、例えば、前回の速度を決定した時には $\Delta V^* > 0$ であり車間距離がA1であったものの、今回の速度決定に際して車間距離がA1からA2に詰まっているとすると、今回は $\Delta V^* < 0$ となることから黒色実線ではなく青色実線上のA2の速度を取ることとなる。従って、この場合、黒色実線上のA1に比べて青色実線上のA2の速度が速いことから、 $\Delta V^* < 0$ において加速するO.S.が発生する。これは、 $\Delta V^* < 0$ から $\Delta V^* > 0$ へと移行する車間距離が広がる場合(D1→D2)も同様である。加えて、この速度関数によって発生するO.S.は、実際に計測されたO.S.と同様に、車間距離が大きく変化した場合に発生するO.S.は小さく、車間距離の変化が小さい場合に発生するO.S.は大きい。

(2) シミュレーション結果とその評価

等間隔の初期車間距離 $\Delta x^* = 1.14$ に配置された101台の車両全てが、同じ反応遅れ時間(=時間刻み) $\Delta t^* = 0.378$ を持ち、最大車速 $V^* = 1$ で自由走行中に、突然、先頭車両が速度を2割減じて一定時間($t^*_{dec} = 1.13, 1.51$)減速した場合の各車両速度 V^* の時間 t^* に対する変化を図5に示す。ここで、時間の参照値は車間時間のため、図5の $t^*_{dec} = 1.13$ と 1.51 との差は実時間で1秒程度である。一方、初期車間距離 $\Delta x^* = 1.14$ は追従走行となる車間距離までに5%だけ余裕のある距離であるが、この距離の差は、先頭車両の2割の減速により詰まる1時間ステップ当たりの車間距離の半分程度である。このため、基本的には1時間ステップ毎に前車からその直後の車へと減速が伝わり、減速の伝わった車は追従走行に移行する。図5では、図(b)における先頭車両の減速時間が、図(a)よりも1時間刻み分($\Delta t^* = 0.378$)長いだけであるが、減速の伝播挙動は著しく異なっている。図(a)では、先頭車両で発生した矩形の減速が速度関数に対応する三角形の減速となり、しかも矩形と等面積のまま後方車両に伝播している。これに対して図(b)では、先頭車両の減速の大きさが、後方車両になるほど増幅して伝播している。特に、この伝播においては、減速部の面積が移動距離の減少分である遅れに相当する距離となって蓄積されて行く。つまり、図(b)では、明確に遅れが蓄積し、渋滞が発生している。なお、このように先頭車両の挙動が僅かに異なるだけで、後方車両の挙動がドラスティックに変化することに関しては、渋滞が自由走行相から渋滞相への相転移現象であると考えられていることから、妥当であると判断している。



(a) 先頭車両の減速時間が $t^*_{dec} = 1.13$ の場合 (b) 先頭車両の減速時間が $t^*_{dec} = 1.51$ の場合
図5 先頭車両から発生した減速波の後方への伝播挙動のシミュレーション結果

図5(b)において渋滞が確認されたことから、車間距離による渋滞の緩和・解消効果を確認するため、図5(b)と同一条件で初期車間距離だけを変更し、渋滞の形成がどのように変化するか

をシミュレートした。総車両台数 101 台の全車の初期車間距離を 1% だけ広くした場合の速度の計算結果を図 6 に示す。ここで、初期車間距離に関して補足すると、車両は基本として最大速度 $V^*=1$ で移動しているため、減速が自車に到達するまでは与えた初期車間距離が保たれる。図 6 では、図 5 (a) と同様に、先頭車両で発生した矩形の減速が三角形となって後方車両に伝播しているものの、この減速の伝播は 20 台目までであり、30 台目以降では減速が見られない。これは、減速による先頭車両の移動距離減少分、つまり、車間距離の詰まりが $(1-V^*) \times t^*_{dec} = 0.302$ であるため、1% だけ車間距離を広くした場合には、ちょうど 30 台目でこの詰まりが無くなるためである。従って、この場合には、遅れが伝播せずに消滅して渋滞は発生しない。これに対して 図 5 (b) には明確に渋滞が現れているが、このシミュレーション結果における渋滞の発生から解消までの時間は、実現現象と比較して 10 倍程度は短くなっている。この原因として考えられるのが反応遅れ時間である。前車も自車も停止している場合に限ると、前車が動き出す瞬間から、自車が動き出すまでの反応遅れ時間の計測結果の平均値は、動画像解析、RTK-GPS 計測のどちらにおいても約 2s 程度となっており、このシミュレーションでの反応遅れ時間に比べて 2 倍以上長い。また、この反応遅れ時間は、走行状況やドライバーによってまちまちであると考えられる。

そこで、このような反応遅れ時間の影響を検討するため、先頭車両を除く 100 台の車両のうち、25 台ずつの車両の反応遅れ時間を半分と倍とし、これらの車両を乱数によりランダムに配置した。その結果の 1 例が図 7 であり、反応遅れ時間が一定の場合には渋滞の発生しなかった先頭車両減速時間 ($t^*_{dec}=1.13$) でも渋滞が発生している。しかも、図 5 (b) に比べ、渋滞の発生から解消までの時間が 8 倍程度となり、実現現象に近づいている。ただし、このシミュレーションでは車両の配置がランダムであることから、試行回数毎に結果が異なる。1 例として、図 7 と同条件で初期車間距離だけを 4.5% 増加させた場合のシミュレーション結果を図 8 に示す。なお、同図の (a) と (b) では与えた条件は全く同じであり、何回目の試行であるかが違うだけである。同図より分かる通り、図 (a) では初期車間距離を広げたために渋滞が発生していない。これに対して図 (b) では、車間距離を広げたにも関わらず、図 7 よりも停止時間の長い渋滞が発生している。これは、図 (b) の場合に、たまたま、反応遅れ時間の長い車両が前方に連なるように配置されたためであり、このような配置が、渋滞相転移の核になるとともに、渋滞を深刻化させている。

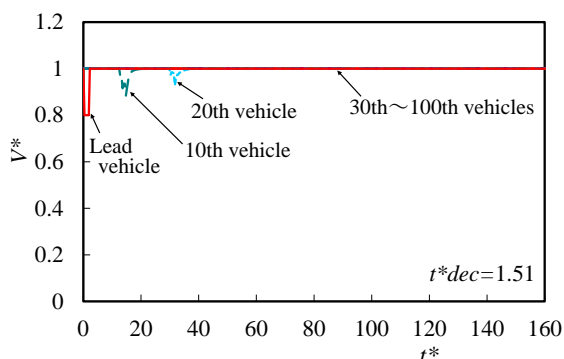


図 6 図 5 (b) と同条件で車間距離だけを 1% 増加させた場合の減速波の後方への伝播挙動

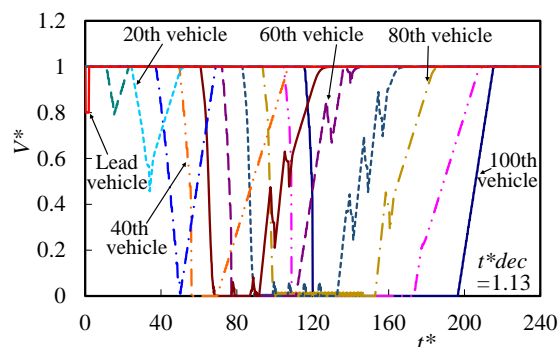
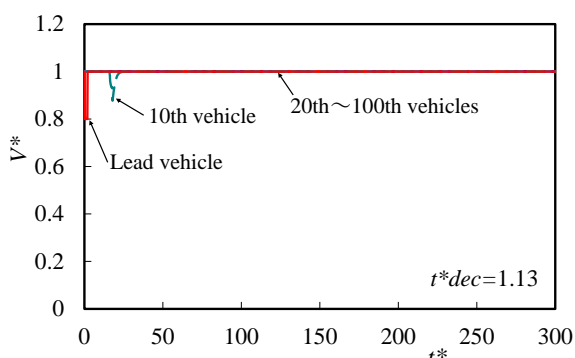
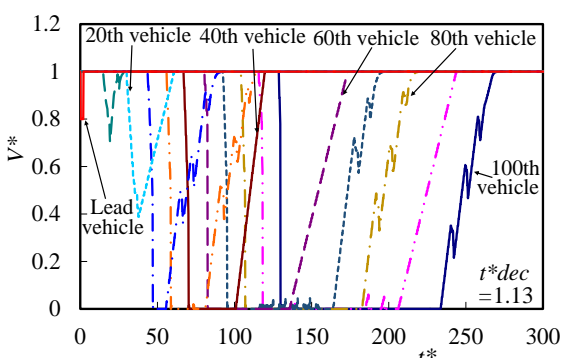


図 7 3 通りの反応遅れ時間をランダムに割り当てた場合の減速波の後方への伝播挙動



(a) Run1



(b) Run2

図 8 図 7 と同条件で初期車間距離だけを 4.5% 増加させた場合の減速波の後方への伝播挙動

引用文献

- (1) 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団、平成 18 年度「エコドライブの普及報告書」
- (2) 国土交通省東北地方整備局、<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/pam/kaiteki/eikyo.htm>
閲覧日：2020.06.14
- (3) 国土交通省、平成 31 年・令和元年 年間の渋滞ランキング、2020.06.08)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 相原浩司、中根一朗	4. 巻 17
2. 論文標題 計測結果に基づく車両追従モデルによる車間距離が渋滞形成に与える影響の考察	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 161-166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 相原浩司、中根一朗
2. 発表標題 計測結果に基づく車両追従モデルによる渋滞の形成と解消の検討
3. 学会等名 ITを活用した教育研究シンポジウム2018
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相原浩司、中根一朗
2. 発表標題 計測結果に基づく車両追従モデルによる車間距離が渋滞形成に与える影響の考察
3. 学会等名 計算数理工学シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----