

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

A STUDY OF INFLUENCE OF THE FOLLOWING DISTANCE ON FORMING TRAFFIC JAM BY THE CAR - FOLLOWING MODEL BASED ON THE TRAFFIC FLOW MEASUREMENTS

相原浩司¹⁾, 中根一朗²⁾

Kouji AIHARA and Ichiro NAKANE

- 1) 神奈川工科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 (〒243-0292 厚木市下荻野 1030, E-mail: s1781003@cce.kanagawa-it.ac.jp)
2) 神奈川工科大学 工学部 機械工学科 (〒243-0292 厚木市下荻野 1030, E-mail: inakane@me.kanagawa-it.ac.jp)

Various mathematical models have been proposed regarding traffic flow, and simulations have also been actively conducted. However, these models can predict the traffic flow only qualitatively. Therefore, to predict more practically, we formed the car-following model through analysis of the traffic flow measurements. Our proposed model has two novel feature that causes the overshoot by applying two velocity functions and accumulates the delay by limiting acceleration and deceleration. In this study, we discuss the relationship between the following distance and forming traffic jam by our model. While the preceding vehicle decelerates, the following vehicles reduce their velocity with time lag. The expansion of the following distance reduces the deceleration of the following vehicles and doesn't cause the traffic jam. In particular, it is much effective for reducing the traffic jam that the vehicles just behind the decelerated vehicle have the wide following distance.

Key Words : Traffic Flow, Traffic Jam, Car-Following Model, Modeling, Numerical Simulation

1. 緒言

交通渋滞は、世界中で発生している深刻な社会問題の一つである。我が国においては、近年、交通量が微減していることであるが⁽¹⁾、現在でも、高速道路渋滞による損失時間は年間 2 億人・時間にも昇り、これは、年間で約 10 万人分の労働力に相当するとのことである⁽²⁾。さらに、渋滞は二酸化炭素の排出増加にも繋がるため、局所の経済問題だけではなく、地球規模の環境問題とも言える。

このような渋滞問題において、我々が解決の一助となることを期待しているものの一つに交通流モデルによるシミュレーションがあり、これまでに様々な数理モデルが提案され、盛んにシミュレーションが行われている。特に、交通流モデルにおいては、直前方車両の位置や速度に応じて自車両の速度や加速度を制御する車両追従モデルが多く提案されている。代表例としては、Newell⁽³⁾が提案した直前方車両との車間距離に応じて自車両の速度を決定するモデルや、Bierley⁽⁴⁾が提案した直前方車両との車間距離と速度差に応じて自車両の速度を更新するモデルがあげられる。

しかしながら、現在までに提案されている多くの交通流モデルでは定性的な予測しか出来ず、定量的に交通渋滞を予測出来ないのが現状である。そこで我々は、定量的にも予測可能な交通流数理モデルの作成を目指して、計測結果からプロトタイプと言うべきモデルを作成した^{(5)~(7)}。そして、現在、さらなる計測結果の解析・モデルへの反映と、作成したモデルを用いたシミュレーション結果の検討・評価を行っている。

上記の経緯より、本研究では、我々が提案する車両追従モデルを用いてシミュレーションを行い、その結果を検討する。特に、対象とするのは、車間距離が渋滞形成に与える影響である。なお、これに関しては、西成らの社会実験が有名である^{(8),(9)}。彼らの実験では、渋滞の発生初期に、その手前の位置において、車間距離を一定にして走行するペースメーカーとなる車 8 台を車群に入れることで、渋滞が緩和されている。また、既報⁽⁵⁾においては、加速度の上限 a_{max} が減速度の上限 a_{min} (本論文では負符号の無い絶対値とする) よりも小さいため、加速によって解消できない大きな減速の発生が渋滞発生に繋がること。言い換えると、加速度の上限が無い、

あるいは減速度が小さければ、渋滞が発生しないことを明らかにしている。そこで本報では、渋滞の発生する条件下において、減速に直接に関わる車群の車間距離を、全体、あるいは一部だけ変更してシミュレートし、本研究が提案するモデルによる渋滞形成プロセスの妥当性を評価するとともに、その結果から渋滞対策として有効な手法も検討する。

2. 使用した車両追従モデルの概要

本報で使用している車両追従モデルは、既報⁽⁵⁾と同じである。基本として、車間距離 Δx だけで表される速度関数 G により、自車速度 V が決定される。ただし、計測結果において加減速度の上限 a_{max} 、 a_{min} が存在していることから、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)に代入して、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。

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

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

$$-a_{min} \leq \frac{G(\Delta x(t+\Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \leq a_{max} \Rightarrow a(t+\Delta t) = \frac{G(\Delta x(t+\Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{G(\Delta x(t+\Delta t)) - V(t)}{\Delta t} < -a_{min} \Rightarrow a(t+\Delta t) = -a_{min}$$

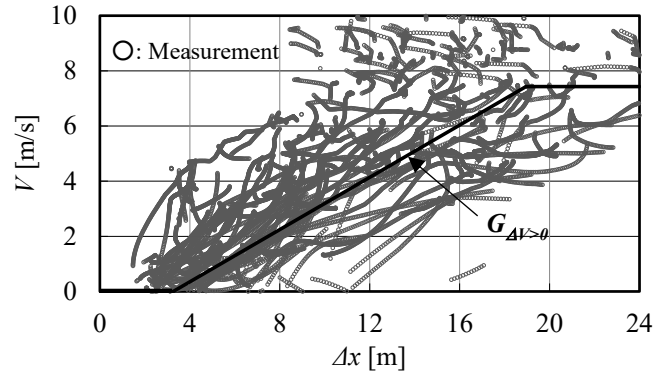
$$a_{max} < \frac{G(\Delta x(t+\Delta t)) - V(t)}{\Delta t} \Rightarrow a(t+\Delta t) = a_{max} \quad (4)$$

ここで、速度関数は、やはり既報⁽⁵⁾において、県道を走行する車両の速度を、前車との速度差 ΔV が正の場合と負の場合に分けて近似することにより得ており、これを Fig.1 に示す。なお、この速度関数と、これを基にした本研究で提案する追従挙動モデルの概要と特長を、以下に列挙する。

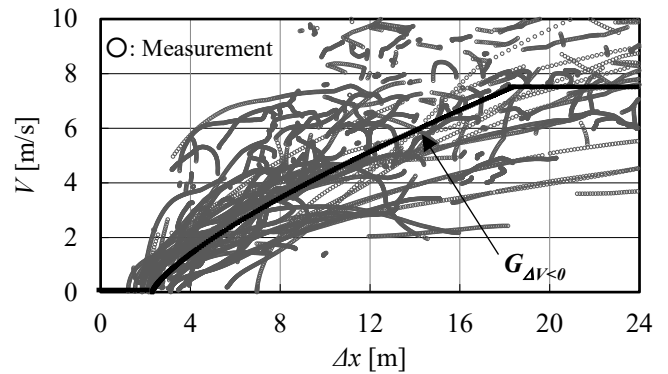
- (1) まず、計測結果から、自由走行する車間距離と停止する車間距離を決定する。次に、速度差 ΔV の正・負で計測結果を分け、それぞれ別の関数 $G_{\Delta V < 0}$ 、 $G_{\Delta V > 0}$ として近似して $G_{\Delta V < 0} > G_{\Delta V > 0}$ とする。そしてこれにより、速度関数だけで、オーバーシュート(O.S.)の発生を可能とする。
- (2) 計測結果では、加速度の上限 a_{max} は減速度の上限 a_{min} よりも小さい。そこで、そのような加減速度の上限を与えることで、遅れの蓄積するモデルとする。

また、上記 O.S.の発生原理を Fig.2 に示す。同図においても、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、破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、 $\Delta V > 0$ の場合には実線上の速度のみを取り、 $\Delta V < 0$ の場合には破線上の速度のみを取るものとする。つまり、破線と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

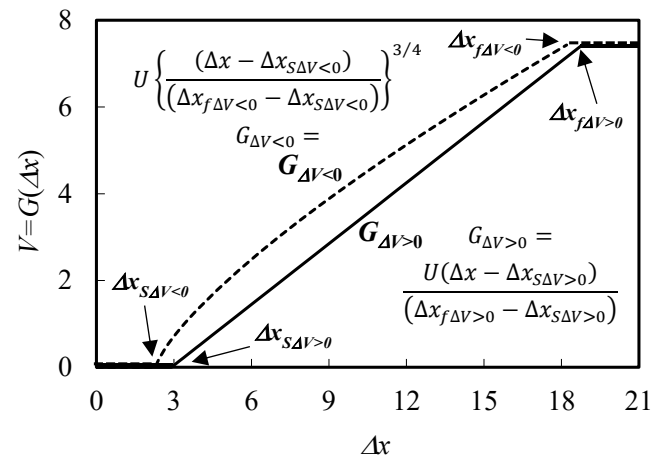
従うと、例えば、前回の速度を決定した時には $\Delta V > 0$ であり車間距離が $A1$ であったものの、今回の速度決定に際して車間距離が $A1$ から $A2$ に詰まっているとすると、今回は $\Delta V < 0$ となることから実線ではなく破線の関数上の $A2$ の速度を取ることとなる。従って、この場合、実線上の $A1$ に比べて青色実線上の $A2$ の速度が速いことから、 $\Delta V < 0$ において加速する O.S.が発生する。これは、 $\Delta V < 0$ から $\Delta V > 0$ へと移行する車間距離が広がる場合($D1 \rightarrow D2$)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、



(a) Velocity function based on measurements of $\Delta V > 0$



(b) Velocity function based on measurements of $\Delta V < 0$



(c) Velocity functions of $\Delta V > 0$ and $\Delta V < 0$

Fig.1 Velocity functions based on the correlation between the following distance Δx and host vehicle velocity V

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は発生せず、車間距離の変化が小さい場合にのみ発生する。

さらに、本研究のモデル化においては、一般性を持たせるため、Fig.1(c)中の各値を用いて無次元化しており、この際の参照値を以下に示す。以降、無次元値には*を付して記す。
 代表速度：自由走行速度(最大速度) $U=7.43\text{m/s}$
 代表距離：自由走行する車間距離と停止する車間距離の差 $\Delta x_{fAV>0} - \Delta x_{sAV<0}=16.65\text{m}$
 代表時間：代表距離/代表速度= $16.65/7.43=2.24\text{s}$

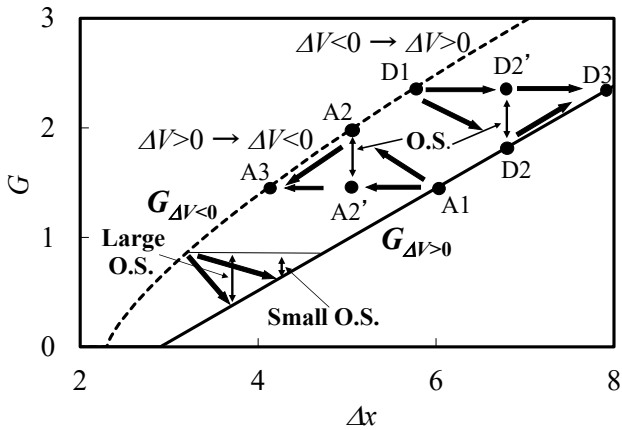
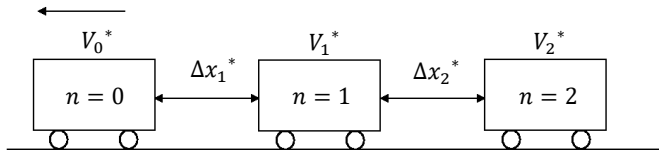


Fig.2 Schema of making Over Shoot (O.S.) by the two velocity functions

3. 数値シミュレーションの概要

前記した追従モデルを用いて、車間距離が渋滞形成に与える影響を評価・検討するため、以下のシミュレーションを行う。下図のように、 N 台の車が、無次元速度 $V_0^*=V_1^*=V_2^*=\dots=V_N^*=1$ ($=V/U$) で自由走行している。この際、車間距離は、何れも自由走行する車間距離 $\Delta x_{fAV>0}=18.95\text{m}$ よりも長く、無次元車間距離 Δx^* 、 $\Delta x^* \dots \Delta x^* \geq 1.14$ となっている。



The lead vehicle decelerates from $t^* = 0.38$ to 1.89 (or 1.51)

Fig.3 Schematic diagram of moving vehicle group

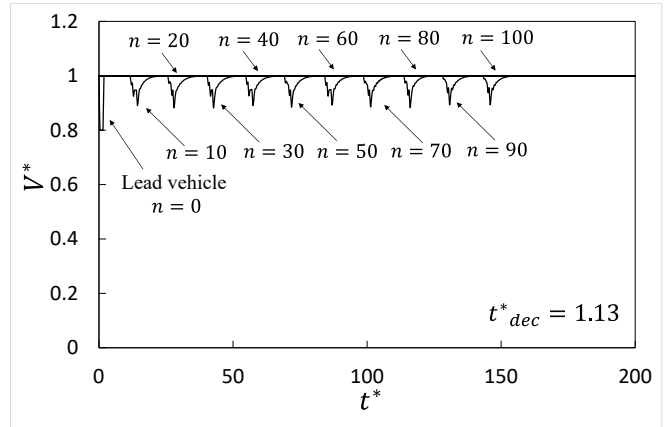
この状態で、先頭車両($n=0$)が、突然、自車速度を減じ、一定無次元時間 t_{dec}^* 後に元の速度 $V_0^*=1$ に戻す。つまり、先頭車両で発生した速度減速の後方車両への伝播挙動のシミュレーションである。なお、本追従モデルの解法には陽解法を用いているため、時間刻み Δt^* が問題となる。ただし、交通流における時間刻みはドライバーの遅れ時間に関係するため、計測結果から判断した $\Delta t^*=0.378$ としている⁽⁵⁾。また、本追従モデルの特長である加減速度の上限値は、加減速度の計測結果において、加速度、減速度、それぞれの 85% の計測結果が

範囲内となる $a_{max}^*=0.0796$ 、 $a_{min}^*=0.291$ とする。

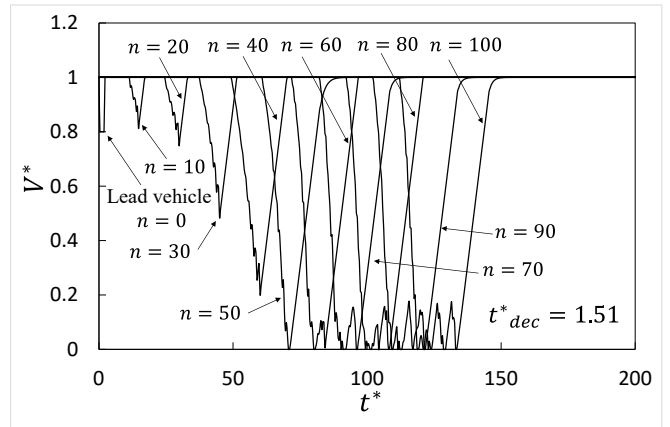
4. 結果および考察

4.1 基本となる挙動のシミュレーション結果

等間隔の初期車間距離 $\Delta x^*=1.14$ ($\Delta x=\Delta x_{fAV>0}=18.95\text{m}$) に配置された $N=101$ 台の車全てが、車速 $V^*=1$ ($V=7.43\text{m/s}$) で自由走行中に、突然、先頭車両($n=0$)が速度を 2 割減じて一定時間 ($t_{dec}^*=1.13, 1.51$) 減速した場合の挙動を Fig.4 に示す。



(a) Deceleration time of the lead vehicle : $t^* = 0.38$ to 1.51



(b) Deceleration time of the lead vehicle : $t^* = 0.38$ to 1.89

Fig.4 Propagation behavior of the velocity deceleration from the lead vehicle to the following vehicles

ここで、減速の伝播と車間距離に関して補足すると、初期車間距離 $\Delta x_{fAV>0}=18.95\text{m}$ ($\Delta x^*=1.14$) は、減速により追従走行に移行する車間距離 $\Delta x_{fAV<0}=18.16\text{m}$ よりも約 0.8m 長い。しかしながら、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。Fig.4 では、Fig.4(b)における先頭車両の減速時間が、Fig.4(a)よりも 1 時間ステップ分 ($\Delta t^*=0.378$) 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。Fig.4(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 Fig.4(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、減速部の面積の増加分が移動距離の減少分、つまり、遅れに相当する距離となって蓄積されて行く。つまり、Fig.4(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⁽¹⁰⁾と考えられていることから、妥当と判断している。

4. 2 初期車間距離を変更した場合のシミュレーション結果

前記した Fig.4(b)において渋滞が確認されたことから、Fig.4(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する。まず、車両台数 $N=101$ 台の車全ての初期車間距離を 1%だけ広くした場合の速度の計算結果を Fig.5 に示す。

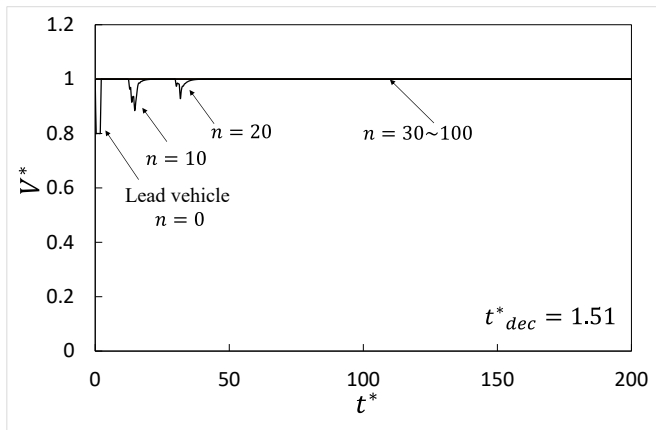
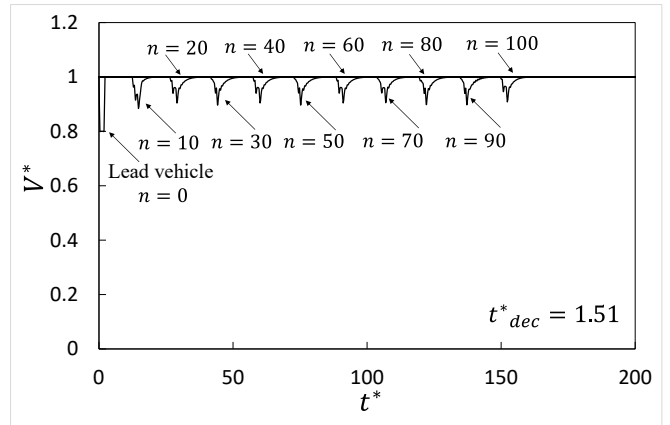


Fig.5 Propagation behavior of the velocity deceleration from the lead vehicle to the following vehicles with 1% expansion of the following distance among all vehicles

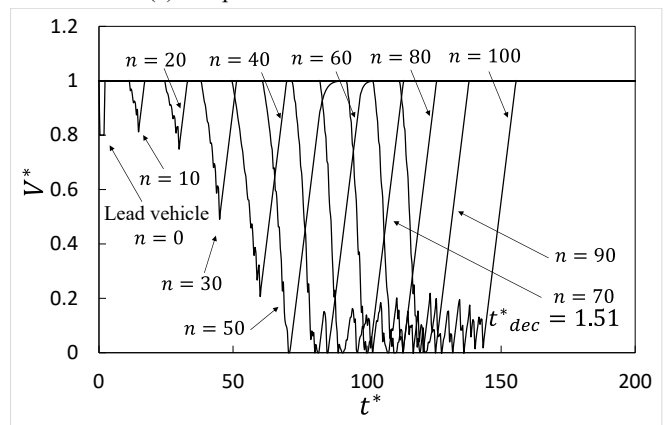
ここで、初期車間距離に関して補足すると、車両は基本として最大速度 $V^*=1$ で移動しているため、減速が自車に到達するまでは広げた初期車間距離が保たれる。Fig.5 では、Fig.4(a)と同様に、先頭車両で発生した矩形の減速が、三角形となって後方車両に伝播しているものの、この減速の伝播は $n=20$ 台目までであり、 $n=30$ 台目以降では減速が見られない。これは、減速により減少する先頭車両の移動距離、つまり、車間距離の詰まりが $(1-V^*) \times t_{dec}^* = 0.302$ であるため、1%だけ車間距離を広くした場合には、ちょうど $n=30$ 台目でこの詰まりが無くなるためである。従って、この場合には、遅れが伝播せず消滅して渋滞は発生しない。

上記より、初期車間距離を広げることの渋滞緩和・解消効果が確認できたことから、どの位置において車間距離を広げることが効果的であるかを、次に検討する。そこで、ここでは、車群を 10 台ずつのグループに分けて考え、その 10 台の

初期車間距離だけを 1%広げた場合のシミュレーションを行った。この場合の結果の一例を Fig.6 に示す。同図において、Fig.6(a)は減速する先頭車両直後の 10 台 ($n=1 \sim 10$) の初期車間距離を 1%広げた結果であり、Fig.6(b)は $n=21 \sim 30$ の 10 台分の初期車間距離を 1%広げた結果である。同図より、Fig.6(a)は、渋滞の発生しない Fig.4(a)と同様の結果であるのに対して、Fig. 6(b)は渋滞の発生する Fig.4(b)と同様の結果となっている。



(a) Expansion between $n=1$ and $n=10$



(b) Expansion between $n=21$ and $n=30$

Fig.6 Propagation behavior of the velocity deceleration from the lead vehicle to the following vehicles with 1% expansion of the following distance

そこで、この違いに関して検討する。Fig.6 の場合、1%ずつ 10 台だけ増やした車間距離はトータルで 0.1 であり、これが車間距離の詰まりに対するマージンとなる。このため、特に先頭車両直後の 10 台 ($n=1 \sim 10$) の車間距離を増やした場合、先頭車両が $t_{dec}^*=1.51$ だけ減速したとしても、10 台目以降の車両では、その減速による車間距離の詰まりは $0.302 - 0.1 = 0.202$ となり、これは $t_{dec}^*=1.01$ の場合に相当する。つまり、Fig.6(a)の場合に 10 台以降の車両に与えられる先頭車両の減速の影響は、Fig.4(a)の場合よりも小さいと考えられ、渋滞の発生しないことの説明が付く。これに対して Fig.6(b)の場合には、Fig.4(b)より分かる通り、 $n=20$ 台目の時点で、速度の減速が増幅しており、その面積の増加分は、車間距離を広げた

マージン分 0.1 よりもはるかに大きい。従って、Fig.6(b)の場合には、車間距離を広げたにも関わらず、その後も減速が大きくなり渋滞が発生する。

前記の通り、初期車間距離を広げる位置によって、車間距

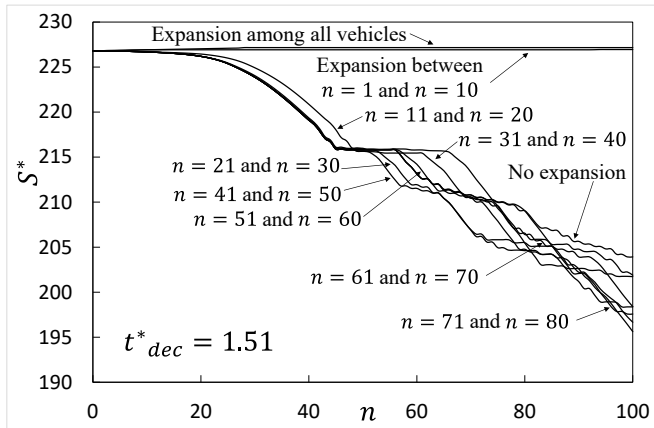
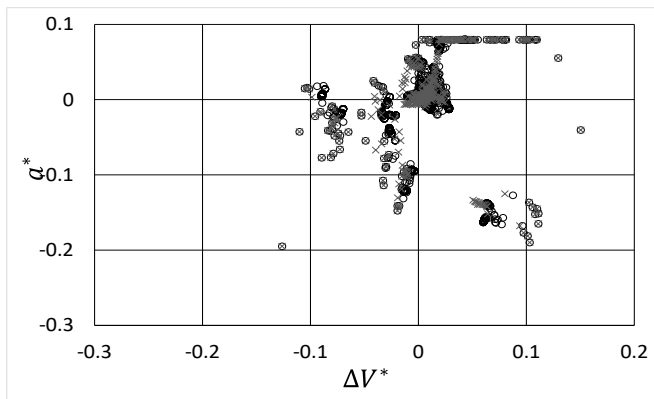
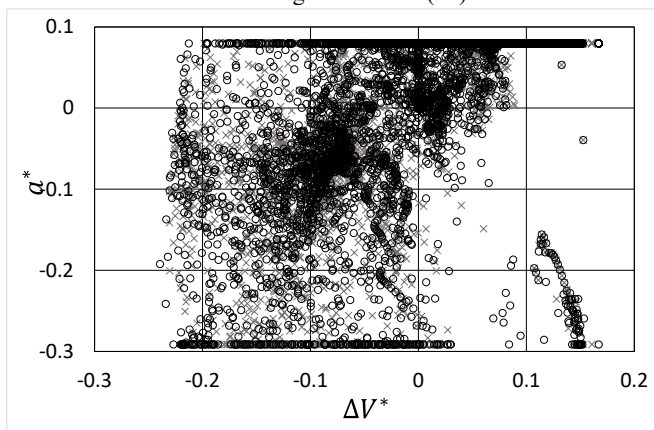


Fig. 7 Vehicle traveling distance S^* from $t^*=0$ to 226.8 for all expansion conditions



(a) Expansion between $n=1$ and $n=10$ (○) and among all vehicles (×)



(b) Expansion between $n=21$ and $n=30$ (○) and no expansion (×)

Fig.8 Difference of the relationship of a^* and ΔV^* by expanding the following distance ($t^*_{dec}=1.51$)

離を広げた効果が異なることから、これらを比較するため、各車両が $t^*=226.8$ 時間内に移動する距離を求めた。この結果が Fig.7 である。同図より、部分的に初期車間距離を 1% 広げることにより、渋滞が緩和されるのは、Fig.6(a)に示した先頭車両直後の 10 台 ($n=1\sim 10$) の初期車間距離を 1% 広げた場合だけであり、その他の場合では、 $n=100$ 台目における移動距離は、初期車間距離を広げない場合よりも短くなっており、かえって悪くなっている。

そこで、初期車間距離を広げることによる渋滞緩和への好影響と悪影響、特に部分的に初期車間距離を広げた場合に、広がっていない場合よりも移動距離の短くなる原因を検討するため、加速度 a^* と速度差 ΔV^* の相関をグラフ化し、Fig.8 に示す。同図では、Fig.8(a) が渋滞の発生しなかった場合の結果であり、全車の車間距離を 1% 広げた場合と先頭車両直後の 10 台 ($n=1\sim 10$) の初期車間距離を 1% 広げた場合を比較している。これに対して、Fig.8(b) は渋滞が発生する場合であり、全く初期車間距離を広げていない場合と $n=100$ 台目における移動距離がもっとも短い $n=21\sim 30$ 台の車間距離を 1% 広げた場合を比較した結果である。Fig.8(a) と (b) を比較すると分かる通り、どちらの場合にも、加速度が上限値となる場合は存在しているものの、渋滞の発生していない Fig.8(a) の場合には、減速度の上限となる場合が発生しておらず、減速度そのものが小さい。従って、Fig.8(a) の場合には、発生した減速を加速により取り戻すことが可能であると考えられるが、Fig.8(b) の場合には、加速と減速がバランスしておらず、減速を加速により取り戻すことができないと予測され、これにより渋滞が発生していると推察される。さらに、本来であれば渋滞緩和に寄与するはずの車間距離の増加が、かえって渋滞の状況を悪化させていることに関して、 $n=21\sim 30$ 台の車間距離を 1% 広げた場合と、全く初期車間距離を広げていない場合を Fig.8(b) で比較すると、前者の場合に、速度差の大きいことや、O.S. により発生する大きな減速度の多いことに気が付く。加えて、加速度の上限を超える減速度の発生した回数を算出すると、前者の場合に 1 割程度多い。そして、これらが前者の移動距離低下に繋がったものと考えられる。なお、このように、車間距離を広げることで減速度や速度差が大きくなった理由としては、以下が挙げられる。

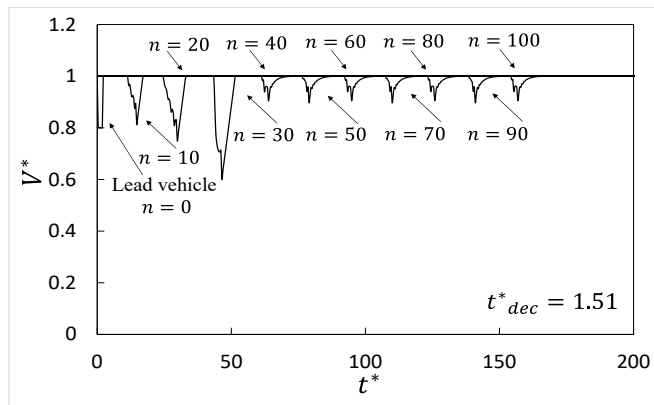
(1) 前記した通り、車間距離を広げていない無次元車間距離 $\Delta x^*=1.14$ の場合には、1 時間ステップ毎に前車からその直後の車へと減速が伝わり、減速の伝わった車は追従走行に移行する。これは、車間距離を 1% 広げた場合にもほぼ同様であるが、なまじ車間距離が広いため、最初の時間ステップでの車間距離の詰まりが短く、次の時間ステップにおける減速が大きくなる。

(2) 僅かとは言え、車両の初期車間距離が前車と後車で異なる場合、車両の加減速挙動の同期が僅かずつずれることで、O.S. の発生が増えることが予測される。

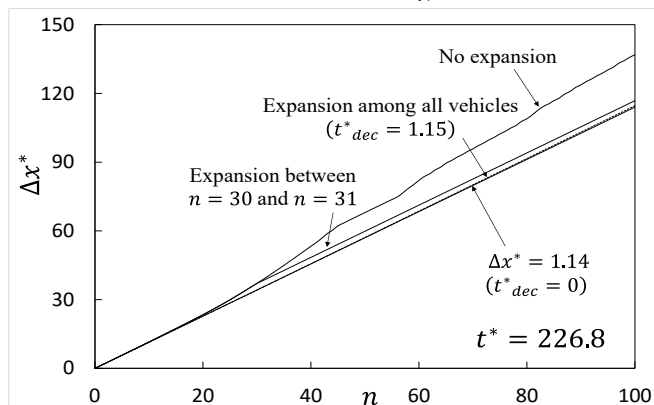
上記の通り、中途半端に初期車間距離を広げることは、

かえって渋滞を増長させることとなる。しかしながら、西成らの社会実験より分かる通り⁽⁹⁾、ある程度十分に車間距離を広げることで、渋滞は緩和・解消されるはずである。そこで、Fig.7において、 $n=30$ 台目で遅れが顕著に現れ始めていることと、Fig.9(a)における減速部($n=30$)の面積が2.28であることから、 $n=30$ と 31 台目のそれぞれの車間距離を 2.3 倍に広げる計算を行い、結果を Fig.9 に示す。同図においては、Fig.9(a)が減速の伝播を示す各車両の時系列速度変化であり、Fig.9(b)は、車両の大きさを無視した場合の $t^*=226.8$ 時間後における、先頭車両と n 台目の車両との車間距離 Δx_n^* である。つまり、先頭車両から後方 100 台目までの車両が、電車のように連結されていれば、Fig.9(b)は傾き一定の直線となる。

まず、Fig.9(a)と初期車間距離に変更を加える前の結果である Fig.4(b)を比較すると、 $n=20$ 台目までは同じであるが、初期車間距離を 2.3 倍に広げた $n=30$ 台目以降においては速度の減速が小さくなっている。特に、 $n=40$ 台目以降の減速挙動は、渋滞の発生しない Fig.4(a)とほぼ同様であり、渋滞の緩和とされていることが予測される。そこで、この渋滞緩和効果を確認するため、Fig.9(b)に示す車間距離 Δx_n^* を算出した。なお、Fig.7で示した無次元移動距離 S^* ではなく、 Δx_n^* としたのは、この場合の広げた車間距離が、前記した場合に比べて長いため、その広げた車間距離分を遅れとして考慮するためである。



(a) Propagation behavior of the velocity deceleration from the lead vehicle to the following vehicles



(b) Following distance from the lead vehicle

Fig.9 Influence of 2.3-times expansion of the following distance between $n=30$ and $n=31$

Fig.9(b)より明らかなように、 $n=30$ と 31 台目の車間距離を 2.3 倍に広げた場合には、若干、 Δx_n^* が大きいものの、渋滞の発生しない Fig.5 に近い結果となっており、遅れが増幅していない。つまり、このように、十分な車間距離を取ることによって、広げた車間距離以上の効果のあることが確認される。

5. 結言

本研究では、我々が提案する交通流モデルを用いたシミュレーションにより、車間距離の詰まりが減速、つまり遅れとなって現れ、これが後続車両へと増幅伝播することを確認するとともに、車間距離を広げることによる渋滞緩和・解消効果に関して以下の知見を得た。

- (1) 上記効果は、最初に減速する車両直後において著しく、車間距離を僅かに広げるだけで、その効果が現れる
- (2) 既に遅れが増幅している場合においても、十分に車間距離を広げることにより、効果をあげることが出来る。
- (3) 不十分に車間距離を広げた場合には、逆効果となる可能性がある。

また、ドラスティックな渋滞への転移や、これまでに報告されている内容と齟齬無く整合する上記の緩和・解消効果をシミュレート出来たことから、本研究で提案する追従モデルの妥当性が、ある程度確認できる。

参考文献

- (1) 国交省：参考データ集，<http://www.mlit.go.jp/common/000047777.pdf>, 2017.9.12.
- (2) 国交省：渋滞ワーストラランキング(平成 27 年速報)，http://www.mlit.go.jp/road/ir-data/pdf/ranking_3.pdf, 2017.9.12.
- (3) Newell, F. G. : Nonlinear effects in the dynamics of car following, *Operations Research*, Vol.9, No.2(1961), pp.209-229.
- (4) Bierley, L. R. : Investigation of an intervehicle spacing display, *Highway Research Record*, No.25(1963), pp.58-75.
- (5) 中根一朗：交通流の計測・評価と数理モデルへの展開 — オーバーシュートと解消しない遅れの蓄積を考慮した基本モデル —，日本機械学会論文集投稿中
- (6) 中根一朗：交通流の計測・評価と車両追従モデルへの展開，山梨講演会講演論文集，2013.
- (7) 中根一朗：計測結果に基づく最適速度モデルによる交通流シミュレーション，日本機械学会年次大会講演論文集，No.7, J1801-1-3, 2010.
- (8) 西成活裕：渋滞のサイエンスとその解消法，*日本物理学会誌*，Vol.71, No.3, 2016.
- (9) JAF ホームページ： <http://movie.jaf.or.jp/details/1.html>
- (10) Sugiyama, Y, etc : Traffic jams without bottlenecks — experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam, *New Journal of Physics*, Vol.10(2008), 033001 (<http://www.njp.org/>).