

## 追従走行時の反応時間特性と安定性に関する実験的検証

### Experimental Analysis of Reaction Time and Stability of Car-Following Model\*

鈴木亨\*\*・吾田洋\*\*\*・吉岡正泰\*\*\*\*・中辻隆\*\*\*\*\*

By Jun SUZUKI\*\*・Yoichi AZUTA\*\*\*・Masayasu YOSHIOKA\*\*\*\*・Takashi NAKATSUJI\*\*\*\*\*

#### 1. はじめに

ミクロ交通流シミュレーションモデルにおいて運転者の反応時間、感度等のパラメータはシミュレーション結果に極めて大きな影響を与える決定的なパラメータである。これらのパラメータ特性に関しては、1950年代におけるChandler<sup>1)</sup>、Herman<sup>2)</sup>、およびGazis<sup>3)</sup>による先駆的研究を嚆矢としてこれまで数多くの研究がなされてきている<sup>4)</sup>。

追従時の反応時間と追従挙動の漸近安定性に関しては、シミュレーションの再現性評価の観点からも極めて重要であり、近年においても活発な研究がなされてきている<sup>5)6)7)</sup>。しかしながら、車群の運動を計測するのに十分な機器の開発がされていなかったこともあり、追従挙動仮説モデル、あるいは漸近安定性に関する特性を実験的に検証するまでには至っていない。

RTK-GPSは、ドップラー効果に基づく補正効果によって車両の位置や速度を数cm程度の精度<sup>8)</sup>で連続的に計測することが可能であり、格段に精度の高い試験が可能となってきた。また、これまでの追従試験では困難であった曲線部における走行挙動の計測も可能になってきている。

北海道大学と開発局土木研究所は、追従挙動特性の実験的検証を行うために、RTK-GPSを用いた追従

試験を実施した。ここでは、計測された試験データを用いて反応時間、および安定性指数の特性に関する分析を行った。

#### 2. 追従走行試験

##### (1) 走行試験

走行試験は2000年10月16日～10月18日に、国土交通省開発土木研究所所有の苫小牧寒地試験道路(苫小牧市柏原)にて行われた。この試走路は1200mの直線区間と曲線半径50mのカーブ区間からなる延長約2700mの周回路である。RTK-GPSによる試験は固定基準点方式とし、試験路周辺の座標既知点から外挿した基準点を試験路内に設置し、衛星からの信号と同時に基準点からの補正信号を各車両に送信した。写真一1は追従試験の実施状況である。走行試験には10台の乗用車を用いた。試験に用いた車両及び車両並びは表1の通りである。配列はA-type、B-typeの2パターンで行った。その並びを表二に示す。先頭車の運転者は2名であり、A,Bのパターンと運転者を組み合わせて走行試験を行った。運転者は、先頭車と最後尾車を除き20歳代の男性である。走行試験は車両10台にRTK-GPSを取り付けて、車両位置、速度等を0.1秒ごとに計測した。



写真一1 追従試験状況(苫小牧寒地試験道路)

\*キーワード: 追従試験、反応時間、安定性

\*\*学生員、北海道大学大学院工学研究科、(札幌市北区北13条西8丁目、TEL011-706-6217、FAX011-706-6216)

\*\*\*正員、北海道開発土木研究所交通研究室、(札幌市豊平区平岸1条3丁目、TEL011-841-1738、FAX011-841-9747)

\*\*\*\*正員、パシフィックリサーチ情報技術部、(東京都多摩市関戸1-7-5、TEL042-372-6340、FAX042-372-6394)

\*\*\*\*\*正員、工博、北海道大学大学院工学研究科、(札幌市北区北13条西8丁目、TEL011-706-6215、FAX011-706-6216)

表一 走行試験に用いた車両

| 車両番号 | 年式    | 車種       |
|------|-------|----------|
| 1号車  | 平成3年  | ハイゼット    |
| 2号車  | 平成12年 | カペラ      |
| 3号車  | 平成10年 | ローレル     |
| 4号車  | 平成10年 | セフィーロ    |
| 5号車  | 平成12年 | ブルーバード   |
| 6号車  | 平成12年 | スカイライン   |
| 7号車  | 平成10年 | プリメーラ    |
| 8号車  | 平成12年 | アベニールワゴン |
| 9号車  | 昭和60年 | ピスタ      |
| 10号車 | 昭和63年 | サファリ     |

表二 走行試験における車両配列

| 配車順列 | Aパターン | Bパターン |
|------|-------|-------|
| 先頭   | 1号車   | 1号車   |
|      | 2号車   | 8号車   |
|      | 3号車   | 7号車   |
|      | 4号車   | 6号車   |
|      | 5号車   | 5号車   |
|      | 6号車   | 4号車   |
|      | 7号車   | 3号車   |
|      | 8号車   | 2号車   |
|      | 9号車   | 9号車   |
| 最後尾  | 10号車  | 10号車  |

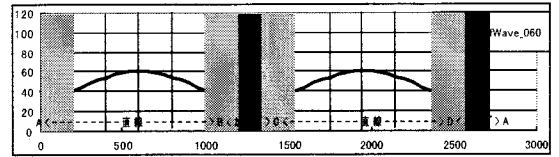
## (2) 走行試験パターン

試験は、静止状態、直線部、曲線部、および交差点部において行われた。静止状態での計測はRTK-GPSの精度を検証するために予め決められた位置に10台の車両を停止させた状態で計測を行った。仕様通りにおぼろげな数cm以内の計測誤差を確認した。

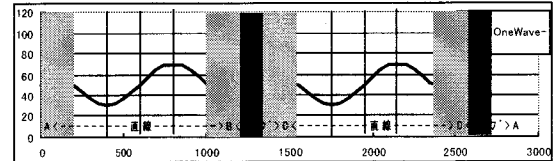
ここでは直線走行試験部における計測データを用いて分析を行った。走行パターンを図一に示す。後の安定解析、あるいはモード分析を想定し、先頭車の速度を正弦波上に变化させて後続車に追従させた。

例えば半波長走行 (Half Wave) においては、十分手前において40km/hでの定常走行を保った後、直線部約1km区間を利用して速度を60km/hまで上げその後40km/h (+パターン) に戻している。半波長から3波長の試験では、定常走行から最初に速度を下げるパターン (-パターン) も行っている。ランダム走行とは、40km/hから80km/hの範囲内で先頭車の速度を自由に变化させている。定速走行

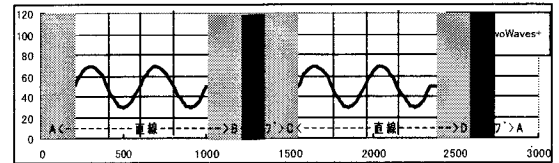
においてはおぼろげな20, 40, 60, 80km/hを保つように走行している。実際の試験においては、これらの試験は、車両配列のパターンA、Bも変えながら追従車両に走行パターンを予測させないようランダムな順序で実施されている。表一に各走行パターンごとの試験回数を示す。



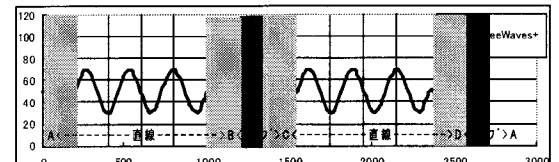
(a) 半波長走行 (Half Wave)



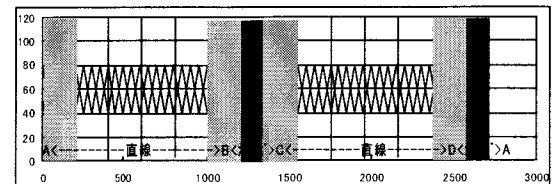
(b) 1波長走行 (One Wave)



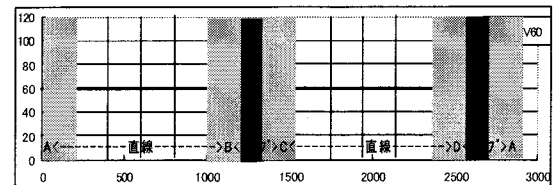
(c) 2波長走行 (Two Wave)



(d) 3波長走行 (Three Wave)



(e) ランダム走行 (Random)



(f) 定速走行 (Constant)

図一 走行パターン

表三 各走行パターンの試験回数

| Pattern    | A  | B  |
|------------|----|----|
| Half Wave  | 4  | 6  |
| One Wave   | 4  | 4  |
| Two Wave   | 2  | 6  |
| Three Wave | 4  | 5  |
| Random     | 4  | 4  |
| Constant   | 11 | 2  |
| Total      | 29 | 27 |

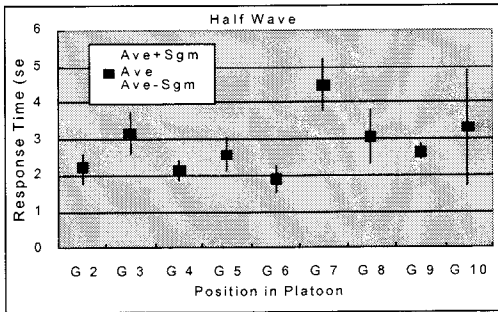
### 3. 安定性解析

#### (1) 応答時間

追従状態にある車両の時間遅れを応答時間としてその特性を調べた。ここでは、前後車間の速度に関して最大の相互相関係数を与える時間差を応答時間として定義した。

$$R_{i+1} = \underset{\delta}{\text{Max}} \quad \hat{n}_{i,i+\delta}(\hat{\delta}) \quad (1)$$

図一2は、車両配列Aパターンで半波長（Half Wave）走行を行った際の2台目（G02）から10台目（G10）までの応答時間の平均値と平均からの偏差を表している。ブレーキやアクセル操作に要する時間のために全体の応答時間は2～4秒となっている。一般的に言われている反応時間1～2秒との差が操作によるおくれ時間となるが、交通流シミュレーションで無視するにはやや大きいことが分かる。車両位置によっては有意な差異は見られていない。



図一2 追従車の応答時間（半波長 A Pattern）

#### (2) 反応時間

刺激—反応仮説に基づく追従理論において最も単純な追従式は

$$\ddot{x}_i(t+T) = \ddot{e}[\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)] \quad (2)$$

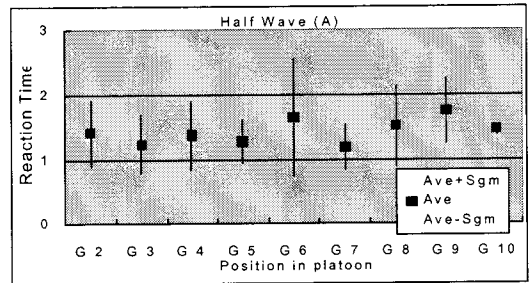
と表現される。ここで

- $\dot{x}_i(t)$ : 車両 i の時刻 t における速度
- $\ddot{x}_i(t)$ : " 加速度
- $T$ : 反応遅れ時間
- $\ddot{e}$ : 感度定数
- $C$ : スタビリティファクタ ( $= \ddot{e}T$ )

本解析では、応答時間と同様に、前車との相対速度  $\angle v_i(t)$  と追従車の加速度  $a_i(t)$  との間の相互相関係数を最大にする時間差を応答時間として定義した。

$$Rt_i = \underset{\delta}{\text{Max}} \quad \frac{E[\Delta v_i(t)a_i(t+\tau)]}{S_{\Delta v_i} S_{a_i}} \quad (3)$$

図一2は、車両配列Aパターンで半波長（Half Wave）走行を行った際の2台目（G02）から10台目（G10）までの反応時間の平均値と平均からの偏差を表している。ほぼ1.5秒前後に分布し車両によるばらつきが大きい。

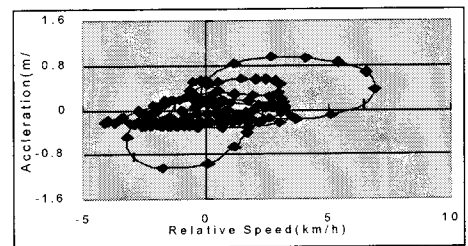


図一3 追従車の反応時間（半波長 A Pattern）

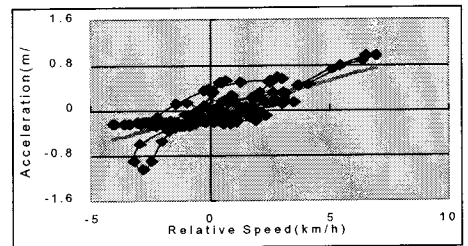
#### (3) 感度定数と安定性指数

リサーチ図の概念を応用し感度定数と安定性指数の算定を行った。図一4（1）は、ある1回の試験走行（半波長、A Pattern）時の相対速度  $\angle v_i(t)$  と加速度  $a_i(t)$  の軌跡を平面表示したものである。位相差（反応遅れ）のために楕円軌道となる。

位相差の影響を除去するために、先に求めた反応時間  $T$  を利用し相対速度  $\angle v_i(t+T)$  と加速度  $a_i(t)$  の軌跡を平面表示すると、図一4（2）に示すように縦長の楕円軌道となる。すなわち、反応時間が走行



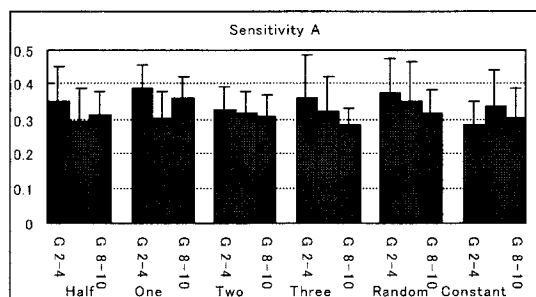
(1) 相対速度  $\angle v_i(t)$  と加速度  $a_i(t)$  の軌跡図



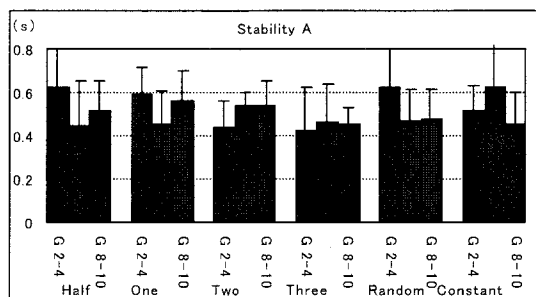
(2)  $\angle v_i(t+T)$  と  $a_i(t)$  の軌跡図と回歸直線

図一4 感度定数と安定性指数の算定

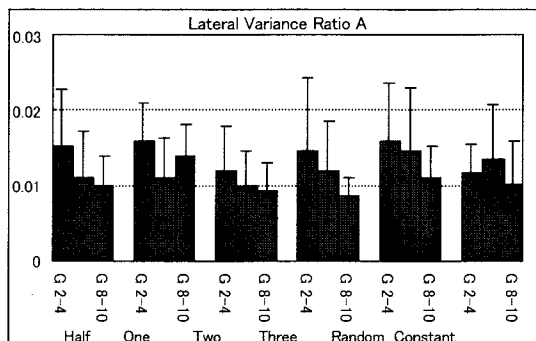
試験中一定であれば直線軌道となるが、そのばらつきのために楕円状の軌跡を描く。逆に短軸の長さは反応時間の安定性を表す指標となっている。式(2)に表されているように、感度定数は、相対速度  $\Delta v_i(t+T)$  と加速度  $a_i(t)$  の回帰直線の勾配として求めることが出来る。図一5は、走行パターンごとに、感度定数、安定性指数、および横方向分散比（短軸分散/長軸分散）を表したものである。車群は、個々の車両の影響を除くため、3台ずつまとめて平均を求めている（G2-4, G5-7, G8-10）。棒グラフは平均値を、線分は平均からの標準偏差を表している。走行パターンは、左から Half、One Wave、Two Wave、Three Wave、Random、Const に対応している。



(1) 感度定数



(2) 安定性指数



(3) 横方向分散比

図一5 走行パターンと安定性

安定性指数では、式(2)のモデルの臨界値0.5付近に分散し、横方向分散値では車群の後方ほど小さくなる傾向が見られている。

最後に、追従試験の実施に際し、RTK-GPSの機材貸与および技術指導に対して多大な協力を賜ったトリプルジャパン(株)井沢氏および岩部氏ら関係各位に記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Chandler, R. E. et. al.: Traffic Dynamics, studies in Car Following, Operations Research, Vol. 6 (2). pp 165-184, 1958
- 2) Hermann R. et. al.: Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following, Operations research, Operations Research, Vol 7 (1). pp 86-106, 1959
- 3) Gazis D C. et. al.: Nonlinear Follow the Leader Models of the Traffic Flow, Operations Research, Operations Research Society of America, Vol 9 (2). pp 545-567, 1961
- 4) Gerlough, D. L. et. al.: Traffic Flow Theory, Transportation Research Board, Special Report No. 165, Washington D.C., 1975 (Updated: N. Gartner, et. al., Traffic Flow Theory: A state-of-the-Art Report, <http://www-cta.oml.gov/cta/research/trb/tft.html>, 1998
- 5) Ozaki H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behaviour, Proc. 12<sup>th</sup> international symposium on transportation and traffic flow theory, pp 349-366, 1993
- 6) Zhang, X et. al: Stability analysis of the classical car-following model, Transportation Research. Part B, Vol: 31 No: 6, pp 441-462, 1997
- 7) Del Castillo et. al.: The reaction time of drivers and the stability of traffic flow, Transportation Research. Part B, Vol: 28 No: 1, pp 35-60, 1994
- 8) G. S. Gurusinghe、中辻: RTK-GPS を用いた車両追従試験と車群中の反応時間特性、第 21 交通工学研究発表会論文集、2001 (投稿中)