

追従積重ね試験データへの共分散構造分析 適用による縦断線形変化の影響抽出

岡田 允孝¹・葛西 誠²・寺部 慎太郎³・康 楠⁴

¹学生非会員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: 7615605@ed.tus.ac.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: kasai@ri-nexco.co.jp

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: terabe@rs.noda.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: kangnan@rs.tus.ac.jp

高速道路単路部における渋滞はサグ部で顕著に発生しており、道路縦断線形が走行挙動に何らかの影響を及ぼして交通容量を低下させていると考えられているが、渋滞を引き起こすメカニズムは十分に解明されていないのが現状である。縦断線形の影響のみを抽出可能と考えられるドライビングシミュレータ(DS)を用いた追従積重ね試験が有力な方法と考えられるが、そのデータ解析法として、既往研究のように1対の追従ペア毎のモデルパラメータ推定をするのではなく、複数回の追従積重ねデータを集合的に扱うことで、被験者特性と線形要因を潜在変数として捉えることができると期待される。そこでDSで取得した追従積重ね試験データに共分散構造分析を適用することで、容量低下の本質的原因と考えられる縦断線形の変化が交通流に及ぼす影響を考察可能か議論する。

Key Words : time headway, longitudinal gradient change, application of structural equation modeling

1. はじめに

高速道路単路部における渋滞はサグ部で顕著に発生していることが報告されており、道路の縦断勾配が車両の走行挙動に影響を及ぼして交通容量を低下させていることが指摘されている¹⁾²⁾。しかし、渋滞を引き起こすメカニズムは十分に解明されていないのが現状である。縦断線形の影響のみを抽出可能と考えられるドライビングシミュレータ(以下DS)を用いた追従積重ね試験³⁾が有力な方法と考えられるが、そのデータ解析法として、既往研究のように1対の追従ペア毎のモデルパラメータ推定をするのではなく、複数回の追従積重ねデータを集合的に扱うことで、被験者特性と線形要因を潜在変数として捉えることができると期待される。そこでDSで取得した追従積重ね試験データに共分散構造分析(SEM:Structural Equation Modeling)を適用することで、容量低下の本質的原因と考えられる縦断線形の変化が交通流に及ぼす影響を考察可能か議論する。

2. ドライビングシミュレータによる追従積重ね

試験

(1) 試験方法³⁾

追従積重ね試験によって交通流を生成すると、DSと実路との相違は否定できないものの運転者属性や車種によらない均一な交通流が実現できるとされる。縦断線形が渋滞に対して支配的であると考えられる以上、縦断線形と交通流の関係のみを議論したい場合には極めて有効な手法と考えられる。

以下、簡単にデータ取得方法を説明する。DS内に再現したサグ部を擁した単路部道路において、まずは被験者に速度を一定に保ちながら走行をしてもらい、1回目の走行データを得る。その1回目の走行データをDS上で先行車として再現し、その後ろを再び同一被験者が追従走行を行い2回目の走行データを得る。これを繰り返すことで交通流が生成できる。

本稿で利用するDSは本田技研工業製、6軸制御により運転者が勾配や車両加減速による加減速を体感できるようになっている。

DSによる追従積重ね試験で用いたコースは、全長約

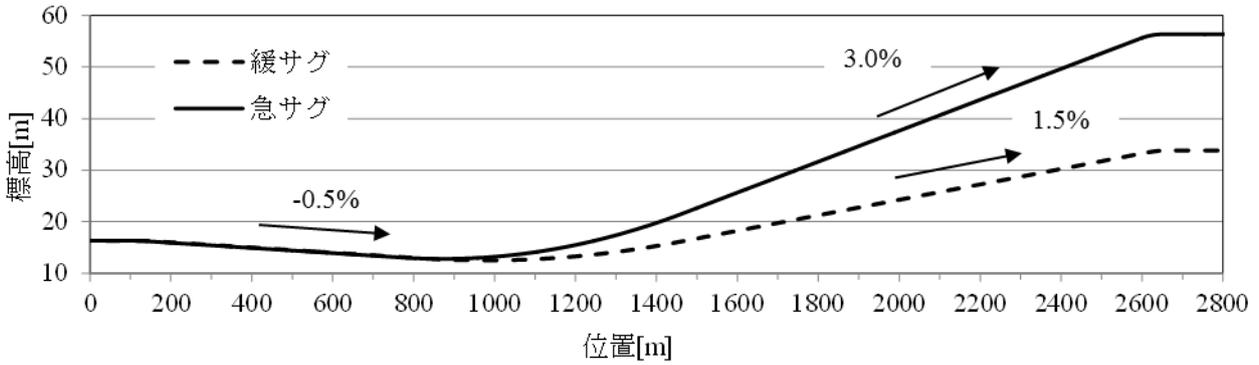


図-1 道路縦断線形

表-1 緩・急サグ平均車頭時間

| 縦断線形 | | 下り直線初期 | 急サグ底 | 緩サグ底 | 上り曲線 | | 上り直線初期 | 上り直線末期 | | | |
|----------|-----|--------|------|------|------|------|--------|--------|------|------|------|
| 位置[m] | | 200 | 300 | 872 | 977 | 1100 | 1200 | 1700 | 1800 | 2400 | 2500 |
| 車頭時間[s] | 緩サグ | 3.57 | 3.61 | — | 3.73 | 3.78 | 3.85 | 4.23 | 4.30 | 4.44 | 4.46 |
| | 急サグ | 3.26 | 3.28 | 3.47 | — | 3.68 | 3.81 | 4.18 | 4.23 | 4.32 | 4.30 |
| 速度[km/h] | 緩サグ | 57.2 | 58.8 | — | 53.7 | 51.5 | 49.2 | 54.5 | 55.6 | 58.6 | 57.8 |
| | 急サグ | 56.4 | 57.0 | 53.9 | — | 46.2 | 46.5 | 54.9 | 55.8 | 59.0 | 58.5 |

3500mのサグ部を含む高速道路単路部で、下り-0.5%から上り1.5%の緩いサグ(緩サグ)と下り-0.5%から上り3.0%の急なサグ(急サグ)の2種類のコースである(図-1)。なお、走行開始から安定した追従走行に至った上でサグでの挙動検証を行うため、縦断・平面線形が共に直線である約1000mの助走区間を含んでいる。

本稿の追従積重ね試験では自由流から渋滞流に至る交通現象を再現するために、先行車となる1回目の走行を60km/hで等速走行するよう被験者に指示をして実験を実施する。また、被験者は左車線のみを走行するよう指示し、追越車線には先行車と同じ動きをする車両を、車間距離が33.3mとして3台表示させる。

(2) 取得データ

被験者は普段運転をしている一般人 9 名(被験者 No.1-9)で、緩サグと急サグの両方で追従積重ね試験を実施する。つまり、9名の被験者による2種類の縦断線形での追従積重ね試験で計 18 種類の走行データが取得される。同一被験者により縦断線形が異なる2つのコースで追従積重ね試験データが取得されたこととなり、個人属性を排除した縦断線形の比較が可能となる。

被験者 1 の緩サグ、急サグで取得された走行データによる Time-space 図を図-2、図-3 に示す。

これらの取得されたデータは、実路でも存在するとされる車頭時間擾乱の増幅伝播を含み、渋滞発生時の特徴をよく捉えていると判断される。

3. 実験データの考察

まず、図-4は横軸にスタートからの距離(位置)を、縦

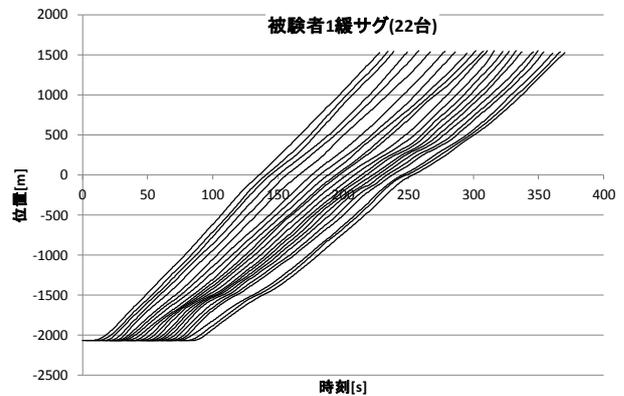


図-2 被験者1(緩サグ)Time-space図

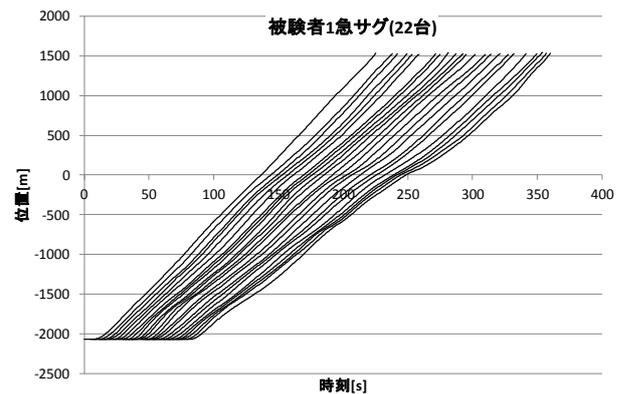


図-3 被験者1(急サグ)Time-space図

軸に平均車頭時間をとったものである。これより、両サグともに位置が進むにつれ、平均車頭時間は増加し続けること、平均車頭時間は緩サグの方が長いこと、両者の差は1200m~1600mで一旦ほぼなくなるが、その後はまた広がるのがわかる。

次に、図-5は横軸にスタートからの距離(位置)を、縦

軸に平均速度をとったものである。両サグともに下りはじめて速度が増加するが、その後すぐに減少に転じ、縦断線形が上りになって少し進んでから速度は増加に転ずること、サグ底について急サグより緩サグのほうが約 100m あとに位置していることを考慮すると、速度が増加に転ずるタイミングはほぼ同じことがわかる。

以上の平均車頭時間と平均速度の変化から、サグ底付近(1000m付近)から車頭時間の増加率が大きくなり、速度の減少率は大きくなるのがわかる。これは減速が起きて、ある断面を通過するのに時間がかかるため、車頭時間が増加したと考えられる。すなわち、この実験で得られたデータはサグ部での渋滞現象を表現できているといえる。

4. 共分散構造分析(SEM)の適用

縦断線形の変化と交通流の関係を把握するため、車頭時間データに SEM を適用する。SEM は直接測定できない潜在変数を導入し、その潜在変数と測定可能な観測変数との間の因果関係を明らかにすることにより、社会現象等を理解するための統計的手法である。ここで、容量低下の原因と考える縦断線形の影響を潜在変数にするため、「下り直線初期」、「上り曲線」、「上り直線初期」、「上り直線末期」の 4 つの縦断線形区間を潜在変数として設定する。この線形区間からそれぞれ 2 つずつ、計 8 つの断面における各走行車両の車頭時間を観測変数とする。ここで、潜在変数から観測変数へのパスを「潜在→観測」、「下り直線初期」から「上り曲線」へのパス、「上り曲線」から「上り直線初期」へのパス、「上り直線初期」から「上り直線末期」へのパスを「隣接潜在間」、「下り直線初期」から「上り直線初期」へのパス、「上り曲線」から「上り直線末期」へのパスを「非隣接潜在間」と呼称する。そして、各縦断線形の影響の間にも何らかの関係があると想定し、サグ上流から下流へ向かう交通流を考慮し、上流から下流へのパスを潜在変数間に設定する。

また、縦断線形が異なる 2 つのサグ間における交通流の違いがあるのかを把握するため、多母集団の同時分析を行う。多母集団の同時分析は、母集団間のモデルの異質性を統計的に検証するための手段である。その上で、表-2 のように、緩サグと急サグでパス係数の値に差がないとする等値制約を設定し、その有無によってモデルを 6 つ作成した。その推定結果を比較すると、GFI はどのモデルも 0.9 以上で、モデルのデータに対する説明率は高いことがわかる。

そして、AIC ではモデル 5 が最小で、6 つの中では最適のモデルであると考えられる。すなわち、本研究のデータの構造を表現するのは、モデル 5 のような、潜在変数

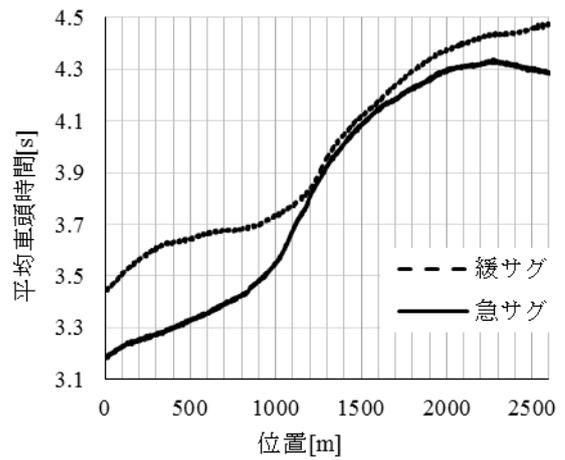


図-4 緩・急サグ平均車頭時間

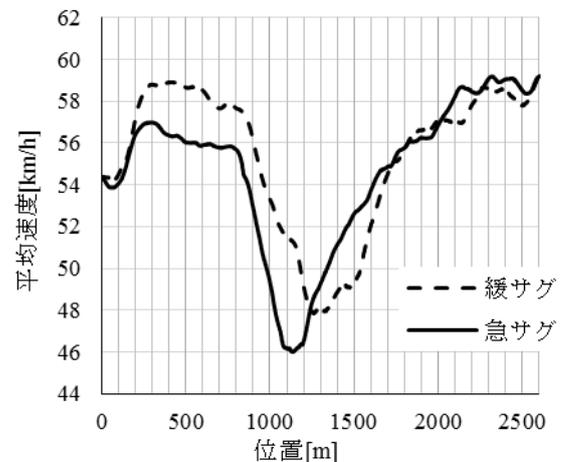


図-5 緩・急サグ平均速度

表-2 モデル比較

| モデル番号 | パス係数の等値制約 | | | GFI | AIC |
|-------|-----------|-------|--------|-------|---------|
| | 潜在→観測 | 隣接潜在間 | 非隣接潜在間 | | |
| 1 | 無 | 無 | 無 | 0.938 | 194.887 |
| 2 | 有 | 無 | 無 | 0.937 | 188.103 |
| 3 | 無 | 有 | 無 | 0.931 | 200.520 |
| 4 | 無 | 有 | 有 | 0.929 | 203.299 |
| 5 | 有 | 無 | 有 | 0.936 | 185.436 |
| 6 | 有 | 有 | 有 | 0.926 | 197.946 |

から観測変数へのパスと隣接する位置の潜在変数間のパスは緩サグと急サグで等しくないとし、隣接しない位置の潜在変数間のパスは緩サグと急サグで等しいとするモデルが最良であるといえる。

そこで次章ではこのモデル 5 について詳しく考察する。

5. 最適モデルの考察

まず、「潜在→観測」のパスはどれも 0.96 以上であるため、それぞれの潜在変数はそれぞれの観測変数できちんと説明されていることがわかる。また、「非隣接潜在間」のパスはどれも統計的に有意であるものの、値は小さいので、その変数間の影響は小さいことがわかる。

続いて、モデル5は「隣接潜在間」のパスのみが等値制約を課していないので、「隣接潜在間」のパスについて緩サグと急サグで比較する。図-6と図-7を比較すると、緩サグでは $0.83 > 0.76 > 0.65$ というように、コース上流の潜在変数間のパスほど大きいのが、急サグでは $0.71 \sim 0.75$ であまり差がない。つまり、サグ上流の交通流が下流の交通流へ与える影響は、緩サグにおいては上流から下流にいくにつれて小さくなるが、急サグにおいてはあまり変わらない。なお、等値制約を課されて推定されたパス係数でも、それぞれのモデル内で標準化されているので、緩サグのモデルと急サグのモデルとでは異なる値が表示されている。

また、パス係数の推定値における差の検定より、「下り直線初期」から「上り曲線」へのパス、「上り直線初期」から「上り直線」へのパスは緩サグと急サグ間に5%水準で有意な差があることがわかった。

6. おわりに

本論文は、ドライビングシミュレータを用いて同一被験者により繰り返し追従する追従積重ね試験データから、交通流に及ぼす縦断線形の影響を抽出できると考える方法として共分散構造分析(SEM)を適用した。適合度指標から見て良いモデルが得られたが、潜在変数が具体的に何を表しているか、解釈に課題が残っている。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文誌，No.371/IV-5，pp.1-7，1986.
- 2) 大口敬：高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—，土木学会論文誌，No.660/IV-49，pp.39-51，2000.
- 3) 大口敬：高速道路における交通渋滞緩和策の最新動向，自動車技術，Vol.67，No.10，pp.11-16，2013
- 4) 大口敬，飯田克弘：高速道路サグにおける追従挙動特性におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性，交通工学，Vol.38，No.4，pp.41-50，2003.
- 5) 葛西誠，大月崇照，寺部慎太郎：単路部交通流の特性を抽出するための車頭時間ダイナミクスモデル，土木計画学研究・講演集，Vol.50，6pages，2014.

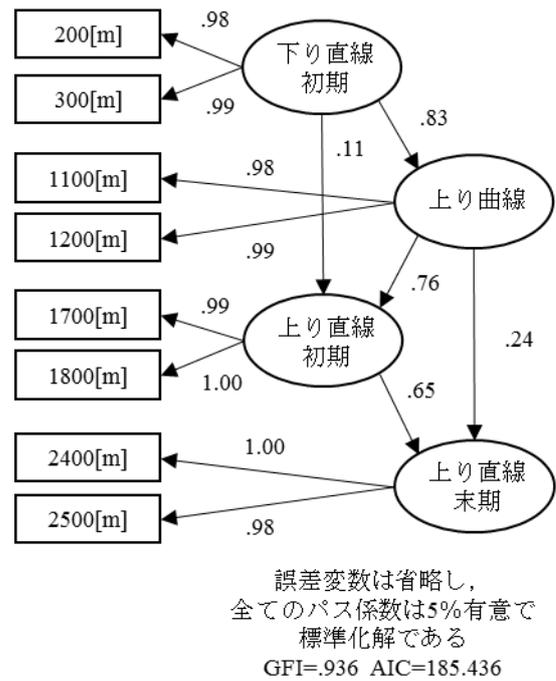


図-6 パス図(モデル5・緩サグ)

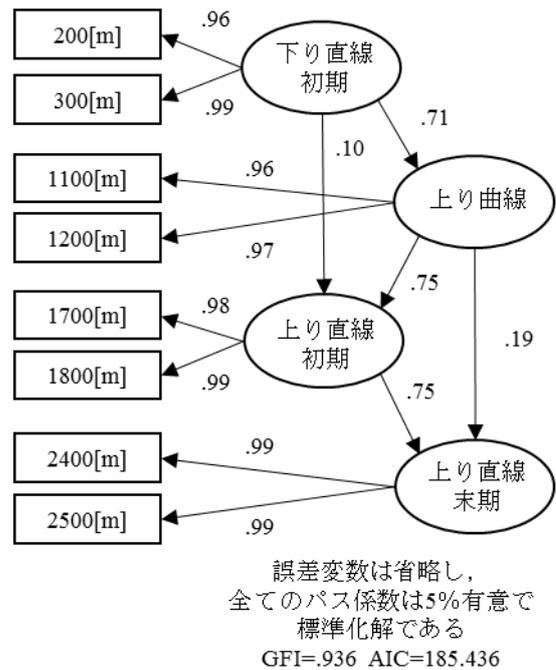


図-7 パス図(モデル5・急サグ)

(2016. 4. 22 受付)

APPLICATION OF STRUCTURAL EQUATION MODELING TO ACCUMULATED DATA OF CAR-FOLLOWING BEHAVIORS TO EXTRACT INFLUENCE OF LONGITUDINAL GRADIENT CHANGE ON TRAFFIC FLOW

Masataka OKADA, Makoto KASAI, Shintaro TERABE and Nan KANG