

車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞の分析*

An Analysis of Bottleneck Phenomena at a Sag Based on Precision Observations of Vehicle Trajectories*

武藤 憲弘**・赤羽弘和***

By Norihiro Muto・Hirokazu Akahane

1. 目的

高速道路の主な渋滞発生箇所として、トンネル入口部、インターチェンジ合流部、料金所部、および縦断曲線の凹部であるサグ部等があった。ETC の利用率が増大するにつれて料金所における渋滞が大幅に減少したことにより、渋滞発生原因で料金所に次いで多いサグ部の渋滞解消は最重要課題となりつつある。

サグ渋滞の発生は、交通流率が高まるにつれて車線利用が追越車線に偏ることにより、大きな車群が形成され、その中をサグの上り勾配で発生した減速波が下流から上流に向けて伝播、増幅されることに起因していることが知られている。¹⁾

本研究の目的は、路側設置された複数のビデオカメラによる画像データに基づいて、車両の走行軌跡を精密に観測し、その分析に基づいて渋滞原因車群及び同車群先頭車を検出すると共に、それらの車両の走行挙動の特徴を明らかにすることである。

2. 使用した観測データ

本研究では、図 1 に示すようにほぼ毎週土曜および交通繁忙期の午前にサグ渋滞が頻発している東名高速道路下り線の大和地区に観測区間を設定した。この約 1.2km の区間に連続設置された 11 台のカメラで走行車両を同期撮影した画像データを用いた。この画像データから、特定の車両の走行軌跡を一体化して推定するシステム^{2,3)}を適用し、車群内の車両の観測、分析を行った。表 - 1 に、ビデオ観測日時を示す。渋滞発生時刻は、(財)日本道路交通情報センターのホームページから取得した。

図 2 に示すように、RTK-GPS、加速度センサ、角速度センサ等により自車位置を高精度に測位可能な実験車両⁴⁾の走行軌跡と、その実験車を撮影した画像データにより推定した走行軌跡とでは、観測区間において 1/30 秒ご

との速度差が約 5km/h 以内、同じく走行位置のユークリッド格差の最大値が 4m 程度であることを確認している。



図 - 1 観測対象地域

表 - 1 ビデオ観測日時

観測日	観測時間帯	渋滞時間帯
2006年7月15日(土)	4:30 - 7:30	6:15 - 18:50
2006年7月22日(土)	4:30 - 7:30	6:45 - 11:10
2006年7月29日(土)	4:30 - 7:30	5:55 - 13:40
2006年8月4日(金)	6:00 - 9:00	7:25 - 12:55

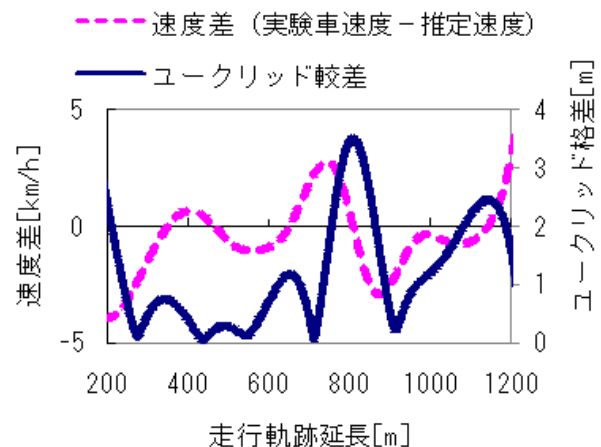


図 - 2 複数ビデオカメラシステムと実験車両の推定速度比較と走行軌跡のユークリッド格差

*キーワード：サグ渋滞、追従走行、ビデオ観測

**千葉工業大学大学院工学研究科建築都市環境学専攻

***工博、千葉工業大学工学部建築都市環境学科

(千葉県習志野市津田沼2-17-9、

TEL:047-478-0444

E-mail : akahane@ce.it-chiba.ac.jp)

3. 渋滞原因車の特定手法

ビデオ画像の目視により車群を構成している車両(以下、車群内走行車両)と他の車両に影響を受けず単独で走行している車両(以下、単独走行車両)を判定した。相対速度と車頭時間の関係から追従判定分析、速度の時間変動から相互相関分析を行った。

(1) 追従走行の判定法

追従走行とは、運転者が、先行車と自車との車間距離あるいは相対速度 = 先行車速度 - 自車速度の変化を認知し、ブレーキやアクセル操作として反応し、その結果自車両の速度・加速度を変化させる状況である。

本研究では、車頭時間と相対速度との時間変動から追従している車群内車両なのか、追従していない単独走行車なのかを判定することにした。図-3 に示すように、追従状態では、車頭時間の変化に対する相対速度の制御に反応遅れが伴うので、車頭時間-相対速度平面上では一般的には時計回りの閉曲線を描く。単独走行状態では、この曲線が閉じない。

図-4 には、渋滞原因車群の先頭と判定した車両の挙動を示す。8月4日のサンプル以外は、観測開始時の車頭時間が小さく追従状態であると推定されるが、相対速度がほぼ一貫して正の領域にあり、結果として車頭時間は増大し続けている。これは、観測区間の途中で追従状態から、車群先頭車に移行していることを示しており、ビデオ画像による目視確認結果とも一致する。また、図-5 に8月4日の渋滞原因車通過後の後続車両の速度変動を示す。図-6 に同じく8月4日の渋滞原因車通過後の後続車両のタイムスペース図を示す。図-5 から、渋滞原因車通過後の車群内を減速波が電波・増幅して臨界速度まで低下していることがわかる。図-6 の走行軌跡からも、渋滞原因車の前方の空白域と、その後の低速域の発生が確認できる。

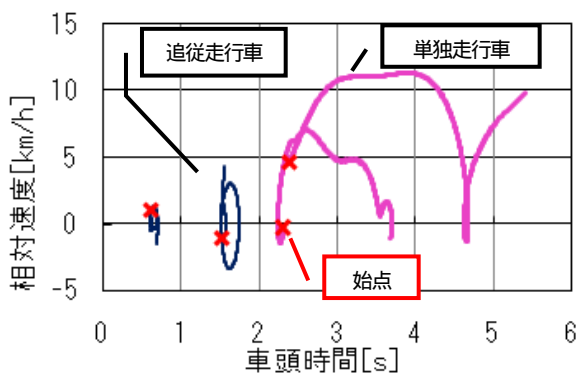


図 - 3 車頭時間と相対速度の変動例

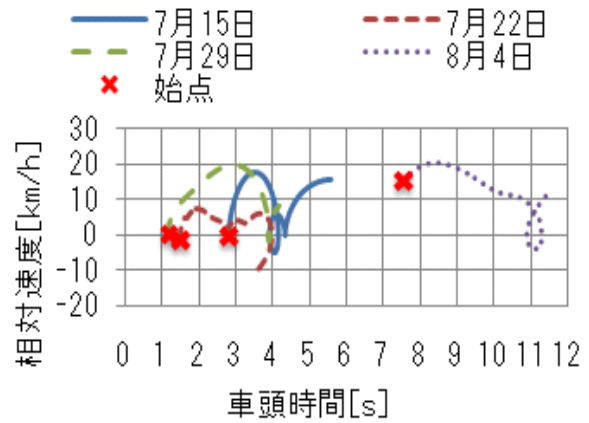


図 - 4 渋滞原因車群先頭車の挙動

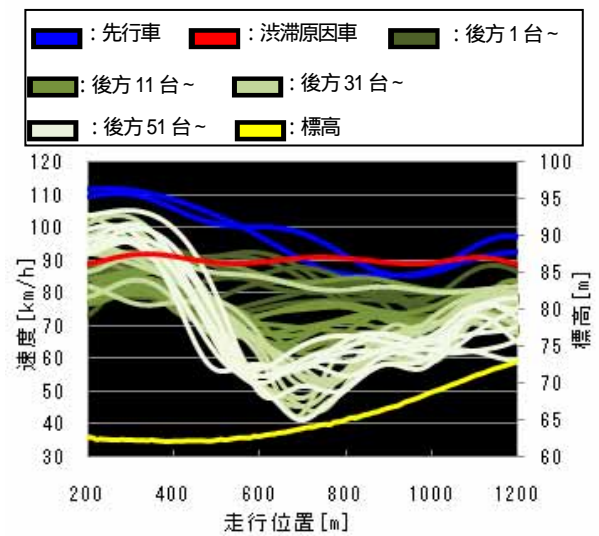


図 - 5 速度変動図 (8月4日)

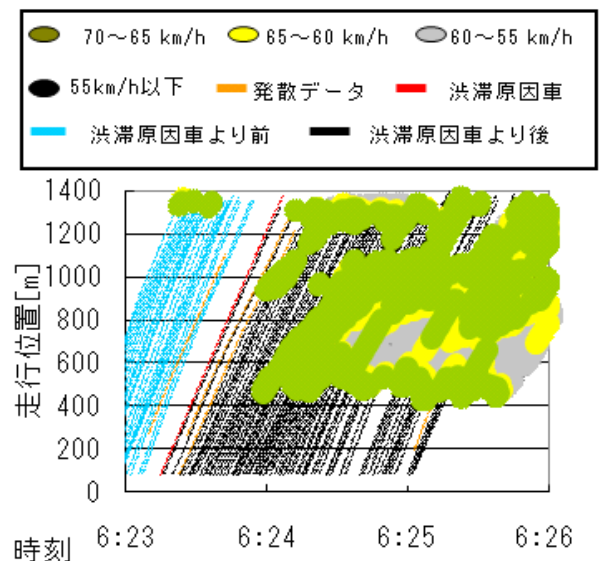


図 - 6 タイムスペース図 (8月4日)

(2) 走行速度の相互相関分析

追従時の車頭時間はドライバーによって異なるので、追従判定用に絶対的な閾値を設定することは難しい。そこで、先行車両と自車両の走行速度の相互相関分析により、追従の度合いを定量的に評価した。図-7に、ビデオ画像の目視により確認した追従走行車両と単独走行車両の走行速度と、各々の先行車両の走行速度との相互相関係数と遅れ時間との関係を示す。同図から、この追従走行車両は、相互相関係数のピークから、反応遅れ時間が1.2秒程度であることが分かる。それに対して、単独走行の車両には、当然ながら相互相関係数のピークが見られない。

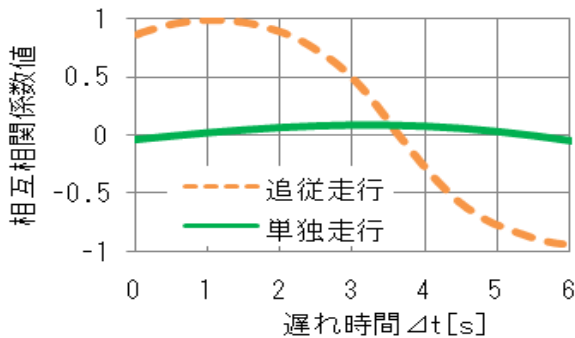


図-7 走行速度の相互相関分析例

a) 渋滞原因車群先頭車の挙動

図-8に、渋滞原因車群先頭車の速度と、先行車の速度との相互相関計数値を示す。いずれのサンプルにもピーク値が存在せず、絶対値も小さいことがわかる。

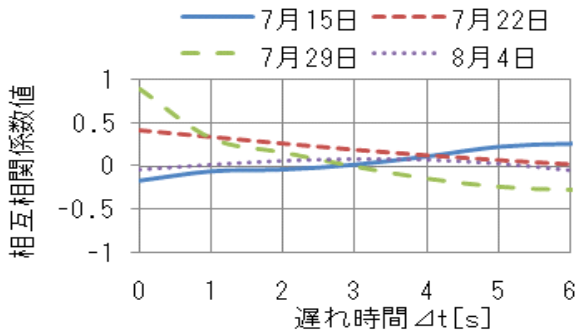


図-8 渋滞原因車群先頭車の先行車との相互相関

b) 先行車群内の車両の挙動

図-9に、8月4日における、ある先行車群内の先頭から2~7台目までの走行速度の、先行車の走行速度との相互相関分析結果を示す。この例では、追従走行車両の反応遅れは1.0~2.2秒程度の範囲に分布していることが分かる。図-10に8月4日における、ある先行車群内の先頭から2~7台目までの車頭時間と相対速度の関係を示す。これらから、図-11に8月4日の先行車群内の2~7台目までの、平均車頭時間

と相互相関係数値のピーク値に対応する反応遅れ時間の関係を示す。平均車頭時間については、車頭時間と相対速度の変動図を使い、追従していると判定される区間のみデータを使用し算出した、相互相関係数値も同様の方法で算出した。車群内の後方に位置する車両ほど、平均車頭時間と反応遅れ時間とが一致する傾向が明確になる。すなわち、先行車とほぼ同等の位置で同等の走行速度をとっていることになる。これは、追従挙動が先行車の挙動のみに対する反応ではなく、道路幾何構造の影響の反映でもあることを示唆している。

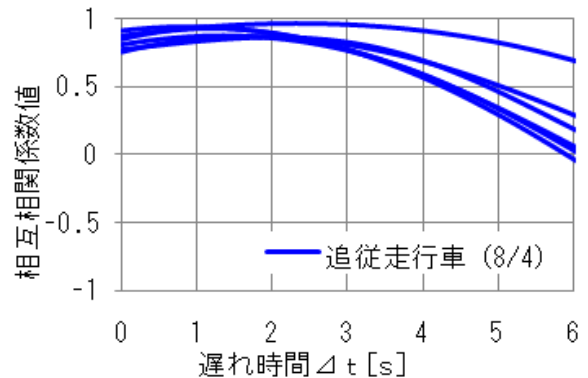


図-9 ある車群の追従走行車の相互相関分析結果

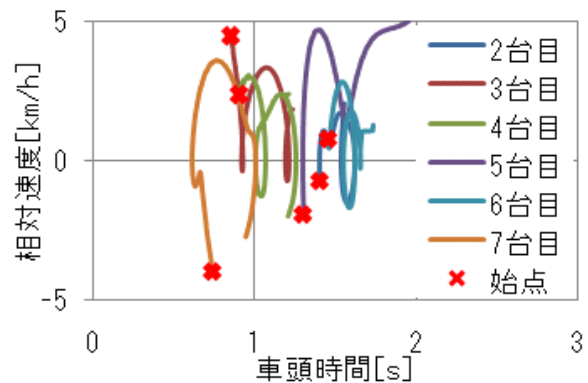


図-10 ある車群の車頭時間と相対速度の変動

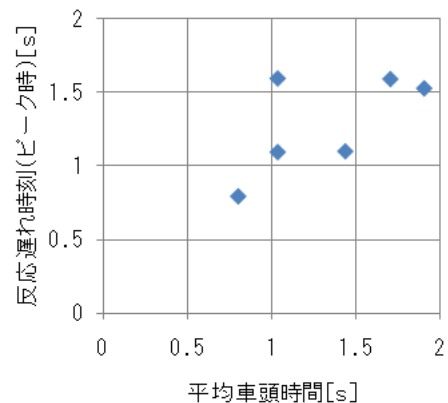


図-11 ある車群内の車両の平均車頭時間と反応

4. 渋滞原因車群における走行挙動の特徴

本節では、3.の方法で抽出した車群の走行挙動の分析結果を示す。図-12に、7月15日の渋滞原因車の通過時刻を0としてその5分前から1分後までの6分間交通流率時間変動を示す。交通流率の算出断面は、サグ部の上り勾配において、車群内車両の車頭時間が減少し始める箇所に設定した。また、交通流率と走行速度はともに、前後2台ずつ計5台で移動平均値である。

渋滞原因車群とその先行車群とで、走行挙動を比較した。先行車群は、渋滞原因車群先頭車と交通流率、走行速度ともに同等であることを基準として選定した。渋滞原因車群の先頭車と先行車群の先頭車は、相互相関分析にて先行車と追従関係にはないことを確認済みである。

図-13に渋滞原因車群先頭車と先行車群先頭車の速度変動図を示す。同図から、先行車群先頭車と比較して渋滞原因車群先頭車の走行速度は低い。観測区間より上流の状況であるため断定はできないが、前述の走行速度差は、先行車群先頭車はサグ部前半の下り勾配で加速するが、渋滞原因車群先頭車は同区間においても一定速度を保持した結果ではないかと推測される。これは、先行車群先頭車は縦断勾配の増大にしたがって速度が低下傾向にあるが、渋滞原因車群先頭車は観測区間を通してほぼ一定値を保っていることにより、ある程度裏付けられよう。

大方の車両は、道路幾何構造の変化にしたがって、多少は走行速度等の状況が変化することが自然であろう。ところが、渋滞原因車群先頭車は共通して、あたかも相対的に低い走行速度を設定してオートクルーズコントロールを使用しているがごとき挙動を示しており、これが後続車両を困惑させて、車群内に擾乱を与えている可能性がある。これが、車群内を伝播するにしたがって増幅されることが、渋滞発生に影響していることも想定される。

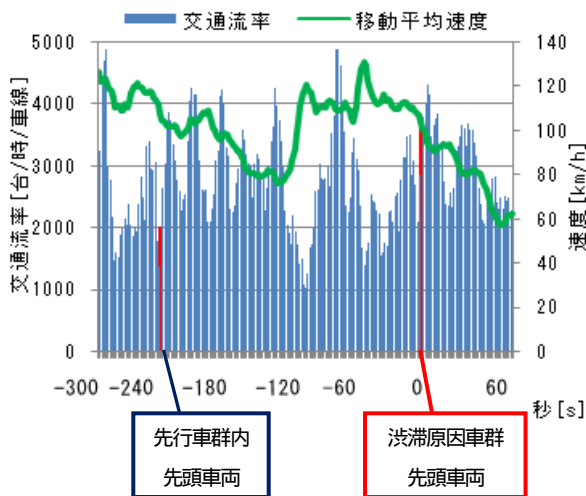


図-12 6分間交通流率と移動平均速度の時間変動

図-14に、車群先頭車両と車群内車両の道路上の同一地点における速度変動を示す。先行車群においては、両者の走行速度の相関はかなり高い。すなわち、道路幾何構造等に応じて走行速度は時間変動しているが、先頭車と後続車両の走行速度は、同一位置ではほぼ同一水準である。これに対して、渋滞原因車群においては、先頭車と後続車の同一位置における走行速度に相関はほとんど認められず、追従関係が不安定であることを推定させる。

図-15に、7月15日の車群内車両と先頭車の走行速度の相関計数値を示す。図-14の関係からも当然の帰結であるが、先行車群内車両の相関計数値は先頭車両からの位置にかかわらず、きわめて高い。一方で、渋滞原因車群内車両の相関計数値は、きわめて低い。他の日の全サンプルにおいても、先行車群の相関係数値が渋滞原因車群を上回った。

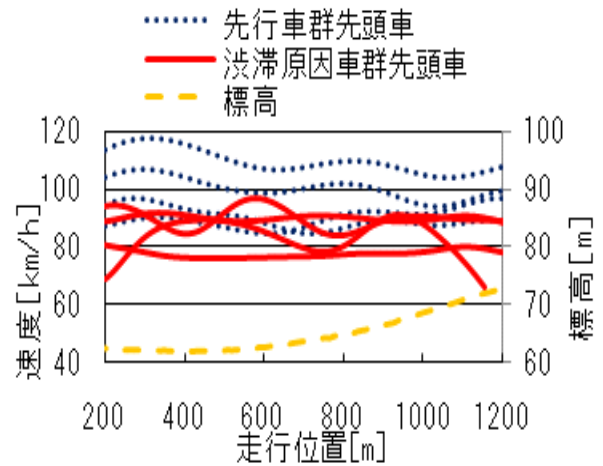


図-13 車群先頭車の走行速度の空間変動

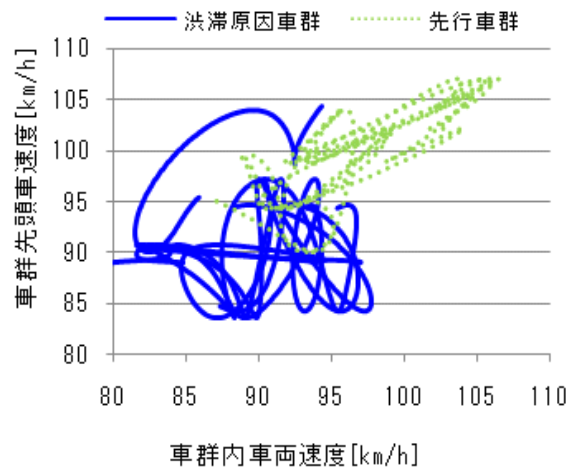


図-14 同一位置における走行速度の時間変動

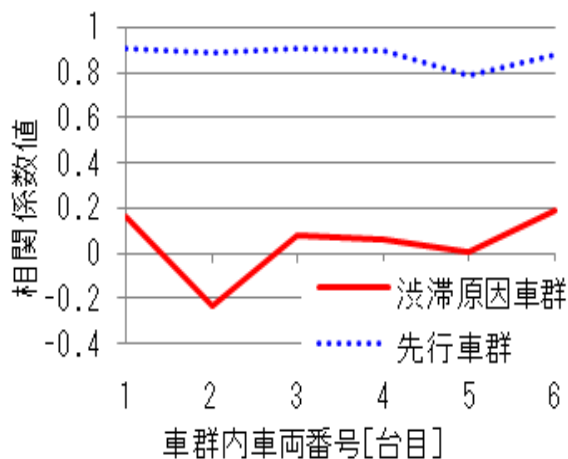


図 - 15 同一位置における走行速度の相関係数

5. まとめ

本研究では、路側設置された複数のビデオカメラによる画像データに基づいて、車両の走行軌跡を精密に観測し、その分析に基づいて渋滞原因車群及び同車群先頭車を検出すると共に、それらの車両の走行挙動の特徴を明らかにした。その結果、以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 渋滞原因車群に先行する車群内における安定的な追従状態では、平均車頭時間と反応遅れ時間とが一致する傾向にある。すなわち、先行車とほぼ同等の位置で同等の走行速度をとっていることになる。これは、追従挙動が先行車の挙動のみに対する反応ではなく、道路幾何構造の影響の反映でもあることを示唆している。
- 2) 先行車群先頭車と比較して渋滞原因車群先頭車の走行速度は低い。また、先行車群先頭車は、縦断勾配の増大にしたがって速度が低下傾向にあるが、渋滞原因車群先頭車は観測区間を通してほぼ一定値を保っている。
- 3) 先頭車と後続車両の走行速度は、道路幾何構造等に応じて走行速度は時間変動するものの、同一位置ではほぼ同一水準である。これに対して、渋滞原因車群においては、先頭車と後続車の同一位置における走行速度に相関はほとんど認められず、追従関係が不安定であることを推定させる。

上記 2) の結果として 3) の不安定な追従状態が車群内に擾乱を与え、それが車群内を伝播するにしたがって増幅されることが、渋滞発生につながっている可能性もある。これが適切な推定であれば、単に一定の走行速度を保持するオートクルーズコントロールの普及は、渋滞原因車群の先頭車になり得る車両を増殖させることにもなりかねない。

少なくとも上記のような安全運転支援装置の装備車と

非装備車が混在する状況においては、非装備車のドライバーに違和感を抱かせないような制御が考慮されるべきであろう。

謝辞

本研究においてビデオ観測データを取得するに当たり、首都大学東京・教授の大川敬氏、国土交通省国土技術政策総合研究所、中日本高速道路(株)、(株)高速道路総合技術研究所、および技術研究組合走行支援道路システム開発機構より多大なる支援を受けた。実験車両による観測精度の検証においては東京大学・教授の桑原雅夫氏および(株)アイ・トランスポート・ラボの小宮粹史氏より、評定点測量においてはアジア航測(株)より、大いなる協力を受けた。基礎データの整備作業においては、千葉工業大学・学生(当時)の長田博文氏、渡辺優一氏、志賀まり恵氏をはじめとする諸兄の助力を得た。ここに記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 越 正毅, 桑原 雅夫, 赤羽 弘和 : 高速道路のトンネル、サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458/ -18, pp.65-71, 1993
- 2) H. Akahane, S. Hatakenaka : Successive Observations of Trajectories of Vehicles with Plural Video Cameras, International Journal of ITS Research, Vol.2, No.1, pp.47-53 2004.
- 3) 小宮粹史, 赤羽弘和, 舌間貴宏, Jian Xing, 堀口良太 : 複数ビデオカメラシステムによる車両走行軌跡長区間連続・大量システムの高速度料金所広場への適用, 交通工学, Vol.42, No.3, pp.47-53, 2007.
- 4) 小宮粹史, 大川敬, 赤羽弘和, 堀口良太, 桑原雅夫 : 車両間および車両と道路構造との相互作用の連続観測用実験車の開発, 交通工学, Vol.44, No.1, pp.71-80, 2009.