

ブレーキ操作解析による列車運転士の異常検出の検討

○ 長谷川 靖 (日本大学) [機] 綱島 均 (日本大学)

[機] 丸茂 喜高 (日本大学)

The examination of analysis of braking behavior for train drivers to detect unusual driving

○ Yasushi Hasegawa, (Nihon University) Hitoshi Tsunashima, (Nihon University)
Yoshitaka Marumo, (Nihon University)

The safety devices for train systems such as the Automatic Train Protection (ATP) system have already been used practically to protect against operating errors made by train drivers. Many such devices are activated in emergency situations when a risk becomes obvious, and the emergency brake is applied. If such systems are not equipped or are faulty, the drivers' operating errors may cause immediate accidents. In order to prevent such accidents, it is necessary to evaluate potential risks by detecting inappropriate driving behavior before manifest risks appear. This study analyses driving behavior of train drivers using a train simulator that simulates train operation. We focus on braking behavior when approaching a station. The method of detecting unusual braking operation is examined by giving drivers mental calculation problems as a mental workload.

キーワード：ヒューマンファクタ、マンマシンシステム、運転行動

Key Words : Human Factor, Man-machine system, Driving behavior

1. はじめに

鉄道は大量輸送という性質上、一度の事故が非常に大きな規模となり得る。現在、鉄道において運行の安全は、自動列車停止装置 (ATS: Automatic Train Stop) やなどの高度な信号保安装置によって保たれているが、これらの保安装置は事故の危険が迫ったときに作動するもので、場合によっては、検出の対象にならない状況もある。最終的な安全は、列車を直接操作する運転士が担っている。そこで、近年、鉄道システムのトータルでの安全性を確保するために、運転士のヒューマンファクタの重要性から、運転士とその状態に着目した研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

これらのことから、より確実な予防安全を目指すために状態監視によって、運転のリスクが顕在化する前に、運転士の不適切な運転行動を事前に検出することにより、潜在的なリスクを評価することが重要であると考えられる。本研究では、身体的な拘束を伴わず、簡便に運転士の状態監視を行う方法として、運転士の運転操作から、運転の顕在的、潜在的リスクの両者を評価できる異常検出の方法につ

いて検討する。今回は、副次課題を課すことで運転士の異常状態を模擬し、列車運転シミュレータを用いた運転実験によって異常運転の判別可能であるか検討した。

2. 運転操作からの異常検出

2.1 ブレーキハンドル操作からの異常検出

ブレーキ操作で要求されることは、目標位置に精度良く停止する他に、乗り心地を維持することである。衝動を抑えるために、ブレーキハンドルの大きな操作は極力行わないのが一般的であるが、運転士が正常な状態でない場合、ブレーキのスムーズな調整が行えなくなると予想される (図1)。したがって、運転士の異常はブレーキハンドルの操作量として現れる可能性がある。

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_k - \bar{u})^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)は平均ハンドル操作量に対する u_k の二乗平均誤差 ε^2 であって、ハンドル操作量 u_k の分散である。

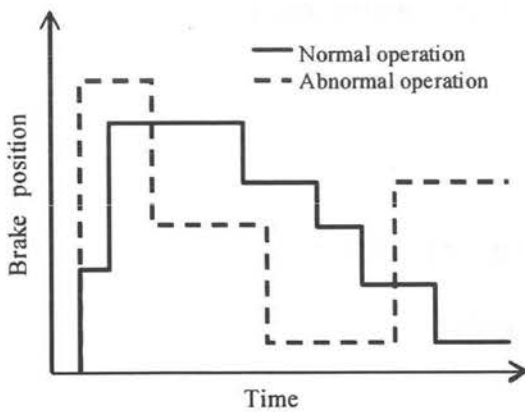


Fig.1 Driver's condition and operation behavior

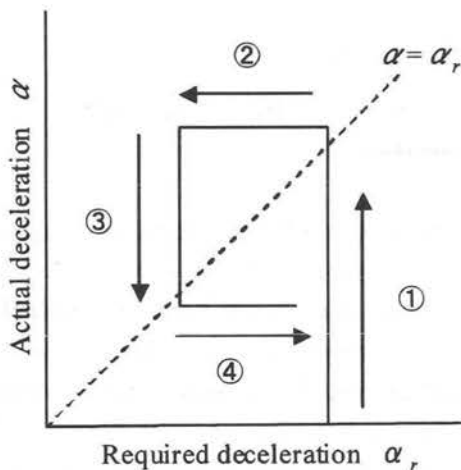


Fig.2 Example of Relation between required and actual decelerations

2.2 減速度による異常検出

速度 $v(t)$ で走行する車両が、位置 $x(t)$ から目標位置 x_T に停止するために必要な平均の減速度 $\alpha_r(t)$ は、次式で定義される。

$$\alpha_r(t) = \frac{v(t)^2}{2(x_T - x(t))} \quad \text{.....(2)}$$

この $\alpha_r(t)$ を所要減速度と呼ぶことにする。

車両の実減速度 $\alpha(t)$ が、所要減速度 $\alpha_r(t)$ より大きい場合 ($\alpha > \alpha_r$) 車両は目標位置 x_T の手前で停止することを意味し、逆に $\alpha < \alpha_r$ では、目標位置 x_T を行き過ぎること (オーバーラン) を意味する。運転士は、車両の実減速度 $\alpha(t)$ が所要減速度 $\alpha_r(t)$ に近づくようにブレーキを操作することによって、ブレーキ力を修正していると考えられる。

運転士に何らかの異常が発生し、ブレーキ力の修正が遅れたり不適切であったりする場合に実減速度 $\alpha(t)$ が所要減速度 $\alpha_r(t)$ に収束しないことが予想される。そこで、所要減速度 $\alpha_r(t)$ を横軸、実減速度 $\alpha(t)$ を縦軸にとる平面において軌跡を描くことで所要減速度 $\alpha_r(t)$ に対する実減速度 $\alpha(t)$ の変化、すなわちブレーキ修正動作の特徴を明確に示すことが出来ると考えられる。減速度軌跡の例を



Fig.3 Experiment with train simulator

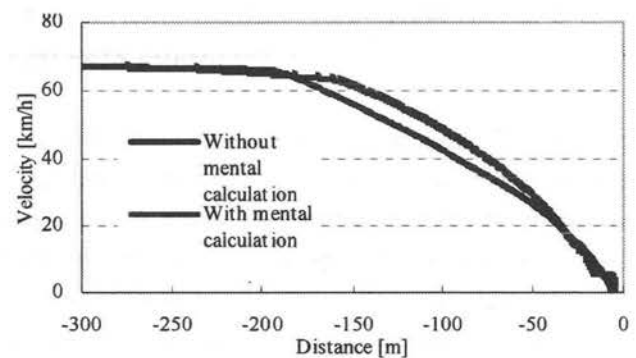


Fig.4 Change of velocity

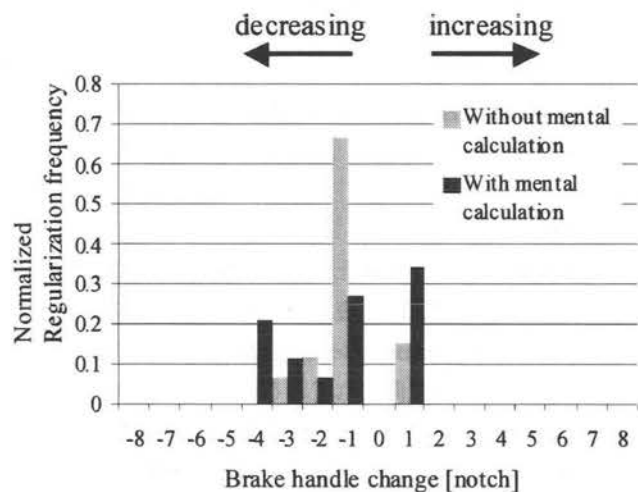


Fig.5 Histogram of brake operation variation (all trial)

図 3 に示す。軌跡は、図 3 中の□から□の順で推移することが予想される。

3. シミュレータ運転実験による検証

3.1 実験方法

実車に近い刺激を与えられるよう開発したヒューマンファクタ研究用の列車運転シミュレータ⁴⁾を用いて実験を行った。運転課題は、実路線を模擬した 4 駅間を各駅停車で運転するものとした。被験者は、出発の合図で列車を発車

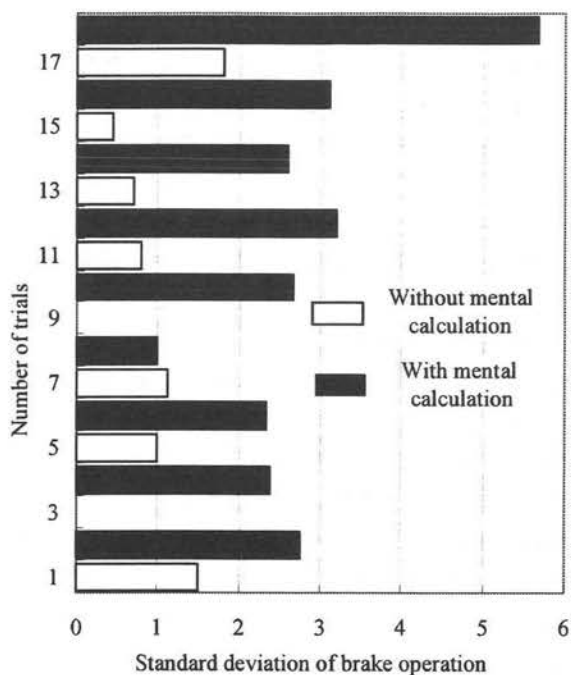


Fig.6 Dispersion of brake operation

させ、次の駅の定められた停車位置で列車を停車させる。図 1 に実験の様子を示す。副次課題には、暗算を用いた。運転と同時に暗算を行っている状態を運転士の異常状態と仮定した。暗算課題は、運転作業と直接干渉しないようにするため、問題を音声で提示し、口頭で解答するものとした。また、解答から次の問題が提示されるまでの間、無負荷の状態となることを避けるため、数字を記憶させる計算とした。

被験者は、視聴覚機能および運動機能が正常な男性 4 名で、うち 2 名は動力車操縦者運転免許を有し、実車両の運転経験がある。他の 2 名は、学生で実車両の運転経験はないが、シミュレータでの運転に十分慣熟している者とした。

3.2 実験結果

被験者 a についての駅に停車する際の速度の変化を図 4 に示す。横軸は停止目標の位置を 0 としたときの距離である。暗算なし (図 4 中 (a))、暗算あり (図 4 中 (b)) とともに停止目標の位置を超えることなく停車していることが確認できる。また、暗算ありのときは、暗算なしのときに比べ減速がスムーズに行われていないことが確認できる。

4. 異常運転の検出

4.1 ブレーキハンドル操作量からの異常検出

ブレーキハンドル操作量の大きさを把握するため、頻度分布を求めた。被験者 a の全試行の平均を求めたものを図 3 に示す。横軸は、1 回の操作における操作量を示しており、負の値がブレーキを緩めたときの操作量、正の値はブレーキを強めたときの操作量を示している。縦軸は正規化した頻度を示している。暗算なし (図 3 中 (a)) では、ブレーキを一段ずつ緩める操作の頻度が高いため操作量が -1 となる頻度が高くなっている。また、暗算なしよりも暗算ありでは、大きな操作量での頻度が大きくなっている事が

Table.1 A result of a distinction of subject

Subject	The average of ε		Error-detection (%)	Un-detection (%)
	Without mental calculation	With mental calculation		
a (Student)	0.82	2.85	0.00	11.10
b (Student)	0.46	10.02	0.00	12.50
c (License holder)	6.25	7.16	22.22	66.67
d (License holder)	1.41	2.27	11.11	88.89

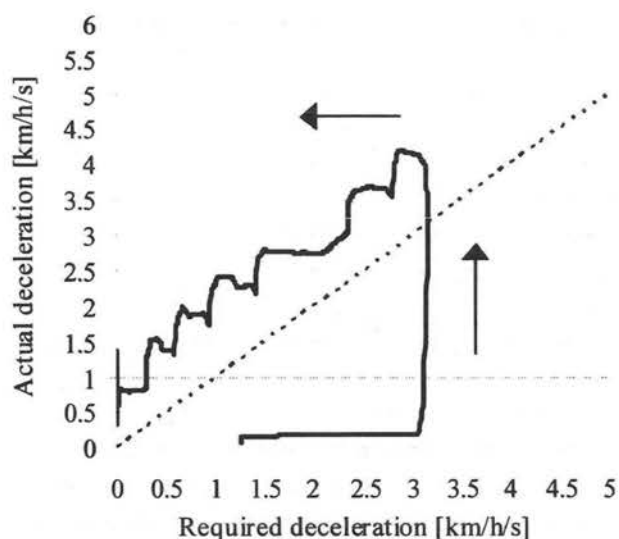
確認できる。同様の傾向は、他の被験者でも確認できた。

次に、式 (1) よりブレーキハンドル操作量の分散を求める。ここでは、平方根をとり標準偏差 ε を評価する。図 3 の場合では、暗算なしが 0.986、暗算ありが 3.79 であった。被験者 a の全試行について、1 施行ごとに求めた標準偏差 ε を図 6 に示す。横軸は、ハンドル操作量の標準偏差 ε である。全体の傾向として、暗算ありの方が高い値となっている。このことから、しきい値を設定する事で異常を判別できる可能性がある。ブレーキハンドル操作量の標準偏差 ε の正常時の平均値と標準偏差 σ から、95 パーセント値を算出すると 2.31 であった。この値をしきい値とし、標準偏差 ε がしきい値以上となる場合を異常、しきい値未満となる場合を正常として図 4 を判別すると、暗算なしを異常と判定した「誤検出」が 0 回で全体の 0%、暗算ありを正常と判定した「不検出」が 1 回で全体の 11.1% であった。

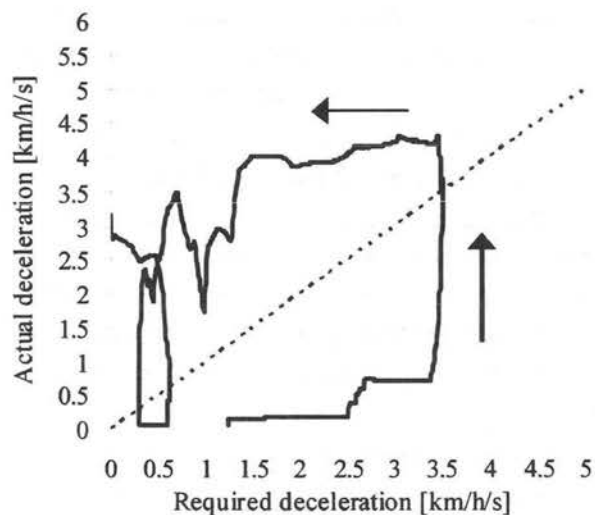
同様にして全ての被験者について求めた結果を表 1 に示す。学生被験者に比べ有資格者の 2 名では、不検出率が高く、異常状態の検出が悪い結果となった。主な原因として被験者 c, d 両名とも暗算なしと暗算ありで、標準偏差 ε の平均値の差が比較的小さいことが挙げられる。これは、暗算課題を与えられても暗算課題がないときと同じようなブレーキ操作を行っていたため、ブレーキの操作量に大きな変化がなかったことが考えられる。ここで、被験者 c は他の被験者に比べて、暗算なしのときの標準偏差 ε が大きな値となっている。これは、被験者 c が暗算課題の有無に限らず、操作量の大きなブレーキ操作を行っている事を示しており、原因としては、被験者自身の操作の癖による影響が考えられる。また、被験者 d は、暗算ありのときの標準偏差 ε の平均値が他の被験者と比べて小さい値となっており、暗算課題がブレーキ行動に及ぼす影響が他の被験者に比べて、小さかった可能性がある。本実験では、暗算課題でブレーキ行動を乱す事を行ったが、この仮定において個人差が生じるため、検出性の詳細を検討するには、異常状態の再現も含めた評価が必要と考えられる。

4.2 減速度からの異常検出

減速度軌跡を図 7 に示す。図中の矢印は、軌跡の時間的な動きを示す。停止位置目標に近づくほど所要減速度 α_r の感度が高くなり、0 から ∞ に近づくため、評価からそれ



(a) Without mental calculation



(b) With mental calculation

Fig.5 Relation between required and actual decelerations

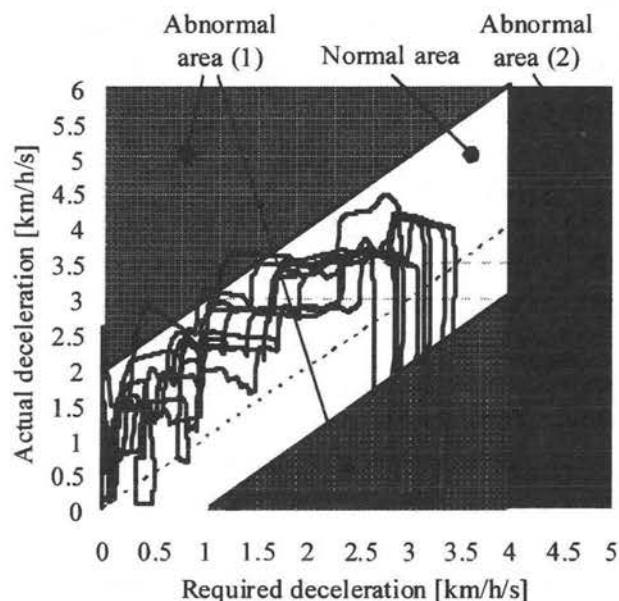


Fig.6 Example of abnormal area set up

らを除くために停止位置目標から 5m までの軌跡を示している。暗算なし (図 7 中 (a)) では、ブレーキをかけてから階段緩めを行っているため、減速度 α が立ち上がった後に原点に向かっていることが確認できる。

一方、暗算あり (図 7 中 (b)) では、ブレーキ修正量が必要以上に大きいため、反時計回りに円を描いている。このような特徴的な軌跡を評価する事により、異常な運転を判別できる可能性がある。

図 8 は、被験者 a の暗算なしにおける全試行の軌跡である。ある程度の決まったパターンの軌跡を描いている事が確認できる。このことから、異常判別の方法として、正常時における個人の標準パターンからの偏差を評価することで、定量的な評価が行える可能性がある。また、正常時に軌跡が推移しない領域を異常領域 (1) として設定し、例えば、正常領域から異常領域へ侵入した場合に、異常と判定することが考えられる。異常領域 (2) は、車両の最大減速度を 4 [km/h/s] としたとき、オーバーランが決定する領域を示し、顕在化したリスクを表す領域である。このことは、本方法が、潜在的なリスクだけでなく、顕在化したリスクも検出が可能であることを示している。

5. まとめ

運転士の異常を運転操作から検出する方法を検討した。駅停車時のブレーキ操作に着目し、ブレーキハンドル操作量と減速度から運転異常を早期に発見する 2 つの方法を提案した。また、シミュレータを用いた実験を行い、暗算による副次課題を課した場合とそうでない場合を比較した。ブレーキハンドル操作量の分散は、副次課題がある場合に有意に大きく、個人の運転の特徴を捉える事が出来る可能性があることを示した。また、減速度軌では副次課題がある場合に軌跡が特徴的な軌跡となった。これを評価する事で、異常な運転を判別できる可能性がある。

今後は、個人の標準パターンからの偏差などの定量的な評価方法の検討を行う。

参 考 文 献

- 1) 吉永, 水間, 工藤, 伊藤, 竹内, 菊池: 運転操作状況の車上モニタリング装置の検討, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL) 講演論文集, p. 405-408, 2007.
- 2) 小島, 綱島, 伊藤, 塩沢: 機能的近赤外分光法 (fNIRS) 装置を用いた列車運転時の高次脳機能計測, 人間工学, vol. 43, No. 4, 2007.
- 3) Marumo, Y. Tsunashima, H. Ymazaki, Y. and Kojima, T. :Evaluation of braking behaviour for train drivers using phase-plane trajectories, Vehicle system dynamics, Vol. 46, supplement, pp. 729-735. 2008.
- 4) 綱島, 小島, 塩沢, 高田: 人間・機械評価用列車運転シミュレータの開発と脳機能計測への適用, 信頼性, Vol. 26, No. 7, p. 617-626, 2004.