

通勤列車における立位客の安全性評価

人間科学研究部 人間工学
主任研究員 大野央人

1. はじめに

我が国では65歳以上の高齢者が総人口に占める割合（高齢化率）が2005年に20%を超え、2015年には25%、2040年には34%に達すると予測されている。そうした見通しを背景に、鉄道分野においてもバリアフリー化をはじめとする安全への取り組みが活発化しているが、鉄道の安全への取り組みにおいては車両の揺れは重要な要素のひとつである。列車内の乗客は車両の揺れによって大小様々の影響を受け、特に立位客では身体のバランスを失ってふらついたり転倒したりする可能性も否定できないからである。通勤列車は立位客の占める割合が高くしかも混雑しているため、乗客がふらついたり転倒したりするリスクを正しく評価して振動管理に反映させる必要が高い。そこで、本研究は通勤列車における立位客の安全性評価に関して検討した。なお、本研究でいう「安全性」とはあくまで列車の通常運転の範囲で生じる事象を指し、非常時（衝突事故など）の事象は含まない。

2. 通勤列車の立位客の安全性に関する実態調査

通勤列車内の立位客の安全性の実態を示す客観的データは見当たらない。そこで、その実態を明らかにするため、大都市圏における通勤列車の利用客を対象にして、アンケートによる実態調査を行った。

調査の結果、利用者の約9割がふらつきを経験し、約7割が圧迫などによる身体的苦痛を経験していることが明らかになった（図1）。また、ふらつきや身体的苦痛の経験は普段乗車する列車の混雑度と関連がみられ、混雑度が高いほど経験の割合が高かった（図1）。つまり、通勤列車の利用者の多くは安全性に影響するような事象を経験しており、それは確実に車内混雑と関連していることがわかる。

次に、ふらつきや身体的苦痛の経験を列車の振動種別との関連で分析したところ、それらを経験したのは加減速時が突出して多く、分岐器通過時、曲線通過時なども多かった（図2）。したがって、通勤列車の振動管理においては分岐器通過時、曲線通過時、加減速時等などが重要であると考えられる。

また、この調査から、通勤列車内でふらつきや身体的苦痛が生じやすい理由は車内設備（吊り手、手すり）

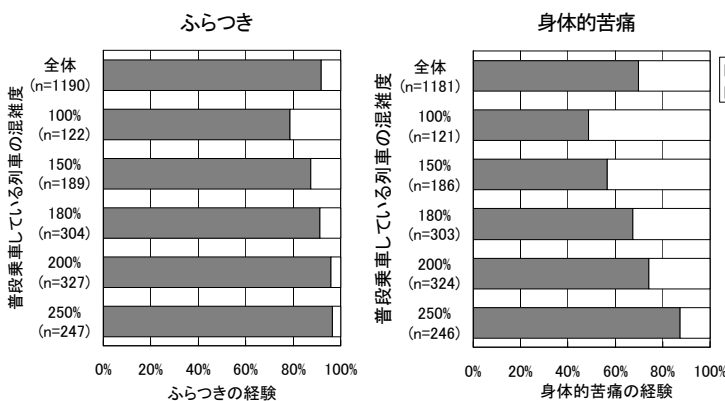


図1 通勤列車内におけるふらつきや身体的苦痛の経験

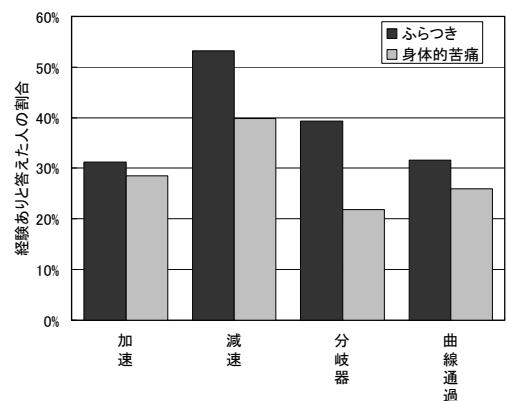


図2 ふらつきや身体的苦痛を生じた場面

を掴めないこと、他の客に押されること、足を自由に踏み出せないこと等が多いことも明らかになった。

通勤列車内のこうした実態を踏まえ、本研究では、振動管理面とそれ以外の両面から検討を行った(図3)。すなわち、振動管理面では分岐器通過時、曲線通過時、加減速時の3種類の運行場面について検討し、振動以外の面では車内混雑の影響、高齢者への対応、車内設備による支援効果について検討した。

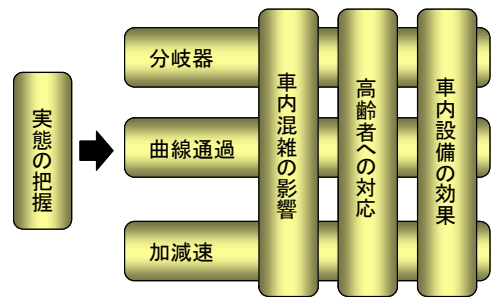


図3 研究の構成

3. 通勤列車にみられる振動の安全性評価

通勤列車内で立位客がふらつきや身体的苦痛を生じるそもそもの原因は、列車の振動によって身体のバランスを失う人がいることである。バランスを失う人がたとえ一部だとしても、混雑している場合にはそれが他客に波及する場合もある。一般に我々は身体のバランスが低下した際、足を踏み出したり支持物に掴まったりしてバランスの維持や回復を図るが、混雑した車内では吊り手や手すりに掴まれず、足を踏み出すことも出来ないといった状況もあり得る。そこで本研究では「支持物が無い場合に足を踏み出してしまう人の割合(姿勢を保持できない割合)」によって安全性への影響度を定量化した。

3.1 分岐器通過時における立位客の安全性評価

分岐器通過時には車両の左右方向に著大な振動が生じ、その振動には遠心力によって生じる成分(遠心成分)と軌道と車輪とが衝撃的に当たることで生じる過渡応答の成分(衝動成分)が混合している。こうした振動を室内試験装置で発生させて体感試験を行った。

検討の結果、遠心成分と衝動成分の双方が安全性に影響することを確認するとともに、両成分を用いて分岐器通過時における立位客の安全性を推定する方法を示した(図4)。限界ラインの下側が安全が保たれる領域であり、図中の点線は遠心成分と衝動成分の和(すなわち振動ピーク値)が等しい点を示す。この図から、振動ピーク値が同じであっても遠心成分と衝動成分の割合によって安全性評価への影響が異なること、つまり安全性への影響は衝動成分の方が相対的に大きいことがわかる。

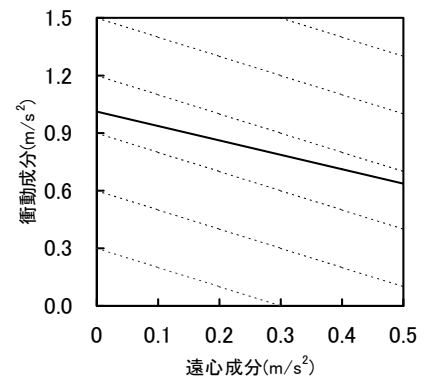


図4 分岐器通過時の安全性の限界ライン

3.2 曲線通過時における立位客の安全性評価

曲線通過時に発生する遠心力(左右定常加速度)は乗客に影響し、この強さが $0.78\text{m/s}^2 (=0.08\text{g})$ を超えると乗り心地が低下することが既往の研究で示されている¹⁾。本研究では左右定常加速度が立位客の安全性に及ぼす影響を室内試験と実車試験のデータから検討した。

その結果、通勤列車の安全性として許容できないとの判断が全体の5%を超えるのは姿勢を保持できない割合が60%となるレベルであり、それに対応する左右定常加速度は従来の乗り心地目安値($=0.78\text{m/s}^2$)とほぼ同等レベルであることを確認した(図5)。但し、今回の検討では曲線区間と直線区間との推移部(緩和曲線区間)における左右定常加速度の変化率については扱っていない。後述する加減速時の安全性評価に関する知見から考えれば、左右

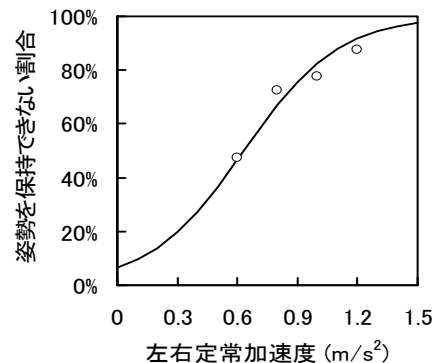


図5 左右定常加速度と姿勢を保持できない割合の関係

定常加速度の変化率を小さく抑えることで左右定常加速度の許容限界を拡大できる可能性は残っている。

3.3 加減速時における立位客の安全性評価

加速時と減速時に生じる振動は作用方向が逆であるが、波形や強度の面では似通っているため、本研究では減速時（制動時）に絞って検討した。制動時に生じる減速度の変化は緩やかであるため、減速度に加えてその変化率（ジャーク）も乗客に影響することが先行研究によって示されている^{2) 3)}。本研究では過去に実施した実車試験のデータを分析した結果、減速度とジャークがともに立位客の安全性に影響することを確認した（図6）。このことから、加減速時の安全性は前後方向の加速度（減速度）とジャークの2変量で推定でき、ジャークを低く抑えれば加減速度の許容限界を拡げることが出来ると考えられる。

4. 振動以外の要因を考慮した評価

4.1 車内混雑の影響

混雑した車内で乗客が受ける影響については既往に生理的疲労の観点で検討された例こそあるものの⁴⁾、安全性の観点から検討された例は見当たらない。本研究では混雑度を100%~250%の範囲で3段階（100%、150%、250%）に変化させた場合に、立位客が姿勢を保持できない割合がどのように変化するかを検討した。

検討の結果、混雑度が高くなると乗客への振動の影響も大きくなる傾向を確認した。特に目立った影響が見られたのは混雑度250%の場合であり、混雑度100%の場合と比較して明確な差が見られた（図6、図7）。その差とは、混雑度250%になるとジャークが小さくても姿勢を保持できない割合が高くなるということであり、これは身体の動きが制約されるため、適正な身体バランス維持動作が行えないことを反映していると考えられる。

4.2 高齢者への対応

我が国は高齢者の就業割合が諸外国に比べて高いため、人口が高齢化すると通勤列車内に高齢者が増えると思われ。そこで、本研究では、会社の定年年齢（現在は60歳）が将来的に65歳あるいは70歳まで引き上げられる状況を想定し、60~69歳の高齢者と20~59歳の非高齢者において振動に対するバランス維持力がどのように相違するのかを比較した。ただ、振動の種類によって年齢差の表れ方が異なる可能性が考えられたため、立ち上がりが急な振動（分岐器振動など）と緩やかな振動（曲線通過や減速など）を用いて検討を行った。その結果、高齢者は振動に対する身体バランス維持力が低下することを確認したが、その低下の仕方は立ち上がりが急な振動より立ち上がりが緩やかな振動において顕著であった（図8）。その理由はまだ明確ではないが、立ちあがり緩やかな振動では被験者の姿勢調節能力の差が結果に反映された一方、立ち上がりが急な振動は人間の姿勢調節能力の範囲を超えていたため、被験者の姿勢調節能力の差が反映される余地が少なかったという可能性が考えられる。

4.3 車内設備の効果

通勤列車内の安全性を向上させるためには、振動管理に加え、車内設備の面からも対策を講じるのが望ましい。振動環境下で立位姿勢を維持する際の身体負担は手すりや吊り手などの支持具があると飛躍的に軽減

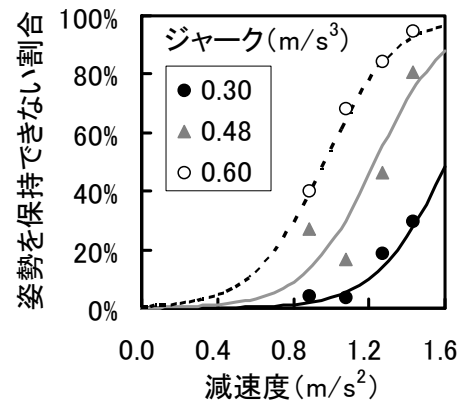


図6 減速度、ジャークと姿勢を保持できない割合の関係（混雑度100%の場合）

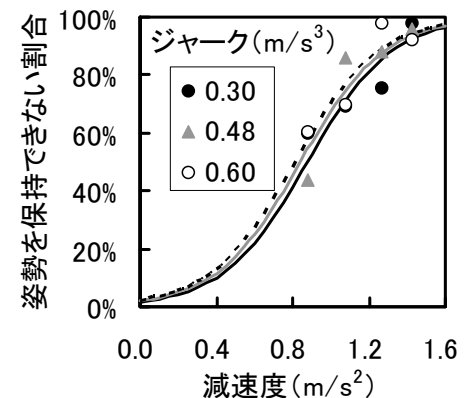


図7 減速度、ジャークと姿勢を保持できない割合の関係（混雑度250%の場合）

され、その軽減効果は手すりと吊り手でほぼ同程度である(図9)。しかし、前述の実態調査では、通勤列車内でふらつきや身体的苦痛を生じやすい理由として、「吊り手・手すりを掴めないから」との回答が多く見られた。そのため、通勤列車の旅客安全を向上させるためには、混雑している状況でもつかまれるだけの個数や寸法を満たす支持具を設置することが1つの方策であると考えられる。

5. まとめ

(1) 通勤列車の振動と立位客の安全性の関係について検討し、

以下の点を明らかにした。

- ・立位客がふらついたり身体的苦痛を感じたりするのは加減速時、分岐器通過時、曲線通過時などが多い。
- ・姿勢を保持できない割合によって立位客の安全性を評価した場合、分岐器通過時の安全性は左右振動の遠心成分と衝動成分の2変量を用いて評価でき、遠心成分と衝動成分の和(すなわちピーク値)が同じであれば、衝動成分の比率を小さく抑える方が安全性評価への影響は小さい。
- ・曲線通過時の左右定常加速度に対する立位客の安全性は従来の乗り心地目安値 $0.78\text{m/s}^2 (=0.08\text{g})$ とほぼ同等レベルの許容限界となる。
- ・加減速時の立位客の安全性は前後方向の加速度とジャークの2変量で推定できる。そしてジャークを低く抑えれば加速度(もしくは減速度)の許容限界を拡大可能である。

(2) 振動以外の要因として、以下の点を明らかにした。

- ・混雑した状況下では身体の動きが制約されるため適正な身体バランス維持動作が行えず、振動の影響が助長される。
- ・高齢者では振動に対する身体バランス維持力が低下し、その影響は立ち上がりが緩やかな振動(曲線通過時の左右定常加速度など)において顕著となる。
- ・吊り手や手すりがあると振動に対する身体バランス維持の負担は飛躍的に軽減されるため、吊り手や手すりは安全性を向上させるための方策として期待できる。

参考文献

- 1) 鈴木浩明：鉄道車両の振動乗り心地に関する人間科学的研究，鉄道総研報告，特別号第24号，1998
- 2) 白戸宏明他：列車減速度の適正レベルに関する検討，鉄道総研報告，Vol. 8，No. 12，1994.
- 3) 小美濃幸司他：乗り心地に配慮したブレーキパターン，人間工学，Vol. 42，No. 3，2006
- 4) 池田守利：通勤時間と電車の混雑度による通勤者の生理反応，車両と電気，Vol. 39，No. 4，1988.

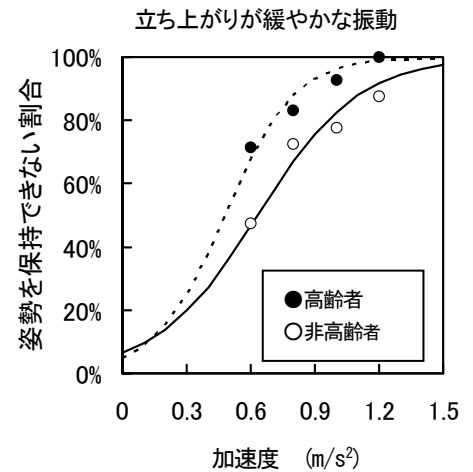
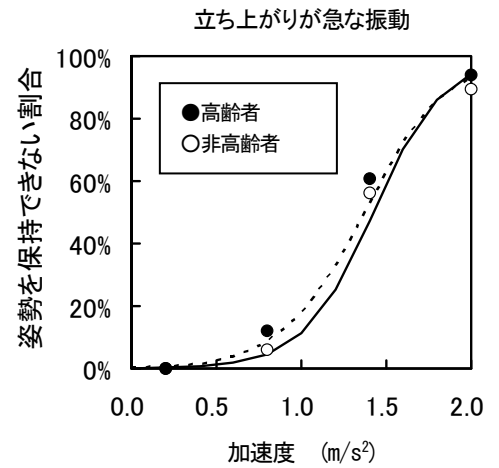


図8 高齢者と非高齢者における姿勢を保持できない割合(上:立ち上がりが急な振動,下:立ち上がりが緩やかな振動)

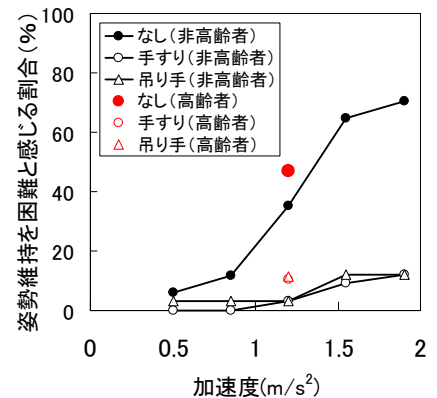


図9 吊り手・手すりの有無と姿勢維持を困難と感じる割合