

鉄道サービスにおけるストレス軽減効果の検証

本研究では、人間の心拍変動から読み取れるストレスに着目し、RRI データを用いて鉄道サービスにおけるストレス軽減効果を定量的に評価した。ストレス軽減効果を期待する施策として、女性専用車両の乗車時とノイズキャンセリングシステムの使用時の2つを評価対象として研究を進めた。ストレスの定量的評価手法には、RRIの中央値を用いたストレス総量の算出とローレンツプロット面積法を用いたストレスの変動特性についての検討を行った。その結果、女性専用車両とノイズキャンセリングシステム使用時のストレス軽減効果について、生体が被るストレス総量や強度の観点より定量的に推定することができた。

キーワード | **ストレス, RRI, 心拍変動, ローレンツプロット, 女性専用車両, ノイズキャンセリングシステム**

石田真二
ISHIDA, Shinji

博(工) 北海道工業大学空間創造学部都市環境学科准教授

武田 超
TAKEDA, Wataru

修(工) SMBC コンサルティング株式会社上席推進役

白川龍生
SHIRAKAWA, Tatsuo

博(工) 北見工業大学工学部社会環境工学科准教授

鹿島 茂
KASHIMA, Shigeru

工博 中央大学理工学部都市環境学科教授

1—はじめに

わが国では、近年、環境負荷の軽減を目的とした公共交通機関の見直しが推奨されている。例えば、路線バスの高度道路交通システム(ITS)を用いた高機能・円滑化、次世代路面電車(LRT)への車両更新・地上設備改良、鉄道車両の質の改善、内装・外装・原動機・ブレーキなどの改善や振り子式車両・軌間可変電車の導入などが挙げられる。特に鉄道車両の質の改善に関しては、既存路線の高速化や鉄道サービス全般の質の向上が急務とされている。

しかし、鉄道サービスの質の向上を目的とした施策の効果については、定量的に検証されている例は少ない。また、鉄道をより快適に利用するために利用者自身が行える対策に関する効果の検証についても、ほとんど見受けられない。何れの施策や対策においても、効果の一つとしては、利用者のストレスの軽減が挙げられ、それを定量的に立証することが鉄道サービスの質の向上に向けた一助になると考える。

ストレスに対応する人間の適応プロセスは、環境中の刺激因子(例えば混雑)からの刺激を受けると、大脳中枢において刺激の大きさや自分の適応能力について評価し、有害と判断すると生体内において刺激因子に対して適応が生じ、否定的な情動反応や様々な生理的反応を示すこととされている¹⁾。

ストレス計測に関する研究は、心拍変動をはじめとして、脈波、脳波、唾液、発汗、皮膚温など多様な計測方法がある²⁾。近年、自律神経の変動は、心拍変動による指標を用いて、簡便かつ高精度に計測が可能となってきている³⁾。また、心拍変動は種々の精神的ストレスの指標となることが知られており、ストレスの負荷が強くなるに従ってRRI(R-R interval)が短縮することが報告されている⁴⁾⁻⁶⁾。このような特徴を読み取り、心拍変動を解析し、ストレス指標の有用性を分析している研究が多くの分野において成果を挙げている⁷⁾⁻¹²⁾。

著者らは、先行研究において多様な環境有害因子の影響を受けるものと想定される首都圏の混雑時における電車(急行乗車と各停乗車の相違)の通勤ストレスを定量的に計測する手法を提示し、その有効性について検証を行っている¹³⁾。その結果、ストレスの平均的な強度を表す①RRIの中央値(RRI_M)は、低い値ほどストレス強度が高いこと示し、電車の「混雑」など特定のストレスへの持続的な暴露による生体への影響を時系列に分析する場合に適した指標であること。また、②乗車を通じて被る通勤ストレスの総量は、平常時における負荷のない状態の RRI_M (ベースライン)と乗車時における RRI_M との乖離幅を乗車時間/区間全体に亘った累積値(TSV)を用いて評価できること。この両指標の有用性を論じている。

これまでの成果を踏まえ、本研究の目的は、人間の心拍変動から読み取れるストレスに着目し、自律神経指標を

用いて鉄道サービスの利用(受動的施策)や利用者自身が行える対策(能動的施策)を実行した場合のストレス軽減効果を以下に示す3つの指標を用いて検証していくことである。

本研究では、先行研究において指標として用いられていたストレスの平均的な強度(①RRI_M)や通勤ストレスの総量を示す指標(②TSV)の妥当性および、有効性を再確認する。また、先行研究では1つのストレスから受けるストレスのばらつきについては検討していない。これまでは、強いストレスを受けた場合は、RRIのばらつきが小さくなると報告されている¹⁴⁾。ただし、最近の交通分野における研究事例においては、逆の例も報告されている¹⁵⁾。そこで、本研究では、新たにローレンツプロット面積法で得られる指標(③LP面積)を加え、RRIのばらつきや変動特性について、上記の2つの指標との関係性を含め、検討をおこなう。

2——研究の流れ

本研究では、車内環境の心理的状況の違いと車内騒音をストレスとして仮定し、両者のストレス軽減対策を受動的施策と能動的施策に2分して遂行した。

受動的施策としては、車内環境の心理的状況の変化に着目し、鉄道サービスにおける女性専用車両の導入対策を評価対象とした。これは、混雑時の車両内に男性乗客が近接して存在した場合を女性乗客のストレスと仮定している。また、車内騒音もストレスとなることは自明であり、騒音の低減がストレスに与える影響についても着目した。そこで、周囲の騒音をカットするノイズキャンセリングヘッドホンを利用した対策を評価対象とした。ただし、ここではノイズキャンセリングシステムを推奨する見地ではなく、車内騒音を低減した場合(鉄道車両の設備改善を含めた見地)のストレス軽減効果を解明することが目的である。

受動的施策では、混雑時(乗車率150~230%)における女性専用車両と普通車両の乗車時(立ち乗り時)の心電図を計測する。能動的施策では、非混雑時(乗車率100%未満)におけるノイズキャンセリングシステムを使用時(着席時・立ち乗り時)と通常時(着席時・立ち乗り時)において、心電図を計測する(表—1参照)。

次に、心電図を活用したストレス指標の検討を実施し、先行研究で用いられたRRI_Mによる平均的なストレス強度の算出とTSV(平常時のRRI_Mとの乖離幅の累積値)によるストレス総量の算出を行う¹³⁾。同時にローレンツプロット面積法によるLP面積の算出を行い、受動的施策と能動的施策のストレス軽減効果を定量的に評価する。また、計

■表—1 計測メニューと条件

施策	車内状況	体位	乗車車両	騒音	計測回数
受動的	混雑時	立ち乗り時	女性専用車両	有	2
			普通車両	有	3
能動的	非混雑時	着席時	普通車両	無	3
			普通車両	有	3
		立ち乗り時	普通車両	無	2
			普通車両	有	3

※騒音の有無は、ノイズキャンセリングシステムの使用により、設定した。

測メニューの条件から、普通車両の乗車時において、①立ち乗り時における混雑時と非混雑時の比較、②通常の立ち乗り時と着席時の比較(騒音有)、③ノイズキャンセリングシステムを使用した場合の立ち乗り時と着席時の比較(騒音無)の検証を実施する。

その後、得られた3つの指標の特性を明確にするために各指標の関係性を整理する。

3——ストレス指標の検討

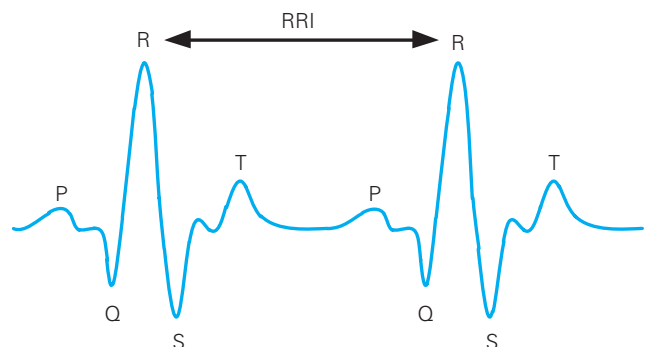
3.1 心拍変動(HRV)

循環機能は、交感神経と副交感神経の相互作用を通して調節されている。この作用は対照的な現象であり、呼吸により調節される。この呼吸に伴って生じる周期性変化を心拍変動(heart rate variability: HRV)と呼ぶ⁵⁾。

心拍変動は、心拍の1拍ごとの変動を瞬時に測定することにより心臓の自律神経緊張の指標となる。人間の心拍変動は、運動状態に依存するが自律神経の活動も心拍変動に影響を与えることが知られており、心電図波形を用いて、身体的・精神的な疲労度や各種心疾患の判定に用いられている。

3.2 RRI(R-R間隔)の変動

通常、心電図は心筋が縮小するときの一連の電気信号の流れ、P、Q、R、S、Tと名付けられた心電図成分で構成されている(図—1参照)。この内、R波は血液を左心室から大動脈に送り出すときに生じ、R波とR波の間隔はRRIと呼ばれている。RRIは常に一定ではなく、体位やストレ



■図—1 心電図の成分

スなどの影響を受けて変動するため、心電図波形において振幅の大きいRRIの変動を用いて、疲労度やストレスを定量的に評価することが可能である。

RRIは、一般的に身体的・精神的ストレスを受けると低下する傾向を示す。また、一定量の強いストレスを安定的に受けるとRRIは低い領域で推移し、ストレス強度が変化するとRRIの変動も大きく変動して推移する。

3.3 心電図の計測機器

鉄道車内で心電図波形を測定するにあたり、混雑車内で測定するために必要な測定機器は、携帯性や簡易性と長時間測定が可能であることが条件となる。そこで、体表面心電図の計測に小型・軽量であり、被験者への侵襲性が低い、ホルター心電計(GMS製アクティブトレーサーAC-301A)を用いて測定を実施した。ホルター心電計で得られるRRIデータは、200~4,096msにおいて、1kHzのデータとして得られる^{注1)}。

3.4 RRIの中央値を用いたストレス総量の推定

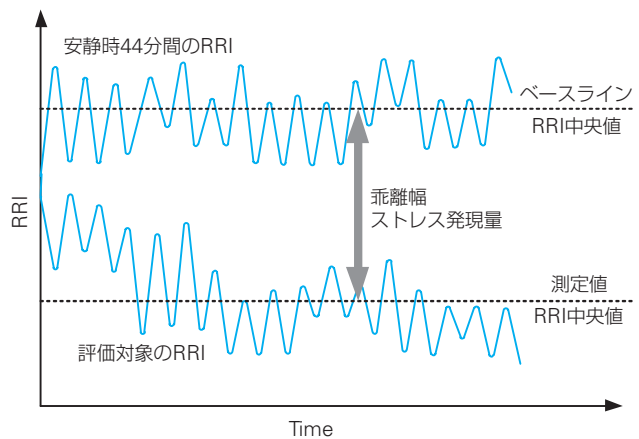
外的ストレスが作用するとストレスの負荷レベルに合わせてRRIは短縮する。しかし、RRIは一様の変動ではなく、年齢や食事、体勢などにより、個人差が生じ、日周期においても夜間は大きく、昼間は小さくなり、異なる変動が生じる^{注2)}。そのため、健康者の心拍変動に関するすべての指標の包括的な検討はされておらず、これらを基準化あるいは、標準化することは現段階では困難である。

本研究では、RRIを測定する区間を統一し、個人差によるデータの分散を防ぐために、試行的に同一被験者1名(20代:女性)において、複数回の測定を実施した。

測定したRRIデータは、各種のエラー値やノイズが含まれることを想定し、算術平均に比べ特異点の影響を受けにくい中央値(RRI_M)を用いてストレスの平均的な強度を表す指標とした。

図-2は、ストレス総量の概念を示したものである。本研究で定義するストレス総量とは、先行研究におけるストレス総量(TSV)と同義であり、単位時間当たりのRRI_Mとベースラインとの乖離幅(ストレス発現量)の時間積分値である¹³⁾。ベースラインで使用する値は、測定時刻に合わせて午後の時間帯における安静時の44分間(乗車時間と同値程度)のRRIデータの中央値(1,139ms)を用いた。

なお、K-S検定によりRRIデータに係る正規性仮説が棄却されたことから、RRI_Mの統計的検証には、特定の分布を仮定しないWilcoxonの順位検定(有意差の判定基準:P<0.01)により実施した。



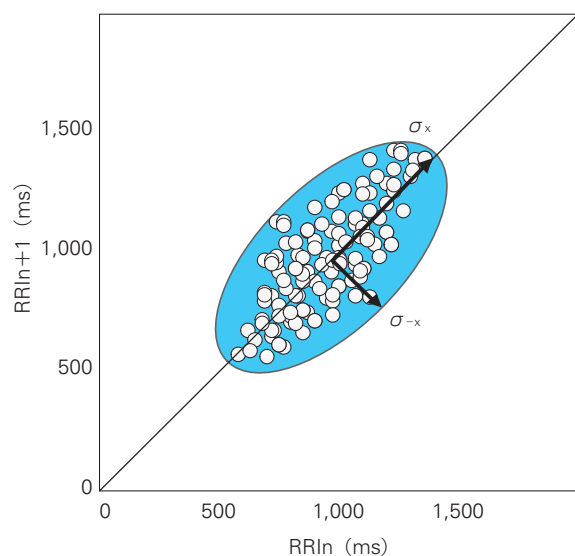
■図-2 ストレス発現量の概念

3.5 ローレンツプロット面積法によるRRIの変動特性

RRIのローレンツプロット(以後、LP)とは、視覚的にRRIの変動を捉えやすい特徴を有しており、図-3に示すように横軸にn番目のRRI、縦軸にn+1番目のRRIをグラフ上にプロットしたものである¹⁴⁾。その評価方法としては、LPされた全ての点をy=x軸とy=-x軸に投影し、投影後、y=x軸において原点からの距離の標準偏差を σ_x 、y=-x軸において原点からの距離の標準偏差を σ_{-x} とし、LPの分布を楕円として捉え、次式(1)により、その面積S(LP面積)を求める。

$$S = \pi \times \sigma_x \times \sigma_{-x} \quad (1)$$

ここで求められたSからは、その大小により、RRIの変動域やストレスの強弱に伴うRRIのばらつきが確認でき、図示することにより、視覚的にストレスの特徴が把握できる。面積の小さい分布では、一定量のストレスを安定的に受け続けている状態を示し、大きい場合はRRIが分散しており、安静時に近い状態を示す。

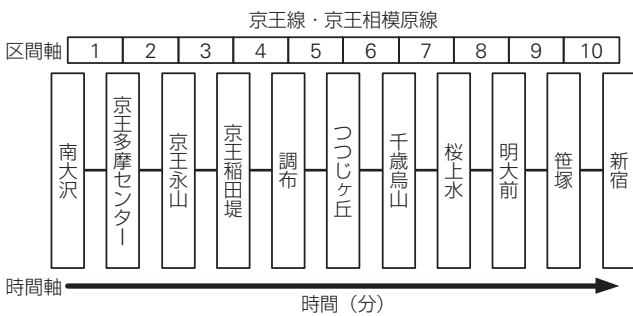


■図-3 ローレンツプロット面積法の概念

4—RRIの測定調査の概要

本研究では、女性専用車両が導入されている京王電鉄の京王線・京王相模原線において測定を実施した。測定区間は、図一4に示す南大沢駅から新宿駅(途中、笹塚駅にて乗り換え)までの区間とした。得られたRRIデータは、駅間の特徴を探るための区間軸と時間的経過の特徴を探るための乗車時間を表す時間軸に分類し、分析を行った。

受動的施策(女性専用車両)の乗車車両は、女性専用車両が設けられている10号車の中央付近とし、普通車両は6号車の中央付近とした。また、能動的施策(ノイズキャンセリングシステム)においては、普通車両の6号車の中央付近に乗り換えた。表一2に調査日時を示す。



■図一4 調査対象の鉄道路線

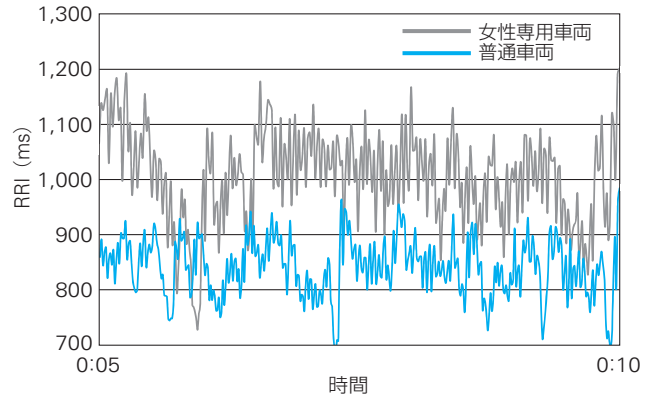
■表一2 調査スケジュールと調査回数

受動的施策(女性専用車両と普通車両)			
調査日	南大沢発	乗車時間	受動的施策
2007/7/23	8:05	57分	普通車両
2007/7/25	8:05	54分	女性専用車両
2007/9/21	7:45	51分	女性専用車両
2007/9/26	7:45	54分	普通車両
2007/9/28	7:45	51分	普通車両
能動的施策: 着席時(ノイズキャンセリングシステム)			
調査日	南大沢発	乗車時間	能動的施策
2007/11/19	15:39	42分	ノイズキャンセル
2007/11/22	15:39	42分	なし
2007/11/30	16:19	41分	なし
2007/12/11	15:19	40分	ノイズキャンセル
2007/12/13	11:39	40分	なし
2007/12/18	14:59	39分	ノイズキャンセル
能動的施策: 立ち乗り時(ノイズキャンセリングシステム)			
調査日	南大沢発	乗車時間	能動的施策
2008/1/9	16:19	40分	ノイズキャンセル
2008/1/10	12:39	40分	なし
2008/1/18	12:59	40分	なし
2008/1/21	13:39	40分	ノイズキャンセル
2008/1/22	15:39	40分	なし

5—受動的施策のストレス軽減効果の検証(女性専用車両)

5.1 RRIの変動特性

図一5は、RRIの変動の特徴を把握するために一例とし



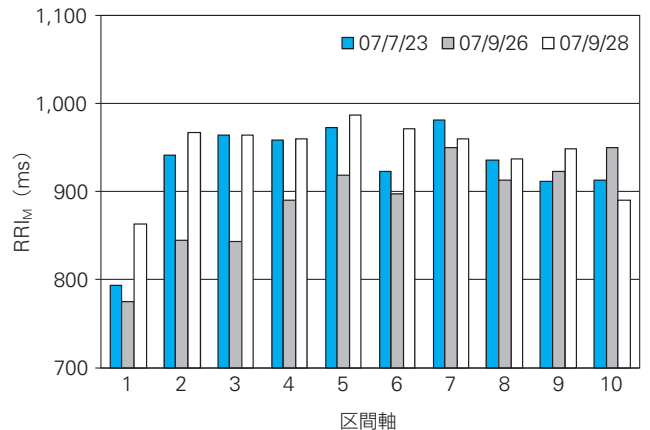
■図一5 RRIの変動(女性専用車両と普通車両)

て、7/25に測定した女性専用車両の5分間のRRIの変動と9/26に測定した普通車両の同一の時間帯のRRIの変動を抜粋して表したものである。RRIは小刻みに変動をしており、両者を比較すると女性専用車両の乗車時の方が常に高い値で推移している。これは、他の日にちのデータにおいても同様の傾向を示した。

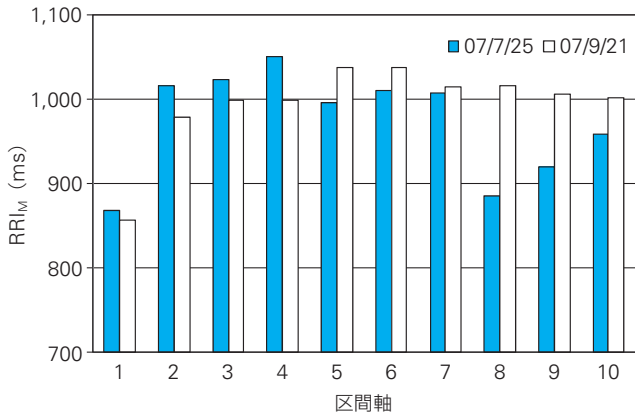
5.2 RRI_Mによるストレス値の比較(区間軸と時間軸)

図一6は、調査日別の普通車両の乗車時において、RRI_Mを区間毎に算出した結果を表したものである。RRI_Mは、区間毎に顕著な特徴は認められなかった。しかし、区間1は他の区間より低い値であり、区間4から測定日による差が小さくなる傾向を示した。これは、乗車直後から時間経過とともに車内空間に被験者が慣れ始めたことが要因として考えられる。また、すべてのRRI_Mは、1,000ms以下で推移していることがわかる。

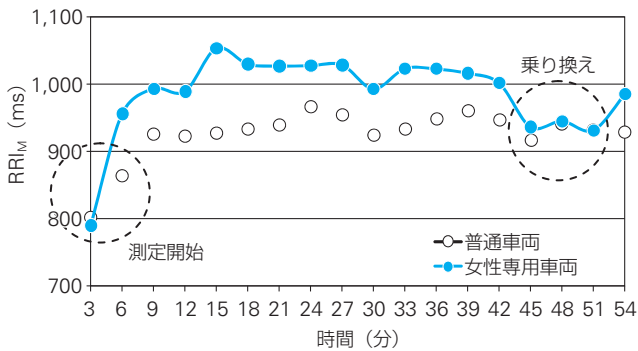
図一7は、調査日別の女性専用車両の乗車時において、RRI_Mを区間毎に算出した結果を表したものである。普通車両と同様に区間1は他の区間より低い値となった。区間8~10では、調査日による差が大きくなる傾向を示した。また、図一6に比べ、RRI_Mが1,000msを超える空間が多く存在することがわかった。



■図一6 普通車両のRRI_M(区間軸)



■図-7 女性専用車両のRRI_M(区間軸)



■図-8 RRI_Mの平均値の推移(時間軸)

区間軸における女性専用車両と普通車両のRRI_Mの統計的検証(有意差の判定基準:P<0.01)では、両者に有意差が認められた。

図-8は、調査対象路線を時間軸に分類して、女性専用車両と普通車両の3分間毎のRRI_Mの平均値の推移を表したものである。全体的に普通車両のRRI_Mが女性専用車両よりも低い傾向を示した。また、乗車時に両者ともRRI_Mが低い値を示した。この傾向は区間軸と同様に測定開始時に計器を装着して乗車することにより被験者が受ける緊張や乗車に伴う運動が影響したと考えられる。また、45~51分でRRI_Mが大きく低下している。これは、乗り換えに伴い、乗車車両の移動という運動により心拍数が上昇したことが要因であると推測できる。

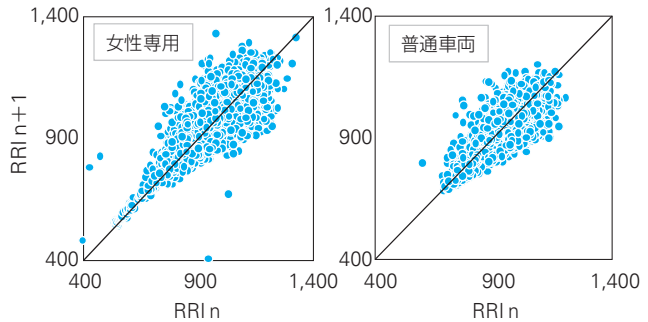
5.3 女性専用車両のストレス軽減効果

表-3に女性専用車両と普通車両の乗車時において算出した3つのストレス指標の一覧を示す。RRI_Mは、女性専用車両においてすべて高い値を示した。これは、被験者が女性専用車両を利用することでストレスが弱化したことを示している。

TSVは、普通車両が女性専用車両より、すべて高い値を示した。普通車両のTSVの平均値は2,168msとなり、女性専用車両では1,542msとなった。よって、女性専用車両では、626msのTSVの減少が認められた。

■表-3 ストレス指標一覧(女性専用車両)

状態	調査日	受動的施策	RRI _M (ms)	TSV (ms)	LP (ms ²)
立乗	7/25	女性専用車両	981	1,648	33,843
	9/21	女性専用車両	1,001	1,435	31,658
	7/23	普通車両	940	2,089	22,607
	9/26	普通車両	882	2,480	19,314
	9/28	普通車両	944	1,936	17,908



■図-9 LP面積の分布(女性専用,普通車両)

LP面積は、普通車両が小さくなる結果となった。図-9は、7月に計測した女性専用車両と普通車両のLPの分布を示したものである。女性専用車両と比較して、普通車両のLP面積が小さいことが視覚的に把握できる。また、 σ_x 方向の広がり、普通車両の方が狭い分布を呈しており、RRIの変動域が小さくなっていることがわかる。一方、 σ_{-x} 方向の広がり、両者に明確な差異は認められない。したがって、RRIの変動域の大きさから、普通車両では女性専用車両と比較して、一定量のストレスを安定的に受けている状態を反映していると考えられる。

よって、すべての指標の結果から考察すると女性専用車両は、普通車両に比べ、被るストレス強度は弱く、ストレス総量も減少する傾向を示した。また、LP面積の分布が、両車両の被るストレスの状態を視覚的に反映していることが確認できた。

6——能動的施策のストレス軽減効果の検証(ノイズキャンセリングシステム)

6.1 ノイズキャンセリングシステム(車内騒音軽減策)

能動的施策では、ストレスの1つである車内騒音に着目した。日常生活において、騒音は物理的・化学的ストレスの要因の一つであり、鉄道の車内騒音もストレスであることは自明である。ここでは、ノイズキャンセリングヘッドホンの使用により、車内騒音を低減させた場合のストレス軽減効果について検証した。

ノイズキャンセリングシステム^{注3)}とは、ヘッドホンに内蔵されたマイクで検出した環境騒音から、逆位相のノイズキャンセリング信号を作り出し、出力することにより環境騒音を低減させるシステムである。近年では、航空機や列車、

コンピュータ騒音に囲まれたオフィス内、人混みなどで効果があるとされ、市場にも定着してきている。本調査でノイズキャンセリングシステムとして使用したヘッドホンのテクニカルデータを表-4に示す。

計測は、乗車時に着席している状態と立ち乗り乗車している状態の2パターンで実施した。着席時は車両中央部の座席とし、立ち乗り時はドア付近に定めた。車両の混雑率が心拍変動に影響を与えることを抑えるために非混雑時を条件として乗車率を100%未満の車両で計測を実施した。

■表-4 ヘッドホンテクニカルデータ

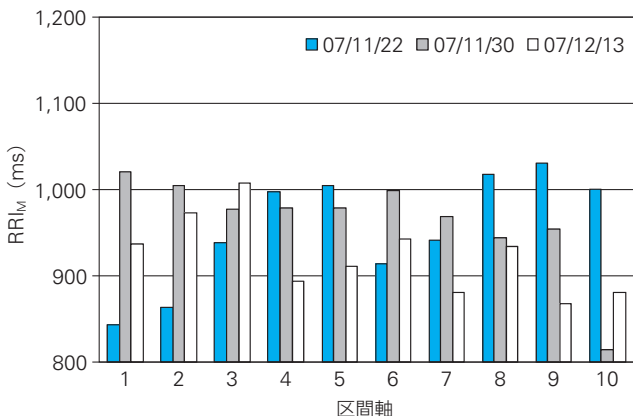
メーカー名	Audio-technica
製品名	ATH-ANC7
型式	密閉ダイナミック型
再生周波数特性	10~25,000Hz
ノイズキャンセルレベル	最大-22dB

6.2 着席時におけるRRIMによるストレス値の比較

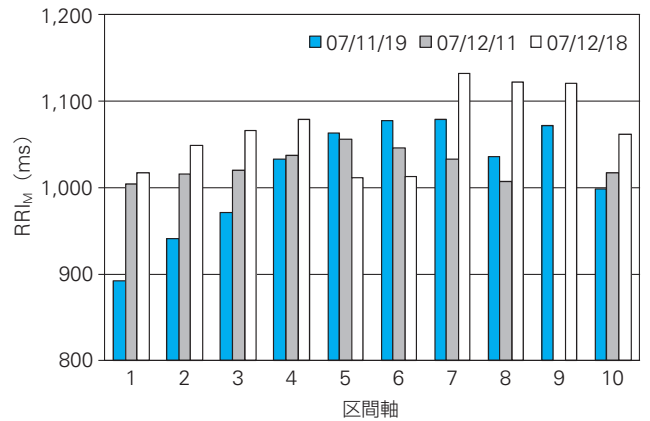
図-10は、普通車両の着席時における区間軸のRRIMを算出した結果を表したものである。調査日別のRRIMに大きなばらつきがあるものの、1,000msを超過する区間は少ない傾向を示し、区間毎に顕著な特徴は認められなかった。

図-11は、普通車両乗車時の着席状態でノイズキャンセリングシステム使用時の区間軸のRRIMを算出したものであり、全体的に1,000msを超過する区間が多く存在していることがわかった。しかし、図-10と同様に区間毎に顕著な特徴は認められなかった。

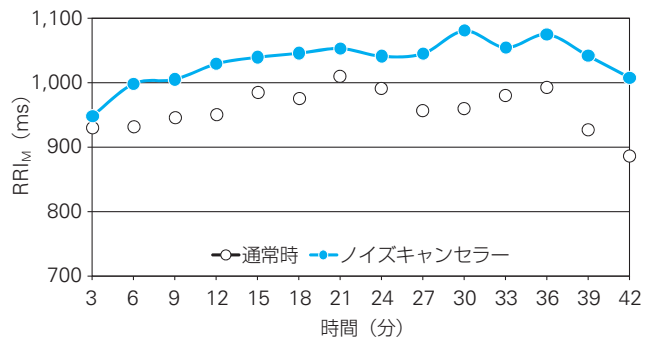
図-12は、着席時におけるノイズキャンセリングシステムの使用の有無で分類したRRIMの平均値の推移を表したものである。全体的にノイズキャンセリングシステムの使用時におけるRRIMが高い値を示した。また、ノイズキャンセリングシステム使用時は、時間経過に伴いRRIMが増大していることから、乗車時から徐々にストレスが弱化的ことが示唆できる。



■図-10 着席時のRRIM(区間軸)



■図-11 ノイズキャンセル使用時のRRIM(区間軸)



■図-12 RRIMの平均値の推移(時間軸)

6.3 ノイズキャンセルのストレス軽減効果(着席時)

表-5に着席時のノイズキャンセル使用の有無に分類し、算出した3つのストレス指標の一覧を示す。RRIMは、ノイズキャンセルなしの場合において、すべて低い値を示し、ノイズキャンセリングシステムの使用によりストレスが弱化的ことを示している。

TSVは、ノイズキャンセルなしの場合において、すべて上回り、平均値ではノイズキャンセリングシステムの使用により926msのTSVの減少が認められた。

LP面積は、11/22のデータを除くとノイズキャンセルなしの場合において、小さくなる傾向を示した。これは、通常の着席時がノイズキャンセリングシステムの使用時よりもRRIMの変動域が狭くなったことを表しており、一定量のストレスを安定的に受けている状態を反映していると考えられる。

よって、着席時ではノイズキャンセリングシステムで外部

■表-5 ストレス指標一覧(ノイズキャンセル着席時)

状態	調査日	能動的施策	RRIM (ms)	TSV (ms)	LP (ms ²)
着席	11/19	ノイズキャンセル	999	1,223	33,004
	12/11	ノイズキャンセル	1,023	1,011	31,318
	12/18	ノイズキャンセル	1,058	713	35,549
	11/22	なし	952	1,830	35,855
	11/30	なし	953	1,740	22,771
	12/13	なし	920	2,153	27,342

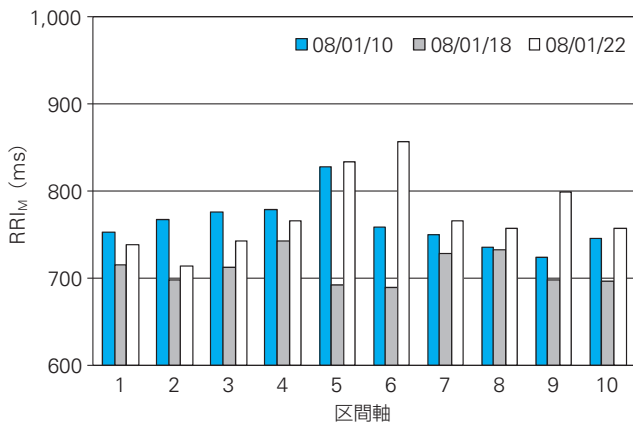
の騒音を低減することにより、被験者が被るストレスが軽減される傾向を示した。また、この状態を3つのストレス指標が適正に反映していることが示唆できた。

6.4 立ち乗り時におけるRRI_Mによるストレス値の比較

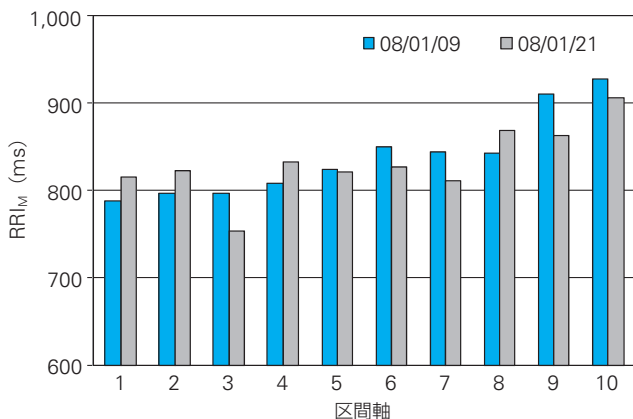
図一13は、普通車両の立ち乗り時における区間軸のRRI_Mを算出した結果を表したものである。全体のRRI_Mの平均値は750msとなり、区間毎に顕著な特徴は認められなかった。

図一14は、普通車両の立ち乗り時におけるノイズキャンセリングシステム使用時の区間軸のRRI_Mを算出した結果を表したものである。区間の移動に伴いRRI_Mが増加傾向を示すことがわかる。また、全体のRRI_Mの平均値は、833msとなり、ノイズキャンセリングシステムを使用しない時よりも高い値を示した。

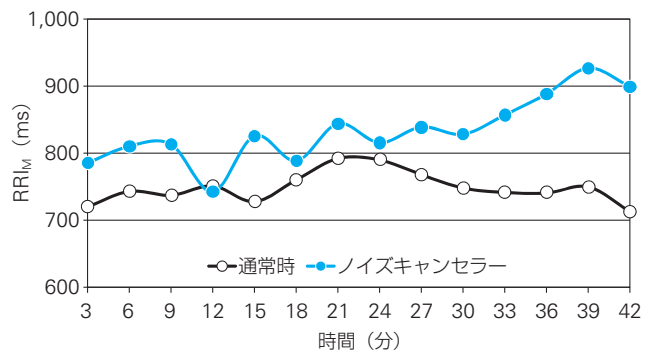
図一15は、立ち乗り時におけるノイズキャンセリングシステムの使用の有無で分類したRRI_Mの平均値の推移を表したものである。全体的にノイズキャンセリングシステムの使用時のRRI_Mが高い値を示した。特に乗車時間の経過とともに両者の差が大きくなる傾向を示した。これは、着席時のそれと同様にノイズキャンセリングシステム使用時において、乗車から時間経過に伴いストレスが弱体化している結果であると示唆できる。



■図一13 立ち乗り時のRRI_M(区間軸)



■図一14 ノイズキャンセリングシステム使用時のRRI_M(区間軸)



■図一15 RRI_Mの平均値の推移(時間軸)

6.5 ノイズキャンセルのストレス軽減効果(立乗時)

表一6に立ち乗り時のノイズキャンセル使用の有無に分類し、算出した3つのストレス指標の一覧を示す。

RRI_Mは、ノイズキャンセルなしの場合において、すべて低い値を示した。

TSVは、ノイズキャンセルなしの場合において、すべて上回り、平均値ではノイズキャンセリングシステムの使用により866msのTSVの減少が認められた。

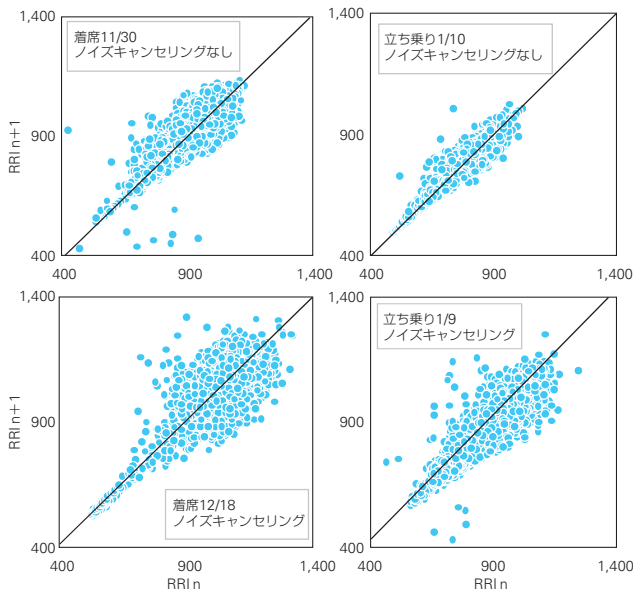
LP面積は、ノイズキャンセルなしの場合において、大きく下回る傾向を示した。これは、着席時のそれと同様の傾向を示し、通常の立ち乗り時はノイズキャンセリングシステムの使用時より、RRIの変動域が狭くなることから、一定量のストレスを安定的に受けている状態を反映していると考えられる。

図一16は、特徴的な着席時と立ち乗り時におけるノイズキャンセリングシステムの有無に分類したLPの分布を示したものである。両者において、ノイズキャンセリングシステムを使用するとLP面積が拡大する傾向を示している。また、 σ_x 方向の広がりが大きくなることから、RRIの分散が大きくなる傾向が認められた。これは、車内騒音を低減することにより、一定のストレスが緩和され、RRIに適度なばらつきが生じた結果を反映していることと示唆できる。また、乗車姿勢によってもLPの分布に差異があることが視覚的に把握できる。

よって、立ち乗り時においても、着席時と同様にノイズキャンセリングシステムで外部の騒音を低減することにより、被るストレスが軽減される傾向を示し、その状態を3つのストレス指標が適正に反映していることが示唆できた。

■表一6 ストレス指標一覧(ノイズキャンセル立乗時)

状態	調査日	能動的施策	RRI _M (ms)	TSV (ms)	LP (ms ²)
立乗	1/9	ノイズキャンセル	835	2,999	19,933
	1/21	ノイズキャンセル	824	3,064	26,928
	1/10	なし	761	3,765	8,306
	1/18	なし	713	4,277	7,240
	1/22	なし	759	3,652	12,637



■図—16 LP面積の分布(ノイズキャンセルの有無)

6.6 混雑, 騒音の有無, 体位の違いにより受けるストレスの比較

本章では, 計測メニューの条件から表—7に示す組み合わせにより, 普通車両の乗車時において, ①立ち乗り時における混雑時と非混雑時の比較, ②非混雑時における通常の立ち乗り時と着席時の比較(騒音有), ③非混雑時におけるノイズキャンセリングシステムを使用した場合の立ち乗り時と着席時の比較(騒音無)の検証を実施した(表—7の○と●の平均値における比較)。

①立ち乗り時における混雑時と非混雑時の比較では, 混雑時の RRI_M が922msに対して, 非混雑時では744msと低い値を示した。TSVにおいても混雑時は2,168msであるのに対し, 非混雑時は3,898msとなり, 非混雑時の方が被るストレスが増大する結果を示した。LP面積においても同様に非混雑時が小さい値を示した。

この逆転とも観られる現象が起きた要因は, RRIの変動特性に起因していると考えられる。両者の測定時間を比較すると, 混雑時の普通車両の計測時間は, 早朝の時間帯(7:45, 8:05)であるのに対し, 非混雑時は, 午後の時間帯(12:39, 12:59, 15:39)である。同一路線において, 混雑時と非混雑時の計測時間を同一時間帯にコントロールすることは不可能であるため, RRIの日周期の変動の影響を受けた可能性が大きいと考えられる。

■表—7 ストレス指標の平均値(RRI_M , TSV, LP面積)

状況	体位	乗車車両	騒音	RRI_M (ms)	TSV(ms)	LP(ms ²)	①	②	③
混雑	立乗	女性専用	有	991	1,541	32,751			
		普通	有	922	2,168	19,943	○		
非混雑	着席	普通	無	1,027	982	33,290			○
		普通	有	942	1,908	28,656		○	
	立乗	普通	無	830	3,032	23,431			●
		普通	有	744	3,898	9,394	●	●	

*①~③は3パターンの検証の組み合わせを, ○及び●は乗車姿勢(立位または着席)や混雑度の違いを示す。

②非混雑時における通常の立ち乗り時と着席時の比較(騒音有)では, 立ち乗り時の RRI_M が744msに対して, 着席時では942msと高い値を示した。TSVにおいても立ち乗り時は3,898msであるのに対し, 着席時は1,908msとなり, 立ち乗り時の方が被るストレスが増大する結果を示した。LP面積においても立ち乗り時の方が小さくなり, 着席時より, 立ち乗り時の方が, 一定量のストレスを安定的に受けている状態を反映した結果が認められた。これは, 立ち乗り時において, 身体の平衡を維持するための筋運動がRRIの変動に影響を与えたものであると示唆できる。

③非混雑時におけるノイズキャンセリングシステムを使用した場合の立ち乗り時と着席時の比較(騒音無)では, ②の比較と同様に, 立ち乗り時の RRI_M が830msに対して, 着席時では1,027msと高い値を示した。TSVにおいても立ち乗り時は3,032msであるのに対し, 着席時は982msとなり, 立ち乗り時の方が被るストレスが増大する結果を示した。LP面積においても立ち乗り時の方が, 一定量のストレスを安定的に受けている状態を反映した結果が認められた。

よって, ②と③の結果から, 被験者の乗車姿勢に伴う筋運動がRRIの変動に影響を与えるひとつの要因であることが示唆できた。

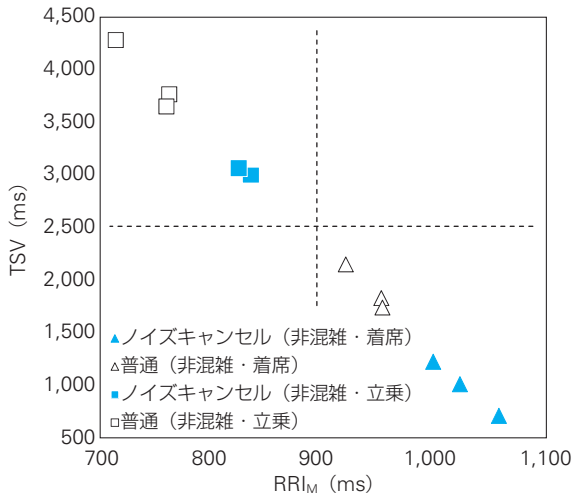
7—3つのストレス指標の関係と乗車時間について

本研究では, ストレスの特性を表す指標として, ①ストレスの平均的な強度(RRI_M), ②ストレスの総量を示す指標(TSV), ③RRIのばらつきや変動特性を表す指標(LP面積)の3つの指標を組み合わせ, ストレスの強度や特徴に関する定量的評価を試みた。ここでは, 日周期の変動による影響を受けたと考えられる早朝の計測データ(女性専用車両・普通車両)を削除して, 上記の3指標の関係について分析を行った。

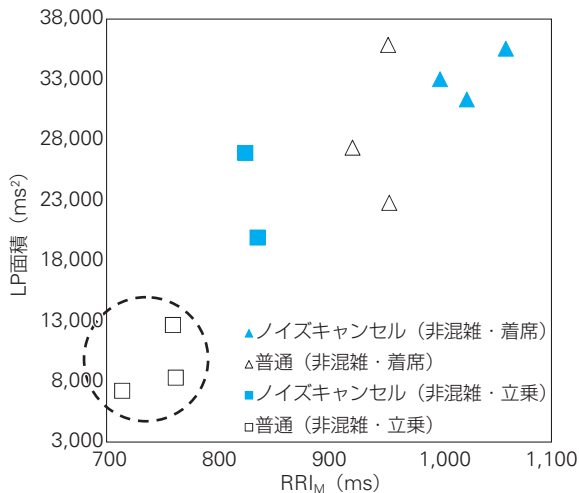
図—17は, RRI_M とTSVの関係を示したものである。①ストレスの平均的な強度(RRI_M)と②ストレスの総量(TSV)は, その指標の定義から本質的に差異がないと考えられ, 図に示すように高い相関関係を実証した。また, RRI_M は, 900msを境に立ち乗り時と着席時のデータが分布しており, TSVも同様に2,500msを境に, 立ち乗り時と着席時のデータが分布していることがわかる。このことから, 乗車姿勢がストレスサーとして RRI_M やTSVに与える影響が大きいことがわかる。

図—18は, RRI_M とLP面積の関係を示したものである。両者にも相関関係が認められ, RRI_M の増加に伴い, LP面積も拡大する傾向を示した。非混雑時における普通車両

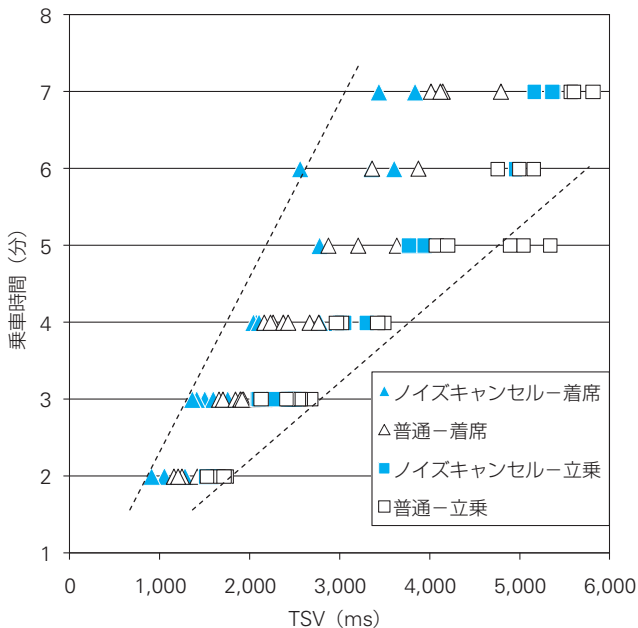
の立ち乗り時(点線の領域)が RRI_M とLP面積が最も小さくなった。これは、 RRI が低い値を保ち、変動の小さい状態で推移していることを示し、ストレスを継続的に受けていることを示唆している。



■図—17 RRI_M とTSVの関係



■図—18 RRI_M とLP面積の関係



■図—19 TSVと乗車時間の関係

図—19は、駅間の区間軸で算出したTSVとその区間における乗車時間の関係を示したものである。自明ではあるが乗車時間の増加に伴いTSVも増加する傾向を示した。しかし、短時間の乗車区間では、乗車姿勢やノイズキャンセルの有無に影響を受けずTSVは近似値を示した。一方、乗車時間が5分以上になる区間では、乗車姿勢やノイズキャンセルの有無に関わる被験者の乗車環境やストレスサの特徴がTSVの差として表れる傾向を示した。

8—まとめ

本研究で得られた結論を以下に記す。

- ・女性専用車両は、普通車両の乗車時と比較して、 RRI_M 、TSV、LP面積の3つの指標の算出結果から、ストレスの軽減現象を定量的に反映している結果が認められた。
- ・ノイズキャンセルの使用時は、着席時と立ち乗り時の両者において、通常の乗車時と比較して、 RRI_M 、TSV、LP面積の3つの指標の算出結果から、ストレスの軽減現象を定量的に反映している結果が認められた。
- ・①立ち乗り時における混雑時と非混雑時の比較では、非混雑時の方がストレスを多く受けている結果となった。この要因は、 RRI の日周期の変動の影響を受けた可能性が大きいと考えられる。
- ・②非混雑時における通常の立ち乗り時と着席時の比較(騒音有)では、着席時の方が、被るストレスが弱く、少ない傾向を示した。また、③非混雑時におけるノイズキャンセリングシステムを使用した場合の立ち乗り時と着席時の比較(騒音無)では、②の検証結果と同様に、着席時の方が被るストレスが軽減されていることがわかった。
- ・ RRI_M とTSVの関係から両者に高い相関関係が認められることを実証した。また、乗車姿勢が RRI_M やTSVに与える影響が大きいことがわかった。
- ・ RRI_M とLP面積の関係から両者に相関関係が認められ、 RRI_M の増加に伴い、LP面積も大きくなる傾向を示した。非混雑時における普通車両の立ち乗り時は、 RRI が低い値を保ち、変動の小さいストレスを継続的に受けている傾向を示した。
- ・駅間のTSVと乗車時間の関係から乗車時間が5分以上になると、乗車姿勢やノイズキャンセルの有無に関わるストレスサの影響がTSVの差として特徴的に表れた。
- ・ RRI_M とTSVは、その算出方法から分析目的に応じた使用が考えられる。 RRI_M は単位時間当たりで算出することにより、平均的なストレスの強度の変動を時系列で確認することができる。TSVは、一定時間/区間におけるストレス量を表す指標として使用が可能であると考えられる。

・LP面積は、今回の計測でRRI_MとTSVとに相関関係が認められ、ストレス強度やストレス量が増加するとLP面積は小さくなる傾向を示した。これは、RRIが低い値を保ちながら狭い変動域で推移した場合に起きる現象であることがわかった。また、グラフ上にローレンツプロットをすることにより、視覚的に一定時間/区間のRRIの変動を捉えやすいという特徴も実証することができた。

本研究では、測定条件を厳密に設定せずに被験者の日常の通学において計測を実施したため、詳細なストレスサ－の要因分析の言及までには至っていない。しかし、試行的に被験者1名に対して、①平均的なストレス強度(RRI_M)、②ストレス総量(TSV)、③ストレスのばらつき(LP面積)が鉄道の乗車姿勢や、女性専用車両、ノイズキャンセリングシステムの使用などの環境要因の違いにより、被るストレスの特性を反映した指標であることが確認できた。

なお、女性専用車両の導入や促進に関しては、一定のストレス軽減効果が示唆できたものの、鉄道の輸送効率性やラッシュ時における乗客の機会平等性についての多くの議論が必要であり、今後は、公共性を保つための導入手法やルール等を検討する必要がある。

また、ノイズキャンセリングシステムにおいても、利用者の費用負担が前提となっており、騒音の低減が期待できる車両の改善等を踏まえ、社会的受容性については別途議論を要する。

今後は、3つの指標の一般性や普遍性を高めるためにサンプル数を増やし、検証するとともに詳細に鉄道乗車時におけるストレスサ－の要因分析を進め、多様なストレスサ－(気温や冷房状況など)がRRIの変動に与える影響を解明する予定である。また、鉄道サービスの質の向上に寄与する効果的なストレス軽減施策についても、ス

レスの許容限界や利用者の印象評価とストレスの関係などの分析を踏まえた研究を同時に進めていく予定である。

注

注1)ホルター心電計は、体に電極を取り付け、心電図を連続的に記録する装置で通常の安静時心電図には現れない一過性不整脈の検出などに利用されている。解析ソフトの使用でRRIのデータを取得することが可能である。
<http://www.gms-jp.com/products/ac301/ac301.html>に詳しい。

注2)心拍変動、RRIの変動に関する日内変動(サーカディアンリズム)については、年齢、食事、体勢などで異なり、詳細は、林博史[1999]、『心拍変動の臨床応用』、医学書院、pp. 2-10などが詳しい。

参考文献

- 1) S. Cohen, R. C. Kessler & L. U. Gordon[1995], *Measuring Stress*, Oxford University Press, Inc. (シェルドンコーエン・ロナルドC. ケスラー・リン アンダーウッド ゴードン[1999]、『ストレス測定法』、小杉正太郎監訳、川島書店)。
- 2) 大須賀美恵子[2010]、“自律神経指標を用いたドライバの状態推定”、『自動車技術』、Vol. 64, No. 10, pp. 24-29.
- 3) 早野順一郎[1996]、“心拍変動による自律神経機能解析”、『循環器疾患と自律神経機能』、医学書院。
- 4) MulderG, MulderLJM.[1981]、“Information processing and cardiovascular control”、*Psychophysiology*, Vol. 18, pp. 392-402.
- 5) 林博史[1999]、『心拍変動の臨床応用』、医学書院。
- 6) 大須賀美恵子[2004]、“心的状態の指標としての心拍・心拍変動”、『ヒューマンインターフェース学会誌』、Vol. 6, No. 1, pp. 9-14.
- 7) 村田厚生[1992]、“心拍変動性指標によるメンタルワークロードの測定”、『人間工学』、第28巻、第2号、pp. 91-98.
- 8) 村田厚生[1994]、“R-R間隔ゆらぎのフラクタル次元解析—フラクタル次元に基づくMWL評価の試み—”、『人間工学』、第30巻、第6号、pp. 389-393.
- 9) 茂吉雅典ほか[1996]、“高速道路の長時間運転における心電図R-R間隔時系列の経年変化”、『自動車技術会論文集』、Vol. 27, No. 3, pp. 107-112.
- 10) 大須賀美恵子ほか[1997]、“心臓血管系モデル用いた自律神経指標の解釈”、『BME』、第11巻、第1号、pp. 75-85.
- 11) 下野太海ほか[1998]、“心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討”、『人間工学』、第34巻、第3号、pp. 107-115.
- 12) 日本自律神経学会編[2001]、『自律神経機能検査 第3版』、文光堂、pp. 140-147.
- 13) 鹿島茂ほか[2009]、“通勤ストレスの定量化手法に関する研究”、『運輸政策研究』、Vol. 11, No. 4 Winter, pp. 47-53.
- 14) 豊福史ほか[2006]、“心電図RR間隔のローレンツプロットによる自律神経活動の簡易推定法の開発”、『第21回生体・生理工学シンポジウム論文集』、pp. 431-434.
- 15) 鈴木清ほか[2010]、“自転車走行時の心理的負担に着目した自転車走行空間の比較評価—高松における「心電図トランスミット」を活用した調査を通じて—”、『土木学会、土木計画学研究・講演集』、Vol. 41, CD-ROM, No. 366.

(原稿受付 2011年11月8日)

Assessment of Stress Relief Effect in Railway Services

By Shinji ISHIDA, Wataru TAKEDA, Tatsuo SHIRAKAWA and Shigeru KASHIMA

This study quantitatively assesses stress relief effect in railway services by using RRI data derived from human heart rate variability. The study focuses on two situations in which stress relief effect is expected. These situations are (1) riding on a women-only coach and (2) using a noise canceling system. As methods to assess stress quantitatively, total stress values were calculated from RRI medians, and stress variability were analyzed by using Lorenz plots. The analytical result of the two methods showed that riding on a women-only coach and using a noise canceling system both exerted stress relief effect. Thus we concluded that it was possible to quantitatively assess stress relief effect of various measures in railway services by analyzing heart rate variability.

Key Words: stress, RRI, heart rate variability, Lorenz plots, railway services