

高速道路走行における心理的負担の計測と安全性評価に関する研究

A Study on the Measurement of Mental Load and
Safety Evaluation in the Condition of Driving on Expressway

大橋 正樹*・内田智也**・屋井鉄雄***
Masaki Ohashi and Tomoya Uchida, Tetsuo Yai

The purpose of this study is to confirm the existence of mental load, to quantify mental load and to estimate the effect on road improvement, considering the driver's mental load.

We adopted the RR-interval among various physiological indices. First, we found out several points of the places on the Metropolitan expressway at which many people feel high-level mental load. Secondly, after explaining why we apply RR-interval and what its feature is, we examined the amount of mental load by driving along the Metropolitan expressway. Finally, we estimated a probability of conflict and the effect of improving the road environment at Ichinohashi Junction of Metropolitan expressway.

Keywords: mental-load, RR-interval, conflict, traffic safety

心理的負担、RR 間隔、コンフリクト、交通安全

1. はじめに

自動車を運転すると様々な交通環境に出会うことになる。実際には、事故等によりドライバー・被害者双方に生ずる物質的な損失だけでなく、想定外のことにヒヤリとしたり、ハッとしたりすることや危険な場所や状況を事前予測し、事故やコンフリクトを起こさないように気を付けて運転するような「注意集中」が普通以上に必要であるなど、人間の内面への負の影響が存在する。しかし、このような箇所は、ドライバーは過度の負担を伴いながらも注意深く運転している化に伴い多様なドライバーが高速道路を利用するようになる一方で、近い将来 ITS の一環として AHS が導入される。AHS には幾つものステージが想定されるがランプ流入部ために、事故があまり発生していない箇所、つまり、事故の発生数や事故率などの従来からの指標では把握しきれない危険な箇所といえる。このような箇所は都心の合流部など用地確保の困難な都市高速道路に存在すると思われる。今後ネットワーク整備が進み交通が円滑に流れるようになると、合流地点等での危険性が増す可能性もあり、施設の老朽化に伴う今後の大規模な改修によってより安全で快適に運転することのできる道路線形や環境を確保する社会的意義は大きいと考えられる。また、高齢等における上記心理的負担を軽減して安全性を向上することも重要と考えられる。以上のような従来から見過ごされがちであったドライバーの心理的負担に関して、どの様な交通環境のもとでどの様な負担がどの程度発生しているのかを把握し、将来の負担発生箇所の構造改善や AHS の導入の効果を定量的な指標の提案を通じて分析することは今後重要な課

題となる。

そこで本研究では、心理的負担を以下の 2 種類に分けて定義する。他車とのコンフリクトが起きたときに感じるヒヤリとするような負担を単発性心的負担、そして先に起こりうる危険な状況を予測することにより、緊張感を持続しなければならないような負担を持続性心的負担とする。その上で、ビデオ観測やアンケートから心理的負担を確認した後に、特定の走行条件で走行実験を行い、心理的負担を発生させている要因について分析し、個人特性や構造特性別に分析を行い、心理的負担を定量的な指標として提案することを本研究の目的とする。さらに、簡易な合流シミュレーションを用いて、どの程度の確率でコンフリクトが発生しているのか、またその損失はどの程度なのか一の橋 JCT をケーススタディーとして検討した。

2. 既往の研究

これまでに、人間の内面への影響を生理的指標で測定した研究がいくつか行われている。生理的指標を用いた研究としては、タクシー運転手、鉄道運転士を対象とし、運転に伴う負担が蓄積された疲労と血圧変化、心拍変動との関連を検討¹⁾²⁾³⁾⁴⁾している。また、運転ストレスが血圧を含めた循環動態に及ぼす影響を確かめる実験³⁾や緊張度の測定とした心拍変動のパワースペクトル解析の検討⁵⁾なども行われている。これらは運転という作業がどの程度の負担を与えているか把握するために生理的指標を用いて研究されているが、どれも長時間の運転や運転から受けるストレスを対象としたものであり、運転が全体としてどのくらいの負担であるかを研究したものであ

* 正会員 首都高速道路公団(Metropolitan expressway)

** 学生会員 *** 正会員 東京工業大学総合理工学研究所人間環境システム専攻(Tokyo institute of Technology)

る。別の視点として、高速道路のトンネル坑口部で車線数、幅員等に変化が無いにもかかわらず渋滞する問題をトンネル進入部の視環境の変化や坑口形状にドライバーが心理的な影響を受けていると仮定し、運転挙動、視点の動き、心拍など生体変化を測定するなど環境から受けるような負担を対象とした研究⁶⁾も行われている。また、負荷と生体反応の関連を扱った研究として、「直線加速器」を用いて生体に2種類の振動周波数に分けて直線加速度負荷刺激を与えた場合の心拍変動及び血圧変動を測定し、負荷の与え方による生体反応の表れ方の違いを確認した研究⁷⁾も行われている。これらの研究は長時間にわたる負荷の影響やシミュレーターなどを用いた室内実験が多く、実際の道路環境では局地的な負荷がドライバーに与える影響もあると考えられる。上記の研究から様々な生体指標が存在する中でRR間隔変動は刺激との時間格差が少なく、運転挙動に制約を設けずに走行できることから、運転時の生体反応の測定には十分耐え得ると判断した。そこで、筆者らは昨年より、高速道路走行において疲労とは異なる人間の内面への影響を心理的負担と定義し、ホルター式心電計を用いてRR間隔を測定し、その分析を行っている⁸⁾。成果としては、高速道路において、心理的負担を発生させてしまう箇所が存在すること、心理的負担をRR間隔を用いて表せる可能性を示した。

3. 潜在的危険性を持つ一の橋JCTの合流挙動分析

昨年度の実験⁸⁾より構造別負担量の平均値の差の検定を行った際に、直線区間と合流区間とでは有意判定が下されていることから、首都高速道路の合流部では、構造的な問題が原因となって運転しづらい箇所が潜在的に存在することが予測されている。そこで、加速レーンが短くかつ、事故率の低い一の橋JCTを対象とし、日常的に行われている合流挙動をビデオ撮影し、合流時における一般的な挙動を実測し、合流地点における問題点の把握と心理的負担との関連を分析した。概要を表1に示す。

表1 ビデオ撮影概要

撮影場所	一の橋JCT(2号線上り 環状線内回り)
1回目	1999.5.23(日)AM10:00~11:00 広角1台で撮影
2回目	1999.6.29(火)AM5:40~6:40 広角1台、ズーム1台、計2台で撮影
撮影日時	

ビデオを分析した結果、本線状況の確認が十分にできない地点から本線へ進入している合流車が多数存在することが判明した。そこで、合流車ドライバーが本線の確認をどのようにして行っているかを、撮影したビデオより目視で観察した。その結果を図1に示す。

全体としてはサイドミラーのみを使用した合流をしている車両は4割ほど存在しており、本線状況を十分に確認していない間に合流しているといえる。目視だけで合

流しているドライバーは5%程度いる。このグループの多くは何回も目視を繰り返しながら、あるいは、長時間にわたって後方を見たまま合流している。彼らは一の橋JCTの構造情報を何も知らずに入ってきてしまった人、あるいは、かつて危険な状況に一の橋JCTで遭遇した人と考えられ、特に大きな持続性心的負担を受けながら合流している人達であると考えられる。このような合流は本線車に対してはそれほど危険ではないが前方の合流車の確認がおろそかになっており、前方の合流車に対しては事故を起こす危険性が高い。このことは運転経験の豊かなタクシーでは後方目視のみで合流する車がおらず、ミラーの使用によって上手く前後の状況を把握していることから裏付けられる。実際、合流できないで停止してしまう合流車が多数存在しており、このことによる合流車線における追突事故が発生している。

また、その後の調査で本線を全く確認せずに合流している車が756台中3台いたことを付け加えておく。これはドライバーに本線を確認する意識がなかったのではなく、本線を確認する前に合流車線が終了してしまい、気が付いたら既に合流していたという状況であったものと考えられる。つまり合流直前がカーブしていることや合流車線が短いことの影響が表れたものと考えられる(図3参照)。

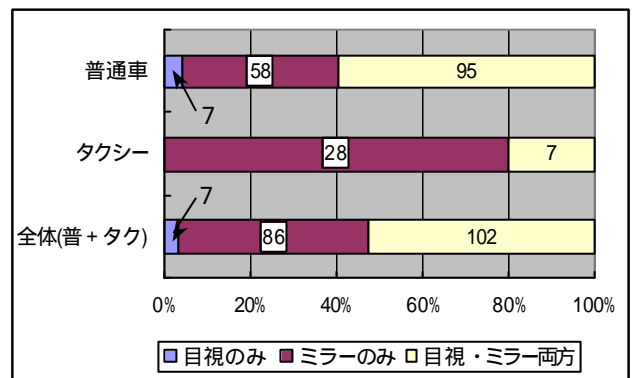


図1 合流車の本線確認状況

さらに、本線車のJCTにおける合流部手前と合流部内での速度変化を測定した。その結果を図2に示す。

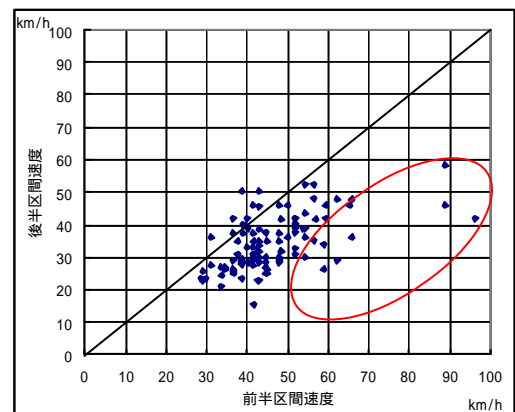


図2 本線車の速度変化

その結果、多くの車両が減速している中で、40km/h～50km/hの急減速をしている車両が数台存在している。このことから本線車にも合流車との交錯が原因となって単発性心的負担が発生していると言える。

そこで、このようなコンフリクトが発生する1つの原因として、対象車同士の認知位置に問題があると考え、どの地点でお互いの存在を認知することができるのか調べてみた。その結果、本線と合流線の高低差がJCT部接続する以前に1m以上ある上に、お互いカーブしながら合流部に導入する構造になっている。そのために、合流車だけでなく本線車も対象車を認知できる地点が合流部にあまりにも近いということが分かった。また、交錯の対象となる車両を認知する地点について本線車と合流車との間にはギャップがあり、合流車は本線車に比べて認知が遅れる構造になっているために単発性心的負担が発生しやすいといえる。以上のことから合流車は合流し難くなり、本線車は合流部手前で減速しなくてはならないことが一つの構造的な要因として確認できた。

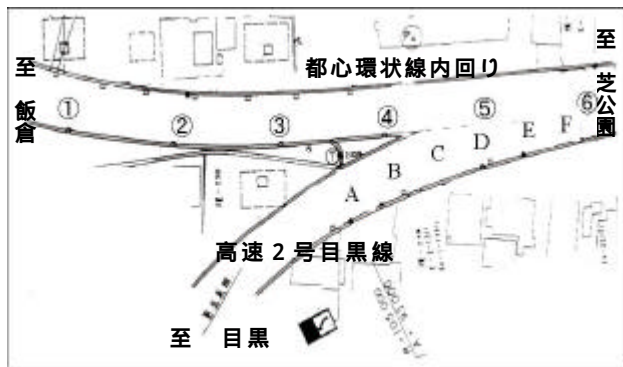


図3 一の橋JCTの走行位置

表2 本線車からみた確認可能な合流車

本線車位置	確認可能な合流車	合流対象車
	-	A
	D,E,F	B
	B,C,D,E,F	C
	C,D,E,F	D
	E,F	E
	F	F

表3 合流車からみた確認可能な本線車

合流車位置	確認可能な本線車	本線対象車
A		
B		
C		
D		
E		
F		

4. 首都高速道路要注意地点の抽出

一の橋JCTのように、道路構造上の問題により通過する度にドライバーに心理的負担が掛かっている地点が他にも存在すると考えられる。そこで、このような問題意

識のもと、首都高速道路には他にも運転しづらいと感じられる地点が存在するのか。また存在するならば、どのような構造を持つ地点が運転しづらいと感じられるのか。また、それはどのような理由からそのように感じるのか。実際に首都高速道路を1日に数回使用するヘビーユーザーであるタクシードライバーから、負担と感じやすい地点を抽出したのち、構造的な傾向を分析した。アンケートはヒアリング形式で行い、対象は首都高速道路東京線とした。概要を表4に示す。

表4 アンケート概要

アンケート実施日	実施場所	サンプル数
11月11日(木)	五反田 品川駅	99
11月16日(火)	東京駅	102
11月17日(水)	新宿駅	101
合計		302

表5 要注意地点(主地点サンプル数)

	五反田駅	東京駅	新宿駅	合計
箱崎JCT	11	30	18	59
代々木カーブ	7	12	24	43
神田橋JCT	18	17	8	43
霞ヶ関外回りONランプ	17	15	4	36
一の橋JCT	19	2	5	26

得られた結果が、サンプリング地点による大きな偏りがないことを確認した後に集計した。都心環状線内で要注意地点として挙げられた主な地点とそのサンプル数を表5及び図4に示す。

構造別では車両の交錯するJCT、ランプ部が上位を占める。特に、交錯の激しい箇所や車線変更や合流に時間を費やすことのできない状況が負担となっているようである。その主な理由として、カーブ、トンネル等とは異なり、速度を落とすなどの自らの対策だけでは危険を回避することが困難だということが挙げられる。

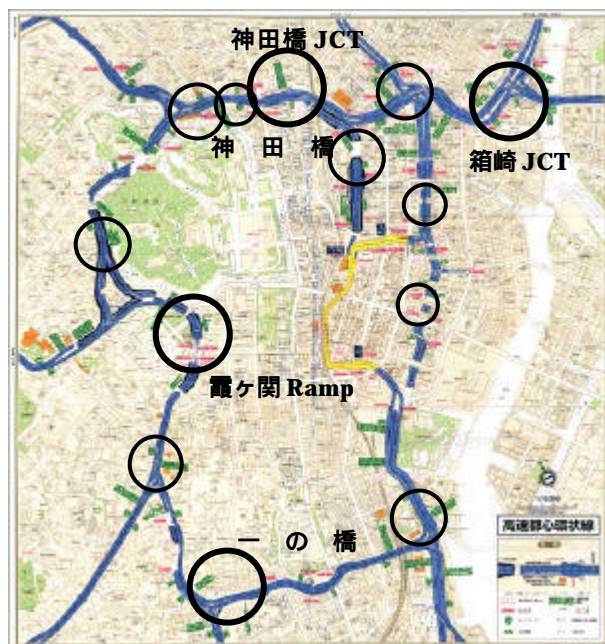


図4 要注意地点

その一方で、事故回避のために行う対策は事前に要注意地点が危険であることを知っているときにとることができるものが多く挙げられた。

5. 生体負荷測定としてのRR間隔

生体への負荷を扱う測定としては、心拍数、心拍変動、血圧、発汗、眼球変動、脳波などが用いられている。本研究では心拍変動を生理的指標として取り上げる。心電波形は、図5のようにP,Q,R,S,Tの各波に分けることができる。それぞれの波が心臓各部の活動を表している。心電波形において最も顕著なパルス状のR波と次のR波との間隔時間をしめすRR間隔を生理的指標として用いる。このRR間隔が大きくなれば心拍数は少なくなり、RR間隔が小さくなれば心拍数は多くなることになる。RR間隔の特性として、常に一定ということではなく変化していることから、心拍数とは異なり、秒単位でその計測が可能である。そのため刻々と状況が変化する交通環境からの影響をとらえるには適した生体指標である。このRR間隔の変動を今回の実験・分析において採用する。

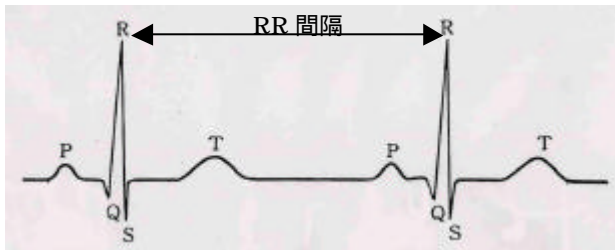


図5 RR間隔

6. 首都高速道路における心理的負担の計測

速度、車間、ブレーキの踏み方など一般的な運転行動によってRR間隔変動に即影響が表れることを学内走行実験において確認していたので⁸⁾、生体にできるだけ負荷のかからないような条件を設定した。首都高速道路においてホルター式心電計を装着した後、指定コースを走行した。その概要を表6、表7に示す。被験者中のプロドライバーはタクシー・ドライバーであり、被験者に走行経験の浅いドライバーはいない。また、各被験者とも健康上の問題は抱えていない。

表6 走行コース

コース名	コース	車線数
基準コース	湾岸線辰巳JCT 大井JCT	3
コース	2号線天現寺ランプ 1号線芝浦ランプ	2
コース	1号線芝浦ランプ 2号線天現寺ランプ	2
コース	2号線天現寺ランプ 都心環状線芝公園ランプ	2
コース	都心環状線内回り(八重洲線経由)	2

表7 被験者情報と実験実施日時

被験者ID	年齢	性別	実験実施日時	属性
被験者1	30代	男性	1999.12.29 11:02~14:35	一般
			2000.01.04 06:16~08:36	
被験者2	20代	男性	1999.12.30 05:49~08:48	一般
被験者3	20代	男性	1999.12.30 09:10~12:57	一般
被験者4	20代	男性	1999.12.31 10:20~14:31	一般
被験者5	60代	男性	2000.01.11 05:49~08:49	プロ
被験者6	50代	男性	2000.01.11 05:24~08:31	プロ

各コースとも指示以外での車線変更はしないなど必要以上の挙動は極力省いて、負担を起こさないようにしてある。しかし、コース3では、合流部において、2車線をまたぐ車線変更を指示し、あらかじめ負荷のかかる運転を設定している。

まず、各被験者のコース毎のRR間隔データに異なった傾向がみられるか調べるために、基準コースと他のコースとのRR間隔データの平均値の差の検定を行った。その結果を表8に示す。

表8 平均値の差の検定

被験者NO	コース	コース	コース	コース
1	**	**	**	**
2		**	**	**
3	**	**	**	**
4	**	**	**	**
5	**	**	**	**
6	**	**	**	**

** : 1%有意

表8のとおり、被験者2のコースを除いて有意判定を得た。つまり、各コースとも基準コースとは異なった値を持ちそれぞれが比較できることを意味している。また、被験者2のコースについてもP値が0.06と小さい値と言えるために他のコースと同様に扱った。

次に、心理的負担発生箇所を明らかにするための指標を示す。

単位時間負担量⁽¹⁾

各被験者の基準コース走行中の平均RR間隔を基準値として設定する。基準値よりも低い値のとき、その差を累積し、走行時間で除した。これにより各コース、各区分間での平均負担量が相対的に把握ができる。(図6~9)

一般ドライバーに比べてプロドライバーは負担量が小さく収まっていることから、豊富な運転経験、運転技術の修得により安定した運転ができていると考えられる。しかしながら、負担を受けるコースや区間の傾向は一般ドライバーとの大きな違いはなく、負担量を小さくすることは可能ではあるが、根本的な問題の解決にはつながらないといえる。

各被験者とも基準コースに比べて大きな負担を各コースで受けている。特に、コースでは2車線をまたぐ車線変更をしていることからその値は大きなものとなっていると推測される。つまり、そのような行動を余儀なくさせる構造を極力なくすることが安全性、安定走行につながると思われる。このことは、要注意地点として指摘された都心環状線外回り霞ヶ関 ONランプや内回り神田橋 ONランプでは注意が必要であるとの意見と一致する結果と言える。

区間別で負担量を検討すると多くの被験者が合流部でその値が大きくなっており、車の交錯による負担が大きいことが分かる。また、直線に比べて、カーブ部での負

担が大きい傾向があり、単路部での線形も影響していると考えられる。しかしこの単位時間負担量は時間で除するため、持続性心的負担に比べ単発性心的負担が大きく見積もられ易く、特定地点の負担量把握にはあまり適さない。そのために においてさらに短時間での分析を次に行った。

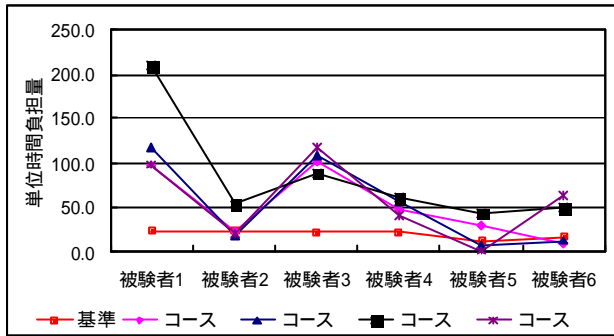


図 6 全被験者負担量(コース別)

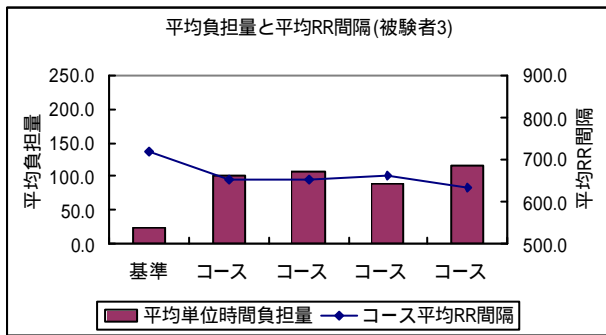


図 7 コース別単位時間負担量(被験者3)

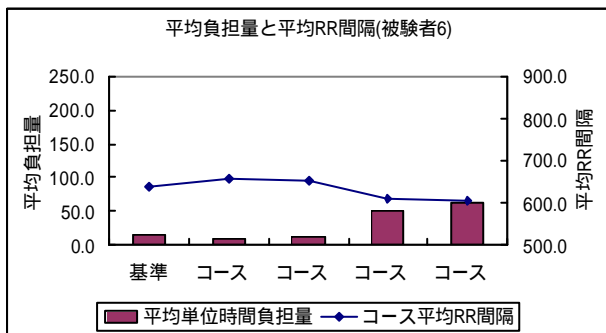


図 8 コース別単位時間負担量(被験者6)

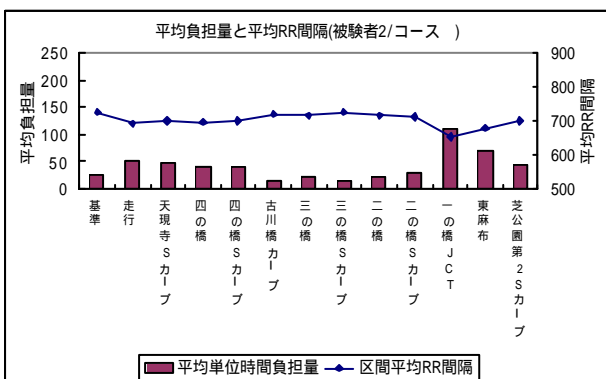


図 9 区間別単位時間負担量(被験者2/コース)

地点負担量⁽²⁾

連続して RR 間隔の減少した時間である累積減少時間とその時間中に減少した RR 間隔変化である累積 RR 間隔変化量を掛け、2 で除したものを使用する。これにより単発性心的負担と持続性心的負担を同時に扱うことができ、地理的に細かい分析をすることができる。結果として図 10 に被験者 2 の負担上位 10 地点を挙げる。

図 10 から負担はカーブ部と JCT 部に集中していることが見て取れる。この場合の JCT 部は他車とのコンフリクトは起こっておらず、持続性心的負担が発生していると言える。また、カーブ部では、曲率の大きいカーブや見通しの悪いカーブに対して負担が大きくなっていることから前方状況を把握できないことによる持続性心的負担が大きいと考えられる。つまり、今までカーブ部の負担については顕著に表せる指標がなかったことから有意義であると考えられる。

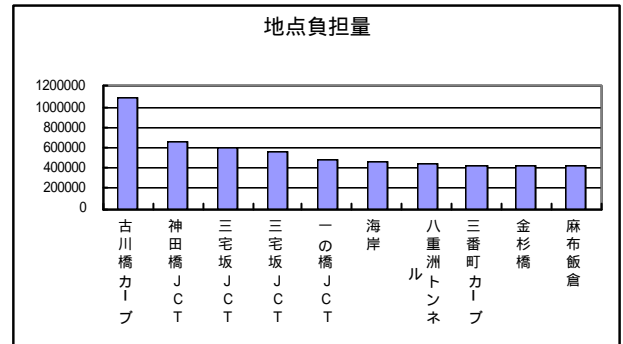


図 10 地点負担量(被験者2)

事故率と心理的負担の関連性の検討

既存の安全評価指標として一般的な事故率と心理的負担との関連を考察した。区間別の単位時間負担量と事故率⁹⁾の散布図を図 11 として以下に示す。

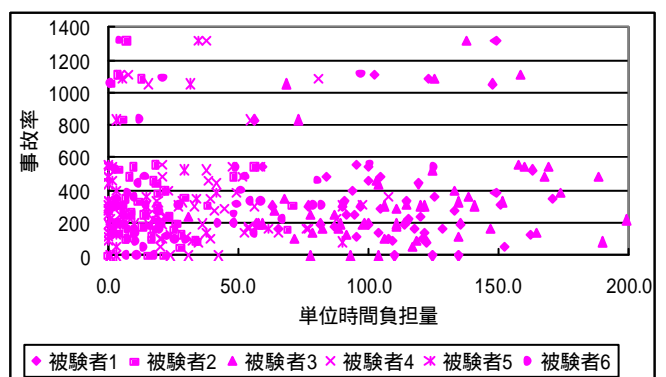


図 11 事故率と単位時間負担量の関係

事故率の低く単位時間負担量が小さい地点、事故率が高く単位時間負担量大きい地点のような理解しやすい地点もあるが、両者にそれほど強い相関が見られるとは判断できない。また、被験者でも強い相関を持つものと相関が弱いものなどばらつきが見られる。その理由としては走行回数が少ないことと被験者が 6 人と少ないことなどが考えられる。しかし、そのような中でも事故率が

低いにも関わらず単位時間負担量が大きい地点、または事故率が高く単位時間負担量が小さい地点がみられる。このような地点ではやはり何らかの問題を抱えている地点であると考えられる。例えば、強い負担を与えていることにより、ドライバーは過度の緊張を伴って運転する。快適に走行できているものの実はそのように見えるだけの危険な地点であったり、知らず知らずのうちに制限速度を大きく上回ってしまうなど、これらの可能性が考えられる。つまり、事故率では表すことのできなかつた潜在的な危険や問題を表現することができる可能性があると考えられる。

7. 合流シミュレーションによるコンフリクトの発生確率

上記でも負担箇所として上位に挙げられている一の橋 JCT をケーススタディーとして簡易な合流シミュレーションを行った。シミュレーションには一の橋 JCT のビデオデータから車線毎の発生頻度、位置、速度、加速度、車頭時間の走行データを分布式で与えている。合流するか否かの判断は合流車と本線走行車との相対速度、本線車速度から合流と見送りの判断を行っている¹⁰⁾。このシミュレーションでは、合流に関して 8 割程度の的中率が得られたことからある程度の信頼が確保できたものと判断した。コンフリクトの発生条件としては合流車が本線に合流したときの本線車との TTC(Time to Collision)が 2 秒以下とする¹¹⁾。その結果、合流車のうち約 2%の割合で本線車とコンフリクトを起こしている。これらのドライバーは単発性心的負担を発生させていると考えられる。また、多くのドライバーはこの 2%に入らないように合流部手前から注意して合流を行っていると言える。つまり、この持続性心的負担は大きな損失をもたらしていると考えられる。

現在の一の橋 JCT では合流区間長は十分にあるものの幅員が狭い区間が長く合流に使うことのできる有効合流区間長は短いことが合流時に負担を発生させている一要因であると考えられる。そこで、合流区間長を変化させてコンフリクトの発生確率を試算した。その結果を表 9 に示す。合流区間長を現在よりも 30m 延長することでコンフリクトの発生確率は 3 分の 1 まで減少し、大きな効果を上げることができると言える。

表 9 コンフリクトの発生確率

合流区間長(m)	20	50	100
交通量(台)	780	797	780
コンフリクト回数(回)	14	5	4
コンフリクト発生確率(回/台)	1.8%	0.6%	0.5%

そこで、一の橋 JCT における CVM の試算結果¹¹⁾を参考にして、改良時の支払い意志額を 75 円、改良以前では合流車の 50%、本線車の 20%が心理的負担を受けているとし、改良後では合流車の 25%、本線車の 10%まで心理的負担を

受ける車両が減少すると仮定し、評価期間を 30 年、社会的割引率を 4%に設定した。すると改良以前では 92 億円の損失、改良後には 46 億円の損失がある。改良にかかる費用については 1 千万円/m とし、初期費用を考慮しても、改良に対しては約 35 億円の純便益が発生すると試算できた。粗い試算ではあるが、その効果は少なくないと判断することができる。改良の可能性を考慮した上で、ある程度の改良を行う意義は大きいと考える。

8. 結論

首都高速道路において広く要注意地点を把握したうえで、高速道路の実走実験から得られた RR 間隔変動に着目した分析を行った。そして、RR 間隔変動指標を用いて各個人において相対的ではあるが心理的負担量を表現することができた。また、事故の発生していない地点での潜在的な問題を指摘できる可能性を示した。

今後は、他の生体指標を補完的に使用し、心理的負担の発生をより詳細に表現できるように改良を行うこと、被験者を増員し、データとしての精度を上げる必要がある。また、事故率など既存の指標との関連性を更に考察・分析し、心理的負担を道路サービス評価の指標として適用可能であるか否か検討を進める必要があると考える。

補注

(1) RR 間隔、走行時間の単位がそれぞれ ms, s なので、単位時間負担量は無次元の値となる。(2) 累積減少時間、RR 間隔の単位が共に ms なので、地点負担量の単位は (ms)²となる。

参考文献

- 小林章雄 (1997) , 「運転とメンタルストレス-タクシードライバーの職務と血圧・自律神経機能」, 医学と工学からみた交通安全対策, pp51-56, 日本交通医学工学研究会
- 水野康文 (1995) , 「心拍 RR 間隔による疲労評価」, 医学と工学からみた交通安全対策, pp59-64, 日本交通医学工学研究会
- 川村光生 (1995) , 「運転中の血圧モニタリング」, 医学と工学からみた交通安全対策, pp53-58, 日本交通医学工学研究会
- 佐藤清・池田守利・澤眞・倉又哲夫 (1995) , 「在来線 160km/h 運転における運転士の生理的負担」, 鉄道総研報告, Vol.9, No.10, pp43-48
- 伊藤典夫・関根太郎・長江啓泰 (1995) , 「運転者の緊張度に関する研究」, 自動車技術会学術講演前刷集, No.956, pp9-12
- 松本晃一・野口雅弘・森康男・飯田克弘 (1998) , 「交通機能面から見たトンネル坑口のあり方」, 交通工学 Vol.33, No.6, pp59-64, 技術書院
- 藤原奈央・横山清子・茂吉雅典・高田和之 (1999) , 「直線加速度負荷時の生体負担度評価」, 日本人間工学会第 40 回大会論文集 CD-ROM 版, 日本人間工学会
- 屋井鉄雄・大橋正樹・清水哲夫・坂巻直紀 (1999) , 「高速道路運転時における心理的負担と損失費用の計量化に関する基礎的検討」, 第 19 回交通工学研究発表会論文報告集, pp233-236, 社団法人交通工学研究会
- 「首都高速道路における交通事故等の状況(平成 8 年度)」, 首都高速道路公団
- 出原克也・清水哲夫・屋井鉄雄 (1997) , 「短い加速車線長を持つランプにおける合流挙動モデルに関する研究」, 第 52 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp222-223, 社団法人土木学会
- 伊吹山太郎・伊吹山四郎, 「道路の人間工学」, 交通工学シリーズ, 技術書院