

自転車利用者のストレス計測に関する研究

金 利昭¹・渋谷 大地²

¹正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢四丁目12-1)

E-mail:tkin@mx.ibaraki.ac.jp

²非会員 東日本高速道路株式会社

E-mail:d.shibuya.aa@e-nexco.co.jp

近年IT技術や生体情報を計測する技術が進歩し、交通分野においてもこれらの新しい技術を活用した評価指標が多数登場している。本研究で着目する心拍変動を用いた生体ストレス指標もその一つである。人間の心拍変動に着目したストレス計測による道路交通環境評価は、生体ストレスという統一指標を計測することで多様な交通主体の多様な交通状況を比較評価できる可能性を有し、きわめて汎用性の高い評価手法と考えられる。しかしながら、心拍変動を用いたストレス計測手法は医療現場では多くの研究蓄積があるものの、交通分野におけるストレス研究は少なく、理論的にも実用的にも未確立であり適用方法は確立されていないと言える。本研究では、自転車交通にストレス計測手法を適用するにあたっての方法及び自転車走行空間における心拍変動要因を整理し、自転車・歩行者が混在する混在空間の自転車走行ストレスを計測してストレス計測手法の適用性を確認した結果を報告する。

Key Words : stress, Compatibility, evaluation, comparison, bicycle

1. はじめに

自転車は日常生活の身近な交通手段として多くの人々に利用されている。近年では健康増進等、レジャー目的としての利用も注目されており、今後も利用者の増加が見込まれる。一方で、自転車関連の事故割合は増加傾向にあり、特に対歩行者との接触事故の増加が顕著にみられ、自転車通行空間整備の必要性が社会的に高まっている。

こうした状況を踏まえ、2008年1月、国土交通省が先進的に自転車通行空間の整備をするモデル地区を指定¹し、以後、全国で自転車通行空間の整備が進められている。また、2012年11月には、国土交通省と警察庁が合同で「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」²を発出し、自転車通行空間整備の指針が示された。しかしながら、効果的な自転車通行空間の整備はまだまだ模索段階であり、今後、より効果的な自転車通行空間の整備を展開していくためには、自転車通行空間を適切に評価し、整備に反映させていく必要があると考える。

交通環境を評価するための指標として、従来は安全性、利便性、経済性、快適性、環境適合性が重視され、交通データや人間の行動データ、意識データなどを用いて評価されることが一般的であった。しかし、近年では生体反応の一つである心拍間隔を用いたストレス計測手法が

注目されている。ストレス計測手法とは、生体が被るストレス(生体が被る精神的な負荷)を心拍間隔から測定する手法であり、この生体ストレスを指標として扱うことができれば利用者に対して、より直接的な立場からの評価が行える可能性がある。加えて、物理量である心拍間隔から得られる生体ストレスを用いることによって、従来の意識レベルによる評価よりも定量的な評価ができる可能性や、心理活動を時間経過に沿って分析することができること等がストレス計測手法の利点として挙げられている³。こうした点から、適切な評価、効果的な整備が求められている自転車通行空間においてもストレス計測手法を用いることは有用であると考えられる。

本研究の目的は、自転車のストレス計測方法を考察し、混在空間での適用結果を示す。

2. ストレス計測に関する研究の動向

ストレス計測による評価は心拍間隔を用いてストレス(精神的な負担)を算出し、このストレスの大きさをを用いて自転車通行空間を評価する手法である。心拍間隔は図-1に示すような自律神経系構造の下で変動し、心拍のR波とR波の間隔であるRRI(R-R Interval)で表される。RRIはストレスを感じると不安や緊張を司る交感神経によってその値が小さくなる。従ってRRI

値が小さいほどストレスが大きくなり好ましくない自転車通行空間であると考えられる。心拍間隔は小型の機器で計測可能であり、データの取得自体も容易である。また、物理量である心拍間隔から得られるストレスを用いることによって、従来の意識レベルによる評価よりも定量的な評価ができる可能性や、心理活動を時間経過に沿って分析することができること等がストレス計測手法の利点として挙げられている⁴⁾。そのため、医学や人間工学、最近では交通工学の分野においても適用研究がある。鹿島ら⁵⁾はサンプル数は少ないものの通勤電車における「混雑度」が増加するとストレスも増加することを確認している。また、TSV(Total Stress Value)という指標を開発し、このTSVを用いることでストレスがより小さい通勤行動を人々が選択している可能性が示された。石田ら⁶⁾は鉄道サービスにおいて「女性専用車両」と「騒音の低減」が鉄道利用者のストレス低減につながることを示しており、ストレス計測手法が交通工学の分野において有用性が高いことが確認されている。一方、自転車通行空間評価におけるストレス計測手法について鈴木(弘)ら⁷⁾はLP面積という指標を用いての評価を試みている。この研究においては、目的変数にLP面積から算出するSLv(ストレスレベル)を設定し、外部要因を説明変数に設定した重回帰分析を行っている。しかし、得られた結果については重相関係数が低く、有意であると判断された説明変数についても自転車通行空間と照合させて考えると合理的解釈が難しい点がある。また、自転車利用者のストレス計測についてはペダルをこぐ動作による運動が、RRIに影響を与えるため、ストレス計測の際、他の交通と比べ特有の難しさがある。

以上を踏まえ、自転車通行空間評価手法として展開するためには、評価結果に合理性が必要不可欠であると考え、本研究においては既存研究において有用性が確認されているTSVの考え方に基づいたストレス量という指標を用いて自転車通行空間の評価を行うこととした。

3. 自転車問題におけるストレス評価の適用場面

交通環境を評価するための手法としては様々なものが存在する。代表的なものとしては意識調査や観察調査が挙げられる。一方、生体反応の一つである心拍間隔を用いたストレス計測手法は反応を実時間で記録できるため、心理活動を時間経過によって分析することができることや意識では求められない刺激を抽出することができるなどの利点が挙げられ、様々な現象が断続的に発生する自転車通行空間においても、ストレス計測手法を用いることは有用であると考えられる。自転車利用者が緊張や不

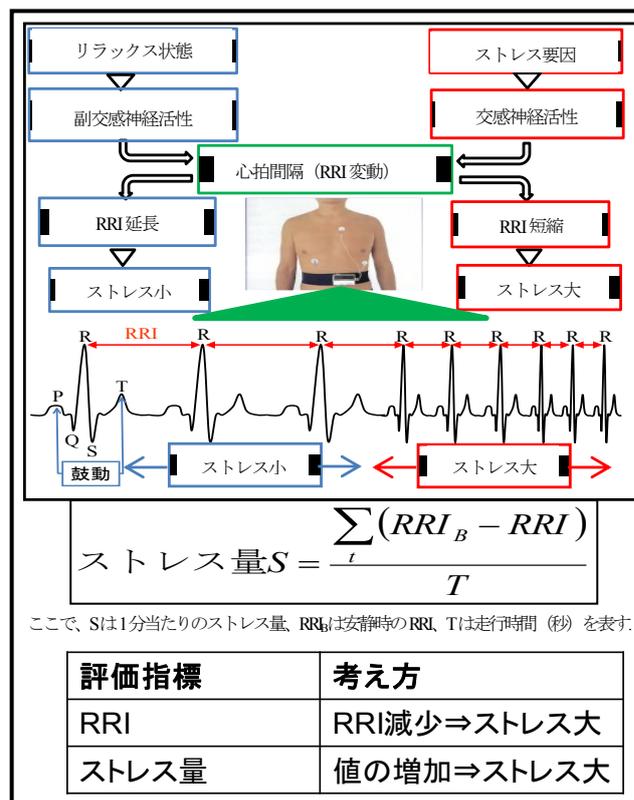


図-1 ストレス計測手法の概要

安などのストレスを極度に感じる自転車走行環境は、安全・安心・快適な観点からは望ましくない。このような自転車問題におけるストレス評価の適用場面は以下のように考えることができる。

- ① 走行空間の局所的な問題個所の発見
自転車利用者にはストレスを与える段差や幅員、障害物といった局所的な問題個所を特定し、改善に役立てることが期待できる。
- ② 自転車通行帯としての評価
ストレスを用いることによって自転車通行帯を評価し、通行帯選択を説明することが期待できる。通行帯選択を説明する仮説として、通常これまでは効用最大化や満足度最大化を仮定し、その説明要因として施設現況や交通状況、個人属性が用いられてきた。新たな仮説としてストレス最小化を仮定する。すなわち自転車通行帯選択において人々はストレスを最小化する通行帯を選択するあるいはストレスを最小化する施設整備が良い仮定するものである。
- ③ 自転車ネットワークとしての評価
単路と交差点が連続したネットワークを評価し、ネットワークの妥当性を評価することが期待できる。
- ④ 多様な利用者からの道路空間の総合的評価
自転車利用者以外の歩行者や自動車等他者のストレスを総合化して道路空間を評価し、最適な道

路空間（コンプリートストリート）のあり方を検討することが期待できる。

4. 自転車利用者のストレス計測の方法

(1) 自転車利用者のストレスの原因

既存文献とブレインストーミングによる調査から、生理指標に影響を与える要因のうち自転車交通に関係のある要因を中心にまとめたものを図-2に示す。自転車走行時のストレスを対象とする場合、特に自転車の操作やペダルを漕ぐ動作(ペダリング)による身体的負荷に起因する心拍変動の取り扱いに注意する必要がある。

(2) 計測機器の計測精度

ストレス計測手法に用いる一般的な機器として、アクティブトレーサーAC-301A（株式会社GMS製）とRS800CX MULTI（POLAR社製）がある。前者は有線で計測精度は高いが高価でもある。後者は無線で小型・安価であり使用の簡便性という観点からは優れているが、無線であるため周辺環境によってノイズが発生する可能性がある。

筆者らがこれまで行ってきた路外の実道路での計測の場合には、これらの機器はほぼ同一の値を計測していることが確認され、心拍間隔計測においてこの2つの機器を併用して使用しても結果に大きな差が生じる可能性は非常に低く、併用の妥当性は確保されていると考えられる。ただし、無線式の場合には交差点付近等において何らかの障害によりノイズが発生する場合が少なくない。この場合には、RRI変動を見ればノイズの発見は容易であるため、調査目的に応じて適切な計測機器を用いることが必要である。

(3) ストレス計測の方法

① 基礎情報の取得

ストレス計測の前段階として、体調のすぐれない被験者が調査に参加することを防ぐことを目的として体温、最高血圧、最低血圧、脈拍の簡易的な計測を行う。

② 座位安静時10分間RRI計測

RRIはその日の体調によって変動することが分かっている。したがって、その日のRRI変動の特徴を把握するために座位安静時10分間のRRI計測を行う。なお、この座位安静時10分間RRI計測の前5分から安静な状態を保つ。

③ 回送走行5分間RRI計測(ベースラインの設定)

回送走行時5分間のRRI計測を行う。回送走行

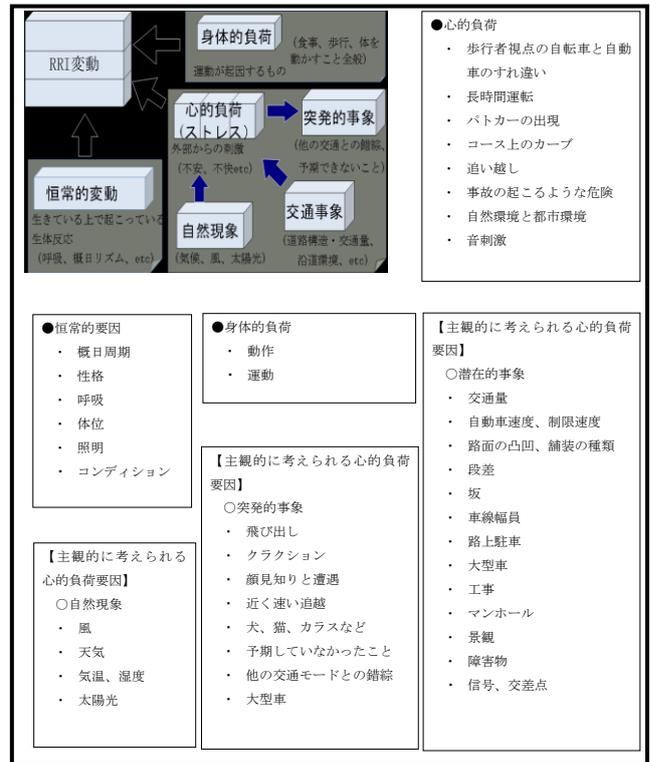


図-2 RRIの変動要因

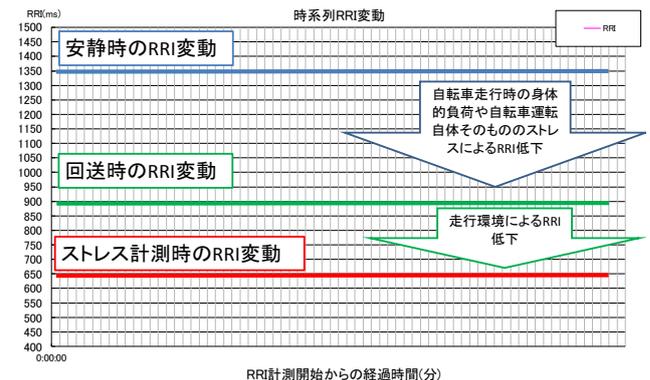


図-3 ストレスの考え方

とは、他の交通による干渉を受けない場所における走行を指す。自転車走行自体による身体的および心的負荷を把握するために計測を行う。回送走行5分間RRI計測の中央値をベースラインとし、平均ストレス量を算出することで、自転車走行による身体的および心的負荷を除去することができる。(図-3)

④ 調査地RRI計測

調査地にてRRI計測を行う。運動強度によるRRI変動を防ぐため、速度はできるだけ一定に保つことが望ましい。また、計測が長時間に及ぶ際は、疲労の影響を考慮し、休憩を入れることが必要である。本研究では、20分計測に対して5分の休憩を目安にしていた。

表-1 代表的なストレス評価指標

ストレス分析手法	概要	考え方
RRI 変動	時系列で RRI 変動を捉えることで分析	数値が減少=ストレス
RRI(中央値)	RRI 変動の一定時間の中央値を捉えることで分析	数値が減少=ストレス
TSV	負荷のない状態の RRI 等を基準とし 負荷時との乖離幅を区間で累積したストレスの総量	数値が増加=ストレス
平均ストレス量	TSV を区間の所要時間で除して 単位時間当たりのストレス量を算出したもの	数値が増加=ストレス
LP 面積	グラフの横軸に n 番目の RRI, 縦軸に n+1 番目の RRI を示したグラフの分布域の面積で解析	数値が減少=ストレス
LF/HF	RRI 変動スペクトルにおける低周波数域(LF)と 高周波数域(HF)の比率の算術平均値を解析	数値が増加=ストレス

⑤ 計測時刻の統一(起床時刻の統一)

RRI は 1 日の中でも変動することが分かっている。したがって、複数の日にまたいで、計測を行う際には、計測時刻を統一することが望ましいと考えられる。また、計測時刻だけでなく、起床時刻も統一する必要がある。日内変動を考慮する場合には厳密には起床からの経過時間を統一ことが本質であり、これらの時刻を統一することが望ましい。

⑥ 食事の有無の統一

食事によっても、RRI は変動する。これは消化活動が身体的な負荷になるためである。よって、食事についても複数の日にまたいで、あるいは午前と午後それぞれ計測を行う際には、計測前の食事の有無を統一する必要がある。

⑦ 調査時の気温

RRI は気温差による影響を受けることが本研究で確認された。本研究においては特に 15℃以下になると RRI の低下が顕著にみられ、15℃~25℃の間は RRI の変動が安定的であったことから 15℃~25℃の間の気温下で RRI 計測を行うことが望ましいと考える。

⑧ 調査地の縦断勾配

縦断勾配は自転車利用者の運動強度に大きな影響を与えることが分かっている。そのため縦断勾配によって RRI が変動し、ストレスを正確に算出することができなくなる可能性が高いため、縦断勾配が無い個所で RRI 計測を行う必要がある。

⑨ 風向・風速

本研究では、風向・風速による影響は検討していないが、自転車利用者が風の影響を受けることは容易に推測される。できる限り、無風に近い状態で RRI 計測を行うことが望ましい。

(4) 自転車のストレス指標

既存の研究においては心拍変動を分析する際の代表的なストレス指標として表-1 に示すものが挙げられている。

5. 自転車・歩行者の混在時のストレス計測

既存研究では、自動車や自転車、歩行者といった各交通モードの一つに着目して、そのストレスを計測し、その交通モードにとっての道路環境を評価した。しかしながら、実際問題として道路には多数の交通モードが混在しており各々の交通モードからの道路環境評価を総合化して包括的に道路空間を評価する必要がある。一方現段階では、計測された異なる交通モードの心拍変動を単純に比較したり足し合わせたりすることが合理的であるのかは明確ではないため、異なる交通モードのストレスを総合化する手法を確立する必要がある。すなわちストレス計測手法を用いて道路環境評価を行う場合、計測される各交通モードの心拍変動は道路環境から受けるストレス以前の操作性や運動負荷といったその交通モード固有のストレスサーがあるという点に注意し、この点をどのように総合的分析に反映させるかを検討しなければならない。

そこで本研究では、自転車、歩行者を取り上げて、ストレス計測手法を用いて自転車・歩行者混在時の道路環境評価を試行し、複数の交通モードが混在している道路空間を評価するための基礎的な知見を得ることとした。

(1) 異なる交通モードが混在する場合のストレス計測の留意点

歩行者・自転車の交通モードのストレス計測を行うにあたっては、対象とする交通手段固有の差異に起因する心拍変動の違いを考慮しなければならない。自転車では車両操作が与える心理的負担、また自転車ではペダルを漕ぐという運動により発生する身体的負荷、歩行者では歩行という運動により発生する身体的負荷を考慮しなけ

ればならない(図-4)。また、図-4の計測延長の考慮に示したように歩行者と自転車と自動車の交通速度が異なるため、同じ距離を歩行または走行しても計測時間の長さに差異が生じ、得られるデータ量(すなわちストレス量)に違いが発生する。このように複数交通のストレスを比較・総合化しようとする場合には各交通モードが持つ固有の心拍間隔変動要因の差異を踏まえて検討を進めなければならない。

(2) 歩行者・自転車混在時の歩行者と自転車のストレスの検討手法

混在時ストレス評価の第一段階として、対象とする歩行者・自転車・自動車の中でより速度差が小さく実験条件の設定が比較的容易な歩行者と自転車の混在時の両者のストレスを把握することを目的として、実験街路による検討を行った。

① 実験場所

実験場所は茨城大学構内に設置した実験街路である。実験街路の全長は100m、幅員2.0mであり、歩行時および自転車走行時に過剰な運動負荷が心拍変動に影響を与えることを避けるため縦断勾配がない箇所を実験街路として選定した(表-2)。

② 被験者と事前の準備

被験者は健康な男子大学生1名とした。使用する自転車は一般的なシティサイクル車である。心拍の計測機器はPOLER-800CXというワイヤレスタイプの心拍計を使用した。(図-5)

③ 実験条件の設定

複数交通が混在する時に、錯綜の状況(すれ違い・追い越し)と交通量が心拍変動にどのような影響を与えるかを把握するため、他の交通との錯綜状況と他の交通の交通量が異なる状況を設定した。具体的な錯綜パターンについては被験歩行者および被験自転車が他の交通とどのような形態で錯綜するかに焦点をあて、表-3に示す計8パターンの錯綜状況を設定した。交通量については、被験歩行者および被験自転車のみの状況を1ケース設定し、それ以外に表-4に挙げた5ケースを想定し、交通量を段階的に変化させることにより被験者がどの程度ストレスを感じるのかを把握できるようにした。

実験街路は被験者が実験街路を1往復するごとに交通状況の変更を行い、また疲労による影響を考慮し、1往復ごとに2分の休憩を入れた。交通状況については5ケース設定し、5ケース終了後、錯綜状況の変更を行った。

被験者には実験街路の左側を自由な速度で歩行

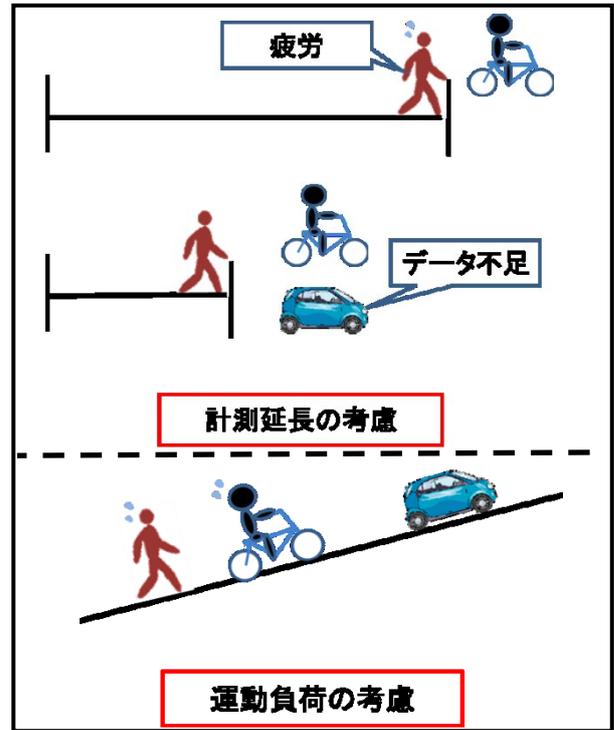


図-4 混在時評価の際の検討事項

表-2 実験概要

実験日	2013年5月9日
調査場所	茨城大学構内
被験者	健康な男子大学生1名
交通状況	8パターン40ケース
実験街路概要	



図-5 使用した自転車と POLER-800CX

および走行をしてもらった。ただし、追い越しの際は実験街路の中の右側を通行で統一した。

④ 分析の考え方とストレス指標

本実験では錯綜状況と交通量によるストレスを把握することを目的としているため、ストレス指標として平均ストレス量を用いることとした。この理由は、区間全体のストレスを評価対象として

いること、また 1 回分走行が短時間であるため周波数解析が困難であるためである。

平均ストレス量の算出にあたっては、図-7 の模式図に示すように、まず実験時に計測した RRI 値とベースライン（研究室における安静時 10 分間の中央値）との乖離幅を時間積分し、計測時 1 回分の全時間ストレス量を算出した。次に 1 ケース毎の全時間ストレス量から(i)式を用いて単位時間当たりの平均ストレス量を算出した。なお、ストレス量を算出する際のベースラインとしては、心拍の日内変動の影響を除去するためには安静時ではなく調査直前の回送時 RRI 中央値を用いる方が望ましいと考えられる。

$$\text{平均ストレス量} S = \frac{\sum (RRI_B - RRI)}{T} \times 60 \quad \dots (i)$$

S : 1 分当たりのストレス量 RRI_B : 安静時の RRI

T : 1 ケースの走行時間 (秒)

(3) 混在時の歩行者と自転車のストレスの比較

- ① 実験街路を被験歩行者のみ、および被験自転車のみで通行した場合のストレス量を下の図-7 に示す。結果が示すように歩行者と自転車は身体的負荷等の違いから同じ通行環境においてもストレス量には違いが発生するため、分析の際には注意が必要であることが確認できた。
- ② 図-8 と図-11 の比較や図-10 と図-15 の比較により、他の交通と混在している状況の方が、同一の交通のみの場合よりもストレス量が大きくなる傾向がある。これより、歩行者は歩行者のみの通行空間、自転車は自転車のみの走行空間を通行する方がよりストレスが小さいということが推測できる。さらに図-8 と図-15 のストレス量の絶対値を比較すると、歩行者が自転車に対して感じるストレスの方が自転車が歩行者に対して感じるストレスより大きくなっており、より立場の弱い交通がより立場の強い交通から受けるストレスと、より立場の強い交通がより立場の弱い交通から受けるストレスを比較すると、前者のストレスの方が大きいと推察できる。
- ③ すれ違いに関しては被験者が歩行者の場合も自転車の場合も、すれ違う相手方の交通量が増えるとストレス量も大きくなるという傾向が若干見られる (図-8, 図-10, 図-11) 。一方で、追い越しの場合、または追い越される場合には、他交通の有無によってストレス量が左右されており、交通量の違いによるストレス量の変化は認められない (図-9, 図-13, 図-14) 。この理由は、歩行者も自転車も他交通とすれ違う場合には、前方に他者の存在

表-3 設定した錯綜状況

錯綜パターン	錯綜状況
パターン1	被験歩行者と自転車のすれ違い
パターン2	被験歩行者を自転車が追い越す
パターン3	被験歩行者と歩行者のすれ違い
パターン4	被験自転車と自転車のすれ違い
パターン5	自転車が被験自転車を追い越す
パターン6	被験自転車が自転車を追い越す
パターン7	被験自転車が歩行者を追い越す
パターン8	被験自転車と歩行者のすれ違い

表-4 設定した交通状況

交通量ケース	状況
ケース1	被験者以外の交通が1人または1台
ケース2	被験者以外の交通が2人または2台
ケース3	被験者以外の交通が3人または3台
ケース4	被験者以外の交通が5人または5台
ケース5	被験者以外の交通が8人または8台



図-6 調査の様子

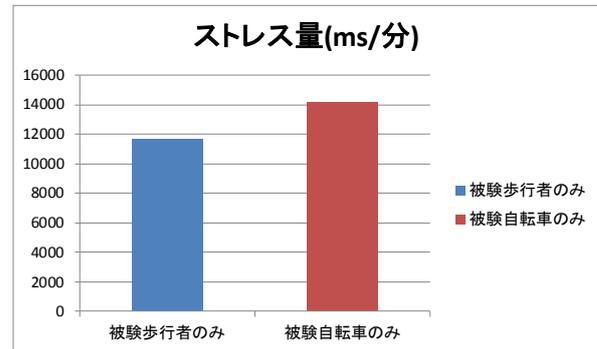


図-7 対象空間を被験者のみが歩行および走行した際の平均ストレス量

を認識している状況にありすれ違い度にストレスを受けると考えることができ、追い越しの場合にはストレス要因を視覚的にとらえることができないために常に一定のストレスを受けている状況にあると考えることができる。

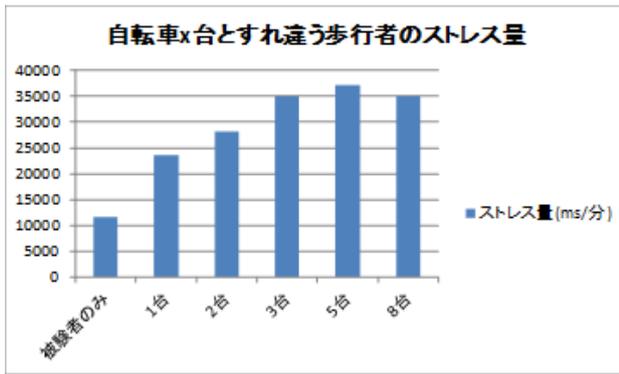


図-8 自転車とすれ違う歩行者の平均ストレス

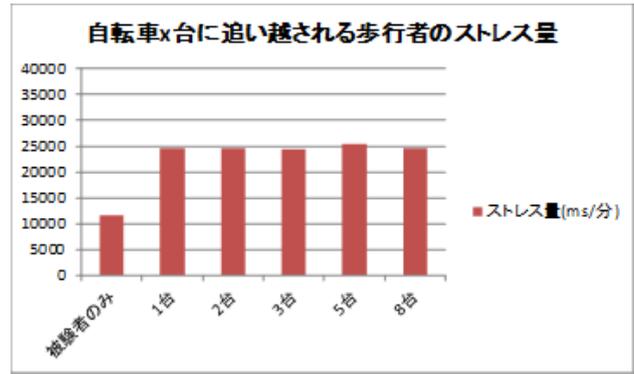


図-9 自転車に追い越される歩行者の平均ストレス

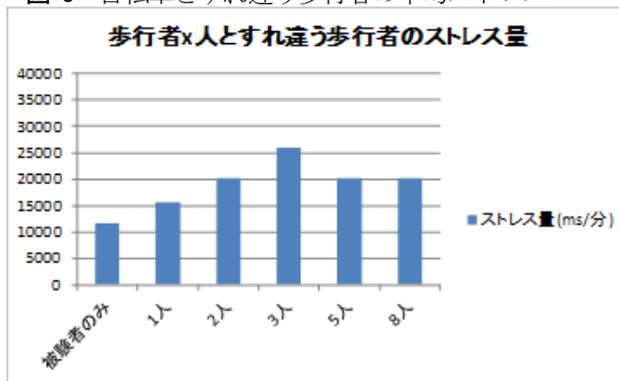


図-10 歩行者とすれ違う歩行者の平均ストレス

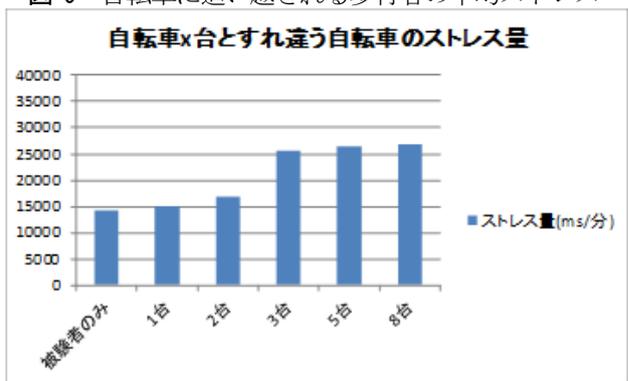
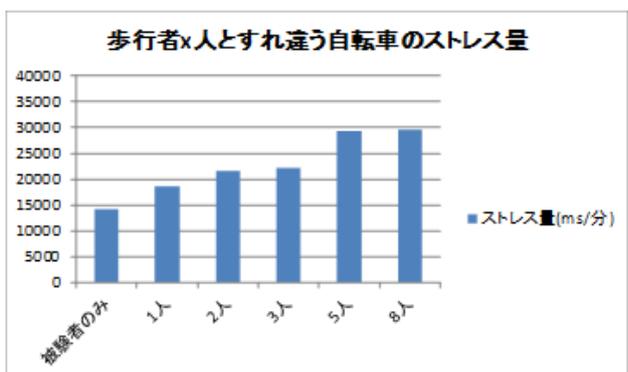
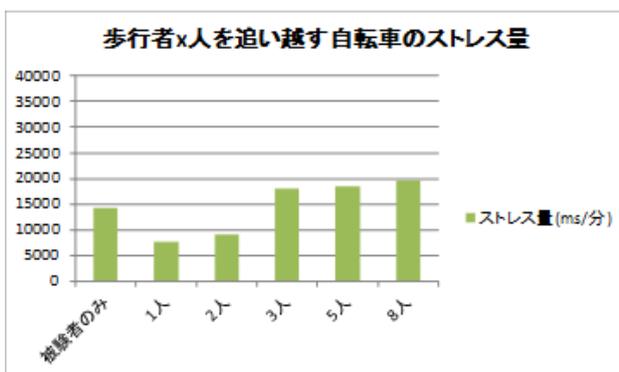
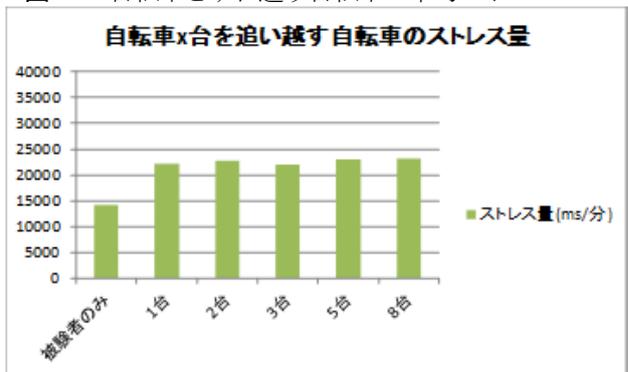
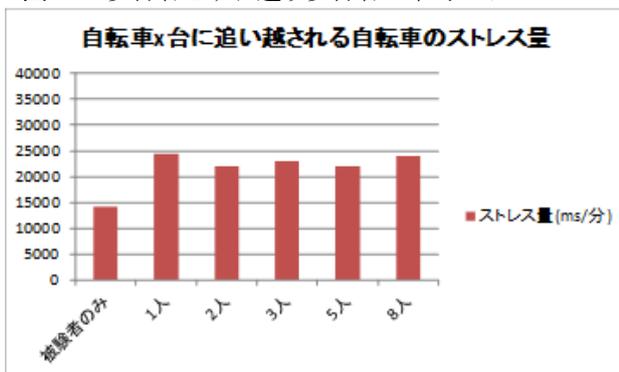


図-11 自転車とすれ違う自転車の平均ストレス



6. まとめ

歩行者・自転車・自動車という異なる交通モードが混在する場合のストレスを検討した結果、異なる交通モードと混在している状況の方が、同一交通モードのみの状況よりストレスが大きいという結果が得られた。この結果より、歩行者は歩行者のみの通行空間、自転車は自転車だけの走行空間を通行する方がよりストレスが小さいということが言える。さらに歩行者が自転車に対して感じるストレスの方が、自転車が歩行者に対して感じるストレスより大きいという結果が得られ、より立場の弱い交通が、より強い交通に対してストレスを受けやすいこと推察できた。また、瞬間ストレスからみた場合、歩行者と自転車の視点では、両者とも自転車が歩道を走行するより車道走行の方がストレスが小さくなった。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局地方道・環境課、警察庁交通局交通規制課：「自転車利用環境整備ガイドブック」(2010).
- 2) 国土交通省・警察庁：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン(2012)
- 3) 金利昭：自転車利用者の満足度を用いた自転車レーンの評価とサービス水準の設定，都市計画論文集，No.44-3，pp.91-96,(2009)
- 4) 藤澤清, 柿木昇治, 山崎勝男編「新生理心理学」北大路書房(1998)
- 5) 鹿島茂，武田超：「通勤ストレスの定量化手法に関する研究」運輸政策機構学術研究論文 vol.11 No.4 2009 Winter
- 6) 石田真二，武田超，白川龍生，鹿島茂：「鉄道サービスにおけるストレス軽減効果の検証」運輸政策機構学術研究論文 Vol.15.No2. 2012 Summer.
- 7) 鈴木弘司，今井克寿，藤田素弘「心拍変動を用いた自転車利用者の幹線街路評価に関する研究」土木計画学研究・論文集 第30巻，I_857-I_867(2013)
- 9) 日本道路協会：「自転車利用環境整備のためのキーポイント」(2013).
- 10) 渋谷大地，金利昭：「自転車走行空間に係わる三つの評価手法の適用性に関する研究—BCC・満足度評価・ストレス計測手法の比較—」第45回土木計画学研究発表会・講演集 309,CD-ROM(2012)
- 11) 金利昭：「自転車走行空間に係わる三つの評価手法の適用性比較—BCC・満足度評価・ストレス計測手法—」機関誌交通工学 Vol.47, No.4, pp.10-15(2012)

Study on the Biological Stress Measurement of Cyclist
Toshiaki KIN and Daichi SHIBUYA