

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560162

研究課題名(和文) 走行車両に作用する風速変動に基づく横転回避情報システムの構築

研究課題名(英文) Development of system to provide information for avoiding overturn based on crosswind fluctuation acting on moving vehicle

研究代表者

白土 博通 (SHIRATO, Hiromichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70150323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：強風時の走行車両の横転事故に対する安全性向上のため、横転警戒区間を通行する大型車の運転者に事前に安全走行速度情報を伝達するシステム構築を目的とする。走行車両が受ける風速変動の閾値超過確率は車両に対する相対風向に依存し、向かい風の方が閾値超過確率が増加することが明らかとなった。横風を急に受ける場合、横力は相対風速、風向に応じて準定常的な変化を示す一方、ヨーイングモーメントは顕著なオーバーシュートが発生した。ソフトコンピューティングによる短期的強風予測を構築し、数分先の平均風速予測は一定の精度を期待できることが示された。以上より横風による車両横転の警報システムの基本構成がほぼ完成した。

研究成果の概要(英文)：In order to assure the safety of a moving vehicle for overturning due to crosswinds, this study aims to develop a system to provide an information of safety driving speed to a truck driver before entering severe wind condition. It was found that: (1) the upcrossing rate of relative wind speed for an moving vehicle depends sensitively on the relative wind direction, and the rate increases in case of against relative wind direction. (2) When a vehicle encounters sudden crosswind, the side force on a vehicle shows quasi-static response which is determined relative wind speed and direction in each instance. On the contrary, there is significant overshoot in the yawing moment response. (3) The short-term wind speed prediction is developed by soft computing technique, which enables to predict average wind speed in several minutes future with a certain level of accuracy.

研究分野：風工学，構造工学

キーワード：横風 横転 規制風速 短期風況予測 閾値超過確率 オーバーシュート 横力 ヨーイングモーメント

## 1. 研究開始当初の背景

強風時に橋梁上を走行する幌付きトラックが横転する事故が後を絶たず、安全確保のための対策が求められている。強風時の交通規制風速を下げる対策は、通行止などの規制の頻度が増加し、供用サービスの低下に直結する。また、防風柵はとくに長大橋梁では動的耐風安定性を損なう可能性が懸念されるため、設置を見送らざるを得ず効果的な安全対策が見出せない状況にある。

走行車両に作用する風圧力(空気力)に関する研究は自動車産業の成長と共に1960年代より既に活発化し、地面を走行速度に等しい速度で動かすmoving beltを導入し、実物の自動車車両と共に全体を大型の風洞に設置する大型実験設備を用いた実験や、屋外に大型送風機を設置した横風実車試験も行われている。これらの研究は走行安全性を目的とする車両の開発に関わるものであり、主として機械工学分野で発展してきた。一方、自然の風況評価も含む実際の交通安全を目的とする研究は自動車、鉄道分野をはじめ、土木、風工学分野で実績があるものの、上記の車両開発研究に比べれば比較的新しい課題として位置づけられる。

自然風中を移動する走行車両が受ける風速は、自身の走行速度より決まる進行方向正面からの相対風速と、走行地点に吹く自然風の風速の2つの成分より成る。前者の走行速度(相対風速)は時間変動が少なくほぼ一定とみなすことができる。一方、後者(自然風)は時間的・空間的両面の風速変動を有し、かつ付近の地形や橋梁構造部材による局所的な非一様性も含む場合が多い。アーチ橋のアーチリブや吊橋主塔近傍を走行する車両が急にハンドルを取られる現象はその例である。強風による走行車両横転に対するより精緻かつ合理的な安全対策を構築するためには、以上の風速変動特性と車両に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

横風による車両横転事故のリスク評価を、横転限界風速を超過する閾値通過問題として捉えた場合、上述の走行中の車両が実際に受ける風速変動の確率統計特性がその基となる。また風速分布の局所的な非一様性に起因して相対風速が急変する際の車両に作用する空気力の非正常性(過渡特性)も通行規制風速レベルの決定に含むべき項目として検討が必要である。さらに、運転者に横転回避に必要な安全走行速度情報を発するためには、車両が橋梁を通過する以前に伝達しなければならず、情報発信時より車両が警戒区間を通過するまで風速が急増しないことも条件に含めるべきであり、短期的強風予測技術の併用が重要である。

## 2. 研究の目的

強風時の走行車両の横転事故に対する安全性向上のため、海峡部の橋梁上や地形的特徴から決まる警戒区間を通行する大型車の

運転者に事前に安全走行速度情報を伝達し、当該路線の道路交通規制発令と併用することにより、供用サービスの向上と横転に対する安全性向上の両面に資することを目的とする。本研究では、通行規制の発令前の風による横転事故原因として従来検討されていなかった、走行車両が受ける風速変動の確率分布に基づく風速の閾値通過問題として風速レベル超過確率を求め、構造部材や近隣地形等による局所的な風速の非一様区間を通過する車体が受ける風圧力(空気力)の非正常性を考慮し、ソフトコンピューティングによる警戒区間通過時間中の風速変化を含む短期的強風予測を導入した横転回避情報システムの構築を試みるものである。

## 3. 研究の方法

本研究の検討項目は以下の通りである。

A) 移動測点の風速変動性状の把握(風洞実験)

風洞内の格子乱流場を一定の速度で移動する風速計が検出する風速変動の確率分布、閾値超過確率を主風向と風速計の移動方向との相対角度ごとに調査し、その依存性を明らかにする。

B) 移動車両が受ける風速変動性状の把握(実車観測)

実際の橋梁上の定点で観測される風向、風速記録、およびこれと同時に同一橋梁上を一定速度で走行する移動観測車両上で観測される風向、風速記録について、その変動性状、風速値、車両速度の影響等を検討する。

C) 高重心車両の突風による非正常空気力特性の把握(風洞実験)

大型トラックを単純化した直方体模型を一定速度で移動させ、横風区間に突入する際に車体に作用する空気力(横力、ヨーイングモーメント)を風洞実験により計測し、その非正常性、オーバーシュートの有無等を明らかにする。

D) 橋梁上の風速場の短期的予測法の構築(数値解析)

数分先の橋梁上の風速についてカオス理論、およびニューラルネットワークによる予測を試み、その精度について検討する。

E) 横風横転回避システムの構築

以上の結果を総合し、横風による走行車両横転を回避するための事前警報システムを構築する。

## 4. 研究成果

3. の各項目ごとに得られた成果の概要を以下に示す。

A) 移動測点の風速変動性状の把握(風洞実験)

風洞内に生成された格子乱流中で熱線流速計プローブを風洞中央点で固定した計測、および風洞主流直角方向に対して0[deg]、45[deg]の方向に移動速度1.0[m/s]で熱線流速計プローブを移動させた計測の両者を実施

した．45[deg]のケースでは，風洞主流方向の風を追い風として受ける場合，向かい風として受ける場合の2ケースを測定した．風洞設定風速は0.7[m/s] ,0.8[m/s] ,1.0[m/s] ,1.5[m/s] ,2.0[m/s]とした．

図-1, 2 に風洞風速と熱線流速計プローブの移動速度のベクトル合成和 $U$ 及び $U$ の時間微分 $dU/dt$ の標準偏差 $\sigma_U, \sigma_{dU/dt}$ を示す．横軸は風洞風速である．これより固定点で計測した場合よりも，0[deg]や45[deg]向かい風状態で移動させた時に風速変動の乱れが小さくなるのがわかる．また風速の時間微分の乱れについては，45[deg]追い風時に値が小さくなることが示された．車両横転に関するリスクを検討する際，風速のベクトル合成和とともに，車両の進行方向に対する相対風向により，車両に作用する横力が決定されるが，とくに $\sigma_{dU/dt}$ の相対風向による違いは，閾値超過確率が相対風向に依存することを示すものであり，留意すべき特性と言える．

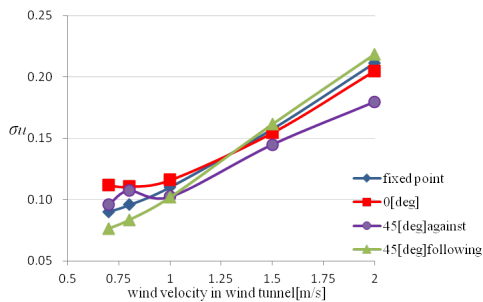


図-1  $\sigma_U$ の相対風向，主風速依存性

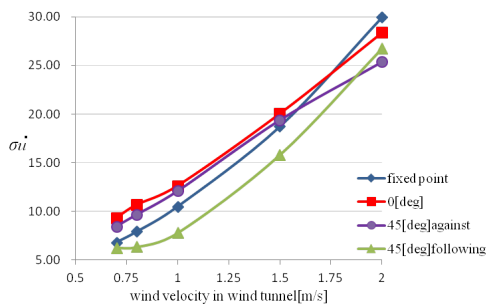


図-2  $\sigma_{dU/dt}$ の相対風向，主風速依存性

移動車両が受ける風速 $U$ の時系列を正規分布確率過程とみなし， $U$ と $dU/dt$ の2次元同時確率密度関数より単位時間内に閾値 $a$ を正勾配で通過する回数 $v^+(a)$ は

$$v^+(a) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{U}}}{\sigma_U} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_U^2}\right) = v^+(0) \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_U^2}\right) \quad (2)$$

と求められる． $v^+(0)$ は風速の平均値を上向きに通過する回数である．図-3 に平均値通過回数 $v^+(0)$ を示す． $v^+(a)$ は $a$ の増加により減少するが平均風速による $v^+(a)$ の変化の傾向はほぼ一定であったため，平均値の超過回数 $v^+(0)$ で代表させている． $v^+(0)$ が大きいほど風速が

閾値超過する可能性が高くなるため，静止時と比べ0[deg]や45[deg]向かい風で走行する時の転倒確率が追い風に比べて上昇することが明らかとなった．

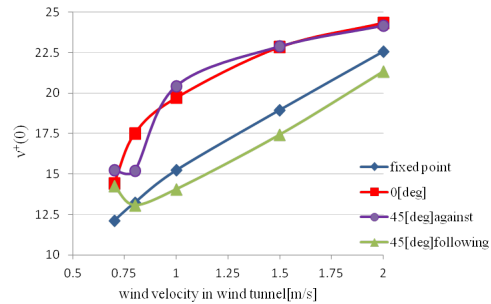


図-3  $v^+(0)$ の相対風向，主風速依存性

### B) 移動車両が受ける風速変動性状の把握 (実車観測)

図-4 は本州四国連絡橋大三島橋で観測された風速の定点観測，移動車両観測の時系列波形の一例を示す．2つの鉛直破線間が移動観測車両が橋梁上を通過中の時間帯を表す．橋梁上を通過中に移動車両が観測した風速は，定点観測値と車両速度との合成風速と概ね等しく，走行中の車両に作用する風速の概略値は定点観測と走行速度より評価が可能と判断されるが，瞬間的に後者が前者を上回っており，アーチリブ等の構造部材による影響と考えられる．

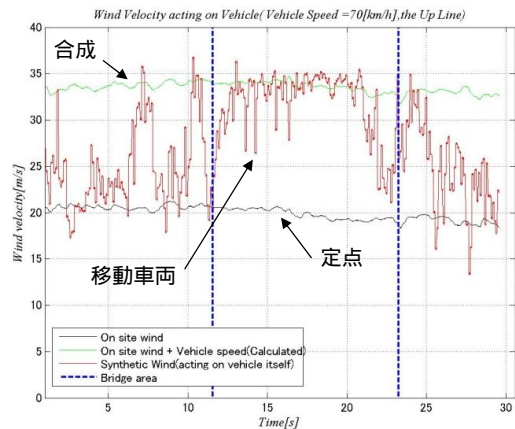


図-4 橋梁上の定点観測記録と移動車両観測記録の比較 (車両走行速度 70km/h)

図-5 は，別途風洞実験および数値流体解析より相対風向ごとに得られた大型トラックを模擬した直方体に作用する横力をもとに，定点観測の風速(縦軸)，風向(横軸)を両軸とする平面上で横転限界(図中の凹型曲線)と風速，風向時刻歴をプロットしたものである．図より，車両の進行方向により相対風向が異なることから，横転に対する風速の余裕度も上下線で異なることが明らかであり，海峡部の橋梁上のように，風向の変動があまり大きくなく，ほぼ一定の風向が卓越する地点では，上下線で別個に交通規制を定めることも可能と言える．

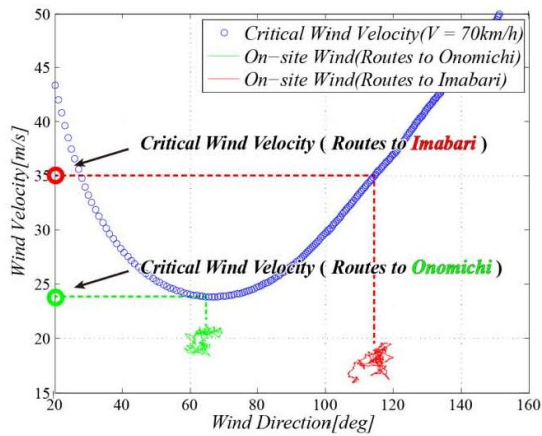


図-5 上下線の横転余裕度の違い

C) 高重心車両の突風による非常空空気力特性の把握 (風洞実験)

一定速度で移動する直方体モデルが横風区間に突入する際の横力, ヨーイングモーメントの時間変化を計測した。横風の風向はモデル進行方向に対して直角であり, 風速の空間分布はほぼ一様である。モデル下面側には地面を模擬した平板が設置されており, モデルに触れぬよう横風用風洞に固定されている。図-6, 7に横力, ヨーイングモーメントの時系列の一例をそれぞれ示す。横風風速(図

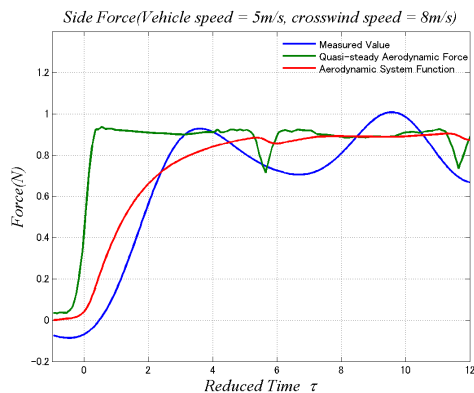


図-6 横風区間突入時の横力の時間変化

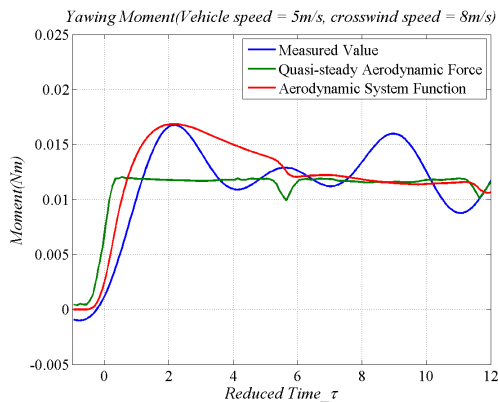


図-7 横風区間突入時のヨーイングモーメントの時間変化

中緑線)は横風区間に入る瞬間に急激に立ち上がるのに対して, 横力(青線)は時間遅れを示しつつ, 徐々に定常値へ漸近する。一方, ヨーイングモーメントは定常値を超えるオーバーシュートを示すことが明らかとなり, 既往の研究と一致する結果が得られた。図中の赤線は横風風速の空間分布が完全なステップ関数上の場合の空気力の時間変化を数学的手法により推定したものである。とくにヨーイングモーメントのオーバーシュートは急激な横風を受ける際の車両の蛇行の原因と考えられることから, 走行安全性の確保の観点からより詳細な検討が必要と判断される。

D) 橋梁上の風速場の短期的予測法の構築 (数値解析)

ソフトコンピューティング手法のうち, カオス時系列予測およびニューラルネットワークを用いた風速, 風向の短期予測を構築した。図-8にその一例として5分先の5分間平均風速値を逐次予測し, 実測値と比較した時系列を示す。図のように5分程度の短期予測は良好な予測精度が期待できることが明らかとなった。風向についても同様の予測精度が得られた。横転回避情報を事前に運転者に伝達するためには, 直近の情報ではなく, 周囲の走行車両との車間距離を保ちつつ, 減速や車線変更などの運転行動に十分時間的余裕をもった伝達が肝要であり, より長時間先の予測にも一定の精度を有する予測の確立が必要と考えられる。さらに, 予測値が実際の風速値を下回る過小予測(見逃し)は信頼性を損なうものであり, 逆に過大予測も必要以上の警戒情報の伝達を招くため, 両者の発生率を抑える予測法の検討が実用化へ向けた次の課題と言える。

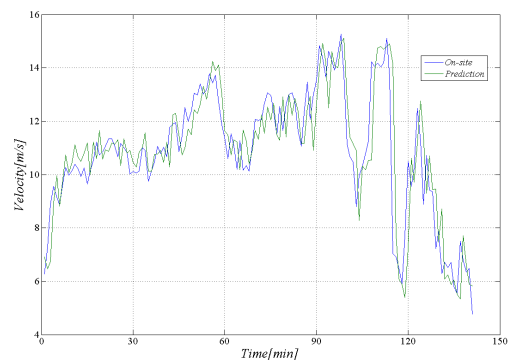


図-8 ソフトコンピューティング手法による風速の短期予測

E) 横風横転回避システムの構築

横転回避情報は, 事前に走行中の運転者に横転を回避するために必要な走行速度を示すことと捉え, 走行速度決定に至るプロセスを図-9に示す。横転事故が生じる地点は警戒地点として過去の横転事故発生状況から経

験的に知られることが多く、予め当該地点の風速、風向の観測が必要である。次いで様々な走行車両の形状に応じた空気力のデータベース、車速と車両重量の監視情報から、横転リスク曲線を短時間に決定し、平均風速、平均風向の短期予測値とリスク曲線間の余裕度から回避情報の決定に至る一連のシステムが想定される。前述 A)の閾値超過確率は、平均風速と横転限界風速との差を横転発生確率から予め決定する際に必要な情報となる。本研究により得られた各項目の基本的知見に基づき、実用化を目指した次のステップの研究開発へとつなげたい。

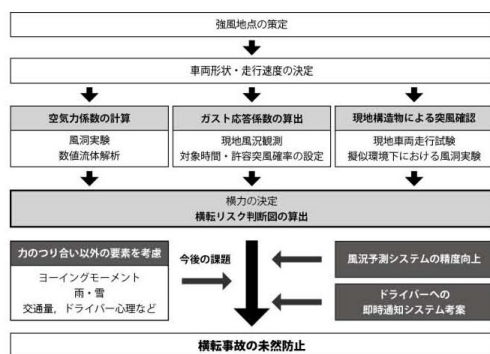


図-9 横風横転回避システムの概念図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- 1) 立花嵩, 和田光平, 白土博通, 服部洋, 八木知己: 車両横転事故防止を目的とした警戒システムの検討, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, pp.343-348, 2014 年 12 月

〔学会発表〕(計 9 件)

- 1) Hiromichi Shirato, Takashi Tachibana, Kohei Wada, Mitsuki Okamoto, Dongming Zhang, Tomomi Yagi and Hiroshi Hattori, Fundamental Study on Warning for Vehicles Overturning due to Crosswinds, The 14th International Conference on Wind Engineering, 21-26 June, 2015, Porto Alegre (Brazil)
- 2) 和田光平, 立花嵩, 岡本光生, 白土博通, 張東明, 八木知己: 横風下に走行車両に作用する空気力に関する研究, 平成 26 年度日本風工学会年次研究発表会, 2015 年 5 月 27 日 ~ 28 日, 徳島大学(徳島県徳島市)
- 3) Kohei Wada, Takashi Tachibana, Hiromichi Shirato: Construction of Warning System for Wind-induced vehicle accidents, The 27th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, 8-10 November, 2014, Tongji University (Shanghai, China)
- 4) 和田光平, 立花嵩, 白土博通, 八木知己, 服部洋: 風速予測を取り入れた車両横転警戒情報システムの考案, 土木学会第 69 回

年次学術講演会, I-251, 2014 年 9 月 10 日 ~ 12 日, 大阪大学(大阪府豊中市)

- 5) 和田光平, 立花嵩, 白土博通, 八木知己, 服部洋: 風速予測を用いた横転警戒情報システムの構築, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-58, 2014 年 5 月 31 日, 大阪産業大学(大阪府大東市)
- 6) Takashi Tachibana, Kenji Nakamura, Hiromichi Shirato and Tomomi Yagi: Experimental study on relative wind fluctuation on a running vehicle from statistical point of view, The 26th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Flash Memory, November, 2013, National University of Singapore (Singapore)
- 7) 立花嵩, 稲毛健至, 白土博通, 八木知己: 車両横転に関わる風速の閾値超過確率を考慮した通行規制風速設定法の提案, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-498, 2013 年 9 月, 日本大学(千葉県津田沼市)
- 8) 立花嵩, 稲毛健至, 白土博通, 八木知己: 風速の閾値超過確率を用いた車両通行規制風速設定法についての考察, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-47, 2013 年 6 月, 大阪市立大学(大阪府大阪市)
- 9) 立花嵩, 稲毛健至, 白土博通, 八木知己: 車両横転に関わる風速の閾値超過確率についての実験的考察, 平成 25 年度日本風工学会年次研究発表会, pp.145-146, 2013 年 5 月, 東北大学(宮城県仙台市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

白土 博通 (SHIRATO, Hiromichi)  
 京都大学・工学研究科・教授  
 研究者番号: 70150323

(2) 研究分担者

八木 知己 (YAGI, Tomomi)  
 京都大学・工学研究科・教授  
 研究者番号: 30293905

服部 洋 (HATTORI, Hiroshi)  
 研究者番号: 30576236