

ドクターヘリのダウンウォッシュが 高速道路走行車両に与える影響の検討

丸山 喜久¹・山崎 文雄²・用害 比呂之³・土屋 良之³

¹正会員 千葉大学助手 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yमारुやま@tu.chiba-u.ac.jp

²正会員 千葉大学教授 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

³正会員 中日本高速道路株式会社 中央研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:h.yogai.aa@c-nexco.co.jp, y.tsuchiya.aa@c-nexco.co.jp

高速道路で重大事故や大規模災害等が発生した場合、その負傷者が重傷である可能性が高く、ドクターヘリを活用することにより高い救命効果が期待できる。一方、ヘリコプターの離着陸に伴うダウンウォッシュと呼ばれる吹き下ろし風が原因となり、対向車線の走行車両が二次的な事故を起こしてしまうことが懸念されている。そこで、本研究では、建設中の第二東海自動車道（第二東名）においてドクターヘリのダウンウォッシュ風速の観測を行った。さらに、実車を用いた走行実験と数値解析により、ドクターヘリのダウンウォッシュが車両の走行安定性に与える影響について評価した。

Key Words : *helicopter, moving stability, vehicles, downwash, expressway*

1. はじめに

事故・急病や災害等の発生時に、消防機関・医療機関等からの要請に対し、直ちに医師等が同乗し、ヘリコプターで救急現場等に出勤する事業（以下「ドクターヘリ事業」という）は、搬送時間の短縮のみならず、救急医療に精通した医師が救急現場等から直ちに救命医療を開始し、高度な救急医療機関に至るまで連続的に必要な医療を行うことにより、救命率の向上や後遺症の軽減に大きな成果を上げることが期待されている。諸外国、とくにドイツではドクターヘリ事業が発達しており、15分以内の救急医療開始が実現されている。1970年のドクターヘリ運用開始時には、アウトバーンで年間2万人の交通事故死者数が出ていたが、15年間で死者が半減したと報告されている。また、アメリカでも交通事故による死者数の増加により、ドクターヘリが導入されるようになった¹⁾。

我が国では、1999年10月より岡山県の川崎医科大学と神奈川県東海大学でドクターヘリの試験運用が開始され、現在は10病院で運用されている。2004年度の出動件数は3300件を超えており、早期の救急医療対応に大きく貢献している¹⁾。2000年5月に消防防災ヘリが高速道路上に交通事故の負傷者搬送のため離着陸したことを契機と

して、ドクターヘリ及び消防防災ヘリが高速道路上に離着陸する場合における問題点とその対応について協議するため、警察庁、消防庁、厚生労働省、国土交通省などの関連省庁等による「高速道路におけるヘリコプターの活用に関する検討会」が発足し、2002年12月には「中間とりまとめ」が作成され、現在まで運用されてきた²⁾。

「中間とりまとめ」では、高速道路で重大事故や大規模災害等が発生した場合、その負傷者が重傷である可能性が高く、ドクターヘリを活用すると高い救命効果が期待できるとされている。一方、高速道路における走行車両の高速性から、ヘリコプターの離着陸に伴うダウンウォッシュと呼ばれる吹き下ろし風³⁾が対向（非事故）車線の走行車両に与える影響、非事故車線の走行車両の急減速や脇見運転等による交通事故の発生など、二次災害発生の危険性について考慮する必要があると指摘されている。このため、高速道路におけるヘリコプターの着陸場所としては、サービスエリア、パーキングエリアに設置されたヘリポートや駐車エリアなど、高速道路本線上以外の場所を選定することが望ましいとされている⁴⁾。しかしながら、救命医療では早期の救急対応が生死を分けることから、道路線形がヘリコプターの着陸を許容する条件（片側2車線または3車線）であれば、高速道路本線上にドクターヘリが着陸することが望ましく、我が国

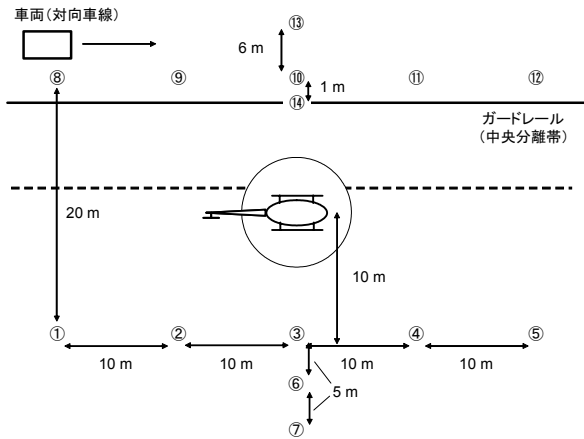


図-1 ヘリコプターのダウンウォッシュ風速観測状況 (○内は観測チャンネル番号)

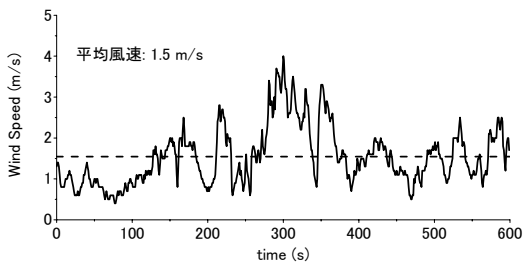


図-2 実験時の自然風の例

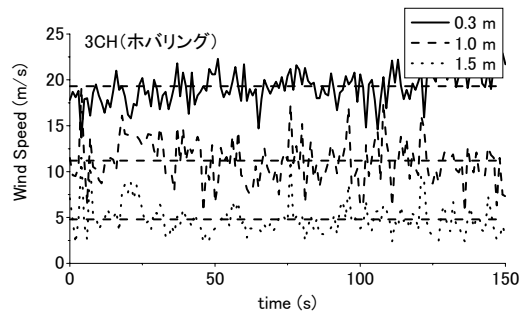
の高速道路における交通事故死者数の減少に大きく貢献できるものと考えられる。

そこで、本研究では、建設中の第二東海自動車道（第二東名）においてドクターヘリのダウンウォッシュ風速の観測実験を行った。さらに、ヘリコプターのホバリング中の実車走行実験を実施し、ドクターヘリのダウンウォッシュが車両の走行安定性に与える影響について評価した。また、丸山・山崎⁹⁾による横風時の運転者の反応と車両の運動の相互作用を考慮できる数値モデルを用いて、ダウンウォッシュが作用しているときの車両の走行軌跡を算出し、ドクターヘリが高速道路本線上に着陸した場合のダウンウォッシュが走行車両に与える影響について検討を行った。

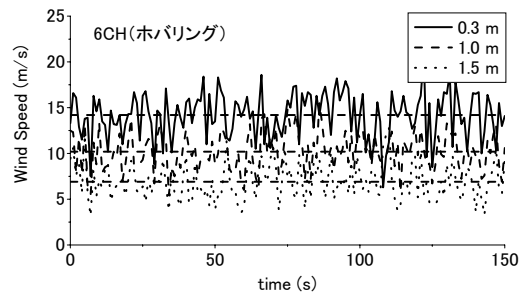
2. ダウンウォッシュ風速の観測

(1) 観測状況の概要

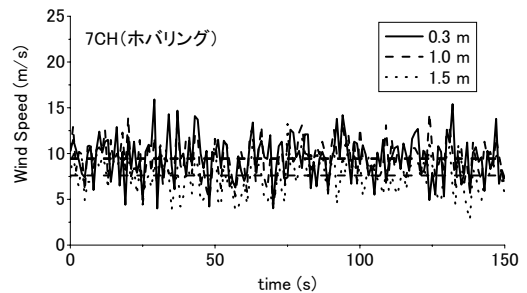
2005年5月28日第二東名（建設中）静岡サービスエリア（仮称）付近にて、午前10時から11時30分の間、ヘリコプターの離着陸、ホバリング時のダウンウォッシュ風速及び風向について観測実験を行った⁹⁾。使用したヘリコプターは、朝日航洋（株）が所有する川崎重工社製のBK117C-2型である⁷⁾。風速計は1箇所あたり高さ0.3m、



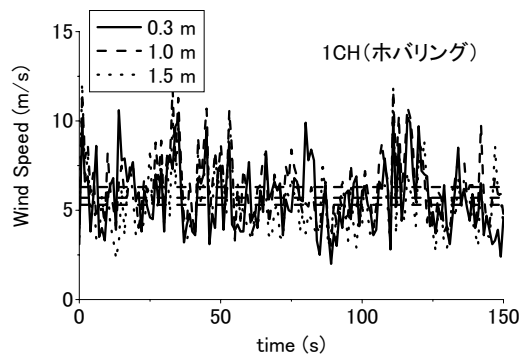
(a) 3CH (ローター中心より 10m)



(b) 6CH (ローター中心より 15m)



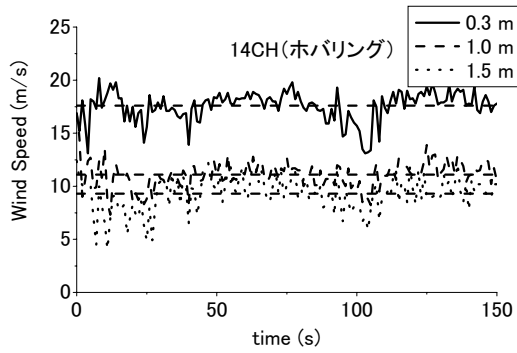
(c) 7CH (ローター中心より 20m)



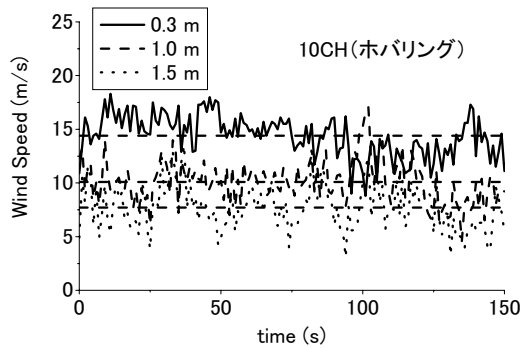
(d) 1CH (ローター中心より 22.4m)

図-3 ホバリング時のダウンウォッシュ風速（ガードレールなし）

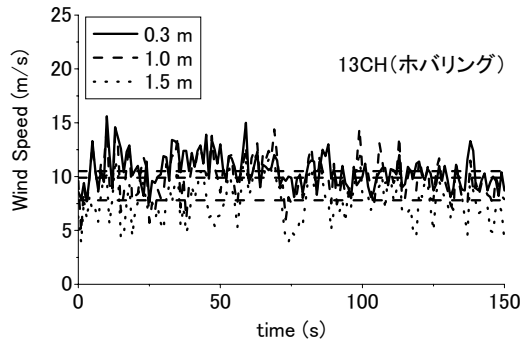
1.0m、1.5mの位置に設置し、風向計は高さ0.3mの位置に



(a) 14CH (ローター中心より9m)



(b) 10CH (ローター中心より10m)



(c) 13CH (ローター中心より16m)

図4 ホバリング時のダウンウォッシュ風速 (ガードレールあり)

設置した。風向計による観測データから、ダウンウォッシュがヘリコプターのローター中心よりほぼ放射状に形成されていることを確認した。ヘリコプターの着陸・ホバリング位置と風速計の設置位置は図-1に示すとおりである。ホバリング高度は1.5mである。高速道路の中央分離帯に設置されているガードレールがダウンウォッシュ風速に与える影響を検討するために、ガードレールのな

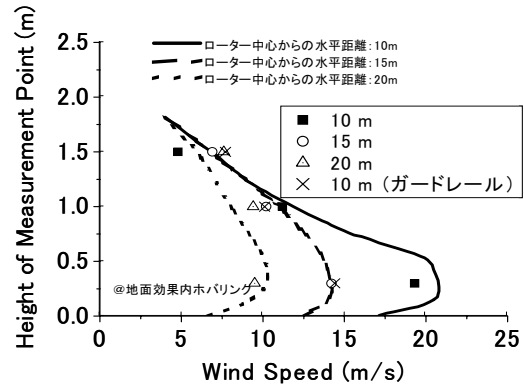


図5 文献⁹⁾をもとにした計算結果と本実験でのダウンウォッシュ風速観測結果の比較

い区間とある区間の2ケースでダウンウォッシュ風速を観測している。ガードレールは高速道路に最も多く設置されている形状のものを用いた(上端高さ1.15m, ビームの下端高さは0.85m)。図-1は、ガードレールのある区間でのヘリコプターと風速計の位置関係を示しているが、ガードレールのない区間でも図-1と同じ位置関係でダウンウォッシュ風速を観測した。実験中の自然風は、平均風速(10分間)1.5-2.4m/s, 北よりないし東よりの風でダウンウォッシュ風速に与える影響は小さいと考えられる状況であった(図-2)。なお、風速計が測定する風速の時間刻みは1秒である。後述の実車を用いた走行実験時には、風速計8CH~12CHは撤去した。

(2) ダウンウォッシュ風速の平均風速

図-3に、ガードレールの設置されていない場合に関して観測されたダウンウォッシュ風速を示す。図中では、ホバリング時150秒間のダウンウォッシュ風速を示している。図示した風速は図-1の3CH, 6CH, 7CH及び1CHで観測されたダウンウォッシュ風速であり、それぞれローター中心から10m, 15m, 20m, 22.4m離れている。ローター中心からの距離が10m, 15mのときは風速の観測点高さが大きくなるほどダウンウォッシュ平均風速が小さくなる傾向が見られる。ローター中心からの距離が大きくなるほどこの傾向は小さくなり、1CH(ローター中心から22.4m)で観測されたダウンウォッシュ風速では、観測点高さによる風速の違いはほとんど見られない。図-4に、ガードレールがある場合のダウンウォッシュ風速の観測結果を示す。図示した風速は、14CH, 10CH, 13CHのもので、ローター中心からの距離はそれぞれ9m, 10m, 16mである。14CHはガードレールの手前、10CHと13CHはヘリコプターから見てガードレールの向こう側にある。ガードレールがある場合についてもローター中心からの距離が大きくなるにつれて、観測点高さが風速の違いに与える影響は小さくなる傾向が見られる。

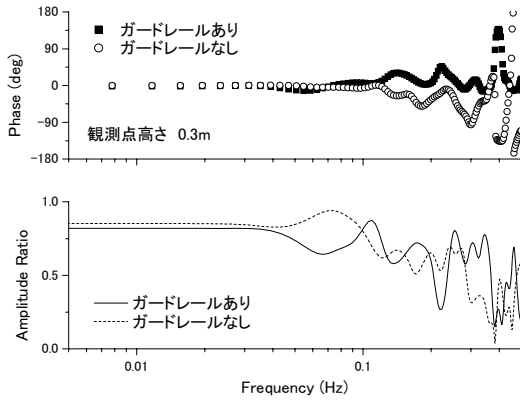
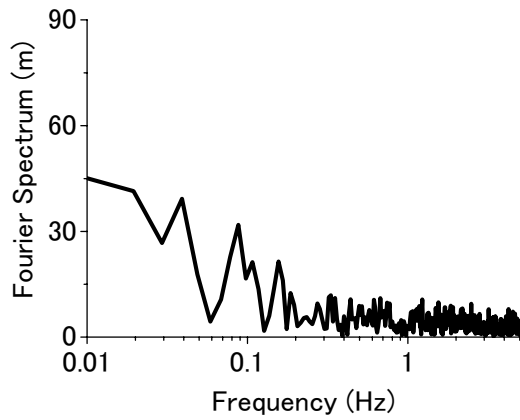
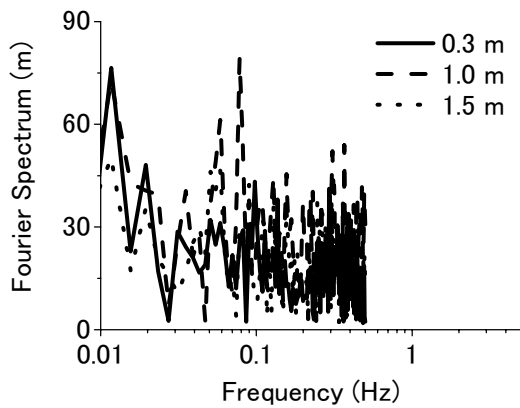


図-6 ダウンウォッシュ風速の伝達関数 (10CH/14CH)
(上:位相差, 下:振幅比)



(a) 竜ヶ崎飛行場 (JAXA 計測, $dt=0.1s$)



(b) 第二東名実験 ($dt=1s$)

図-7 ダウンウォッシュ風速の変動成分のフーリエスペクトル

O'Bryan⁸⁾は、ヘリコプターのダウンウォッシュ風速の高さ方向とローター中心からの距離に関する分布を、ローター直径、機体重量で無次元化している。これより、

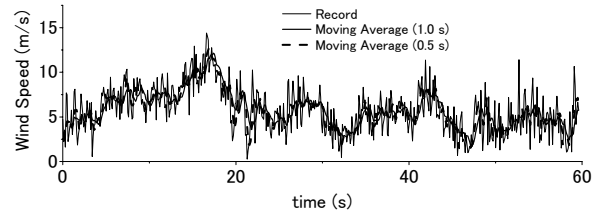


図-8 ダウンウォッシュ風速の平均化時間による変動の様子 (記録は時間刻み0.1秒)

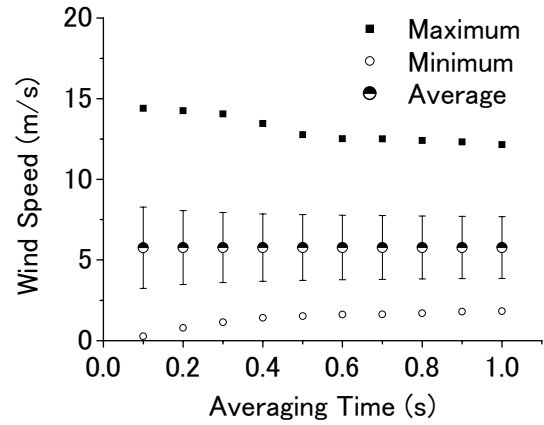


図-9 ダウンウォッシュ風速の平均化時間と最大・最小風速及び平均風速の関係

BK117C-2型の諸元を用いてダウンウォッシュ風速の分布を計算した。図-5に、計算結果と本実験での測定結果(ホバリング時のダウンウォッシュ平均風速)を比較する。これによると、両者の結果は良く整合性がとれていることが確認できる。前述の通り、ローター中心からの距離が大きくなるほど、ダウンウォッシュ風速は地上高さにあまり依存しない傾向がある。また、ガードレールがある場合にローター中心から10m離れた地点で観測されたダウンウォッシュ風速は、ガードレールのない場合のローター中心からの距離が15mのときの風速とほぼ一致している。このことから、ガードレールはダウンウォッシュ風速を低減する効果があり、その低減分は距離に換算すると約5mに対応するものと考えられる。

(3) ダウンウォッシュ変動風速の特徴

ガードレールがダウンウォッシュ風速の変動成分に与える影響をより詳細に検討するために、ガードレールの有無の場合それぞれに関して、ダウンウォッシュ変動風速の伝達関数(10CH/14CH)を計算した(図-6)。これによると、ガードレールがある場合、0.04~0.1Hzの振動数領域で振幅比がガードレールのない場合と比較して小さくなることが確認できる。ガードレールには、この振動数領域の成分の変動風速を低減する効果があるものと

事故発生車線 対向車線

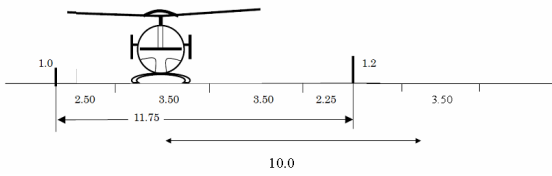


図-10 想定した高速道路本線上におけるドクターヘリの着陸状況

考えられる。

本実験では、時間刻み1秒の風速データを観測している。発達した乱流では、変動風速がカルマン型のパワースペクトルで近似できる⁹⁾ことや、10分平均風速に対して2秒間の風速記録は約1.5倍程度大きくなることが示されている¹⁰⁾。ダウンウォッシュの変動風速の特性を把握するために、ダウンウォッシュ風速値に観測時間刻みが与える影響について検討を行った。2004年10月24日に茨城県竜ヶ崎飛行場にて行われたダウンウォッシュ風速の観測実験では、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が超音波風速計を用いて時間刻み0.1秒の風速データを取得している¹¹⁾。実験には、JAXA実験用ヘリコプタ（三菱式MH2000A）を使用し、ホバリング高度は約18m（60ft）風速計測位置のローター中心からの距離は10m、地上高さは1.5mである。本実験でも、ダウンウォッシュ風速はヘリコプターのローター中心から放射状に形成されていたので、検討に用いる風速データはJAXAによって測定された2方向風速の合成値とした。

図-7に、JAXA計測のダウンウォッシュ風速の変動風速フーリエスペクトルと本実験の変動風速フーリエスペクトルを比較する。JAXAが計測したダウンウォッシュ風速のフーリエスペクトルには、振動数領域で0.2Hz以上の成分がほとんど含まれていない。第二東名で行われた本実験に関しては、ややフーリエ振幅に乱れがあるが、概ね0.01-0.2Hzの振動数領域の成分が支配的と考えられる。図-8に、JAXA計測のダウンウォッシュ風速（時間刻み0.1秒）と0.5秒、1.0秒を平均化時間とした風速の移動平均の様子を示す。また、図-9にダウンウォッシュ風速の平均化時間と最大値、最小値及び平均値±標準偏差の関係を示す。これによると、平均化時間が大きくなるほど、風速の最大値は減少し、最小値は増加するが、平均化時間が0.5秒～1.0秒の範囲では最大値、最小値にあまり違いは見られない。

後述の通り、車両が50km/hで走行しているときダウンウォッシュ風速の影響を受ける時間は約4秒、80km/hのときは約2秒かかる。このことから、車両にダウンウォッシュが作用する継続時間とダウンウォッシュ変動風速の時間刻みに対する変動特性をふまえると、1秒刻みの

表-1 ダウンウォッシュ下での実車走行試験一覧

| ケース名 | 車種 | 車速 (km/h) | ガードレール |
|------|--------|-----------|--------|
| 1 | カローラ | 50 | なし |
| 2 | タウンエース | | |
| 3 | カローラ | 50 | あり |
| 4 | タウンエース | | |
| 5 | カローラ | 80 | あり |
| 6 | タウンエース | | |

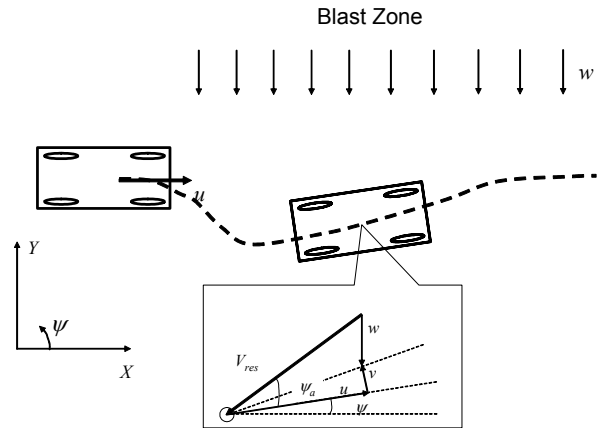


図-11 横風が作用したときの走行車両の様子

ダウンウォッシュ風速をもとに車両に作用する横風をモデル化し、走行車両の安定性の検討を行うことは適当であるものと考えられる。

3. 実車走行試験結果と2次予測モデルを用いた数値解析結果の比較

(1) 実車走行試験の概要

ヘリコプターのダウンウォッシュ観測実験時に実車走行試験も併せて行った。図-10に示すような高速道路本線上における着陸状況を想定した。ここでは、対向車線（非事故車線）を走行している車両に最も厳しい条件として、片側2車線の高速道路本線の中央にドクターヘリが着陸したと仮定し、ローター中心から10mの位置に車両の側面があるものとした。実験には、小型乗用車としてトヨタ・カローラ（1500cc）、ワンボックス車としてトヨタ・タウンエース（2000cc）を試験車両として用いた。実験車両の側面に染料の入った金属製のパイプを取り付け、マーカーで路面に走行軌跡を記録できるようにした。走行試験後に、2mピッチでマーカーで示された車両の横変位量を測定し走行軌跡とした。

走行試験には2名の運転者を用いて、表-1に示す6ケー

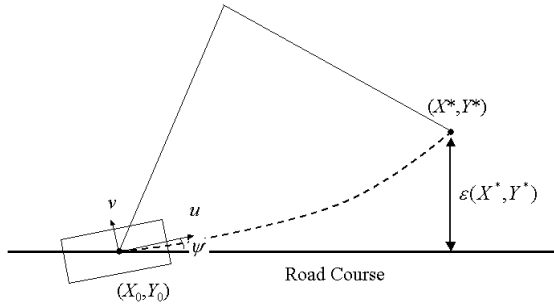


図-12 2次予測モデルの概要

スの走行実験を行った。高速道路本線上の中央分離帯には、ガードレールが設置されている。このことを踏まえて、実車試験ではガードレールが設置されている区間とされていない区間の両方で走行実験を行った。また、ドクターヘリ着陸時には速度規制を行う方向で検討されているので、車速は50km/h, 80km/hの2通りとした。車速80km/hのときは、ガードレールが設置されている区間でのみ走行実験を行った。

(2) 2次予測モデルによる運転者の反応を考慮した走行車両の横風応答解析

横風時の車両応答解析を行った。走行車両に作用する横風の様子を図-11に示す。このとき、車両には、横力とヨーイングモーメントが以下の式のように発生する¹²⁾。

$$Y_w = C_y \rho S \{u^2 + (v+w)^2\} / 2 \quad (1)$$

$$N_w = C_n \rho S (l_f + l_r) \{u^2 + (v+w)^2\} / 2 \quad (2)$$

ここで、 S は車両前面投影面積、 ρ は空気密度である。 l_f , l_r は、車両の重心から前輪、後輪までの距離を表す。 u , v は、車両の前後速度、横速度、 w は横風の風速である。 C_y は横力係数、 C_n はヨーイングモーメント係数であり、いずれも空力横滑り角 ψ_a の関数である(式(3))。

$$\psi_a \approx \arctan\left(\frac{v+w}{u}\right) \quad (3)$$

式(1), (2)で得られる空気力を車両の運動方程式に加え、横風時の走行車両の応答解析を行うこととした(式(4), (5))。空気力が作用することで、車両のロール運動とピッチ運動も生じる。これらの運動は乗り心地に影響する¹²⁾。本研究では、ダウンウォッシュが作用することによる車両の横変位量を評価することを目的としていることから、車両に働く空気力としては横力とヨーイングモーメントのみを考慮した。

$$m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = \sum_{i,j} F'_{yij} - Y_w \quad (4)$$

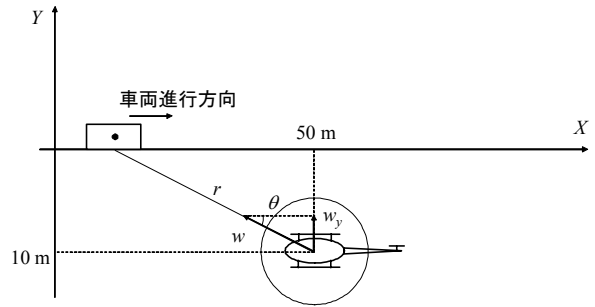


図-13 数値解析で仮定した走行車両とドクターヘリの位置関係

表-2 2次予測モデルにおける横風時の運転者反応に関するパラメータ値⁵⁾

| 車速 (km/h) | τ (s) | H (kgf) | T (s) |
|-----------|------------|---------|-------|
| 80 | 2.2 | 0.33 | 0.6 |
| 100 | 2 | 0.4 | 0.6 |
| 120 | 1.8 | 0.49 | 0.6 |

$$I_z \ddot{\psi} = (F'_{y11} + F'_{y12}) l_f - (F'_{y21} + F'_{y22}) l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12}) \frac{d}{2} + (-F'_{x21} + F'_{x22}) \frac{d}{2} - N_w \quad (5)$$

ここで、 F'_{xy} と F'_{yx} は各タイヤが生じる力(x成分およびy成分)でマジックフォーミュラモデル^{13),14)}によって算出される。

丸山・山崎¹⁵⁾は、吉本¹⁵⁾が提案した運転者と車両運動の相互作用を考慮する2次予測モデルの運転者反応に関するパラメータ値を、ドライビングシミュレータを用いた走行実験の結果をもとに適切に設定し、数値解析により車両の走行軌跡が精度良く再現されることを示している。2次予測モデルは、図-12に示すように、自動車が現位置 (X_0, Y_0) から将来 τ 秒間このまま走行した場合に到達する位置 (X^*, Y^*) は容易に予測できると仮定している。時刻 t 秒後の車両の予測位置は以下のように書ける。

$$X^* = X_0 + \int_0^{\tau} \{u \cos(\psi + \psi t) - v \sin(\psi + \psi t)\} dt \quad (6)$$

$$Y^* = Y_0 + \int_0^{\tau} \{u \sin(\psi + \psi t) + v \cos(\psi + \psi t)\} dt \quad (7)$$

ここで、 ψ は車両のヨー角である。以上により求められた予測位置と目標コースとの偏差 ϵ を算出する。この偏差に比例した修正操舵を運転者は行う(比例定数 H)ものと仮定し、運転者の出力を操舵力とする。また、運転者は修正を離散的に行うものと考え、動作のサンプリング周期を T 秒とした場合、人間の伝達遅れは $T/2$ 秒と等価になる。

得られた操舵力をもとに、式(8)からハンドル操舵角を算出する。

$$I_n \frac{d^2 A}{dt^2} + C_n \frac{dA}{dt} + K_{st} (nA - \delta_t) = \frac{fr}{n} \quad (8)$$

ここで、 I_n は操舵系の等価慣性能率、 n はステアリング角度比、 C_n は等価粘性係数、 K_{st} は等価弾性係数、 A はハンドル操舵角、 $f(=H\varepsilon)$ は運転者のハンドル操舵力、 r はステアリング半径である。これらのパラメータ値は、丸山・山崎⁹⁾が用いたものと同じ値に定めた。

以上より、二次予測モデルにおける運転者のパラメータは、ハンドル操舵比例定数 H 、予見時間 τ 、動作のサンプリング周期 T の3つである。人間の動作の時間遅れは約 0.3 秒であることから T は 0.6 秒以上とするのが妥当であるとしている。また、車速によらず系の特性を一定に保つには H を T^2 に比例して変化させればよいとされている¹⁵⁾。丸山・山崎⁹⁾がドライビングシミュレータを用いた走行実験により定めた運転者の反応に関するパラメータ値は表-2の通りである。

実車試験は、車速80km/hと50km/hの2通りの場合で行っている。車速80km/hのときの運転者反応に関するパラメータ値は表-2に示したものをそのまま用いた。車速50km/hに関しては、前述の H と T^2 の比例関係を外挿し、 τ を 2.5 s、 H を 0.26 kgf とした。

本研究で用いた車両モデルは6自由度（並進3成分、回転3成分）の運動を考慮できるものである。車両走行に伴うロール角、ピッチ角の算出方法は著者らの先行研究と同じアルゴリズムを用いている^{9,14)}。本研究の解析では、路面の凹凸を考慮していないので、バウンディング運動（並進上下運動）に関しては、考えないこととした。

(3) 実車試験結果と数値解析結果の比較

前項で述べた2次予測モデルを用いて、ダウンウォッシュ作用時の走行車両の応答解析を行い、実車試験で得られた走行軌跡と比較する。実車試験の走行状況を踏まえて、図-13のように数値解析における走行条件を定めた。すなわち、車両進行方向右側にドクターヘリが着陸するものと仮定し、ローター中心から車両の側面までの距離を10mとした。また、前方50mの位置にドクターヘリが着陸するものと仮定した。

図-5に示したダウンウォッシュ風速とローター中心の距離および地上高さの関係を踏まえて、図-14のようにダウンウォッシュ風速をモデル化した。ここではO'Bryan⁹⁾による結果と本研究で行ったダウンウォッシュ風速観測結果が調和的であることから、O'Bryanによる結果を基準にモデル化を行った。ダウンウォッシュ風速は、ローター中心からの距離が遠くなるにつれて小さく

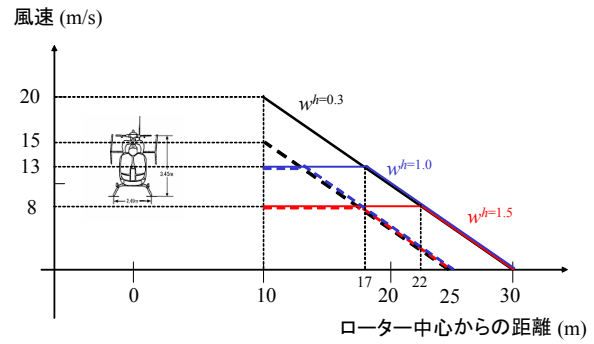


図-14 ダウンウォッシュ風速とローター中心からの距離および地上高さの関係

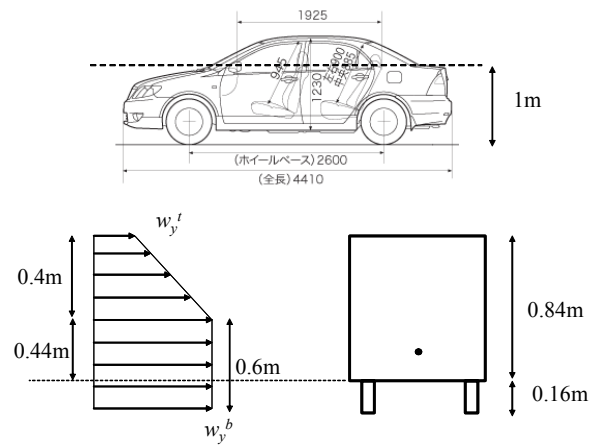


図-15 カローラの車体寸法¹⁶⁾と作用するダウンウォッシュの高さ方向風速分布

なる。図-5より、地上高さ0.3mの地点では、ローター中心からの距離が10mのとき風速20m/s、20mのとき風速10m/s、30mのとき風速0m/sと直線で近似した ($w^h=0.3$)。ローター中心からの距離が10mの位置において、地上高さ1.0mの地点でのダウンウォッシュ風速を13m/s、高さ1.5mでの風速を8m/sと定めた。図-5によると、ローター中心からの距離が大きくなるにつれて、地上高さの違いがダウンウォッシュ風速に与える影響は小さくなる。今回の実験で観測されたダウンウォッシュ風速はローター中心からの距離が20mのときは、地上高さ0.3mと1.0mの地点での風速の差が小さくなり、22.4mのときに3地点の風速がほぼ等しくなっている (図-3)。これらより、図-14の実線に示すようなダウンウォッシュ風速のモデル化を行った。また、図-5によると、ガードレールが設置された場合、ローター中心からの距離を5m遠ざけるとほぼ同等の効果が見られる。そこで、ガードレールが設置された場合については、図-14の点線に示すように、実線でモデル化された風速を5m平行移動することにした。

カローラの高さは1.47mである¹⁶⁾。車両側面図は図-15のようである。前述の通り、ヘリコプターのダウンウォッシュ風速は高さ方向に風速分布を有している。地上高

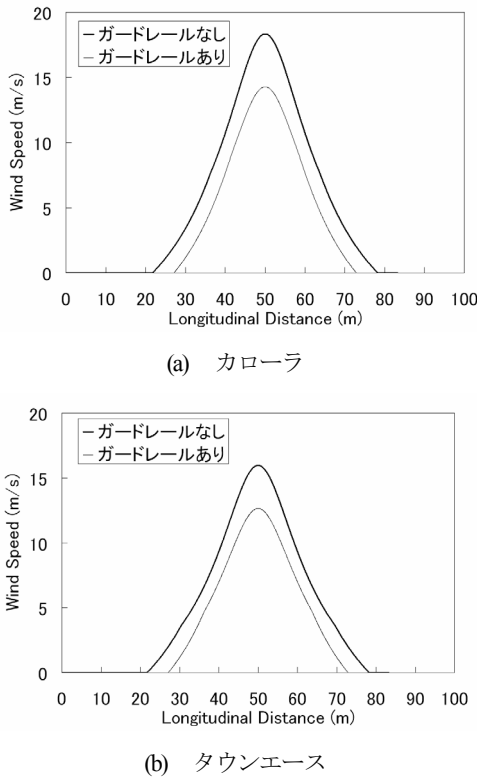


図-16 数値解析に用いた等価風速

表-3 数値解析で用いた車両パラメータ

| 記号 | 定義 | 小型車 (カローラ) | ワンボックス車 (タウンエース) | 単位 |
|--------|----------------|---------------|---------------------|-------------------|
| m | 車両質量 | 1100 | 1400 | kg |
| l_f | 前輪軸と重心 間の距離 | 1 | 1.03 | m |
| l_r | 後輪軸と重心 間の距離 | 1.635 | 1.685 | m |
| I_z | ヨー慣性モー メント | 637 | 637 | kgm ² |
| d | トレッド | 1.505 | 1.46 | m |
| ρ | 空気密度 | 1.245 | 1.245 | kg/m ³ |
| h | 重心高さ | 0.35 | 0.42 | m |
| S | 車両前面 投影面積 | 1.92 | 3.3 | m ² |

さが大きくなるほど、風速は小さくなる傾向にある。2次予測モデルを用いた車両の応答解析を行う際には、高さ方向の風速変化を考慮した一様風を車両に作用させる必要がある。そこで、カローラの場合は、車両の側面形状も考慮に入れて、地上高さ1mまでの風速分布を考慮した。

カローラの車高は1.47mであるが、等価風速を算出する際には、車体側面形状をほぼ長方形と仮定できる1.0m

までの風速のみを考えている。実際には、例えばカローラの中央部分などでは、地上高さが1.0mよりも大きな部分でも横風を受風している。しかし、ダウンウォッシュ風速は地上高さが大きくなるほど減少するので、ここでは車体側面形状がほぼ長方形と仮定できる地上高さまでのダウンウォッシュが車両に与える空気力を外力とすることにした。この方法では、風速が大きい範囲のみから等価風速を計算しているの、実際よりも大きめの風速が見積もられている。車両にとって危険側で検討を行ってもダウンウォッシュが走行車両に与える影響が小さいと判断できれば、ドクターヘリ的高速道路本線上への着陸が可能となると思われる。

まず、図-5から、地上高さ0.6mまでのダウンウォッシュ風速は一定であり、高さ0.3mの地点で測定されたダウンウォッシュ風速と等しいと仮定した。図-5によると、地上高さ0.15m程度以下では、ダウンウォッシュ風速が小さくなるが、カローラの最低地上高が0.16mであるのでこの影響は無視した。したがって、図-15に示した台形の風速分布から等価風速を以下のように算出した。

$$w_y = \frac{(w_y^t + w_y^b) \times 0.4 / 2 + w_y^b \times 0.44}{0.84} \quad (9)$$

ここで、図-13より

$$w_y^b = w^{h=0.3} \sin \theta = w^{h=0.3} \cdot 10/r \quad (10)$$

$$w_y^t = w^{h=1.0} \sin \theta = w^{h=1.0} \cdot 10/r \quad (11)$$

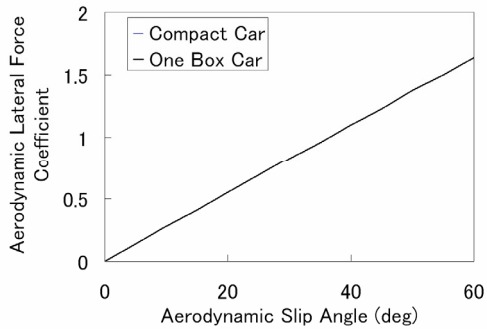
である。すなわち、ヘリコプターのローター中心から放射状に発生するダウンウォッシュのうち、車体に真横から作用する横風成分のみを考えている。実際は前後方向からもダウンウォッシュが走行車両に作用するため、本解析の式(3)によって算出される横滑り角は実現象のものとは異なる。横滑り角は車両に作用する空気力の大小を決定する要素の一つであり、車両に作用する風速、風向を適切に考慮し車両の空気力をより正確に推定する方法については、今後検討が必要である。

タウンエースの車高は1.95mである¹⁷⁾ので、地上高さ1.5mまでのダウンウォッシュを考慮した。カローラのとくと同様に台形の風速分布を仮定し、等価風速を以下のように算出した。

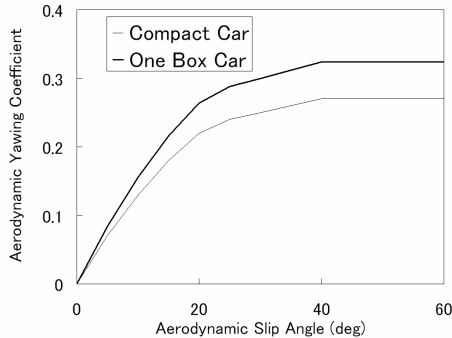
$$w_y = \frac{(w_y^t + w_y^b) \times 0.9 / 2 + w_y^b \times 0.44}{1.34} \quad (12)$$

ここで、 w_y^b は式(10)と同様であり、 w_y^t は式(11)の $w^{h=1.0}$ を $w^{h=1.5}$ として計算した。

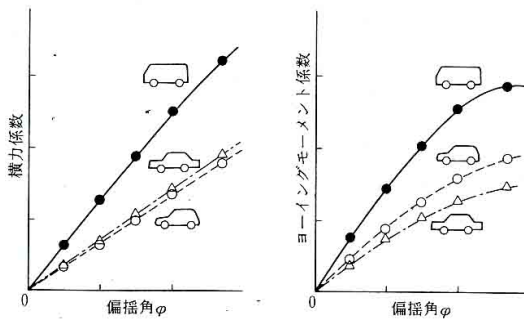
図-16に以上のように算出される等価風速を示す。タウンエースの方が車高が高く、さらにダウンウォッシュ



(a) 横力係数



(b) ヨーイングモーメント係数



(c) 車両側面形状と空気力係数の関係¹⁸⁾

図-17 車両の空気力係数

風速は地上高さが大きくなるほど減少するため、タウンエースの等価風速の方がカローラのものよりも小さくなる。しかし、式(1)、(2)の車両全面面積はタウンエースの方が大きいため、車両に作用する空気力はタウンエースの方が大きくなる。表-3に、数値解析で用いたカローラとタウンエースの車両諸元を示す。ここで、カローラの数値モデルには、丸山・山崎⁹⁾が使用した小型車を想定した車両の数値モデルを用いている。図-17に式(1)、(2)で用いる空気力係数 (C_y , C_n) を示す。このうち小型車(カローラ)の空気力係数は、著者らが横風時走行模擬実験を行った際に使用したドライビングシミュレータに搭載されている空気力係数⁹⁾である。空気力係数は、車両の側面形状によって異なることが分かっている¹⁸⁾ (図-17(c))。横力係数は、カローラ (○) とタウンエース (△) の側面形状の違いでは大きな差はないものと

考えられる。ヨーイングモーメント係数は、タウンエースの方がカローラよりも大きいものと推測される。したがって、本研究の数値解析では、ワンボックス車(タウンエース)のヨーイングモーメント係数を小型車の1.2倍とし、横力係数は小型車と等しいものと仮定した。本研究で構築した車両数値モデルは、正確なパラメータ値を入手してカローラやタウンエースをモデル化したというわけではない。したがって、カローラは小型車の、タウンエースはワンボックス車の例として検討を進める。

図-18に、2次予測モデルで推定される車両の走行軌跡と実車試験で観測された走行軌跡を比較する。これによると、ケース2の場合についてのみ2次予測モデルから推定される車両の走行軌跡が実車試験結果の再現性が悪い。ケース2はワンボックス車を用いて走行実験を行っているが、2名の被験者の走行軌跡は、ケース2と同じ走行条件で小型車を用いたケース1の車両の走行軌跡よりも小さく、最大横変位量は0.1m程度である。同じ走行条件であれば、ワンボックス車の方が小型車よりも横変位量は大きくなるものと推測されるが、ケース1とケース2に関しては逆の結果となった。このことには、被験者の運転慣れの問題や、実車試験時の瞬間風速が数値解析で用いたダウンウォッシュ風速のモデルよりも小さかった可能性など様々な要因が挙げられ、主要原因を示すことは難しい。

ケース2以外の場合について実車試験の結果を見ると、ケース6のときに1名の被験者の最大横変位量が約0.4mとなっている。それ以外の場合は、最大横変位量は0.2~0.3m程度である。車幅と高速道路の車線幅を考えると、横変位量が0.9~1.0mに達すると車線をはみ出すことに対応する。このことから、今回の実験パターンに関しては、高速道路走行中の車両はドクターヘリのダウンウォッシュにより車線を逸脱するような状況に陥ることは考えにくい。一方、2次予測モデルにより数値解析で推定される車両の走行軌跡は、実車試験で得られた走行軌跡を精度良く再現できている。最大横変位量は2次予測モデルにより推定されるものの方が、実車試験結果よりも若干大きいことがある。実車試験では被験者がヘリコプターのホバリング位置をあらかじめ予測しながら走行しているのに対して、2次予測モデルでは車両の現位置での運動状態から横変位量を予測し修正操舵を加えていく。すなわち、実車試験では最大風速を受けるであろう大まかな位置が明らかであるのに対して、2次予測モデルではそのような予見は不可能である。このことが影響し、2次予測モデルによる最大横変位量が大きくなることがあると考えられる。しかしながら、2次予測モデルを用いると、運転者の反応まで含めて車両の走行軌跡を数値解析で精度良く再現可能であるものと考えられる。

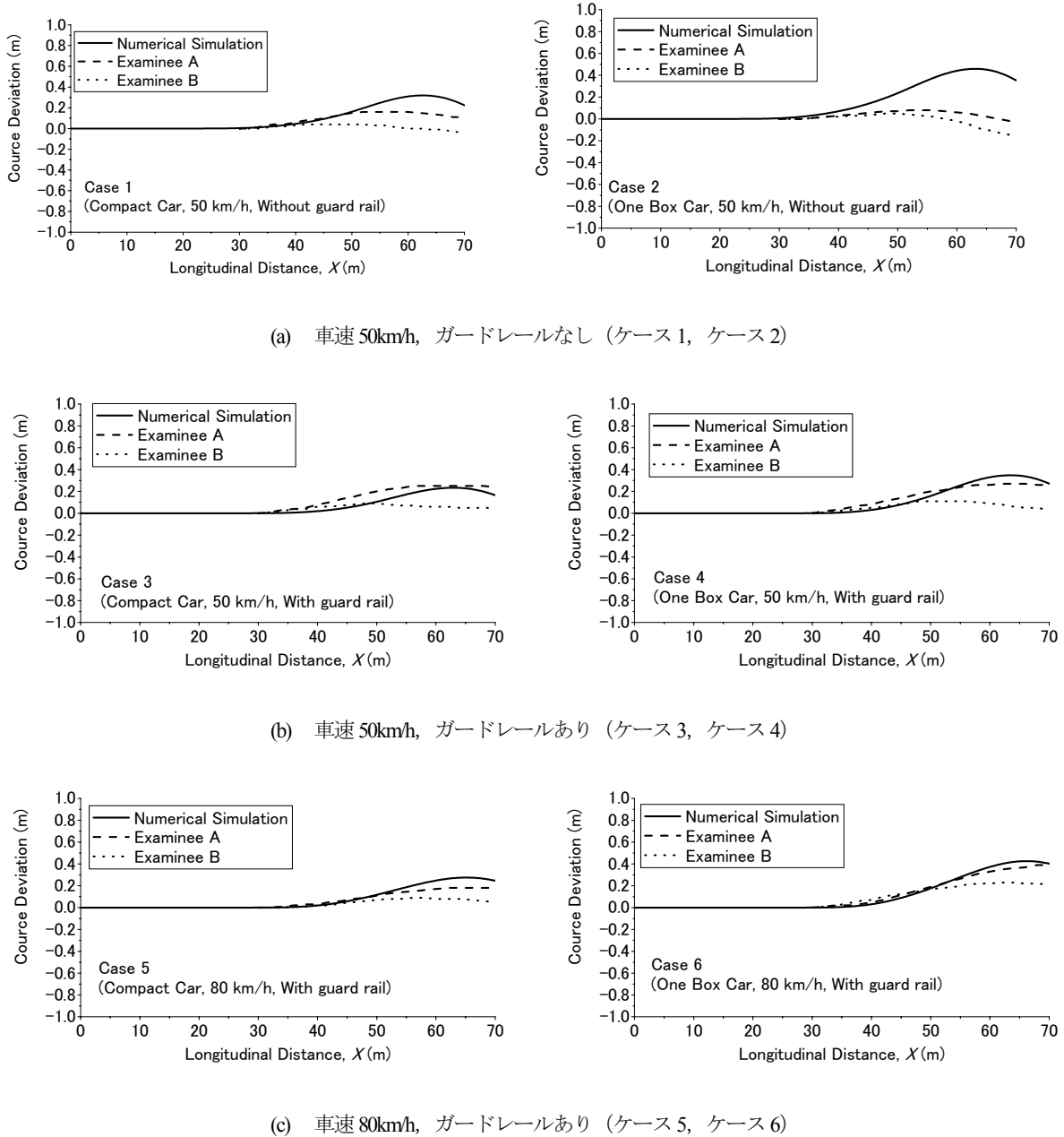


図-18 2次予測モデルで推定される車両の走行軌跡と実車試験結果の比較

4. 2次予測モデルを用いた様々な走行・風速条件下での車両の走行軌跡の推定

本章では、前章で2次予測モデルが推定するダウンウォッシュ下での車両の走行軌跡は精度良く実車試験を再現できることが確認されたので、2次予測モデルを用いて様々な走行、風速条件下での車両の走行軌跡を評価し、ドクターヘリの高速道路本線上での着陸に向けた検討を行う。

図-19に、走行車両の车速が変化したときに予測される最大横変位量を示す。2次予測モデルの運転者反応に

関するパラメータ値は、表-2に示したものを外挿または内挿している。ダウンウォッシュ風速は、ガードレールが設置されている場合の風速を用いている。また、図中では、車速50km/hと80km/hの場合について、実車試験で得られた最大横変位量を参考までに示している。2次予測モデルを用いた推定結果によると、車速の大小による横変位量最大値の差は小さく、小型車では約0.25m、ワンボックス車では約0.4m程度となる。車速が大きければ、横風を受けた横変位量は大きくなるものと思われるが、ドクターヘリによるダウンウォッシュ下での走行中の場合は、横風を受ける範囲がローター中心から30mの範囲であるので車速が大きいと受風時間は短くなる。このた

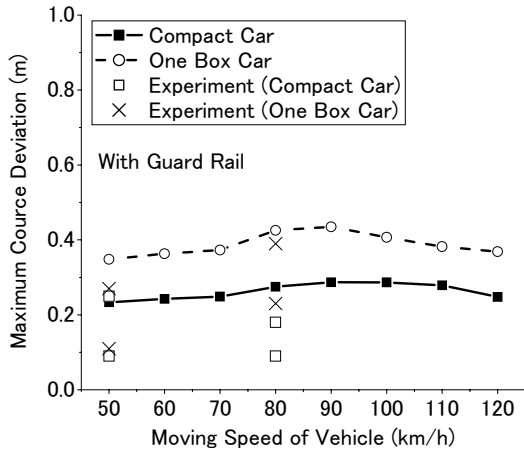


図-19 車速と最大横変位量の関係 (ガードレールあり)

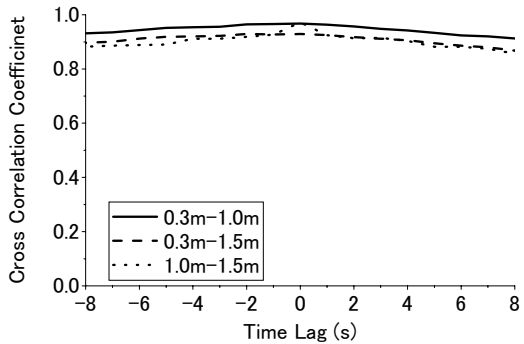


図-20 ダウンウォッシュ風速の地上高さ方向の相互相関係数 (ローター中心からの距離 10m)

め、車速の大小による横変位量の違いがあまり大きくなりません。

図-3(a)に示したローター中心から10m離れた地点(3CH)で観測されたダウンウォッシュ風速の高さ方向の相互相関係数¹⁹⁾を計算した(図-20)。これによると、各地点間の相互相関係数は大きく0.9以上を示している。このことから、ある地上高さの点で大きなダウンウォッシュ風速が観測されると、他の2つの高度でも同時に大きな風速が観測される可能性が高いものと考えられる。ダウンウォッシュ風速観測実験において、図-1の3CH(ガードレールなし、ローター中心からの距離10m)で記録された風速の平均値と標準偏差を表-4に示す。前述の通り、地上高さが大きくなるほど平均風速は小さくなる。また、標準偏差は1.74~2.48m/sとなっている。図-21に、3CHで観測された風速の累積確率を正規確率紙上に示す。ここで、累積確率は以下のように計算した。

$$P(i) = \frac{i}{N+1} \quad (13)$$

ここで、 N は風速のデータ数(151)、 $P(i)$ は N 個の観測値を昇順に並べたときの i 番目の観測値の累積確率であ

表-4 観測されたダウンウォッシュ風速の平均値と標準偏差(3CH, ガードレールなし)

| 地上高さ (m) | 平均風速 (m/s) | 標準偏差 (m/s) |
|----------|------------|------------|
| 0.3 | 19.3 | 1.76 |
| 1.0 | 11.2 | 2.48 |
| 1.5 | 4.83 | 1.74 |

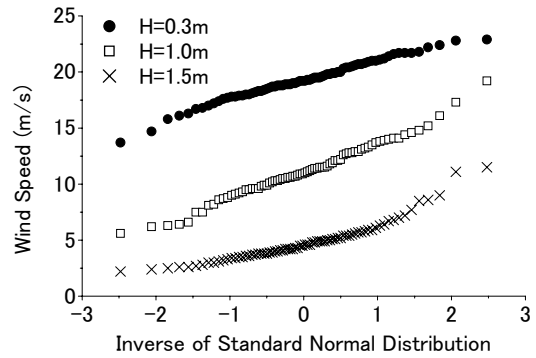


図-21 正規確率紙上のダウンウォッシュ風速の累積確率

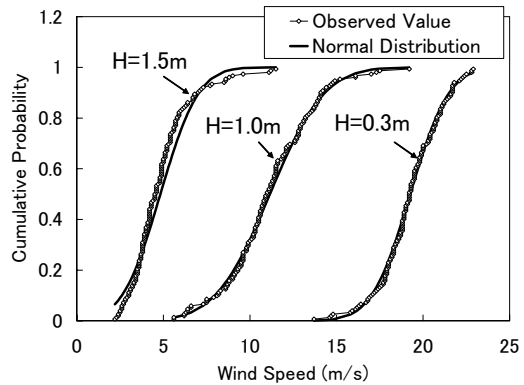
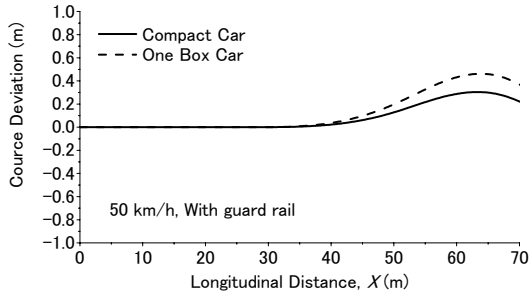


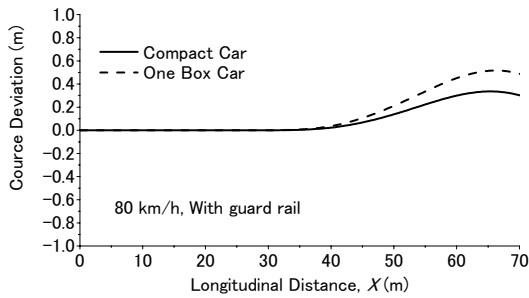
図-22 ダウンウォッシュ風速の累積確率と正規分布の累積確率分布の比較

る。これによると、地上高さ0.3m, 1.0mの地点でのダウンウォッシュ風速の累積確率は、確率紙上で直線性が見られるので、正規分布に従うことが予想される。

図-22は、表-4に示した平均風速、標準偏差を用いた正規分布の累積分布関数とダウンウォッシュ風速の累積確率である。地上高さ0.3m, 1.0mおよび1.5mのそれぞれについて、コルモゴロフスミルノフ検定²⁰⁾を行ったところ、有意水準5%のもとで仮定した正規分布は棄却されなかったため、これらの風速分布は正規分布に従うものと考えられる。しかし、地上高さ1.5mの位置の風速の累積確率は、他の2つの高度のものとは比べて、正規分布の累積確率分布とやや乖離している。この理由としては、ダウンウォッシュ風速は地上高さが大きくなるにつれて低減する傾向があるため、地上高さ1.5mの地点の風速に



(a) 車速 50km/h



(b) 車速 80km/h

図-23 2次予測モデルが推定するダウンウォッシュ受風時の車両の走行軌跡 (風速値に、平均値+標準偏差の2倍を使用)

は、自然風による影響がダウンウォッシュ風速の大きな他の2つの高度よりも反映されていると思われる。

図-14にモデル化したダウンウォッシュ風速をもとに、 $w^{F0.3}$ を $N(20, 1.75)$ 、 $w^{F1.0}$ を $N(13, 1.75)$ 、 $w^{F1.5}$ を $N(8, 1.75)$ 、にそれぞれ従うものと仮定する ($N(\mu, \sigma)$ は、平均値 μ 、標準偏差 σ の正規分布)。高さ1mのダウンウォッシュ風速の標準偏差は2.48m/sと他の2つの高度のものよりもやや大きい。本研究では台形の風速分布を考えている (図-15) ので、標準偏差の値をそろえてモデル化した。このように考えると、風速 $w = \mu + 2\sigma$ を超過する確率は約0.023である。また、図-20より地上高さごとの風速の相互相関係数は大きい。以上から、走行車両が受風するダウンウォッシュの上限値として23.5m/s、16.5m/s、11.5m/sを、それぞれ地上高さ0.3m、1.0m、1.5mの位置でローター中心から10m離れた地点における風速値として仮定した。図-23に、車速50km/hと80km/hの場合 (ガードレールあり) について、2次予測モデルから推定される車両の走行軌跡を示す。これによると、小型車で約0.3m、ワンボックス車で約0.5mの最大横変位量が発生すると推定されている。この横変位量は、走行車両の車線の逸脱を想像させるような量ではない。したがって、ドクターヘリが高速道路本線上に着陸するときに生じるダウンウォッシュが走行車両に与える影響は、横風が影響して交通

事故が生じるなどの二次的事故の発生を引き起こすほど大きなものであるとは考えにくいと思われる。

5. 結論

本研究では、ドクターヘリの高速道路本線上の着陸に向けた検討として、ドクターヘリのダウンウォッシュが走行車両に与える影響について検討を行った。

第二東海自動車道 (第二東名) で実施されたドクターヘリのダウンウォッシュ風速は、高さ方向に風速分布を有しており、その分布は既往の研究による結果と概ね調和的であった。また、高速道路の中央分離帯に設置されているガードレールは、ダウンウォッシュ風速を低減する効果があり、その寄与分は距離に換算すると、ローター中心からの距離を約5m遠ざけるのと等価であった。

本研究では、第二東名で行われたダウンウォッシュ観測実験をもとに、ダウンウォッシュの風速分布をモデル化し、2次予測モデルを用いて車両の走行軌跡を推定した。推定された走行軌跡と2名の被験者を用いた実車試験の結果を比較すると、精度良く車両の走行軌跡が再現できた。今回の実験結果では、2名の被験者の最大横変位量は0.2~0.3m程度であり、ダウンウォッシュが影響して走行車線を逸脱するような可能性は低いものと考えられる。

2次予測モデルを用いて、車速やダウンウォッシュ風速を変化させて、いくつかの走行・風速条件での車両の走行軌跡の予測を行った。第二東名でのダウンウォッシュ観測実験結果をもとに作成した風速モデル下において、車両の最大横変位量は、あまり車速に依存せず小型車で約0.25m、ワンボックス車で約0.4m程度推定される。また、風速が正規分布に従うことを確認し、それに基づいて超過確率が0.023となる風速を走行車両に作用させても、小型車とワンボックス車の横変位量は約0.3m、0.5mと推定された。このことから、高速道路本線上に着陸したドクターヘリのダウンウォッシュは、走行車両が二次的な交通事故を起こしてしまうほどの大きな影響を与えるとは考えにくいものと思われる。

ヘリコプターのダウンウォッシュはヘリコプターが動いているときに発生する。すなわち、地上に接地した状態でプロペラを回しているときにはダウンウォッシュは発生せず、離着陸、空中でのホバリング時 (ヘリコプターは、ホバリング時に完全に静止することは不可能で、実際には小刻みな移動を繰り返している。) にダウンウォッシュが発生する。離着陸時のダウンウォッシュ平均風速は、ホバリング時のものと比べてその値に大きな差はない。したがって、離着陸時にのみ限定した特別な交

通規制を設ける必要はないと考えられる。

本研究の結果から、2次予測モデルにより横風受風時の車両の走行軌跡が精度良く推定されることが確認できたので、強風時の通行規制基準の定量的検討や防風柵の効果的な配置方法などの検討に応用できるものと思われる。

謝辞：茨城県竜ヶ崎飛行場におけるダウンウォッシュ風速データは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）よりご提供頂いた。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本航空医療学会：<http://www.medianetjapan.com/2/town/government/airrescue/index.html>
- 2) 総務省消防庁：<http://www.fdma.go.jp/ugoki/h1709/11.pdf>
- 3) 加藤寛一郎，今永勇生：ヘリコプタ入門，東京大学出版会，1998.
- 4) 総務省消防庁：<http://www.fdma.go.jp/html/data/tuchi1708/pdf/170818kyu184.pdf>
- 5) 丸山喜久，山崎文雄：横風強風時の車両走行安定性に関する数値解析とシミュレータ実験，土木学会論文集，No. 766/I-68, pp. 129-140, 2004.
- 6) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：<http://www.nexco.ne.jp/lib/press/rel/2005/05/18/>
- 7) 朝日航洋（株）：<http://www.aeroasahi.co.jp/aviation/lineup/>
- 8) O'Bryan, T.C.: An Investigation of the Effect of Downwash from a VTOL Aircraft and a Helicopter in the Ground Environment, NASA TND-977.
- 9) 大熊武司，神田順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会，1996.
- 10) 斉藤知生，神田順：最大風速の評価時間について，第12回風工学シンポジウム，pp. 49-54, 1992.
- 11) 宇宙航空研究開発機構：実験用ヘリコプタのダウンウォッシュ計測試験結果，JAXA 技術資料，GPX-04001，2004.
- 12) 社団法人自動車技術会：自動車のデザインと空力技術，朝倉書店，1998.
- 13) Bakker, E., Pacejka, H. B. and Linder, L.: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, Society of Automotive Engineers (SAE) paper No. 890087, 1989.
- 14) 丸山喜久，山崎文雄，山之内宏安：高速道路走行車両の地震応答解析，土木学会論文集，No. 696/I-58, pp. 249-260, 2002.
- 15) 吉本堅一：予測を含む操だモデルによる人間自動車系のシミュレーション，日本機械学会誌，Vol. 71, No. 596, pp. 13-18, 1968.
- 16) トヨタ自動車：<http://toyota.jp/corollasedan/spec/spec/>
- 17) トヨタ自動車：http://toyota.jp/Showroom/All_toyota_lineup/townacevan/spec/sheet.html
- 18) 高田弘之，中川邦夫，篠田浩行：1 ボックス車の横風安定性について，自動車技術，Vol. 43, No. 3, pp. 119-126, 1989.
- 19) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，2002.
- 20) Ang, A. H-S. and Tang, W.H. (伊藤學，亀田弘之（訳）)：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1997.

(2005. 11. 7 受付)

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF DOWNWASH GENERATED BY HELIAMBULANCE TO MOVING VEHICLES ON EXPRESSWAYS

Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI, Hiroyuki YOGAI
and Yoshiyuki TSUCHIYA

Emergency medical care is very effective to save the lives of injured people in traffic accidents. The heliambulance has been under operation since 1999, and it is expected to contribute for the emergency medical care. However, the heliambulance is allowed to land on the expressway under only some restricted conditions, because the heliambulance generates strong wind called downwash. In this study, the moving stability of vehicles under crosswind generated by a helicopter is investigated based on field experiments and numerical simulation. Based on these results, the possibility of landing of a heliambulance on expressways is discussed.