

大型ヘリコプターがホバリング時に発生させる ダウンウォッシュの風速測定に関する検証

佐藤 歩*, 金子 公平*, 大滝 英一**

概 要

東京消防庁では、多岐にわたる災害現場で消防ヘリコプターが活用されている。その一方、消防ヘリコプターのホバリング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、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、本検証は、4機種の消防ヘリコプターに対し、4種類の対地高度でホバリングさせたときに発生するダウンウォッシュの風向と風速の多点計測を行った。

その結果、消防ヘリコプターがホバリング中に発生させるダウンウォッシュは、人が転倒し、建物の屋根や壁の一部が破損する危険性がある 20m/s 以上の瞬間水平風速が観測された。また、大型機の「このとり」及び「ひばり」は、消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離が 40m 離れていても人や物に影響が発生する 10m/s 以上の瞬間水平風速が観測された。

1 はじめに

東京消防庁（以下「当庁」という。）では、昭和 41 年からヘリコプターを導入し、救助活動、消火活動、救急活動等、活動の場は多岐にわたる。

一般に民間などのヘリコプターは、航空法（昭和 27 年 7 月 15 日法律第 231 号）第 81 条により地表面から 150m 以上の高度（人や家屋の密集地域は 300m）で飛行しなければならない。しかし、消防ヘリコプターは、災害が発生した様々な場所や高度でホバリング^{*1}し、リペリング^{*2}やホイスト降下^{*3}等を伴う災害活動を行う可能性がある。

その際に、消防ヘリコプターが、地表面付近を飛行する時に気を付けなければならない事の一つが飛行時に発生させる吹き下ろし風（ダウンウォッシュ）である。

このダウンウォッシュにより、過去には表 1 に示すような事故が発生しているため、消防ヘリコプターによる活動上の安全性を考慮する上で、ダウンウォッシュの影響が及ぶ範囲を把握することは重要であるといえる。

2 目的

既報の研究¹⁾では、ヘリコプターのホバリングの対地高度が限定されている他、ダウンウォッシュの風向や風速が、地表面の部分的な計測に留まっている。さらに、ヘリコプターの機種が当庁とは異なっているため、比較検証が必要と考えた。

そこで本検証は、当庁の消防ヘリコプターがホバリング時に発生させるダウンウォッシュの風向及び風速につ

いて、機種ごとに多点計測を実施し、地上で活動している隊員及び物件等に対する影響を明確にするとともに、災害活動、演習及び行事等における危険個所の判断または警戒措置の範囲の選定等に資するものである。

表 1 ヘリコプターが発生させたダウンウォッシュによる事故事例

発生日	場所	概要
2005 年 2 月 2 日	インド ネシア スマトラ島	医療支援のため陸上自衛隊の大型輸送ヘリ（CH-47）が空き地に着陸した際、ダウンウォッシュにより民家の屋根を損壊させ、2 名が受傷した。
2014 年 10 月 26 日	愛媛県	国際サイクリング大会で取材ヘリのダウンウォッシュにより飛ばされた滑り止め用のマットが、競技者 2 名に衝突した。
2016 年 5 月 4 日	鳥取県	林野火災の消火準備のため、消防防災ヘリコプター（AW139）が緑水園場外離着陸場に着陸しようとした際にダウンウォッシュにより真砂土が舞い上がり自動車等を損壊した。

* 装備安全課 ** 企画課

3 対象ヘリコプター等

(1) 対象ヘリコプター

ダウンウォッシュの風向及び風速を測定した消防ヘリコプターは、「こうのとり」、「ひばり」、「ちどり」及び「つばめ」の4機種である。なお、「ちどり」及び「つばめ」は中型機であるが、大型機との比較として参考までに測定を行った。

それぞれの消防ヘリコプターの諸元及び性能を表2に示す。

(2) 実験場所等

ア 名称

明星大学青梅校陸上競技場グラウンド

イ 実験実施日の環境

実験場所付近の平均気温は 7.7℃、最高気温は 14.9℃であった。実験測定時における自然風の風向は、北東よりを主とするものであった。また、青梅气象台発表の気象データによると、10分間の平均風速が 1.7~3.0 m/s であった。

(3) 測定装置

ア 3次元風向風速計

ダウンウォッシュの風向及び風速を測定するために使用した3次元風向風速計の仕様は、図1のとおり。

イ 2次元風向風速計

ダウンウォッシュの風向及び風速を測定するために使用した2次元風向風速計の仕様は、図2のとおり。

4 実験方法

(1) 測定装置の配置

3次元風向風速計及び2次元風向風速計は、ホバリング中の消防ヘリコプターを中心としたときの、地表面の影響を確認するために図3のように配置した。

ホバリング中の消防ヘリコプターのローター中心直下の地上に3次元風向風速計1個を配置し、そこを中心とした半径15m、20m、25m、30m、40m及び50mの同心円と、同円を中心角60°で等分する線分との交点に2次元風向風速計36個を配置した。

2次元風向風速計は、記録間隔が1秒毎のものが30個、1分毎のものが6個あり、記録間隔が短い方が消防ヘリコプターの近くになるよう配置した。


	<ul style="list-style-type: none"> 測定方式：超音波パルス方式 風速範囲：0~60m/s (読み値±3%、分解能0.01m/s) 風向範囲：0~540° (分解能0.1°) 記録間隔：0.25sec
---	--

図1 3次元風向風速計

表2 測定対象機種²⁾

機種名	こうのとり (大型機)	ひばり (大型機)	ちどり (中型機)	つばめ (中型機)
型式	ユーロコ プター式 EC225LP	ユーロコ プター式 AS332L1	アグスタ 式 AW139	ユーロコ プター式 AS365N3
画像				
全備重量(kg)	11000	8600	6800	4300
自重(kg)	5270	4510	4392	2389
ローター直径(m)	16.20	15.60	13.80	13.68
ローター数(枚)	5	4	5	4
全長(m)	19.50	18.70	16.66	11.94
エンジン (出力馬力×基数)	2382 ×2	1877 ×2	1872 ×2	977 ×2
同型機種名及び画像	はくちょう 	—	—	かもめ 
	ゆりかもめ 	—	—	おおたか 


	<ul style="list-style-type: none"> 測定方式：回転羽根(風速)、矢羽(風向) 風速範囲：0~67m/s (正確性±2%、閾値0.45m/s) 風向範囲：0~360° 不感帯なし(正確性±22.5°) 記録間隔：1sec or 1min
---	--

図2 2次元風向風速計

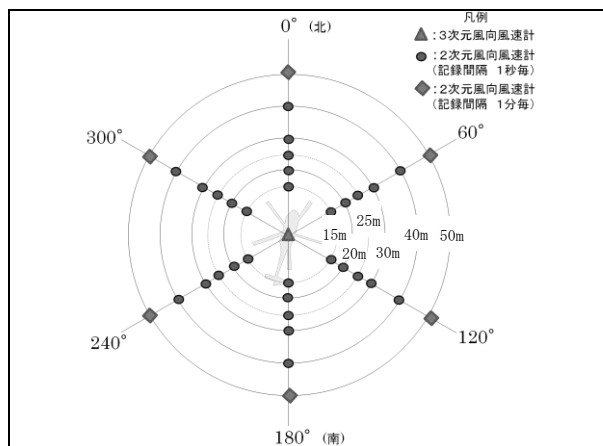


図3 測定装置の配置

(2) 飛行手順

測定中の消防ヘリコプターの飛行は、次のアからキの手順で行った。測定中の消防ヘリコプターの飛行手順及び状況を図4に示す。

- ア 南南西の方角からホバリング位置（3次元風向風速計の直上に消防ヘリコプターのローターの中心がくるよう）に飛行する。機首の方角は、北北東とする。
- イ 対地高度7ft（約2.1m）で2分間ホバリングする。
- ウ 対地高度50ft（約15.2m）で2分間ホバリングする。
- エ 対地高度100ft（約30.4m）で2分間ホバリングする。
- オ 対地高度150ft（約45.7m）で2分間ホバリングする。
- カ 一度ホバリングの対地高度を下げ、北北東の方角に飛行する。
- キ 測定終了

5 結果

(1) 風向

3次元風向風速計で計測されたホバリング中の消防ヘリコプター直下の仰角と風向の変化について、代表的な結果が得られた「ちどり」の結果を図5に示す。対地高度7ft（2.1m）での仰角は概ね約0°から約45°の間を、風向はほぼ0°であった。対地高度50ft（15.2m）では、仰角は概ね約-45°から約45°の間を、風向は約0°から約180°の間を推移した。対地高度100ft（30.4m）では、仰角は概ね約-45°から約0°の間を、風向は約180°から約360°が多かった。対地高度150ft（45.7m）では、仰角は概ね0°付近を、風向は約180°から約360°の間を推移した

これから、ホバリング直下では、対地高度が上がるほど仰角が0°で安定することから風は水平に吹くが、風向は安定しないことがわかった。

また、対地高度が下がるほど仰角が0°から45°で推移することから、やや上向きの成分を含む風となり、風向は安定しないことがわかった。その他の機種でも同様の傾向であった。

次に2次元風向風速計で計測された風向の変化について、ホバリング対地高度に対するローター中心からの水平距離ごとの風配図に関して、代表的な結果が得られた「こうのとり」の結果を表3に示す。

対地高度7ft（2.1m）において、風向は0°軸では135°から247°、60°軸では157°から292°、120°軸では202°から360°、180°軸では315°から90°、240°軸では0°から135°、300°軸では67°から180°の分布がそれぞれあった。

これは、消防ヘリコプターを中心にダウンウォッシュが放射状に吹いていることを意味している。

対地高度50ft（15.2m）、100ft（30.4m）及び150ft（45.7m）においても、同様の風向が主であった。また、その他の機種でも同様の傾向が確認できた。



図4 測定中の消防ヘリコプターの飛行手順及び状況

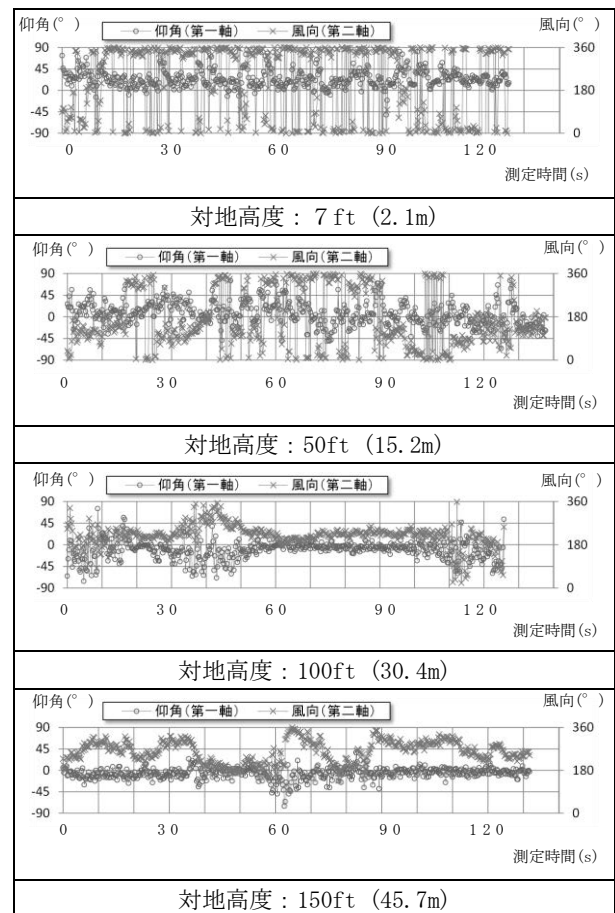


図5 ホバリング中の消防ヘリコプター直下の仰角と風向の変化（ちどり）

(2) 風速

3次元風向風速計で測定した消防ヘリコプター直下の風速（以下「風速」という。）について、代表的な結果が得られた「つばめ」の結果を図6に示す。対地高度7ft（2.1m）では、風速は約5m/sから約15m/sであり、3秒間平均の風速の最大値（以下「瞬間風速」という。）は、12m/sであった。対地高度50ft（15.2m）では、風速は約5m/sから約20m/sであり、瞬間風速の最大値は、18m/sであった。対地高度100ft（30.4m）では、風速は約5m/sから約20m/sであり、瞬間風速の最大値は、16m/sであった。対地高度150ft（45.7m）では、風速は約2m/sで、瞬間風速の最大値は、4m/sであった。これから、対地高度が低くなるにつれて、風速は大きくなった。しかし、対地高度7ftの瞬間風速は、対地高度50ftと差が少なかった。これは、ローターの吹き下ろし風が地面に反射してヘリコプターを持ち上げる揚力が増す地面効果³⁾によるものと思われる。その他の機種でも同様の傾向であった。

次に、2次元風向風速計の設置位置ごとの3秒間平均の最大値（以下「瞬間水平風速」という。）を機種ごとに図7から図10に示す。

代表的な結果が得られた図8の「ひばり」について、対地高度7ft（2.1m）では、瞬間水平風速はローターからの水平距離15mで約22m/sから約25m/s、20mで約17m/sから約25m/s、25mで約13m/sから約22m/s、30mで約12m/sから約17m/s、40mで約10m/sから約17m/sであった。ローターからの水平距離50mで瞬間水平風速は180°軸及び240°軸では約13m/s、その他は約8m/sであった。

対地高度50ft（15.2m）では、瞬間水平風速はローターからの水平距離15mで約25m/s、20mで約20m/s、25mで約17m/s、30mで約15m/sであった。ローターからの水平距離40mで、瞬間水平風速は240°軸で約16m/s、その他は約12m/sであった。ローターからの水平距離50mで、瞬間水平風速は180°軸で約12m/s、240°軸で約16m/s、その他は約6m/sであった。

対地高度100ft（30.4m）では、瞬間水平風速はローターからの水平距離15mで約23m/s、20mで約19m/sから約24m/s、25mで約16m/sから約22m/s、30mで約14m/sから約19m/s、40mで約11m/sから約16m/sであった。ローターからの水平距離50mで瞬間水平風速は180°軸は約13m/s、240°軸は約17m/s、その他は約7m/sであった。

対地高度150ft（45.7m）では、瞬間水平風速はローターからの水平距離15mで約13m/sから約18m/s、20mで約12m/sから約20m/s、25mで約10m/sから約20m/s、30mで約10m/sから約20m/s、40mで約10m/sから17m/sであった。ローターからの水平距離50mで、瞬間水平風速は180°軸で約11m/s、240°軸で約17m/s、その他は約6m/sであった。

その他の機種でも同様の傾向で、ローター中心からの水平距離が大きくなるほど、いずれの対地高度において

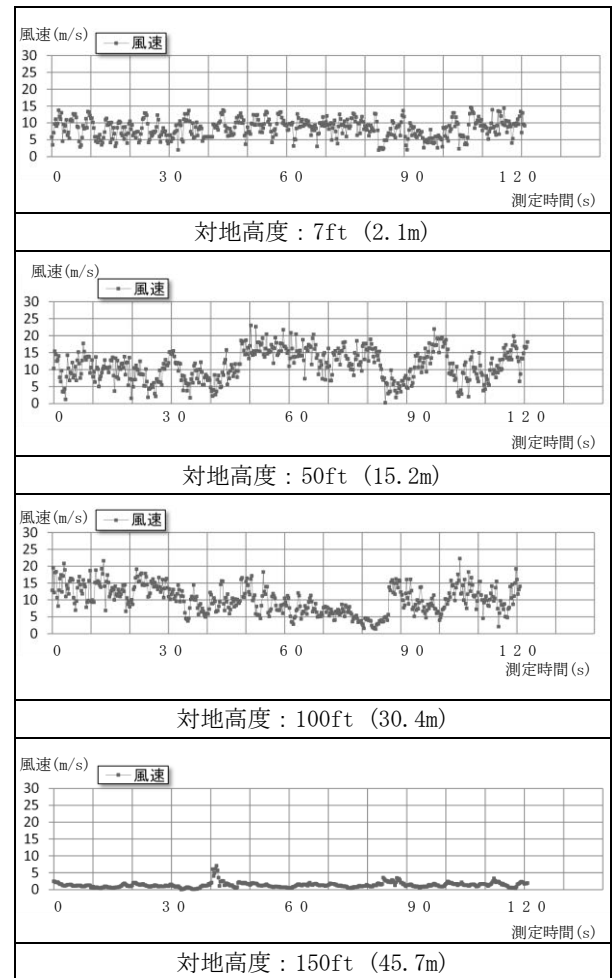


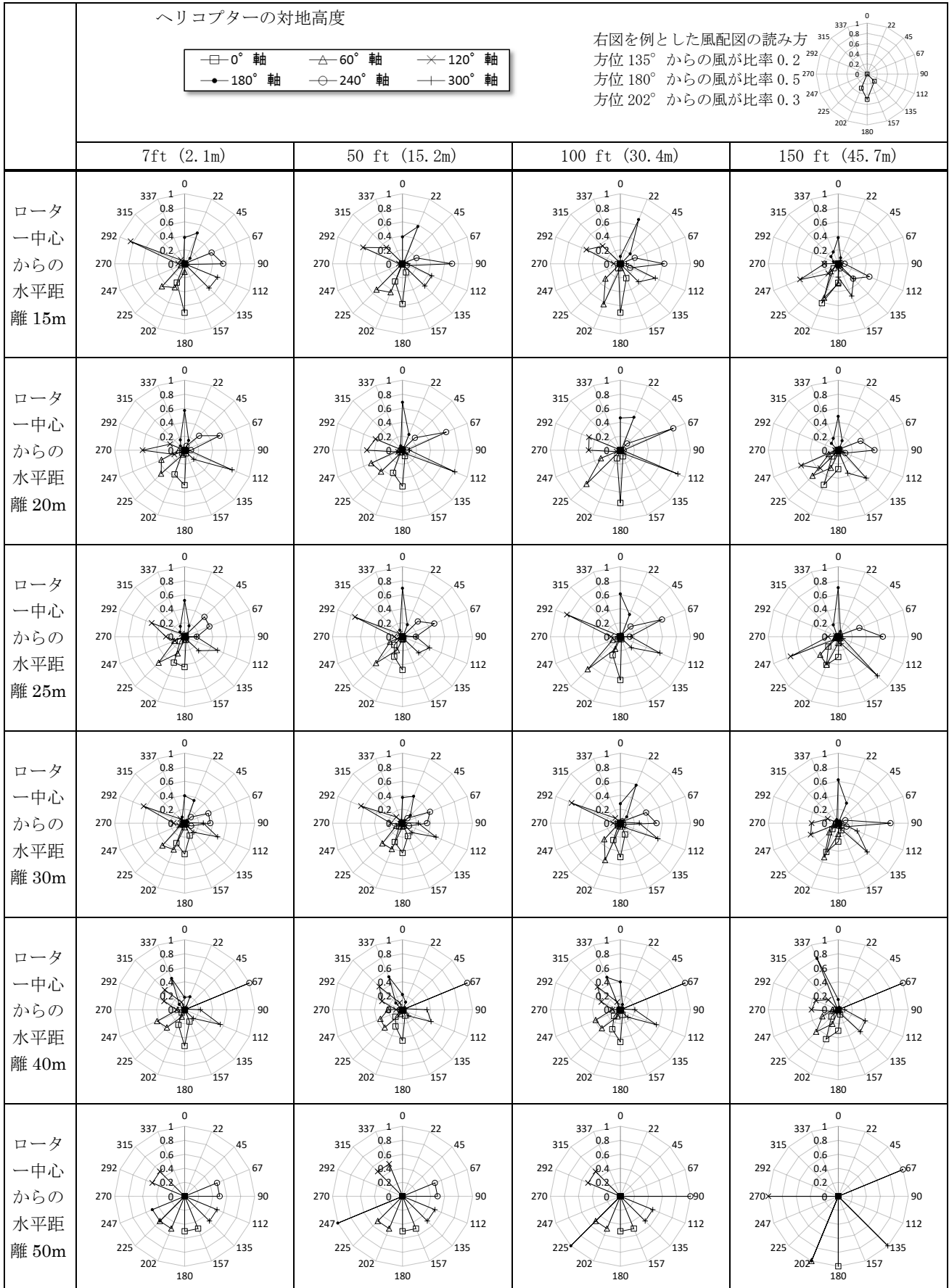
図6 3次元風向風速計で測定した消防ヘリコプター直下の風速（つばめ）

も、瞬間水平風速は小さくなった。また、対地高度が低いほど、軸毎の瞬間水平風速の違いが少なくなった。また、瞬間水平風速は、180°軸、240°軸及び300°軸の方が、0°軸、60°軸及び120°軸より、大きい傾向があった。

すべての機種で瞬間水平風速が10m/s未満となるのは、ヘリコプターの風下である180°軸と240°軸を除き、ローター中心からの水平距離が50mであった。また、風下である180°軸と240°軸では、水平距離が50mでも瞬間水平風速が10m/s未満にならない条件があった。

大型機の「こうのとりのり」及び「ひばり」、中型機の「ちどり」は、消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離が25m以内の範囲で、瞬間水平風速が20m/s以上が観測された。

表3 ヘリコプターのホバリング対地高度に対するローター中心からの水平距離ごとの風配図（このとおり）



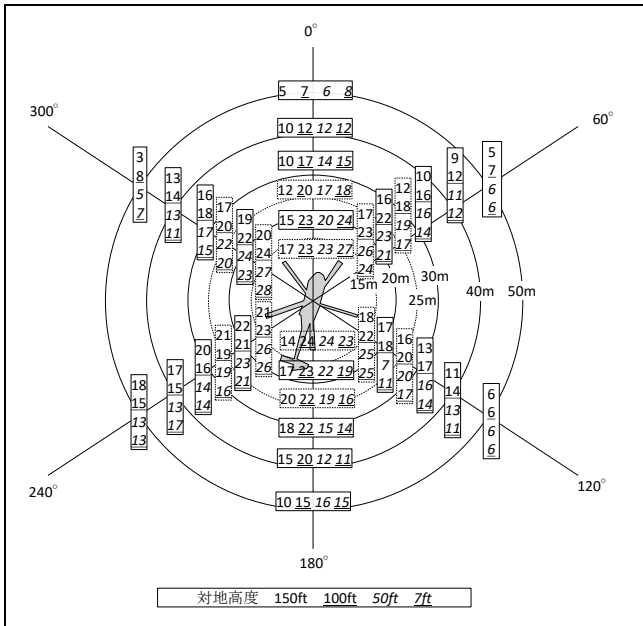


図7 2次元風向風速計の設置位置ごとの瞬間水平風速の最大値（このとり）

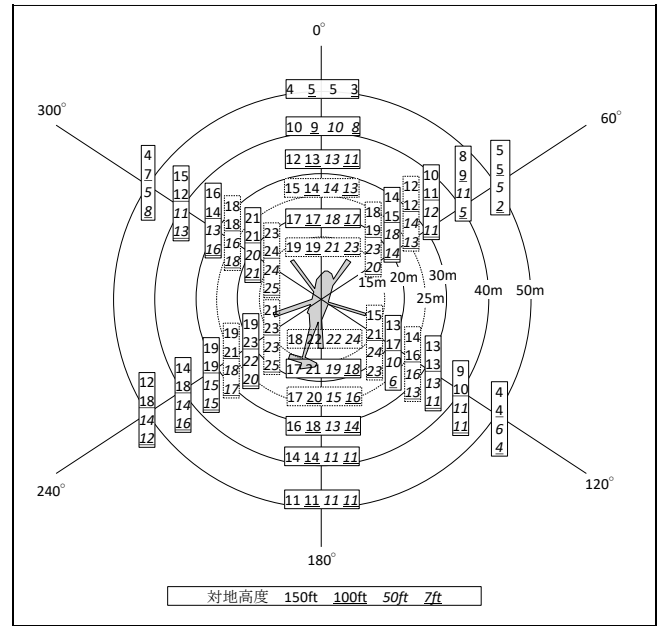


図9 2次元風向風速計の設置位置ごとの瞬間水平風速の最大値（ちどり）

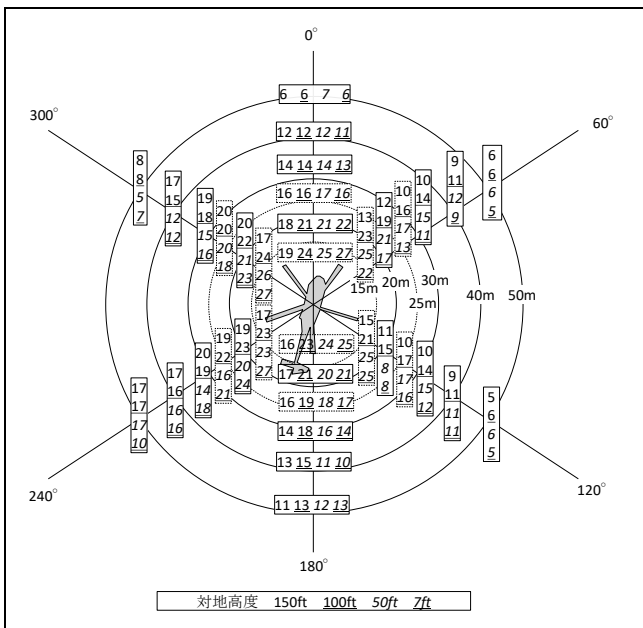


図8 2次元風向風速計の設置位置ごとの瞬間水平風速の最大値（ひばり）

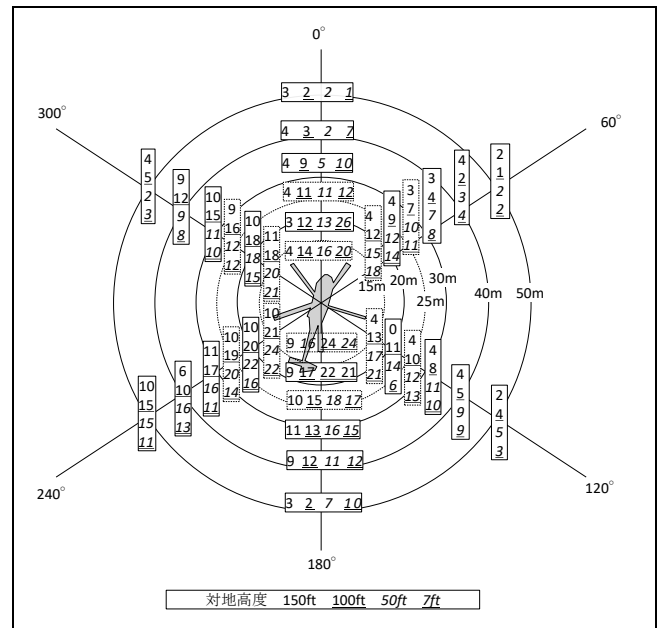


図10 2次元風向風速計の設置位置ごとの瞬間水平風速の最大値（つばめ）

6 指標からみた危険性の評価

本検証では、図 11 に示す日本風工学会が作成した指標⁴⁾を参考にして危険性を評価する。この指標は気象庁でも採用されている⁵⁾。なお、表中の瞬間風速の値に対する事象は目安であり、その事象が必ず生じるわけではないことを付記しておく。

これによると、歩行者は瞬間風速 10m/s になると風に向かって歩きにくくなり、意思通りの歩行は困難な状態になる。瞬間風速 15m/s になると意思通りの歩行は不可

能で風に飛ばされそうになったり、転倒する人も出るといふ。瞬間風速 20m/s になると風に向かって歩かず、身の危険を感じる状態になるとともに、高所での作業はきわめて危険な状態になる。瞬間風速 30m/s になると何かにつかまっていなくて立ってられない状態になり、歩行者にとってはきわめて危険な状態になる。

また、建造物については、瞬間風速 10m/s になると樋が揺れ始め、瞬間風速 20m/s になると屋根瓦・屋根葺材が広範囲に破れるという。瞬間風速 30m/s になると屋根

瓦・屋根葺材が飛散し始め、固定されていないプレハブ小屋が移動、転倒する。屋外設置物は、瞬間風速 10m/s になると看板やトタン板がばたつき始める状態にある。瞬間風速 20m/s になると看板やトタン板が外れ始め、瞬間風速 30m/s になると看板が落下・飛散する状態になるという。

以下、瞬間風速 10m/s 以下を一定の安全性を確保できる条件として、実験の測定値と比較する。

3次元風向風速計の測定結果より、消防ヘリコプターの直下の瞬間風速は対地高度 150ft でホバリングした状態で、「つばめ」を除き「ひばり」及び「ちどり」*4で人が飛ばされそうになる恐れがある瞬間風速 10m/s 以上が観測された。

注目すべきは大型機である「ひばり」で、対地高度が 150ft でホバリングをしても 25m/s 以上の瞬間風速が観測された。したがって「ひばり」については、対地高度 150ft のホバリングで屋根瓦・屋根葺材がはがれ始めるほか、ビニールハウスのフィルム（被覆材）が広範囲に破れるなどの被害が出る恐れがある。

2次元風向風速計の測定結果である図7から図10より、すべての機種で瞬間水平風速が 10m/s 未満となるのは、消防ヘリコプターの風下である 180° 軸と 240° 軸を除き、消防ヘリコプターのローター中心から水平距離が 50m であることがわかる。また、ヘリコプターの風下である 180° 軸と 240° 軸では、瞬間水平風速が 10m/s 未満になるのは、50m 以上離れる必要がある。

大型機の「このとり」及び「ひばり」、中型機の「ちどり」は、瞬間水平風速が 20m/s 以上が観測されたローター中心から水平距離が 25m 以内の範囲では、人が転倒するほか、屋根瓦・屋根葺材がはがれ始め、ビニールハウスのフィルム（被覆材）が広範囲に破れるなどの被害が出る恐れがある。

7 考察

機種別にみた、ホバリングの対地高度に対する瞬間水平風速と水平距離の関係を示したものを表4に示す。なお、表中の風下とは 180° 軸又は 240° 軸のことをいう。

本検証の条件で、すべての機種で瞬間水平風速が 10m/s 未満となるのは、ヘリコプターの風下である 180° 軸と 240° 軸を除き、消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離が 50m であることがわかる。また、消防ヘリコプターの風下である 180° 軸と 240° 軸では、瞬間水平風速が 10m/s 未満になるのは、50m 以上離れる必要がある。これは、ダウンウォッシュが地表面に到達するまでの間に自然風により風下側に移動したことが原因と考えられる。

大型機の「このとり」及び「ひばり」、中型機の「ちどり」は、瞬間水平風速が 20m/s 以上が観測されたローター中心からの水平距離が 25m 以内の範囲では、人が転倒し、屋根瓦・屋根葺材がはがれ始めるほか、ビニール

瞬間風速と人や街の様子との関係

瞬間風速	0m/s	10 m/s (36km/h)	20 m/s (72km/h)	30 m/s (108km/h)
歩行者や屋外作業		<ul style="list-style-type: none"> > 歩調が少々乱れる。 > 髪・スカートが乱れる。 	<ul style="list-style-type: none"> > 意思通りの歩行は不可能。 > 風に飛ばされそうなる。 > 転倒する人もできる。 	<ul style="list-style-type: none"> > 何かにつかまっていられない。 > 歩行者にはきわめて危険。
建造物		<ul style="list-style-type: none"> > 樋が揺れ始める。 	<ul style="list-style-type: none"> > 屋根瓦・屋根瓦材がはがれ始める。 > 雨戸やシャッターが揺れる。 > ビニールハウスのフィルム（被覆材）が広範囲に破れる。 	

図 11 危険性を評価するため用いた指標（抜粋）

ハウスのフィルム（被覆材）が広範囲に破れるなどの被害が出る可能性があるため、特に注意が必要である。

8 おわりに

- (1) ローター中心からの水平距離が大きくなるほど、いずれの対地高度においても、瞬間水平風速は小さくなった。
- (2) 消防ヘリコプターがホバリング中に発生させるダウンウォッシュは、瞬間水平風速 20m/s 以上が観測された。これは、人が転倒し、建物の屋根や壁の一部が破損する危険性がある風速値である。
- (3) 大型機の「このとり」及び「ひばり」は、消防ヘリコプターのローター中心から水平距離が 40m 離れていても自然の風が発生していない場合、人や物に影響が発生する瞬間水平風速である 10m/s 以上が観測された。
- (4) 自然の風が発生していない場合、人や物に影響がないと予想される範囲は、ホバリングの対地高度が 150ft 以下であれば消防ヘリコプターのローター中心から水平距離 50m は必要である。
- (5) 自然の風が発生している場合は、ダウンウォッシュが風下側に流されるため、消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離が 50m 以上の範囲でも警戒する必要がある。
- (6) 本検証で実施した対地高度によらず、全ての機種で、消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離が 40m 以内は、人が転倒し看板やトタン等のものが飛散する瞬間水平風速 10m/s 以上であるため、警戒が必要である。

表4 機種別のホバリング対地高度に対する瞬間水平風速と水平距離

機種名	対地高度	ホバリングしている消防ヘリコプターのローター中心からの水平距離		
		瞬間水平風速 20m/s 以上 30m/s 未満	瞬間水平風速 10m/s 以上 20m/s 未満	瞬間水平風速 10m/s 未満
		・高齢者は転倒する ・建物の屋根等がはがれる ・工事用の足場が崩落する	・転倒する人ができる ・軽量工作物が飛ばされる ・家屋の屋根が一部破損する	・影響はないと思われる
しゅうりょう	150ft	— (風下は ~25m)	15~40m	50m (風下は 50m 以上)
	100ft	~25m (風下は ~40m)	30~40m	
	50ft	~25m		
	7ft			
ひばり	150ft	~25m	30 m (風下は 40m)	50m (風下は 50m 以上)
	100ft		30~40m	
	50ft			
	7ft	~20m (風下は ~25m)	25~40m	
ちべり	150ft	~20m	25~40m	50m (風下は 50m 以上)
	100ft	~20m (風下は ~25m)		
	50ft	~25m	30~40m	
	7ft			

つばめ	150ft	—	~30m	40m (風下は 50m 以上)
	100ft	— (風下は ~20m)	~40m	50m (風下は 50m 以上)
	50ft	~15m (風下は ~25m)	20~30m	40m (風下は 50m 以上)
	7ft	~20m	25~30m	

9 謝辞

本検証の実施にあたり、消防庁消防研究センター大規模火災研究室長の田村裕之先生より多くの貴重な知見を賜りました。また、明星大学より実験場を提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

注釈

※1 地上から見てヘリコプターが空中の一点に留まって飛行している状態。

※2 ヘリコプターから投下したりペリンググローブ及びレグバック降下により、救助員が座席懸垂で地上や水上に降下する方法。

※3 救助員がホイスト装置により地上、建物上及び水上に降下する方法。

※4 「こうのとり」は、3次元風向風速計の設定の不具合から風速を記録することができなかった。

[参考文献]

- 丸山喜久ほか3名：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、土木学会論文集A、Vol. 62、No. 3、pp. 582-594、2006年7月
- 東京消防庁装備部航空隊：装備部航空隊50年のあゆみ、東京消防庁装備部航空隊、pp. 22-23、平成29年4月
- 鈴木英夫：図解ヘリコプターメカニズムと操縦法、株式会社講談社、pp. 30-31、2013年
- 日本風工学会：瞬間風速と人や町の様子の関係 Ver. 2. 0、2016年3月17日
- 気象庁HP：風の強さと吹き方
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kannkyo.html

Study on the Measurement of the Wind Velocity of the Downwash Generated by Hovering Large Helicopters

Ayumu SATOU*, Kouhei KANEKO*, Hidekazu OTAKI**

Abstract

Firefighting helicopters are used by the Tokyo Fire Department at a wide variety of disaster sites. There has been a concern that secondary accidents may occur due to the downwash following the hovering of firefighting helicopters. This study was conducted to perform the multi-point measurements of the wind direction and the wind velocity of the downwash generated during hovering using four levels of altitude and four types of firefighting helicopter.

The study found that, in the downwash generated by a firefighting helicopter during hovering, an instantaneous horizontal wind velocity of 20 m/s or more was observed, and this is forcible enough to knock down a person and partially damage the roof or walls of a building. Moreover, in the case of large helicopters like "Konotori" and "Hibari," an instantaneous horizontal wind velocity of 10 m/s or more, which can affect people and objects, was observed even when the horizontal distance from the center of the rotor of a firefighting helicopter was 40 m away.