

ISSN 0452-2982
UDC 629.735.45
629.7.072
629.7.018.7

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-685

風洞実験による高層ビル周辺の風の測定 －消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験－

奥野善則・赤松重樹
齊藤茂・原田正志

1995年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

概 要.....	1
記 号.....	2
1. はじめに	2
2. 実験の内容	2
2.1 実験装置	2
2.2 風速の測定方法	3
2.3 実験項目	4
3. 結果と考察	5
3.1 現地実測結果との比較	5
3.2 飛行実験の際の風の再現	9
–ビルに対して直角の風向の場合–	
3.3 ビル周辺の風速分布	10
–ビルに対して斜めの風向の場合–	
4. おわりに	14
謝 辞.....	15
参考文献.....	15

風洞実験による高層ビル周辺の風の測定* －消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験－

奥野善則^{*1} 赤松重樹^{*2}
齊藤茂^{*1} 原田正志^{*1}

Wind Tunnel Test of the Turbulent Wind around a High-Rise Building*

－Basic experiment to establish the safety criteria of a fire helicopter－

Yoshinori OKUNO^{*1}, Shigeki AKAMATSU^{*2},
Shigeru SAITO^{*1}, Masashi HARADA^{*1}

ABSTRACT

In the National Aerospace Laboratory, research activities have been carried out to investigate the safety of a fire helicopter in cooperation with the Tokyo Fire Department, which involve wind tunnel tests to measure the turbulent wind around a high-rise building. The fire helicopter now being planned has the capability to suppress fires in high-rise buildings by discharging pressurized water from its tank through a nozzle while hovering nearby the building, which is an approach with very little precedent in the world. One of the problems in realizing this concept is the peculiar turbulence around buildings which may adversely affect flight safety. The present wind tunnel tests clarified the characteristics of the turbulence around a high-rise building. According to the results, a large and abrupt change in wind speed occurs around the building corners. In order to establish the safety criteria of the fire helicopter, piloted simulations will be necessary to verify the safety against such turbulent wind.

Key Words: Wind Tunnel Test, Turbulence, Building, Helicopter

概要

航技研では東京消防庁との共同により、消火ヘリコプタの安全性に関する研究を進めており、今回その一環として、風洞実験を行って高層ビル周辺の風の乱れを測定した。現在構想中の消火ヘリコプタは、ビルの近傍でホバリングしながら機内に積載した消火水をノズルから加圧放水することによって高層ビル火災を消火する能力を有するもので、このような試みは世界的にもほとんど例がない。消火ヘリコプタの実現に際する問題点の一つとして、高層ビル周辺では特有の風の乱れが発生するため、飛行の安全に悪影響を及ぼす可能性が考えられる。今回の風洞実験により、ビル周辺の風の性状が明らかになり、特にビルの角付近では、風速が急激に大きく変化する突風状の乱れが発生することが指摘された。今後消火ヘリコプタの安全基準や運航規定を確立するに際し、飛行シミュレータによる実験等を行って、このような風の乱れに対する安全性を検証する必要がある。

* 平成7年5月31日受付(received 31 May 1995)

* 1 飛行実験部(Flight Research Division)

* 2 東京大学大学院、現日本飛行機㈱(University of Tokyo, presently Japan Aircraft Manufacturing Co., Ltd.)

記号

U, V, W	各測定点での平均風向方向を基準とする座標系における風速成分
U'	水平面内における平均風向方向の風速成分、図2.2.1, 2.2.2参照
U_B, V_B, W_B	地面固定座標系における風速成分
U_I	水平面内の風速の絶対値(無指向性のI型熱線風速計による測定結果)
σ_U	風速の標準偏差(添字は風速の成分を表す)。なお、本報告書では標準偏差の3倍(3 σ)を乱れの強さを表す指標として用いている。
σ/U	乱れの割合(標準偏差を平均風速で無次元化したもの)

1. はじめに

近年ますますビルの高層化が進み、万一火災が発生した場合に従来のはしご車では対処できなくなっているため、ヘリコプタを活用したビル火災消火の可能性について東京消防庁を中心に検討が進められている。¹⁾ ヘリコプタ(最大重量 8t クラスのシングルロータ機)の機内に 1t の消防水を積載し、火災現場近傍でホバリングしながら放水ブームを目標点に向けて約100秒間放水を行う(図1.1)。消火活動中のヘリコプタとビルとの距離は、放水の効率やホバリングの安全性などを考慮して約20mと想定されている。

このような消火ヘリコプタの実現に際する問題点として、高層ビル周辺では強い乱れを伴う風、いわゆるビル風が発生するため、安定したホバリングを行うことが困難になる可能性が考えられる。当航空宇宙技術研究所で

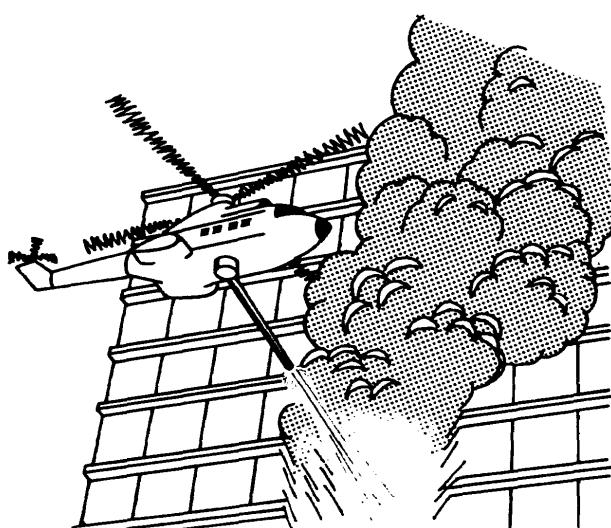


図1.1 消火ヘリコプタの概念図

は、東京消防庁との共同により、消火ヘリコプタの安全性と実用性に関する研究を進めてきた。消火ヘリコプタに要求される性能の目安として、風速 7 m/s の条件下でも安全かつ効果的に消火活動を行える能力が想定されている。これは、東京地方では、風速(東京管区気象台で地上高度 75m で計測された10分間の平均風速)が 7 m/s を越えるのは年間の 5 % 程度であり、即ちこの要求を満たすことによって 95% の稼働率を確保できることを基準に設定されたものである。

現在構想中の消火ヘリコプタがこのような要求性能を満たし得るかを調べるために、まず飛行シミュレータを用いたシミュレーション実験が行われた。^{2,3)} この結果、風速 7 m/s でも 90% 程度の割合で放水を目標窓内に命中できることが実証され、消火ヘリコプタが新たな消防手段として有効であることが確認された。この時用いたビル風の数学モデル^{4,5)}は、実測データ^{1,6)}に基づいて白色ノイズ+ローパスフィルタの形式でモデル化されたものであり、ビル風中での機体の応答を解析的に扱える利点を持つほか、計算が簡単なため実時間でのシミュレーションにも向くものである。ただし、ビル風の平均的な周波数特性を再現するように設計されており、風向やビルとの位置関係による影響などは考慮されていない。例えばビルの風下側では剥離流の影響によって機体の固有運動の周期に近い乱れが発生し、飛行の安全に悪影響を及ぼす可能性も考えられる。今後消火ヘリコプタの安全基準や運航規定を定める際には、このような汎用的な数学モデルではなく、様々な条件下で実際に測定されたビル風のデータを直接用いて安全性を検証することが望ましい。一方、実際のビル周辺では、風向や測定点など限られた条件内でしか風速の測定を行うことはできない。そこで今回、風洞内に実在の高層ビル(東京芝浦のシーバンスピル)周辺の風を再現し⁷⁾、消火ヘリコプタのホバリング位置と想定されるビルの壁面から 20m の距離に相当する点における風速分布等を測定した。

なお、本実験は航空宇宙技術研究所と東京消防庁との共同研究「消火ヘリコプタの安全基準に関する研究」の一環として、東京消防庁「消防ヘリコプタの消火活動に係わる検討委員会」の一員である気象庁気象研究所において行われたものである。

2. 実験の内容

2.1 実験装置

実験は気象庁気象研究所の大型気象風洞において、平成 6 年 11 月 15 日～18日の 4 日間にわたって行われた。この風洞内では速度成層装置によって市街地の乱流境界層が 1/500 スケールで再現されており、その風速分布は指数 1/4 のべき分布、一様流風速の 95% 値を示す境界層高さは

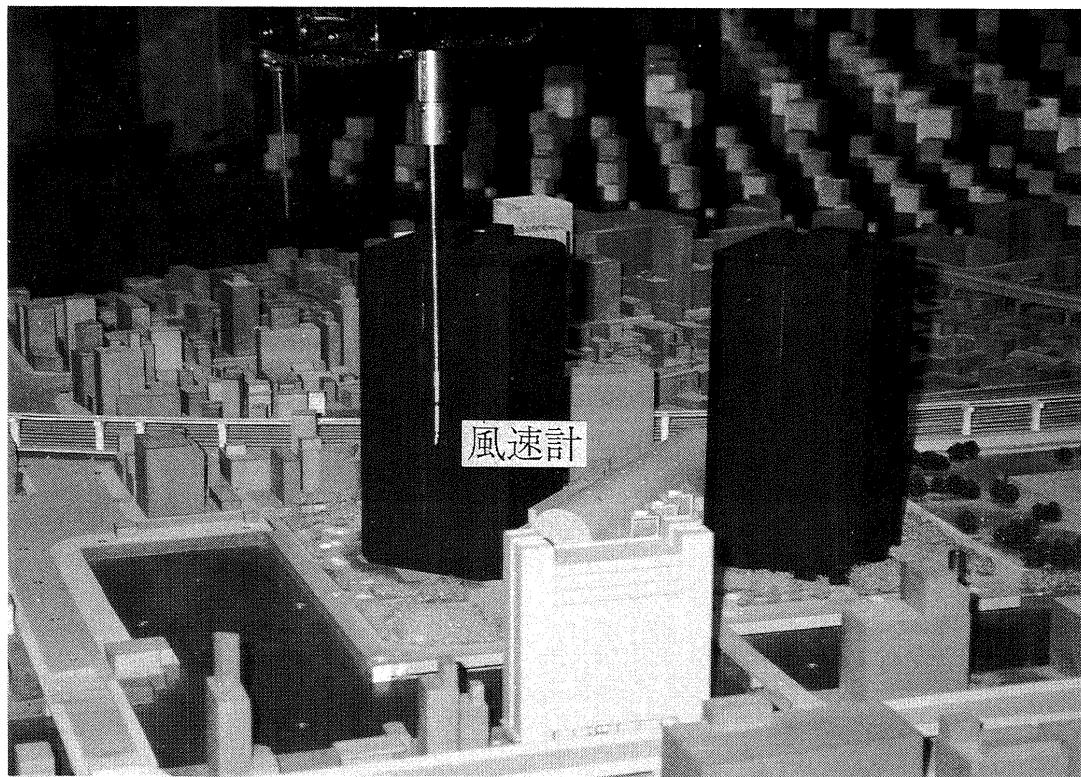


図2.1.1 風洞模型

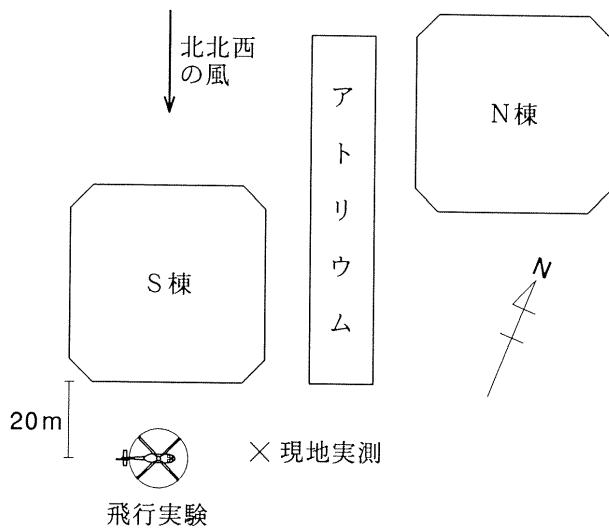


図2.1.2 ビルの配置図

300m、乱流強度は地上10mで25%である。風洞の一様流風速は8 m/sとした。この時のレイノルズ数は境界層高さで無次元化した場合約 3×10^5 と十分大きいため、風洞内の乱流構造は現地と相似になっており、また風速によって変化しないと仮定した。

図2.1.1に風洞模型の写真を示す。東京芝浦のシーバンスツインビル(地上24階建て、高さ約100m)周辺の直径1km以内の建物、および風上側2km以内の高さ50m以上の建物が再現されている。

図2.1.2にビルの配置図を示す。ほぼ同一の形状のビル

が2棟隣接しており、その間に高さ約30mの建物(アトリウム)が建っている。ビルの底面は1辺約52メートルの正方形であるが、角が約6m切り落とされた形になっている。

2.2 風速の測定方法

風速の測定はX型熱線風速計(直径5 μm、長さ1.25 mmの白金メッキタンクステン線)を用いて行った。同時に2軸方向の風速成分しか測定できず、また有効測定範囲が±30度に限定されるため、以下の手順で各測定点における3軸方向の風速成分を測定した。

- (1)煙と気流糸(実際にはたんぽぽの種を用いたもの)を用いて流れの様子を可視化し、各測定点での平均的な流れの方向を調べる。
- (2)風速計の位置を測定点の座標に合わせ、センサの測定軸2軸を水平面内に取り、主軸を平均風向方向に向ける。
- (3)平均風向に直交する方向の風速の平均値が0に近づくようにセンサの水平角度(図2.2.1, θ_1)を5度刻みで振って定め、U' と V を測定する。
- (4)センサの2軸を鉛直面内に取り、(3)と同様にして上下方向の角度(図2.2.2, θ_2)を定め、U と W を測定する。

上記の手順により、各測定点での平均風向方向を基準とする座標系における風速成分が測定される。これらの結果から、以下の式によって地面固定座標系における風

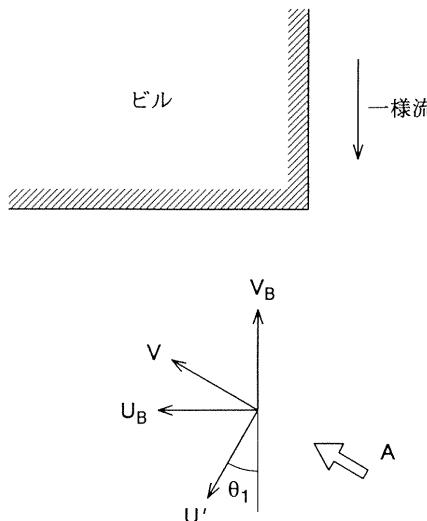


図2.2.1 風速測定の座標系(上からみた図)

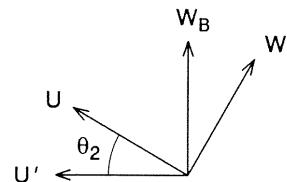


図2.2.2 風速測定の座標系(図2.2.1のA方向から見た図)

速成分(U_B , V_B , W_B)を求めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} U_B = U' \sin \theta_1 + V \cos \theta_1 \\ V_B = -U' \cos \theta_1 + V \sin \theta_1 \\ W_B = U \sin \theta_2 + W \cos \theta_2 \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

ただし、X型熱線風速計は風向の変動が激しい箇所(主にビルの風下側)では正確な値を示さないため、無指向性のI型熱線風速計を用いて水平面内の風速の絶対値 U_1 も合わせて測定した。

各測定結果はサンプリングレート2500Hzで時歴データとして収録した。これは、スケール換算(1/500)すると実時間での5 Hzに相当する。ただし、風速計の空間分解能を熱線長の4倍程度の直径を持つ渦までと仮定すると約5 mmとなるため、風速8 m/sの時の周波数分解能は約1600Hz(実時間で約3 Hz)となる。

2.3 実験項目

実験は次の3つの項目について行った。

(1) 現地実測結果との比較

東京消防庁「消防ヘリコプタの消火活動に係わる検討委員会」の活動の一環として、平成4年11月28日に芝浦シーバンスビルの現地においてビル風の実測が行われた。¹⁾ 当日の風向は北北西(ビルの壁面にはほぼ直角の方向、図2.1.2参照)であり、まだ風速の測定は3次



図2.3.1 3次元超音波風速計

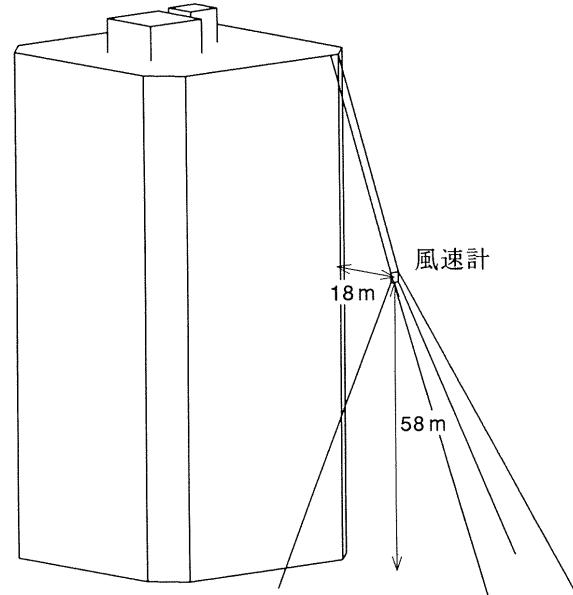


図2.3.2 実際の高層ビルでの風速の測定位置

元超音波風速計(図2.3.1)をS棟の角から18m風下、高さ58mの位置にワイヤで支持して行われた(図2.3.2)。風洞実験結果の検証のため、風洞内でも同じ条件を再現し、平均風速、乱れの強さ、パワースペクトルなどを比較した。

(2) 飛行実験の際の風の再現

平成6年1月14日に芝浦シーバンスビルの近傍でヘリコプタの実機によるホバリング実験が行われた(図2.3.3)^{2,3)}。当日の風向は(1)と同じく北北西、ホバリングはS棟の風下20mの位置で行われた(図2.1.2参照)。風洞内でこの条件を再現し、実際に飛行を行った

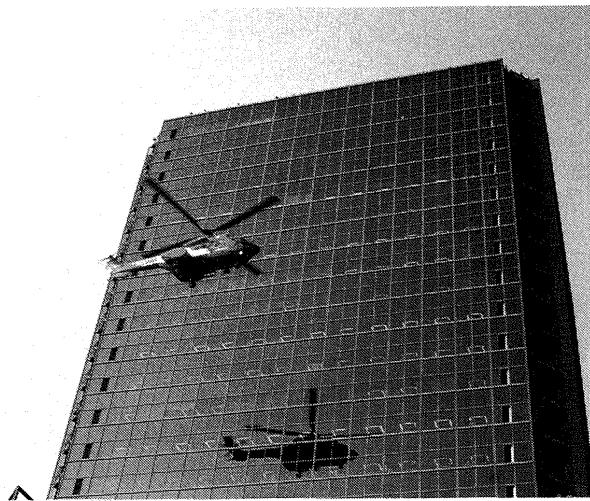


図2.3.3 ビル近傍でのホバリング実験

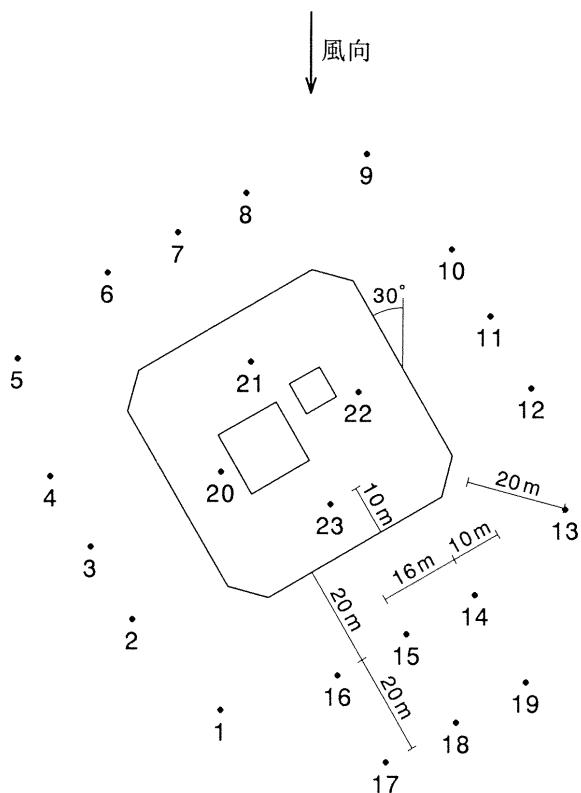


図2.3.4 ビル周辺での風速の測定点

場所に相当する点で風速の時歴を取得した。

(3) ビル周辺の風速分布の測定

消火ヘリコプタの安全基準策定のための資料として、消火活動時のホバリング位置と想定されるビル周辺、壁面から20mの距離に相当する測定点(図2.3.4)における風速分布を測定した。風向はビルに対して斜め方向とし、非対称性による影響を見るため、図2.3.4に示した角度(30度)を選んだ。なお、この実験に限り、結果に汎用性を持たせるため、周辺の建物を含まないビル単体の模型を用いて行った。

3. 結果と考察

表3.1に全ての実験ケースについて風速の平均値と標準偏差を示す。これらの値は1分間の測定結果(現地実時間の500分間に相当する)に基づくものである。また、表中の風向は、気流糸によって風向の変動を可視化した結果で、→印と△印がそれぞれ風向の変動が非常に激しかった点とやや激しかった点、また←印が一様流風向に対して逆流していた点を表している。風向の変動が激しかった点についてはI型熱線風速計による測定結果も合わせて示されている。

なお、全ての実験は風洞の一様流風速8m/sで行われたが、この時ビルの屋上付近(地上高度約100m)での平均風速は約7m/sであった。従って、消火ヘリコプタの所期の要求性能である風速7m/sで安全かつ効果的に消火活動を行う能力を達成するためには、今回の風洞実験で得られた全ての風速データに対して安全性、有効性を実証する必要がある。

以下、個々の結果について考察を行う。

3.1 現地実測結果との比較

図3.1.1は図2.3.2に示したビル角後流の測定点において実測された風速の時歴の例である。 U_B はビルの壁面に平行な水平方向成分、 W_B は鉛直方向成分であり(図2.2.1, 2.2.2参照)、それぞれ上の図が1200秒間の時歴で、下の図はこのうちの120秒分(消火ヘリコプタの消火活動時間にほぼ等しい)を時間軸を10倍に引き延ばして描いたものである。表3.2に現地実測結果の各成分の平均値と標準偏差(一様流の風速、風向が比較的安定していたと思われる120秒間の値)を示す。また、表3.3にこれを平均風向方向を基準とする(U , V , W)座標系に変換した結果を示す。

現地実測では、風速計はワイヤで支持されたため、加速度計を設置して揺れによる影響を合わせて測定した。図3.1.2は風速計の U_B 方向の加速度とそれを積分して得られた速度の時歴の例である(時間軸は図3.1.1に示した風速 U_B のものと対応している)。風速計の揺れの速度(1200秒の測定時間中)は標準偏差が0.08m/s、最大値が0.23m/s程度であり、風速の測定結果に及ぼす影響は無視して良いと考えられる。

一方、図3.1.3は同じ測定点で風洞実験によって測定された風速の時歴の例である。時間軸は風洞での測定結果をスケール換算(500倍)したもので、現地での実時間に相当する。ただし、 U_B と W_B はそれぞれ別の時刻に測定された(U' , V)と(U , W)から式(2.1)によって求められたものである。

現地実測では、ビルの屋上に設置された風速計(地上高

表3.1 風洞実験結果の平均風速と標準偏差

測定点		風向	θ_1	U'	$\sigma_{u'}$	V	σ_v	θ_2	U	σ_u	W	σ_w	U_1	σ_i	
実測	風下 屋上		10 0	2.47 7.00	1.14 1.02	0.02 0.26	0.59 0.89	15 5	2.62 7.11	1.07 1.05	0.01 0.00	0.56 0.53	2.17 7.03	1.05 1.05	
飛行実験	1 2 3 4 5 6	↔	0 0 20 10 5 0	1.60 1.36 1.41 3.08 4.55 4.40	0.76 0.67 0.66 1.24 1.04 1.03	0.03 0.06 0.02 0.03 0.07 0.11	0.32 0.28 0.33 0.70 0.74 0.65						1.08 0.98 1.06 2.82 4.50 4.30	0.48 0.44 0.48 1.20 1.07 1.12	
			-5	5.92	1.13	0.19	0.86						5.85	1.15	
			1 2 3 4 5 6 7	2.15 2.23 3.58 6.22 5.35 4.39 3.58	0.97 1.05 1.69 1.05 0.83 0.79 0.79	0.01 -0.20 0.02 0.19 0.08 -0.03 0.10	0.55 0.61 0.75 0.85 0.72 0.68 0.58						1.79 1.86 3.21	0.84 0.96 1.71	
			8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19	3.08 3.64 4.28 4.69 5.18 5.49 2.47 1.99 -170 -160 30 -5	0.79 0.83 0.81 0.80 0.79 0.78 1.06 0.89 2.41 2.72 2.40 1.21	0.02 0.06 -0.08 -0.07 0.01 0.19 0.01 0.15 -0.02 -0.03 0.06 0.20	0.55 0.63 0.62 0.59 0.60 0.64 0.63 0.44 0.60 0.63 0.54 0.87						3.20 4.52 4.92 1.55 1.88 2.04 1.85 5.08	0.68 0.74 0.95 0.72 0.78 0.84 0.90 1.19	
			10 11 12 13 14 15 16 17 18 19	-20 -20 -20 -20 -15 -15 -20 -20 -160 -5	4.60 4.60 4.60 4.60 3.42 3.42 4.60 4.60 2.72 5.37	0.77 0.77 0.31 0.44 0.74 0.74 0.77 0.77 1.06 1.08						2.36 5.34 5.96 1.12 1.46 1.84 5.58	1.03 0.69 0.72 0.53 0.67 0.91 1.13		
			1 3 5 7 9 11 13 15 16 14 19	40 0 10 15 -10 -15 -10 -5 -	3.44 4.77 5.94 4.22 4.67 5.47 6.15 1.64	1.62 1.78 0.76 0.63 0.72 0.70 0.73 0.76	0.07 -0.08 0.05 -0.04 0.08 0.00 0.00 -0.02	0.70 0.88 0.69 0.60 0.61 0.59 0.62 0.37						4.60 4.22 5.34 5.96 1.12 1.46 1.84 5.58	1.85 0.65 0.69 0.72 0.53 0.67 0.91 1.13
			3 7 11 15 20 21 22 23	0 5 -5 5 -5 -10 0 5	6.38 5.55 6.03 6.25 6.90 7.07 6.77 6.87	1.17 0.65 0.66 1.19 1.33 0.82 0.70 0.81	-0.13 -0.14 -0.22 0.04 0.19 0.24 -0.11 0.14	0.83 0.58 0.57 0.78 0.83 0.89 0.63 0.80	5 10 5 0 5 0 5 -5	6.56 5.59 5.59 6.30 6.71 6.84	1.06 0.67 0.67 1.04 0.71 0.76	-0.17 -0.03 0.04 -0.15 0.13 0.00	0.66 0.47 0.44 0.47 0.32 0.32	6.32 5.40 5.89 6.13 6.67 6.66	1.12 0.66 0.67 1.15 0.69 0.71

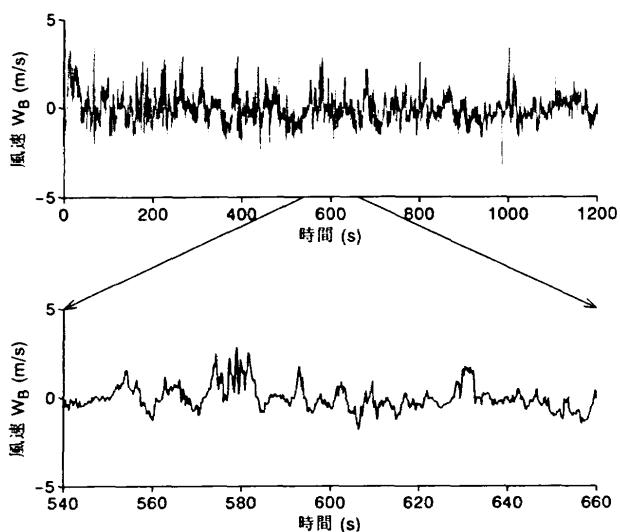
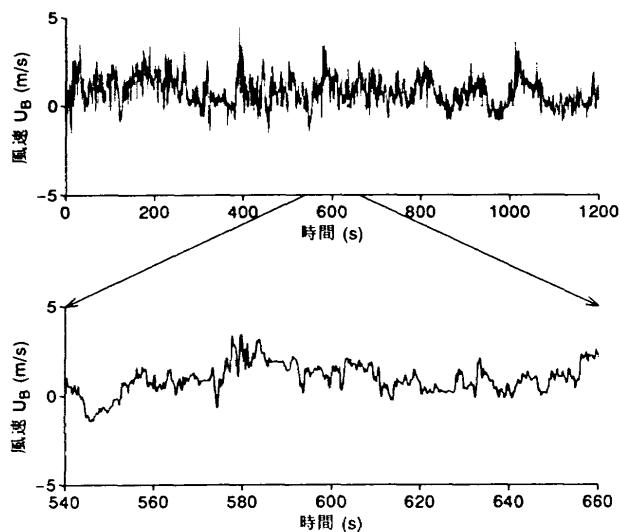


図3.1.1 現地実測による風速の時歴の例

表3.2 現地実測結果の平均風速と標準偏差
－(U_B, V_B, W_B)座標系－

測定点	U _B	σ_{UB}	V _B	σ_{VB}	W _B	σ_{WB}
風下	0.24	0.53	-0.72	0.95	0.03	0.59
屋上	-0.06	0.74	-3.50	0.74	0.50	0.95

度112m、屋上から12m)による平均風速が3.5m/sであった。風洞実験(一様流風速8m/s)でも同じ点で風速の測定を行った結果、平均風速は7.0m/sであったため、以

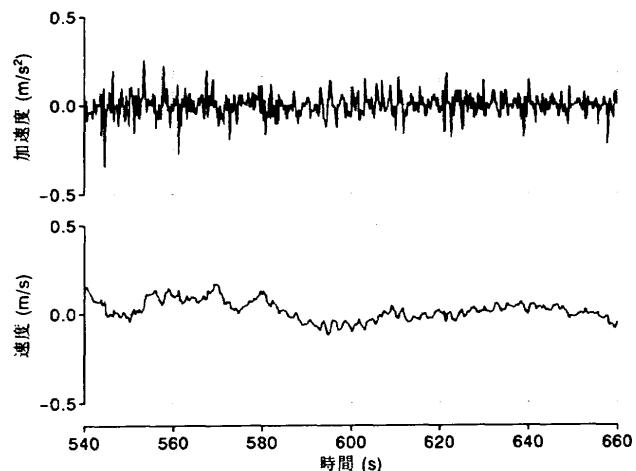


図3.1.2 現地実測での風速計の加速度と速度の時歴の例

下、この点での平均風速が等しくなるように換算して(実測結果を2.0倍して)両者の比較を行う。

図3.1.4はビルの屋上とビル角後流の測定点において風洞実験と現地実測による風速と風向の変動の様子を比較したものである。矢印は水平面内における平均風速U' と風向を表し、また扇形は外側、内側の弧がそれぞれU'±2σ_{U'}(内側の弧がないのはU'-2σ_{U'}が負になる場合)を、内径角度が平均風向±tan⁻¹(2σ_{U'}/U')を表している。ここでσ_{U'}とσ_vは各測定点での水平面内における平均風向方向とそれに直交する方向の風速の標準偏差である(図2.2.1, 2.2.2参照)。個々の値は表3.1, 3.3にまとめられている。ビル角後流の測定点での両者の結果を比較すると、平均風速では差異が見られるものの、現地実測結果は分散が大きく、風洞実験結果は現地実測結果の分散の範囲内にほぼ収まっていることが判る。

図3.1.5は鉛直面内の風速と風向の変動の様子を比較したものである。鉛直方向でも、水平方向同様、現地実測結果は風洞実験結果に比べて分散が大きく、またビル角後流の測定点では平均風速、風向にも若干の差異がみられる。今後今回の風洞実験結果を用いて消火ヘリコプタの安全性を検証する際には、現地実測結果に対してこのような差異があることを念頭に置く必要がある。

図3.1.6は風洞実験と現地実測による風速U_B, W_Bのパワースペクトルを比較したものである。風洞実験結果は現地実測結果に比べて低周波数域(<3×10⁻²Hz)でパワーが小さくなっているが、これは実測結果には一様流の風速、

表3.3 現地実測結果の平均風速と標準偏差
－(U, V, W)座標系－

測定点	θ_1	U'	$\sigma_{U'}$	V	σ_v	θ_2	U	σ_u	W	σ_w
風下	18	0.76	0.94	0.00	0.55	2	0.76	0.94	-0.00	0.59
屋上	-1	3.50	0.74	0.00	0.74	0	3.50	0.74	0.50	0.95

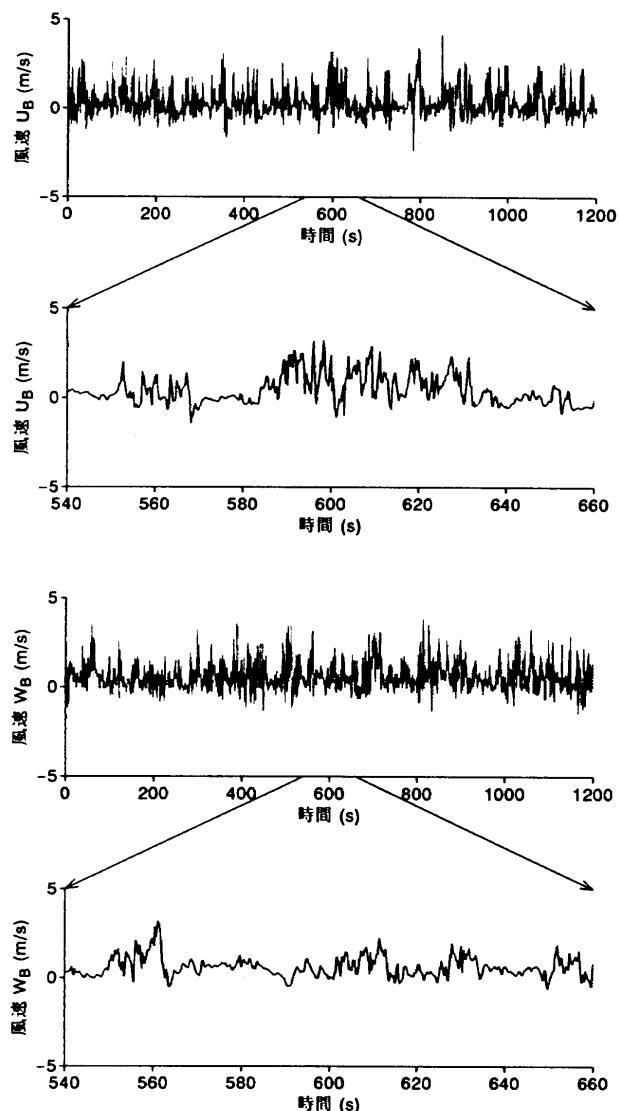


図3.1.3 風洞実験による風速の時歴の例

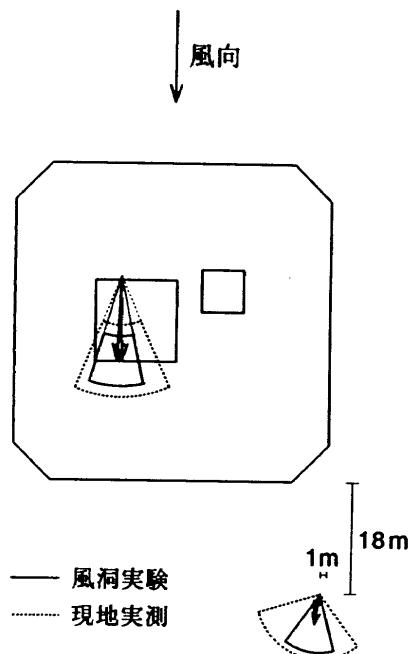


図3.1.4 風洞実験と現地実測による平均風速、風向と分散の比較(水平面)

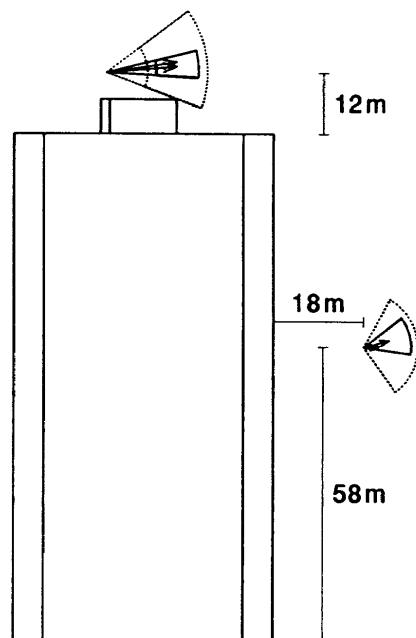


図3.1.5 風洞実験と現地実測による平均風速、風向と分散の比較(鉛直面)

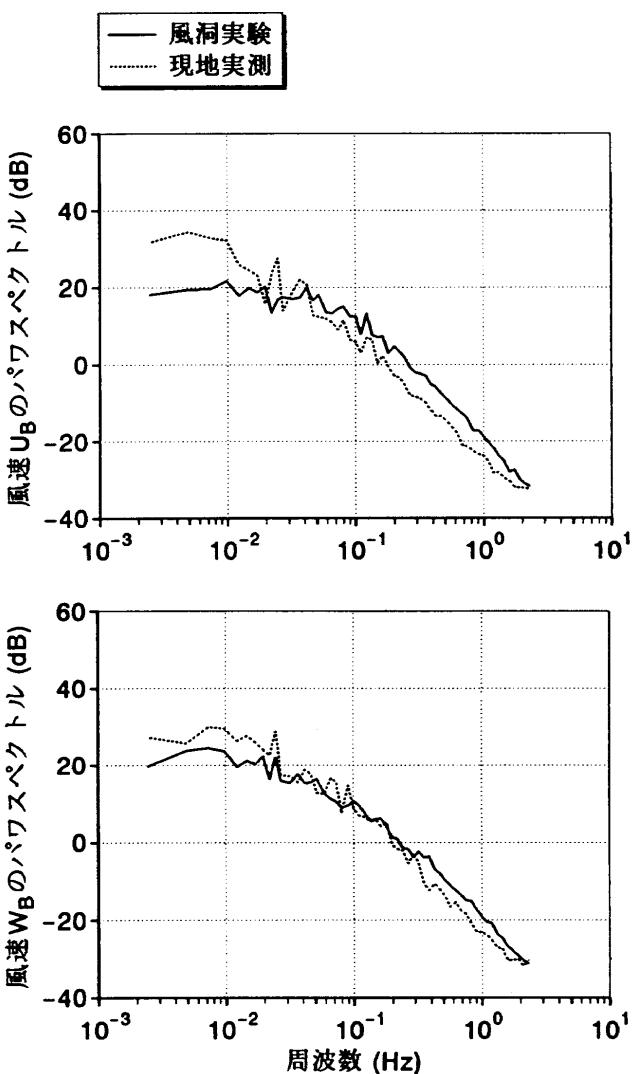


図3.1.6 風洞実験と現地実測による風速のパワースペクトルの比較

風向の変動成分が含まれるためと思われる。ヘリコプタの安定性に影響を及ぼす周波数域($10^{-1} \sim 10^0$ Hz付近)では両者は比較的良く一致している。

以上の結果をまとめると、風洞実験結果を現地実測結果と比較した場合、平均風速では差異が見られるものの、風洞実験結果は現地実測結果の分散の範囲内にほぼ収まっている。またパワースペクトルでは両者の間に良い一致が見られるため、今回の風洞実験で得られた風速の時歴データは、今後消防ヘリコプタのシミュレーション実験等でそのままビル風として用いてよいと判断する。ただし、シミュレーション実験でも風洞実験結果と現地実測結果を比較してパイロットから見て有為な差がないことを確認する必要がある。また、両者の比較はビル角後流の1点のみで行われたが、他の測定点(風上や風下死水領域)においても平均風速、風向、分散、パワースペクトルなどの相関を検証することが望ましい。

3.2 飛行実験の際の風の再現

－ビルに対して直角の風向の場合－

図3.2.1は飛行実験の際の風向(ビルに対してほぼ直角の方向)を風洞実験で再現した結果である。点線は飛行実験の際にビルの屋上の測定点(地上高度106m、屋上から6m)で、超音波風速計によって実測された結果で、平均風速がこの点での風洞実験結果と一致するように換算(1.09倍)して示されている。測定点1～6は、ビルの風下20m、高度50mで、飛行実験において実際に飛行を行った場所に相当する点である。円で示された点は風向の変

動が激しかった場所で、矢印がX型熱円風速計による平均風速 U' と風向を、円がI型熱線風速計による平均風速 U_i および $U_i \pm 2\sigma$ (円が2つしかないのは $U_i - 2\sigma$ が負になる場合)をそれぞれ表している。

図3.2.2は図3.2.1に示した各点での測定結果(全てI型熱線風速計によるもの)をグラフにしたものである。平均風速 U_i はビルの風横側、測定点5で最大であるが、乱れの強さ(ここでは標準偏差 σ の3倍で示されている)は剥離点であるビル角の後流、測定点4で最大となっており、

—— 平均風速 (U_i)
- - - 乱れの強さ (3σ)
..... 乱れの割合 (σ/U_i)

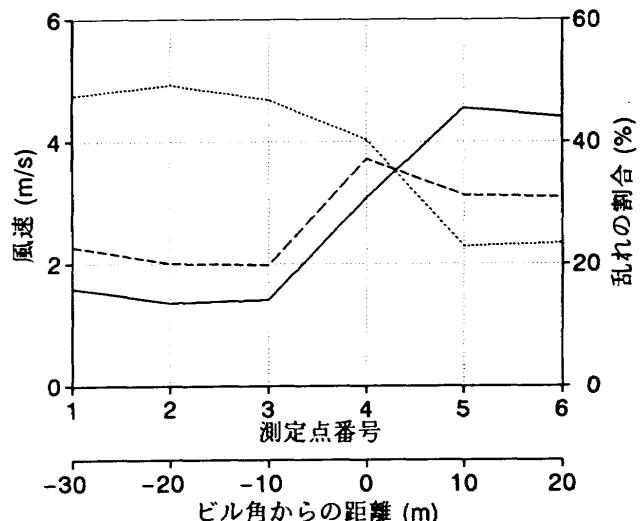


図3.2.2 飛行実験を行った点での平均風速と分散の分布

..... 風横 (測定点6)
—— ビル角後流 (測定点4)
- - - 風下死水領域 (測定点1)

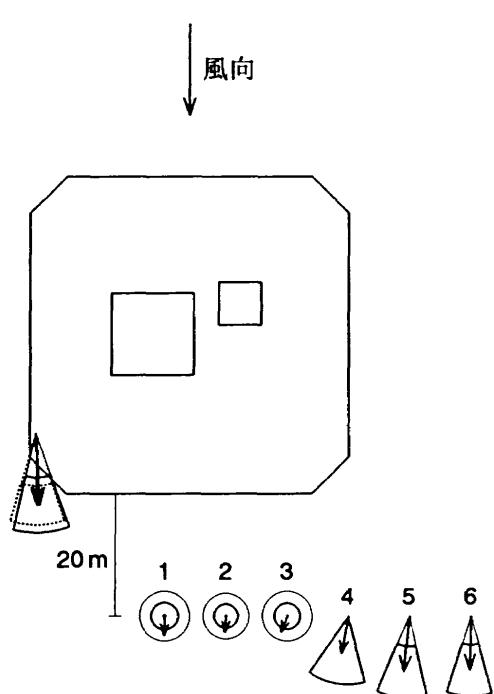


図3.2.1 飛行実験を行った点での平均風速、風向と分散

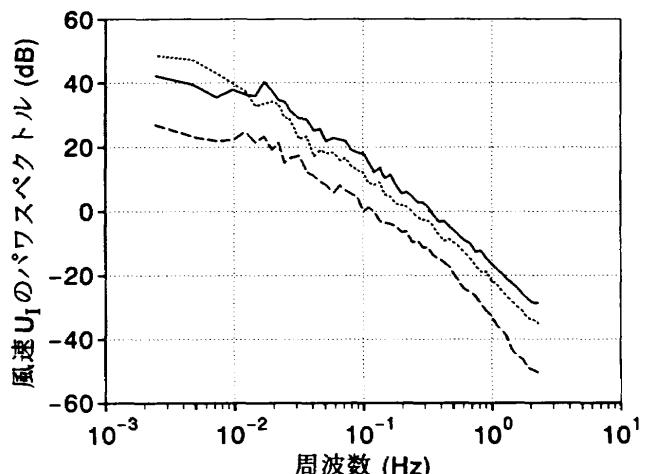


図3.2.3 飛行実験を行った点での風速のパワースペクトルの比較

また乱れの割合 σ/U_1 は死水領域である測定点 2 で最大となる。このうち、ヘリコプタの安定性に直接影響を及ぼすのは乱れの強さであり、従ってビルの角付近でホバリングする際に風による影響が最も強くなる。この結果は、飛行実験におけるパイロットコメントによって裏付けられる。なお、飛行実験結果の詳細は文献³⁾にまとめられている。

図3.2.3はビルの風横側(測定点 6), ビル角後流(測定点 4), および風下死水領域(測定点 1)での風速 U_1 のパワースペクトルを比較したものである。ビル角後流では、剥離流の影響によって、ビルの風横側に比べてより高い周波数域($>10^{-2}\text{Hz}$)にパワーが変移している。また風下死水領域では、ビル角後流に比べて全体に約20dBパワーが小さいが、 $1 \sim 5 \times 10^{-1}\text{Hz}$ 付近で相対的にパワーが若干大きくなっている。ただし、当初ビルの風下側では消火ヘリコプタの機体の固有運動(周期数秒~十数秒程度)が励起されるような現象が懸念されたが、今回の風洞実験結果で見る限り、この周波数域での風のパワーは飛行の安全性に影響を及ぼすほどではないと思われる。また、飛行実験においてもこの様な現象は報告されなかった。

3.3 ビル周辺の風速分布

—ビルに対して斜めの風向の場合—

図3.3.1は地上高度50mで図2.3.4に示した測定点における平均風速、風向とその分散を図示したものである。各測定点でのそれぞれの値は表3.1にまとめられている。測定点14~19では風向の変動が激しく、特に測定点16, 17では平均風向が一様流に対して逆になっており、ビル

右側後方で流れが回り込んで大きな渦ができていることが推定される。

図3.3.2はこの測定結果から平均風速と乱れの強さをグラフにしたものである。乱れの強さはビル角後流である測定点 3 で最大で、その値(3σ)は 5 m/s に達しており、飛行実験の際の風向(ビルに対して直角の方向)の場合の乱れの強さの最大値(図3.2.2, 測定点 4)と比べて約 35% 大きくなっている。従ってこのような場所で消火活動を行う場合には特に注意が必要である。今回の実験は時間的制約から特定のビル、風向の条件で行われたが、ビル周辺の立地条件などによっては(例えば新宿副都心のように高層ビルが密集する地域等では)より一層強い乱れが発生する可能性もあり、更なる検討が必要である。

また、図3.3.2において測定点 3 と 4 の間では 16m の距離の間に風速が 3 m/s 近く変化しているが、機体が前進飛行する場合には風速の空間的な変化も機体の安定性に影響を及ぼすため、例えば火災現場へのアプローチ中にこの領域を通過する際にも注意が必要になる。また、この距離(16m)は消火ヘリコプタの母機と想定されている機体のロータ直径にはほぼ等しい。従来航技研で行われた消火ヘリコプタの理論解析^{4,5)}や飛行シミュレータによる実験^{2,3)}では、ロータ面内で風速を一律と仮定する数学モデルが用いられていたが、このように風速の空間的な変化率が大きい場合、ロータ面内での風速の変化による影響が無視できない可能性もあるため、今後慎重に検討する必要がある。またこの結果はあくまで各測定点での平均風速による比較であるが、ある瞬間での風速の空間的な変化はより一層大きくなることも考えられるため、空間上の複数点で同時に風速を測定することが望ましい。

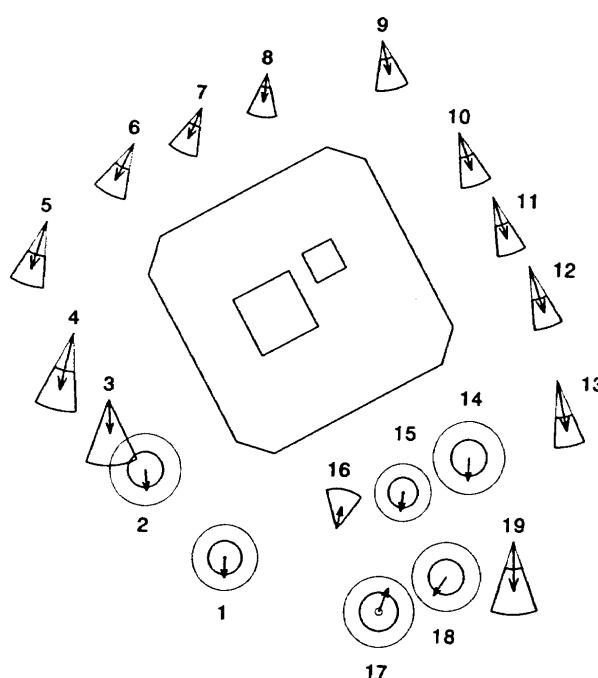


図3.3.1 ビル周辺の平均風速、風向と分散(高度50m)

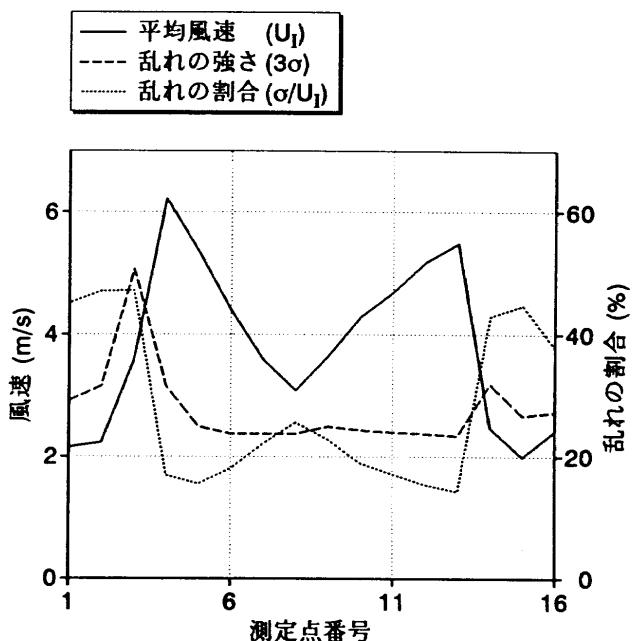


図3.3.2 ビル周辺の平均風速と分散の分布

図3.3.3は3つの測定点で風速のパワースペクトルを比較したものである。ビルの風上側(測定点7)に比べて、ビル角後流(測定点3)では全体の周波数域ではほぼ20dB

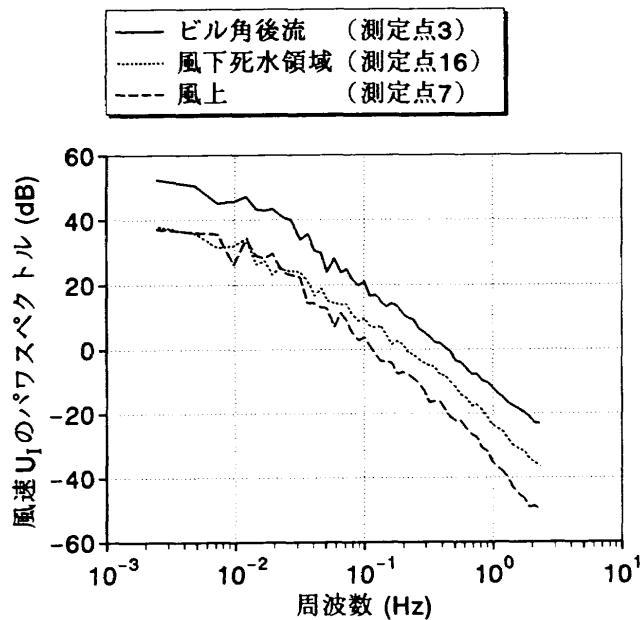


図3.3.3 ビル周辺の3点における風速のパワースペクトルの比較

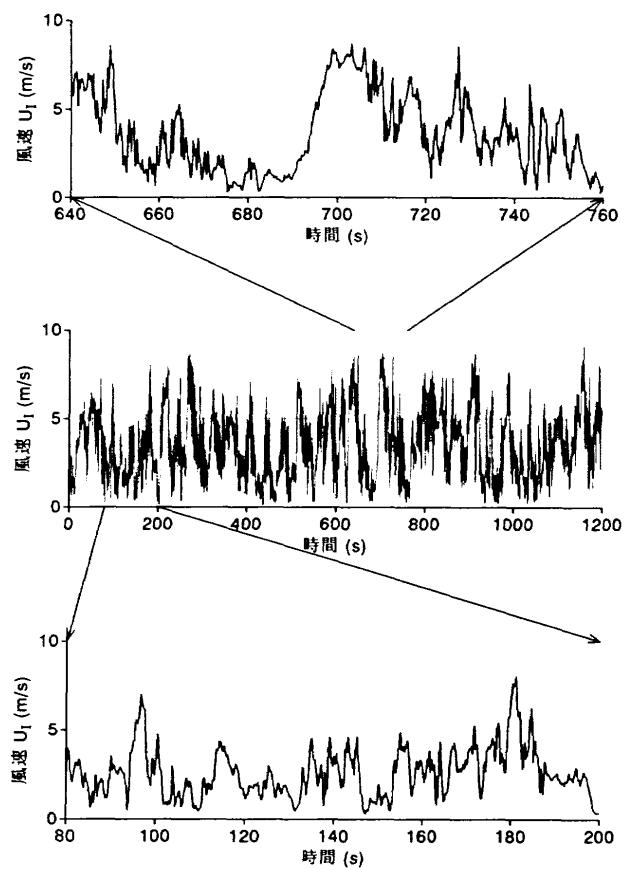


図3.3.4 風洞実験結果の時歴の例

パワーが大きくなっている。また風下死水領域(測定点16)では $3 \times 10^{-2} \text{Hz}$ 以上の周波数域で周波数が高くなるほど相対的にパワーが大きくなっている。ただし、前述のビルに対して直角の風向の場合(図3.2.3)同様、どの測定点においても消防ヘリコプタの機体の固有運動の周期(数秒～十数秒程度)に近い乱れが突出するような現象は見られなかった。

図3.3.4は最も乱れの強かった測定点3における風速 U_t の時歴の例である。中央の図は1200秒間の時歴で、上下の図はこのうちの120秒分を時間軸を引き延ばして描いたものである。ビル周辺の気流の変化の時間スケールは、消防ヘリコプタの消防活動の時間(放水時間だけで約100秒と想定されている)に比べて長いため、消防活動中に機体が受ける風の乱れは、同じ一流風速、風向の条件でも場所によって大きく異なる。下の図に示した例では周期変動成分による連続的な乱気流と見なせるのに対して、上の図の例では孤立突風的な性質が強く現れている。

消防ヘリコプタの安全性に関して、当初ビルの風下側では剥離流の影響によって機体の固有運動(周期数秒～十数秒程度)が励起されるような現象が懸念されたが、図3.2.3や図3.3.3に示したように、このような周波数域で突出したピークを持つようなパワースペクトルはどの実験ケースにおいても見られなかった。従って、ビル風の持つ乱気流的な性質は、消防活動の平均的な効率などには影響を及ぼすが、飛行の安全性を損なうほどではないと思われ、むしろ図3.3.4の上の図に示したような孤立突風的な要素の方が、消防ヘリコプタにとって危険性(例えば機体が流されてロータブレードがビルの壁面に接触してしまうような可能性)は高いと思われる。

突風指標の導入

ビル風の持つ孤立突風的な要素を定量的に抽出するた

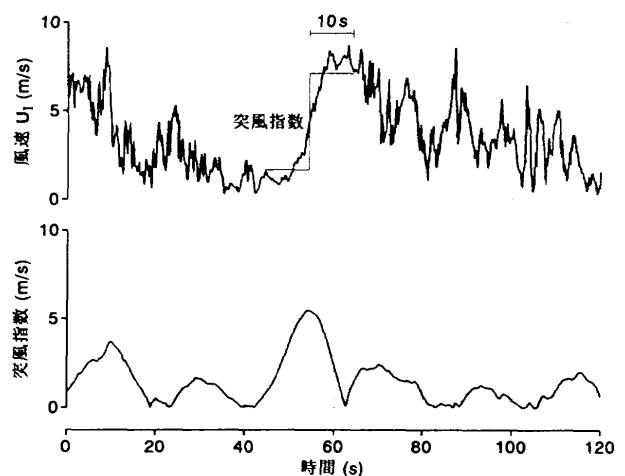


図3.3.5 突風指標の定義と解析例

め、ある時刻の前後10秒ずつの平均風速の差をとって(即ちステップ状の風速の変化に換算して)突風指数として定義した。この10秒という時間は、消火ヘリコプタの機体の固有運動の平均的な周期とほぼ等しくなるように定めた。図3.3.5は突風指数の解析例を示したもので、上の図が風速の時歴、下の図がこれに対応する突風指数の時歴である。

図3.3.6は3つの測定点での突風指数(I型熱線風速計によるもの)の遭遇頻度を比較したものである。横軸は突風指数の値、縦軸はその突風指数に100秒の間に遭遇する

確率を示している。例えば、測定点3では、100秒の間に60%の確率で3 m/sを越えるステップ状の風速の変化に遭遇し、またその最大値(4096秒の測定時間中に観測された最大値)は5 m/sを越えている。今後、飛行シミュレータによる実験等を行い、このような突風に遭遇した場合にも、安全にホバリングを行えるか、あるいは少なくとも安全に現場から離脱できることを実証する必要がある。

図3.3.7は各測定点で観測された突風指数の最大値と乱れの強さ(3σ)を比較したものである(X型熱線風速計による測定結果)。これらの結果から、各測定点で発生し得る最大突風指数は、その点での風速の 3σ にほぼ等しいと考えられる。また、○印はI型熱線風速計による測定結果に基づく最大突風指数(図3.3.6参照)であり、測定点3ではX型熱線風速計による結果より約20%大きな値を示している。X型熱線風速計は有効測定範囲が±30度に限定されるため風向の変動が激しい測定点では正確な値を示さないが、一方無指向性のI型熱線風速計による測定結果では風向の変動による影響を考慮することができないため、消火ヘリコプタの安全性を検証する際には両者の結果を併用することが望ましい。

高度による影響

図3.3.8, 9はそれぞれ高度90m(屋上から10m下)、高度110m(屋上10m)での測定結果を図示したものである。高度90mでも測定点3で最も乱れが強くなっている。また、高度110mでは、ビル屋上の4点(測定点20~23)でも測定を行った。これらのデータは、消火ヘリコプタのみではなく、通常のヘリコプタの運用における高層ビル屋上へ

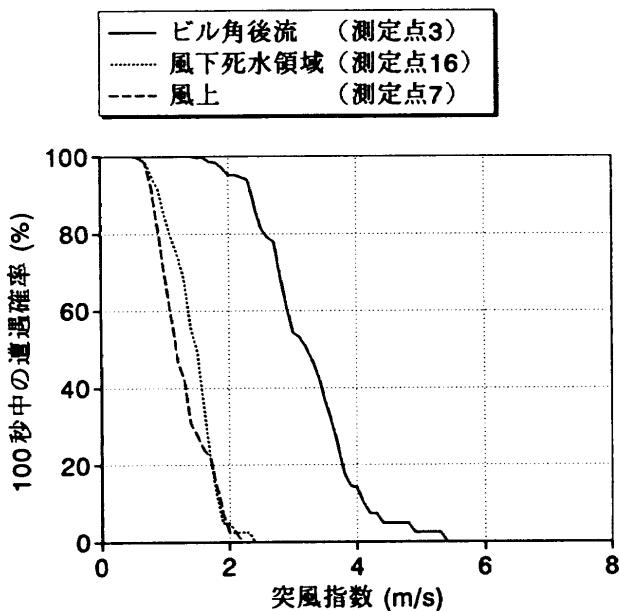


図3.3.6 ビル周辺の3点における突風指数の頻度の比較

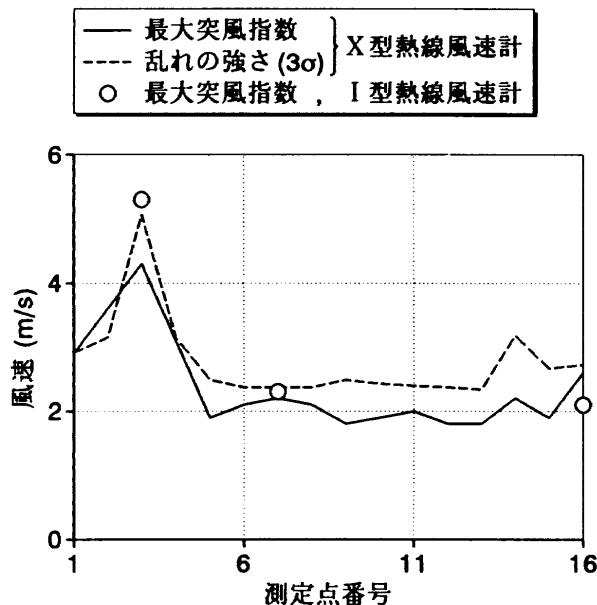


図3.3.7 最大突風指数と乱れの強さの比較

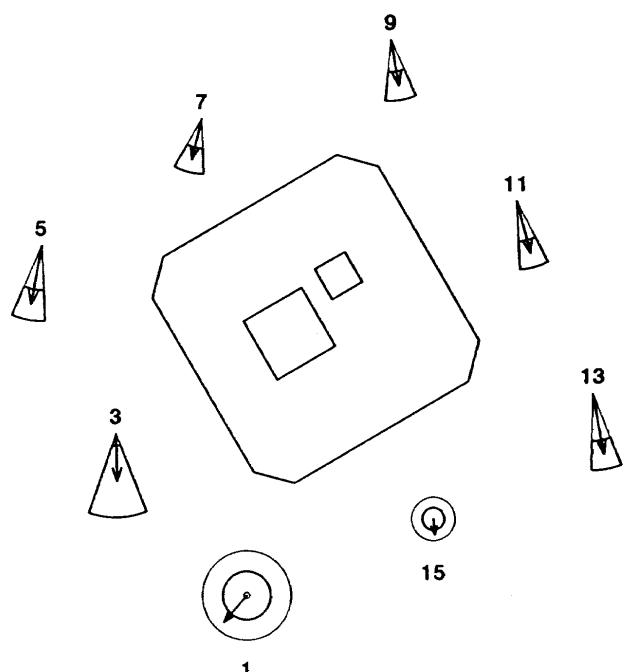


図3.3.8 ビル周辺の平均風速、風向と分散(高度90m)

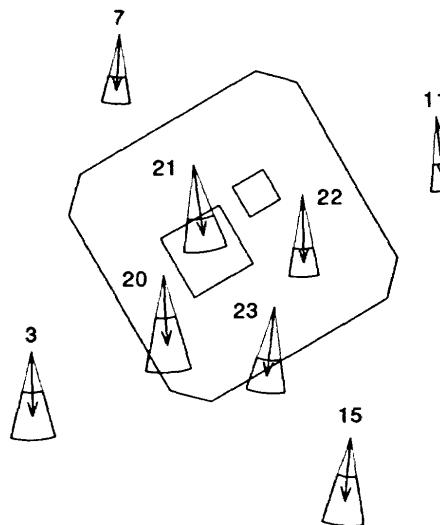


図3.3.9 ビル周辺の平均風速、風向と分散(高度110m)

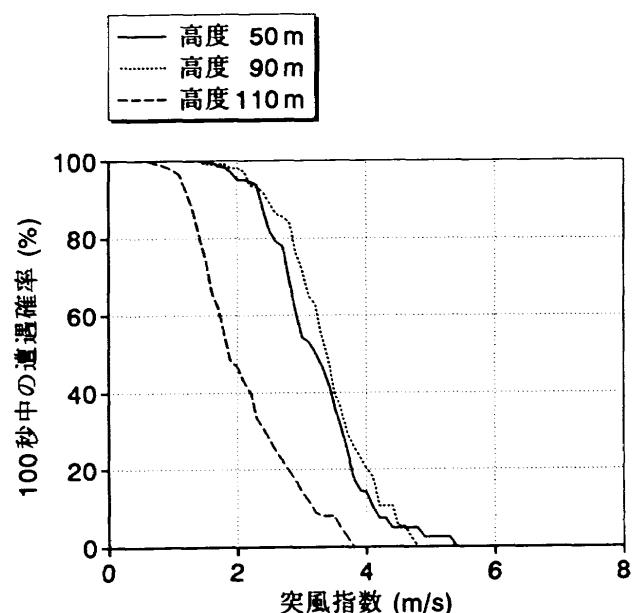


図3.3.11 3つの高度における測定点3での突風指数の頻度の比較

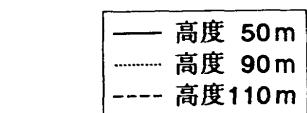


図3.3.10 3つの高度における測定点3での風速のパワースペクトルの比較

の離発着時の安全性に関する研究にも役立てることがある。

図3.3.10, 11は測定点3の3つの高度における風速のパワースペクトルと突風指数頻度を比較したものである。ビル中程、高度50mとビル最上部、高度90mでは、パワースペクトル、突風指数頻度とも有為な差は見られない。一方ビル屋上、高度110mでは、これらに比べて周波数が低くなるほどパワが小さくなっている。また突風指数頻度も比較的小さい。

図3.3.12は鉛直方向の平均風速、風向と分散の様子を示したものである。水平方向同様、鉛直方向の乱れもビル角後流(測定点3)で最も強くなっている。また、ビ

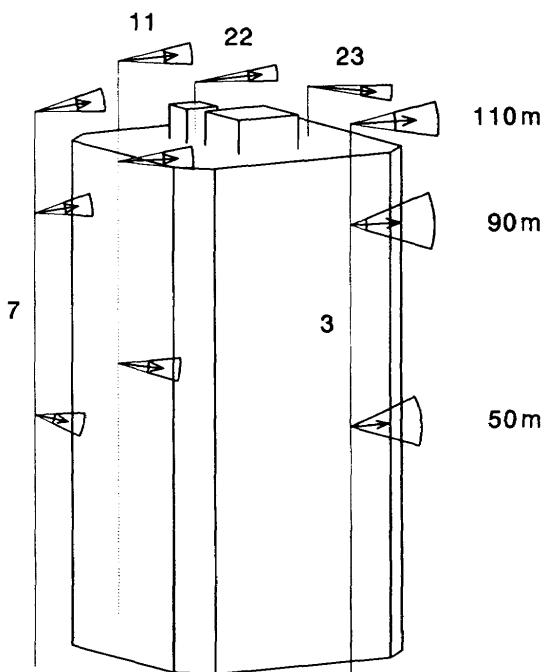


図3.3.12 ビル周辺の平均風速、風向と分散(鉛直面)

ルの風上側(測定点7)では、乱れの強さは高度によらず小さいが、高度50mにおいて下降流、高度90mにおいて上昇流が観測されている。特に下降流の場合、ホバリングを行うために必要なパワが増加し、エンジンパワの余裕が少なくなるため注意が必要である。

図3.3.13、14は測定点3の3つの高度における鉛直方向の風速のパワースペクトルと突風指数頻度を比較したものである。高度50mと110mのパワースペクトルでは有為な

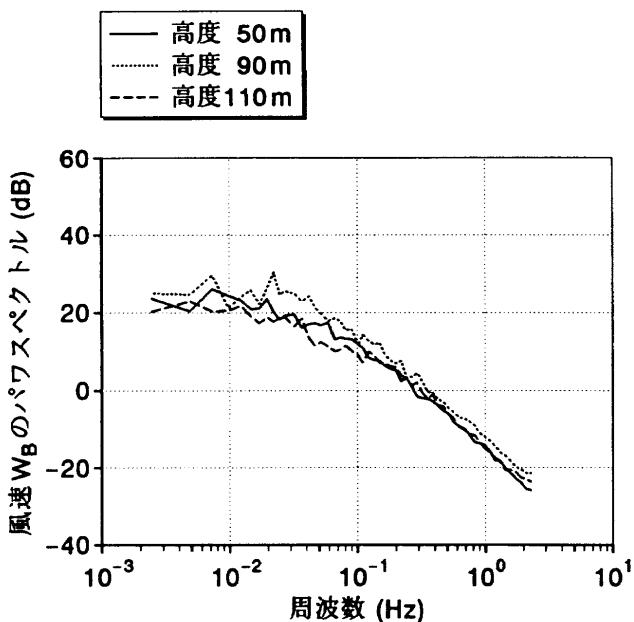


図3.3.13 3つの高度における測定点3での鉛直風のパワースペクトルの比較

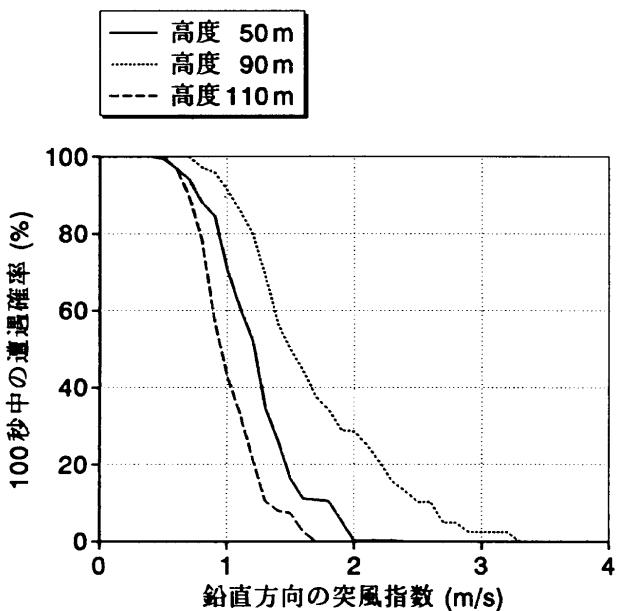


図3.3.14 3つの高度における測定点3での鉛直風の突風指數の頻度の比較

差はみられないが、高度90mではこれらに比べて $2 \sim 5 \times 10^{-2}$ Hz付近で若干パワーが大きくなっている。突風指數頻度も高度90mで最大であり、特に最大突風指數は3 m/sを越えており、高度50mの1.5倍に達している。水平方向の乱れの強さは図3.3.10, 11に示したようにビルの中程と最上部であまり変化しなかったが、鉛直方向の乱れはビルの最上部で特に強くなることが判った。

4. おわりに

消防ヘリコプタの安全性に関する研究の一環として、風洞実験を行って高層ビル周辺の風を測定した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 風洞実験結果を現地実測結果と比較した場合、平均風速では差異が見られるものの、風洞実験結果は現地実測結果の分散の範囲内にはほぼ収まっており、またパワースペクトルでは両者の間に良い一致が見られるため、風洞実験で得られた風速の時歴データは、今後消防ヘリコプタのシミュレーション実験等そのままビル風として用いてよいと判断する。
- (2) 実機によるビル近傍でのホバリング実験の際の風を再現し、実際に飛行を行った場所に相当する点で風速の時歴を取得した。飛行実験の際のパイロットコメントでは、ビルの角付近で風による影響が最も大きいという結果であったが、風洞実験によってこの点で乱れの強さ(風速の標準偏差)が最大となることが確認された。
- (3) 消防ヘリコプタは風速7 m/sまで安全に運航できることが目標とされている。この条件を風洞内に再現し、ホバリング位置と想定されるビル周辺、壁面から20mの距離における風速分布を測定した結果、その性状は、①風上、②風横、③ビル角(剥離点)後流、④風下死水領域に大別され、各領域における平均風速、乱れの強さ、平均風速に対する乱れの割合、および突風状の風速の変化の度合(突風指數)をまとめると表4.1のようになる。このうちヘリコプタの安定性に直接影響を及ぼすのは乱れの強さと突風指數(両者は強い相関にある)であり、従ってビル角後流付近で消火活動を行う際に最も注意が必要である。
- (4) 乱れの強さは風向によらず剥離点であるビル角後流で最大となるが、その値はビルに対して斜めの風向の場合5 m/s(3σ)に達し、ビルに対して直角の風向の場合に比べて約35%大きくなる。今回の実験は

表4.1 ビル周辺の風の性状

	風上	風横	角後流	死水
平均風速	○	○	○	○
乱れの強さ	○	○	○	○
乱れの割合	○	○	○	○
突風指數	○	○	○	○
ヘリへの影響	○	○	○	○

特定のビル、風向の条件で行われたが、ビル周辺の立地条件などによっては(例えば新宿副都心の高層ビル群等では)より一層強い乱れが発生する可能性もある。

- (5)当初ビル風の周期変動成分によって消防ヘリコプタの機体の固有運動(周期数秒～十数秒程度)が励起される現象が懸念されたが、この周波数域での風の乱れは飛行の安全性を損なうほどではないと思われ、むしろ次に述べるような孤立空風的な風速の変動の方が危険性が高いと思われた。
 - (6)ビル角後流では、水平方向に最大5m/s、鉛直方向に最大3m/sのステップ状の風速の変化に相当する突風が観測された。消防ヘリコプタを風速7m/sで運航するためには、このような突風に遭遇した場合にも、安全にホバリングを行えるか、あるいは少なくとも安全に現場から離脱できることを実証する必要がある。
 - (7)ビル角後流では風速の空間的な変化率も大きくなるため、火災現場へのアプローチ中にこの領域を通過する際にも注意が必要である。また、従来航技研で行われた消防ヘリコプタの理論解析やシミュレーション実験では、ロータ面内で風速を一様と仮定する数学モデルが用いられていたが、この領域ではロータ面内の風速の変化による影響が無視できない可能性もあり、今後検討を要する。
 - (8)ビル周辺の気流の変化の時間スケールは、消防ヘリコプタの消火活動の時間(放水時間だけで約100秒)に比べて長いため、風の乱れによる影響は、同じ一様流風速、風向でも場合によって大きく異なる。
 - (9)風向の変動が激しい場所(風下死水領域など)では、X型熱線風速計とI型熱線風速計による風洞実験結果を併用して安全性を検証することが望ましい。
 - (10)ビルの風上側では全体的に風の乱れは小さいが、高度によっては上昇流や下降流が発生する。特に下降流の場合、ホバリング中のエンジンパワの余裕が減少するため注意が必要である。
 - (11)水平方向の乱れの強さは高度によってあまり変化しないが、鉛直方向の乱れの強さはビルの最上部で特に強くなる。
- 現在、東京消防庁「消防ヘリコプタの消火活動に係わる検討委員会」の活動の一環として、飛行シミュレータによる実験、実機による飛行実験、風洞実験などが一通り行われ、それぞれの結果が比較検討された段階であり、また一方で、火災の火炎がビル周辺の気流に及ぼす影響等

についても研究が進められている。¹⁾今後、これらの成果を相互に反映し、より詳細かつ現実的なシミュレーション実験等を実施して行く予定である。消防ヘリコプタの安全性は、風速、風向、ビル周辺の立地条件、ホバリングの際の機首方位や火災現場へのアプローチ経路など様々な状況によって変化するが、これらの影響を定量的に明らかにし、消防ヘリコプタの安全基準と運航規程の確立を目指す。

謝 辞

本実験は航空宇宙技術研究所と東京消防庁との共同研究「消防ヘリコプタの安全基準に関する研究」の一環として、東京消防庁「消防ヘリコプタの消火活動に係わる検討委員会」の一員である気象庁気象研究所において行われたものであり、関係各位に多大なるご協力を頂いた。また、風洞実験結果の検証に際して(財)日本気象協会からビル風の実測データを提供して頂いた。あわせて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 消防ヘリコプタによる消火活動に係わる検討委員会；消防ヘリコプタによる消火活動に係わる検討報告書(平成7年3月)，東京消防庁，1995。
- 2) 奥野善則、船引浩平；ヘリコプタによるビル火災消火のシミュレーション実験、航空宇宙学会年会講演会，1994。
- 3) 奥野善則、船引浩平、齊藤茂、原田正志；ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験、航空宇宙技術研究所報告TR-1269, 1995。
- 4) 齊藤茂、原田正志、赤松重樹；ビル風の中のヘリコプタの飛行特性、飛行機シンポジウム, 1993。
- 5) S. Saito, Y. Okuno, M. Harada, K. Funabiki, and S. Akamatsu; Feasibility Study of a Fire Fighting Helicopter for High Buildings, 20th European Rotorcraft Forum, Amsterdam, The Netherlands, October 4-7, 1994.
- 6) 日比一喜、花房龍男、加藤眞規子；建物側面の変動風速の性状(消防ヘリ安全運航のための実測と風洞実験)，日本風工学会誌，第55号，1994年5月，pp25-26。
- 7) 奥野善則、赤松重樹、齊藤茂、原田正志；風洞実験によるビル風のシミュレーション－消防ヘリコプタの実現に向けて－、航空宇宙学会年会講演会，1995。

航空宇宙技術研究所資料685号

平成7年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社 実業公社
東京都千代田区九段北1-7-8
