

ISSN 0389-4010
UDC 629.735.45
629.7.072
629.7.018.7

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1269

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験

奥野善則・船引浩平
齊藤茂・原田正志

1995年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

概 要	1
1. はじめに	1
2. 飛行シミュレータによる実験	3
2.1 実験装置	3
2.2 ビル風の数学モデル	4
2.3 実験手順と項目	5
2.4 実験結果	5
2.5 シミュレータ実験のまとめ	11
3. 実機による飛行実験	12
3.1 実験装置	12
3.2 実験手順と項目	13
3.3 実験結果ーパイロットコメントー	14
3.4 実験結果ーデータ解析ー	15
3.5 飛行実験のまとめ	19
4. 風洞実験によるビル風の検証	20
4.1 実験の概要	20
4.2 実験結果	20
4.3 風洞実験のまとめ	22
5. おわりに	22
謝 辞	23
参考文献	23

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験*

奥 野 善 則^{*1} 船 引 浩 平^{*2}

齊 藤 茂^{*1} 原 田 正 志^{*1}

Simulation Study for a Fire Helicopter*

Yoshinori OKUNO^{*1}, Kohei FUNABIKI^{*2}

Shigeru SAITO^{*1}, Masashi HARADA^{*1}

ABSTRACT

The feasibility of the concept of using a helicopter to suppress fires in high-rise buildings was investigated by means of flight simulations and flight tests. The piloted simulations using a flight simulator were performed to investigate the safety and effectiveness of the fire fighting operation. The results demonstrated that nearly 90% of the discharged water can be hit on the target window at wind speeds of up to 7 m/s when the operator of the water discharge boom cooperates with the helicopter pilot. On the other hand, flight tests were conducted, in which the pilots performed hovering at a distance of 20m from a real high-rise building and tried to keep the searchlight, which was mounted on the helicopter, fixed on a target window. It was pointed out that the fire helicopter should be equipped with an indicator of the distance to the building wall to improve the safety and efficiency during the fire fighting operation. The results of these experiments validated the feasibility of the fire helicopter and also clarified the problems to be solved to realize this concept.

Key Words : Helicopter, Flight Simulator, Flight Test, Fire Fighting

概 要

飛行シミュレータと実機を用いてヘリコプタによる高層ビル火災消火の模擬実験を行い、その有効性、安全性を評価した。飛行シミュレータによる実験では、ビル風中で安全にホバリングし、有効な消火活動を行えるかどうかを調べた結果、パイロットと放水操作員が協調することにより、風速7m/sまでなら放水の90%近くを目標窓内に命中できることが示された。一方、実機による飛行実験では、高層ビルから20mの距離でホバリングしながら機体に固定されたサーチライトの光を目標点に当てるようにパイロットが操縦を行った結果、実際の消火活動をより安全かつ効果的に行うためには、ビルとの間の距離を計測表示する装置の搭載が望ましいことが指摘された。これらの実験結果から、消火ヘリコプタの構想が基本的の実現可能であることが示されるとともに、その実現に向けて解決されるべき問題点が明らかになった。

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しきれなくなっているため、

これに代わる新しい消火手段としてヘリコプタから放水する方法が有望視されている。ヘリコプタは現在でも山火事などの消火に活用されているが、これは機体の下にタンク

* 平成7年3月29日受付 (received 29 March 1995)

*1 飛行実験部 (Flight Research Division)

*2 制御部, 現飛行実験部 (Control Systems Division, presently Flight Research Division)

を吊り下げて火災現場上空から水を撒くものであり、ホバリングしながら機内に積載した水を加圧してノズルから放水することによってビル火災を消火する能力を有するヘリコプタ（以下消火ヘリコプタ）は世界にも未だ例がない。図1.1に消火ヘリコプタの概念図を示す。

消火ヘリコプタの具体案として、現在東京消防庁において、既存のユーロコプタ社製スーパーピューマ（全備重量8tクラスの双発シングルロータヘリコプタ）を改修し、機内に1tの水を搭載、ビルから20mの距離で緊急時に離脱しやすいようビルに対して横向きにホバリングしながら毎秒10kg程度の割合で放水する能力を有するものが検討されている¹⁾。火災現場の状況に応じて、例えば風向や緊急時の離脱経路などを考慮してホバリングする向きを変えられるよう、放水ブームは左右両方に装備されており、火災現場まではこれを収縮して機体前方向に固定して飛行し、消火活動時に片方を真横に向け、放水流がメインロータの後流の影響を受けないようロータ径（半径7.8m）の外側までブームを伸長し、放水操作員がブームの方向を制御して目標点に照準を合わせて放水を開始する。約100秒の消火活動の後、最寄りのヘリポートまたは貯水池等で給水を行い、再び現場に向かう。消火活動中に非常事態が発生した場合、例えば片方のエンジンが停止した場合などには、放水を中止し、タンク内の水を機体下部から投棄して直ちに現場から離脱する。水を積載しない状態では、通常の運用条件下であれば片発でホバリングを行うことも可能である。

このような消火ヘリコプタの実現に向けて検討すべき問題点として主に次の3つが挙げられる。

(1) 耐空性

放水システム（タンク、ポンプ、ブーム等）が飛行

の安全に影響を及ぼす可能性がないか。例えば消火活動後、放水ブームが収縮しなくなる可能性がある場合、その状態でも飛行を継続して安全に帰還することが可能か。また、非常時にタンク内の水を投棄する装置が有効に作動するか。

(2) 安全性

ビルに接近した際、火災の影響によって飛行の安全に支障を来す可能性がないか。例えばエンジンが高熱の空気を吸って出力が低下するといった現象が起きないか。また、高層ビルの周辺では強い風の乱れが発生するため、消火活動中、あるいは現場へのアプローチ中に機体の操縦性、安定性を損なう可能性がないか。特に風による影響は、風速、風向やビル周辺の立地条件によっても変化するため、あらゆる状況を想定して慎重に検討する必要がある。

(3) 機能性

放水による反力や機体重量の変化などの影響を受けながら安定したホバリングを行うことが可能か。また、どの程度の風速まで安全かつ効果的に放水を目標点に命中させることができるか。

このような問題点のうち、(1)に関しては現在東京消防庁において放水システム（タンク、ポンプ、ブーム）を試作して地上試験を行っている段階である。一方、(2)、(3)に関して問題となるビル風について、気象庁気象研究所と清水建設(株)においてそれぞれ風洞模型と実物のビルの周りの風の測定が行われており、データの蓄積が進んでいる。また、火災の熱がビル周辺の気流に及ぼす影響について、東京大学生産技術研究所において解析が行われている。これらの成果を踏まえて、平成4年度より当航空宇宙技術研究所において消火ヘリコプタの安全性と有効性に関する研究が東

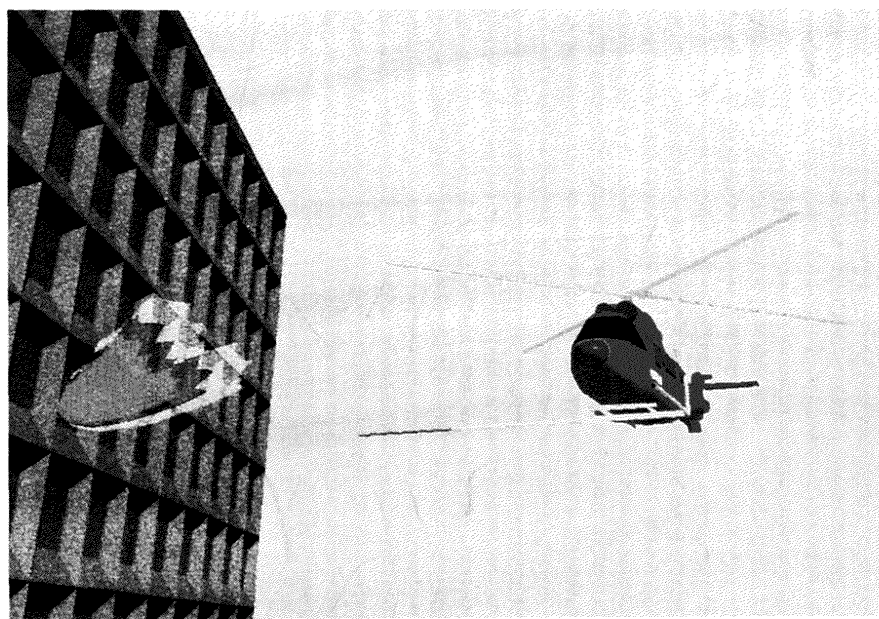


図1.1 消火ヘリコプタの概念図

京消防庁との共同により行われてきた。本報告書はその中間報告として、消火ヘリコプタが新たな消防手段として十分な効果を発揮し得るか、即ち上記の問題点のうち、主に(3)について検討した結果をまとめたものである。

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、まず簡単な理論解析が行われた^{2,3)}。ビルの周りの風は複雑な構造を持つため、従来航空の分野で用いられてきた一般的な突風モデルをそのまま適用することはできない。文献²⁾では実際のビルでの風の測定データ^{1,4)}をそのパワースペクトル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する方法が提案された。ビル周辺の風の性質はビルとの位置関係(風上側、風下側)やビル周辺の状況によって変化する(例えば新宿副都心の高層ビル群ではより複雑な構造を持つ流れが予想される)ため、それらの全てを考慮するためには複雑な計算、あるいは膨大なデータベースが必要となる。ここで提案されたビル風モデルは、あくまで平均的なビル風の特徴を示しているに過ぎないが、計算の負担が小さいため、特に実時間でのシミュレーション等の用途に向くものである。

本報告書の第2章では、このビル風モデルを用いて飛行シミュレータによる模擬実験を行った結果⁵⁾についてまとめる。ビルの横でホバリングしながら放水操作員がブームの方向を制御して放水を目標点に命中させる実験を行うことにより、どの程度の風速まで安全かつ効果的に消火活動を行い得るかを明らかにするとともに、パイロットと放水操作員の間の最適な役割分担と連携方法について調べた。また、現在構想中の消火ヘリコプタでは、放水ブームの伸長時の長さが7m以上にもなるため、あまり速い角速度で制御することができない。実験ではブームのアクチュエータに要求される性能についても考慮した。

飛行シミュレータを用いた実験によって消火ヘリコプタが所期の要求性能を満たし得る可能性が示されたので、次に実機による飛行実験を行った⁵⁻⁷⁾。実際に高層ビルの近傍でホバリングを行い、ビル風中での機体の運動を計測するとともに、消火活動を模擬するため、機体に固定されたサーチライトの光を目標点に当てるようにパイロットが機体を操縦する実験を行った。本報告書の第3章では、この飛行実験の結果から実際の消火活動で起こり得る問題点について考察し、また飛行シミュレータによる実験結果と比較することによってヘリコプタの運動やビル風の数学モデ

ルの検証を行う。

ヘリコプタの実機による飛行実験では、機体全体がメインロータの後流の中に入るため、機体の位置での風速を直接測定することは困難であり、今回の飛行実験では風速の測定はビルの屋上でのみ行われた。実際にホバリングを行った位置での風速を調べるため、風洞実験を行って飛行実験当日のビル周辺の風を再現した^{8,9)}。本報告書の第4章ではこの風洞実験の結果についてまとめる。

現在、これらシミュレータ実験、飛行実験、風洞実験が一通り行われた段階であり、本報告書ではこれらの結果が比較検討されるにとどまるが、今後これらの成果を相互に活用してより現実的なシミュレーション実験等を継続する予定であり、本研究の最終的な目的は、消火ヘリコプタの実用化に向けてその安全基準と運航規程を確立することである。

2. 飛行シミュレータによる実験

2.1 実験装置

航技研所有の飛行シミュレータ^{10,11)}を用いてヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験を行った。実験は平成5年11月17日、12月1日、8日の3日間にわたって行われた。今回の実験で用いたシミュレータの操縦席はヘリコプタ用ではなく固定翼輸送機用であるため、コレクティブレバーの代わりにスロットルレバーを、操縦桿の代わりにサイドスティックコントローラを用いて操縦を行った。また、このシミュレータは本来モーション装置付きであるが、今回はこれを用いず、固定ベースで実験を行った。機体の特性は消火ヘリコプタの母機と想定されているスーパーピューマのものをを用いており、またこの機体には標準装備として安定増大装置(Stability Augmentation System=SAS)と自動安定装置(Automatic Stability Equipment=ASE)が搭載されているが、通常はASEがONの状態で作動しているため、今回の実験でも常にこの状態を想定した。ヘリコプタの運動は非線形6自由度の運動方程式を用いて計算し、ロータに働く空気力は誘導速度をロータ面で一様と仮定して運動量理論と翼素理論から求めている。シミュレータに組み込まれたビル風モデルについては2.2で述べる。

今回の実験では、操縦はヘリコプタのメインパイロット席である右席で行い、機体の右側面をビルに向ける方向でホバリングを行った。現在の消火ヘリコプタの構想では、ビルから20mの距離で目標点を真横に見るようにホバリングする想定であるが、シミュレータでは視界模擬装置の制約上、操縦席から真横方向の視界が得られないため、ビルから20mの距離で10m前方に目標点を置いて、機体はビルと平行になるようにホバリングを行った(図2.1.1)。従ってパイロットから見て目標点は右斜め前方約63度の方向に見える。また、視界模擬装置の制約から、ビルとの間の距

離感が不足したため、コックピットにデジタルの距離計を設置し、パイロットは適宜これを参照して操縦を行った。

また、操縦席とは別に放水操作席を設置した(図2.1.2)。放水操作席から見える映像は操縦席右側方の視界と同一のものであり、ビルの壁面には放水ブームの照準点(赤い点)と放水の着水点(青い点)が映し出される(放水流そのものは見えない)。照準点とは、ブームに取り付けられたレーザー光をイメージしたものであり、主に放水開始前にブームの方向を定めるために用いる。放水の着水点は空気抵抗を無視して水が放物運動すると仮定して計算した。放水操作員はジョイスティックコントローラ(上下・左右のON/OFFスイッチ)によってブームの角度の制御を行う。ブー

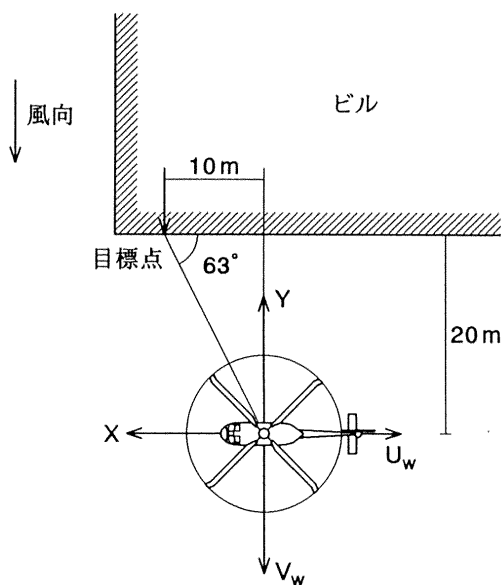


図2.1.1 シミュレータ実験でのホバリング位置と風向

ムは一定角速度で運動するが、角速度は命令入力に対して1次遅れを伴って追従すると仮定した。

放水ブームの運動特性は東京消防庁において試作された地上試験用放水システムに準拠して設定されており、ブームの可動範囲が横方向90度(真横)を中心として±10度、縦方向0度(水平)～15度(上向き)、角速度(定常状態に達した時の値)3deg/s、時定数(角速度が定常状態の63%に達するまでの時間)0.15秒である。また、放水中に機体が受ける反力は1000Nと仮定した。

2.2 ビル風の数学モデル

シミュレータ実験に用いたビル風の数学モデル²⁾は、実際のビル(清水建設(株)技術研究所内実験棟)周辺で測定された風速データ⁴⁾をそのパワースペクトルに基づいて白色ノイズ+1次のローパスフィルタの形式でモデル化したものである。モデル化に際し、風の乱れのスケールはロータの直径に対して十分大きいと仮定しており、ロータ面内の風速の変化は考慮していない。

今回の実験で用いた風モデルは1分間の平均風速が約10m/sの場合の実測結果に基づくものであり、ヘリコプタがビルの風下側で平均風を機体の真右方向から受けるようにホバリングした場合(図2.1.1参照)を想定して定式を行うと以下のように表される。

$$U_w \text{ (m/s)} : 6 + \frac{3}{1+s/1.8} \cdot \text{白色ノイズ}$$

$$V_w \text{ (m/s)} : 8 + \frac{4}{1+s/1.6} \cdot \text{白色ノイズ}$$

$$W_w \text{ (m/s)} : 0 + \frac{2}{1+s/2.0} \cdot \text{白色ノイズ}$$

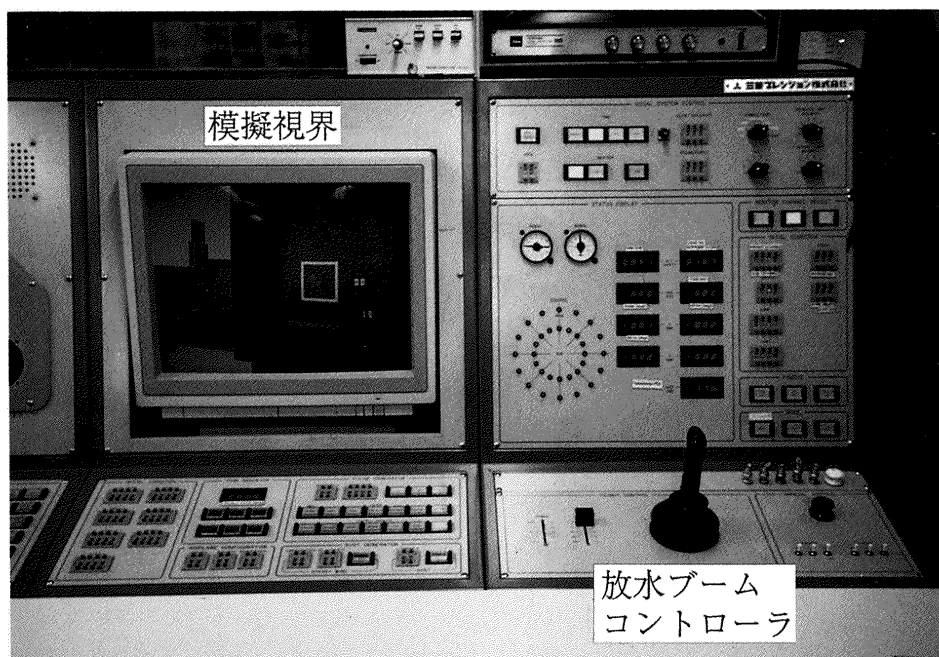


図2.1.2 飛行シミュレータの放水ブーム操作席

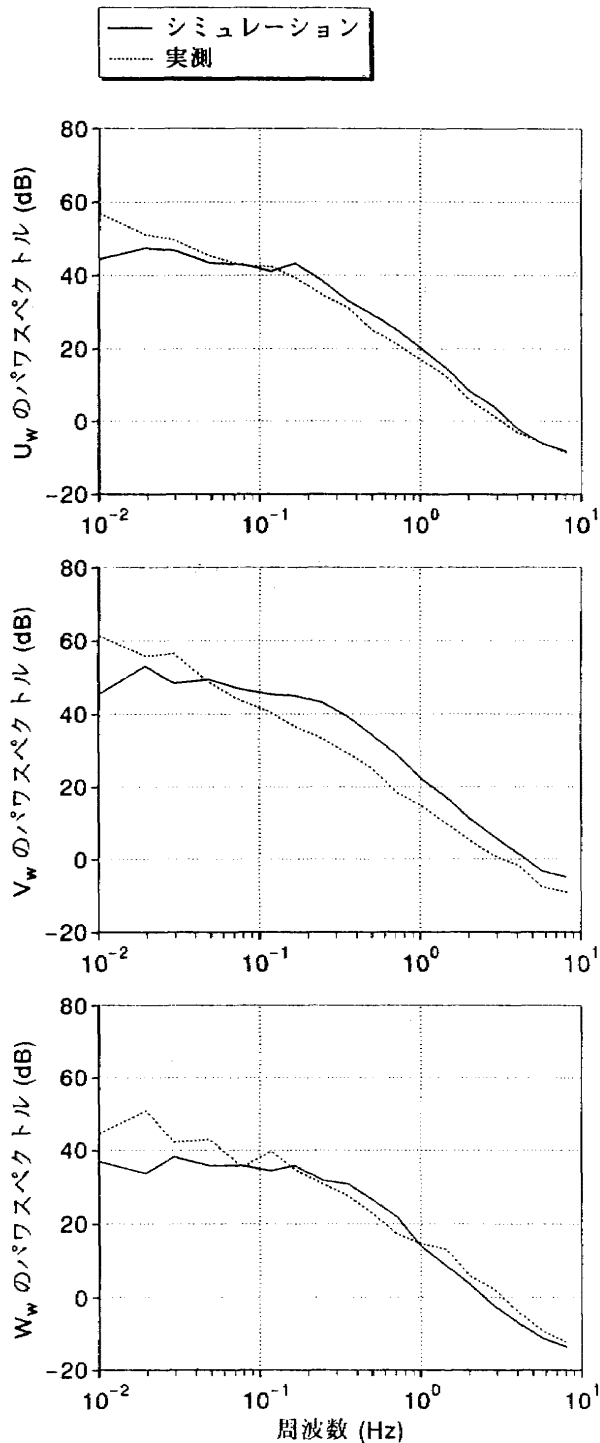


図 2.2.1 風のパワースペクトルの比較

表 2.2.1 に上記の数学モデルによる計算結果とモデル化に用いた実測結果の平均値と標準偏差を示す。また、図 2.2.1 にそれぞれの風速のパワースペクトルを、図 2.2.2 に風速の時歴の例を示す。ビル風の特徴として数秒～十数秒程度の比較的長い周期の変動成分が大きい。今回のシミュレータ実験では、風の違いによる影響を除くため、白色ノイズ発生のための乱数計算ルーチンに与える種を一定とし、毎回同じ風（この図に示したもの）を用いた。

表 2.2.1 数学モデルと実測結果による平均風速と標準偏差の比較

	平均値		標準偏差	
	計 算	実 測	計 算	実 測
U_w (m/s)	6.06	6.33	2.75	3.53
V_w (m/s)	8.57	8.56	3.67	3.91
W_w (m/s)	-0.30	0.03	2.01	2.35

2.3 実験手順と項目

パイロットが定常ホバリングに達したと判断した後、放水操作員が放水を開始、約 1 分間の各状態量を記録し、放水が目標窓（一般的な高層ビルの窓の大きさとして 2×2 m を想定している）に当たった割合などを求めた。

実験は次の 3 つのパラメタに関して行った。

(1) 風速

平均風速約 10 m/s の時の実測データに基づく風モデル（2.2 に示したもの）を強い風とし、これを 0.7 倍としたものを中程度の風、0.4 倍したものを弱い風として実験を行った。ただし風速が変化した場合にも風モデルにおけるフィルタの時定数は一定とした。

(2) パイロットタスク

パイロットに課せられるタスクとして、(a) 着水点を気にせず、ビルなどの地上目標物を参照して定点ホバリングを行う場合（以下定点ホバ）と、(b) 放水が目標窓に当たるように積極的に機体を操縦する場合（以下照準制御）の 2 通りの実験を行った。後者の場合には、放水が目標窓に当たっている限りホバリング位置のずれは修正しない。ただし放水ブームの角度が可動範囲の制限に近づいた場合には放水操作員からの指示によってホバリング位置の修正を行う。

(3) 放水ブームの制御

(a) 放水ブームは固定してパイロットの操縦のみによって照準制御を行う場合と、(b) 放水操作員がブームの角度を制御する場合とについて実験を行った。また、放水ブームを駆動するアクチュエータに要求される性能を調べるため、ブームの角速度と時定数を変えた場合の実験も行った。

2.4 実験結果

表 2.4.1, 2 に実験結果をまとめて示す。各枠内の数字は左がケース番号（S はシミュレータ実験を表す）、右が各実験ケースで 1 分間の放水時間中水が目標窓内に当たっ

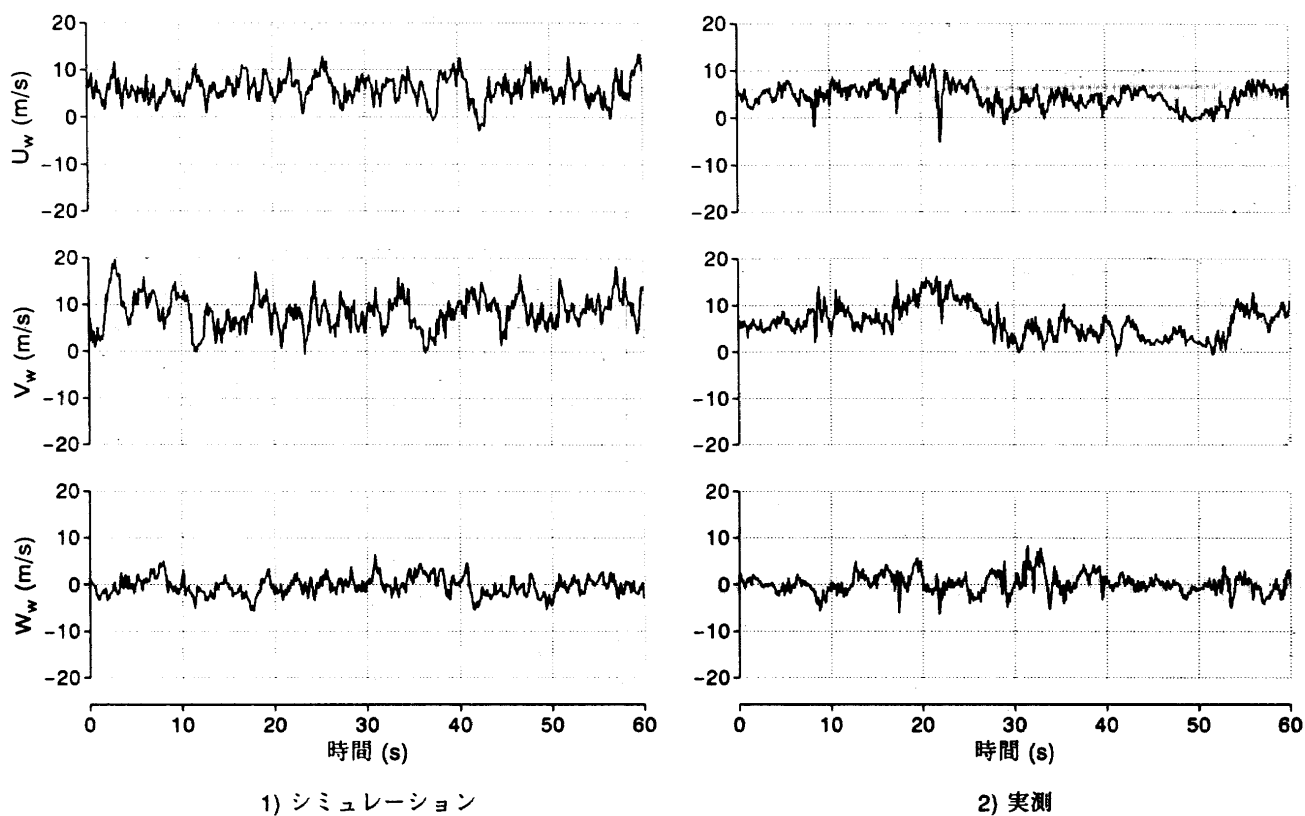


図 2.2.2 風の時歴の比較

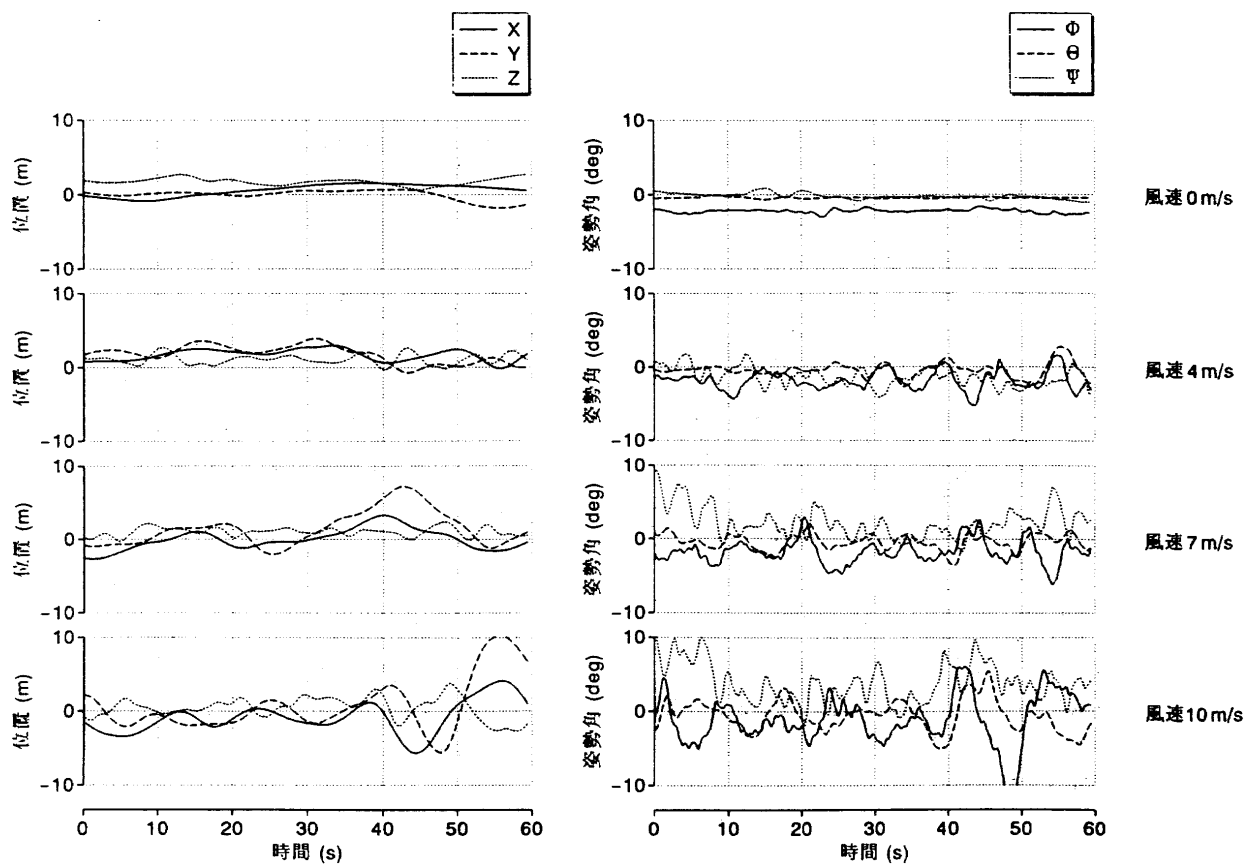


図 2.4.1 シミュレータ実験で計測された時歴の例 (定点ホバ)

表 2.4.1 シミュレータ実験での命中率

ブーム パイロット タスク 風速	固 定		操 作	
	定点ホバ	照準制御	定点ホバ	照準制御
無(0m/s)	S01 54%	S05 99%	S09 98%	S13 100%
弱(4m/s)	S02 71%	S06 87%	S10 81%	S14 100%
中(7m/s)	S03 66%	S07 65%	S11 72%	S15 87%
強(10m/s)	S04 40%	S08 57%	S12 61%	S16 63%

表 2.4.2 放水ブームの角速度と時定数を変えた場合の
シミュレータ実験結果

時定数 角速度	0.00s	0.15s	0.30s	0.60s
1.5deg/s		S21 61%		
3.0deg/s	S17 87%	S18 84% S22 83%	S19 77%	S20 61%
6.0deg/s		S23 57%		

注) ケースS17～S23はパイロットタスク照準制御，
風速8m/sで行った。

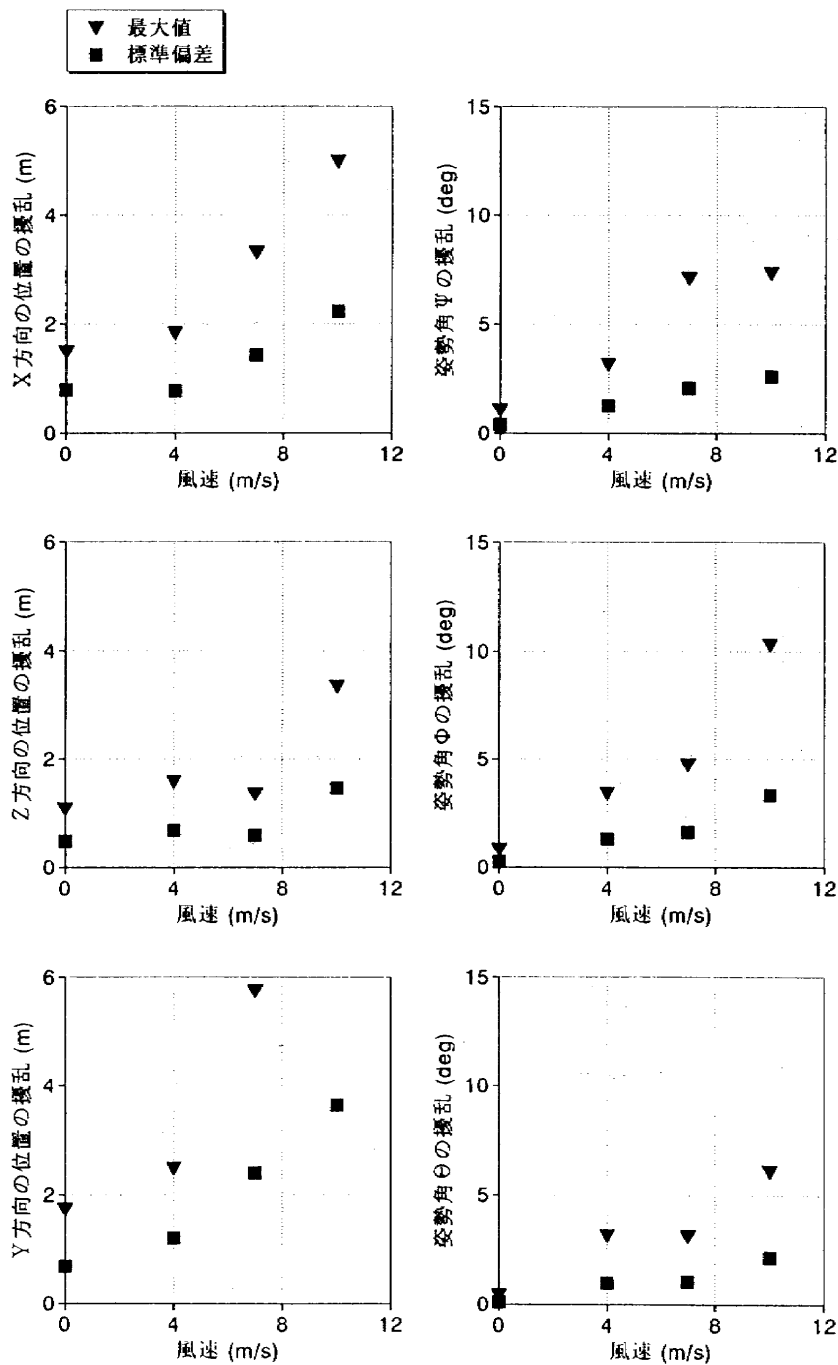


図 2.4.2 位置と姿勢角の擾乱 (定点ホバ)

ていた割合を示している。原則として各ケース1回の試行を行ったが、不適切な操作があった場合には、パイロットまたは放水操作員の判断によって実験をやり直したケースもあり、該当ケースでの平均的な命中率が得られていると考えられる。

図2.4.1に4通りの風速で定点ホバリングを行った場合の3軸方向の位置と姿勢角の時歴を示す(ケースS01~S04)。XYZは基準ホバリング点を原点とする地面固定座標系(図2.1.1参照、Zは下向きが正)であり、 $\Phi\Theta\Psi$ は機体のオイラー角である。また、図2.4.2はこれらの結果から位置と姿勢角の擾乱の最大値と標準偏差を求めたものである。機体の位置の変動では特にY方向(ビルの壁面と垂直方向)に大きくなっており、シミュレータの視界模擬装置の制約上、ビルとの間の距離感が不足したことがうかがえる。コクピット内にビルとの間の距離を表示する計器を設置したが、ホバリング中はパイロットの視線はほとんど外部に向いており、距離計は時々参照する程度であった。

ビルから20mの距離でホバリングしている時、機体の姿勢角が5度変動するとビルの壁面上では照準点が約2m変動する。従って、図2.4.2において上列のX、 Ψ 、および中列のZ、 Φ はそれぞれ照準点の左右、上下の変動に関し

てグラフの1目盛りが同じ意味を持っている。即ちここに示した例では位置と姿勢角の変動がほぼ同じオーダーで照準点の変動に影響することが判る。

図2.4.3は放水ブームを固定してパイロットの操縦のみによって照準制御を行った場合の1分間の着水点の軌跡を示したものである(ケースS05~S08)。また図2.4.4はこれらの結果から着水点の誤差の最大値と自乗平均(RMS)を求めたものである。図中の実線はこれらの結果から最小自乗法によって直線補間したもので、最大値、自乗平均とも風速に対してほぼ線形に増加することが示されている。

図2.4.5は放水操作員がブームの角度の制御を行った場合の時歴の例である。この例では時間40秒前後にブームの角度が左方向に振り切れており(±10度が制限値)、放水操作員の指示によって機体の位置を前方(X方向)に移動させている。また着水点と照準点のグラフでは、着水点は重力の影響によって照準点より約0.8m下方にあり、また着水点の動きは照準点より約0.6秒遅れていることが判る。また、放水ブームと機体の角速度を比較すると、この時のブームの角速度3deg/s(定常状態に達したときの値)は機体のロールおよびヨーの平均的な角速度とほぼ等しい。後に述べるように(図2.4.9)、機体の姿勢角の擾乱による

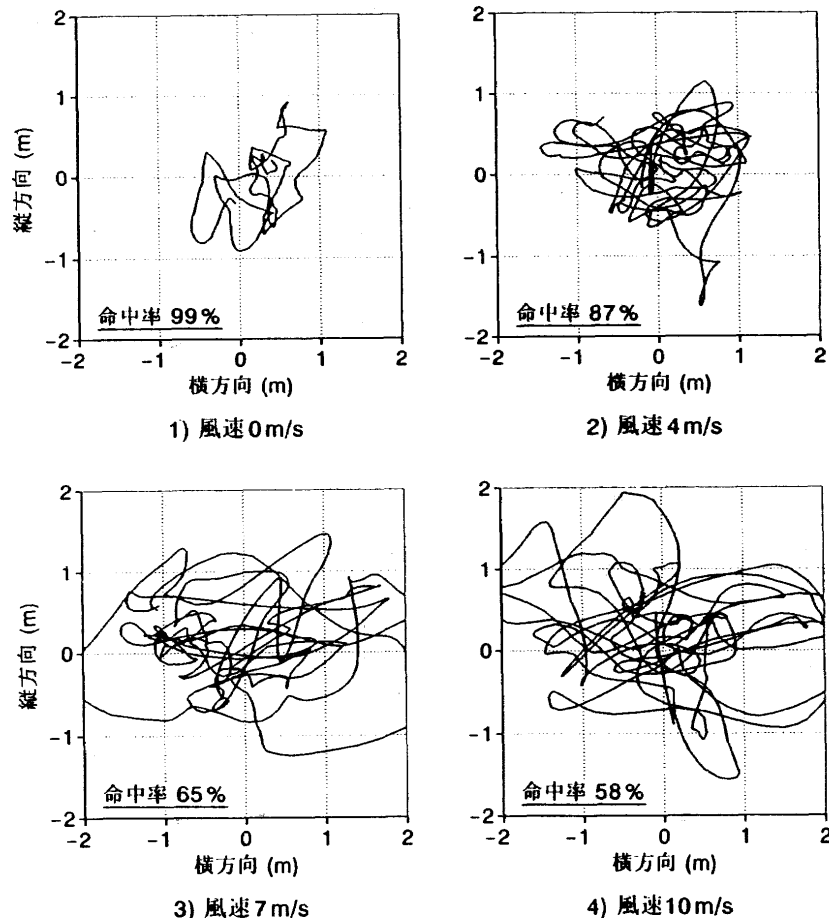


図2.4.3 着水点の軌跡(照準制御, ブーム固定)

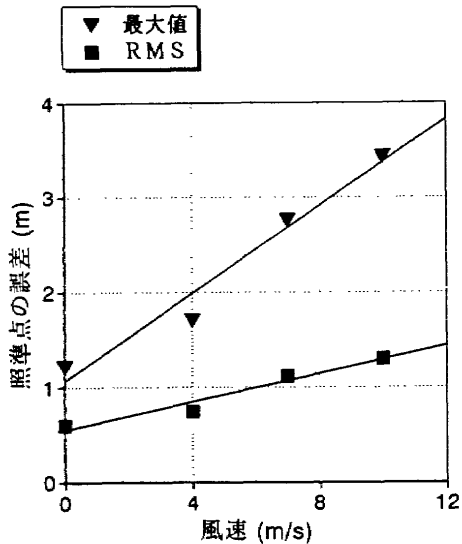


図 2.4.4 着水点の誤差（照準制御，ブーム固定）

着水点の変動を補正するためには、この程度のブームの角速度が最も適していると考えられる。

図 2.4.6 はこのシミュレータ実験で 1 分間の放水時間のうち何 % が目標窓内に命中したかを示したものである。□印は放水ブームを固定してパイロットの操縦のみによって照準制御を行った場合（ケース S05～S08），●印はパイロットはビルなどの地上目標物を見ながら定点ホバリングに専念して放水操作員のみによって照準制御を行った場合（ケース S09～S12），■印はパイロット、放水操作員とも照準制御を行った場合（ケース S13～S16）それぞれの結果を表している。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 の条件下でも有効な消火活動を行える能力が想定されているが、パイロットと放水操作員が協調することにより、風速 7 m/s で 90 % 近くの水を目標窓に命中できることが示されており、消火ヘリコプタが所期の要求

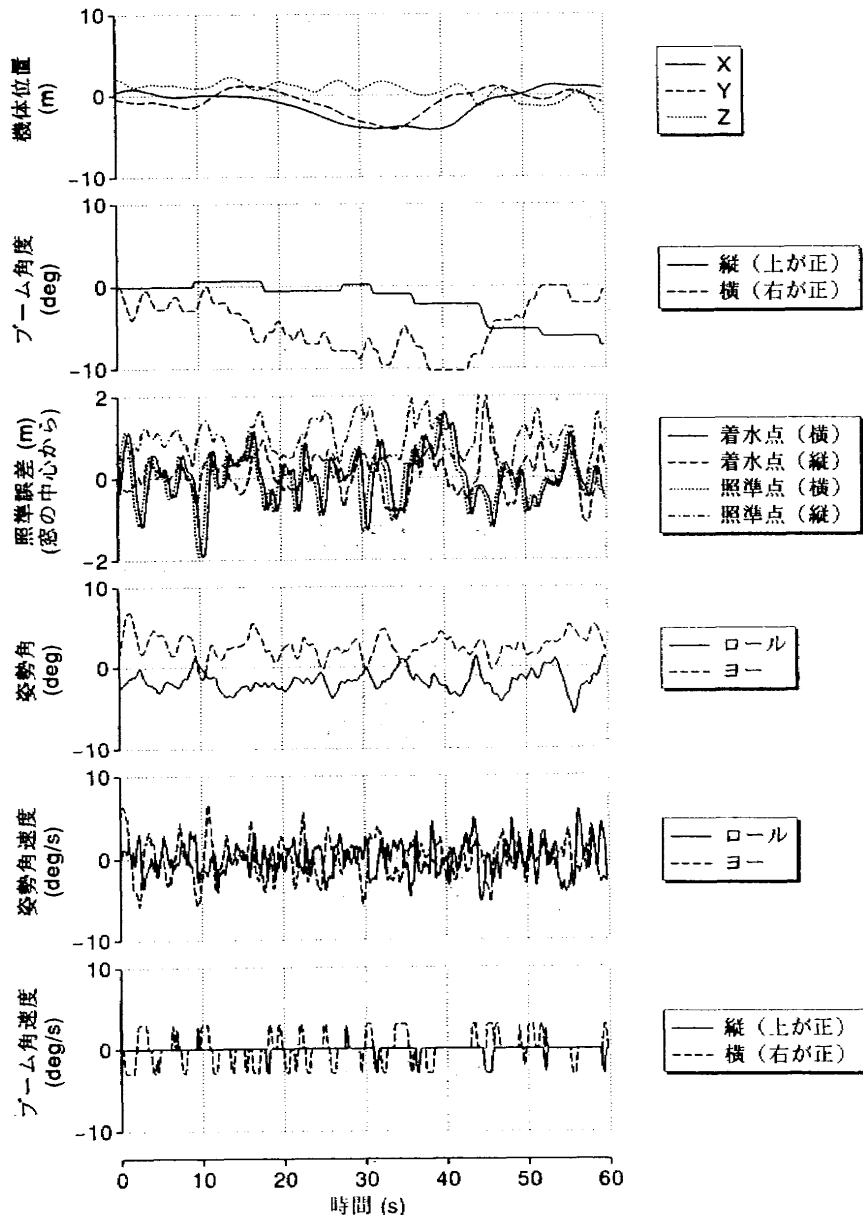


図 2.4.5 放水ブームを操作した場合の時歴の例

性能を満たし得ることが実証された。ただし、パイロットのみ、あるいは放水操作員のみの場合、風速4m/sでは80%以上の命中率を確保できるが、風速7m/sでは命中率は60~70%程度に低下する。また、風速7m/sでパイロットのみによって照準制御を行った場合、ワークロードが高く、ビルとの間の距離を安全に保てないことがあった。

図2.4.7は放水ブームのアクチュエータの時定数を変化させた場合のブームの角度と角速度の時歴を示したもので

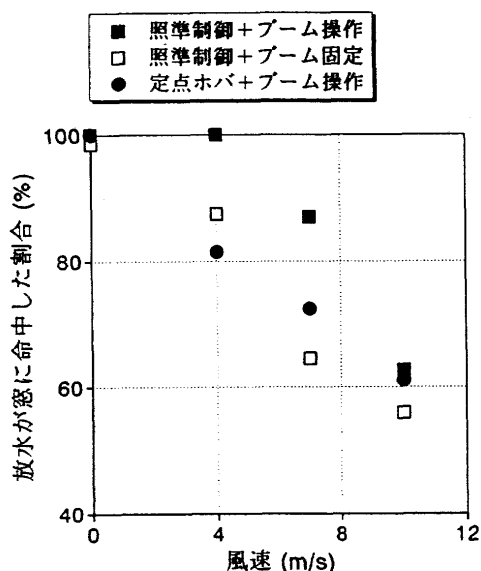


図2.4.6 風速による命中率の変化

ある(ケースS17~S20)。時定数が0.6秒程度になると、角速度は定常値に達する間がなく常に変化しているため、目標点を的確にとらえることが困難になる。また図2.4.8はこの時の命中率の変化を示したものである。時定数が大きくなるほど命中率が低下するが、0.2秒以下の時定数を実現すれば風速8m/sで80%以上の命中率を確保できることが判った。

図2.4.9は放水ブームの角速度(定常状態に達した時の値)を変化させた場合のブームの角度と角速度の時歴を示したものである(ケースS21~S23)。角速度6deg/sの場

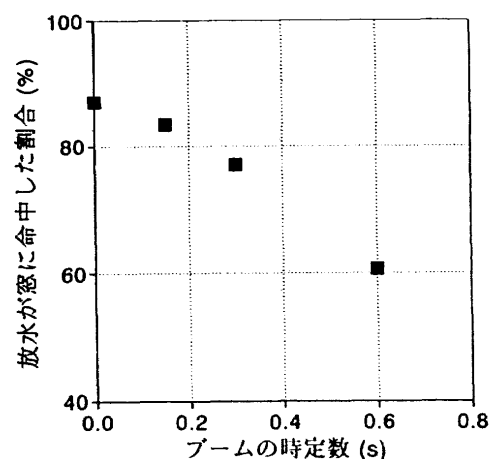


図2.4.8 放水ブームの時定数による命中率の変化

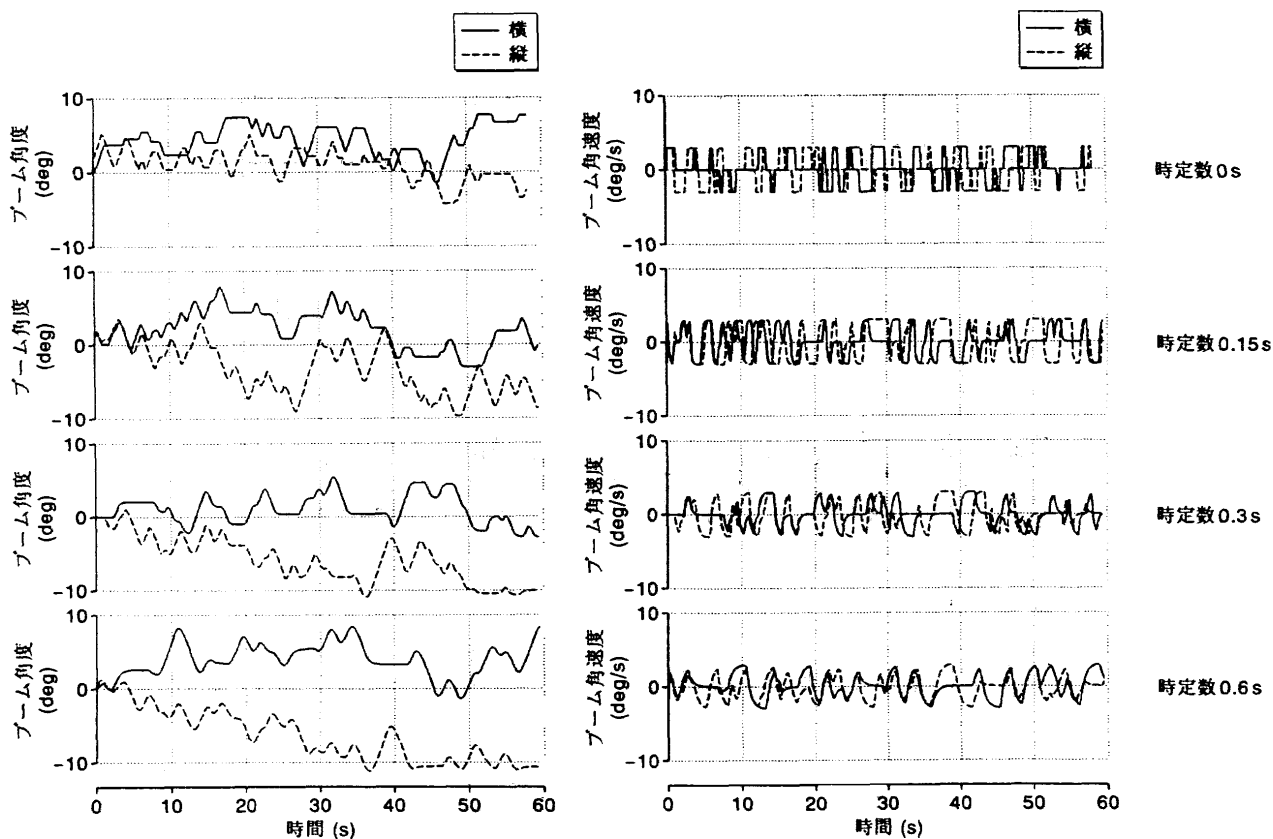


図2.4.7 放水ブームの時定数を変えた場合の時歴の例

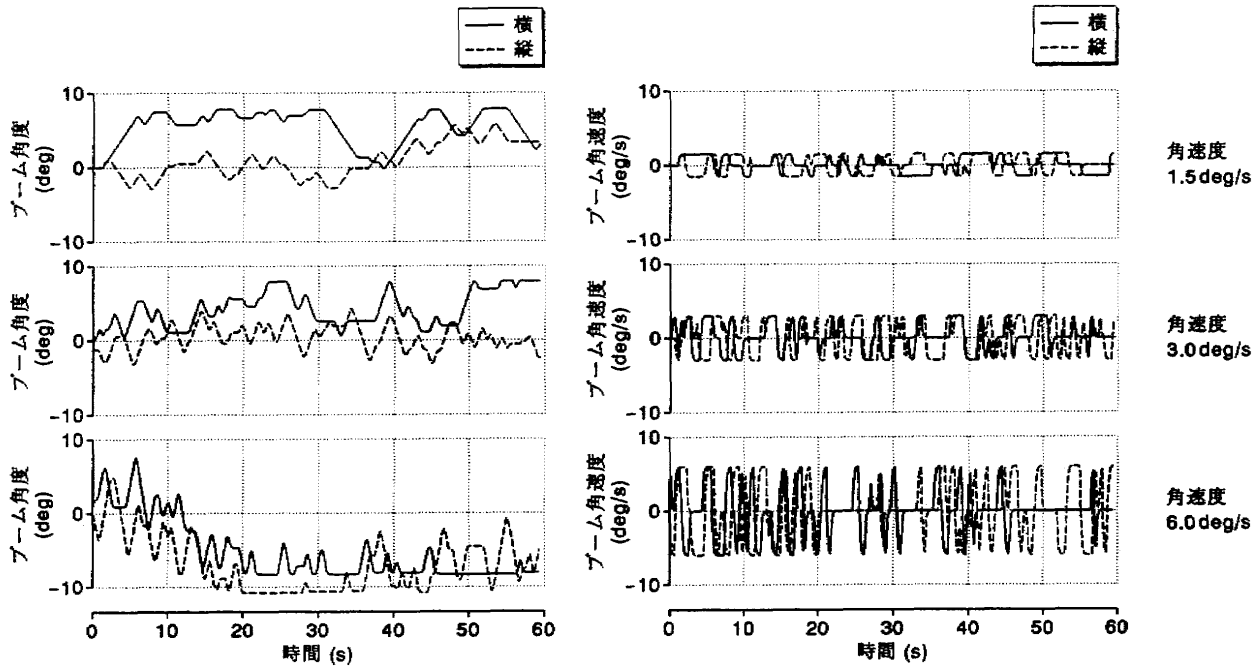


図 2.4.9 放水ブームの角速度を変えた場合の時歴の例

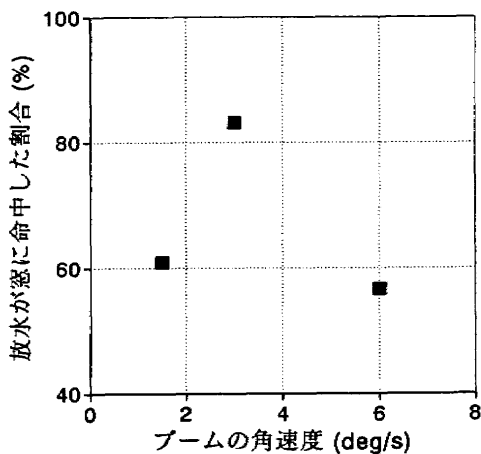


図 2.4.10 放水ブームの角速度による命中率の変化

合には、1 秒程度の周期でブームの操作が繰り返されているが、これは角速度が大き過ぎて目標点のオーバーシュートが起こるためである。また図 2.4.10はこの時の命中率の変化を示したものである。角速度が小さ過ぎると機体の擾乱による着水点の変動を抑えきれず、また大き過ぎるとオーバーシュートが起こって操作が困難になる。このため、実験を行った 3 つの角速度の中では 3 deg/s が最も命中率が高い結果となった。この値は、図 2.4.5 に示されたとおり、機体の運動の平均的な角速度にほぼ等しい。

2.5 シミュレータ実験のまとめ

シミュレータ実験で得られた結果をパイロットコメント等も含めてまとめると以下ようになる。

(1) 弱い風 (4 m/s) の場合、放水操作員のみ、あるいは

パイロットのみによっても有効な消火活動を行うことができる。

(2) 中程度の風 (7 m/s) の場合、パイロットと放水操作員の協調によって 90% 近くの放水を目標窓内に命中させることができる。放水操作員のみ（パイロットは定点ホバリングに専念）では命中率は 70% 程度であり、一方パイロットのみ（放水ブームは固定）ではワークロードが高く、ビルとの間の距離を安全に保てないことがある。

(3) 強い風 (10 m/s) の場合、パイロットと放水操作員が協調しても着水点が目標窓から大きくはずれることがある。このような場合、搭載した消火水を有効に使うためには、放水操作員が放水の ON/OFF 制御を行う必要がある。

(4) パイロットも放水操作員と協調して照準制御を行った方が効率良く消火活動を行える。この時、定点ホバリングに専念する場合に比べてもパイロットのワークロードの増加は小さい。ただし、安全性確保の面ではパイロットは定点ホバリングに専念した方が良い可能性もあり、今後の検討を要する。

(5) 有効な消火活動を行うためには放水ブームの角速度を 3 deg/s 程度、時定数を 0.2 秒以下とすることが望ましい（縦横とも）。これは、東京消防庁において試作された地上試験用放水システムで既に達成されている値である。

(6) 放水中の反力 (1000 N) や機体質量の変化 (10 kg/s) が機体の運動に与える影響はパイロットの通常操作内で容易に補正し得る。

全体として、パイロットと放水操作員が協調することによって風速7m/sでも有効な消火活動が行えることが示され、消火ヘリコプタが所期の要求性能を満たし得ることが確認された。しかし今回のシミュレーション実験では安全性に対する配慮が十分ではなく、例えばビルからの距離にも制限を設けなかったため、基準ホバリング点から数mビルに近づいた場合もそのまま実験を継続している。今後、より実際に即した運用規程を定め、放水中に風が強まった場合には消火活動を中断して現場から離脱するといった緊急時の手順なども含めてシミュレーション実験を行う必要がある。

また、今回の実験では簡単化のため様々な仮定が導入されているが、これらの仮定を(1)実際の消火ヘリコプタに比べて性能を過大に評価する原因、(2)過小に評価する要因、および(3)現段階ではどちらともいえないもの、に分けてまとめると以下ようになる。

(1) 性能を過大に評価する要因

ビル風の数学モデルが簡単化されており、ビルに対する相対位置による影響なども考慮されていない。ビルの角付近では同じ様流風速に対して風の乱れがより強いことも予想されるため、今後ビル風の実測データや風試データの蓄積に伴ってより現実的なビル風モデルを構築する必要がある。また、放水流に対する風の影響や機体が動揺した場合の放水ブームの変形なども考慮されていない。この点については現在東京消防庁において放水システムの地上試験が行われており、その成果をシミュレーションモデルに反映する予定で

ある。

(2) 性能を過小に評価する要因

シミュレータの視界模擬装置の制約から位置に関する情報がパイロットに十分に伝わらない。また、今回の実験はモーションなしで行った。一般にモーションキューによって突風に対する機体の応答は軽減されるため、ホバリング精度が改善される可能性がある。

(3) どちらともいえないもの

機体の運動の数学モデルの妥当性が明らかでない。

個々の要素がどの程度シミュレーション結果に影響を与えているかについて現段階では明らかでないが、全体としての結果は飛行実験結果と比較することによって検証を行った。その結果について次章で述べる。

3. 実機による飛行実験

3.1 実験装置

東京消防庁所有のユーロコプタ社製スーパーピューマヘリコプタを用いて、実際の高層ビル（芝浦シーバンスツインビルS棟、地上24階建て、高さ約100m）に20mまで接近してホバリングする飛行実験を行った。実験は平成6年1月12日～14日の3日間にわたって行われた。飛行実験の詳細は別報⁷⁾にまとめられている。図3.1.1にホバリング中のヘリコプタの写真を示す。実験中、ビルの屋上で計測された平均風速は5.4m/s、風向は北北西、ビルの壁面にはほぼ直角の方向であり、またホバリングはビルの風下側で行われた（図3.1.2）。

記録されたデータは以下のとおりである。

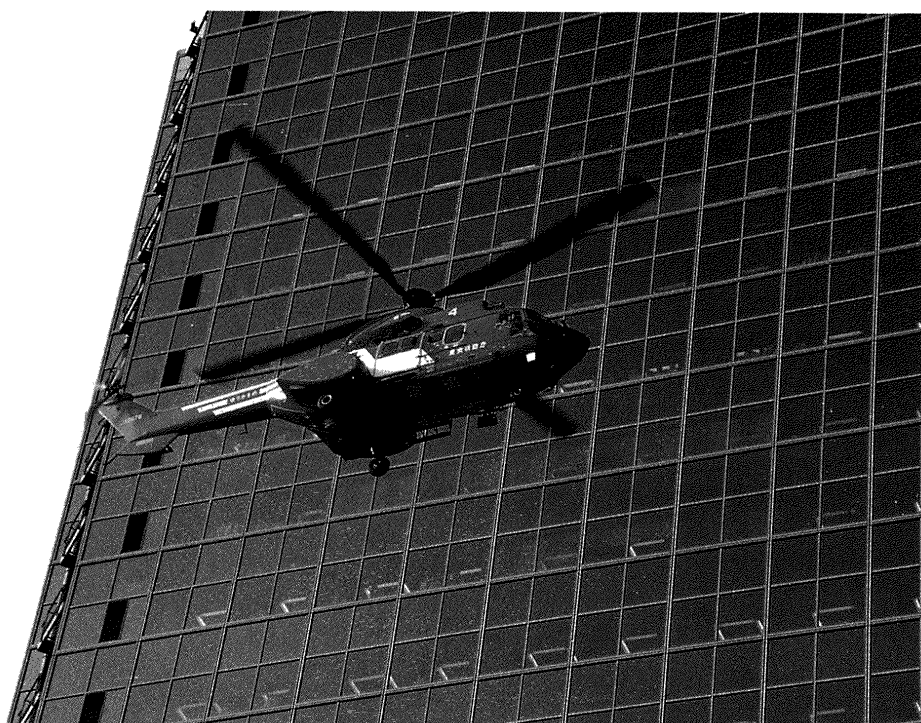


図 3.1.1 ビル横でのホバリング実験

(1) 機体の状態量

IRU (Inertial Reference Unit) を搭載し、3軸の加速度、姿勢角、角速度を計測した。

(2) パイロットの操舵量

操縦桿縦横、コレクティブレバー、ペダルの各変位量を操縦索にポテンショメータを取り付けて計測した。

(3) 自動制御系の出力を含んだ操舵量

ASEがONの状態ではパイロットの操舵と自動制

御系からの出力が足し合わされて各サーボを駆動する。メインロータのスウォッシュプレート直下のサーボ3本とテイルロータのサーボにポテンショメータを取り付けてその変位量を計測した。

(4) ビルまでの距離

機内後部座席の担当員がレーザ光を用いた測距計（双眼鏡状のもの）によってビルまでの距離を随時計測し、結果を読み上げて音声で記録した。

以上の計測結果はサンプリングレート20Hzで機載のデータレコーダに収録された。

実験に用いた機体は上記のセンサや計測装置を搭載した以外には改修は行っておらず、放水システム等は搭載されていない。今回の実験では、機体外部に装着されたサーチライトの光を目標点（地上14階、高度約50m）に当てることによって消火活動の模擬を行った。図3.1.3に目標点の写真（機内から撮影したもの）を示す。3の数字が書かれている赤いプレートが目標点である。サーチライトは機体左舷側にしか取り付けられないため、機体の左側面をビルに向ける方向でビルの壁面と平行になる姿勢でホバリングを行った。サーチライトの取付角度は上下左右方向に機内後部座席から制御できるが、その角速度は約10deg/sで一定であり、またその時定数も非常に小さいため、放水ブームの運動の模擬にはならなかった（放水ブームの角速度は3~6deg/s、時定数は0.1~0.2秒と想定されている）。このため、サーチライトは固定してパイロットの操縦のみによって目標点に照準を合わせる実験を主に行った。

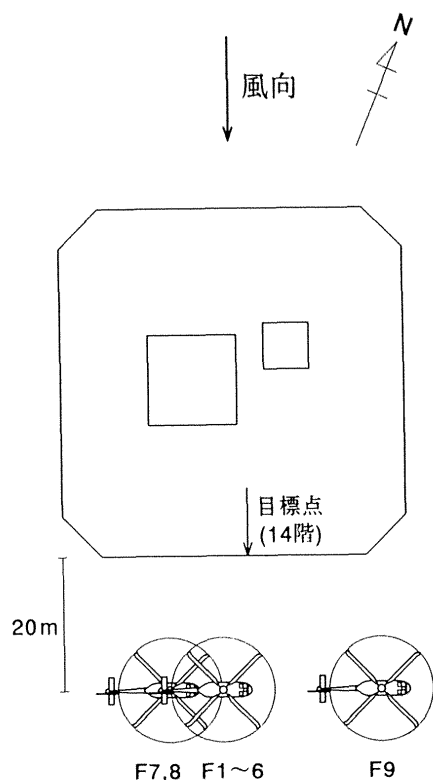


図3.1.2 飛行実験でのホバリング位置と風向

3.2 実験手順と項目

パイロットが目標点から20mの位置で定点ホバリングを行う場合（この時サーチライトは点灯しない）とサーチラ



図3.1.3 飛行実験での目標点

イトの光が目標点に当たるように機体を操縦する場合とについて実験を行った。ビルまでの距離は後部座席の担当員がパイロットからの要求に従って随時計測し、音声で答えた。ヘリコプタの操縦は通常は右席で行われるが、右席からでは機体左舷側の目標点を視認しづらいため、左席による操縦も合わせて試行した。また、目標点の位置による影響を調べるため、目標点をパイロットから見てほぼ真横に置いた場合（図3.1.2 F1～6）と斜め45度前方に置いた場合（図3.1.2 F7, 8）とについて、その見やすさ、操縦のしやすさなどを比較した。また、ビルとの相対位置による風の違いを調べるため、ビルの角付近でのホバリングも行った（図3.1.2 F9）。実験ケースを表3.2.1にまとめる。

ケースF1（Fは飛行実験を表す）は通常の定点ホバリング、F2はASEをOFFにした状態での定点ホバリング、F3はパイロット（右席）の操縦のみによってサーチライトの光を目標点に照準する実験、F4は同じ操縦をコパイロット（左席）が行う場合、F5はパイロットは直接目標点を見ず、コパイロットの誘導によってホバリング位置を保持する実験、F6はパイロットは定点ホバリングに専念して後部座席の操作員がサーチライトの角度を制御して目標点に照準する実験、F7は目標点を斜め前方に置いてパイロットが照準する実験、F8はこれをコパイロットが行う場合、そしてF9はビルの角付近でホバリングする実験である。各ケースについてパイロットが定常ホバリングに達したと判断してから1分間のデータを記録した。なお、全ての実験を2名のパイロットA（飛行時間5300時間）、B（飛行時間3500時間）で各1回ずつ行った。

以上の実験ケースを飛行シミュレータによる実験と比較した場合、飛行実験当日の風速を考慮すると、ケースF1がS02（表2.4.1）に、またケースF3がS06にそれぞれ対応する。またF6はタスクとしてはS10に対応するが、前述のようにサーチライトと放水ブームの運動速度が異なるため直接比較はできない。

3.3 実験結果－パイロットコメント－

各飛行実験で得られた結果をパイロットコメントを中心にまとめると以下になる。

(1) 定点ホバリングを行う実験

- 実験中、ビルの屋上で計測された平均風速は5.4m/sであったが、ホバリングを行った場所がビルの風下側、死水領域であったため、パイロットはホバリング中、特に強い風の乱れは感じなかった。タスクに要求されるスキルレベルはビルの屋上でのホバリングと同程度であった。
- パイロットが目視によってビルとの間の距離を正確に判断して一定に保つことは困難であった。ビルからの距離は20mを目標としたが、最も近づいた場合で16m、

表3.2.1 飛行実験の実験項目

ケース	実験項目	パイロットタスク	パイロット
F1	定点ホバ	定点ホバ	右席
F2	ASE OFF	定点ホバ	右席
F3	照準（真横，右席）	照準制御	右席
F4	照準（真横，左席）	照準制御	左席
F5	コパイロットによる誘導	定点ホバ	右席
F6	サーチライト操作	定点ホバ	右席
F7	照準（斜め，右席）	照準制御	右席
F8	照準（斜め，左席）	照準制御	左席
F9	ビル角付近でのホバ	定点ホバ	右席

遠ざかった場合で30m程度であった。また、数分以上ホバリングを続けると距離感が狂うことも報告された。消火ヘリコプタにはビルとの間の距離を計測してコクピット内に表示するシステムの搭載が望まれる。

- パイロットが目視によってビルと平行な機首方位を保つことは困難であり、適宜方位計を参照して機首方位を修正したが、±10度の範囲で変動した。
- 上記のように距離や姿勢の感覚が不足したため、パイロットが操縦している間、距離や機首方位をコパイロット等がコールすることが有効であった。
- 上記のように距離や姿勢の感覚が不足した要因の一つとして、今回実験を行ったビルが全面ガラス張りであったことが挙げられる（図3.1.1参照）。

(2) ビルの角付近でのホバリング

- ビルの角付近（図3.1.2, F9）ではビルの風下側（図3.1.2, F1～6, F7, 8）に比べて風の乱れが強い。
- パイロットから目標のビルが全く視認できなくなるため、ホバリング位置の保持が困難になる。コパイロット等による誘導が不可欠である。

(3) 目標点にサーチライトを照準する実験

- 左真横に目標点を置くとパイロット（右）席から視認しづらくなるため、コパイロットが姿勢を反らしたり、また適宜状況をパイロットにコールする必要があった。しかし一方で、右席からの方がコクピットのフレーム越しにビルを見るようになるため、ビルとの相対位置関係を把握しやすい。左席からでは目標点を見やすくなる反面、ビルの壁面が視野のほとんどを占めるようになるため、距離や機首方位に関する感覚が悪化する。また、操縦そのものも左席では不慣れなため、総合的には右席で操縦を行う方が良いという結論であった。今回の実験ではサーチライトの取付が機体左舷側に限定されていたが、現在構想中の消火ヘリコプタでは左右両方に放水ブームが装備されているため、実際の消

火活動ではビルを右側に見る方向で右席で操縦することが考えられる。ただし、風向や現場の立地条件等によってはビルを左側に見る向きにホバリングせざるを得ない状況も起こり得るため、それぞれの場合に応じてパイロットとコパイロットの役割分担を検討しておく必要がある。

- 目標点は真横に置くよりやや斜め前方に置いた方がパイロットから視認しやすい。ただし、ビルからの距離を一定にして目標点を斜め前方に置いた場合、機体と目標点との距離が長くなるため放水が届かなくなる可能性がある。今後、放水システムの性能や機体とビルとの安全な距離などを考慮して目標点をどの角度に置くのが最も良いか検討する必要がある。

(4) サーチライト操作

- サーチライトの動きが速過ぎたため放水ブーム操作の模擬にはならなかった。
- サーチライトを固定した状態でも高い命中率が得られたため、サーチライト操作による命中率の向上は確認できなかった。

3.4 実験結果ーデータ解析ー

IRUから出力される加速度を2回積分して機体のホバリング位置を計算した。この際、次の変数を未知パラメタとして、機体の位置の基準ホバリング点からの誤差が最小になるように最小自乗法によって定めた。

- (1) 加速度計の3軸方向出力それぞれに1分間の計測時間中一定のバイアスが含まれていると仮定し、その3変数を未知パラメタとした
- (2) 積分定数である初期ホバリング位置3変数のうち、ビルとの間の距離のみ測距計で計測した値を用い、残りの2変数を未知パラメタとした。
- (3) 積分定数である初期速度3変数はゼロとせずに未知パラメタとした。

このようにして得られた機体の位置とIRUから出力される姿勢角のデータからサーチライトの光がビルの壁面に当たる位置を計算し、1分間のホバリング中に目標窓(実際のビルの窓ではなく目標点を中心として2×2mの大きさを持つ仮想的な窓)内に命中した割合などを求めた。表3.4.1にサーチライトの照準を行った各ケースについて命中率をまとめて示す。以上の計算方法では、未知パラメタがホバリング中の位置誤差を最小にするように定められているため、得られた命中率が実際よりも高い値を示す可能性があるが、実験中に機内に固定されたビデオカメラから撮影された映像と比較した結果、計算によって求められた命中率はほぼ妥当な値を示していることが確認されている。

実験結果を見ると、全般にパイロットAによる結果の方がBによる結果よりも命中率が高い傾向にあるが、この要

表3.4.1 サーチライトが目標窓に命中した割合

ケース	パイロット	
	A	B
F3	96 %	83 %
F4	91 %	88 %
F7	—	70 %
F8	—	75 %

注) パイロットAによるケースF7, 8は計測装置の不具合のためデータを記録できなかった。

因として、総飛行時間の差(パイロットAが5300時間、Bが3500時間)よりむしろ、パイロットAが実験前の予備飛行を担当し、実際にビルの横でホバリングを行ったため、実験に対する慣熟度が高かったことが挙げられる。パイロットコメントによれば、ビルの近傍でのホバリングは実際の危険度以上に精神的な負担が大きく、慣熟度の差による影響が大きい。消火ヘリコプタの実用化に向けて、乗員の慣熟訓練の徹底が肝要になる。

図3.4.1は定点ホバリング(ケースF1)、ASE OFFでの定点ホバリング(ケースF2)、右席パイロットによるサーチライトの照準制御(ケースF3)、左席コパイロットによる照準制御(ケースF4)の各場合について位置と姿勢角の時歴を示したものである。ASE OFFの状態では機体の姿勢角の変動が大きい。この機体は通常ASE ONの状態では運航されており、例えばASEに不具合が生じた場合などには有効な消火活動は望めなくなる。

パイロットが機体に固定されたサーチライトの光を目標点に当てるように操縦する照準制御の場合、定点ホバリングの場合に比べて機体の位置の変動は大きくなる。特に、照準点の左右方向の動きを保持するために機体の位置の前後(X)方向と姿勢角のヨー(Ψ)方向の運動がカップリングして現れる。この影響は特に左席で操縦を行った場合に顕著になる。それは前述のパイロットコメントにあるように、右席ではコクピットのフレーム越しにビルを見るため、パイロットが機体の位置と姿勢角の変動を把握しやすいのに対し、左席では視野のほとんどをビルの壁面が覆い、対照できる物がなくなるためである。図3.4.1の例では、1分間の実験中、機体の位置が前方向に約4m(左下の図の実線)、機首方位が左向きに約10度(右下の図の点線)それぞれ変移しているが、この結果パイロットから見て目標点はほぼ一定の位置に見えるため、ホバリング位置とヨー姿勢角のカップリングによる変動に気付きにくい。一方、照準点の上下方向の動きを制御するためには、機体の上下方向の運動とロール姿勢角がカップリングするが、パイロットはヨ

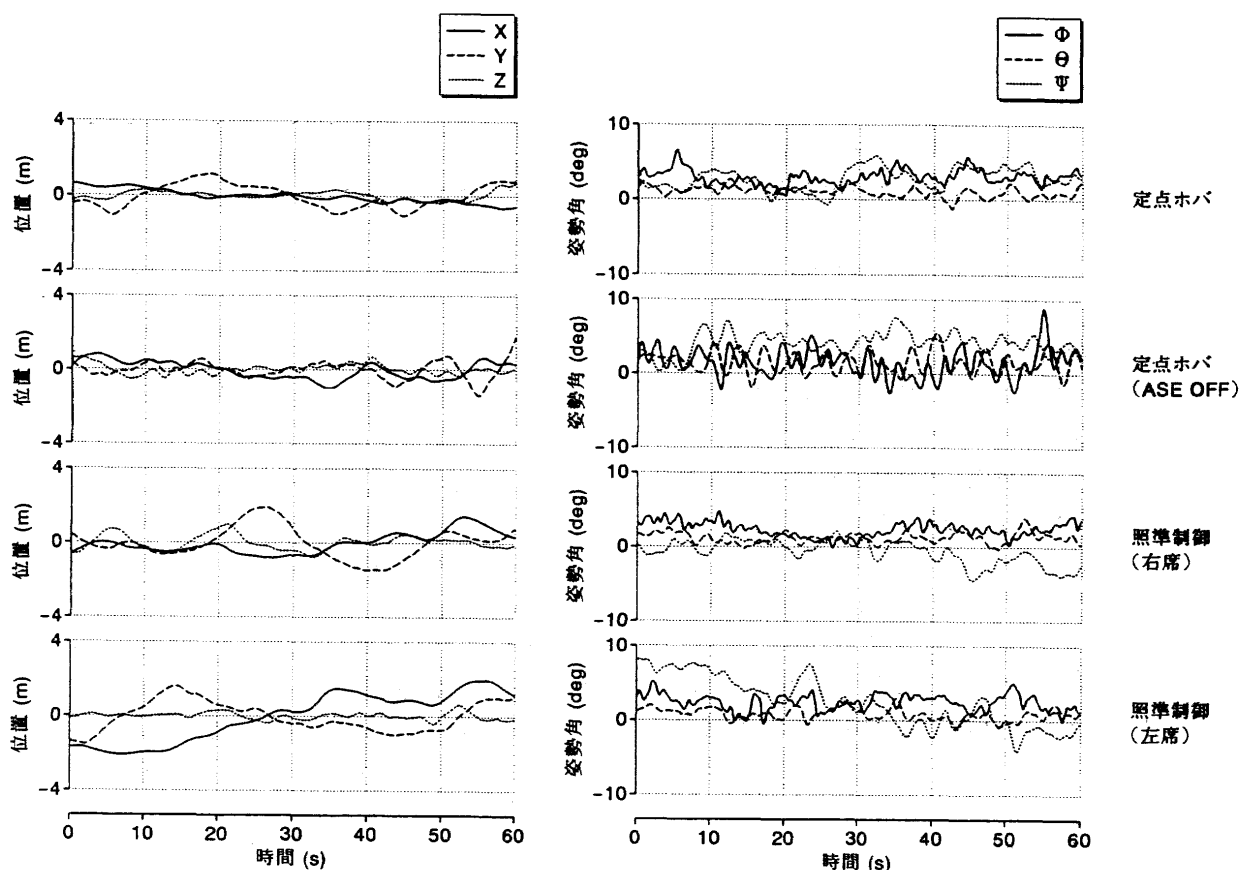


図 3.4.1 飛行実験で計測された時歴の例

ー姿勢角に比べてロール姿勢角の方が水平線を参照して絶対値を把握しやすいため、左右どちらの席で操縦した場合にもこのようなカップリングによる変動は見られなかった。

図 3.4.2 は定点ホバリングを行った場合(ケース F1)の 3 軸方向の位置と姿勢角の擾乱の最大値と標準偏差をシミュレータ実験結果(ケース S01~S04)と比較したものである。飛行実験結果は 2 名のパイロットによる結果とその平均が示されている。全般に、位置の変動ではシミュレータ実験結果の方が飛行実験結果よりも大きな値を示し、姿勢角の変動では両者は比較的近い値を示しているが、この要因として以下のことが考えられる。

- (1) シミュレータでは視界模擬装置の制約上、位置の感覚が乏しく、また今回の実験は固定ベースで行われておりモーションキューも無かったため、位置の変動が飛行実験結果に比べて大きくなった。ただし、飛行実験結果でも Y 方向(ビルの壁面と垂直方向)に関してはシミュレータ実験結果と同程度の変動が見られており、実際の飛行でもビルとの間の距離感が不足したことがうかがえる。
- (2) 実験中、ビルの屋上での平均風速は 5.4m/s であったが、ホバリング位置はビルの風下側のため風が弱かったものと思われる。飛行実験結果は全体に風速 4m/s の時のシミュレータ実験結果(ケース S02)と

似た値を示している。

図 3.4.3 は定点ホバリングを行っている間のパイロットの操舵(操縦桿の縦操作)のパワースペクトルを ASE ON(ケース F1), OFF(ケース F2)の場合で比較したものである。ASE を OFF にした場合、機体の姿勢角維持のためのパイロットゲインが高く、照準を目標点に保持することが困難になる。特に周波数 0.3Hz 付近で操舵のピークがあり、これが機体の ASE OFF の状態での固有振動数と思われる。この機体は通常 ASE ON の状態で運航されるが、特にビルの近傍での消火活動のように機体の安定性を求められる場合には ASE の機能は不可欠である。

図 3.4.4 は定点ホバリング中のパイロットの縦操舵のパワースペクトルをビルの風下側(ケース F1, 図 3.1.2 参照)とビルの角付近(ケース F9)で比較したものである。ビルの角付近でのホバリングでは周波数 0.2Hz 付近に操舵のピークが見られるが、これがビル角後流の剥離流の影響によるものか、あるいはパイロットの視野の影響(前述のパイロットコメントにあるようにビルの角付近ではパイロットから目標のビルが視認できなくなる)によるものか、現段階では不明である。第 4 章に示す風洞実験結果では、ビル角後流でも風のパワースペクトルの変化は見られなかった。今後より詳細なシミュレーション実験等を行い、ビルに対する相対位置によってパイロットの操縦の負担がどのよう

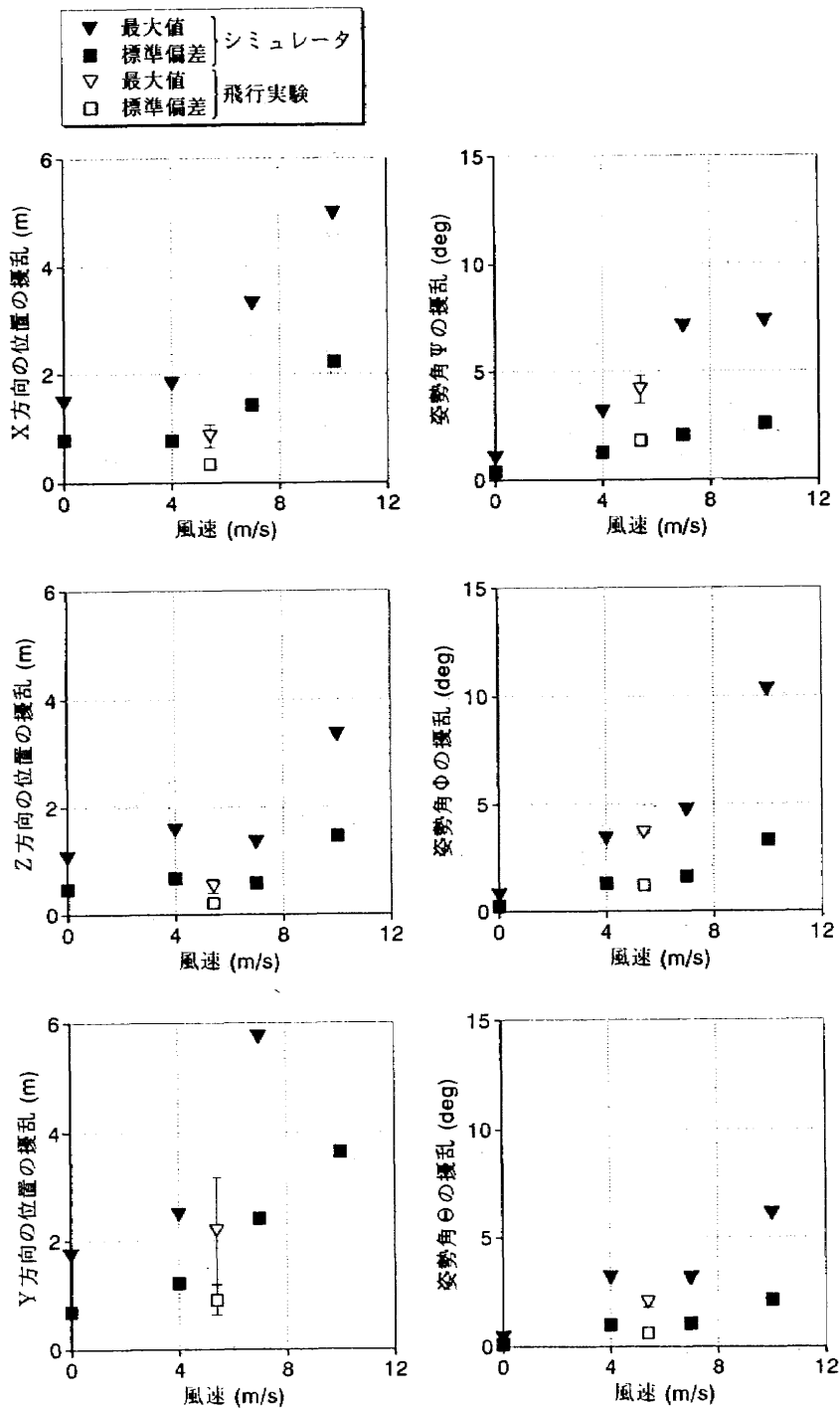


図3.4.2 位置と姿勢角の擾乱(定点ホバ)

に変化するか検討する必要がある。

図3.4.5はサーチライトの照準点の1分間の軌跡(ケースF3)をシミュレータ実験での着水点の軌跡(ケースS06, 風速4m/sで放水ブームを固定したもの)と比較したものである。両者は命中率に関してはほぼ等しい値を示しており、この程度の風速であればパイロットの操縦のみによって80%以上の命中率が得られることが確認されたが、一方で照準点の乱れのパターンに関しては両者の間にやや異なった点が見うけられる。シミュレータ実験ではビル風を実測結果のパワースペクトルに基づいて白色ノイズ+フィル

タの形式でモデル化したため、乱れの大きさが時間にほとんど依存していないのに対し、飛行実験では時々強い突風を受けて照準点が大きく乱れており、またそれ以外の時にはシミュレータ実験結果よりも安定している様子がうかがえる。また、パイロットコメントによれば、実機よりシミュレータの方が機体のヨー方向が不安定であったが、照準点の乱れにもその傾向が現れている。このような結果を踏まえて、今後シミュレータに用いるビル風や機体の運動の数学モデルを改善する必要がある。

図3.4.6, 7はそれぞれ照準点の誤差の最大値と自乗平

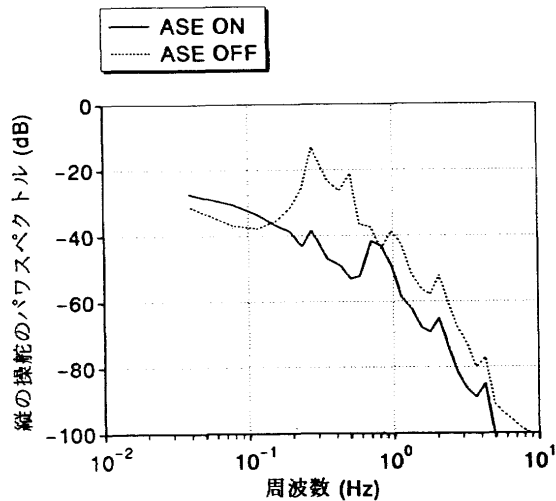


図3.4.3 パイロットの操舵のパワスペクトル
(ASE ON/OFF での比較)

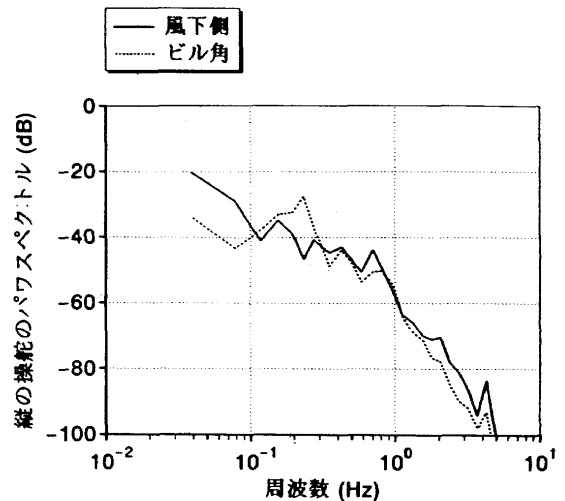
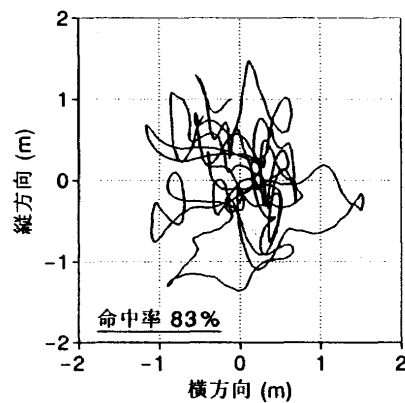
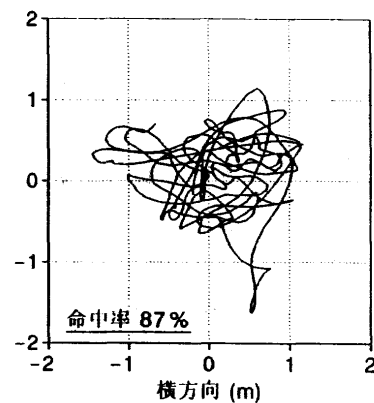


図3.4.4 パイロットの操舵のパワスペクトル
(ホバリング位置での比較)



1) 飛行実験



2) シミュレータ実験

図3.4.5 照準点の軌跡(照準制御, ブーム固定)

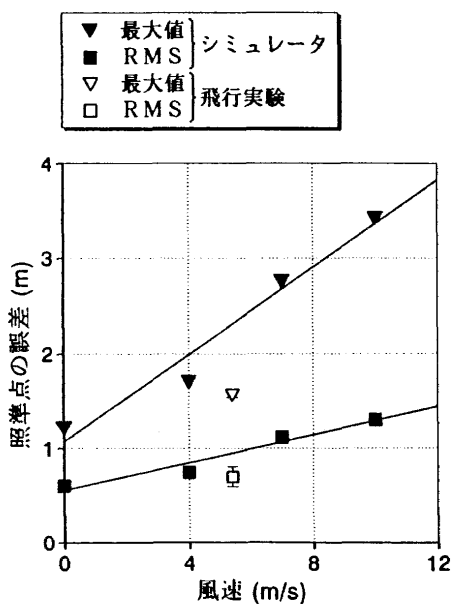


図3.4.6 照準点の誤差(照準制御, ブーム固定)

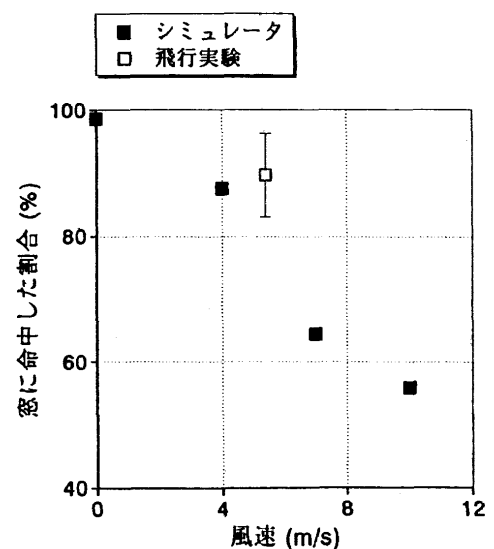


図3.4.7 命中率の比較(照準制御, ブーム固定)

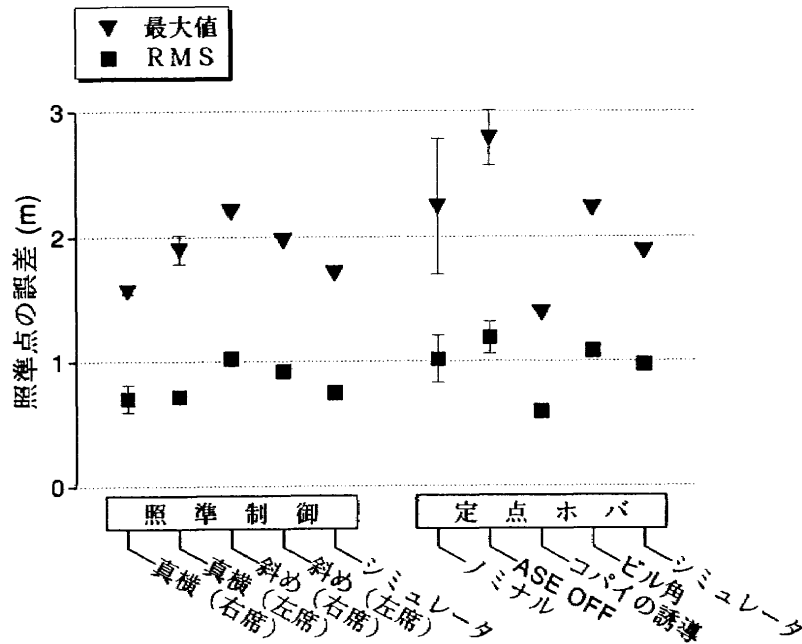


図 3.4.8 各実験ケースでの照準点の誤差

均、および照準点が目標窓内に命中した割合を飛行実験結果（ケース F3）とシミュレータ実験結果（ケース S05～S08）で比較したものである。飛行実験ではシミュレータ実験に比べて照準点の変動が小さく、目標窓に命中した割合が高い。これは図 3.4.2 で述べたのと同じ要因によるものと思われるが、今後これらの点を改善することができれば、飛行シミュレータによる実験は消火ヘリコプタの有効性と安全性を評価するための有用な手段となり得る。

図 3.4.8 は F6 を除くすべての飛行実験ケースとシミュレータ実験のケース S02, S06 について、照準点の誤差の最大値と自乗平均をまとめたものである。飛行実験で定点ホバリングを行ったケースではサーチライトは点灯されていないが、機体の運動の擾乱の目安として前述の方法によって照準点の誤差を計算した。

まず、パイロットが照準制御を行ったケースで右席と左席を比較した場合、右席での成績が良く、これは前述のパイロットコメントを裏付ける結果である。しかし、目標点を斜め前方に置いた場合には真横に置いた場合よりも成績が悪くなっており、斜め前方の方が目標点を視認しやすいというパイロットコメントと相反する結果となった。これは、目標点を斜め前方に置いた方が機体と目標点との距離が長くなるため、機体の姿勢角の擾乱による照準点の変動がより大きくなるためと、また、目標点を真横に置いた場合には照準点の上下、左右の動きがそれぞれ機体のロール、ヨーの動きに独立して対応するのに対して、目標点を斜め前方に置いた場合には機体のロールとピッチの動きがカップリングして照準点の上下運動に現れるようになるため、照準点の誤差が増大したものと推測される。この点を踏ま

えて今後目標点をどの位置に置くようにホバリングすれば良いか検討する必要がある。

次に、パイロットが定点ホバリングを行ったケースでは、コパイロットの誘導によってホバリング位置を保持した場合に特に照準点の擾乱が小さくなっている。これは、機体の位置をコパイロットが音声でコールすることによって、パイロットは機体の姿勢角の維持に集中できたためと思われる。実際の消火活動においても、パイロットとコパイロット、さらに放水操作員の間の役割分担と連携が重要になる。

3.5 飛行実験のまとめ

風の強い季節を選んだにもかかわらず実験当日は風が比較的穏やかであり、またホバリングを行った場所がビルの風下側、死水領域であったため、パイロットはホバリング中、ビル風による影響をあまり感じなかった。しかし一方でビルの角付近を飛行中には比較的強い風の乱れを感じており、風向と火災現場の位置関係や現場までのアプローチ経路までを含めて風の影響についてより詳細に調べる必要があることが指摘された。また、今回の実験で、風速 5m/s 程度であれば風の影響よりもむしろビルとの間の距離感などが問題となることが判った。この点についてはシミュレータ実験では模擬が困難であり、飛行実験の意義が大きかった。ビルの近傍でホバリングしている間はパイロットの視線がコックピット外部に集中するため、コパイロット等が計器に表示される距離や機首方位の情報をパイロットにコールすることが有効であった。実際の消火活動でも、パイロット、コパイロット、放水操作員の三者がうまく役割

分担と連携を行うことが重要になる。今後、飛行シミュレータでもこの三者を配置した実験を行い、安全かつ効果的に消火活動を行うための作業手順を策定する必要がある。

4. 風洞実験によるビル風の検証

4.1 実験の概要

飛行実験では機体のホバリング位置での風速を測定できなかったため、風洞実験によって飛行実験中のビル周辺の風を再現した。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300m、乱流強度は地上10mで25%である。風洞の一様流風速は8m/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4.1.1に芝浦シーバンスツインビルの風洞模型の写真を示す。ビル周辺の直径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。飛行実験においてホバリングを行った場所は図のS棟と記されるビルの壁面側に相当する。

風速の測定はX型熱線風速計を用いて行い、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を測定した。また、風向の変動が激しい箇所では、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も合わせて測定した。データのサンプリングレートは2500Hz(スケール換算で5Hz)である。

実験は次の2項目について行った。

(1) 現地実測結果との比較

風洞実験結果の検証のため、平成4年11月28日に芝浦シーバンスビル周辺において3次元超音波風速計をワイヤ吊りして測定した風速データ¹⁾との比較を行った。

(2) 飛行実験の際の風の再現

平成6年1月14日の飛行実験の際の風向を再現し、ホバリングを行った数点において風速の時歴を取得した。

なお、風洞実験の詳細は別報⁹⁾にまとめられている。

4.2 実験結果

図4.2.1はビルの屋上の測定点(地上高度112m, 屋上から12m)とビル角後流の測定点(ビルの壁面から風下に18m, 内側に1m, 高度58.3m)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 $U \pm 2\sigma_U$ (内側の弧がないのは $U - 2\sigma_U$ が負になる場合)を, 内径角度が平均風向 $\pm \tan^{-1}(2\sigma_V/U)$ 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。風洞実験結果はビルの屋上の測定

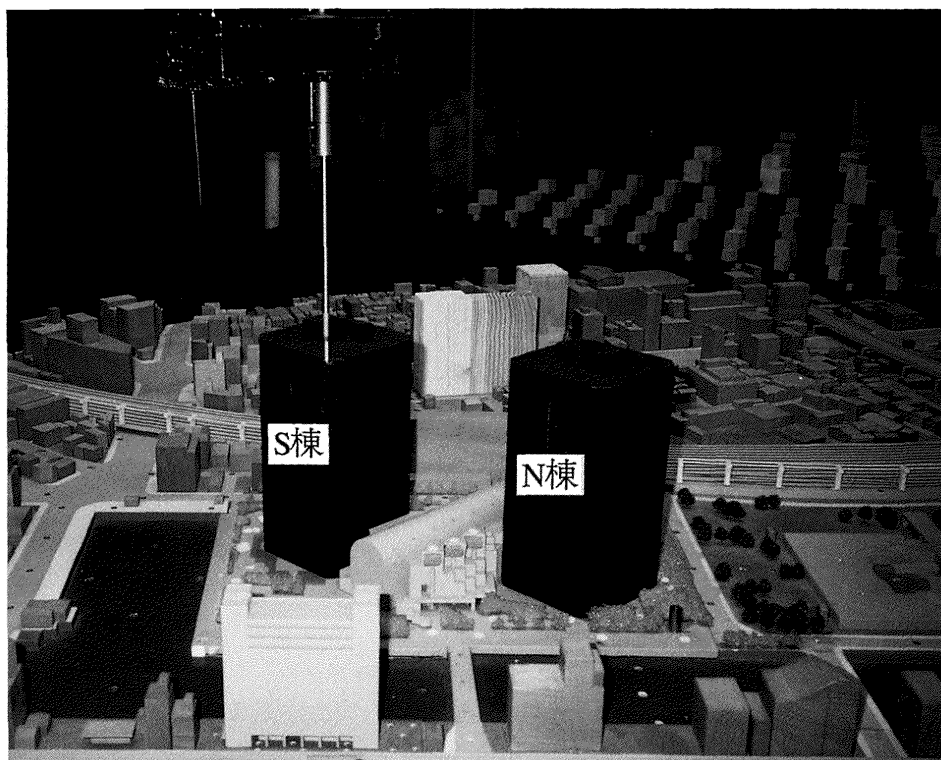


図4.1.1 風洞模型

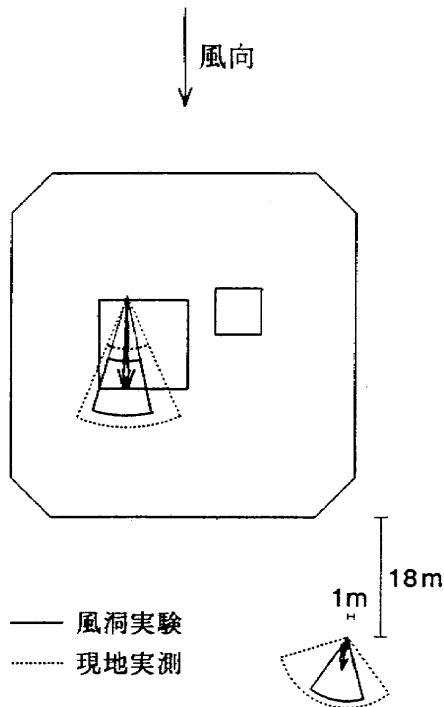


図4.2.1 風洞実験と現地実測による平均風速、風向と分散の比較

点での平均風速が現地実測結果と同じになるように換算して示されている。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はほぼ収まっていることが判る。

図4.2.2は風洞実験と現地実測による風速（ビルの壁面に平行な水平方向成分）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（ $<3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ ）でパワ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、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（ $10^{-1} \sim 10^0 \text{ Hz}$ 付近）では両者は比較的良く一致している。

以上の結果から、風洞実験によって得られた風速の時歴データは、今後シミュレータ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、シミュレータ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。

図4.2.3は飛行実験の際の風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、風洞実験結果はこの点での平均風速が実測結果と一致するように換算されている。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

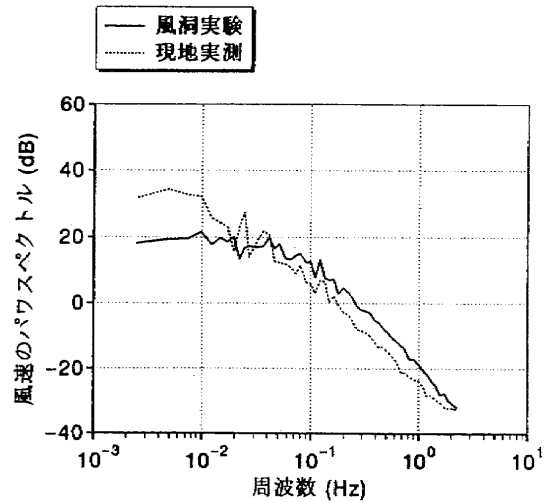


図4.2.2 風洞実験と現地実測による風速のパワースペクトルの比較

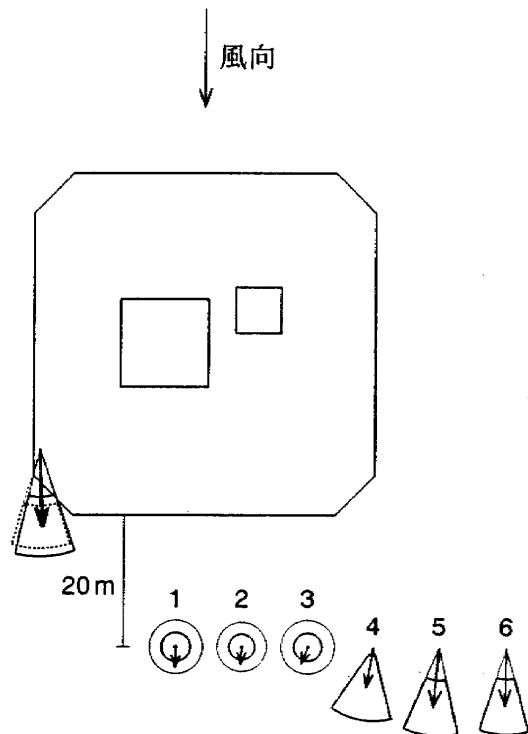


図4.2.3 飛行実験を行った点での平均風速、風向と分散

飛行を行った場所に相当する点である（図3.1.2参照）。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型熱線風速計による平均風速と風向を、内、外側の円がI型熱線風速計による平均風速、平均風速 $+2\sigma$ をそれぞれ表している。

図4.2.4は図4.2.3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 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、ま

た乱れの割合 σ/U 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 corner 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を裏付けるものである。

図4.2.5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 ($>10^{-2}$ Hz) にパワーが変移している。また風下死水領域と比較した場合には、ほぼ全域の周波数で20dB近くパワーが大きくなっているが、周波数特性には有為な差は見られない。図3.4.4に示したように、パイロットの操舵の周波数特性ではビルの風下側と角付近で差が見られたが、これは前述のように風の違いよりむしろパイロットの視野の影響（ビルの角付近ではパイロットから目標のビルが視認できなくなる）によるものと思われる。

4.3 風洞実験のまとめ

風洞実験で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (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、今後シミュレータ実験等でそのままビル風として用いてよいと判断する。
- (2) 飛行実験の際の風を再現した結果、ビルの風下側のホバリング点（飛行実験ケースF1～F8）は死水領域で風の乱れも弱く、またビルの角付近のホバリング点（ケースF9）では風の乱れが強いことが確認された。この結果は飛行実験の際のパイロットコメントを裏付けるものである。

5. おわりに

飛行シミュレータと実機を用いて消火ヘリコプタの有効性、安全性に関する実験を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 飛行シミュレータを用いてヘリコプタによる高層ビル火災消火の模擬実験を行った結果、パイロットと放水操作員が協調することにより、平均風速7m/sで90%近くの放水を目標窓内に命中できることが示され、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。
- (2) 実機による飛行実験を行った結果、実験当日の風（ビルの屋上での平均風速5.4m/s）程度であれば、高

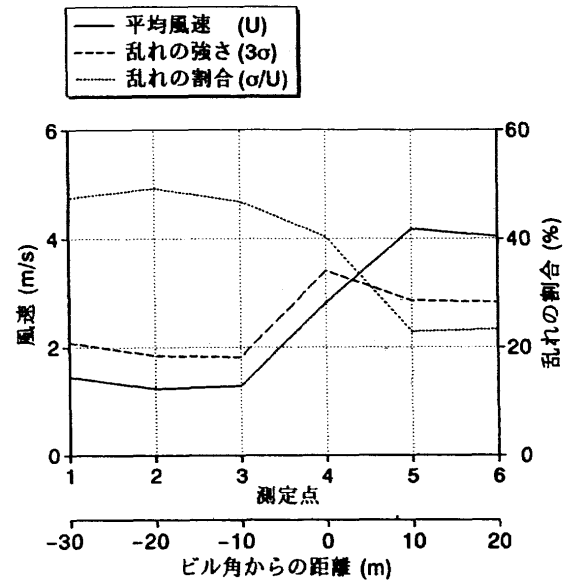


図4.2.4 飛行実験を行った点での平均風速と分散の分布

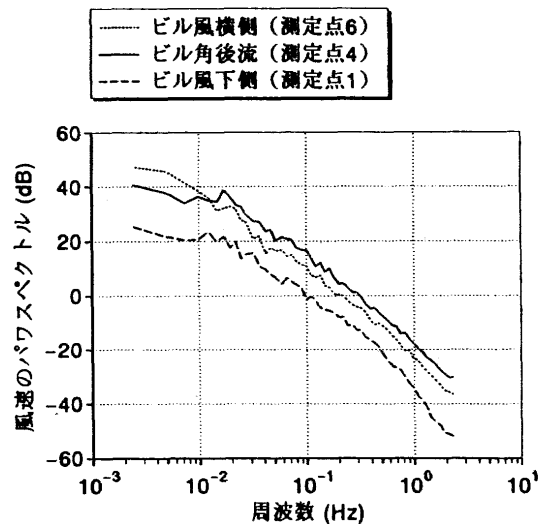


図4.2.5 飛行実験を行った点での風速のパワースペクトルの比較

層ビルから20mの距離で安全にホバリングできることが実証された。ただし、パイロットが目視によってビルとの間の距離を正確に保持することは困難であったため、消火ヘリコプタにはビルとの間の距離を計測表示するシステムの搭載が望まれることが指摘された。また、ホバリング中はパイロットの視線がコクピット外部に集中するため、計器に表示される情報をコパイロットがコールすることが有効であった。

- (3) シミュレータによる実験結果と飛行実験結果を比較した結果、両者は良い相関関係にあり、シミュレータ実験による消火ヘリコプタの評価が妥当かつ有効であることが確認された。一方で、シミュレータに用いたヘリコプタの運動とビル風の数学モデルの改良すべき

点が指摘された。

- (4) 風洞実験によって飛行実験の際のビル周辺の風を再現した結果、パイロットコメントを裏付ける風速データが得られた。

また、今回の実験の成果を通して以下のような今後検討されるべき課題が提起された。

- (1) 今回の飛行実験では、本報告書で述べたビルの近傍でのホバリング実験とは別に、消火ヘリコプタの母機と想定されているスーパービューマのホバリング特性を測定する実験も行われた^{7,12)}。また、風洞実験では、飛行実験を行った場所以外のビル周辺での風速分布等も測定されている⁹⁾。今後、これらの成果を活用してヘリコプタの運動やビル風の数学モデルをより現実的なものにする。
- (2) 実際の消火活動では、パイロット、コパイロット、放水操作員の間の役割分担と連携が重要になる。今後飛行シミュレータでもこの三者を配置した実験を行い、現場へのアプローチから放水、離脱までの過程を最も安全かつ効率的に行うための作業手順を策定する。
- (3) 今後は消火ヘリコプタの安全性の検討に重点を置き、例えば消火活動中に突然強い風が吹いた場合や片方のエンジンが停止した状況を想定し、タンク内の水を投棄して現場から離脱する際のシミュレーション実験なども行う必要がある。

以上の課題について今後検討を行い、消火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「消火ヘリコプタの安全基準に関する研究」および東京消防庁「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行われたものであり、飛行実験の実施に際しては関係各位に多大なるご協力を頂いた。また、ビル風の風洞実験は同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、風モデルの作成に際しては清水建設(株)から、風洞実験結果の検証に際しては(財)日本気象協会からそれぞれ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4年度），東京消防庁，1992.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 日比一喜，花房龍男，加藤真規子；建物側面の変動風速の性状（消火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，pp.25-26.
- 5) 奥野善則，松引浩平；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.
- 6) 齊藤 茂，原田正志，奥野善則；ヘリコプタによるビル横でのホバリング実験，航空宇宙学会年会講演会，1994.
- 7) 原田正志，齊藤 茂，奥野善則；ヘリコプタの動特性測定飛行実験，航空宇宙技術研究所資料 TM（現在執筆中）.
- 8) 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ー消火ヘリコプタの実現に向けてー，航空宇宙学会年会講演会，1995.
- 9) 奥野善則，赤松重樹，齊藤 茂，原田正志；風洞実験による高層ビル周辺の風の測定ー消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験ー，航空宇宙技術研究所資料 TM-685.
- 10) 川原弘靖，岡部正典，渡辺 顯，坂東俊夫，若色 薫；飛行シミュレーション試験設備，模擬操縦席装置の構成および機能，性能，航空宇宙技術研究所資料 TM-577, 1987.
- 11) 若色 薫，川原弘靖，渡辺 顯，岡部正典；飛行シミュレーション試験設備，視界模擬装置の構成および機能・性能，航空宇宙技術研究所資料 TM-581, 1988.
- 12) 原田正志，齊藤 茂，奥野善則；大型ヘリコプタによる飛行特性計測試験，飛行機シンポジウム，1994.

航空宇宙技術研究所報告1269号

平成7年5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丁目44番地1
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表) ㊟182

印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

Printed in Japan