

ISSN 0389-4010
UDC 629.735.45
629.7.072

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1293

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験
—その2 消火効率・安全性に及ぼすビル風の影響—

奥野善則・船引浩平・原田正志

1996年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

概 要	1
1. はじめに	2
2. 前回の実験からの改良点	3
3. ヘリコプタの数学モデル	5
3.1 数学モデルの概要	5
3.2 数学モデルの検証	6
4. 風洞実験によるビル風を用いたシミュレーション	6
5. 理論計算によるビル風を用いたシミュレーション	9
5.1 ビル風モデルの検証	9
5.2 仮想ビルでのシミュレーション結果	9
5.3 ロータ面内の風速の変化による影響	12
6. ビル風に対する安全基準	13
7. 飛行試験結果との比較	14
7.1 飛行試験の概要	14
7.2 飛行試験結果	14
8. おわりに	17
謝 辞	18
参考文献	18

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験*

—その2 消火効率・安全性に及ぼすビル風の影響—

奥野善則*¹ 船引浩平*¹ 原田正志*¹

Simulation Study for a Fire Helicopter*

—Part 2 Effects of Turbulent Wind on the Efficiency and Safety—

Yoshinori OKUNO*¹, Kohei FUNABIKI*¹, Masashi HARADA*¹

ABSTRACT

Simulation tests of a fire helicopter are performed using a flight simulator. A fire helicopter is being developed by the Tokyo Fire Department, which has the capability to suppress a fire in high-rise buildings by discharging pressurized water while hovering near the fire. One of the problems in realizing this concept is the heavily turbulent wind around buildings that may cause difficulties in maintaining a stable hover. Wind tunnel tests and theoretical calculations are performed to clarify the characteristics of the turbulence. Based on these results, some wind models around a high-rise building are developed which are available in real time flight simulations. Extensive piloted simulations are carried out using these models, demonstrating that the fire helicopter can suppress fires efficiently up to a wind speed of 7 m/s. Safety criteria are also proposed for when the helicopter approaches a building. The results prove the effectiveness and safety of the fire helicopter and finally led to the approval of experimental operation beginning in March 1996.

Key Words : Helicopter, Flight Simulator, Fire Fighting

概 要

飛行シミュレータを用いて消火ヘリコプタのシミュレーション実験を行った。消火ヘリコプタは現在東京消防庁で開発が進められているもので、高層ビルで火災が発生した場合に現場近傍でホバリングしながら機内に積載した水をポンプで加圧放水して消火する能力を有するものである。消火ヘリコプタの実現に向けて検討すべき問題点の一つとして、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、安定にホバリングを行うことが困難になる可能性が指摘されている。ビル風の特徴を明らかにするため、風洞実験や理論計算が行われ、データの蓄積が進められた。今回、これらの成果に基づいて実時間で高層ビル周辺の風速を計算できるビル風モデルを作成し、ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験を行った。実験結果から、消火ヘリコプタが風速7m/sの条件下で有効な消火活動を行い得ることが示されるとともに、ビルに接近する際の安全限界が策定された。これらの結果に基づいて、平成8年度からは実機による試験運用が開始される運びとなった。

* 平成8年5月1日受付 (received 1 May 1996)

*¹ 飛行実験部 (Flight Research Division)

1. はじめに

航空宇宙技術研究所では平成4年度から消火ヘリコプタの安全性、実用性に関して東京消防庁と共同研究を行ってきた。消火ヘリコプタとは、はしご車の届かない地上50m以上の高層階で火災が発生した場合に、火災現場の近傍でホバリングしながら機内に積載した水をポンプで加圧放水することによって消火する能力を有するものである¹⁾。図1.1に消火ヘリコプタの概念図を示す。

母機となるヘリコプタは東京消防庁所有のアエロスパシアル(現ユーロコプタ・フランス)式スーパーピューマで、放水装備を含めた最大全備質量は8.6t、消火水の搭載量は約1tである。機体の左右に放水ブームを装備しており、巡航中はこれを機体下部に固定した状態で飛行し、現場に到着後片側のブームを横方向に展開・伸長して放水を開始する。ヘリコプタの操縦は右席のパイロットが行うため、通常は右側のブームを用いることが想定されるが、風向や火災現場の立地条件などによって機首方位が制限される場合には左側のブームを使用する。放水の際にブームを横方向に展開するのは機首方位をビルと平行に保つことによってエンジン故障などの緊急事態が発生した場合にも現場から安全に離脱できるようにするためであり、またブームを伸長するのは放水流がメインロータの吹き下ろしの影響を受けないようにするためである。放水は約2分間持続するが、この間後部座席の操作員が火点を狙ってブームの方向を制御する。消火の効率と安全性への配慮から、ブームの先端からビルまでの距離は20m程度が適当と考えられており、機体下部にはレーザー光を用いてビルまでの距離を計測

する装置が装備されている。

このような機能を持ったヘリコプタは世界的にも類例が無く、その実現に向けて大きな期待が寄せられる反面、検討すべき課題も多い。特に消火ヘリコプタの運用が想定される高層ビル周辺では、特有の強い乱れを伴う風、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指摘されている。東京地方の気象データの解析から、95%以上の稼働率を確保するためには、風速7m/sの条件下で安全かつ有効に消火活動を行う能力が必要とされている。消火ヘリコプタの安全性および消火活動の効率に対するビル風の影響について調べるため、平成5年度に航空宇宙技術研究所の飛行シミュレータを用いて模擬実験が行われた²⁾。この結果、消火ヘリコプタが新たな消防手段として有効に機能し得ることが示されるとともに、今後解決すべき問題点が明らかになった。その後関係各機関で様々な研究が続けられ、また一方で実機に搭載される消火システムの設計・製作が進められて、平成7年度末には消火ヘリコプタとしての耐空証明が取得される運びとなった。

このような状況の下で、前回の実験以降に得られた新たな研究成果を反映し、また平成8年度から予定される実機の試験運用に向けて安全基準を策定することを目的として、平成7年10月26日、11月14日、21日、12月12日、21日の5日間にわたって第2回目の模擬実験が行われたので、その結果について報告する。

今回の実験は主に以下の項目について行われた。

(1) ビル風の影響

風速やビルに対する相対位置(風上、風下)が消火

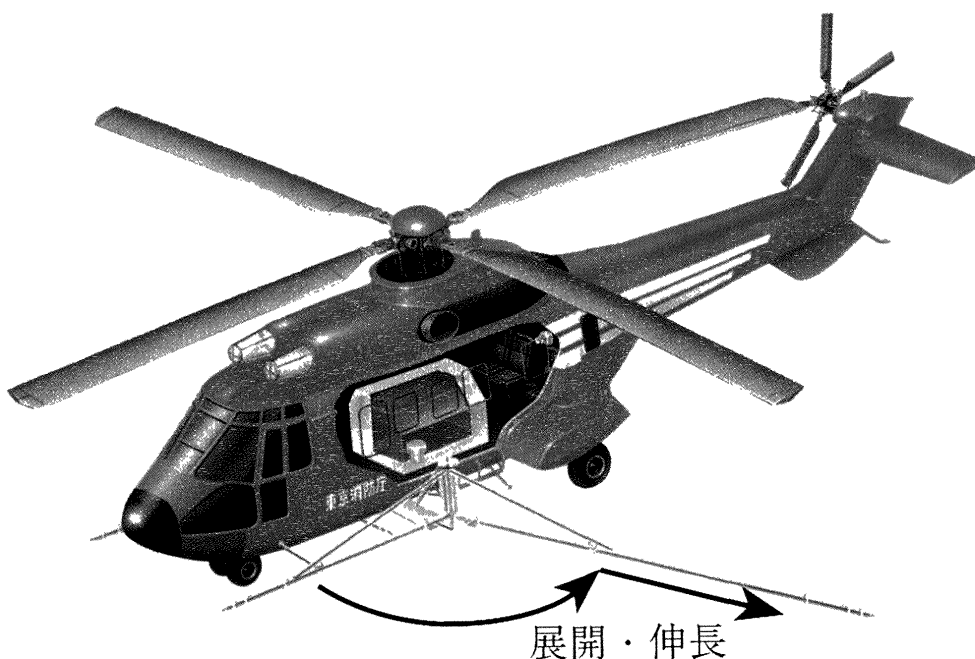


図1.1 消火ヘリコプタの概念図

効率、安全性に及ぼす影響について調べる。

(2) ミッション全体のシミュレーション

離陸、火災現場への進入、放水ブームの展開、消火活動、放水ブームの格納、離脱、掃投、給水、再出動という一連の運用手順を模擬し、パイロット、コパイロット、放水操作員との役割分担と連携を確立するとともに、放水操作卓やコクピットに設置される距離計などの機能性、操作性を確認する。

(3) 緊急時のシミュレーション

消火活動中にエンジン（片発）故障が発生し、消火水を投棄して現場から直ちに離脱する場合を想定したシミュレーションを行う。

本報告書は以上の実験項目のうち主に(1)の結果についてまとめたものであり、(2)、(3)については別報³⁾にまとめられている。

2. 前回の実験からの改良点

今回の実験に用いたシミュレータのソフトウェアおよびハードウェアは平成5年度に行われた第1回目の実験²⁾に比べて以下の点で改良されている。

(1) ヘリコプタの数学モデル

① 飛行試験結果に基づく数学モデルの検証

平成6年1月に消火ヘリコプタの母機であるスーパーピューマのホバリング特性を調べる飛行試験が行われた⁴⁾。飛行試験結果との比較による数学モデルの検証を本報告書の第3.2章に示す。また、平成8年2月には消火システムを搭載した状態での飛行試験が行われた。この結果について第7章にまとめる。

② ロータ面内における風速の変化の考慮

ビル周辺の気流は空間的な変化率が大きいので、ヘリコプタのメインロータ（スーパーピューマの場合直径15.6m）内における風速の変化が機体の運動に影響を及ぼす可能性がある。今回開発されたメインロータの空力モデルでは、ブレードの各翼素ごとに異なった風速を入力することが可能になった。

③ エンジンモデルの組み込み

一般にタービンヘリコプタではロータの回転速度はガバナによってほぼ一定に保たれるため、通常のシミュレーションではエンジンの特性を考慮する必要はない。しかし消火ヘリコプタではエンジン故障時の安全性が問題視されているため、エンジンモデルを組み込んでシミュレーション実験を行った。ただし、火災現場周辺の温度上昇によるエンジン出力の低下についてはほぼ無視できることが実験および理論計算によって確認されている¹⁾ため、この影響は考慮されていない。

(2) ビル風モデル

前回のシミュレーション実験では、白色ノイズ+ローパスフィルタの形式のビル風モデルが用いられた。フィルタの特性はビル風の実測結果の周波数特性を再現するように設計されたが、場所による特性の違い（ビルの上、下）などは考慮されていなかった。今回の実験では次の3つのビル風モデルを新たに作成した。

① 風洞実験に基づくモデル

平成6年11月に実在のビル（東京芝浦のシーバンスツインビル）を模擬した風洞実験が行われた⁵⁾。この際に記録された風速の時歴データをそのまま用いて風モデルを作成した。

② 理論計算によるモデル

離散渦法を用いた理論計算に基づく風モデルを開発した。計算法の詳細については別報⁶⁾にまとめられている。このモデルではビル周辺の任意の場所における風速を実時間で計算できるため、火災現場への進入から離脱までを含めたミッション全体のシミュレーションが可能になった。

③ ステップ風

ビル風の実測結果および風洞実験結果の解析から、ビル風の特徴として、周期変動成分による乱気流的な性質と孤立突風の性質を併せ持つことが指摘された⁵⁾。特に後者は消火ヘリコプタの安全性に影響を及ぼす可能性があるため、これをステップ状の風速の変化に換算してその影響を調べた。

なお、上記①、③の風モデルでは風速は時間のみの関数として与えられており、機体の位置の変動による影響は考慮されていない。また、全ての風モデルにおいて水平面内の風速のみを考慮しており、鉛直風はゼロと仮定している。上記①、②、③の風モデルを用いたシミュレーション実験結果をそれぞれ第4、5、6章に示す。

(3) 飛行シミュレータ

平成6年度に導入されたドーム型ヘリコプタ用飛行シミュレータを用いた。視界模擬装置の向上により、ビルとの距離感などが改善されている。また、火災の火炎（図2.1）と放水流を視界に加えた。放水の軌跡は空気抵抗や風による影響、機体の運動の影響などを考慮して計算されている。また操縦桿は油圧式の舵力制御装置を備えており、パイロットの所見に従って実機の操縦感覚に近くなるようにこれを調整した。

(4) 放水操作卓

放水操作卓を実機に搭載予定のものの仕様に基づいて製作した（図2.2）。特に、前回の実験ではブームの角度の制御をON/OFF式のジョイスティック・コントローラで行ったため角速度の設定値が問題となっ

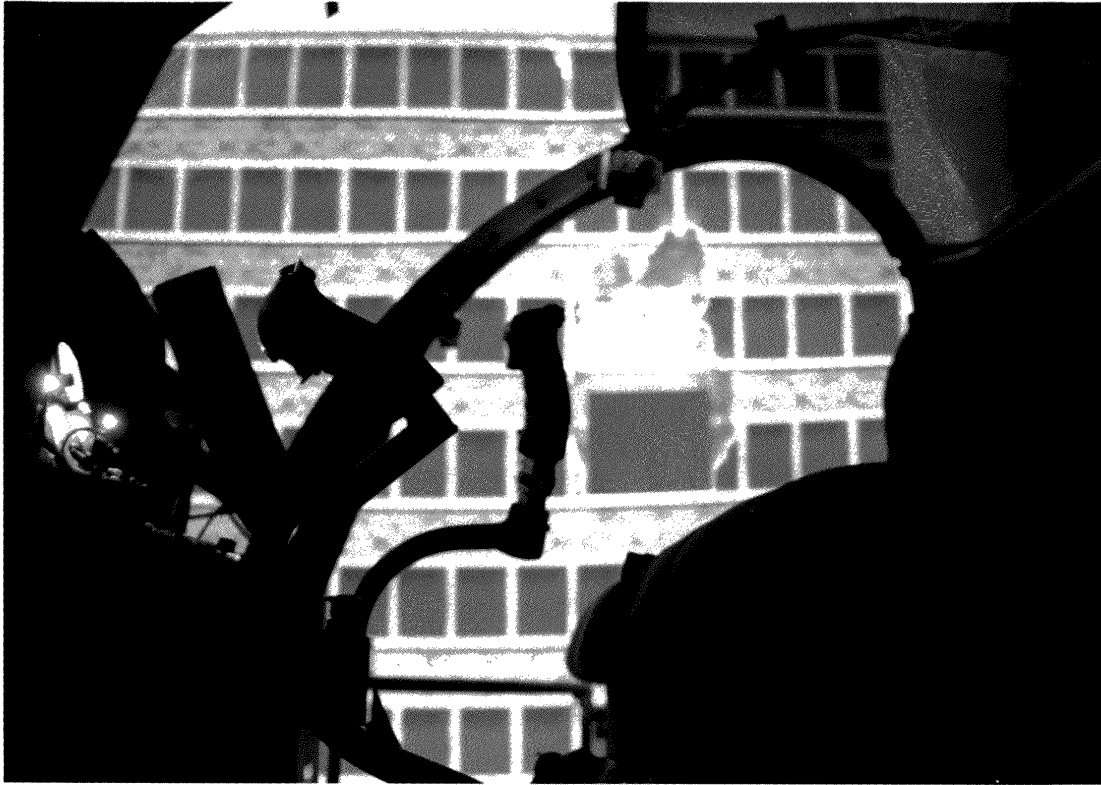


図 2.1 コックピット内部から見たビル火災の模擬視界



図 2.2 放水操作員用模擬視界と放水操作卓

たが²⁾、今回の実験ではアナログ式のコントローラ（感圧素子を用いたビープスイッチを親指で操作するタイプのもの）を採用したため、ブームの角速度は約7deg/sの範囲内で操作員が任意に制御できるようになった。

(5) 乗員

東京消防庁所属の、スーパーピューマについて十分な操縦経験を持つ3名のパイロットが実験を担当した。また、パイロット、コパイロット、放水操作員の3名を配置し、機内通信を模擬した装置によって互いに交信しながら消火活動を行った。

以上のように、今回整備されたシミュレーション環境では、前回の実験で指摘されたソフトウェアおよびハードウェア上の問題点についてはほぼ全面的に改善されており、消

火ヘリコプタの通常の作業範囲内で必要十分な模擬レベルが達成されている。

3. ヘリコプタの数学モデル

3.1 数学モデルの概要

ヘリコプタのメインロータに働く空気力はブレードの各翼素に働く空気力を数値的に積分して求めている。またブレードのフラッピング運動およびリードラグ運動は各ブレードの運動方程式をやはり数値的に積分して求めている。この計算法は、それぞれの積分を解析的に行う場合に比べてより多くの計算時間を必要とするが、ブレードの各翼素における風速を独立に入力できるという利点を持つ。離散渦法を用いた理論計算によるビル風モデルでは、ビル周辺の任意の点における風速を実時間で求めることができるた

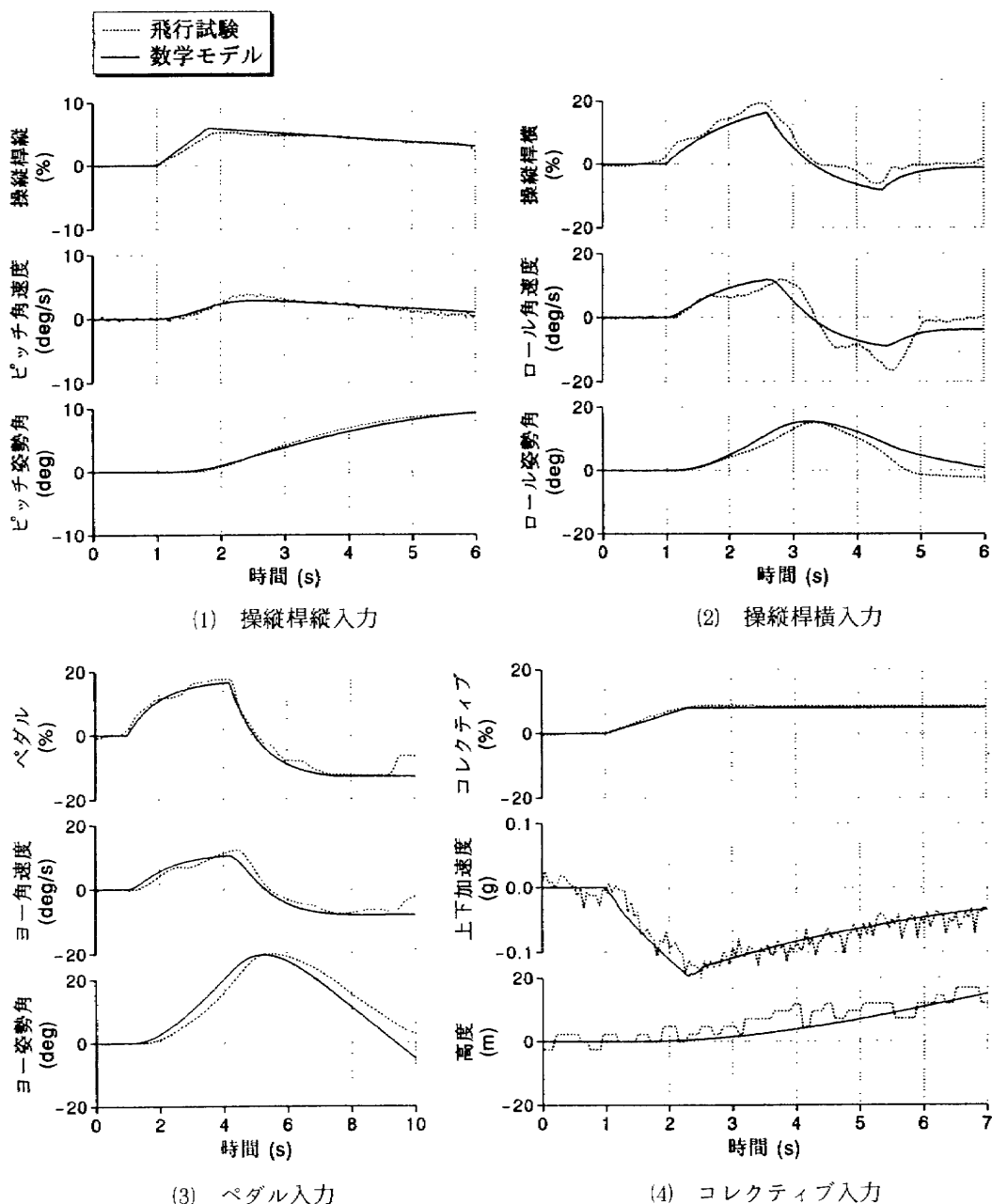


図 3.1 飛行試験結果との比較による数学モデルの検証

め、ロータ面内の5点(4枚の各ブレードの先端部分とロータの中心)で風速を計算し、これらを線形補間して各翼素における風速を定めた。この影響を考慮した場合としない場合(即ちロータ面内で風速を一様と仮定した場合)のシミュレーション実験結果の比較を第5.3章に示す。ただし、誘導速度は漏斗型分布を仮定して運動量理論から求めているため、個々の翼素における誘導速度には風速の変化による影響は反映されない。また、風洞実験結果を用いたビル風モデル(第4章)、およびステップ状の突風の場合(第6章)には常にロータ面内で風速を一様と仮定している。

なお、消火ヘリコプタの母機であるスーパーピューマは、ホバリングの際には、通常、自動安定化装置(Automatic Stabilization Equipment, ASE)を姿勢角保持モードにした状態で運用されている。シミュレーション実験においても、機体の運動の数学モデルおよび操縦桿のハードウェア的な機能とともに実機のASEを模擬するように設定した。フィードバック・ゲイン等の特性はユーロコプタ・フランス社から提供を受けた。

3.2 数学モデルの検証

数学モデルの検証のため、スーパーピューマのホバリング特性を調べる飛行試験を行った⁴⁾。ホバリングのトリム状態から様々な操舵入力を与えた時の機体の応答を慣性センサで測定して記録した。飛行試験結果と数学モデルによる計算結果(オフラインで行われたもの)の比較を図3.1に示す。図の(1)~(4)はそれぞれ操縦桿の縦、横、ペダル、およびコレクティブ・レバーに対する応答の時歴である。計算結果では飛行試験におけるパイロットの操舵をランプ状入力と1次遅れの組み合わせで模擬している。計算による機体の操舵応答は飛行試験結果と良く一致しており、数学モデルが実機の特性を精度良く模擬していることが検証された。

4. 風洞実験によるビル風を用いたシミュレーション

東京芝浦のシーバンスビル周辺の1/500模型を用いて風洞実験を行った⁵⁾。図4.1に風洞実験におけるビル風の測定点(今回のシミュレーション実験で用いたもの)を、また図4.2にそれぞれの測定点での風速の時歴を示す。一様流風速は消火ヘリコプタの運航目標である7m/sに設定されている。測定点1は剝離点であるビル角の後流で最も乱れが強く、測定点2は風上で乱れが弱い。測定点3は風下の死水領域で平均風速が小さく、また一様流に対して逆流している(W_x が正になっている)。シミュレーション実験では放水開始のタイミングはパイロットによって指示されるが、消火活動の時間はほぼ120秒であり、実験中はこ

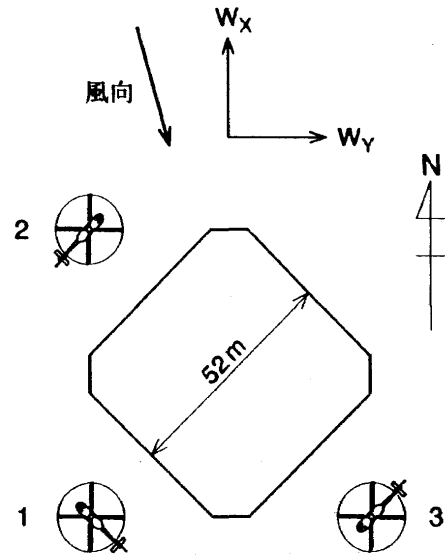


図4.1 風洞実験におけるビル風の測定点

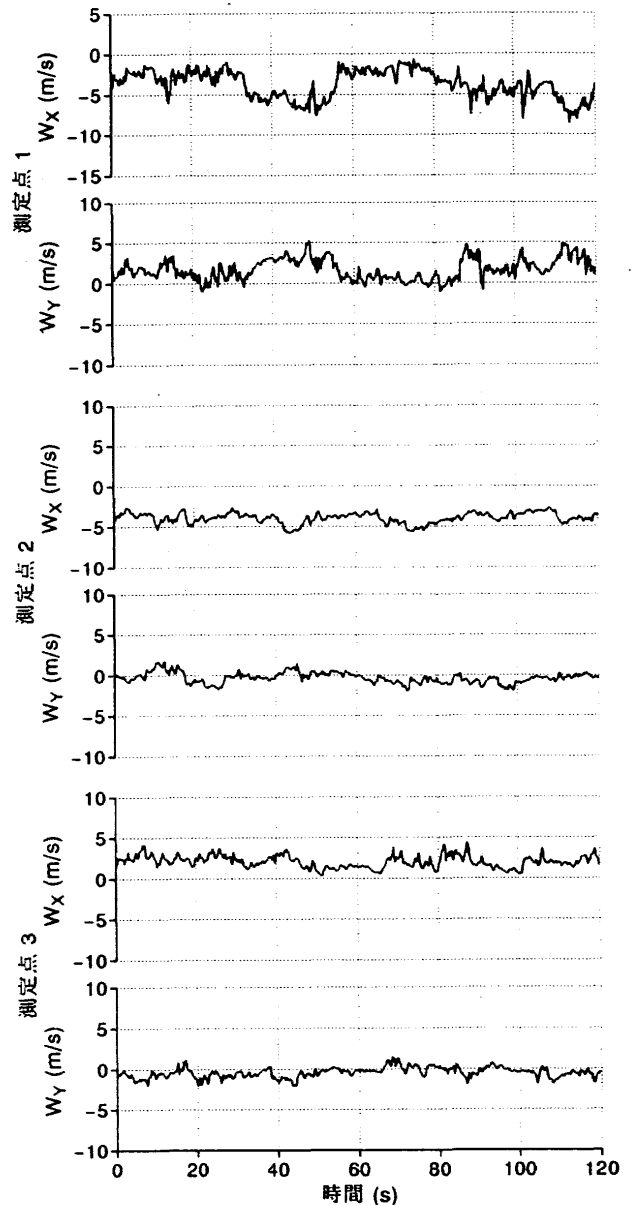


図4.2 風洞実験で記録された風速の時歴の例

ここに示した120秒分の風速データがエンドレスで再生されるため、どのタイミングで放水を開始しても風による影響はほぼ同じ程度と考えるがよい。

図4.3はシミュレーション実験結果の時歴の例である(測定点1, 風速7m/s)。図は上から順に地面固定座標系における風速(図4.1参照), 機体の姿勢角(方位角 Ψ はビルの壁面に平行な状態を0度としている), 機体の位置(目標点の正面が原点, ビルに近づく方向に Y_E が正), ブームの角度(機体に直角の方向が0度), 着水点の位置(目標点の正面が原点), およびコレクティブピッチ(実線)と消火水の残量(点線)である。実験の設定では, 目標点の正面から, 機首方位がビルと平行になる状態, 即ち機体から真右方向に目標点を見る状態で放水することが想定されているが, 機体の姿勢角と位置の時歴を見ると, 方位角 Ψ の平均値が左方向に約10度, 前後位置 X_E の平均値が後ろ

方向に約5mそれぞれ基準値から偏倚している様子が伺える。一方, 放水ブームの水平角度を見るとほぼ0度付近に保たれており, これらの結果から, 機首方位と前後の位置の偏倚は互いに相殺されて, 結果的に機体から見て常に真右方向に火点が捉えられていることが判る。また, 一番下の図では, 消火水の放出に伴って満載時に比べてコレクティブピッチを10%近く下げる必要があることが示されているが, パイロットの所見によればこれは通常の操作感覚で対処し得る範囲内という結論であった。

図4.4は3つの測定点でそれぞれ4つの風速(0, 4, 7, 10 m/s)で行われたシミュレーション実験結果で, 3軸方向の機体の位置と姿勢角の擾乱の最大値と自乗平均をまとめたものである。各結果は3人のパイロットがそれぞれ1回ずつ行った実験結果の平均値で示されている。機体のX(前後)方向の位置と姿勢角 Ψ の変動が他に比べて大きくなっ

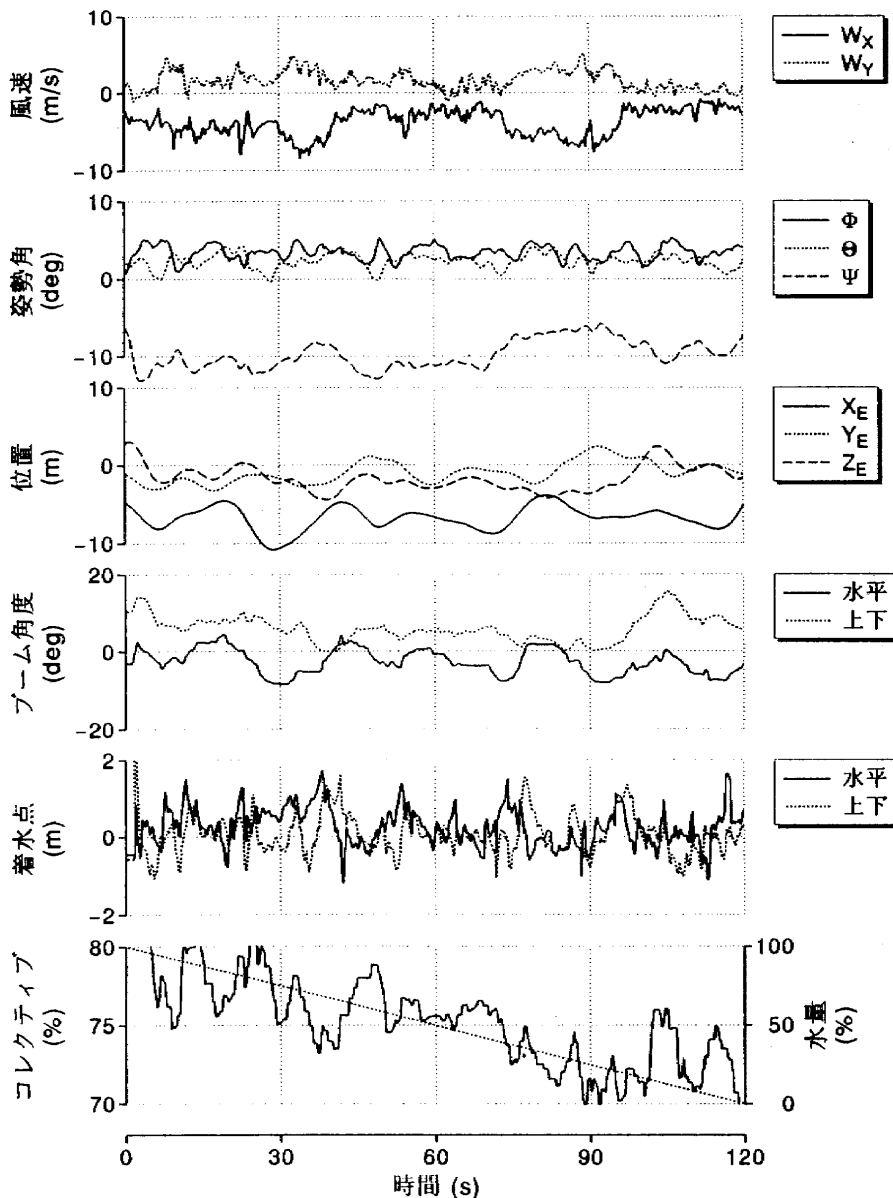


図4.3 シミュレーション実験結果の時歴の例

ているが、これは前述のように目標点を捕捉する際にこの2つの運動がカップリングして現れるためである。シミュレータでは位置の情報がパイロットに十分に伝わらないことも一因ではあるが、飛行試験結果からも同様の現象が見

られることが報告されており²⁾、コパイロットが適切なタイミングで方位計の指示を読み上げることが消火効率、安全性の両面で重要になる。

図4.5は同じ実験結果で、2分間の放水時間中、着水点

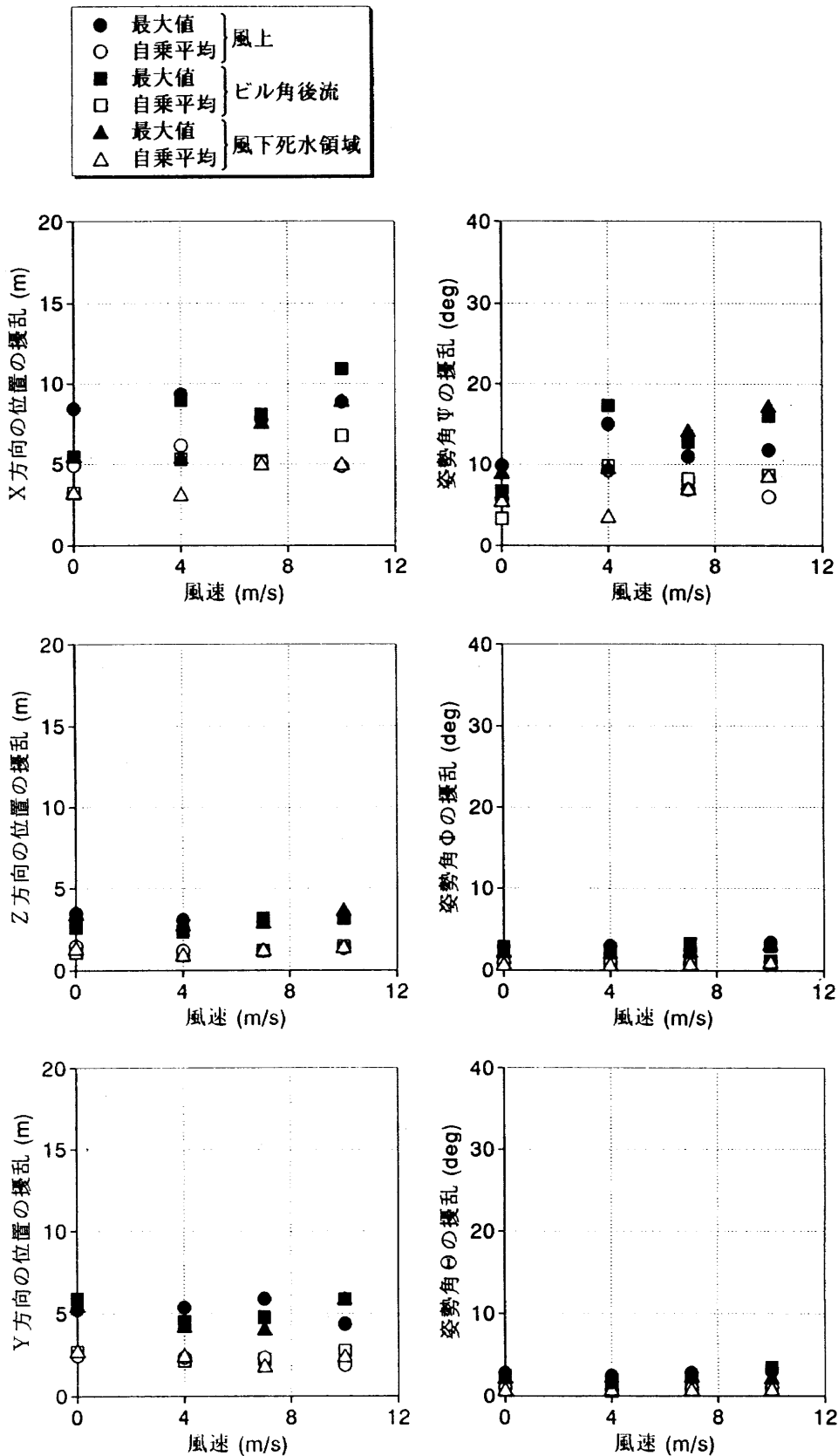


図4.4 位置と姿勢角の擾乱（風洞実験によるビル風）

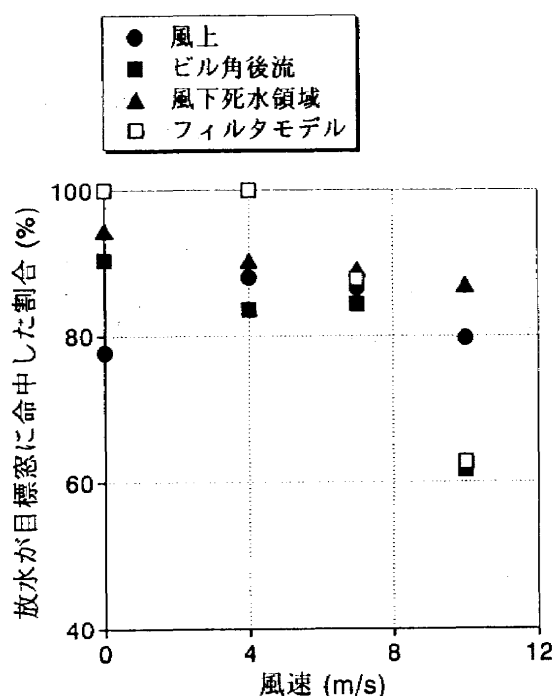


図4.5 風速による命中率の変化
(風洞実験によるビル風)

が目標窓内に命中していた割合を示したものである。目標窓の大きさは 2×2 mを想定している。□印は白色ノイズ+ローパスフィルタの形式のビル風モデルを用いた第1回目のシミュレーション実験結果²⁾で、今回の実験結果のビル角後流の場合(■印)と比較的近い値を示している。全ての実験結果において、消火ヘリコプタの運航目標である風速7m/s以下では、風上、風下に関わらず80%以上の命中率が確保できることが示されている。

5. 理論計算によるビル風を用いたシミュレーション

5.1 ビル風モデルの検証

図5.1に離散渦法を用いた理論計算によって求められたシーバンスビル周辺の風速の時歴の例を示す。測定点の位置および一樣流風速は第4章に示した風洞実験結果と同様である。測定点1(ビル角後流)では周期20秒以上の大きな変動が見られ、測定点2(風上)では変動が小さく、また測定点3(死水領域)では風速の絶対値が小さい。このように計算結果は風洞実験結果(図4.2)に見られたビル風の特徴を良く再現している。反面、全ての測定点において、風洞実験で見られた比較的短周期(2秒以下程度)の変動が計算では現れていない。この周波数域の乱れは、ビルの影響によるものではなく、市街地の乱流境界層に含まれる成分と思われる(詳細は文献⁶⁾参照)。消火ヘリコプタの機体の固有運動の周期は数秒~十数秒程度であり、このような短周期の成分は今回の実験の目的には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

図5.2は同じ理論計算によるビル周辺の気流の様子を示したものである。矢印は各点での平均風速と風向を、また楕円はX-Y方向の風速の標準偏差を表している。斜線で示したのは風の乱れが最も強かった点で、乱れの強さ(σ)は3.0m/sに達している。この計算法により、ビル周辺の任意の点における風速を実時間で計算できるため、ロータ面内の風速の変化による影響を考慮できるとともに、火災現場への進入から離脱までを含めた消火ヘリコプタのミッション全体のシミュレーションが可能になった。

5.2 仮想ビルでのシミュレーション結果

前節図5.1, 5.2に示された計算結果は、風洞実験結果との比較のため実際のシーバンスビルの形状(1辺約52m, 高さ約100m)に合わせて行われたものである。一般にあまり細長くないビルでは3次元性の影響によってカルマン渦が発生しにくくなるため後流の乱れは小さくなる。これに対し、図5.3, 5.4は同じ条件の下でビルの高さを無限大と仮定して2次元の計算を行った場合の結果を示したものである。図5.4中斜線で示したのは最も乱れの強かった点で、乱れの強さ(σ)は4.5m/sに達しており、3次元性を考慮した場合(図5.2)に比べて約50%大きくなっている。遭遇し得る最も強いビル風として、ここに示した2次元の計算結果を用いて消火活動のシミュレーション実験を行った。

図5.5, 5.6はそれぞれ上記のビル風に対して機体の位置と姿勢角の擾乱の最大値と自乗平均、および放水の命中率を示したものである。風洞実験によるビル風を用いたシミュレーション実験結果(図4.4, 4.5)に比べて機体の変動が大きく、また命中率も低くなっている。特にビル角後流では、風速7m/sで命中率が60%程度に低下している。実際のビルでは3次元性や他の建物の影響によってカルマン渦は発生しにくくなるため乱れは小さくなると思われるが、孤立した細長いビル(例えば横浜ランドマークタワーなど)の風下ではここに示したような強い乱れが発生する可能性があるため、更なる検討が必要である。

図5.7は火災現場への進入から離脱までを含めたシミュレーション実験における飛行軌跡を示したものである。進入経路は点線で、消火活動中は実線で、離脱経路は破線で示されている。このケースでは離脱中にビル後流の乱れの強い領域(図5.4参照)を通過し、その間平均風も機体右後方からの追い風、死水領域、弱い向かい風、再び追い風と激しく変動している。

図5.8はこの間の各状態量の時歴を示したものである。風速の時歴は機体軸系で示されている。 U_w は追い風が正である。風速の変化はほぼ上述の通りであるが、パイロットの所見によれば特に操縦の困難は感じられないという結果であった。

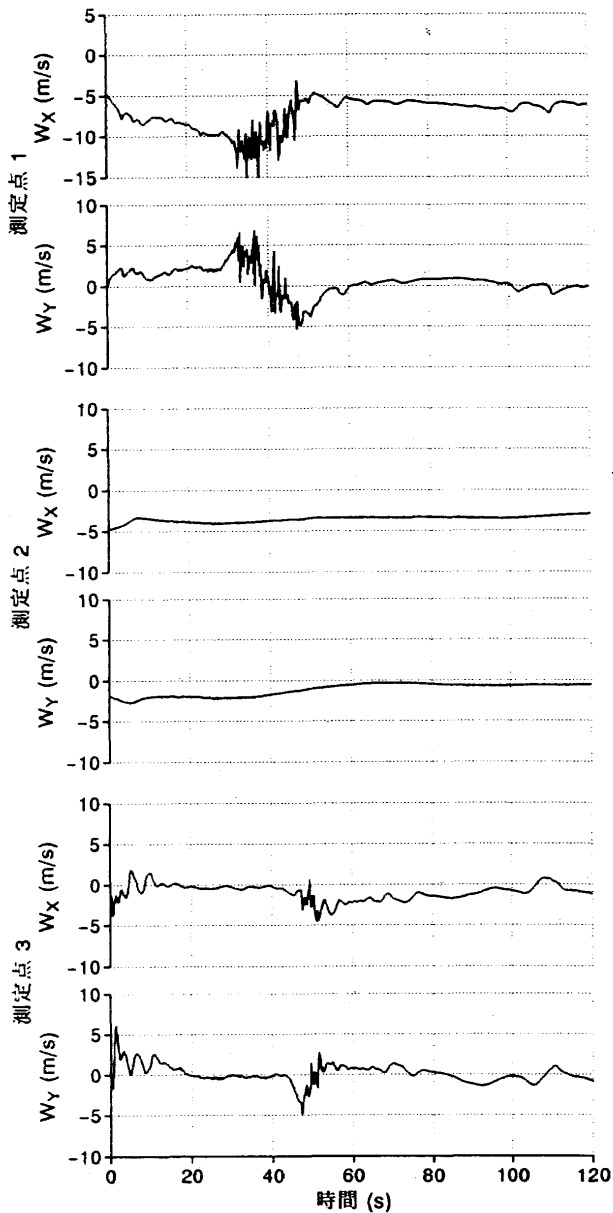


図 5.1 理論計算によるシーバンスビル周辺の風速の時歴

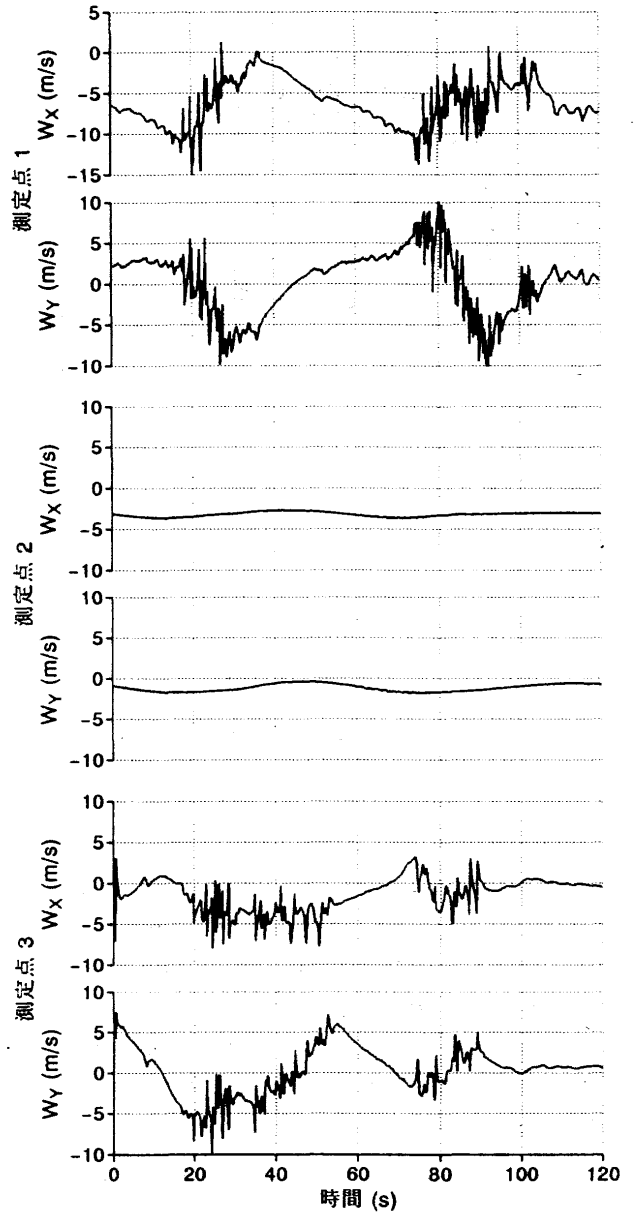


図 5.3 理論計算による2次元ビル周辺の風速の時歴

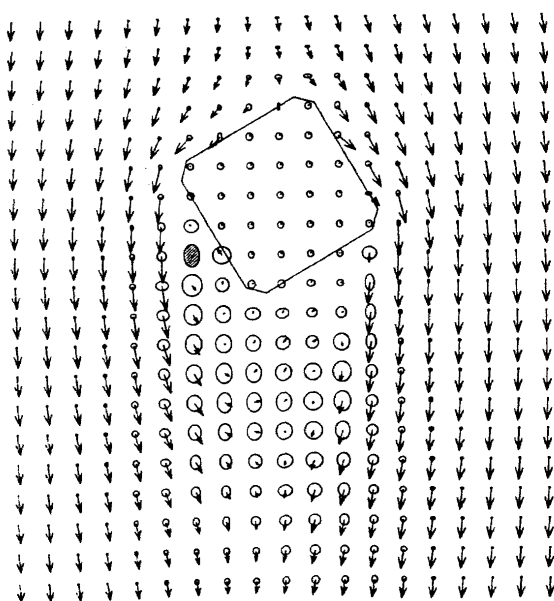


図 5.2 理論計算によるシーバンスビル周辺の気流の様子

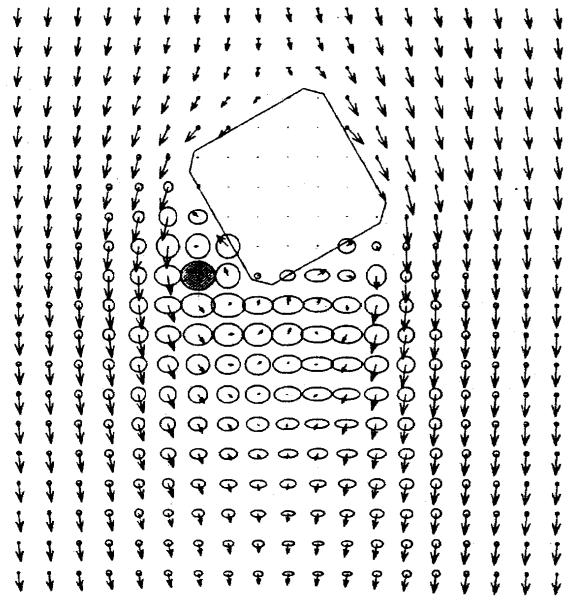


図 5.4 理論計算による2次元ビル周辺の気流の様子

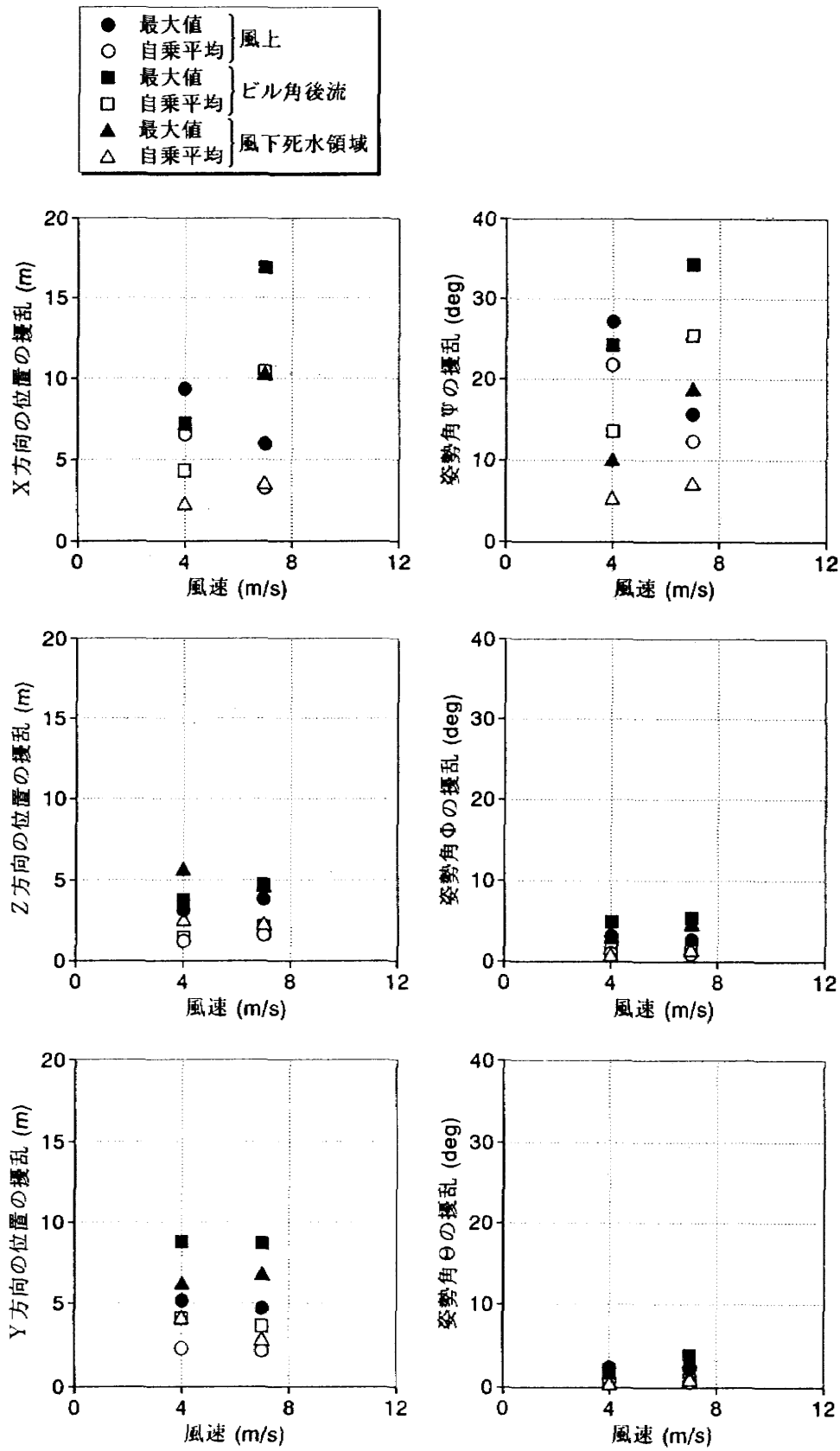


図5.5 位置と姿勢角の擾乱（理論計算によるビル風）

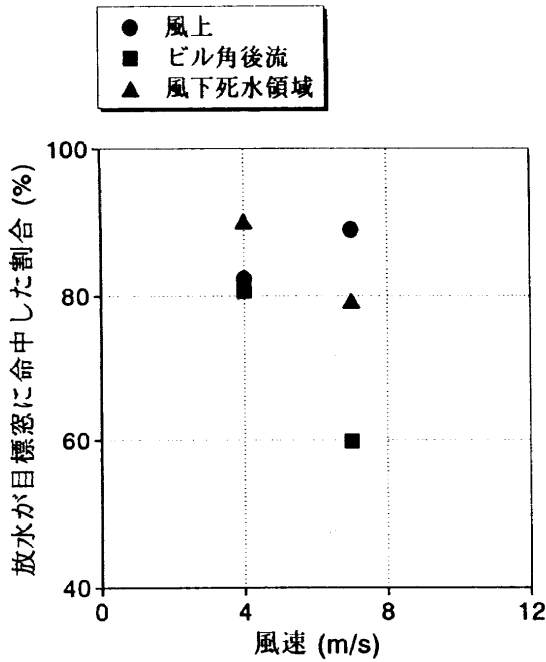


図 5.6 風速による命中率の変化 (理論計算によるビル風)

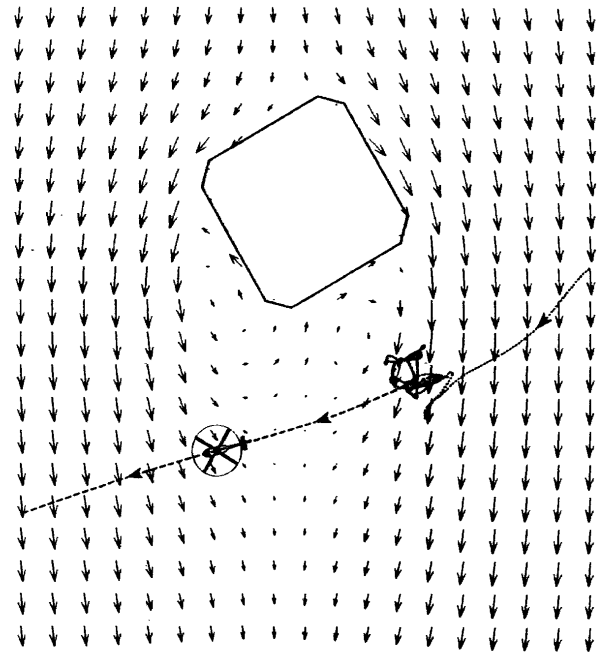


図 5.7 ビル周辺の気流と飛行軌跡

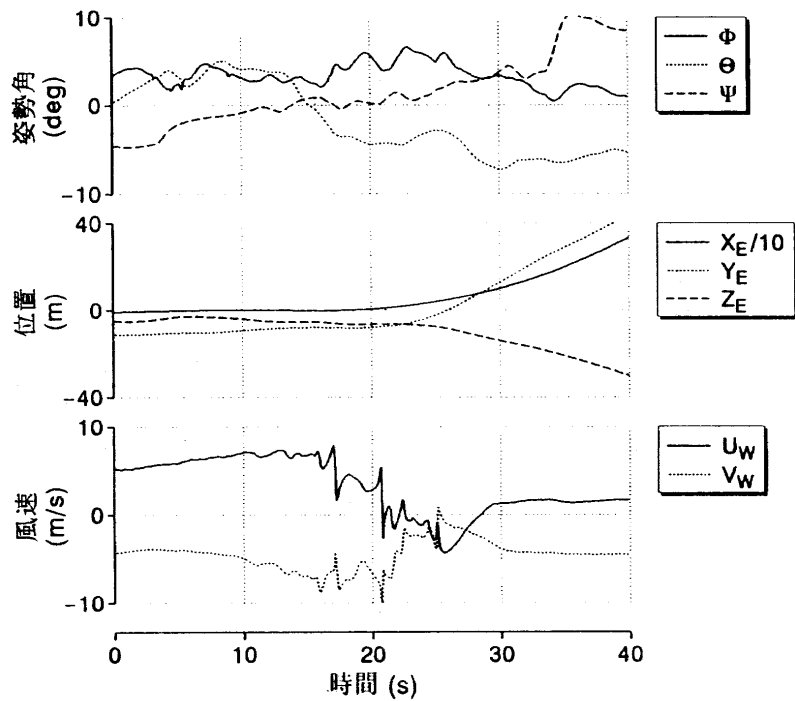
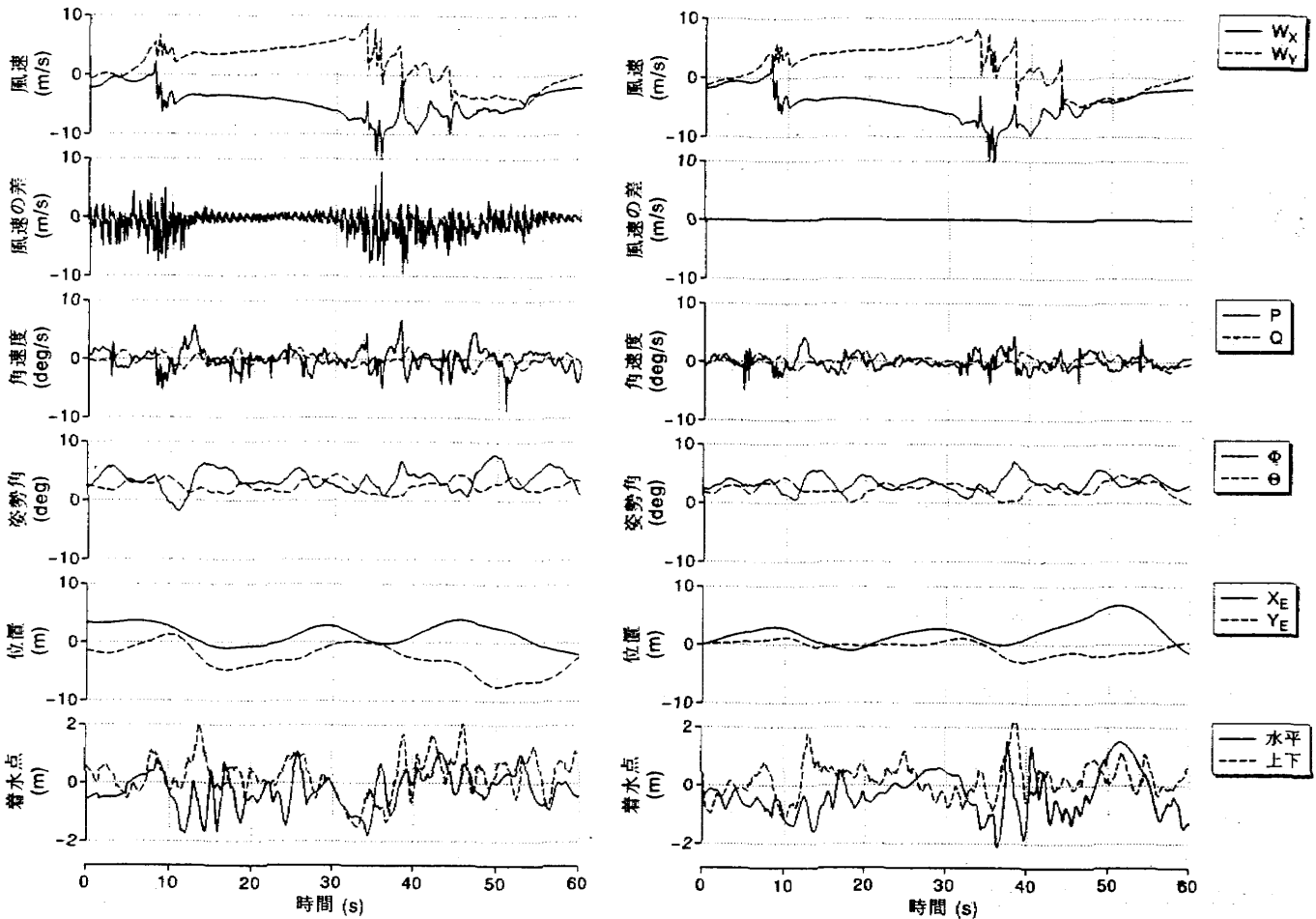


図 5.8 ビル後流の離脱経路上での状態量の時歴

5.3 ロータ面内の風速の変化による影響

ビル周辺では風速の空間的な変化率が大きいため、ロータ面内における風速の変化が機体の運動に影響を及ぼす可能性がある。図 5.9 (1), (2) はそれぞれロータ面内における風速の変化を考慮した場合としない場合 (即ちロータ面内で風速を一様と仮定した場合) についてのシミュレーション実験結果を比較したものである (風速 7m/s, 測定点 1)。一番上の図はロータの中心における風速を表している。こ

の 2 つのケースは同じ初期条件で行われており、その後の機体の位置の変動が異なるため風速の時歴は厳密には等しくないものの、ほぼ同じ風速を受けていると考えて良い。これに対し、上から 2 番目の図はロータの中心と 1 本のブレードの先端部分 (この機体のブレードの長さは 7.8m) における風速の差を表したものである。図 (2) に示した例ではこの差は常にゼロであるのに対し、図 (1) に示した例では特に時間 8 秒前後と 35 秒前後でこの差は大きくなり、最大



(1) ロータ面内の風速の変化を考慮した場合

(2) ロータ面内で風速を一様と仮定した場合

図 5.9 ロータ面内の風速の変化を考慮した場合としない場合の比較

10m/sに達している。この影響は特に機体の姿勢角の擾乱に現れており、時間10秒前後と38秒前後で角速度の変動が大きくなっている。ただし、ここに示した60秒間における放水の目標窓への命中率を比較すると、図(1)で75%、図(2)で71%であった。従って、ロータ面内の風速の変化による影響は、機体の角速度などには若干の影響を及ぼすものの、命中率に有意な差となって現れる程ではないと結論される。従来当研究所で行われた理論解析やシミュレーション実験²⁾ではロータ面内で風速が一様と仮定されていたが、これらの結果の妥当性は損なわれないことが確認された。

6. ビル風に対する安全基準

ビル風の実測結果および風洞実験結果の解析から、ビル風の特徴として連続的な乱気流としての性質と孤立突風の性質を併せ持つことが指摘された⁵⁾。このうち前者は消火の効率、即ち放水の目標窓への命中率などには影響を及ぼすが、安全性、特にビルに異常接近する可能性に対しては後者の方が影響が大きいと考えられる。ここではビル風に対する安全基準を策定するため、ビル風の持つ孤立突風の性質をステップ状の風速の変化に換算してその影響を

調べた。

風洞実験結果の解析から、ステップ状の風速の変化に相当する突風の最大値は乱れの強さの3倍(3σ)にほぼ等しいことが示されており⁵⁾、また第5.2章に示した2次元の理論計算によるビル後流の乱れの強さ(σ)の最大値は4.5m/sであった。従って、一様流風速が7m/sの場合、遭遇し得るステップ状の風速の変化の最大値は13.5m/s以下と想定される。実験では風速を5, 10, 15m/sと設定し、また風向は機体の正面、および左側方(ビルに向かう方向)からの2通りを考慮した。突風は消火活動中に適当なタイミングでパイロットには伝えずに発生させた。突風に遭遇した後消火活動を続けるかどうかはパイロットの判断に任せた。

図6.1はステップ状の突風に対するシミュレーション実験結果の例である(風速10m/s, 横風)。このケースでは、突風印加の前後で比較して、機体は右方向(ビルに接近する方向)に最大約10m変動している。前後方向には10m以上変動しているが、ここではビルに接近する方向のみを評価の対象とした。

図6.2はステップ状の突風に対する機体の位置の変動の最大値をまとめたものである。風速10m/sと15m/sを比較

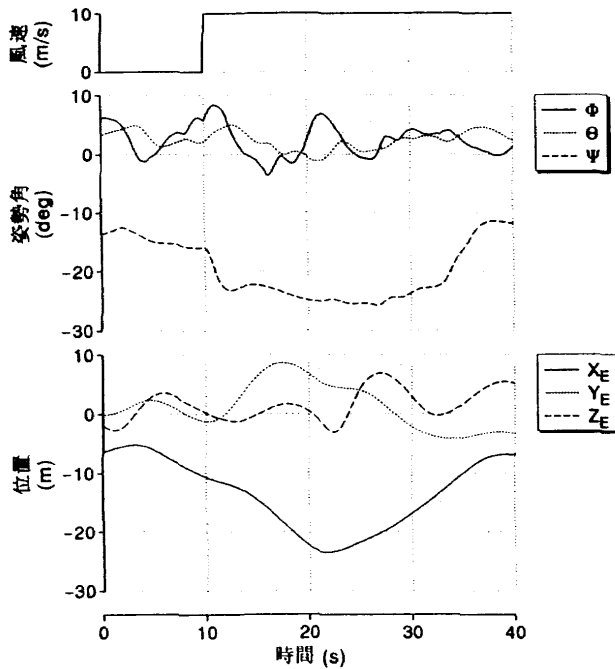


図 6.1 ステップ状の突風に対する応答の例

した場合、むしろ後者の方が変動距離が小さくなっているが、これは風速10m/sの場合にはパイロットは消火活動を続けようとして着水点あまり変動しないように操縦したのに対し、15m/sの場合には消火を断念して安全性の確保に専念したためである。

以上の結果、および図 4.4、5.5 に示した実験結果を総合すると、ビル風の影響によって機体の位置は最大10m程度変動する可能性がある結論付けられる。従って、消火ヘリコプタの安全基準として、ビルへの接近限界を10m（放水ブームの先端からビルまでの垂直距離）と定めるのが適当と思われる。消火活動中に万一安全限界以内に近づいた場合には、放水が目標点からはずれることを顧みず、直ちに所定の距離（20m）まで待避することが望ましい。また、15m程度まで近付いた時に何らかの警報を出す（例えばランプを点灯する、警報音を出すなど）ことが安全性確保の面で有効と思われる。最終的な安全基準と警報装置の詳細などについては、今後実機による試験運用の結果を踏まえて確定される予定である。

7. 飛行試験結果との比較

7.1 飛行試験の概要

平成8年2月に消火ヘリコプタの飛行試験が行われた（図 7.1）。今回行われた試験は消火システムの作動確認が主な目的であり、実際の消火活動の模擬等は行われていない。

機内に計測装置（図 7.2）を搭載して以下の項目について記録することとした。

- (1) 機体の3軸の姿勢角、角速度、加速度

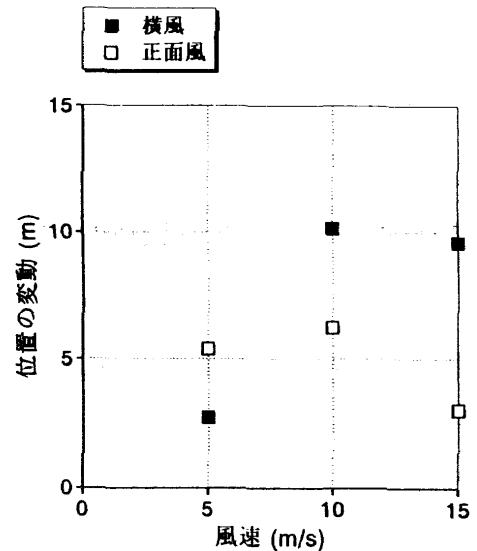


図 6.2 ステップ状の突風に対する機体の位置の変動の最大値

- (2) 放水ブームの角度（水平、上下）
- (3) 放水ブームの角速度（水平、上下）の制御電圧
- (4) 放水および投棄スイッチの作動状態
- (5) 消火水の残量
- (6) ビルとの距離

ただし(4)、(5)については計測システムの不具合のため記録できなかった。また(6)については今回の試験では作動確認は行われなかった。

7.2 飛行試験結果

図 7.3 に計測結果の例を示す。図は上からブーム水平角度（ここでは機首方向を0度としている）、ブーム上下角度（水平が0度）、ブーム水平角速度制御電圧（実線）と角速度（点線）、ブーム上下角速度制御電圧（実線）と角速度（点線）、および機体の3軸の姿勢角、角速度、加速度である。ブームの角速度は角度の計測値を数値的に微分して求めたものである。この例では地上5m付近でホバリング中に右側のブームを90度に展開、約10度上に向けて約20秒間放水し（図 7.1 参照）、終了後ブームを格納している。放水の目標点は特に設定されていない。また、実験中風はほとんど感じられない程度であった。放水の反力による横加速度は、計算では0.01g程度であり、通常受ける外乱に比べても十分に小さいため、加速度データ（ a_y ）からは識別できない。またパイロットの所見でも反力による影響は特に感じられないという結果であった。

記録されたデータから放水中の機体の運動の擾乱を求めると表 7.1 のようになる。実際の消火活動では機体の重心から火点まで約30mと想定されているため、姿勢角の1度の変動は着水点の約0.5mの変動に相当するが、今回計測された程度に機体が安定していれば問題なく放水を火点



図7.1 消火ヘリコプタの飛行試験

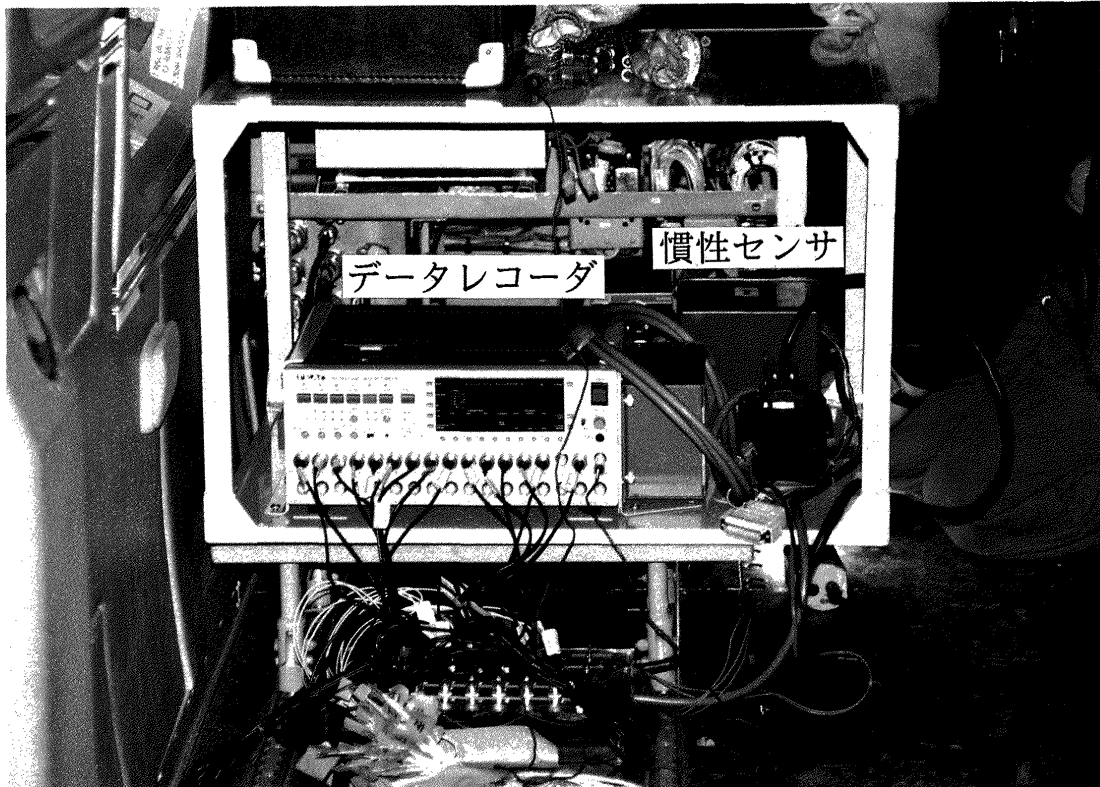


図7.2 機体に搭載された計測装置

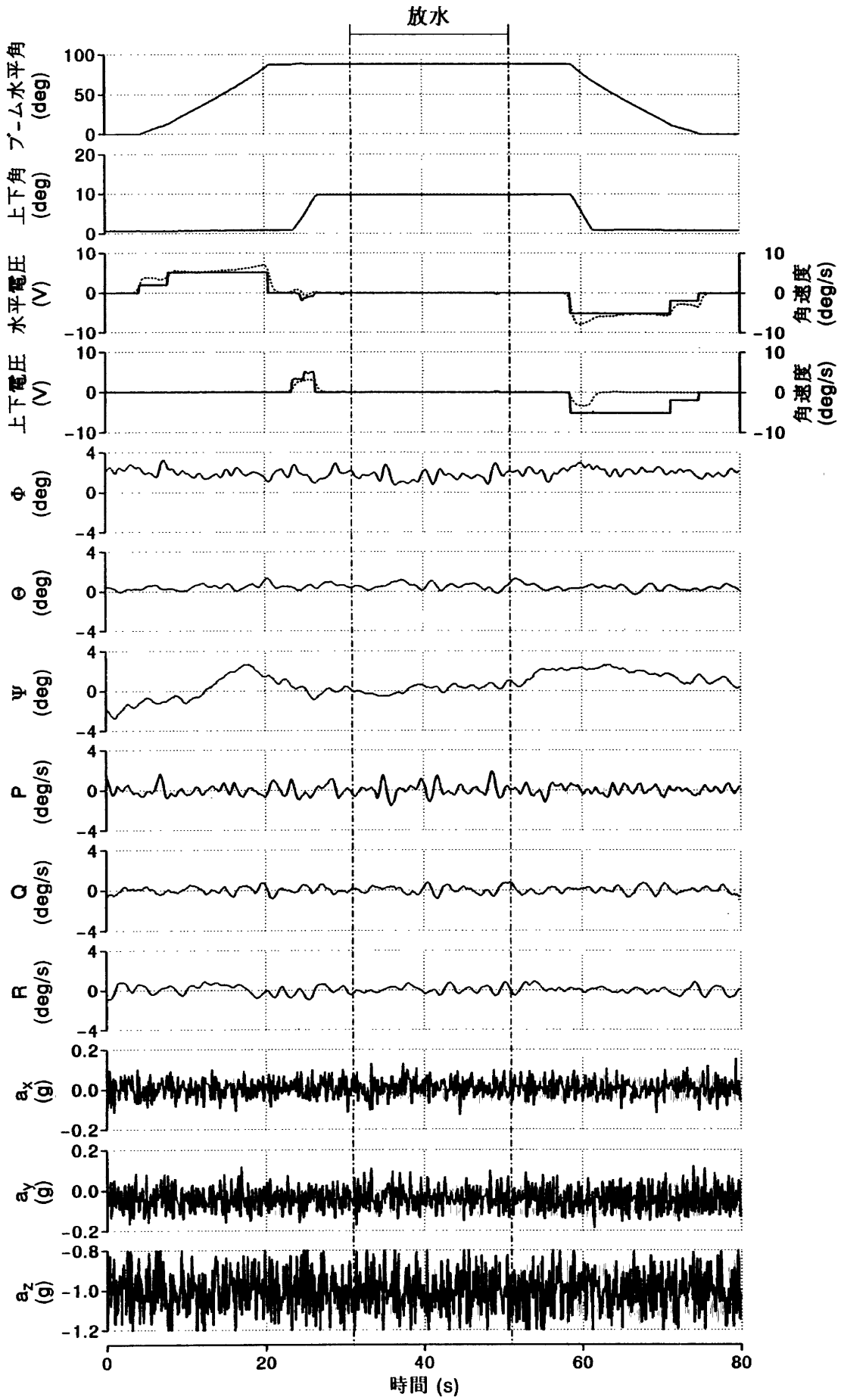


図7.3 飛行試験による放水中の機体の運動の時歴

表 7.1 放水中の機体運動の擾乱

	Φ (deg)	Θ (deg)	Ψ (deg)	P (deg/s)	Q (deg/s)	R (deg/s)	a_x (g)	a_y (g)	a_z (g)
最大値	1.29	0.73	0.88	1.87	0.87	0.75	0.14	0.15	0.26
自乗平均	0.49	0.31	0.40	0.65	0.37	0.32	0.05	0.05	0.11

に命中できるものと思われる。目視による観測でも放水の揺れはほとんど認められなかった。一方、シミュレーション実験において無風状態で記録された機体の擾乱量(図4.4参照)は飛行試験結果に比べてやや大きくなっている。ただし、シミュレーション実験結果は地上高度約200mでビルの近傍でホバリングを行った場合のものであり、直接には比較できない。今後実機の試験運用が開始されれば、実際にビルの近傍で目標点を定めて放水した場合のデータを取得できるものと思われる。

図7.4は放水ブームの展開時の動きをシミュレーション実験結果と比較したものである。実機ではアクチュエータの取り付け位置の関係で水平方向に展開中のブームの角速度は一定にはならないが、放水が行われる水平角度90度付近では角速度は約7deg/sであり、シミュレーション実験における設定値とほぼ一致している。この結果から、消火活動中のブームの動作についてもシミュレーションモデルは実機をほぼ模擬していると考えて良い。

8. おわりに

今回の実験で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 飛行試験結果との比較、およびパイロットの所見により、本実験で用いたシミュレーション環境が消火ヘリコプタの主要な作業の範囲内で必要十分な模擬性能を有することが確認された。
- (2) 実在のビル(東京芝浦のシーバンスビル)を模擬した風洞実験に基づくビル風を用いたシミュレーション実験では、消火ヘリコプタの運航目標である風速7m/sにおいて、ビルの風上、風下に関わらず目標窓(2×2m)への放水の命中率は80%以上を確保できることが確認された。
- (3) 離散渦法によって計算されたシーバンスビル周辺の気流は、風洞実験で見られたビル風の特徴をよく再現していた。この計算手法により、ビル周辺の任意の場所、時間における風速を実時間で計算できるため、火災現場への進入から離脱までを含めた消火ヘリコプタのミッション全体のシミュレーションが可能になるとともに、ロータ面内における風速の変化を考慮できるようになった。

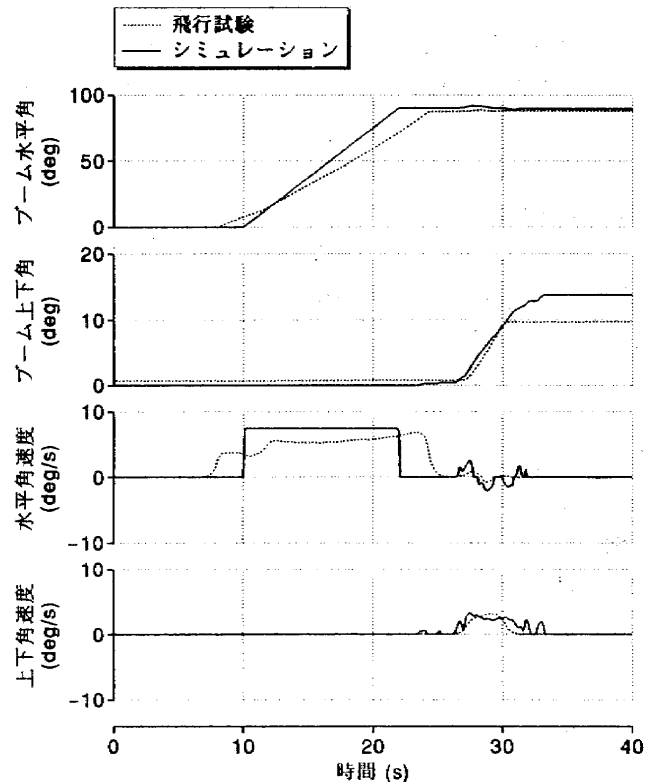


図 7.4 飛行試験とシミュレーション実験による放水ブームの動作の比較

- (4) 火災現場への進入中および離脱中にビル風下の風速の変動の激しい領域を通過する際にも機体の操縦性・安定性に問題はなかった。
- (5) 無限に高い(2次元の)ビルを想定した理論計算では、カルマン渦の発生によって後流に強い乱れが生じる。このビル風を用いたシミュレーション実験では、風速7m/sで命中率が60%程度に低下した。実際のビルでは3次元性や他の建物の影響によってカルマン渦は発生しにくくなるため乱れは小さくなると思われるが、孤立した細長い高層ビルの風下で消火活動を行う場合については更なる検討が必要である。
- (6) 想定される最大の突風から、ビルへの接近限界を10mと策定した。これに基づき、15m程度に接近した場合に何らかの警報を出すことが安全性確保の面で有効と思われる。

今回のシミュレーション実験により、消火ヘリコプタが

概ね所期の目標性能を達成し得ることが確認された。平成8年度には実機の試験運用が開始されるが、今後も飛行シミュレータは安全限界の策定や乗員訓練の目的で有効な手段となるであろう。

今後の展望

平成7年度に開発された消火ヘリコプタでは、システムの簡素化のため、放水ブームを全て手動で制御する仕様となっている。今回のシミュレーション実験から、このシステムによって所期の目標性能が達成される見込みであるが、消火性能をより向上する手段の一つとして、放水ブームを自動制御にすることが考えられる。機体の姿勢角や加速度などの情報を放水ブームのアクチュエータにフィードバックすることにより、乱れた風の中でも放水の方向を安定できる可能性がある。平成8年度に行われる試験運用の結果を踏まえて今後その必要性を検討して行きたい。

謝 辞

本研究は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」の一環として行われたものであり、シミュレーション実験に際して東京消防庁航空隊の津田飛行副隊長はじめ関係各位に多大なる御協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

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，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.
- 3) 船引浩平，奥野善則，村岡浩治，若色 薫；ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験—その3 消火ヘリコプタの運用シミュレーション—，航空宇宙技術研究所報告 TR（発刊予定）.
- 4) 原田正志，齊藤 茂，奥野善則；ヘリコプタの動特性測定飛行試験，航空宇宙技術研究所資料 TM（発刊予定）.
- 5) 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—消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験—，航空宇宙技術研究所資料 TM-685，1995.
- 6) 原田正志，奥野善則；ヘリコプタ飛行シミュレータのためのビル風モデル，航空宇宙技術研究所報告 TR（発刊予定）.

航空宇宙技術研究所報告1293号

平成8年6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