

消防研究所研究資料第45号

市街地火災時における空中消火の
延焼阻止効果に関する研究報告書

平成 11 年 3 月

自治省消防庁消防研究所



写真1 水の投下状況（第1実験）

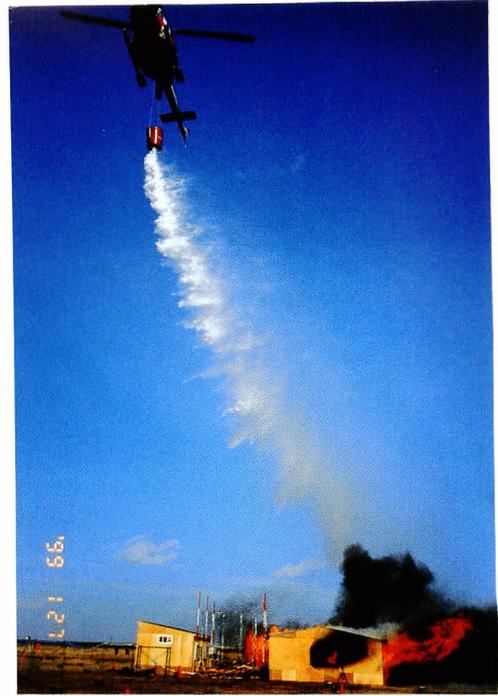


写真2 水の投下状況（第2実験）



写真3 水の投下状況（第3実験その1）

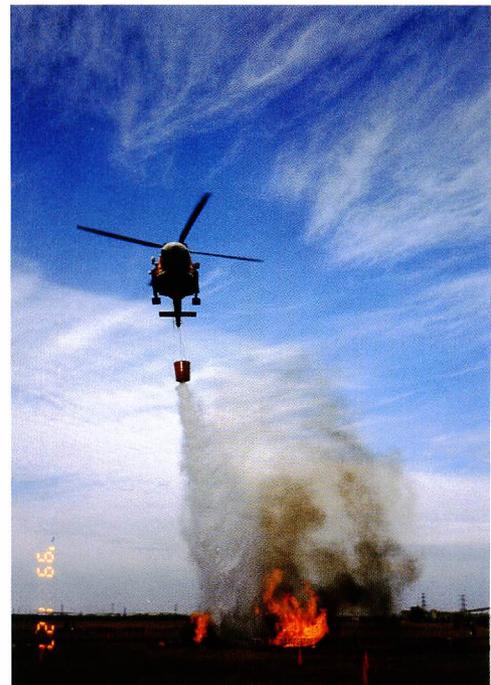


写真4 水の投下状況（第3実験その2）



写真5 実験に使った木材クリブ（第3実験その1）

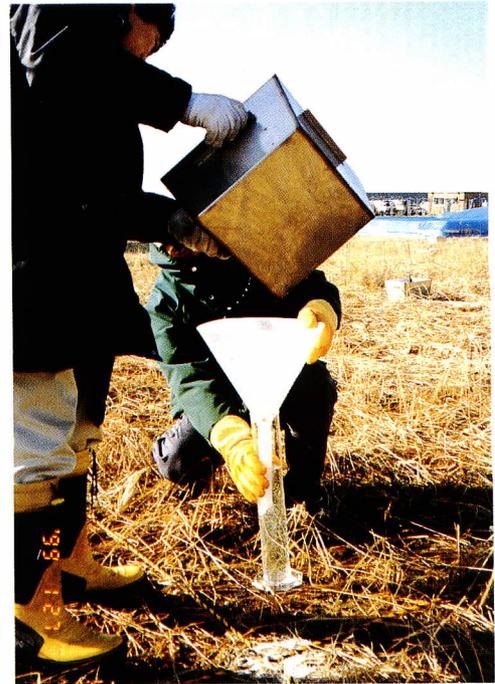


写真6 散水マスを使って散布密度の測定状況



写真7 大型水槽車を使ってバケツに給水

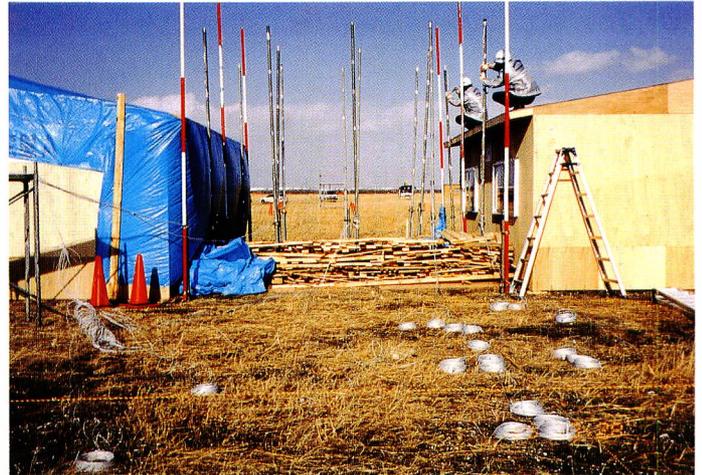


写真8 家屋AとA'間の可燃物状況

市街地火災時における 空中消火の延焼阻止効果に関する研究報告書

(目次)

第1章 研究概要	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 実験の概要	1
1. 2. 1 実験実施時期と場所	1
1. 2. 2 実験の実施機関	1
1. 2. 3 実験実施時の気象条件	1
1. 2. 4 出動ヘリコプター	2
1. 2. 5 実験実施体制	2
1. 3 実験方法	2
1. 3. 1 第1実験(対象家屋への命中度の観測)	2
1. 3. 2 第2実験(家屋間の延焼阻止効果の観測)	2
1. 3. 3 第3実験(飛び火火災に対する火勢抑止効果の観測)	3
1. 3. 4 水の投下記録	4
1. 4 各実験毎の観測項目	6
第2章 ヘリコプターの飛行高度と飛行速度	7
2. 1 高度と速度の測定	7
2. 2 結果	9
2. 3 結論	10
第3章 後流(ダウンウォッシュ)の測定	12
3. 1 測定方法	12
3. 2 結果	12
3. 3 結論	14
第4章 ヘリコプターからの投下水の落下拡散性状	16
4. 1 はじめに	16
4. 2 投下水の画像解析方法	16
4. 3 画像解析結果	17
4. 3. 1 第1実験-No.2放水実験	17
4. 3. 2 第1実験-No.4放水実験	17
4. 3. 3 第1実験-No.6放水実験	37

4. 3. 4	第2実験-No.1放水実験	37
4. 3. 5	画像解析結果のまとめ	37
4. 4	シミュレーション	57
4. 4. 1	シミュレーションの方法	57
4. 4. 2	シミュレーション結果	58
4. 4. 3	まとめ	58
第5章	水の拡散範囲と散布密度	63
5. 1	はじめに	63
5. 2	観測方法	63
5. 3	観測結果	63
5. 3. 1	第1実験の散布範囲	63
5. 3. 2	第2実験の散布範囲	64
5. 3. 3	第3実験の散布範囲	69
5. 4	考察	69
5. 5	まとめ	69
第6章	火災性状と家屋間における気流温度分布	73
6. 1	はじめに	73
6. 2	実験条件と観測方法	73
6. 2. 1	燃焼状況の観測	73
6. 2. 2	熱電対の設置箇所	73
6. 3	観測結果	74
6. 3. 1	点火後の火災拡大	74
6. 3. 2	廃材を媒体とした延焼拡大	75
6. 3. 3	気流温度	75
6. 4	考察	76
6. 5	まとめ	79
第7章	放射照度及び外壁表面温度からみた火災抑止効果	80
7. 1	はじめに	80
7. 2	放射計の配置	80
7. 3	結果及び考察	80
7. 3. 1	放射照度の測定結果	80
7. 3. 2	散布による放射照度の減少	84
7. 3. 3	散布後の放射照度の時間変化	85
7. 3. 4	放射照度の実測値と計算結果の比較	86
7. 3. 5	熱画像測定結果	87
7. 4	まとめ	95

第8章 家屋間延焼阻止効果及び飛び火火災の火災抑止効果	97
8. 1 はじめに	97
8. 2 分析方法	97
8. 3 結果及び検討	97
8. 3. 1 風上への延焼阻止効果	97
8. 3. 2 飛び火火災への火災抑止効果	103
8. 3. 2. 1 90cm角規模の飛び火火災	103
8. 3. 2. 2 7.3m角規模の飛び火火災	105
8. 4 まとめ	106
第9章 考察及びまとめ	124
9. 1 空中消火の効果を左右する要因	124
9. 2 実験結果のまとめ	129
付属資料	135

市街地火災におけるする空中消火の延焼阻止効果に関する研究

第1章 研究概要

1. 1 研究目的

大震災時においては建物の屋根、外壁、窓ガラスが一部破損したり、建物全体が倒壊する。また、道路上に多くの障害物が散乱するなどの理由により延焼し易くなる。加えて、水道式消火栓や道路の破損などにより消防水利が不足し、消防車両の移動が困難になることから、火災が拡大する危険性が高くなる。ヘリコプターを使った空中消火は、機動的であり、道路や水利事情に関係なく短時間に火災現場に到着して、水を投下できる可能性がある。このような理由から大震災時の市街地火災に対して空中消火の可能性に期待が寄せられている。市街地火災に対して空中消火の可能性を検討した研究として、東京消防庁が日本火災学会に委託して行った調査研究¹⁾や消防研究所が延焼阻止効果について行った研究²⁾がある。これらの研究により、市街地火災に対して空中消火は一定の火災抑止効果や延焼阻止効果があることが指摘されている。空中消火の効果は、火災規模やヘリコプターの機種や機数、あるいは気象条件に左右されることが予測される。そこで、今回は強風下の1棟火災に対して2機のヘリコプターにより水を投下（空中消火の意）して、火災抑止効果及び延焼阻止効果について検討し、その結果を報告書として取りまとめた。

1. 2 実験の概要

1. 2. 1 実験実施時期と場所

- ・実験実施場所：北海道苫小牧市字弁天1-17番地 苫小牧東部大規模工業基地内
- ・実験実施時期：平成11年1月27日（水） 午前9時45分～午後3時30分

1. 2. 2 実験の実施機関

消防庁消防研究所、北海道総務部防災消防課防災航空室、苫小牧市消防本部
胆振東部消防組合消防本部、札幌市消防局、仙台市消防局、東京消防庁

1. 2. 3 実験実施時の気象条件

今回の実験は、強風・低温下で市街地火災の初期段階の火災を対象にして空中消火の諸効果を検討した。風向風速の時間変化を図1-1に示す。風向は西南西であり、平均風速は約 9 m/sであった。

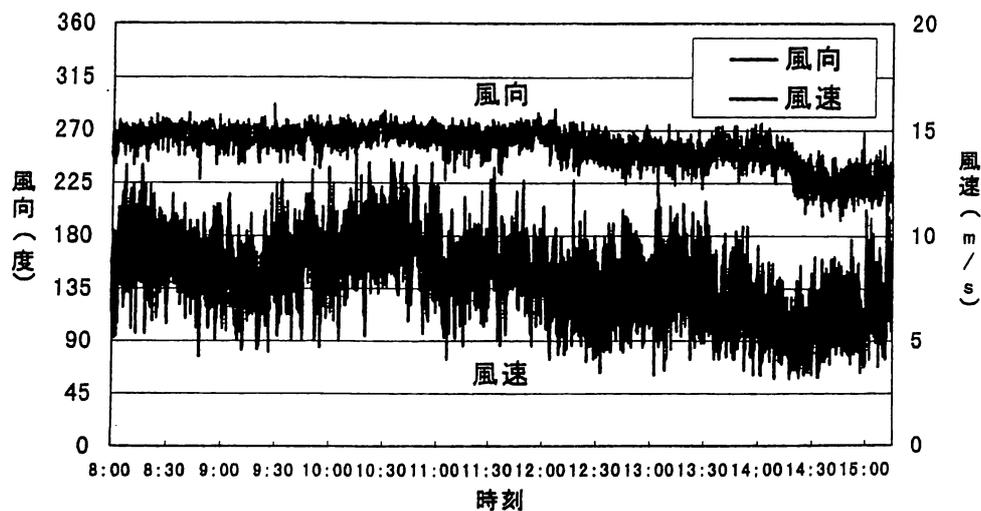


図 1-1 風向風速の時間変化

1. 2. 4 出動ヘリコプター

出動したヘリコプターは以下の2機である。

北海道防災航空隊 (ベル412EP) 1 機

札幌市消防局 (ベル412) 1 機

使用したバケットの容量はいずれも 900ℓ である。

1. 2. 5 実験実施体制

実験実施体制を表1-1に示す。また、空中消火実験において安全性を確保するために平成10年12月17日にパイロット会議を札幌市消防局消防航空隊の会議室にて開催し、ヘリコプターの飛行方法、給水方法等について検討した。

1. 3. 実験方法

第1、第2実験では、2棟の供試家屋A及びA'を使い、第3実験では木材クリブを使って行った。第1実験は午前10時、第2実験は午前11時、第3実験(その1)は午後1時30分にまた第3実験(その2)は午後2時30分に開始した。家屋あるいは木材クリブへの点火は、水の投下を開始する5～10分前に行った。

1. 3. 1 第1実験(対象家屋への命中度の観測)

強風下において風を横切る方向にヘリコプターが飛行しながら対象家屋へ水を投下した時の散布範囲と命中精度を観測した。ヘリコプターの飛行高度は100～150ftの範囲内、飛行速度は20～40ktの範囲内とし、パイロットの判断により飛行速度と飛行高度を決定した。

1. 3. 2 第2実験(家屋間の延焼阻止効果の観測)

1棟の建物火災が隣接する風上の建物に延焼拡大しようとする火災に対して水を投下して延焼拡大阻止を図り、その時の延焼阻止効果と火勢抑止効果を観測した。水が投下された箇所は主に家屋Aと家屋A'の間であるが、風に流される度合いに応じて家屋Aあるいは家屋A'にも落下した。

家屋の大きさを図1-2に示す。家屋Aの大きさは、7.2m×7.2mで、高さは3mである。また、家屋A'は家屋Aの5メートル西側に配置した。この家屋A'の大きさは家屋Aの半分とした。

家屋Aの開口部は、北側と南側にそれぞれ1個、西側と東側にそれぞれ2個の窓がある建物である。これらの窓の大きさは1.8 m × 1.5 m である。

両家屋の屋根はトタン葺きであり、火災荷重はいずれも 130 kg /m² 程度として火災継続時間を長くした。

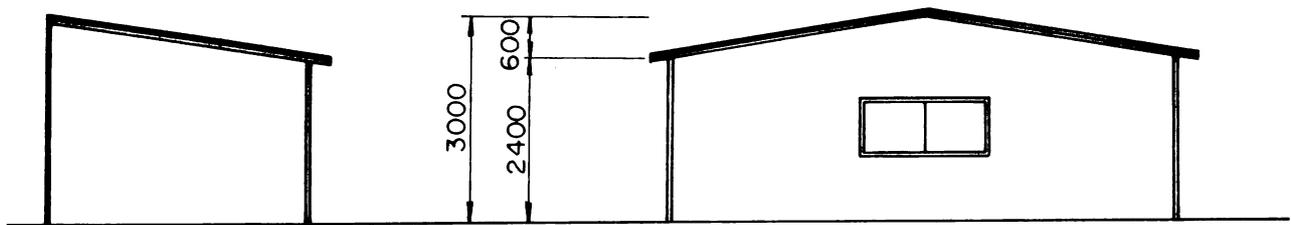


図1-2 家屋の配置

両家屋の間には中心線からそれぞれ南北に2メートル離れた地点に幅0.9 mの可燃物の帯（ベルト）を配置した。火災荷重は北側ベルトと南側ベルトで異なり、それぞれ30 kg/m²と100 kg/m²とした。火災荷重の違いは、可燃物の厚さと延焼阻止効果の違いを調べるためである。

水を投下しない場合には点火家屋から放射熱で家屋A'の外壁に延焼着火する危険性がある。また、両家屋間の廃材を媒体として家屋A'に延焼拡大すると予測される。

1. 3. 3 第3実験（飛び火火災に対する火勢抑止効果の観測）

飛び火火災に対して水を連続的に投下した時の火勢抑止効果を調べるため、火災規模、可燃物の含水率、燃焼区域の深さを変えて火勢抑止（消火）効果を観測した。倒壊して可燃物が露出した家屋を想定して木材クリブを使用した。木材クリブの大きさは、幅7.2 m、奥行き7.2mで、高さ0.3 mである。その表面に布切れを差し込み、それに点火して燃焼させた。第3実験（その1）では、含水率の異なる二つの木材クリブ1（含水率25%~40%、含水率15%以下の木材クリブを1つにして、このクリブの2カ所に点火（面積1.0m×1.0m）した。第3実験（その2）では木材クリブの全面に同時点火して水投下の効果を観測した。第3実験の点火箇所を図1-3、図1-4に示す。

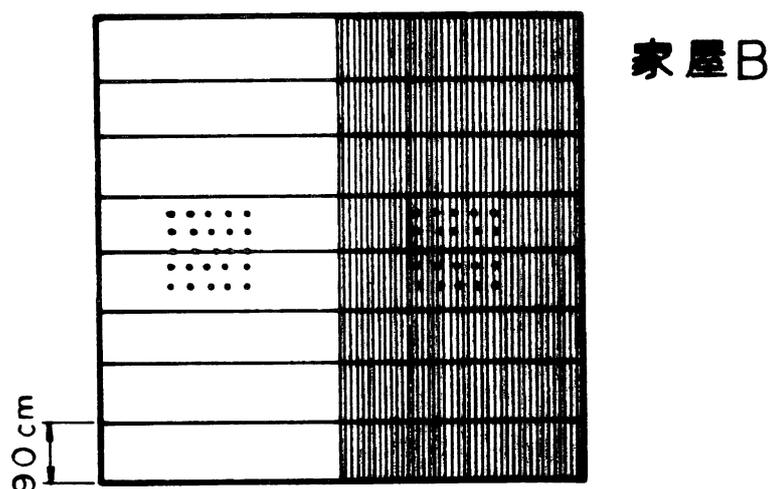


図1-3 第3実験その（1）の点火箇所

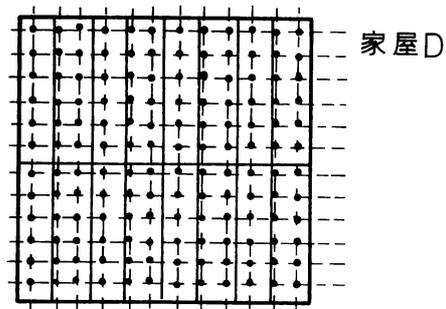


図1-4 第3実験（2）の点火箇所

1. 3. 4 水の投下記録

第1実験では10分間に9回（5.4トン）、第2実験では30分間に15回（13.5トン）、第3実験（1）では10分間に6回（5.4トン）、第3実験（2）では10分間に6回（5.4トン）水を投下した。この実験で投下した総回数は60分間に33回で、散布総量は29.7トンになる。各実験で投下した時刻は表1-1（a～c）の通りである。

表1-1 水の投下時刻

ヘリコプターの飛行実績記録票

第1実験

番号	散布開始時刻	飛行高度 (ft)	飛行速度 (kt)	散布水量 (l)	へり
1	10時00分30秒	70	20	900	道
2	10時02分50秒	70	15	900	局
3	10時04分30秒	70	20	900	道
4	10時06分25秒	70	20	900	局
5	10時08分35秒	70	20	900	道
6	10時10分25秒	70	20	900	局

第2実験（道：北海道防災航空隊、局：札幌市消防局）

散布番号	散布開始時間	飛行高度 (ft)	飛行速度 (kt)	散布水量 (l)	へり
1	11時05分15秒	120	20	900	道
2	11時07分10秒	70	15	900	局
3	11時09分05秒	120	20	900	道
4	11時11分05秒	100	20	900	局
5	11時13分58秒	100	20	900	道
6	11時15分15秒	100	20	900	局
7	11時16分50秒	100	20	900	道
8	11時19分15秒	80	15	900	局
9	11時21分08秒	80	20	900	道
10	11時23分20秒	150	15	900	局
11	11時25分20秒	100	20	900	道
12	11時27分25秒	80	15	900	局
13	11時29分14秒	100	20	900	道
14	11時31分20秒	120	15	900	局
15	11時33分20秒	150	20	900	道

第3実験（1）

番号	散布開始時間	飛行高度 (ft)	飛行速度 (kt)	散布水量 (l)	へり
1	13時30分10秒	100	20	900	道
2	13時32分10秒	100	20	900	局
3	13時34分10秒	80	20	900	道
4	13時36分05秒	80	20	900	局
5	13時38分14秒	80	20	900	道
6	13時40分18秒	70	0	900	局

第3実験（2）

	散布開始時刻	飛行高度 (ft)	飛行速度 (kt)	散布水量 (l)	へり
1	14時27分10秒	80	20	900	道
2	14時27分55秒	80	5	900	局
3	14時31分05秒	80	20	900	道
4	14時32分20秒	75	5	900	局
5	14時34分35秒	80	20	900	道
6	14時36分17秒	70	0	900	局

1. 4 各実験毎の観測項目

各実験における観測項目を表1-2に示す。

第1実験では水の散布範囲と散布密度及び対象家屋への命中度合を観測した。第2、第3実験では模擬火災に水を投下して、水投下の効果を観測した。主要な観測項目は以下の通りである。

表1-2 観測項目

○ 観測 - 未観測

観測項目	第1実験	第2実験	第3実験
・ 風向風速、気温、湿度	○	○	○
・ ヘリコプターの飛行高度及び飛行速度	○	○	○
・ 燃焼状況	-	○	○
・ 水の落下拡散状況	○	○	○
・ 散布範囲及び散水密度	○	○	○
・ 炎上建物内の温度	-	○	○
・ 放射熱及び隣接家屋の表面温度	-	○	○
・ 延焼阻止効果及び飛び火火災の火災抑止効果	-	○	○

第2章 ヘリコプターの飛行高度と飛行速度

2.1 高度と速度の測定

空中から放水するヘリコプターの放水時の位置と、地表に散布された散布パターンとの位置の関係を調べるため、地上から精度高く、機体の飛行高度と飛行速度とを測定した。飛行方向を側面から望む高度速度測定地点にレーザー距離計を設置し、放水前から放水後までの距離計と機体中心部との間の直線距離及び仰角を数秒間隔で測定し、地上からの高度に換算した。また、機体の移動に伴う距離計の旋回角から直前の測定点との移動距離及び所要時間を求め、各測定点間の区間平均速度を算出した。図2-1に実験区域内の測定地点の配置を、また表2-1にレーザー距離計の仕様を示す。

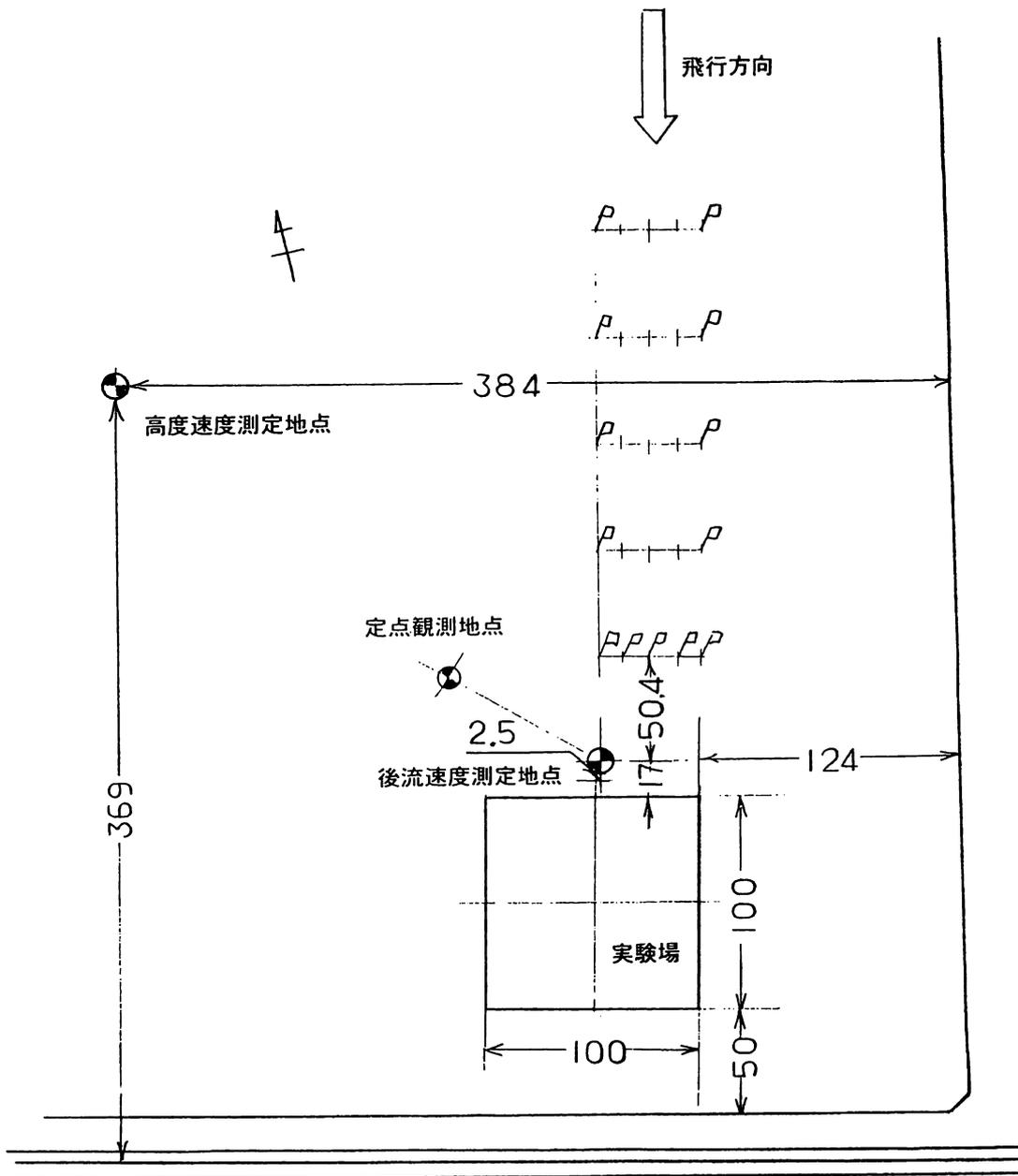


図2-1 実験区域内の測定地点の配置

表2-1 レーザー距離計の仕様

測定方式	: Er (エルビウム) ガラスレーザー反射時間差方式		
波長	: 1.54 μm		
出力	: 3 ~ 5 mJ		
測定速度	: 12回/分		
距離測定範囲	: 30 ~ 5000 m		
測定精度	: ±1 m		
角度測定範囲	水平 0 ~ 360度	垂直 ±35度	
測定精度	水平 ±30秒	垂直 ±2分	
照準光学系視野	左右 6.4度	上方 3.2度	下方 1.6度

目標上空で放水した水流は、水塊の前進速度が無くなると同時に主流が崩壊 (break-up) し、分散した各水滴が風に流されてしまう。そこで地表の自然風が散布範囲に及ぼす影響を調べるため、図2-2に示す次の方法で行った。地上の放水区域 (実験場) 直前に設けた後流速度測定地点直上をヘリコプターが通過した時刻から放水開始時刻との時間差と飛行速度 V により、放水開始点の位置を後流速度測定地点からの距離 L とした。さらに別項「投下水の散布範囲及び散布密度」で示された各実験における散布範囲の散布中心位置と放水開始点との平面上の飛行前後方向の距離を散布のずれとして求めた。

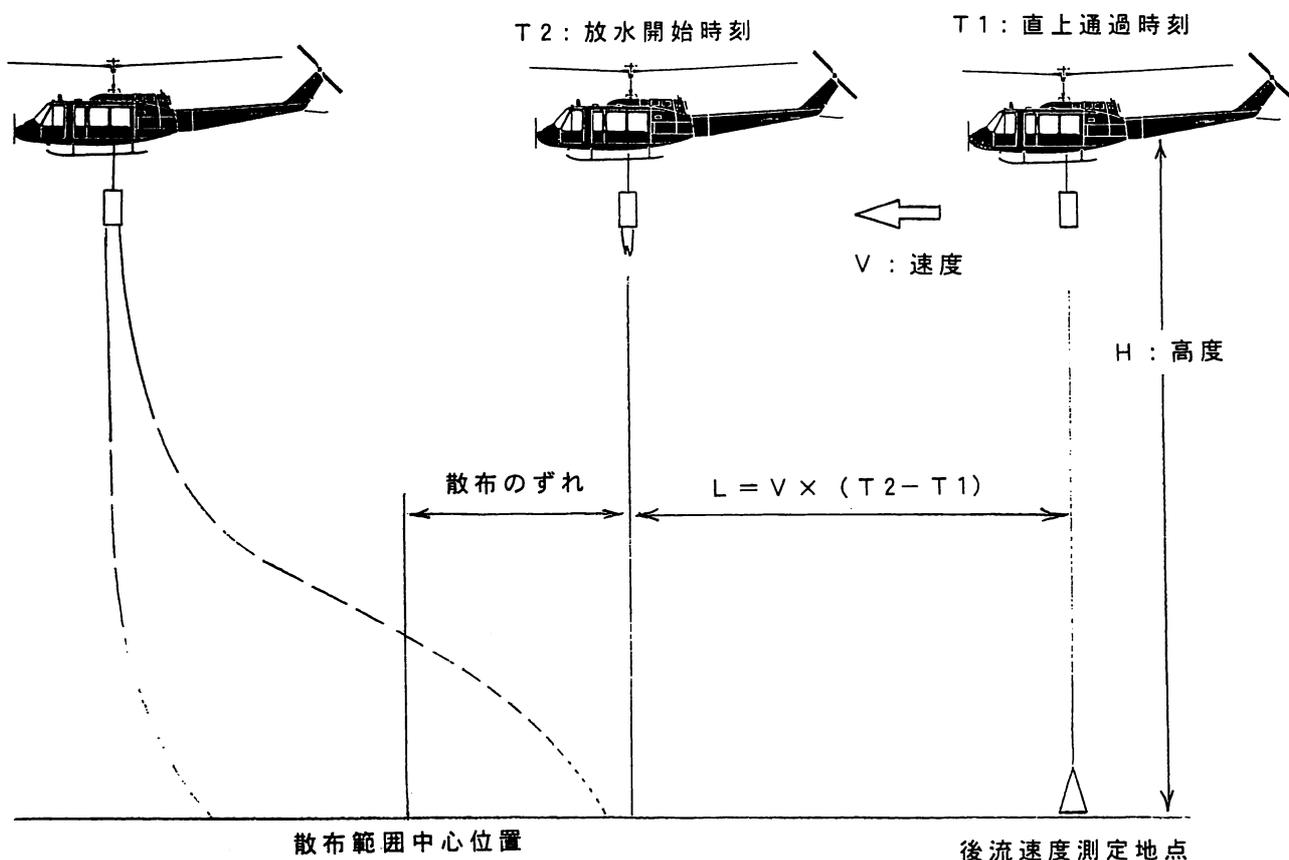


図2-2 散布のずれ

2. 2 結果

今回の強風下での実験については、安全を最優先し、100から150 ft (30から45m) の高度で、且つ目標に放水を到達させることを前提としたため、パイロットの状況判断による高度と速度でヘリコプターは飛行した。第1実験では6回、第2実験では15回、第3実験(その1)では6回、第3実験(その2)では6回の飛行について測定を行った。一例として第2実験-1の測定結果を図2-3に示す。放水開始時に測定できなかった場合には、放水時刻よりその高度と速度とを比例配分により推定した。高度速度及び後流速度測定地点における飛行高度と飛行速度の測定結果をまとめ、表2-2に示す。第3実験(その2)では前半の3回の測定記録が消失してしまったため、空欄とした。同表における高度と速度の測定値において、括弧内の数値は推定値である。自然風が散布のずれと高度及び速度との関係にどのように影響したかをみるため、風速6(m/s)未満、6以上8(m/s)未満、8以上10(m/s)未満と10(m/s)以上との4段階に分けて検討した。自然風の値は一般気象の測定を行った定点観測地点の地上5mに設置した風速精度0.1(m/s)の風車型風向風速計により5秒間隔で測定した放水開始時の瞬間値を採用した。散布のずれと飛行高度との関係については図2-4に、また飛行速度との関係については図2-5に示す。放水時の自然風は概ね、飛行方向と直角の西風であり、風速は5から11.9(m/s)であった。図2-4において高度と散布のずれの関係は風速6(m/s)未満の条件においては、上方に凸の形状の極大点のある傾向となり、他の風速条件については高度の変化に対応することなく相関のない傾向を示すものであった。しかし、図2-5において風速6(m/s)未満と6(m/s)以上とでは、傾向の違いが現れた。即ち、6(m/s)未満の測定点の近似直線では飛行速度の増加と共に散布のずれも増加したが、6(m/s)以上になると近似直線が横軸と平行に近くなり、この傾向がなくなった。さらにその相関係数 R^2 の値も風速6(m/s)未満の値が6(m/s)以上の値に比べ大きく、風速6(m/s)未満では飛行速度と散布のずれに相関が高いことがわかった。

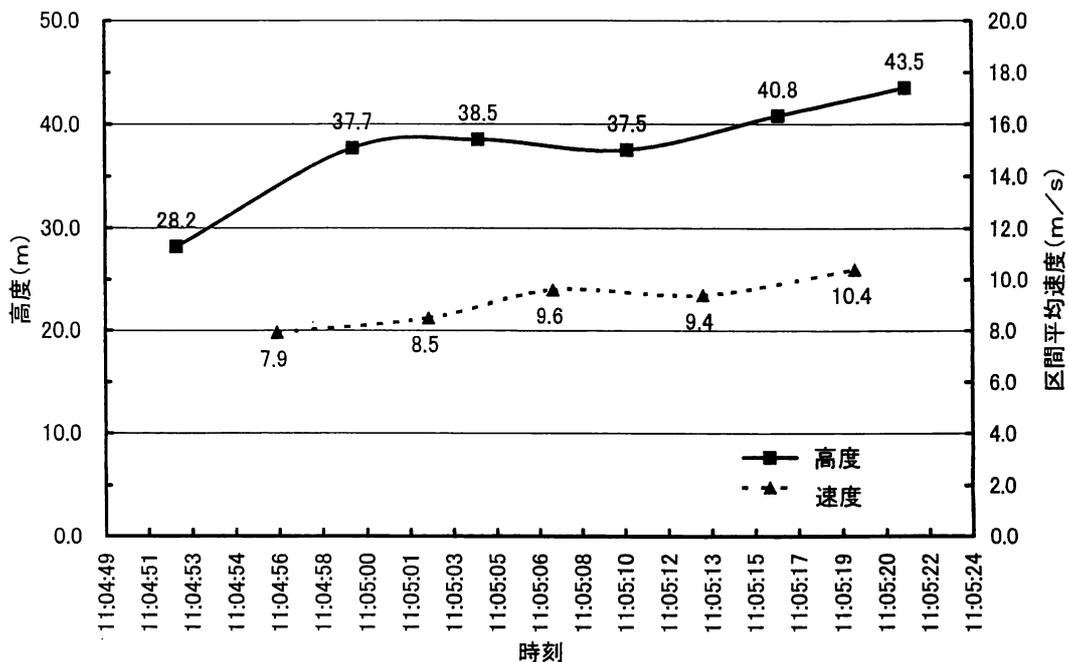


図2-3 測定結果の一例 (第二実験-1)

表2-2 飛行高度と速度の測定結果

実験番号	飛行番号	後流速度測定 地点通過時刻	高度 (m)	速度 (m/s)	放水開始 時刻	高度 (m)	速度 (m/s)
1	1	10:00:23	(23.3)	13.3	10:00:30	(22.3)	12.3
	2	01:59	22.7	(9.0)	02:05	22.9	8.5
	3	04:23	(22.4)	7.1	04:30	(22.3)	6.8
	4	06:19	(21.9)	8.8	06:25	(22.0)	8.5
	5	08:27	24.7	(10.1)	08:30	(23.7)	8.0
	6	10:15	(22.6)	7.6	10:16	22.7	(7.5)
2	1	11:05:07	(38.0)	9.6	11:05:10	37.5	(9.5)
	2	06:59	(20.1)	8.8	07:00	20.2	(8.8)
	3	08:59	(40.4)	9.2	09:01	40.2	(8.9)
	4	10:57	(31.1)	9.7	11:00	31.3	(9.7)
	5	12:51	(34.6)	8.9	12:55	34.0	(9.3)
	6	14:54	(27.1)	7.4	14:58	28.7	(9.4)
	7	16:48	(34.1)	6.6	16:51	33.8	(6.7)
	8	19:03	(28.5)	7.0	19:07	27.1	(7.9)
	9	21:00	27.2	(6.0)	21:06	27.2	(5.5)
	10	23:11	38.5	(9.0)	23:11	38.5	(9.0)
	11	25:12	(33.0)	8.1	25:15	32.6	(8.2)
	12	27:08	24.3	(7.8)	27:14	26.0	7.9
	13	29:07	32.1	(7.5)	29:12	31.7	(7.1)
	14	31:11	(34.5)	8.1	31:15	36.2	(9.8)
	15	33:16	46.2	(7.9)	33:23	48.0	(8.0)
3(その1)	1	13:30:04	(33.1)	8.9	13:30:12	34.3	(7.2)
	2	32:02	(34.0)	10.3	32:04	34.2	(10.6)
	3	34:00	28.7	(9.1)	34:11	27.9	(6.8)
	4	35:58	(26.8)	11.0	36:01	26.3	(10.8)
	5	38:00	(27.5)	6.0	38:09	28.9	(4.7)
	6	40:02	(22.5)	8.0	40:09	22.5	(5.1)
3(その2)	1	14:26:50	—	—	(14:27:10)	—	—
	2	27:45	—	—	(27:55)	—	—
	3	30:45	—	—	(31:05)	—	—
	4	32:08	(25.7)	10.0	32:13	26.4	(6.6)
	5	34:25	27.2	(6.9)	34:35	26.3	(4.7)
	6	35:58	(25.2)	8.3	36:11	19.3	(2.9)

2. 3 結論

全33回の飛行中30回の飛行について飛行高度と飛行速度のデータが得られ、昨年度までの画像による計測では得られなかった放水に到る高度と速度の推移が、数秒間隔で精度高く求められるようになった。今回使用した2基の水タンク容量は共に900リットルであり、放水開始から終了までの放水持続時間はほぼ一定である。飛行速度が増加すると単位時間当たりの飛行距離が長くなり、その散布範囲は飛行方向へ延びる。散布範囲の中心位置も放水開始点から飛行方向前方へと移動する。放水が目標に散布され、効果的に目的を達成するためには、横風飛行時の放水において、どの程度の風速で前述の関係が成立しなくなるかを把握

しておく必要がある。放水開始点と散布中心との距離を散布のずれとして地上風速との関係を調べると、今回の飛行条件においては、風速6 (m/s) 未満では明確な相関が得られたが、6 (m/s) 以上になると相関がほとんど無くなった。地上の横風が6 (m/s) 未満の風速であれば、飛行速度10 (m/s) においても放水開始点と地表の散布範囲中心位置とのずれが40m以下の確度で、目標に散布できることがわかった。

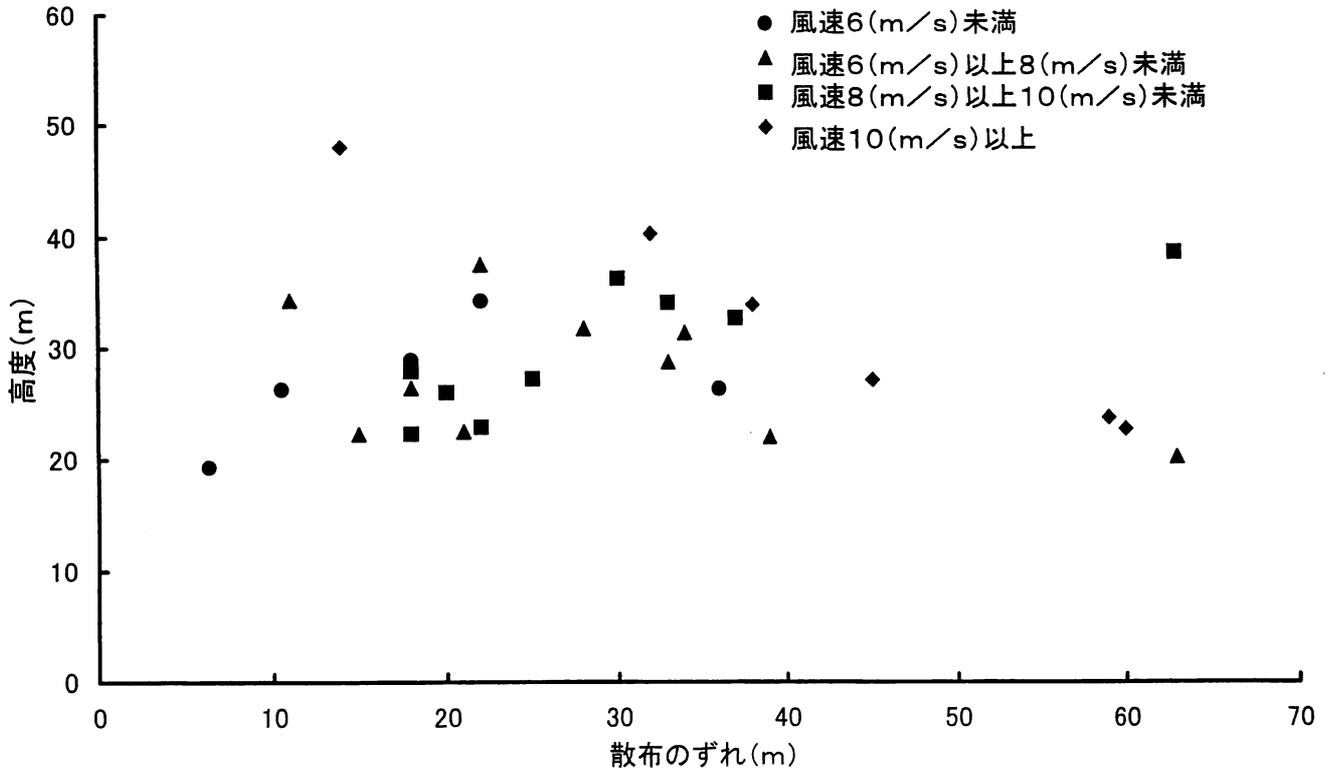


図2-4 高度と散布のずれ

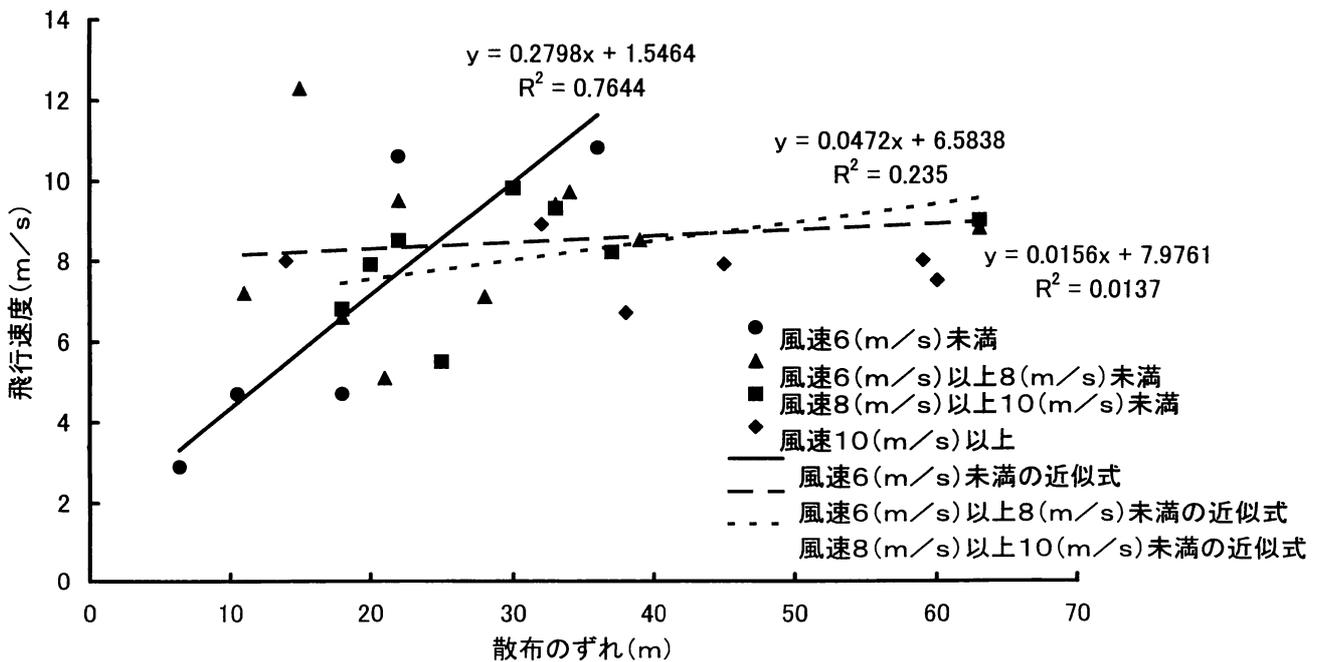


図2-5 速度と散布のずれ

第3章 後流（ダウンウォッシュ）の測定

3. 1 測定方法

ヘリコプターの飛行に伴う地表面への後流を把握するため、図2-1に示した飛行経路直下の後流速度測定地点に地上1.5mの高さで超音波風向風速計を設置し、水平及び垂直の風向風速を1秒間隔で、測定点直上通過以前から放水終了までを測定した。

同時に後流速度測定地点直上をヘリコプターが通過した時刻を記録した。後流速度測定地点通過後の十数秒以内に風速の変化があり、その値も後流速度測定地点から北西に83m離れた一般気象の定点観測地点における実験現地の自然風（水平成分）と比較して明らかに異なった値となった場合に、後流と判定した。第一及び第二実験においては、水平風速のみを10分間の移動平均値としてしまったため、瞬間値となっていない。

表3-1に実験に用いた超音波風向風速計の仕様を示す。

表3-1 超音波風向風速計の仕様

測定方向	: 水平及び垂直成分の風向風速
風速測定方式	: 超音波パルス受信方式
測定範囲	: $\pm 0 \sim 30 \text{ m/s}$
測定精度	: $\pm 1 \%$
分解能	: 0.5 cm/s
測定速度	: 20回/秒
風向測定範囲	: $0 \sim 540 \text{ 度}$
変換演算精度	: $\pm 5 \%$

3. 2 結果

測定した33回の内、飛行高度と飛行速度の測定記録の残った30回の飛行について、後流速度測定地点を通過した時の高度と速度とを後流有りと判定した6回の飛行をシンボルを変えて図3-1に示す。今回の実験では飛行高度が低く、且つ飛行速度の低い条件で後流が発生するとは限らなかった。後流有りと判定した一例として第3実験（その2）-6の風向風速測定結果を図3-2に示す。図3-2において、後流速度測定地点を通過した時刻（14:35:58）の11秒後に垂直風速に負の値となる下向きの変動があり、続いて水平風速の大きな変動が発生しているが、風向は概ね南南西から南西であり顕著な変動がなかった。自然風を5秒間隔で測定した定点観測地点における同時刻の前後30秒の風向風速の変化を図3-3に示す。水平及び垂直風速の両者共に変動があり、後流の判定をした3例ともその変動の発生順は垂直風速が先で、続いて水平風速の変動が発生した。以後、後流の水平風速を水平成分に、垂直風速を垂直成分とする。風速変動範囲が4から9(m/s)の自然風の状況下において、水平方向における後流速度最大値は14.47(m/s)であった。

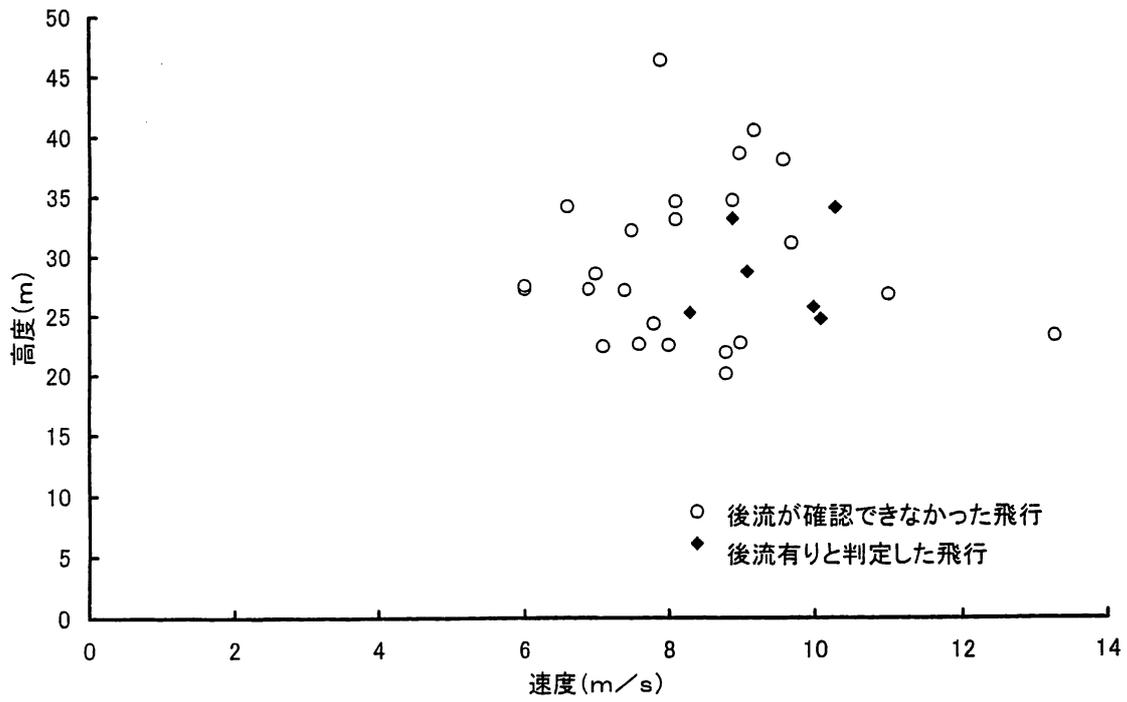


図3-1 測定時の高度と速度

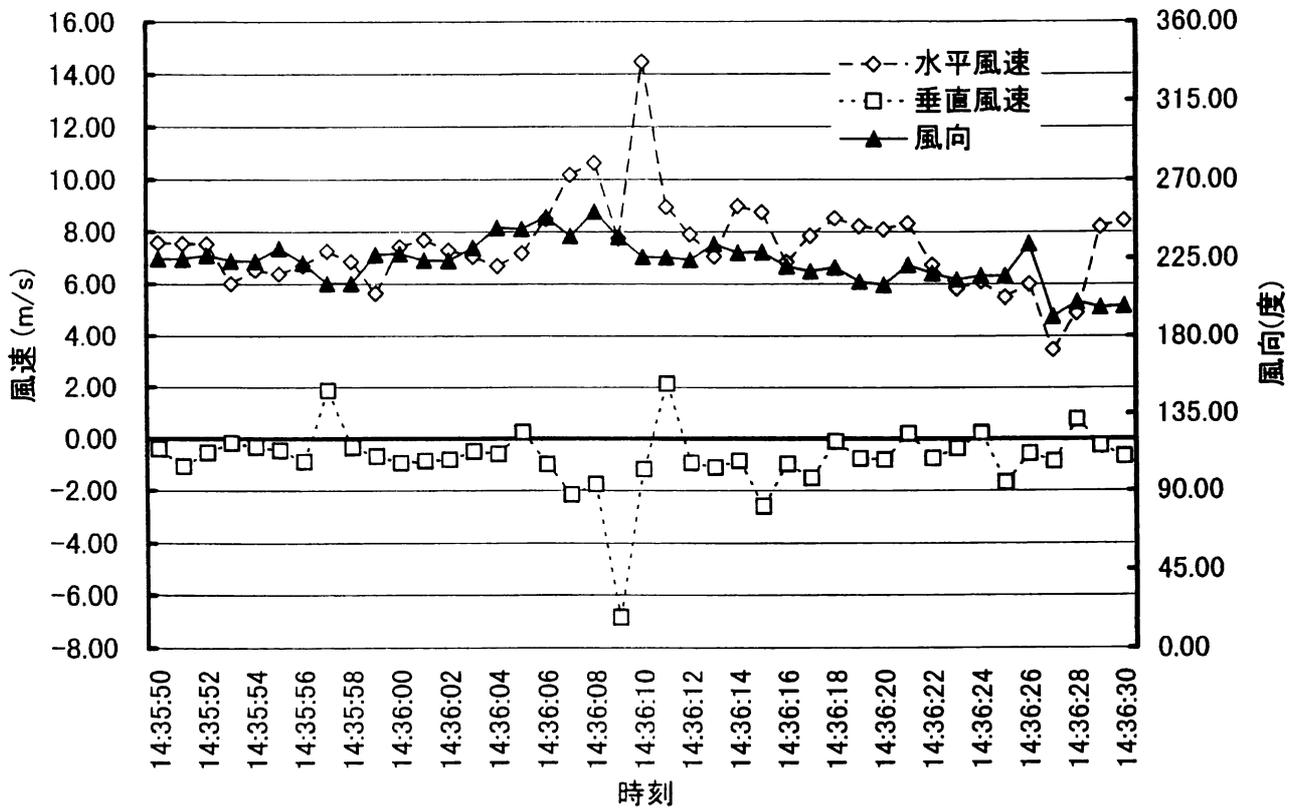


図3-2 測定結果の一例 (第3実験その2-6)

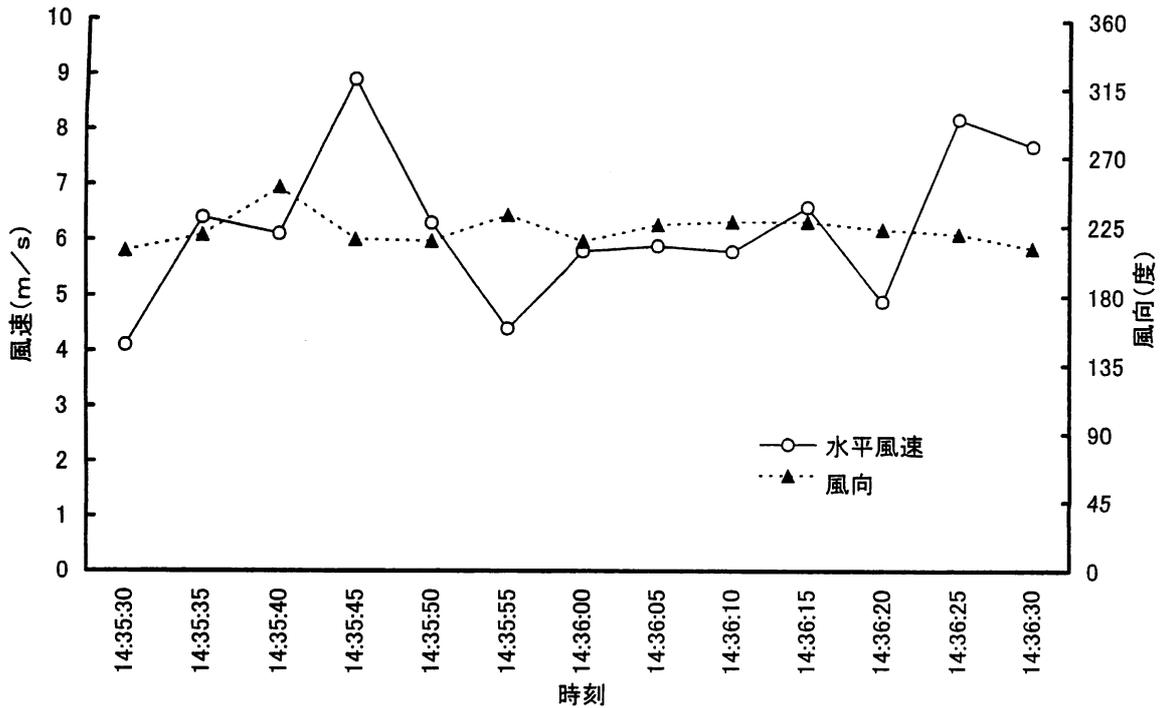


図3-3 定点観測地点における風向風速

3. 3 結論

昨年度は撮影した画像における煙の動きから後流の有無を見つけた¹⁾が、今回は風速の時間経過の中に定量的な変動として6回の飛行に後流が確認できた。後流の発生した第1実験-5〔垂直成分のみ〕、第3実験(その1)-1、-2〔水平成分のみ〕、-3〔水平成分のみ〕、第3実験(その2)-4、-6の6回の飛行について、水平及び垂直成分の最大後流速度と飛行条件との関係について、垂直成分の値は絶対値とし、検討を行った。図3-4に飛行高度と後流速度との関係を示す。水平成分は8(m/s)以上、垂直成分は7(m/s)未満の測定値だけとなり、後流速度8(m/s)前後で分かれてしまった。実験時には5(m/s)以上の水平方向の自然風が吹き続けていたため、後流の水平成分として測定できたものは、これ以上の値である。垂直成分については、強い水平成分の風により偏向されて減衰し、地表近くまで到達できなかったためと考えられる。水平及び垂直成分共に飛行高度が高くなると後流速度が低くなる反比例の傾向が伺える。飛行速度と後流速度との関係を図3-5に示す。図3-4と同様に水平、垂直成分共に後流速度8(m/s)前後で分かれているが、測定値が分散し、同図ほどにはその傾向が強く現れていないことは、その近似式の相関係数がかなり異なることから分かる。さらに、後流の特徴である旋回流を含んでいることから、発生の確認は水平及び垂直成分の両者に変化が現れ、発生時間に若干の差があり、垂直成分の変化が先に現れることが分かった。最大風速10(m/s)以上となった強風下の飛行においても、後流の発生が確認でき、その最大後流速度は飛行速度より高度との相関が高いことが分かった。

文献

- 1) 金田節夫、ヘリコプターの飛行による後流の発生：消防研究所報告 第87号、P38-45 (1999)

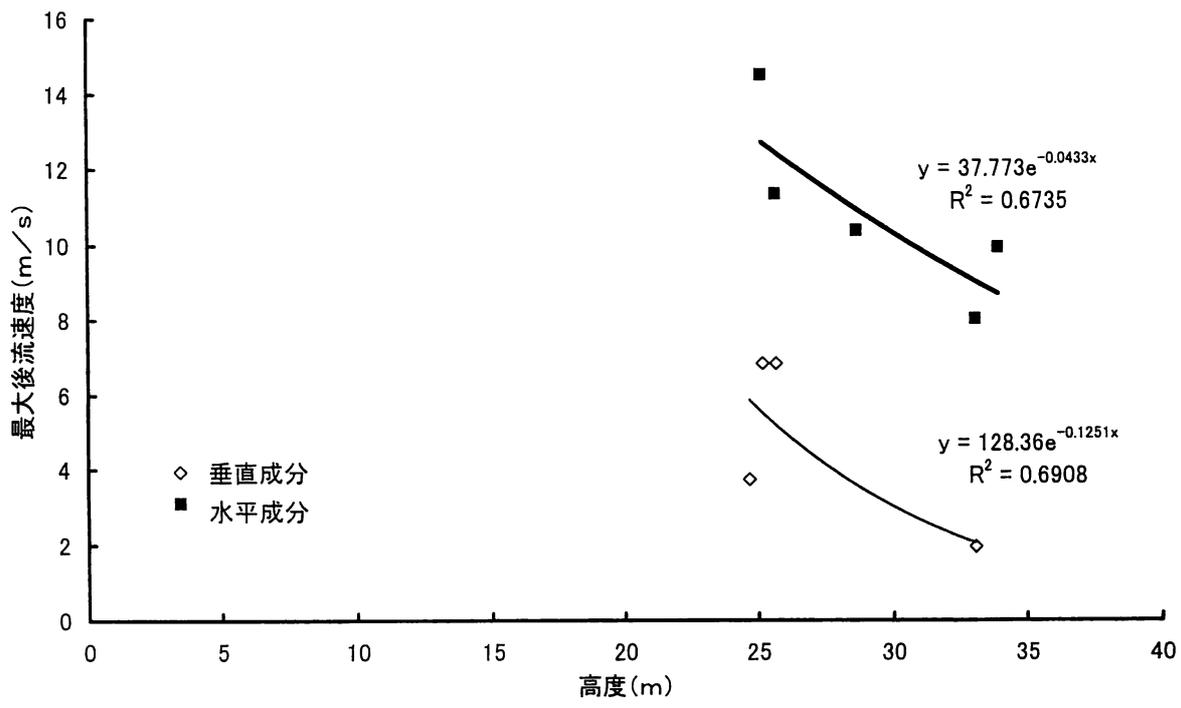


図3-4 高度と後流速度

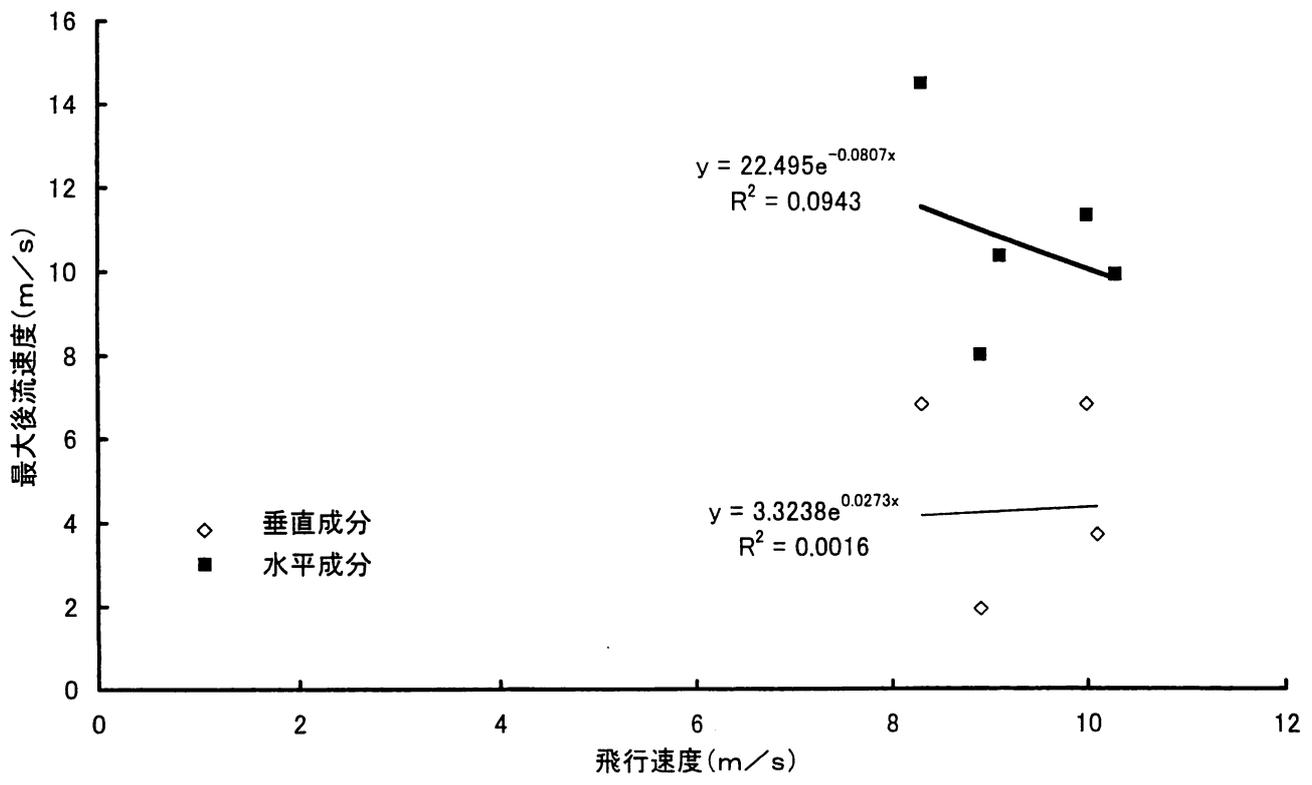


図3-5 飛行速度と後流速度

第4章 ヘリコプターからの投下水の落下拡散性状

4. 1 はじめに

大震災時における建物の倒壊や給水設備の破壊などを伴う同時多発火災においては地上からの消防力には限界が生じるため、ヘリコプター等の航空機を用いた空中からの消火活動が重要となる。しかし、空中から市街地火災の拡大を抑制するためには、火災の規模や火災拡大状況に対する必要投下水量を把握する必要があるが、なお不明な点が多く、実大規模火災実験がくり返されている。特に、山火事などの広域的消火の場合と異なり、大震災時における建物火災が拡大する前の初期消火のためには、ピンポイント攻撃のような命中精度が必要とされるため、空中から地面に到達する水の分布の把握が重要となり、従来から地上に多数のマスの配列を置き計測されている。しかしながら、ヘリコプターからの投下水は気象条件などに左右され、計測用マス配列から外れる場合やマスとマスとの間に散水分布のピーク値がくる恐れもあるなど計測は必ずしも容易ではない。このような状況から、本研究ではコンピューターシミュレーションによるヘリコプターからの散水分布の把握を目的とし、投下水のビデオ画像解析と比較する基礎的研究を行った。

4. 2 投下水の画像解析方法

ヘリコプターから投下される水の地面への到達分布を数値シミュレーションにより把握するためには、実験でのマス配列の測定値との比較によるほか、空中における水の塊の分裂過程や空気との相互作用による拡散状況を実験の映像などを基に把握するなどのシミュレーション手法の資料を得る必要がある。例えば、ヘリコプターからの散水状況に通常見られるように、落下の主流から垂直に突起状に突き出した水の分裂過程は、放水流にしばしば見られる多くの特徴がある。また、本実験は気温0℃付近で行われ、投下水の温度は10℃付近にあったため、赤外線画像から空中を拡散する投下水の水温変化の過程に関する情報も得られ、散水状況のシミュレーションに重要な資料となる。ただし、今回のシミュレーションは第1段階のものとして、流れ性状の比較を主に行う。

空中を拡散する水の速度情報を測定することは通常困難であるが、近年ビデオ画像のコンピューター解析による計測方法が進歩しており、ここではこの画像解析の方法を用いる。本画像解析ではパターントラッキングアルゴリズムに基づく速度ベクトルの解析を行った。ヘリコプターの飛行方向の正面と直角方向で散布域から150m離れた位置から2台のデジタルビデオカメラ(SONY DSR-300F)により撮影した散水状況のビデオ映像をデジタルイメージプロセッサのビデオキャプチャーボードで1/30秒間隔の映像をとり込み、解析ソフトとして市販のFLOW-VEC32¹⁾を用いて解析した。解析画面は640x480ピクセルで、画像中の移動量に対して、ヘリコプターの長さ(12.7m-後部ローターを除く)を基準にして速度ベクトルを求めた。

なお、この解析に先立ち、風洞実験室において、吹き出し風速2m/sのもとで煙を流してビデオ撮影した画像を解析したところ、1.5-1.6m/sの値に速度ベクトルの最多

頻度が現れる結果を得た。この結果は、別の風速測定装置の測定結果と近く、この速度解析ソフトはほぼ実用になるものと推定される。

ここでは、次の4回の散水実験における落下パターンを解析した。

- (1) 第1実験-No. 2 (飛行高度：22.9m、飛行速度：8.5m/s)
- (2) 第1実験-No. 4 (飛行高度：22.0m、飛行速度：8.5m/s)
- (3) 第1実験-No. 6 (飛行高度：22.7m、飛行速度：7.5m/s - 放水時に停止)
- (4) 第2実験-No. 1 (飛行高度：37.5m、飛行速度：9.5m/s)

4.3 画像解析結果

4.3.1 第1実験-No. 2 放水実験

図4.1.1から図4.1.12に第1実験-No. 2の散水時におけるベクトル解析結果と頻度分布を示す。第1実験では火災建物のない状態で、投下水の散水パターンのみの計測が行われ、第1実験-No. 2では風速7-8m/sの強風横風のなかで、比較的低い高度からのヘリコプターからの放水が行われた。図4.1.1はヘリコプターの飛行方向に対して側面側と正面側からの赤外線映像を示す。散水流の後方に密度の薄い霧状の散水分布が見られるが、これは通常の可視画像では見えにくいものである。図4.1.2から図4.1.6に正面側からの散水パターンと速度ベクトル解析結果を示す。また、この解析結果を基に、各時刻でのそれぞれの速度ベクトルの個数を速度1m/sごとに集計し、百分率を求めた結果を併せて示す。散水開始0.67秒までは比較的小さい速度ベクトルが多いが、散水開始1秒を経過すると6-7m/sの速度成分が増え、2.67秒経過時点では9-10m/sの速度成分が増えてくる。この時点でのベクトルの方向は風により右側に流されている状況をよく表している。また、図4.1.7に散水開始0.67秒から3.33秒までの速度ベクトルを1m/sごとに集計した頻度分布を示す。その結果、7-8m/sの速度成分がもっとも多かった。

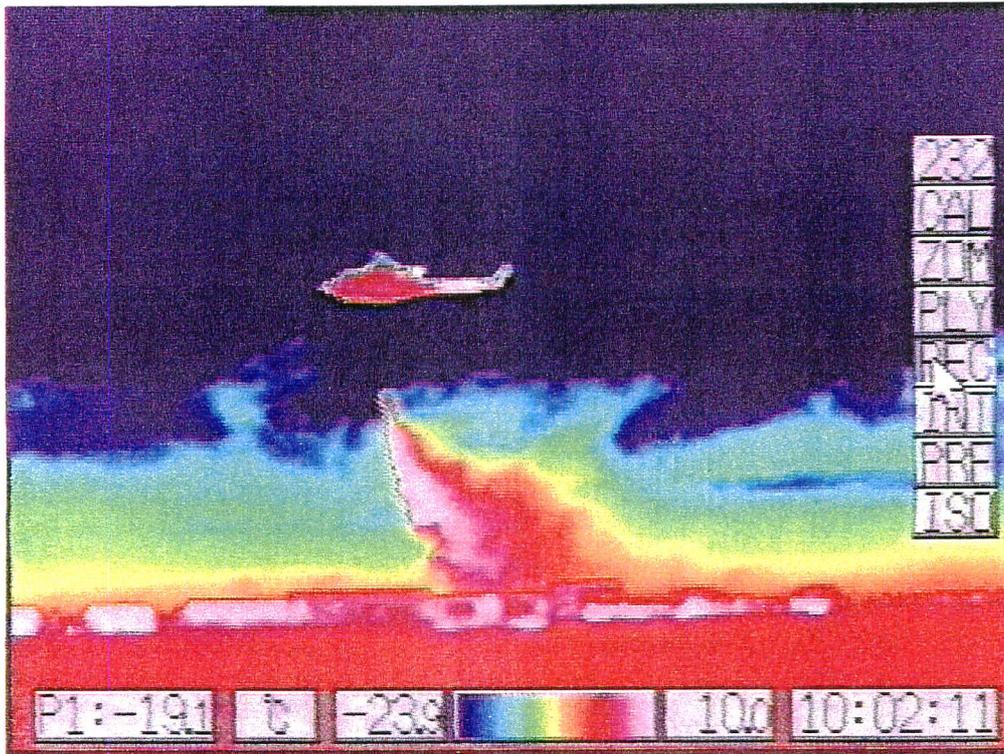
次に、図4.1.8から4.1.12に側面側における散水パターンと速度ベクトル解析結果および速度ベクトルの頻度分布を示す。また、放水開始後0.67秒から3.33秒までの速度ベクトルの頻度分布の集計結果を図4.1.13に示す。側面側では、7-8m/sの速度の成分が最多で9-10m/sの成分も多い。

4.3.2 第1実験-No. 4 放水実験

図4.2.1に第1実験-No. 4放水実験におけるデジタルカラー画像と赤外映像および速度ベクトル解析図を併せて示す。この図から、赤外映像は可視画像では把握できない霧状の領域までの散水パターンを表示していることがわかる。飛行高度はNo.2と同様に約22mでかなり低い。風速は約6-7m/sであった。図4.2.2と図4.2.3に散水開始1.67秒後での正面側と側面側での散水パターン、速度ベクトル解析結果およびこの時刻での速度ベクトル集計結果を示す。この図から7-9m/sの速度成分が多いことがわかる。さらに、図4.2.4と4.2.5に散水開始後1.00から4.00秒までの速度ベ

第1実験 No. 2

側面 (東側)



正面 (南側)

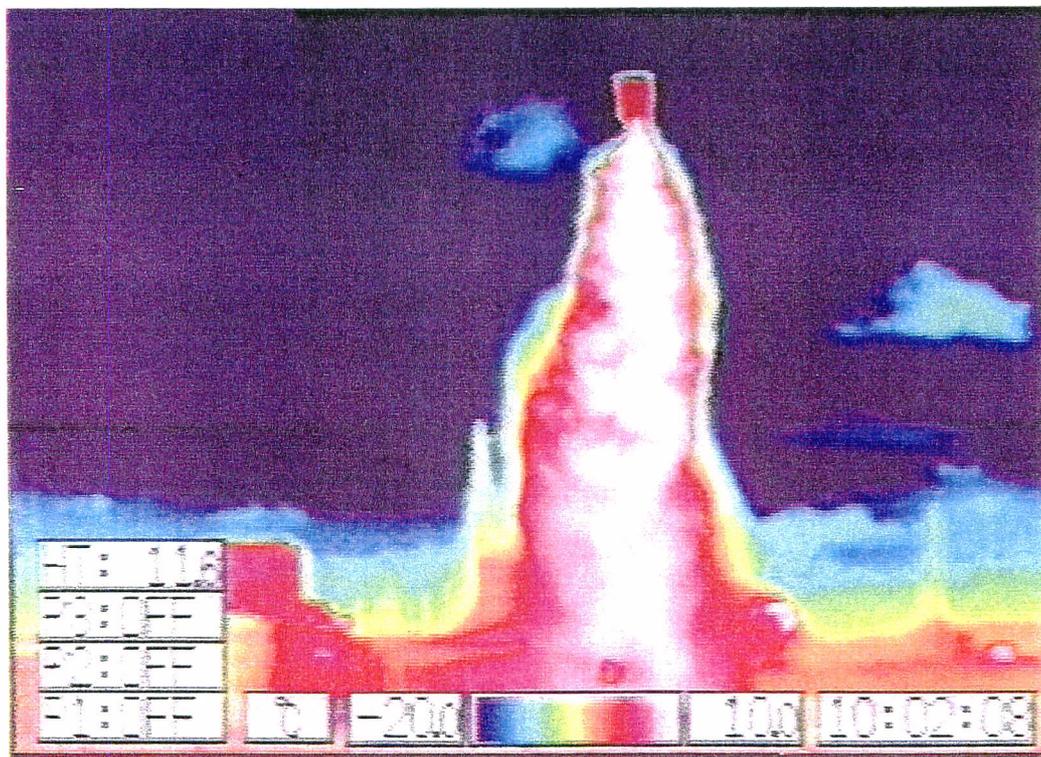


図4. 1. 1 第1実験-No. 2における放水状況の赤外線映像
(最高温度設定 : 10℃)

第1実験 No. 2 (正面)

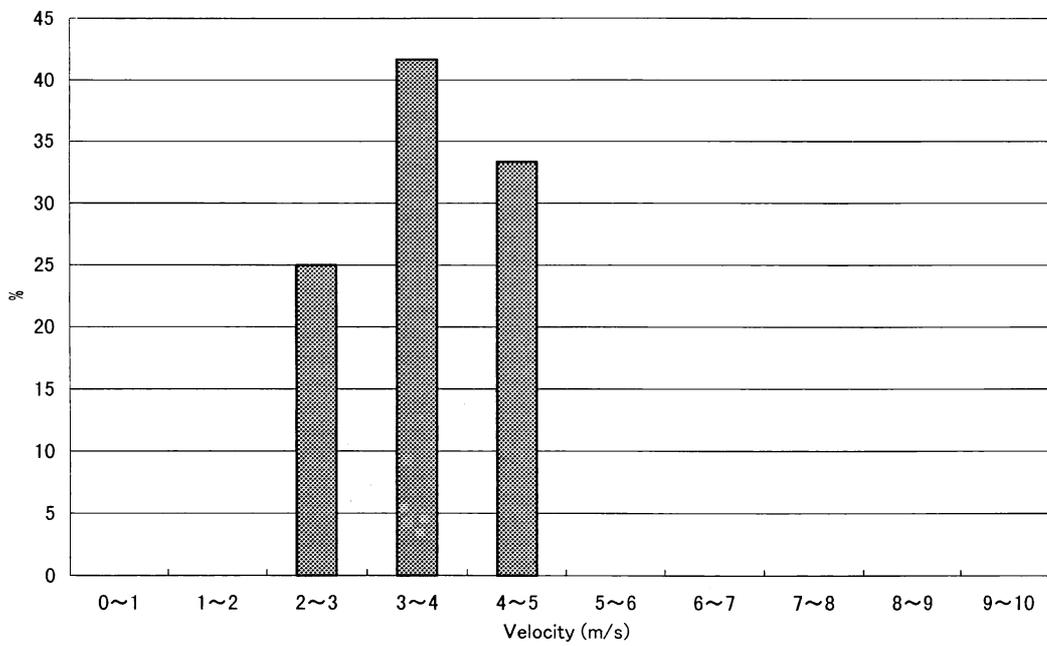
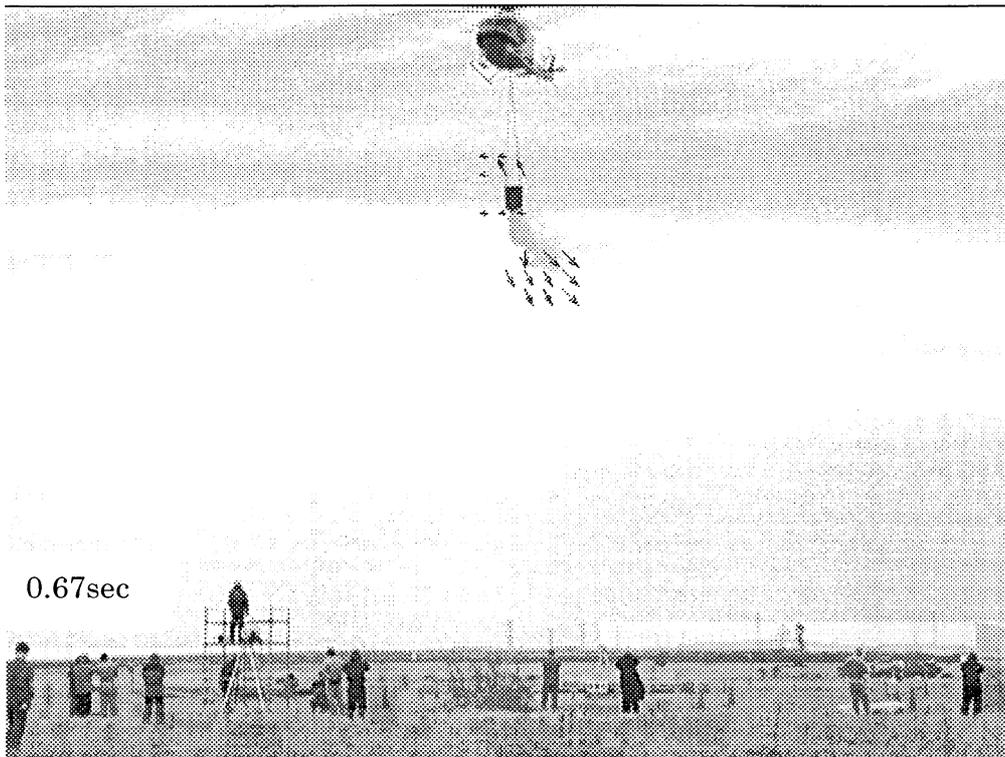


図4-1-2 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布 (放水開始0.67秒後)

第1実験 No. 2

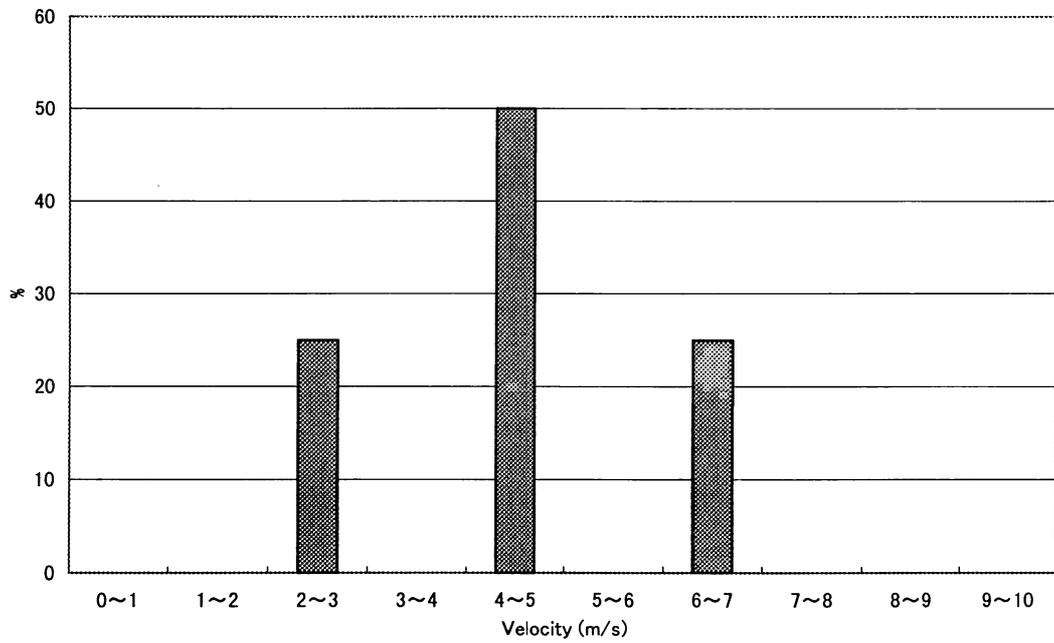
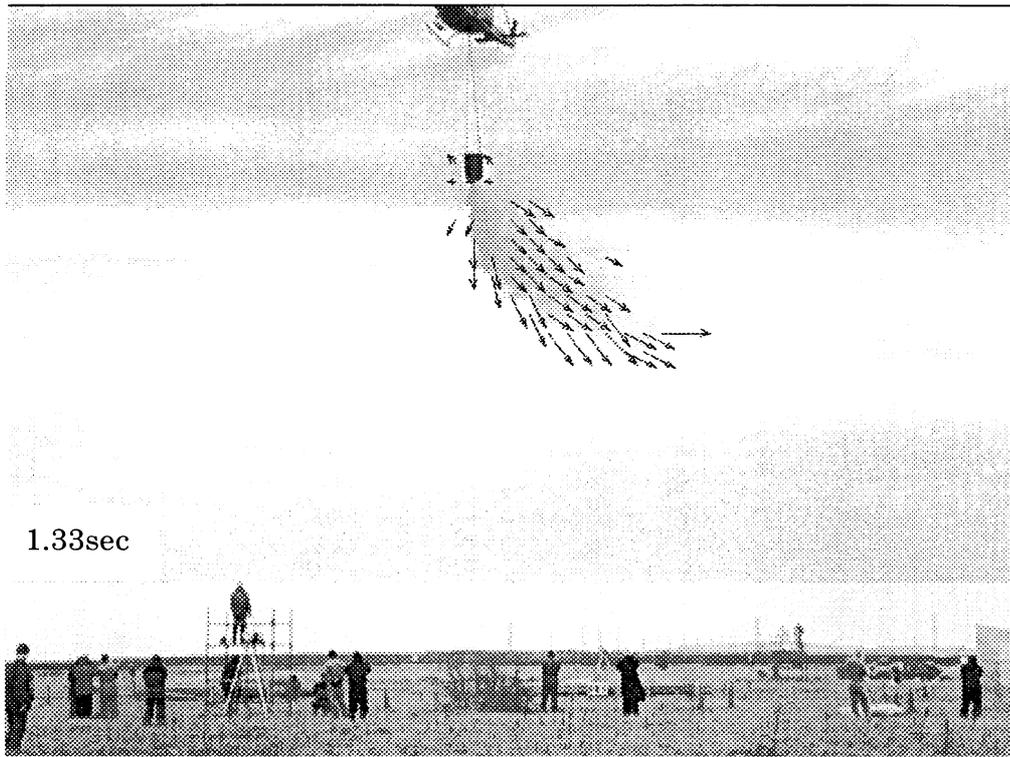


図4-1-3 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始1.33秒後）

第1実験 No. 2

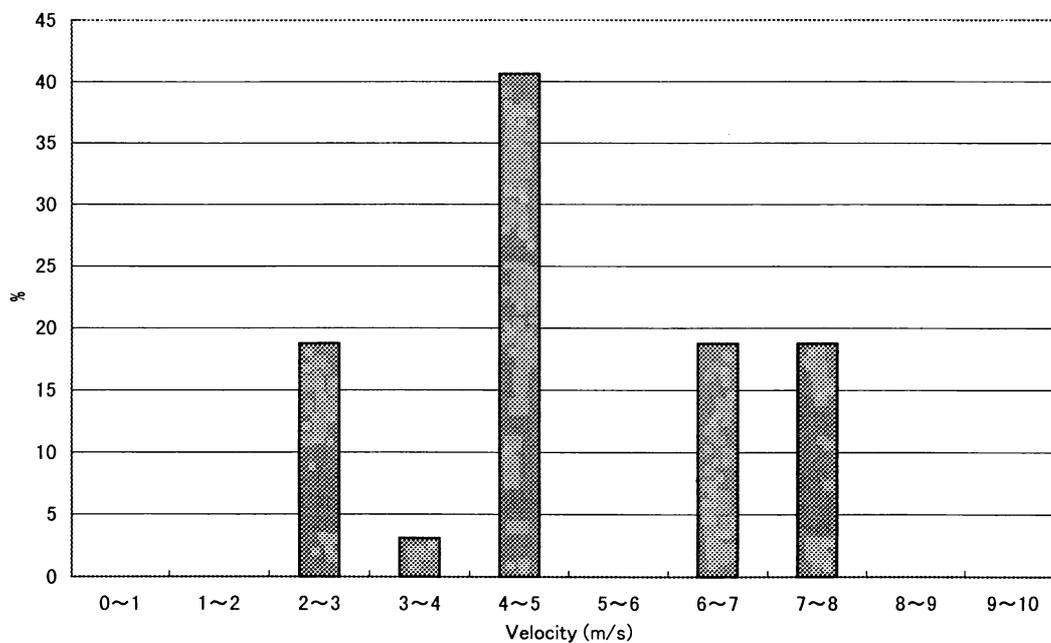
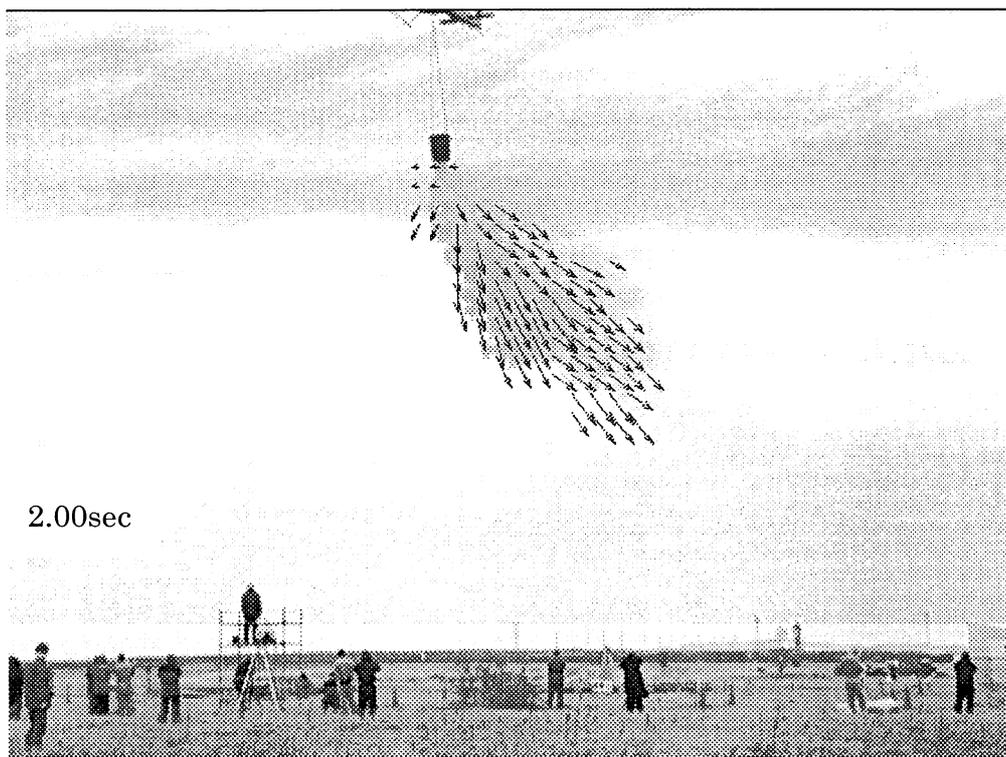


図4-1-4 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始2.00秒後）

第1実験 No. 2

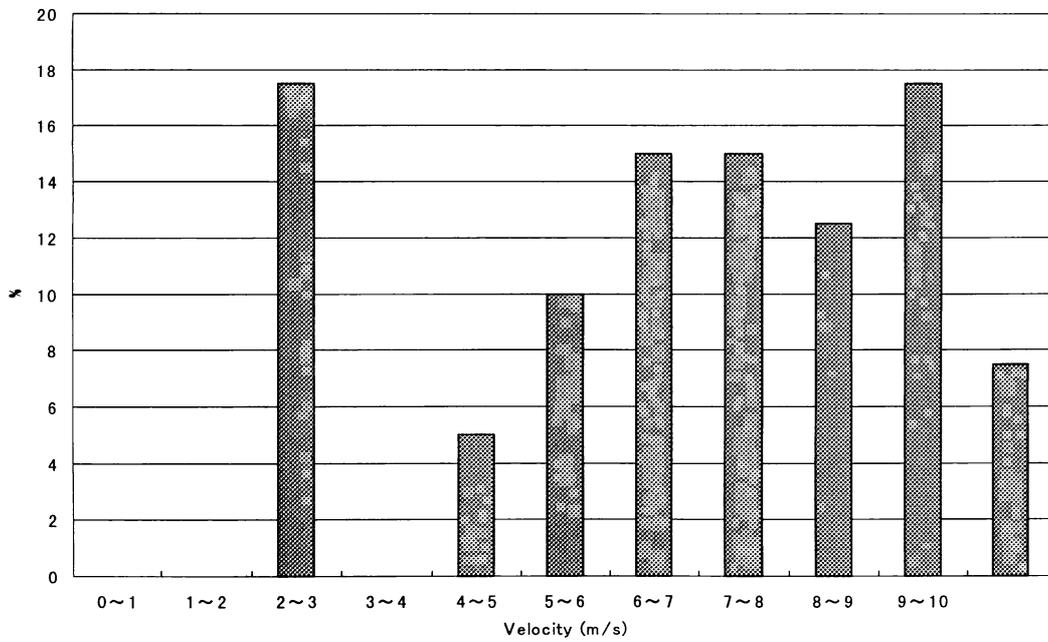
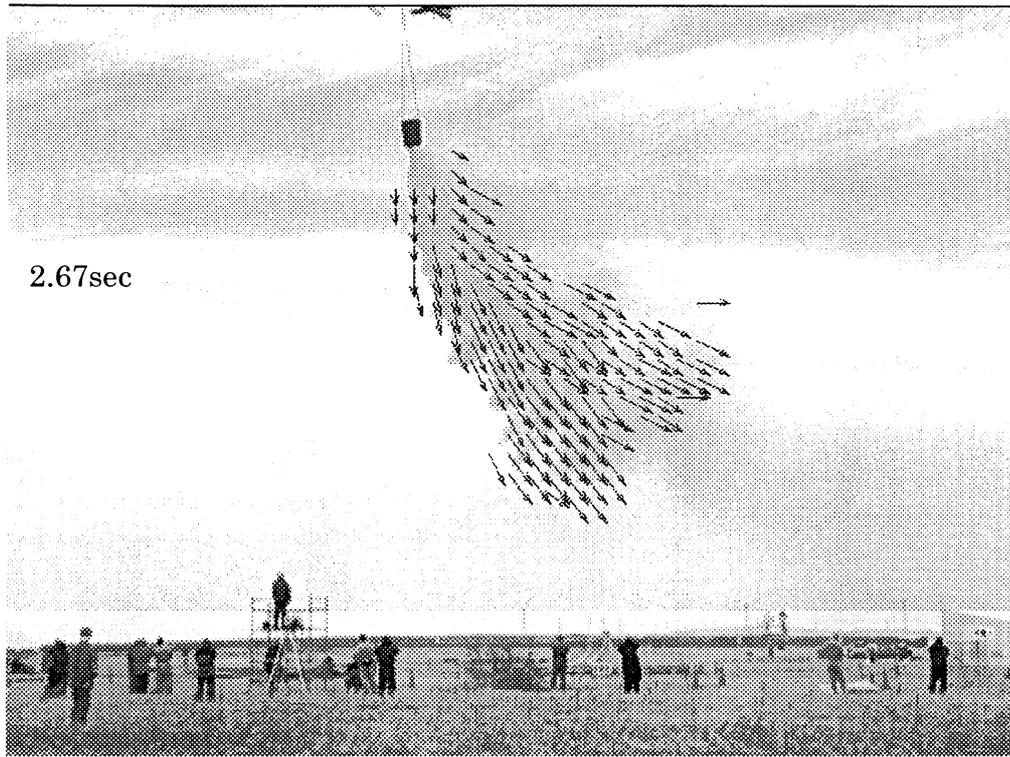


図4-1-5 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始2.67秒後）

第1実験 No. 2

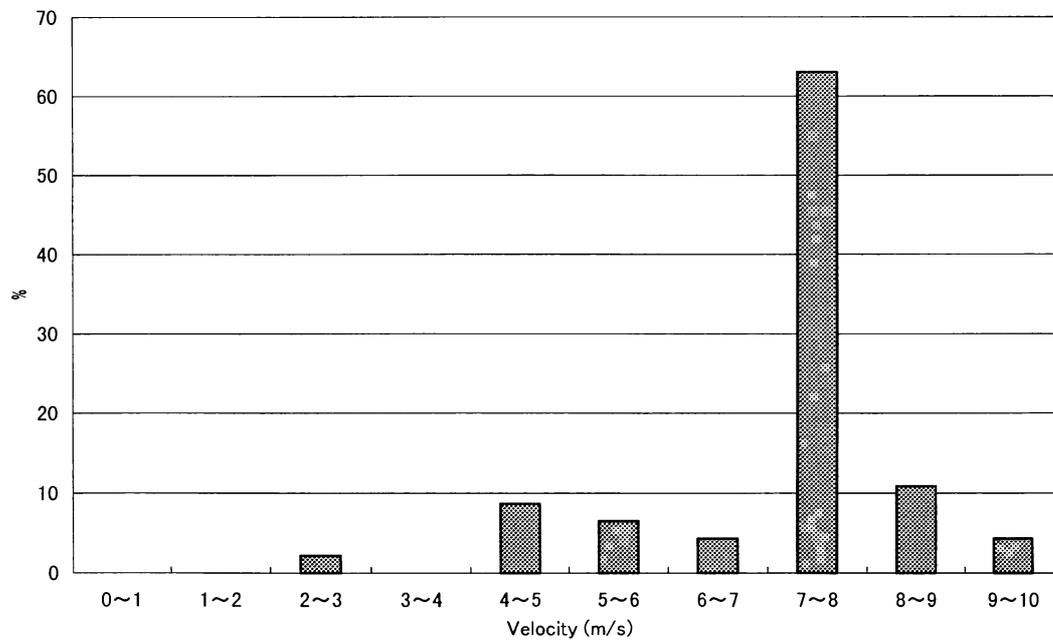
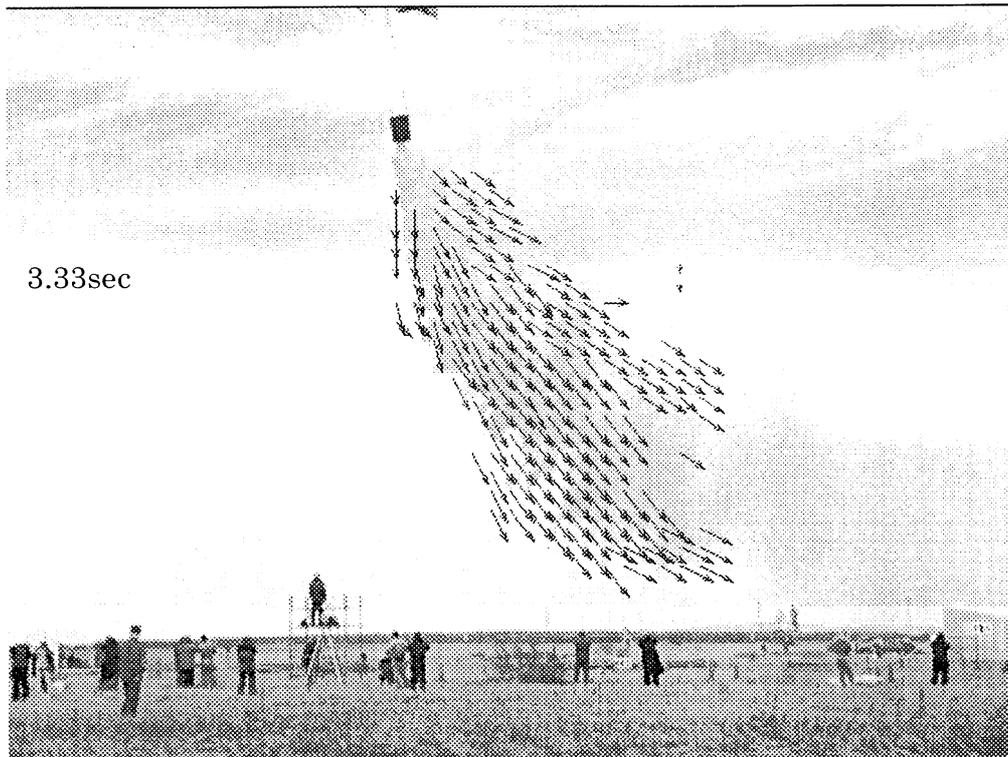


図4-1-6 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始3.33秒後）

(正面) 0.67から3.33秒までの平均値

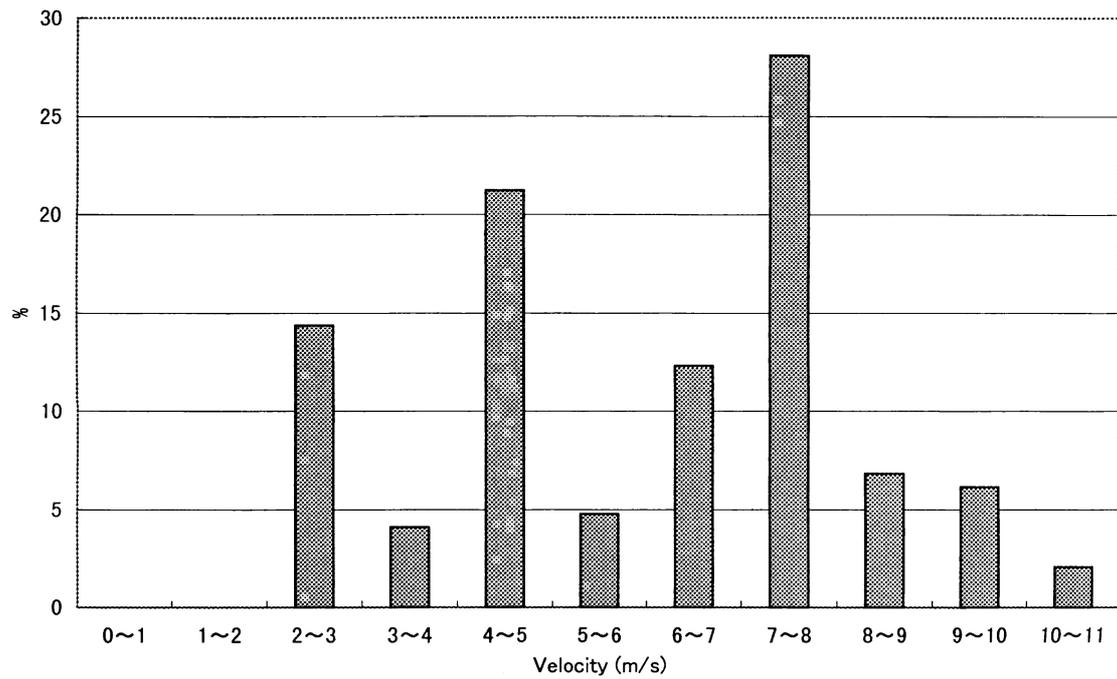


図4-1-7 第1実験 No.2での速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

第1実験 No. 2 (側面)

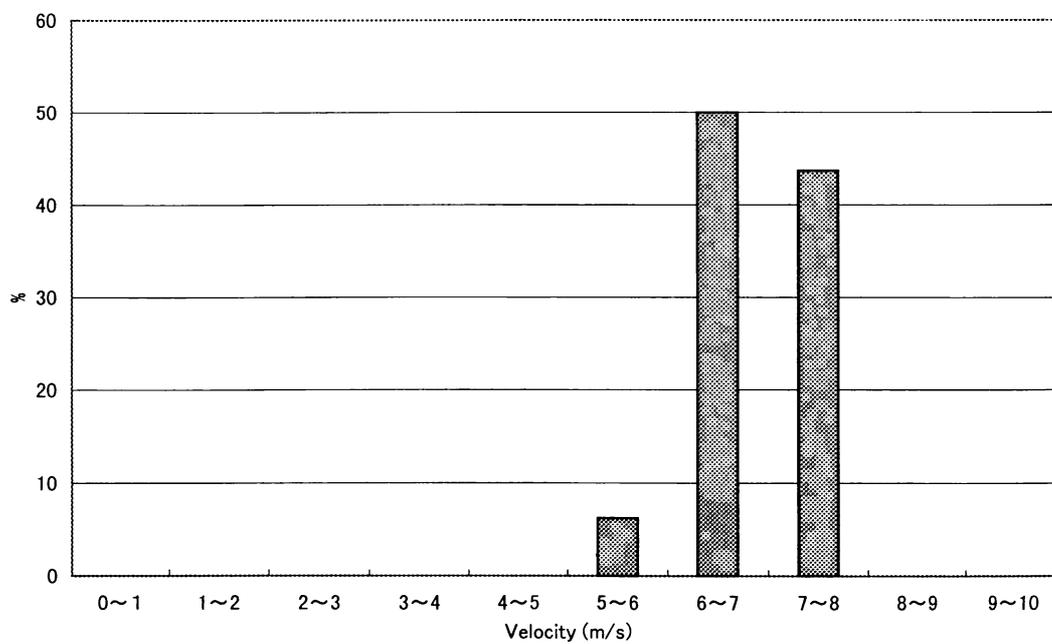
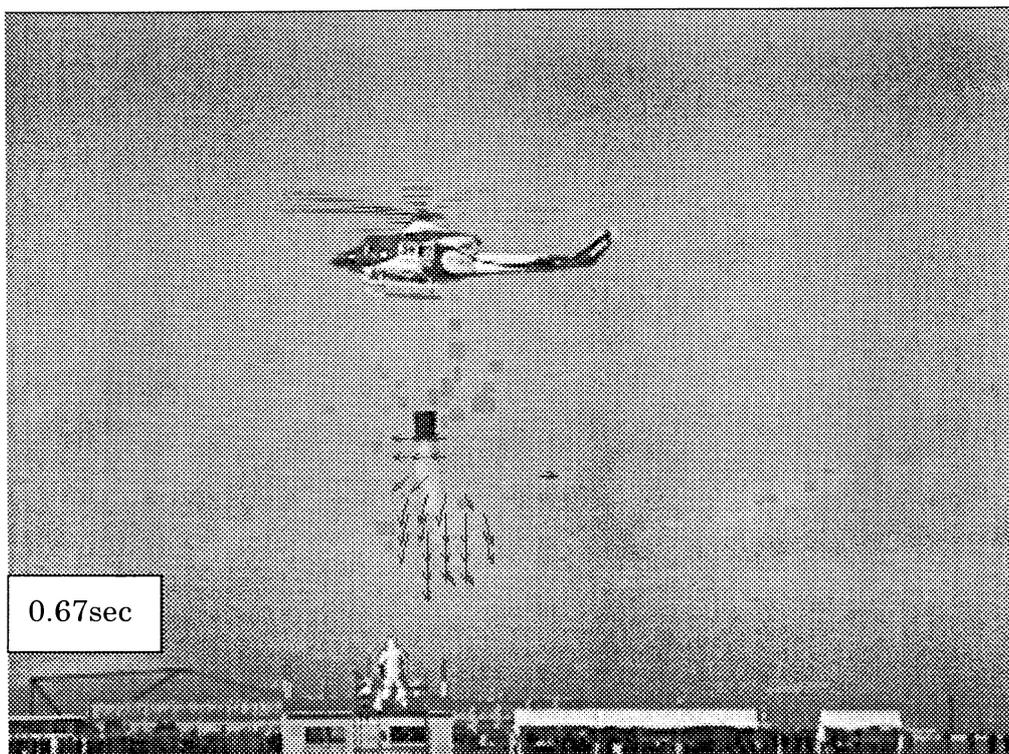


図4-1-8 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布 (放水開始0.67秒後)

第1実験 No. 2

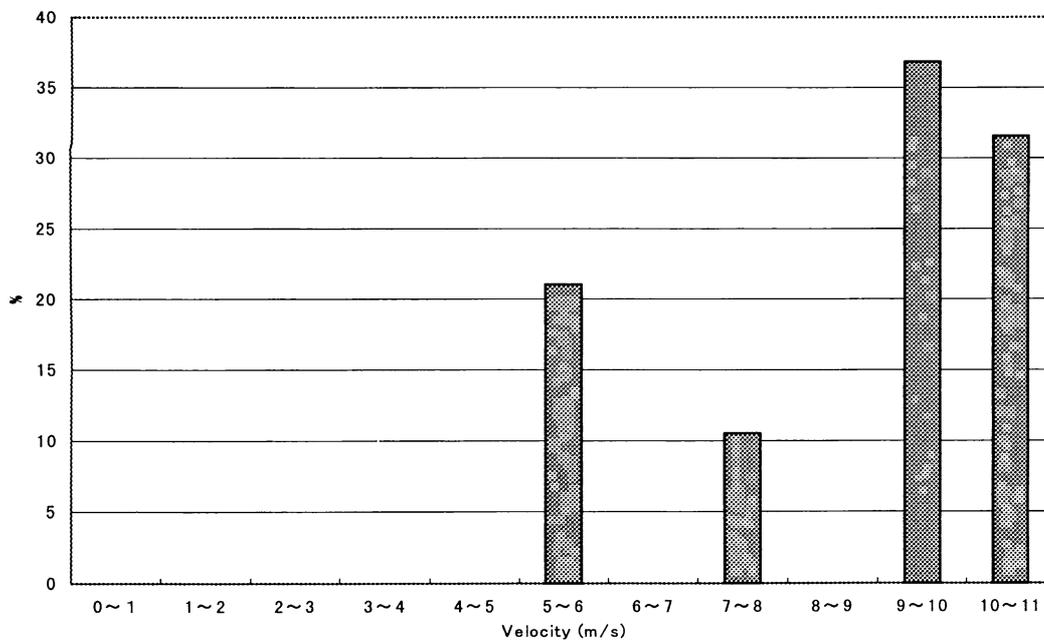
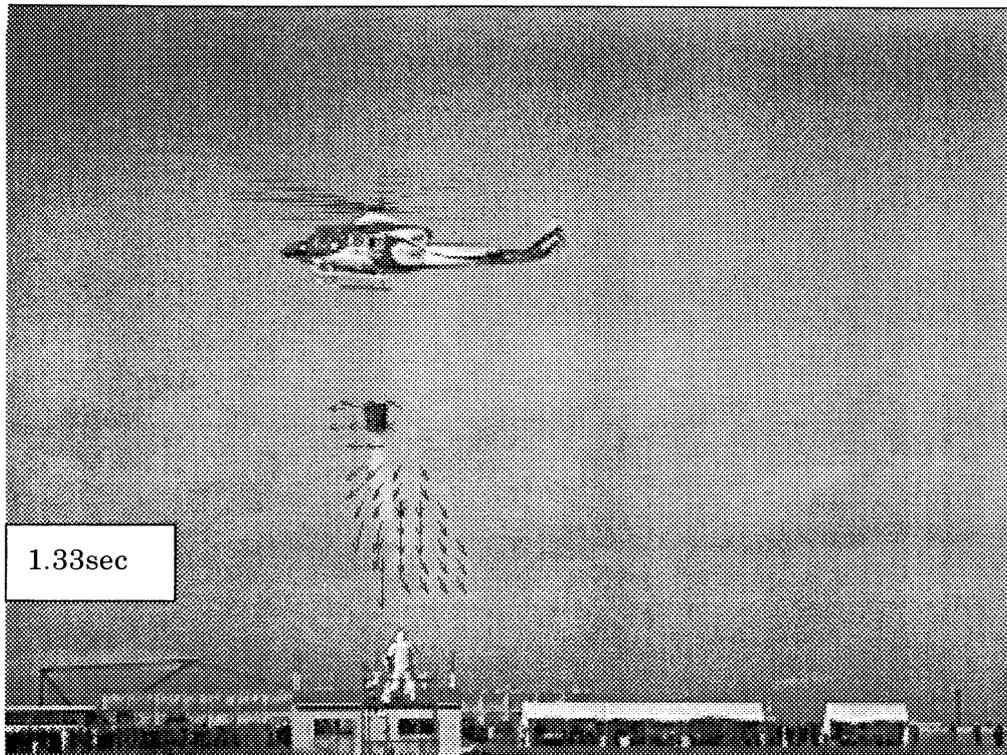


図4-1-9 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始1.33秒後）

第1実験 No. 2

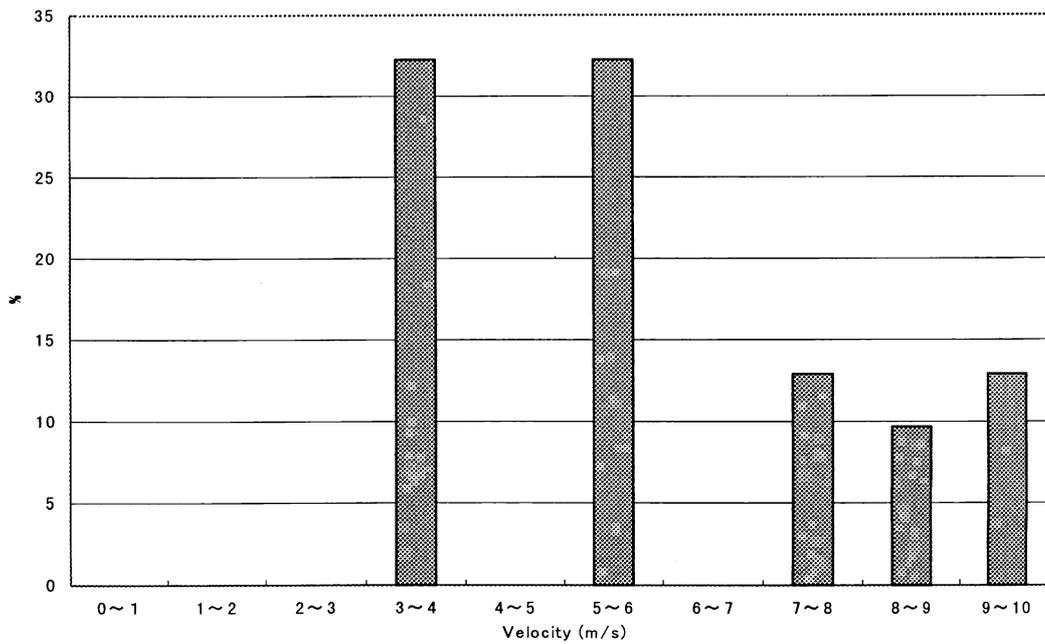


図4-1-10 第1実験 No. 2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始2.00秒後）

第1実験 No. 2

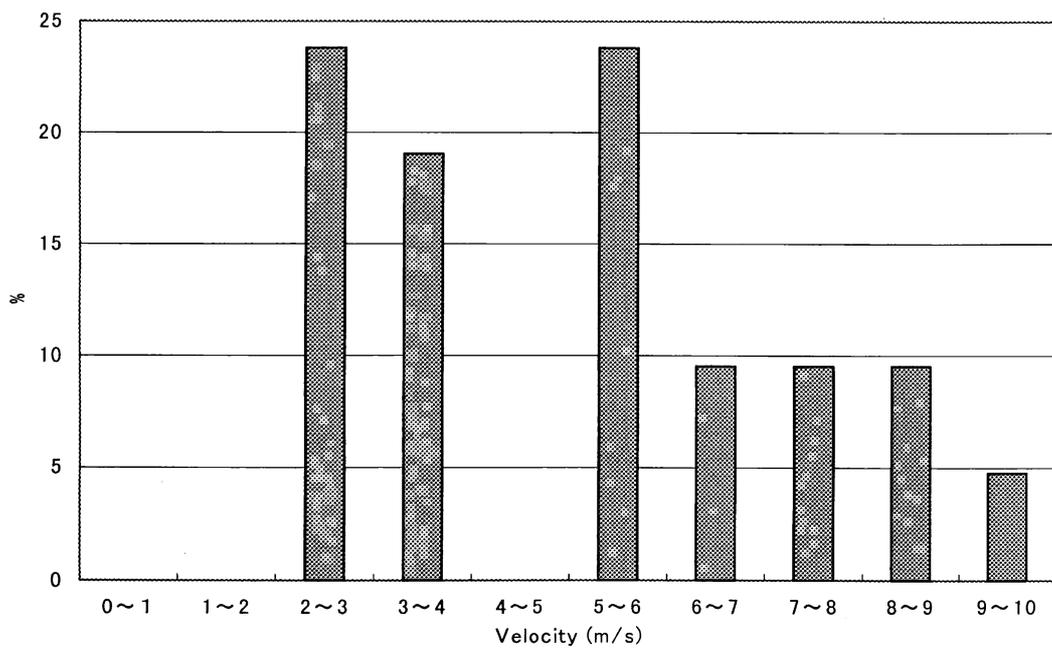
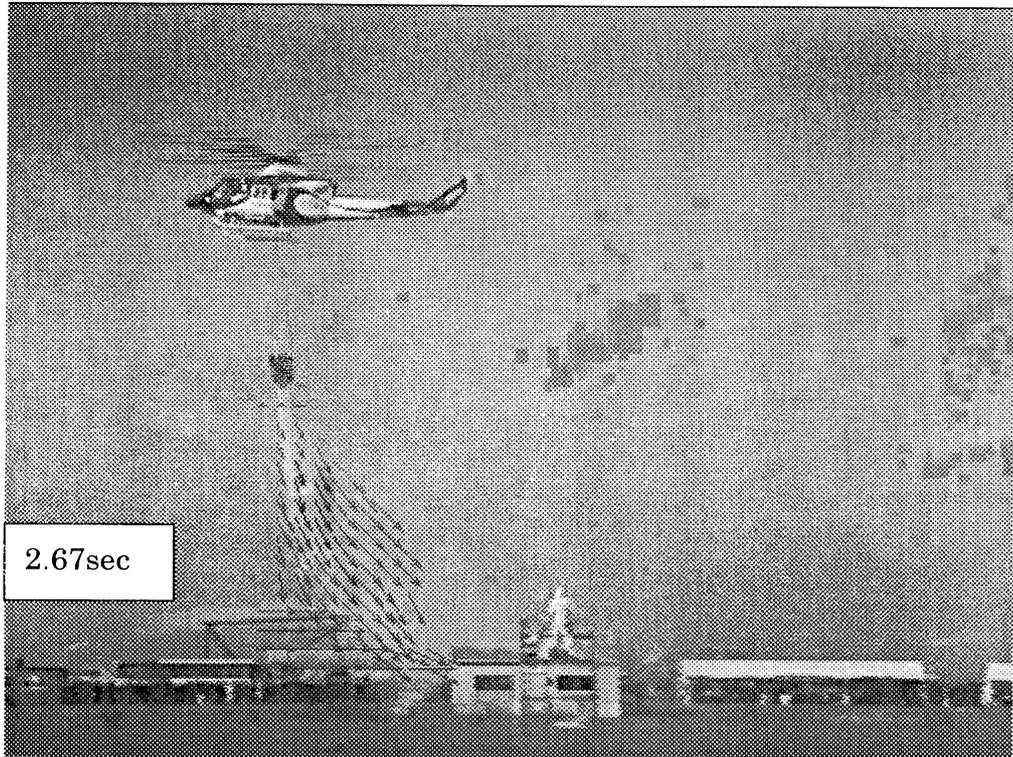


図4-1-11 第1実験 No.2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始2.67秒後）

第1実験 No. 2

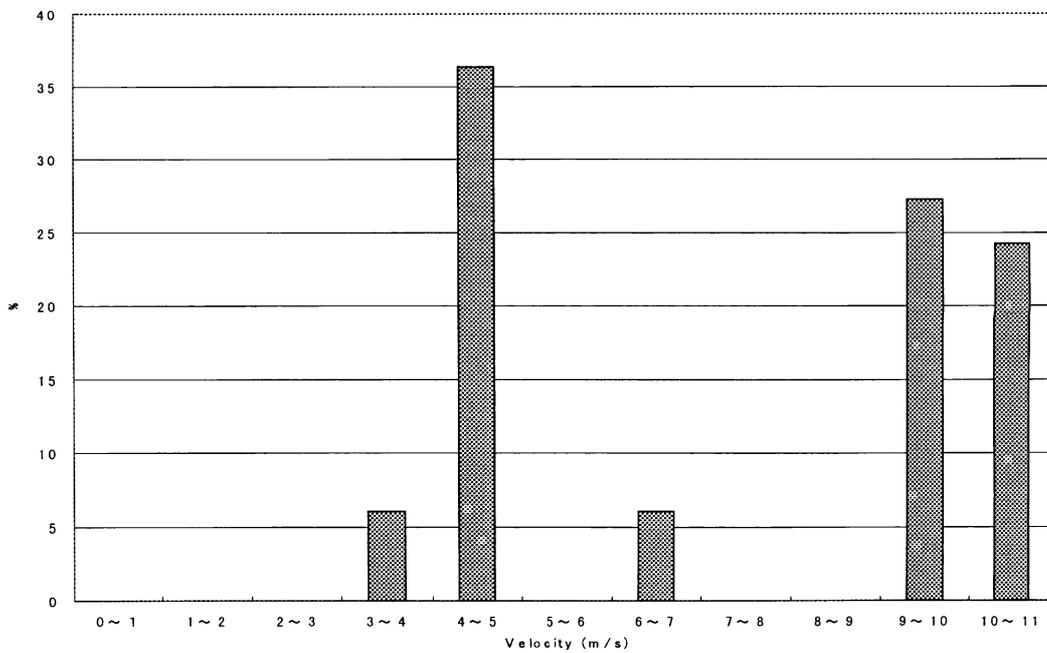
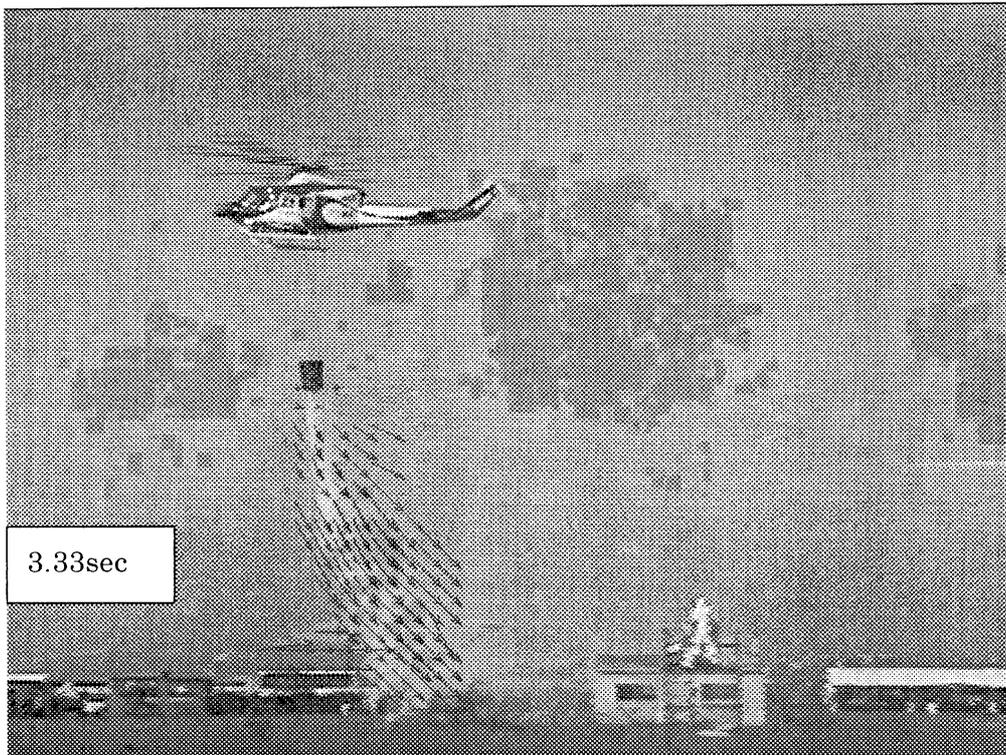


図4-1-12 第1実験 No.2での散水状況のベクトル分布と頻度分布（放水開始3.33秒後）

(側面) 0.67から3.33秒までの平均値

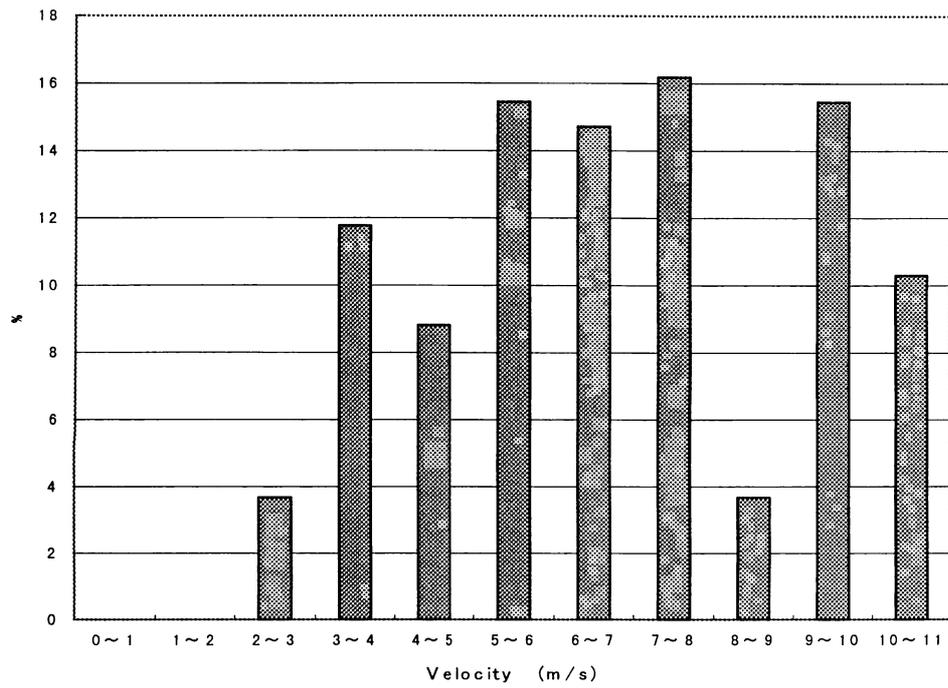
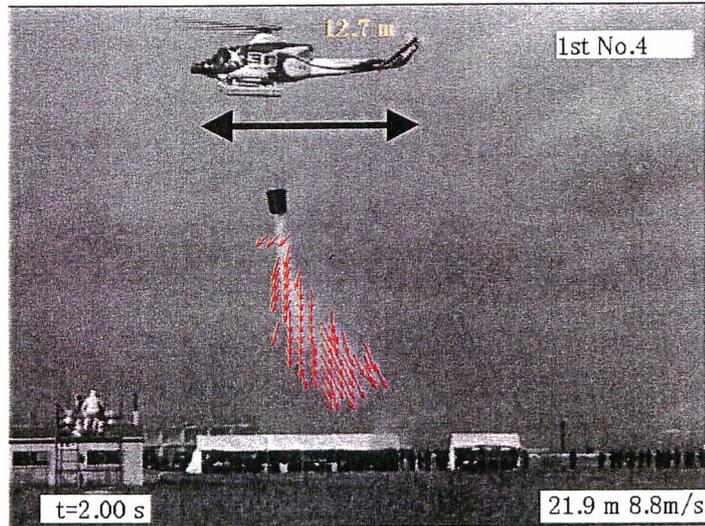


図4-1-13 第1実験 No.2での速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

(A)
ベクトル解析図



(B)
デジタル
カラービデオ
画像



(C)
赤外映像

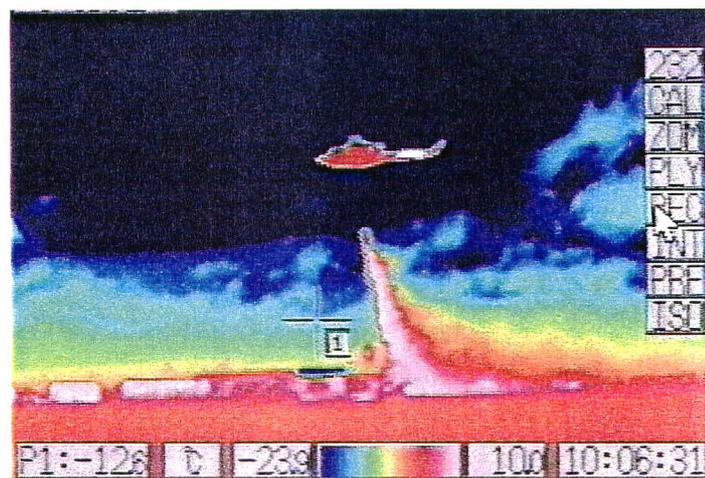


図 4. 2. 1 第 1 実験 - N o . 4 における放水状況

第1実験 No. 4 (正面)

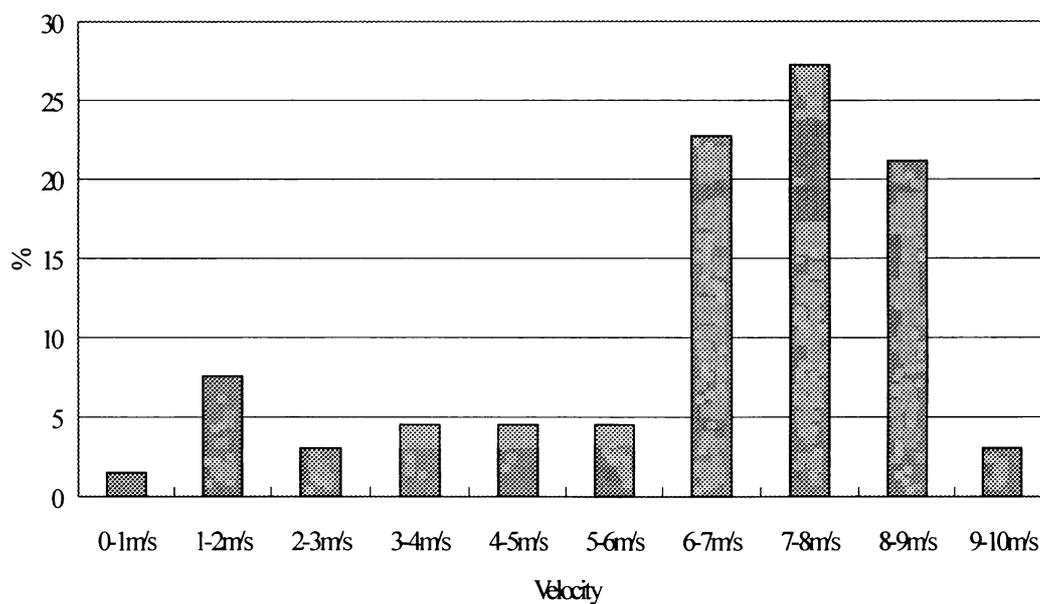


図4-2-2 第1実験 No. 4での散水状況のベクトル分布と頻度分布 (放水開始1.67秒後)

第1実験 No. 4 (側面)

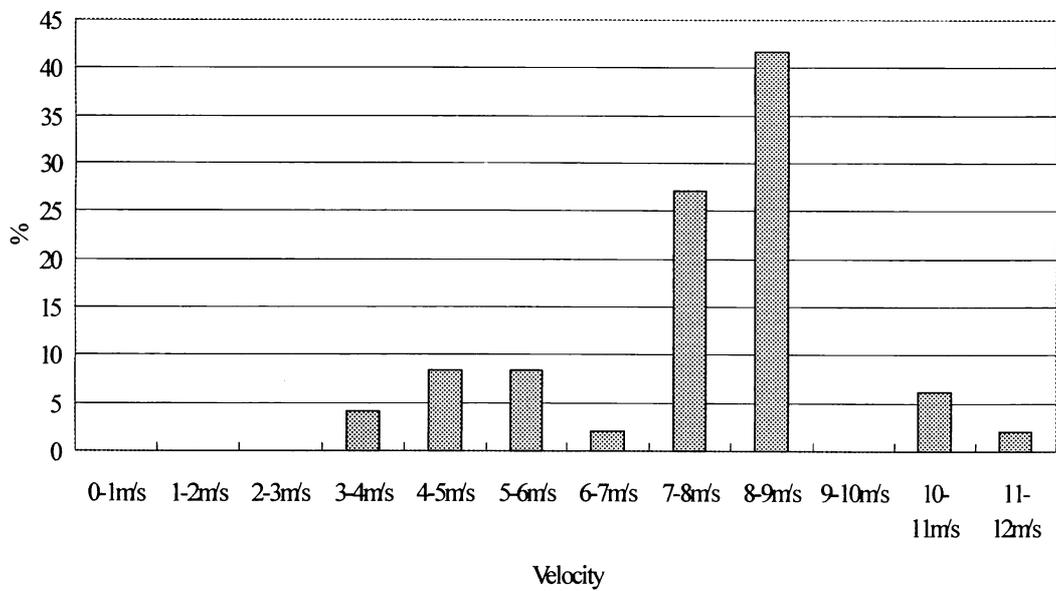
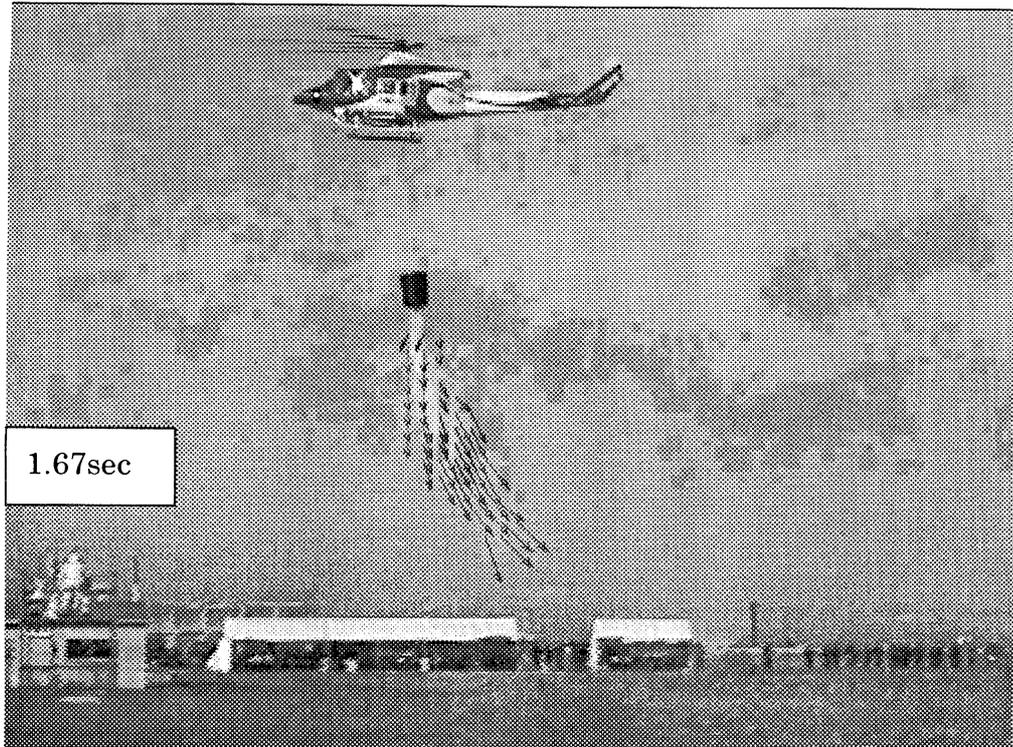


図4-2-3 第1実験 No. 4での散水状況のベクトル分布と頻度分布 (放水開始1.67秒後)

クトルの頻度分布の時間平均値を示す。この図からも、散水継続中において速度 $7 - 9 \text{ m/s}$ の成分が最も多いことがわかる。

4. 3. 3 第1実験-No. 6 散水実験

第1実験-No. 6の散水実験では、放水中に命中精度を上げるため、ヘリコプターはホバリングによりほぼ空中に停止していた。飛行高度は No. 2 や No. 4 と同様 $22 - 23 \text{ m}$ でかなり低い。風速は約 $6 - 7 \text{ m/s}$ であった。この状況における速度ベクトルを解析した。図 4. 3. 1 から図 4. 3. 2 に散水開始 1.67 秒から 3.33 秒までの速度ベクトル解析結果を示す。この場合、散水開始後 1.67 秒から 3.33 秒までほとんど散水パターンは一定であった。また、図 4. 3. 3 に散水開始 1.67 秒から 4.00 秒までの速度ベクトルの頻度分布の時間平均値を示す。 $8 - 9 \text{ m/s}$ の速度成分が圧倒的に多いことがわかる。

4. 3. 4 第2実験-No. 1 散水実験

第2実験では家屋の火災に散水が行われた。第2実験-No. 1の散水実験では放水はかなり高い高度 (37.5 m) から行われた。このため、図 4. 4. 1 の赤外映像に示すように地面付近ではほとんどの散水が霧状になっていることがわかる。図 4. 4. 2 から図 4. 4. 7 に正面側からの散水パターンと速度ベクトル解析結果を示す。併せて、各時刻において、 1 m/s ごとに集計した速度ベクトルの出現頻度分布を図 4. 4. 8 に示す。 $8 - 9 \text{ m/s}$ の速度成分が最も多く、 $9 - 10 \text{ m/s}$ の成分がこれに次いで多い。さらに、図 4-4-9 から図 4-4-14 に、側面側からの散水パターンと速度ベクトル解析結果を示す。併せて、各時刻において、 1 m/s ごとに集計した速度ベクトルの出現頻度分布を図 4. 4. 15 示す。 $8 - 9 \text{ m/s}$ の速度成分が際立って多い。これは、第1実験の場合とあまり変わらない。

4. 3. 5 画像解析結果のまとめ

第1実験-No. 2の側面側の映像に対する速度ベクトルの解析の結果では、 $7 - 8 \text{ m/s}$ の速度成分がもっとも多く、側面側では、 $7 - 8 \text{ m/s}$ の速度の成分が最多で $9 - 10 \text{ m/s}$ の成分も多かった。また、第1実験-No. 4の解析では、速度 $7 - 9 \text{ m/s}$ の成分が最も多かった。さらに、第1実験-No. 6の解析では、 $8 - 9 \text{ m/s}$ の速度成分が圧倒的に多かった。

建物火災に対する散水が行われた第2実験の No. 1散水実験では、放水はかなり高い高度 (37.5 m) から行われ地面付近ではほとんどの水が霧状になったが、速度ベクトルの頻度分布では、 $8 - 9 \text{ m/s}$ の速度成分が際立って多く、第1実験の場合とあまり変わらない結果が得られた。

(正面) 1. 00秒～4.00秒までの平均値

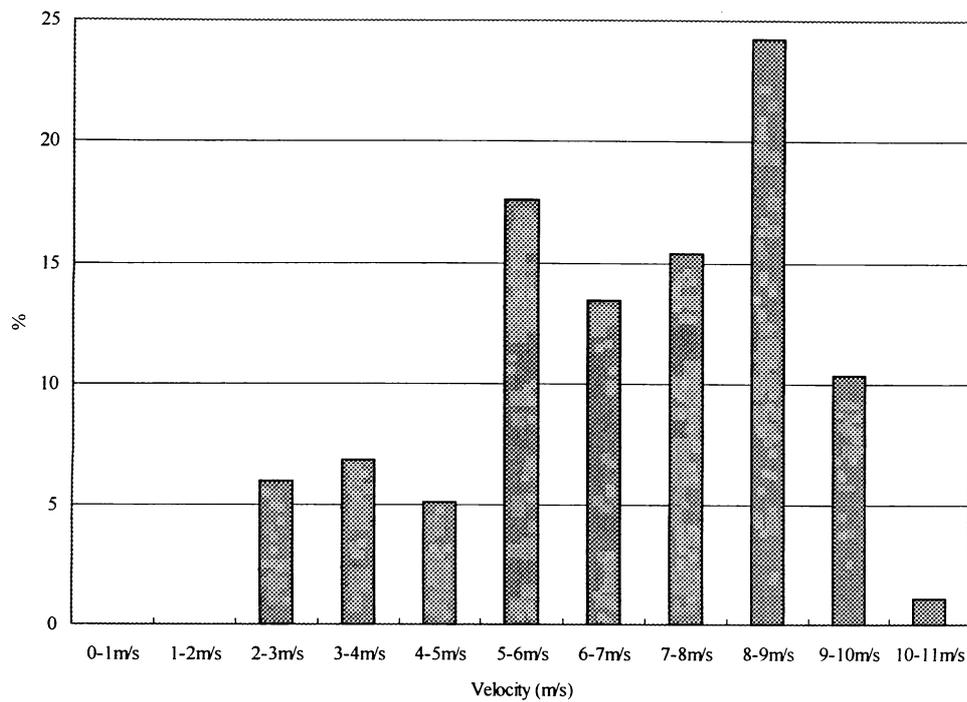


図4-2-4 第1実験 No.4での散水状況での速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

(側面) 1. 00秒～4.00秒までの平均値

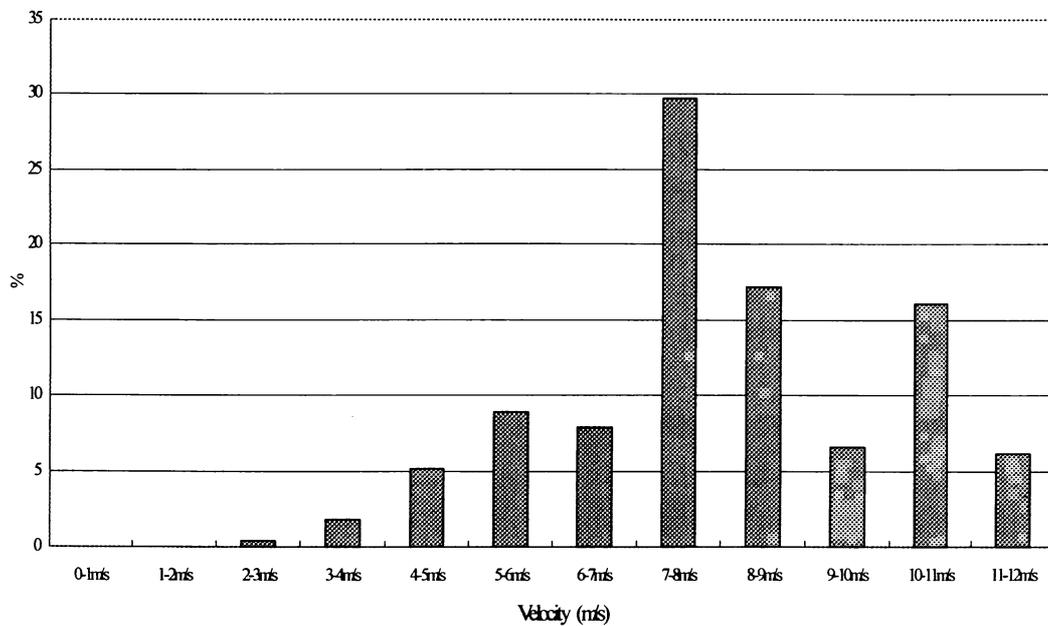


図4-2-5 第1実験 No.4での散水状況での速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

第1実験 No. 6 (高度: 23.7m、速度: 8.0m/s - 投下時ほぼ静止)

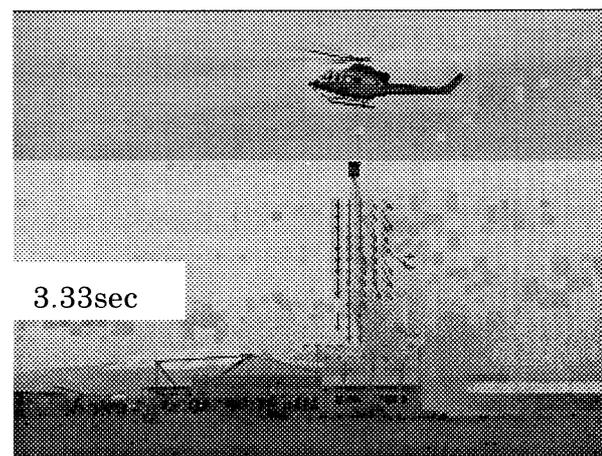
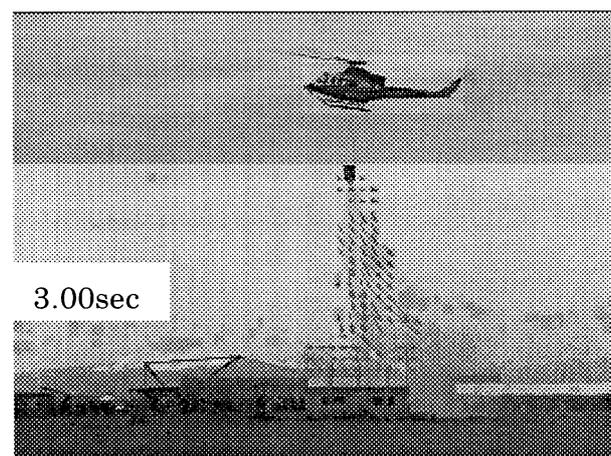
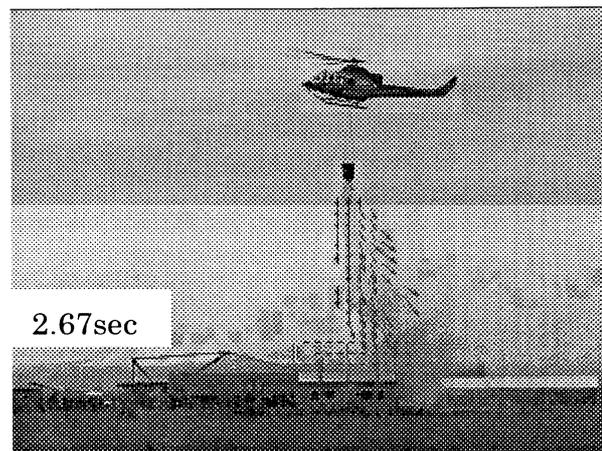
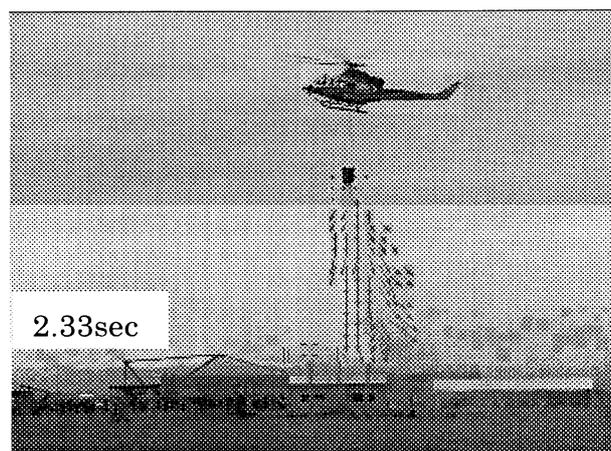
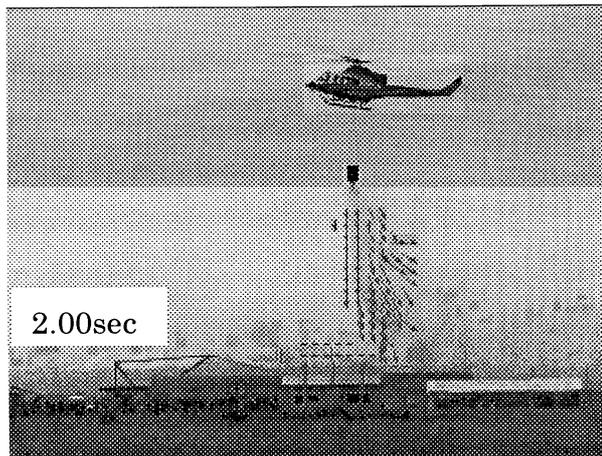
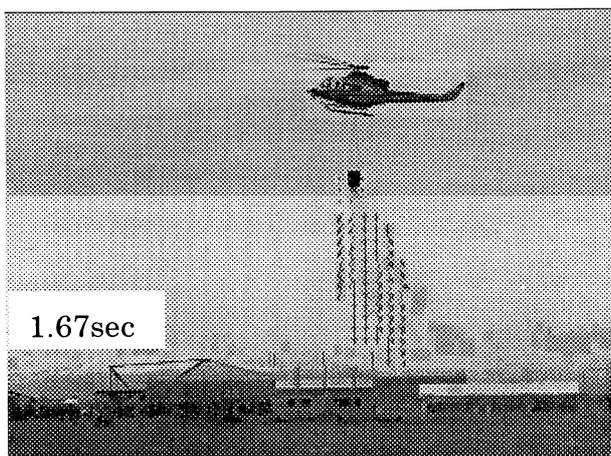


図4-3-1 第1実験 No.6散水実験の落下水の速度ベクトル
(1.0-3.33S) (ほとんど静止状態での放水)

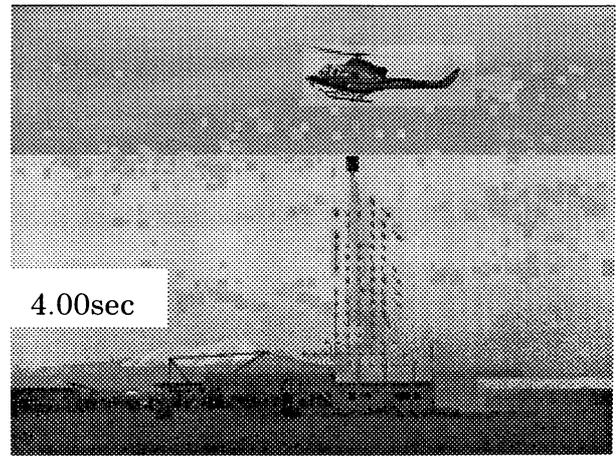
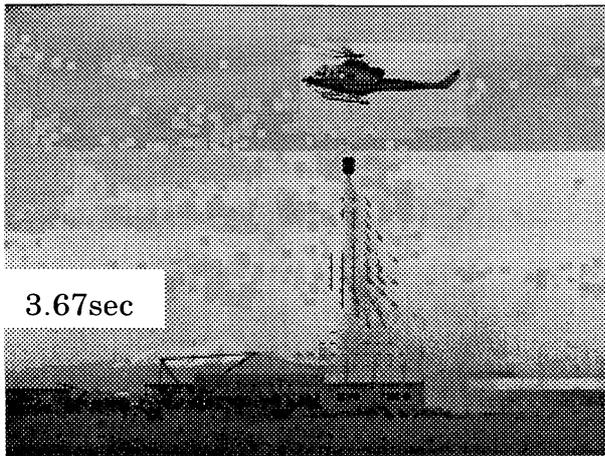


図4-3-2 第1実験 No.6散水実験における落下水の速度ベクトル
(3.67-4.00s) (ほぼ停止状態)

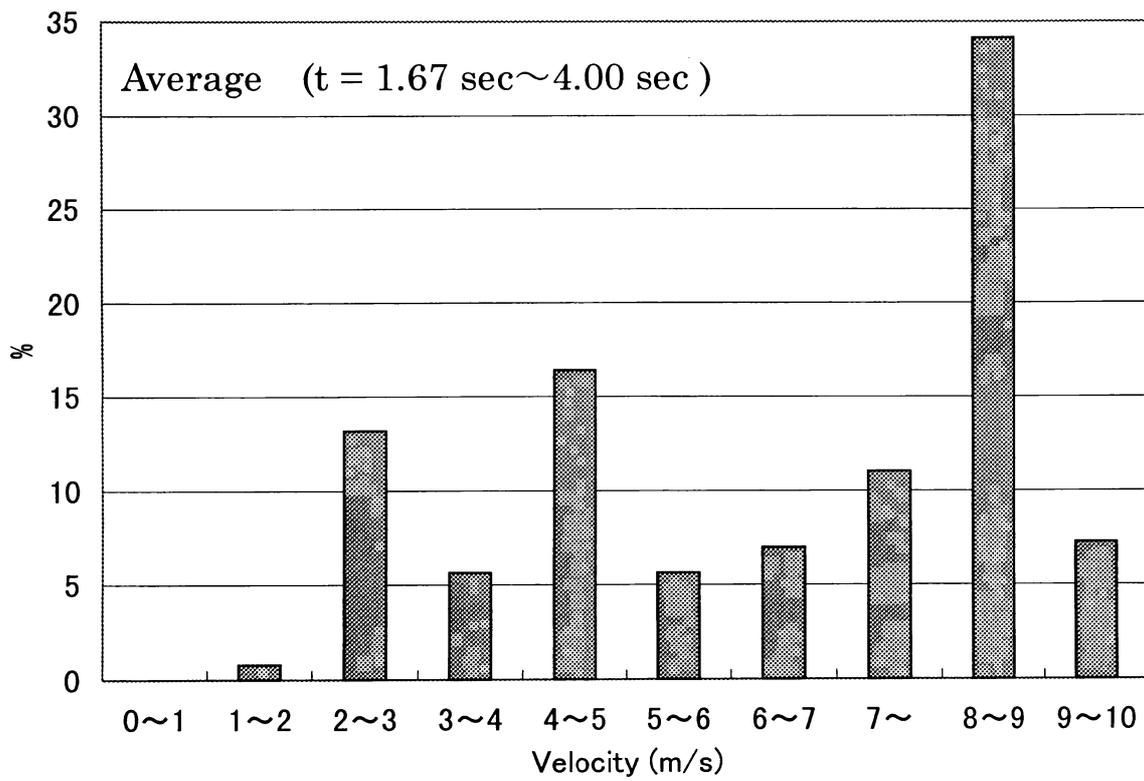
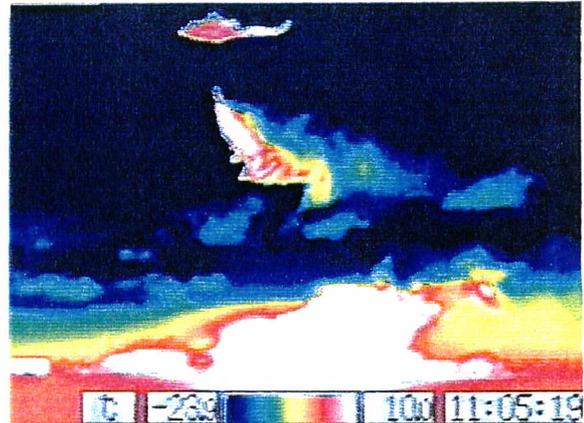
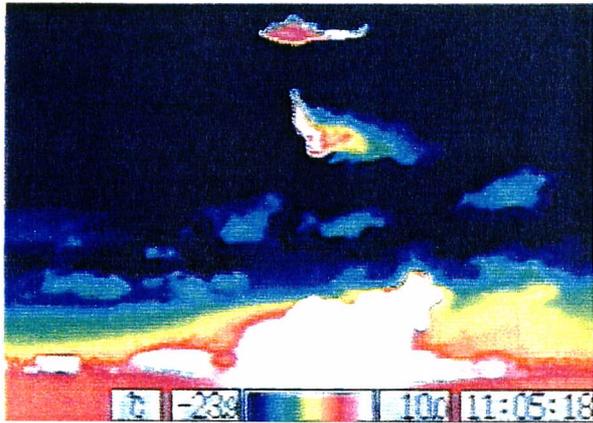


図4-3-3 第1実験 No.6散水実験の落下水の速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

第2実験-N o. 1 放水実験 飛行高度：38.0m、飛行速度：9.8 m/s

t = 1.0 秒

t = 2.0 秒



t = 3.0 秒

t = 3.9 秒

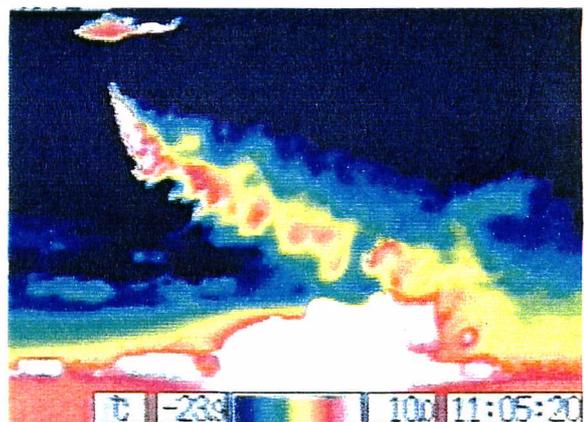
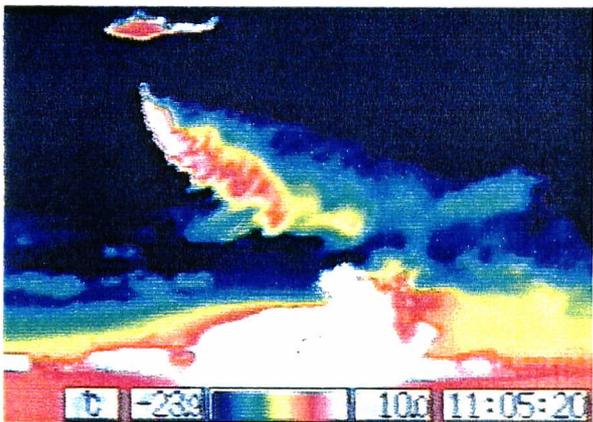


図 4. 4. 1 第2実験-N o. 1 放水実験における赤外映像
(最高温度設定 = 10°C、中央下の白い部分は火災)

第2実験 No. 1 (正面) 飛行高度: 38.0m、飛行速度: 9.6 m/s

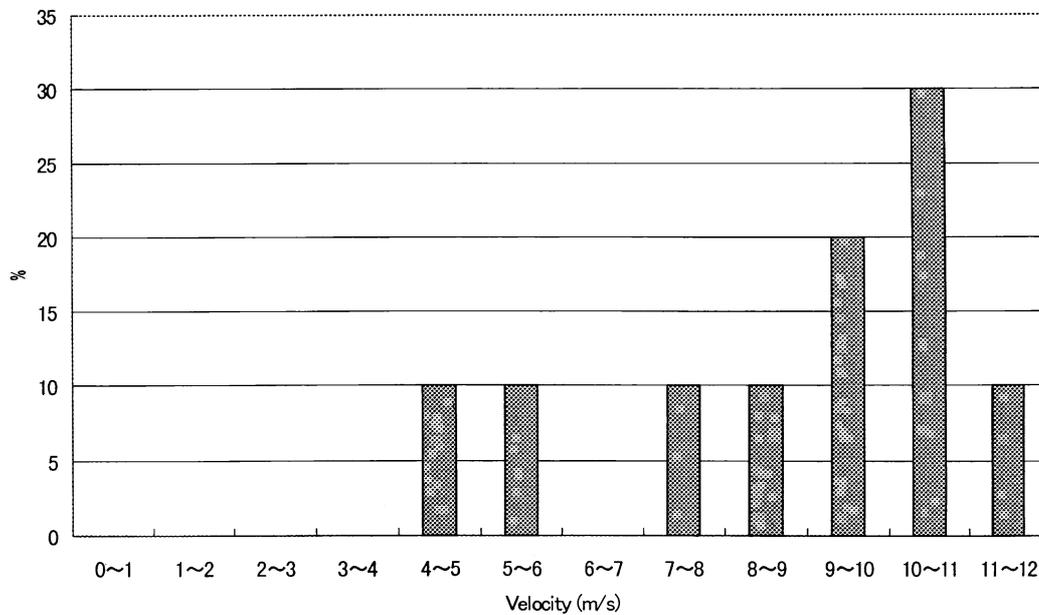
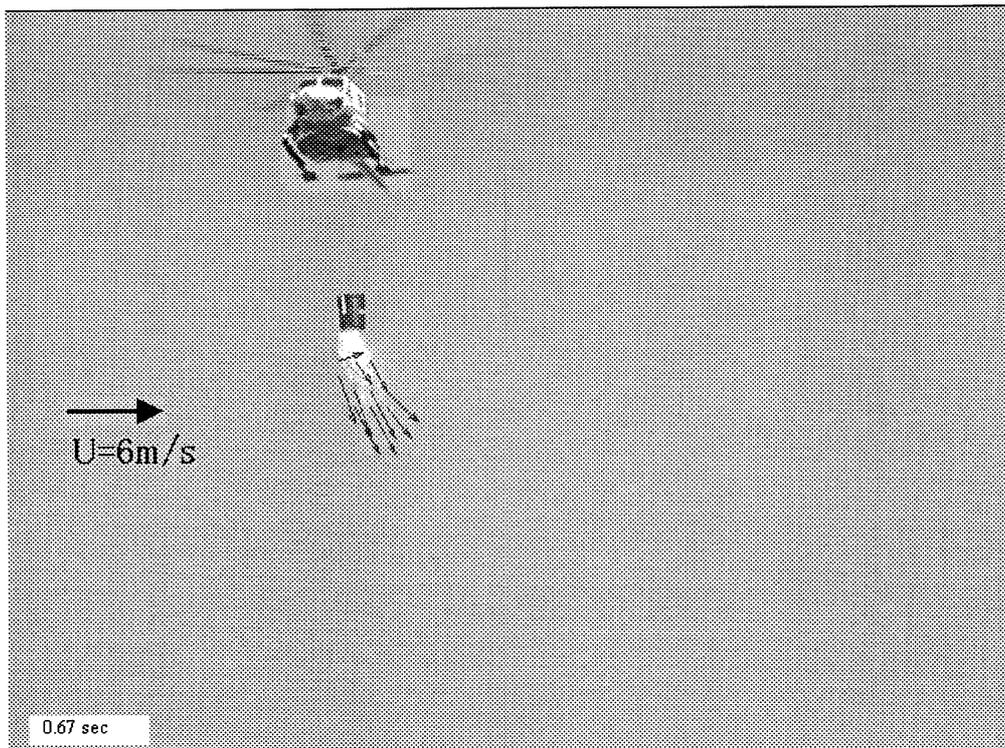


図4-4-2 第2実験 No. 1散水実験における落水の速度ベクトル (t=0.67S)

第2実験 No. 1

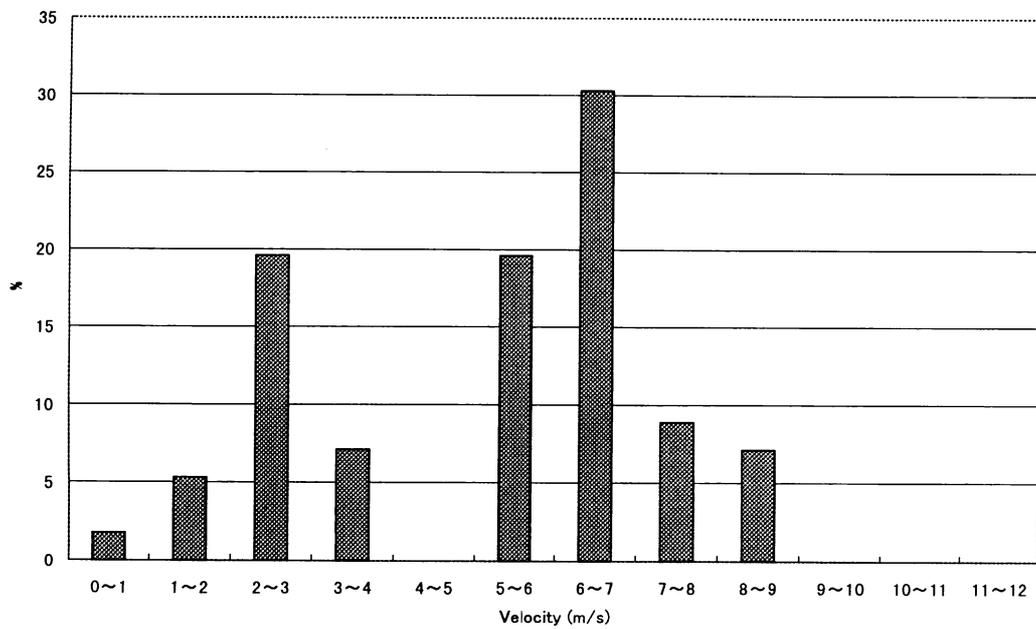
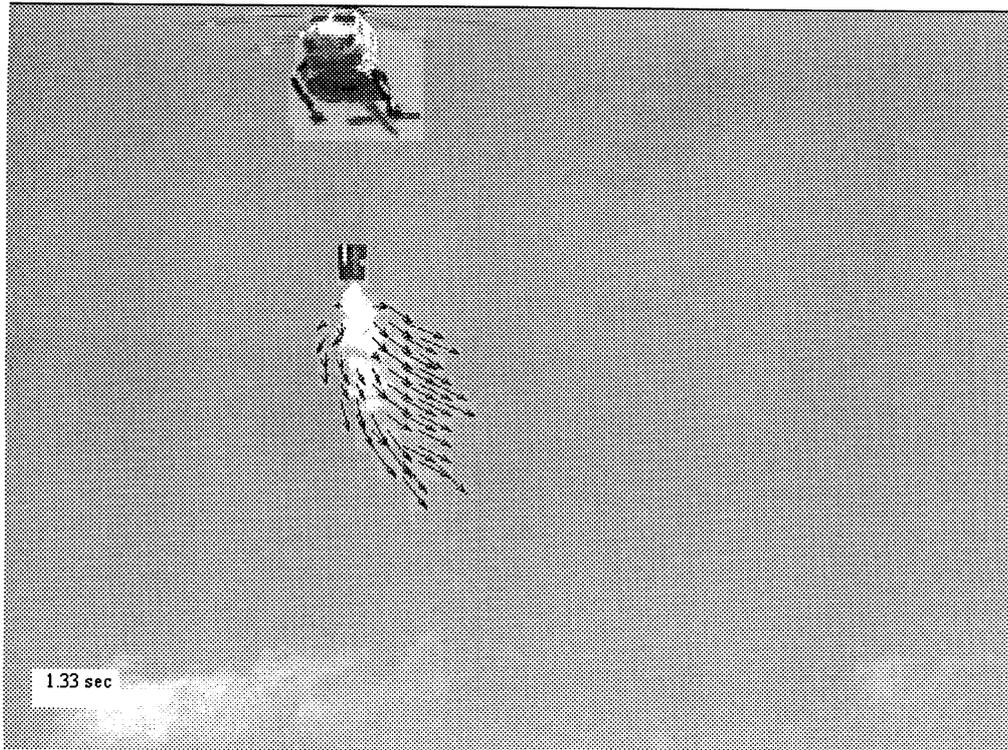


図4-4-3 第2実験 No. 1散水実験における落下水の速度ベクトル (t=1.33s)

第2実験 No. 1

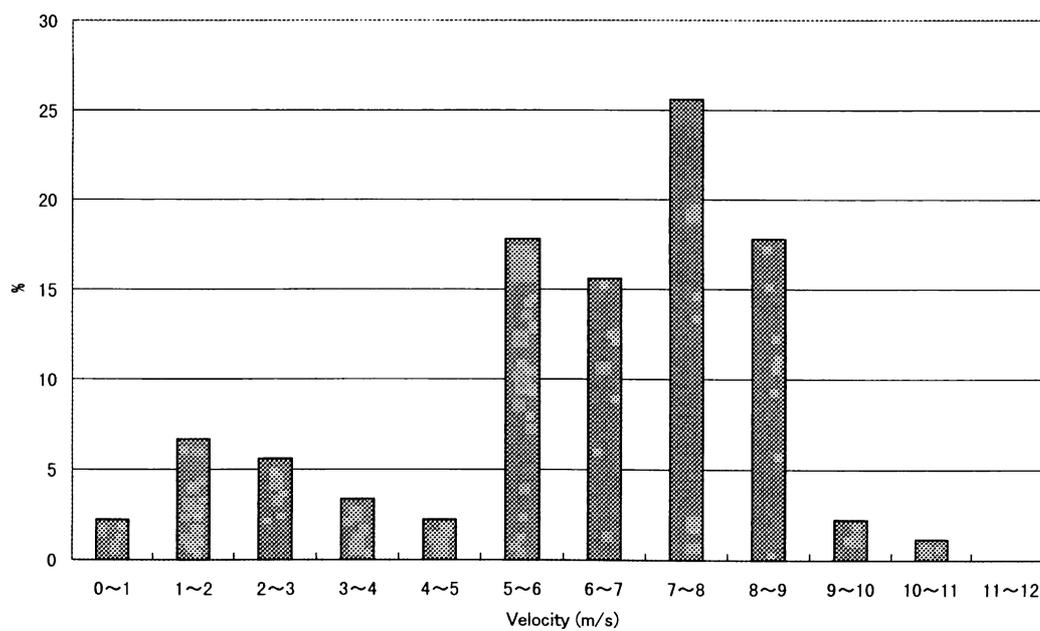
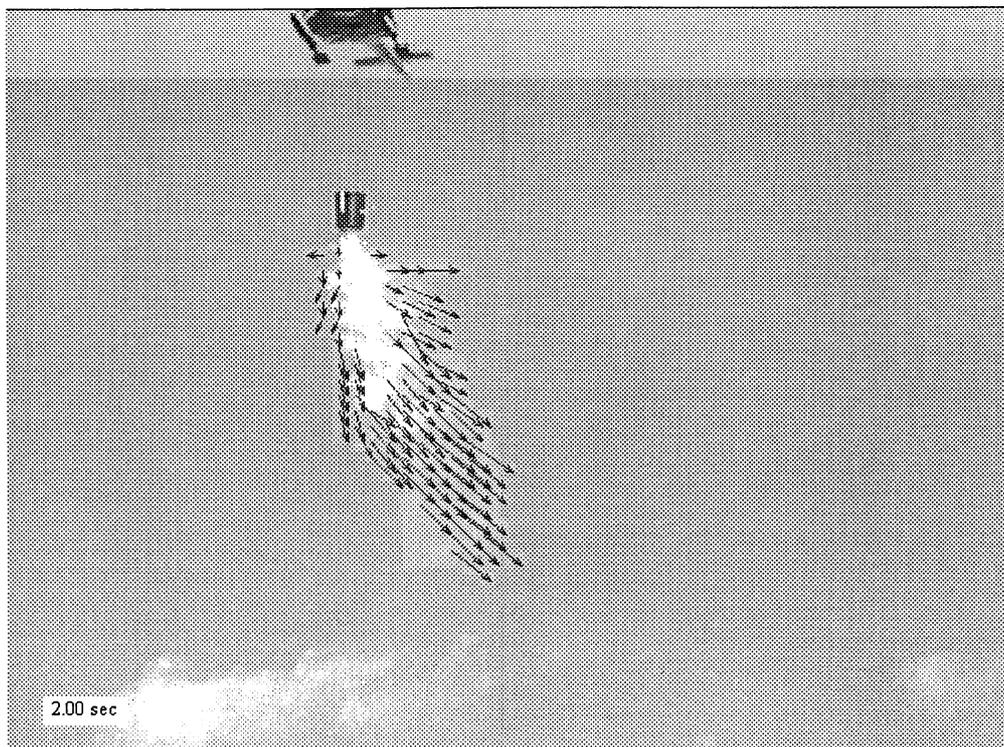


図4-4-4 第2実験 No.1散水実験における落水の速度ベクトル
($t=2.00S$)

第2実験 No. 1

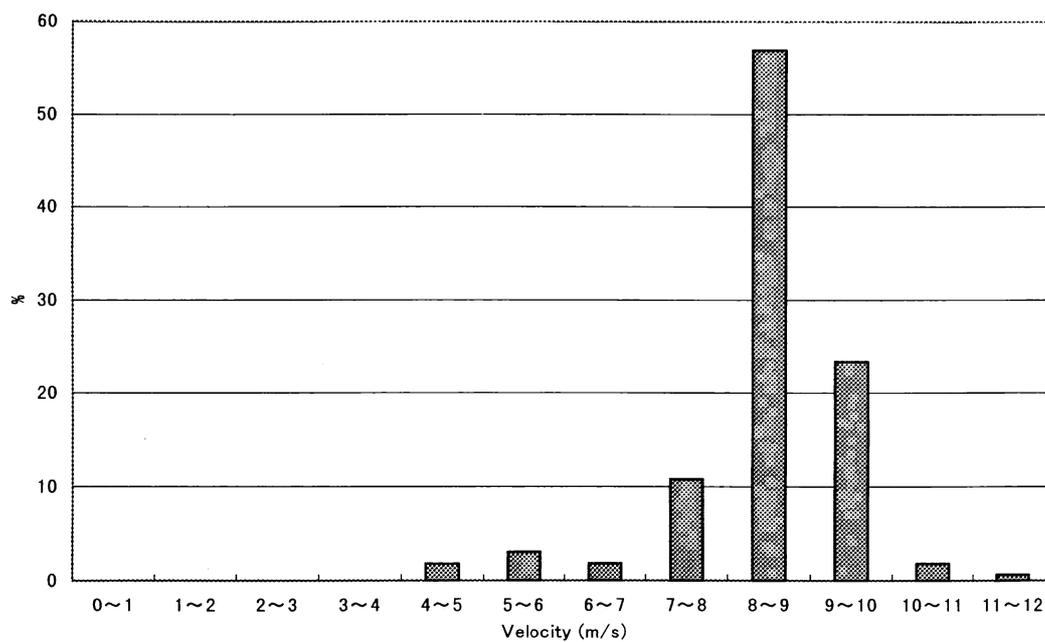
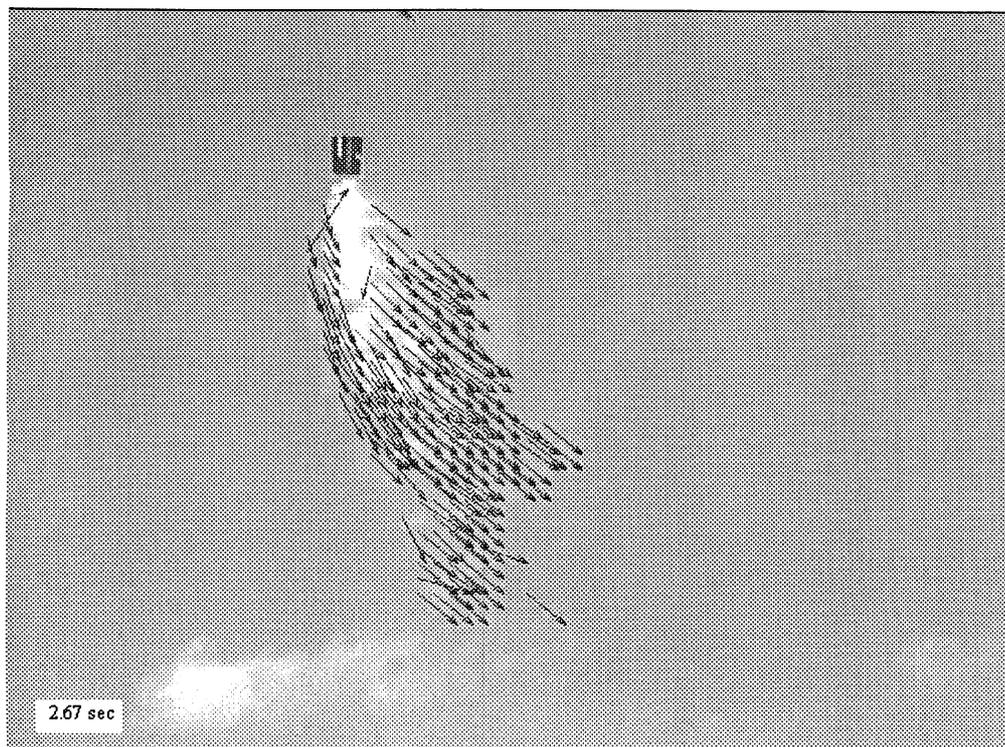


図4-4-5 第2実験 No.1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=2.67\text{S}$)

第2実験No. 1

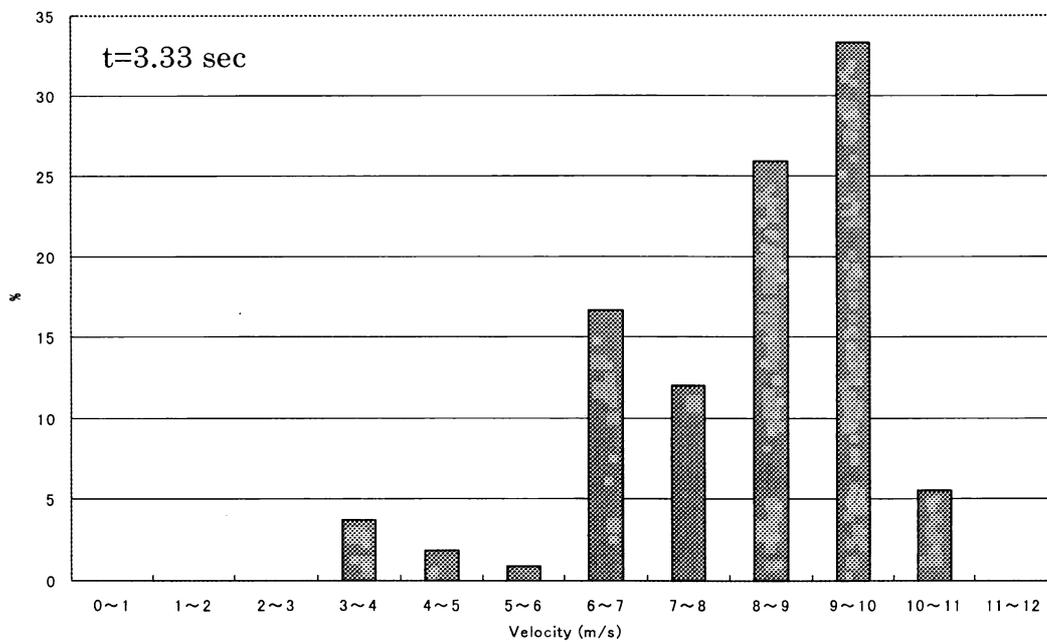
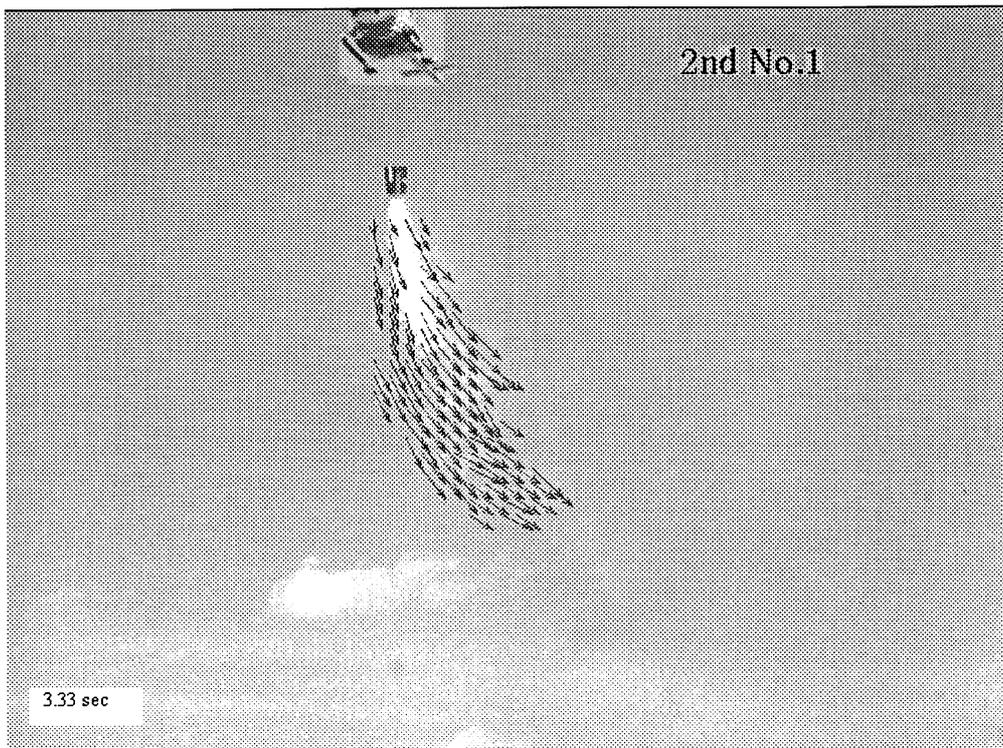


図4-4-6 第2実験 No.1散水実験における落下水の水速度ベクトル (t=3.33S)

第2実験 No. 1

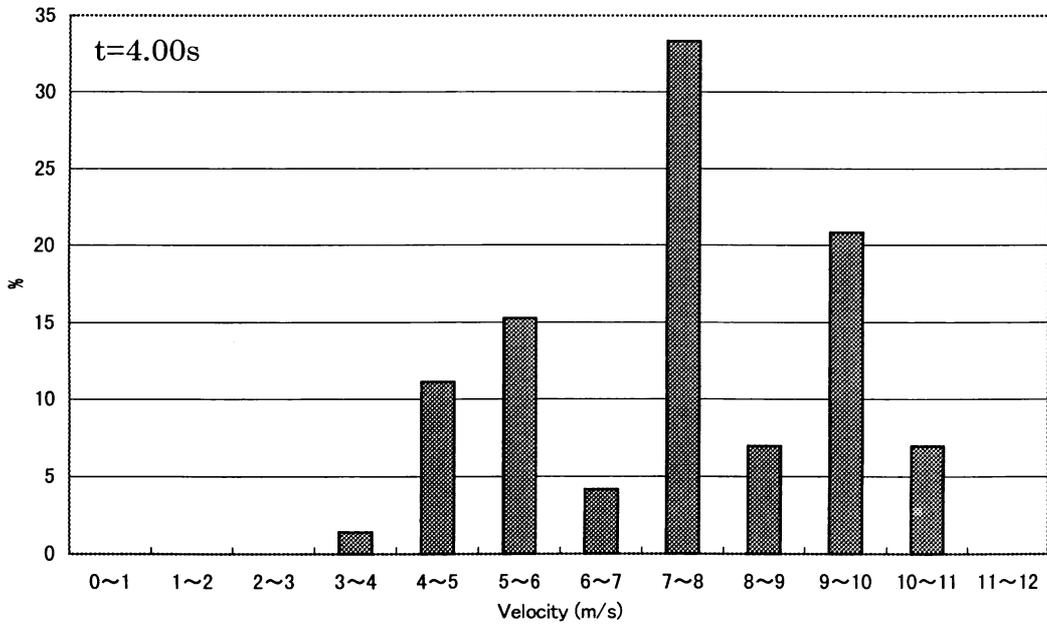
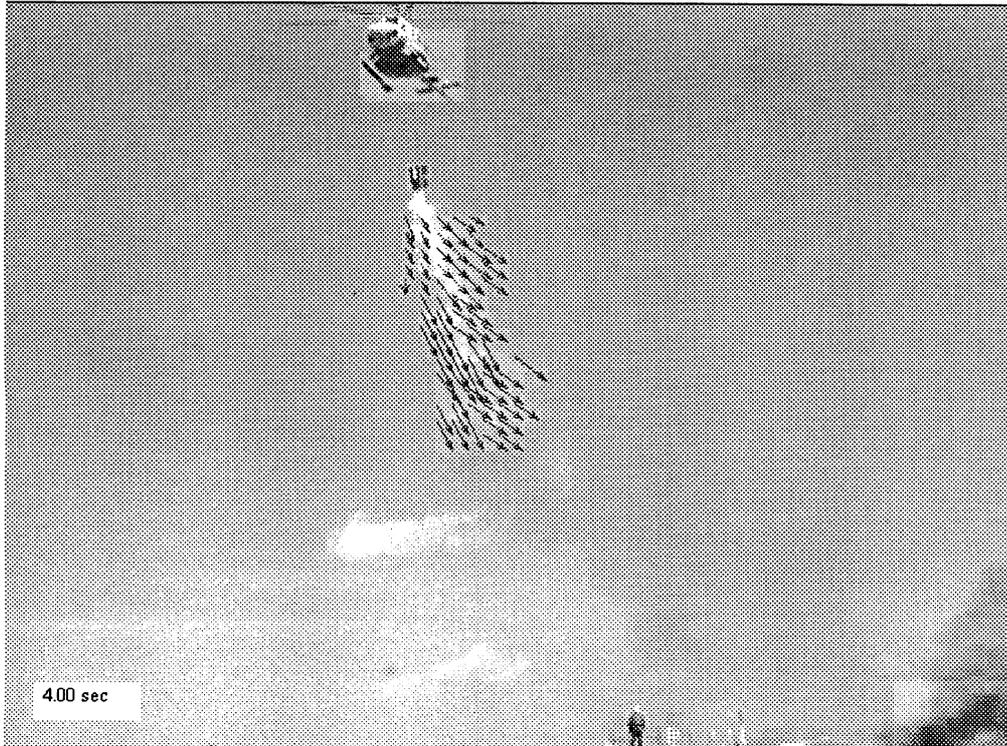


図4-4-7 第2実験 No.1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=4.00s$)

(正面) 1. 00～4.00秒までの平均値

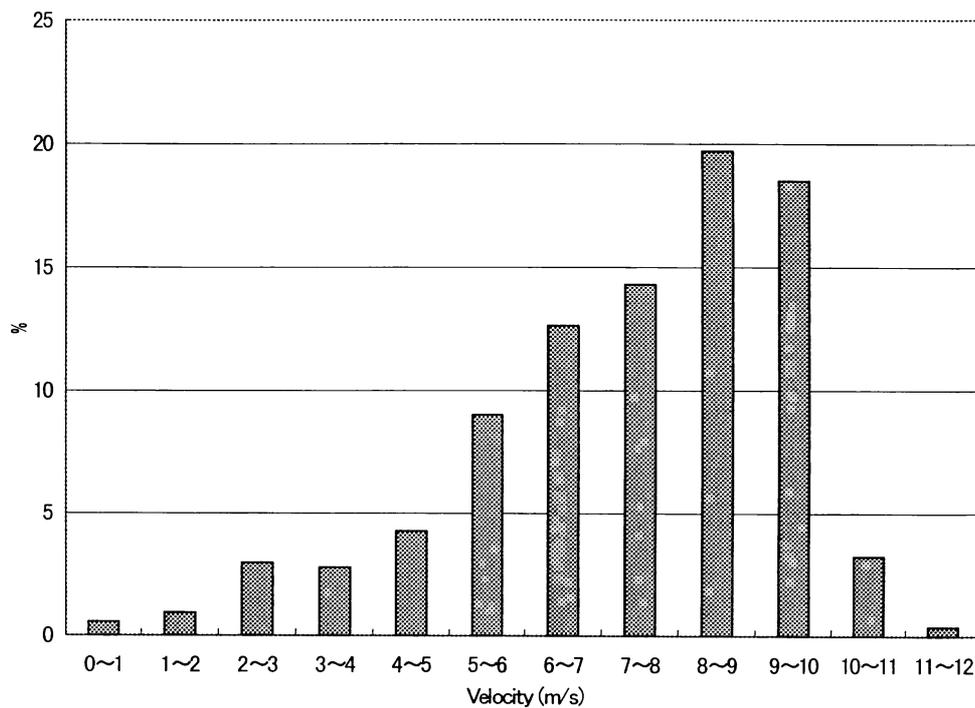


図4-4-8 第2実験 No.1散水実験での速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

第2実験 No. 1 (側面)

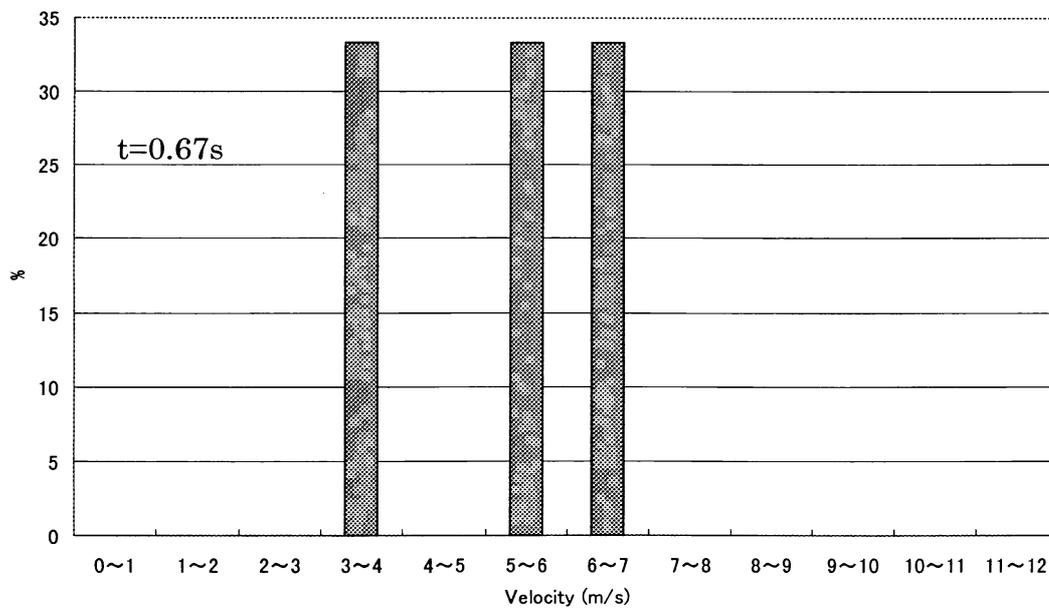
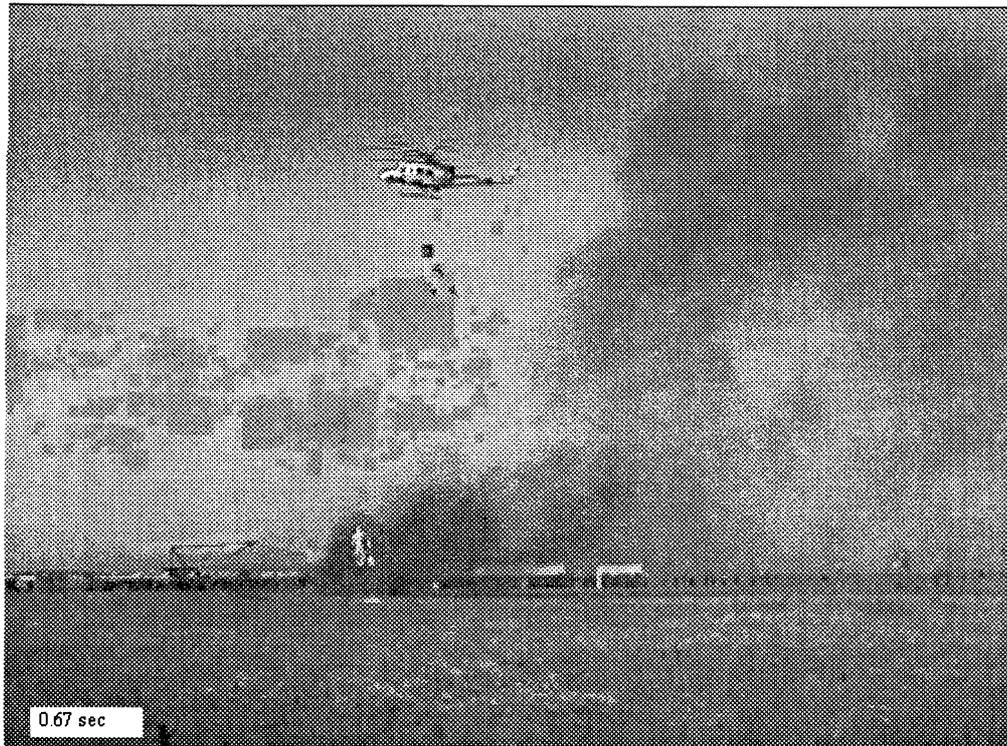


図4-4-9 第2実験 NO.1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=0.67s$)

第2実験No. 1

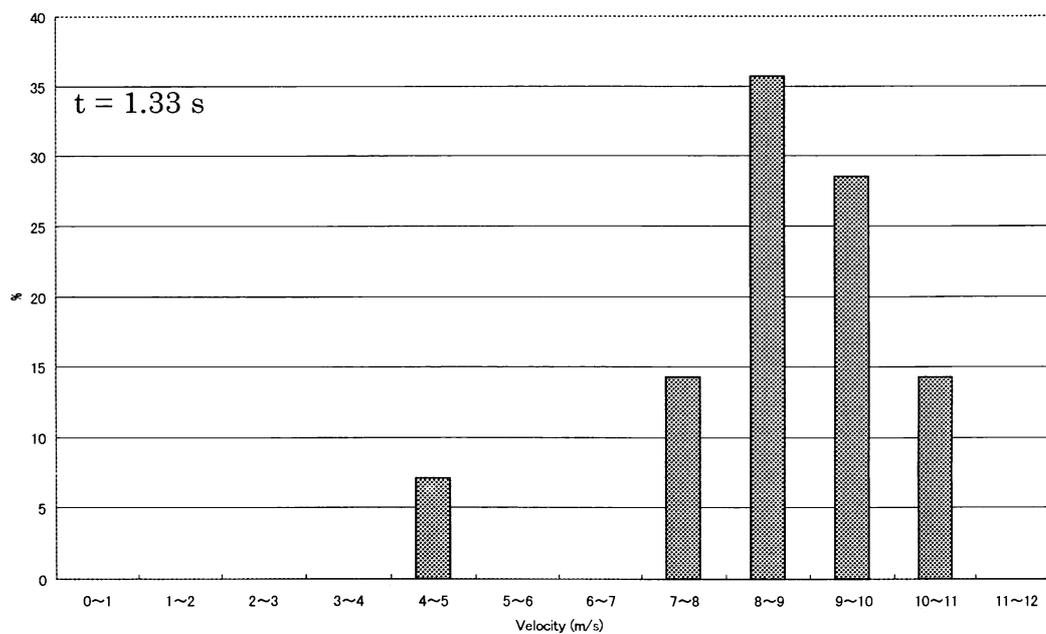
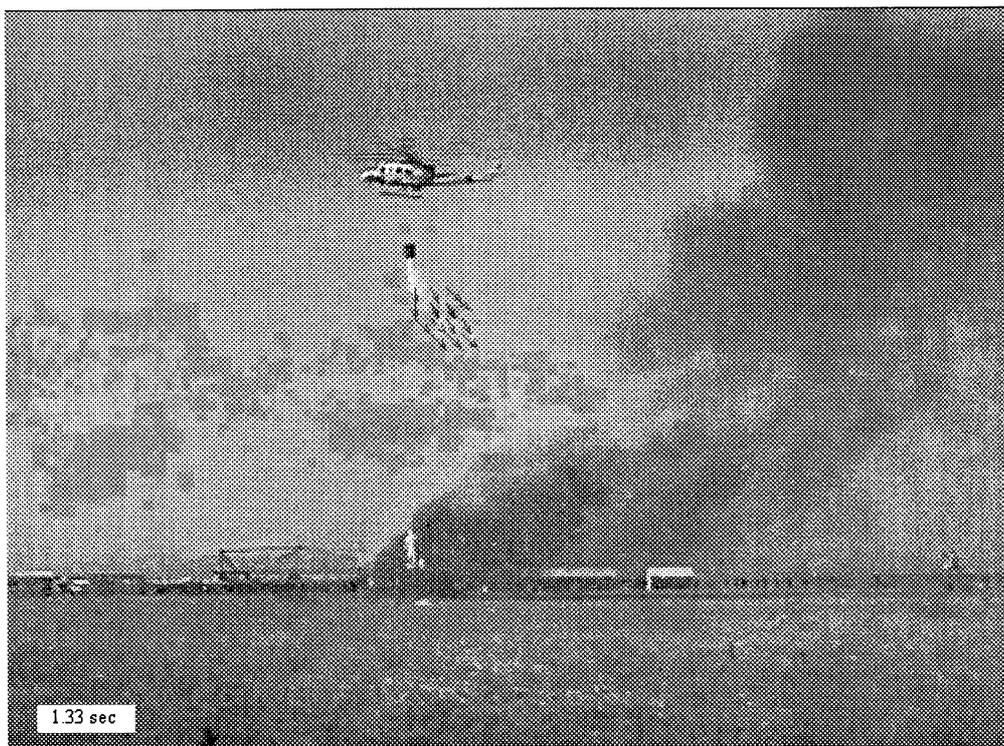


図4-4-10 第2実験 No. 1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=1.33\text{s}$)

第2実験 No. 1

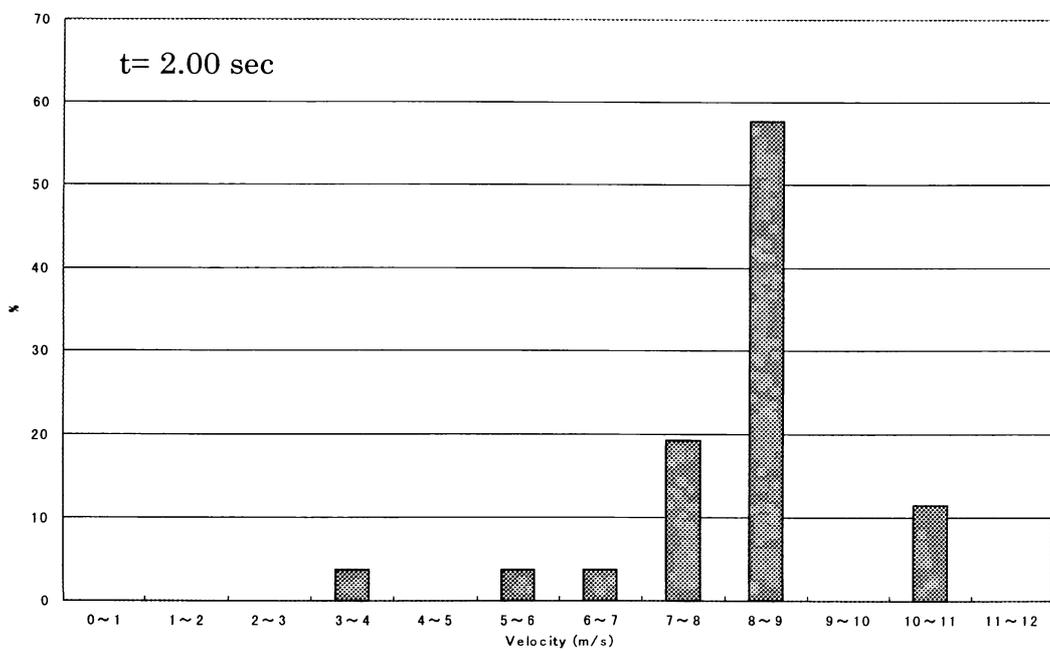
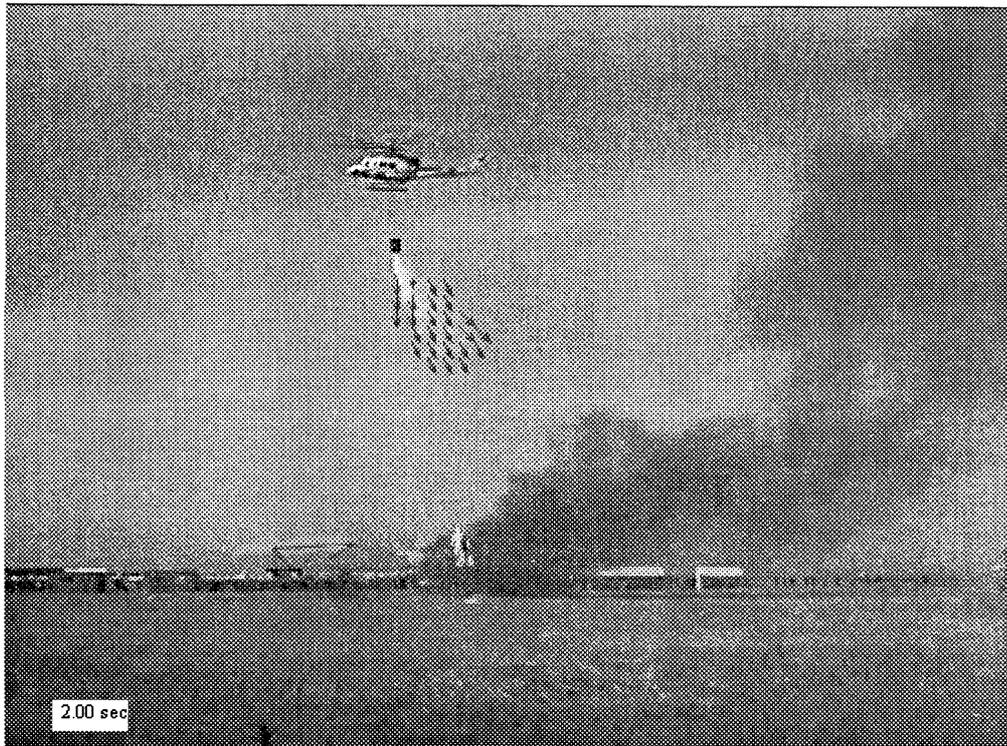


図4-4-11 第2実験 No.1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=2.00\text{s}$)

第2実験 No. 1

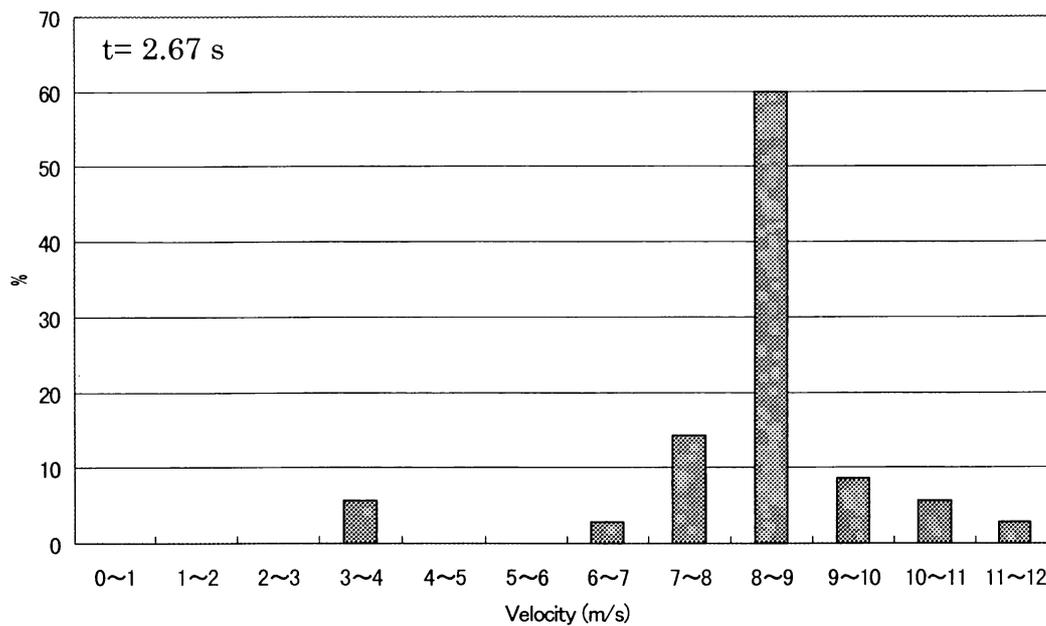
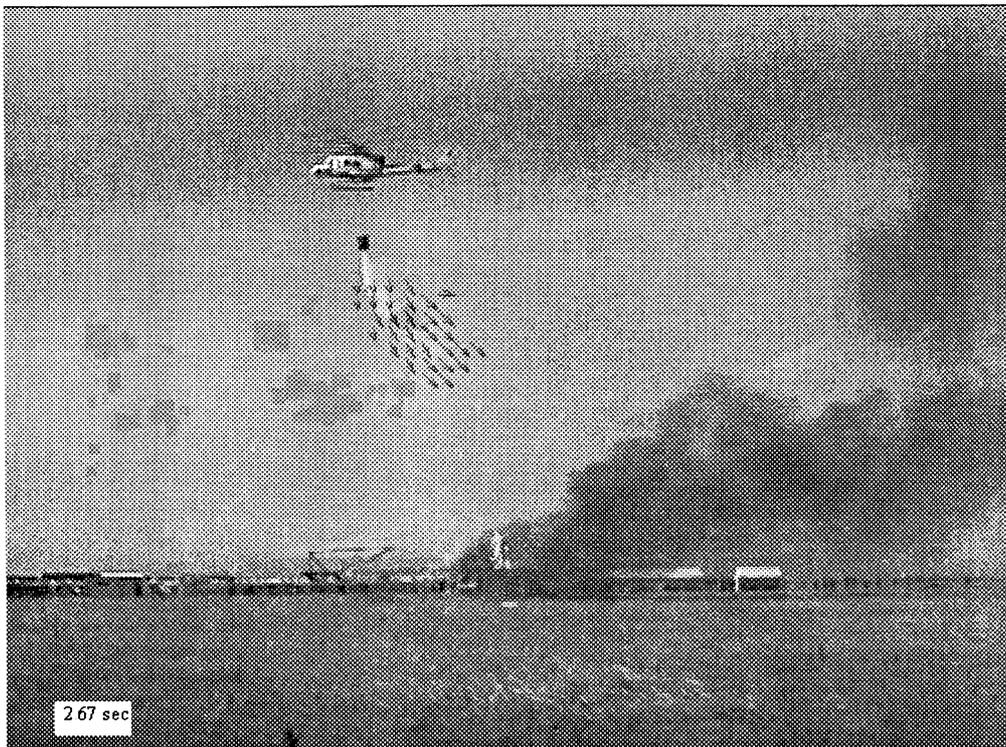


図4-4-12 第2実験 No.1散水実験における落下水の速度ベクトル (t=2.67S)

第2実験 No. 1

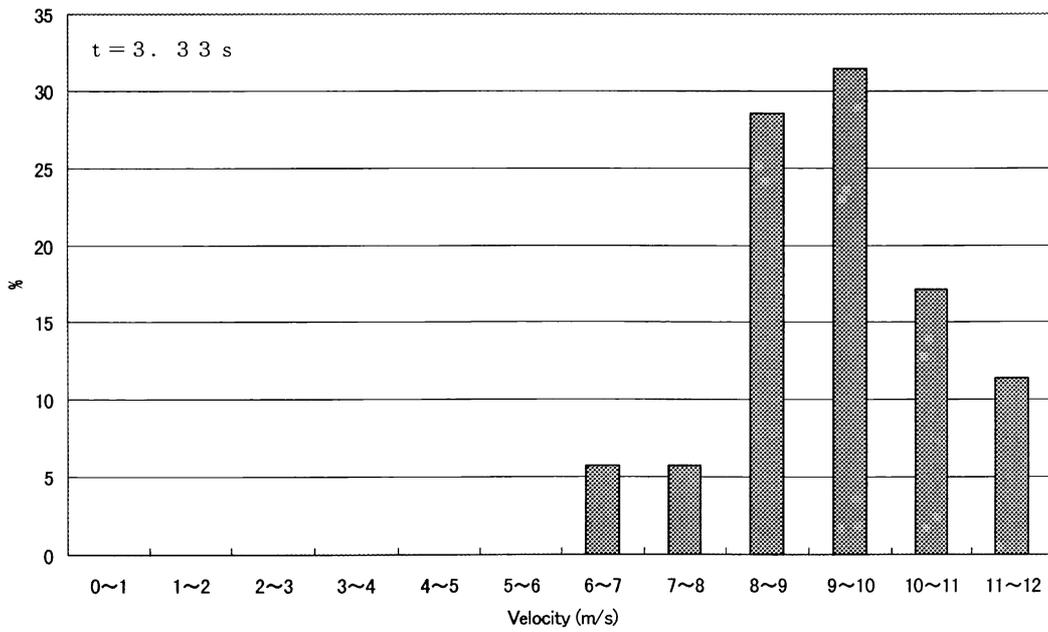
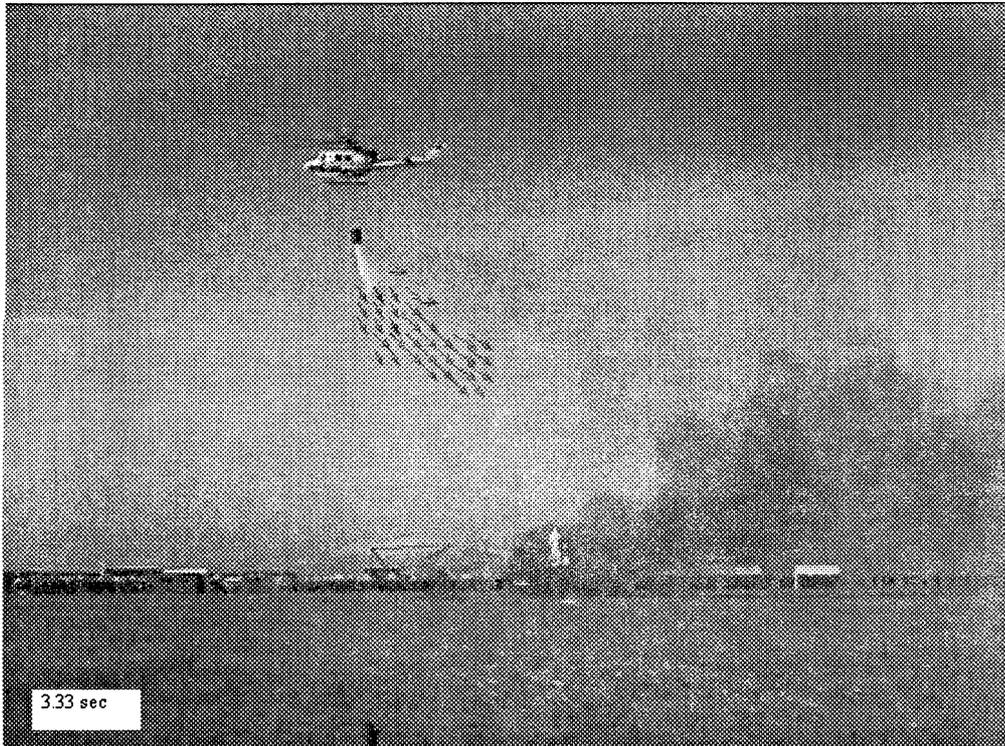


図4-4-13 第2実験 No.1散水実験における落下水の速度ベクトル (t=3.33S)

第2実験 No. 1

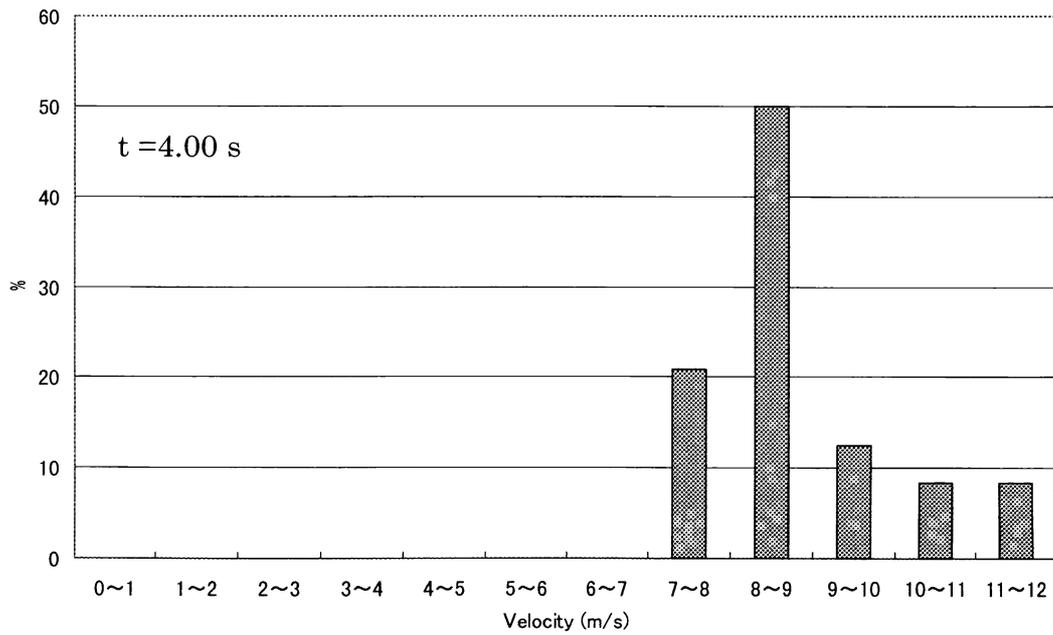
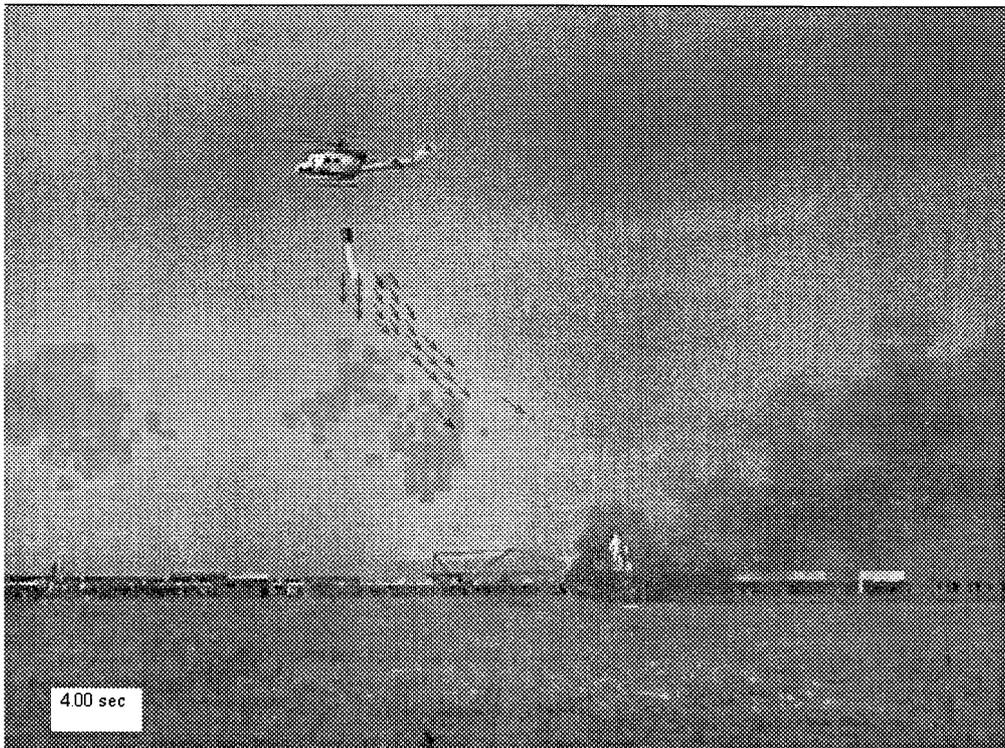


図4-4-14 第2実験 No. 1散水実験における落下水の速度ベクトル
($t=4.00\text{s}$)

(側面) 1. 00から4.00秒までの平均値

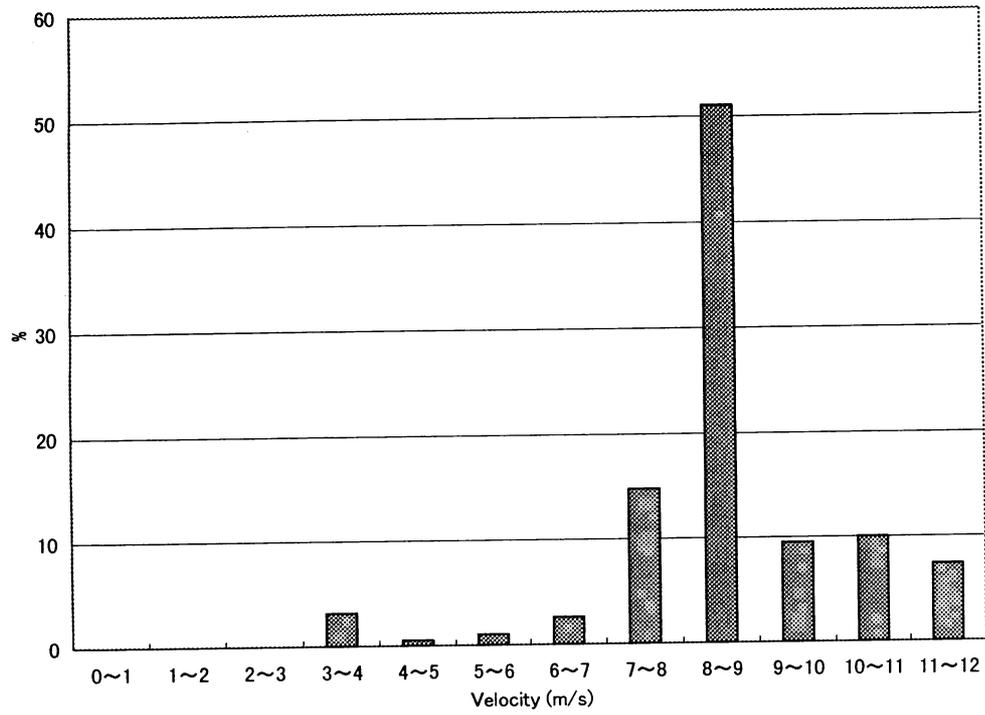


図4-4-15 第2実験 No.1散水実験の速度ベクトルの頻度分布の時間平均値

4. 4 シミュレーション

4. 4. 1 シミュレーションの方法

ここでのシミュレーションには液体スロッシングや噴流に用いられるシミュレーションソフト (NAGARE) を用いた。この計算で用いられるナビエ・ストークス方程式等の支配方程式を以下に示す。

$$\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right\} = - \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + K_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$\frac{\partial C_v T}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_v T}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho} p \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$

圧力を計算するためのポアソン方程式は次式になる。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha T \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[-u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} - \alpha T \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) \right\} + K_k \right] + \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_k} u_k - \frac{\alpha}{C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right\}^{n+1}$$

ここでは、水が飛び散る様子や不定形な境界などが生成される様子をシミュレーションする際に、適当な大きさの水分子の集まりを一つの要素で置き換え、粒子動力学法を用い、要素間には2体ポテンシャルが働くものとし、二つの要素間に働く力を次式とした。

$$\vec{f}_{ij} = - \frac{\partial \phi_{ij}}{\partial \vec{r}_{ij}}$$

各要素に働く力は、周りにある全ての要素との相互作用を取り入れ、次式とした。

$$\vec{F}_i = \sum_{j \neq i}^N \vec{f}_{ij} + \vec{g} + \vec{w}_i$$

本シミュレーションでは、重力加速度及び風による力として次式を導入した。

$$\vec{f}_i' = -\gamma_m (\vec{v}_{ij} \cdot \vec{r}_{ij}) \vec{r}_{ij} / |\vec{r}_{ij}|^2,$$

これらの力を全ての要素・各時間毎に求め、各要素の軌跡をニュートンの運動方程式から数値的に解く。計算条件の概要を以下に示す。

1. 一様立方体格子 : $128 \times 65 \times 65$ (0.4 m/格子)
2. ヘリコプター対地飛行速度 : 10 m/s
3. ヘリコプターの翼の回転による下降気流速度 : 40 m/s
4. 横風風速 ; 7 m/s
5. 放水時間 : 5 秒間
6. 総放水量 : 0.8 トン
7. 放水速度 : 0.16 t/秒 (5 秒間一定)

4. 4. 2 シミュレーション結果

図4.5.1と図4.5.2にシミュレーションの結果を示す。地面への散水分布は風下側に流されている状況が見られる。空中における投下水の落下パターンは実験における映像とほぼ類似しているが、シミュレーションによる速度分布は実験結果の約1.5倍程度の値でかなり異なっている。これは水の分裂性状のモデル化等の数学的定式化がまだ不十分であることや定数の取り方に問題があるためと考えられる。

4. 4. 3 まとめ

ヘリコプターからの空中投下水の落下拡散パターンのシミュレーションを行った。空中における投下水の落下パターンは実験における映像とほぼ類似しているが、シミュレーションによる速度分布は実験結果とかなり異なっている。これは水の分裂性状のモデル化等の数学的定式化がまだ不十分であることや定数の取り方に問題があるためと考えられる。

参考)

- 1) 加賀ほか、可視化情報、Vol.14,No.53,p.38(1994)、
- 2) 桑原、宇宙航行の力学シンポジウム講演論文集 (1998年3月)

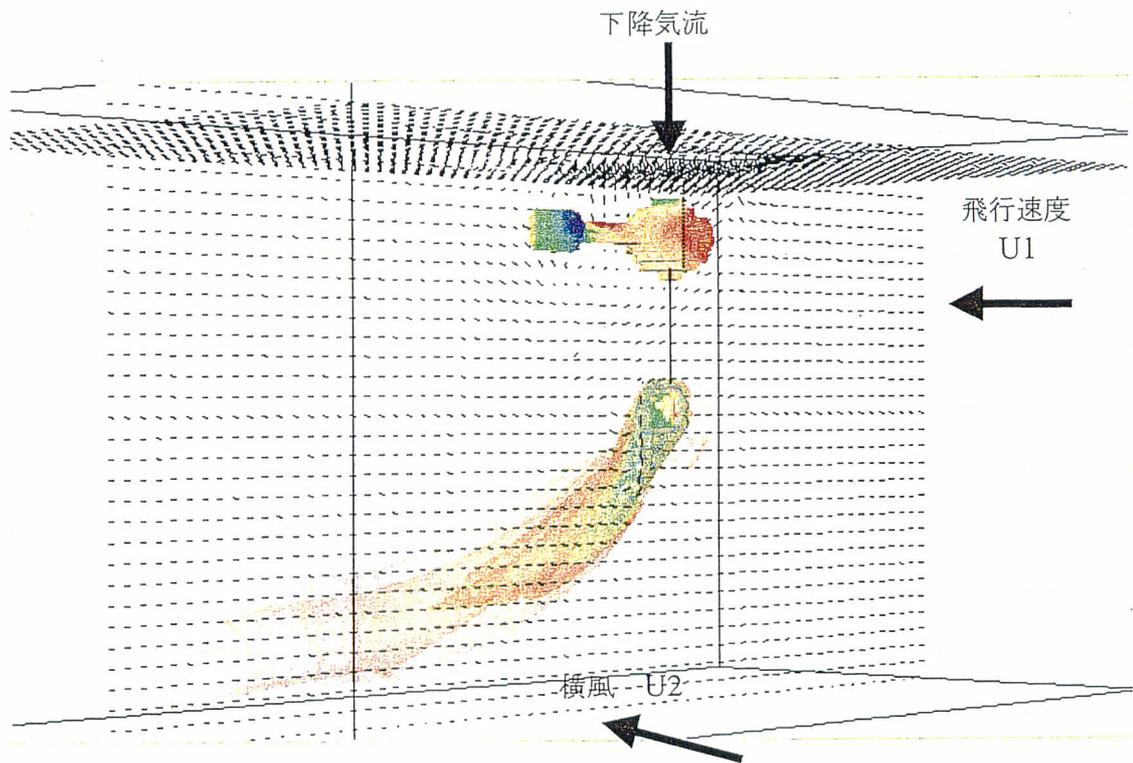


図4. 5. 1 数値シミュレーションによるヘリコプター懸架バケットからの放水状況

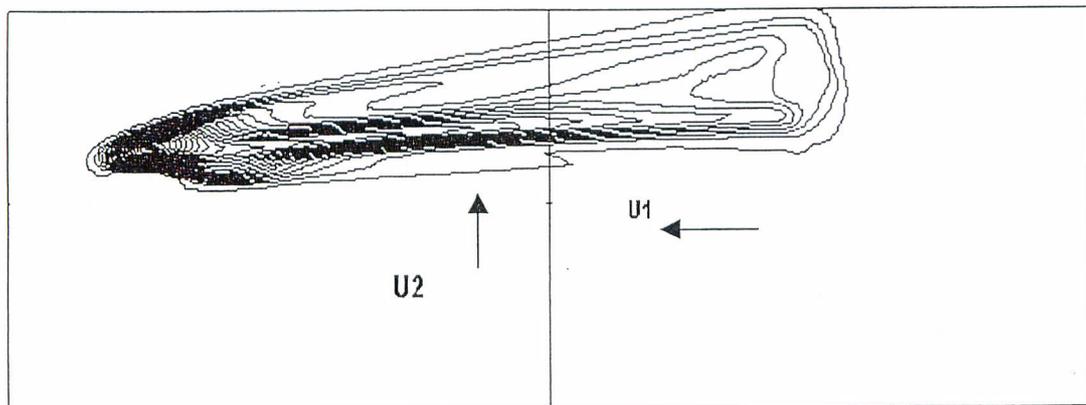


図4. 5. 2 数値シミュレーションによる地面における投下水の散布パターン

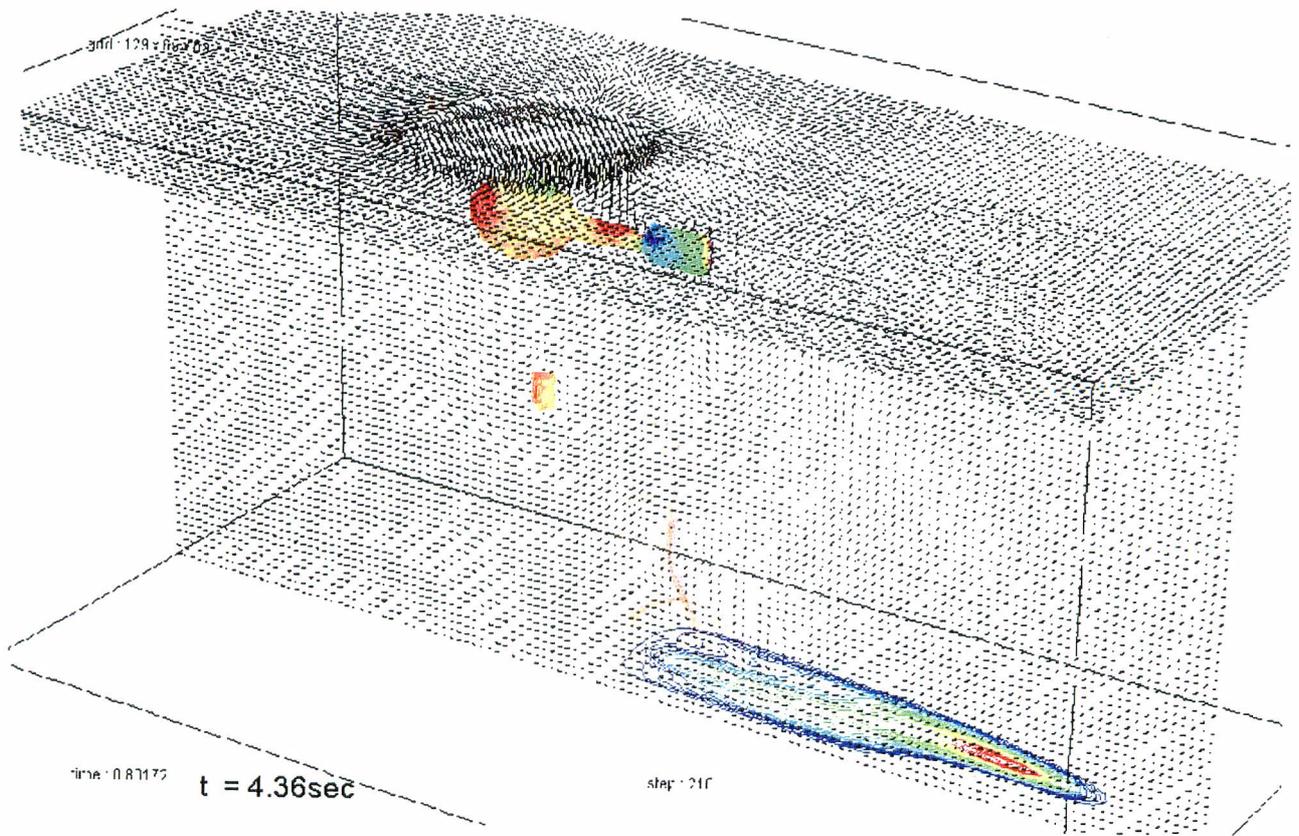


図 4. 5. 3 ヘリコプターからの放水のシミュレーション結果

第5章 水の拡散範囲と散布密度

5.1 はじめに

ヘリコプターから投下された水の散布範囲、散布密度は、延焼阻止効果や火災の抑制効果に大きな影響を与える。散布範囲、散布密度は風速の他に、ヘリコプターの飛行速度、飛行高度、散布水量、消火機材の種類等に左右される。今回の実験において、第1実験、第2実験、第3実験で、1回当たりの散布水量は900ℓ（一定）、また消火機材もバケット形式であったことにより、投下水の散布範囲、散布密度は飛行高度、飛行速度と風速に影響されたと考えられる。

これまでの研究¹⁾より、風速が毎秒2～3mの場合に限って散布範囲、散布密度が調べられているが、強風下での観測例はない。今回、北海道苫小牧市で行われた実験では風速が毎秒約10mという強風下で、散布範囲と散布密度を観測したので、その結果について報告する。

5.2 観測方法

散布範囲の観測は、4台のビデオカメラによって行い、あわせてビデオ観測者4人それぞれの目視によっても行った。第1実験、第2実験でのビデオカメラの位置は実験会場（南北100m、東西45m、会場全体の東側ほぼ半分）の対角線上の4隅近くとした。第3実験では、実験会場（会場全体のほぼ中央から西側部分）の隅又は対角線延長上とした。

また、第1実験、第2実験では、家屋を中心として、5mピッチで、南北方向13列、東西方向8行、すなわち60m×35mの範囲に、採水マス²⁾を102個配置し、各実験終了時に採水マスの水量を求め、単位面積当たりの各実験ごとのトータルの散布密度を求めた。ただし、家屋A、A'および両家屋間の部分は観測しなかった。採水マスは上端開口部が一辺31.6cm四方の金属マスで、採水された水量はメスシリンダーに移し替えて計量した。メスシリンダーは容量1ℓ、最小目盛り10mℓである。

5.3 観測結果

5.3.1 第1実験の散布範囲

水投下は合計6回行われ、各回ごとの散布範囲は図5-1の通りである。飛行高度は各回とも70ft、飛行速度はおよそ20ktであった。投下目標は家屋Aであり、散布範囲は、霧状ではなく、ある程度まとまりのある濃さの水が落下した範囲とした。図5-1より、第1実験では目標とした家屋Aによく当たっていることがわかる。

強風下では、地上150ftの高さから対象家屋（7.3m×7.3m）に命中させることは容易ではない。飛行高度を低くするとともに命中率を高めるために、飛行コースの微調整ができるように、事前に各飛行コース上に7.5m間隔で赤、緑、青、オレンジ、黄色の旗を立てた。このような準備をすることにより水投下目標である家屋Aには6回中4回投下水が当てることができたが、実験終了後ヘリのパイロット達にアンケートを行ったところ、命中率を上げるためには、1)一定条件下で訓練を行って練度を上げる、2)風上、風横から進入散水する、3)一定の高度で投下する、4)地上部隊から投下のタイミングを支援する等の提案回答が得られ、4)については八王子の実験で東京消防庁が実施している。

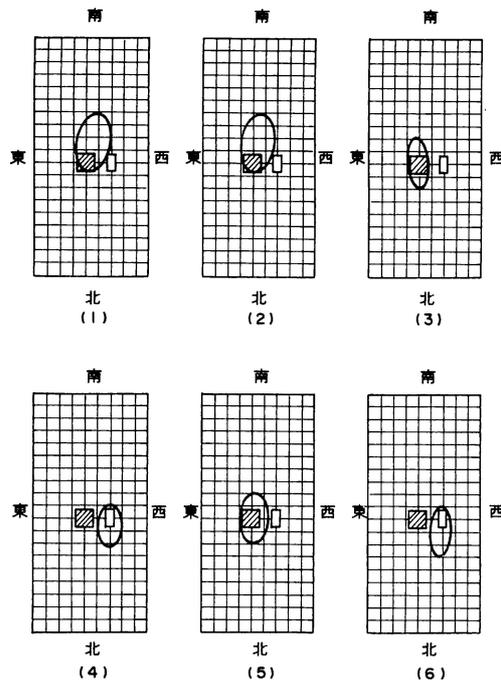


図5-1 第1実験各水投下の散布範囲

散布密度の推測値を、散布範囲に投下水が一様に散布されたと仮定して求めたところ、投下目標とした家屋A付近に多く散布されたことがわかった。図5-2に上記の散布範囲の推測より、水投下6回合計の散布密度の分布を示した。この試算では、今回の投下で、最大で1㎡当たり20 lの水が散布されたと推測された。図5-3に採水マスの計量結果から得られた散布密度の分布を示した。

採水マスで得た計量結果と照合すると、1㎡当たり2 l以上の散布密度の範囲ではほぼ一致した。家屋Aから北へ5m離れた地点、家屋A' から北へ5m、家屋Aから南へ5m、家屋A' から南へ5mの地点等では観測結果と推定結果がほぼ一致する。散布密度のピーク値もほぼ一致するが、散水密度のピークを与える地点は異なった。家屋AとA' には散水マスを配置しなかったため家屋付近での散布密度は比較出来ない。

第1実験における各水投下ごとの散布範囲の平均の最大長さ20m、最大幅10m、面積は150㎡であった。

5. 3. 2 第2実験の散布範囲

水投下は15回行われた。地上の散布範囲は、各回の飛行高度や風によって、投下水が霧状になったり、水滴状であったり、または水塊状であったりして、決定するのが困難である。各回の飛行高度、飛行速度、落下状態を表5-1に示した。飛行高度が120 ft以上になると、投下水はほとんど霧状になった。飛行高度80 ftでは、速度が15 ktであると、ほとんど投下水は水塊状になった。高度80 ft、速度が20 ktだと、投下水は一部霧となって飛び、塊もややゆるくなった。高度100 ftでは、飛行速度が大きいとき霧状になったケースがあった。

飛行高度80 ft以下では投下水はほとんど風に流されないが、100 ftでは、最大約10 m、150 ftでは約30 m風下に流された。

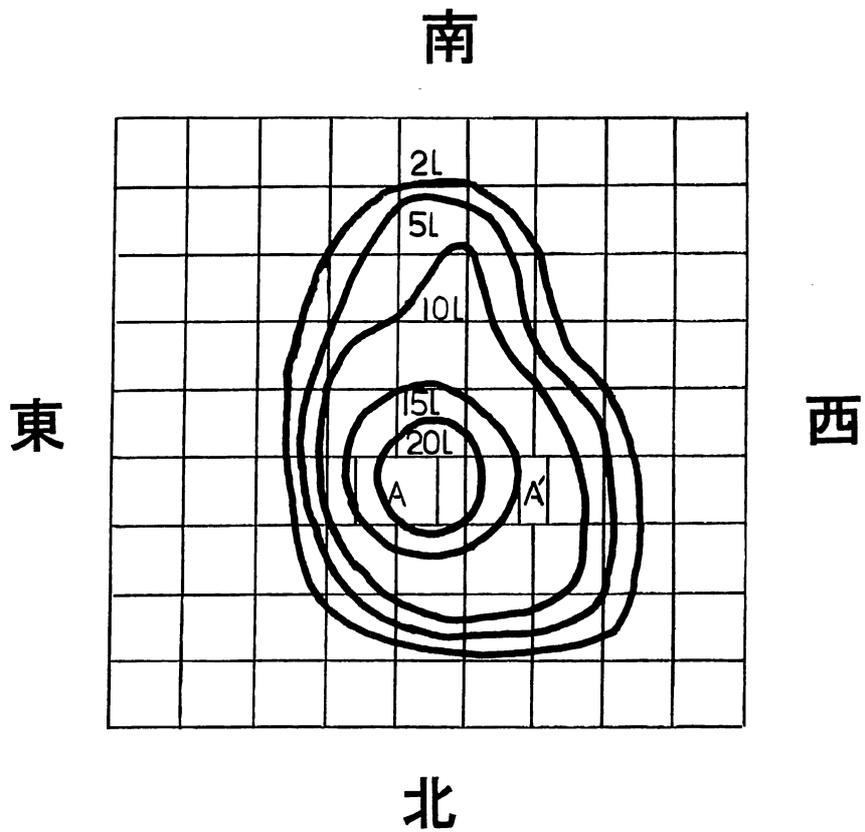
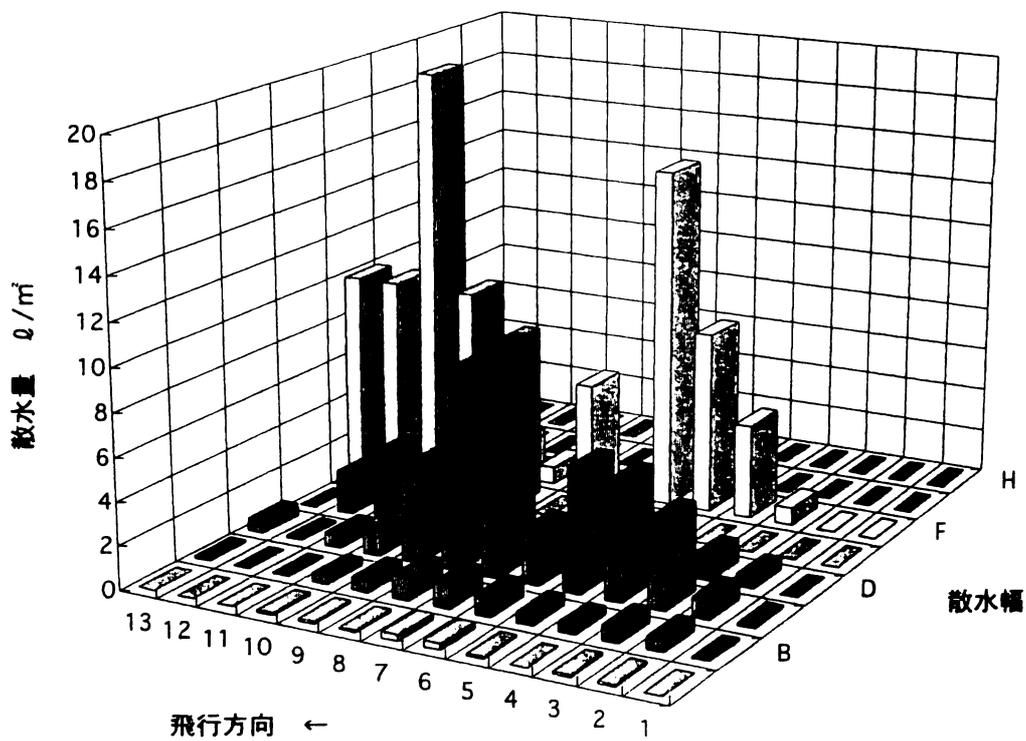


図5-2 第1実験の推定散布密度



図a 三次元散水分布

図5-3 第1実験の採水マス計量による散布密度

番号	飛行高度 (ft)	飛行速度 (kt)	散布水量 (l)	散布状況	風速 (m/sec)	流れた距離 (m)
1	120	20	900	E	6.5	10
2	70	15	900	A	6.1	0
3	100	20	900	E	10.4	15
4	100	20	900	C	7.0	5
5	100	20	900	C	8.5	5
6	100	20	900	C	7.3	5
7	100	20	900	D	10.6	10
8	80	15	900	A	11.0	0
9	80	20	900	B	9.2	0
10	150	15	900	D	9.1	10
11	100	20	900	C	8.8	5
12	80	15	900	A	8.2	5
13	100	20	900	B	6.8	10
14	120	15	900	D	9.3	15
15	150	20	900	E	11.9	30

A : まとまっている B : ややまとまっている C : 水滴状

D : 霧状、E : 薄い霧状

流れた距離 : 飛行コースから投下水が風によって流された距離

表5-1 第2実験散布状況

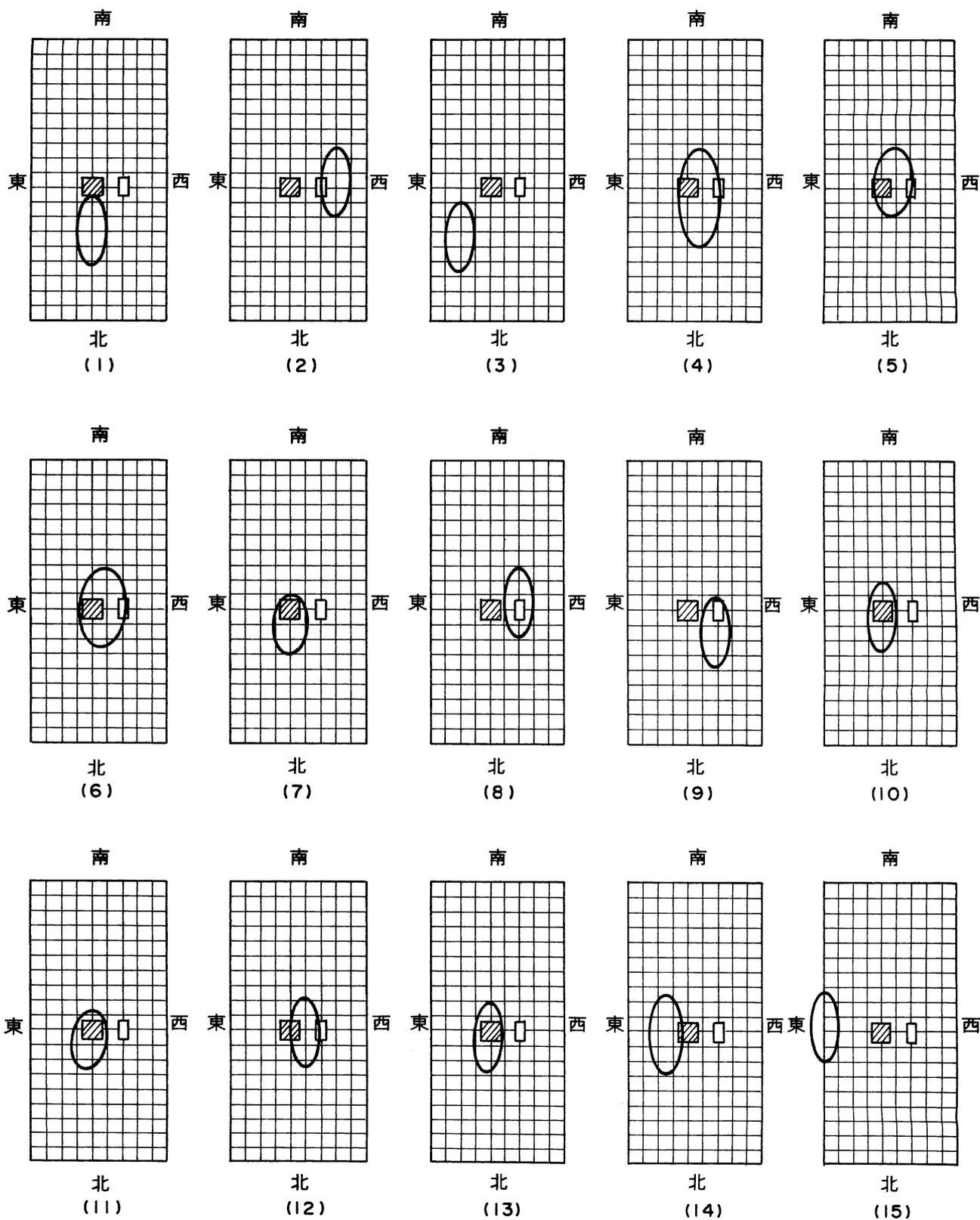


図5-4 第2実験各水投下の散布範囲

図5-4に各水投下ごとの散布範囲を示した。散布範囲はかなりばらついているが、投下の前半（火災最盛期）は家屋A' に集中的に散布し、後半（火災の減衰期）は家屋Aに集中的に散布されたことは、火災最盛期には家屋Aから家屋A' への延焼阻止を、火災減衰期には家屋Aの火災の抑制を目標にして、水投下が行われたためと思われる。

水の落下状態は、落下直後は水塊状で、落下するにつれて、塊が分裂してどんどん小さくなり、最後は霧状になる。散水密度の観測結果²⁾から類推すると概算で、大きい水滴を含んだ状態で、狭い区域に集中的に落下した場合には、 10 l/m^2 以上で、小さい水滴がまとまって落下した場合には、 $1 \text{ l} \sim 10 \text{ l/m}^2$ 程度、水が霧状で落下した場合には 0.1 l/m^2 以下と推測される。以上の仮定のもとに、散布密度の分布を推測すると、水投下の目標とした家屋Aと家屋A' の間に集中的に散布されたことがわかる。最大で 1 m^2 当たり 13 l の水が散布されたと推測された。図5-5に第2実験15回合計の散布密度の分布を示した。

図5-5に示した結果と、図5-6に示した採水マスの計量結果と比較すると、散布範囲が異なるが、散布密度のピーク値はほぼ一致している。家屋A、家屋A' の周辺でもほぼ同じ値を示している。

各水投下ごとの散布範囲はばらつくが、風下については投下水の落下線を外挿することによって散布範囲を求めた。平均の最大長さ、最大幅、面積は、飛行高度80ft以下ではそれぞれ22m、8m、約 140 m^2 、飛行高度100 ftでは25 m、10m、約 210 m^2 と推定された。八王子における実験では、バケット式の消火機材による水投下の散布範囲¹⁾は、今回の実験の結果より大きい。この違いはヘリコプターの飛行高度の違いによるものと思われる。

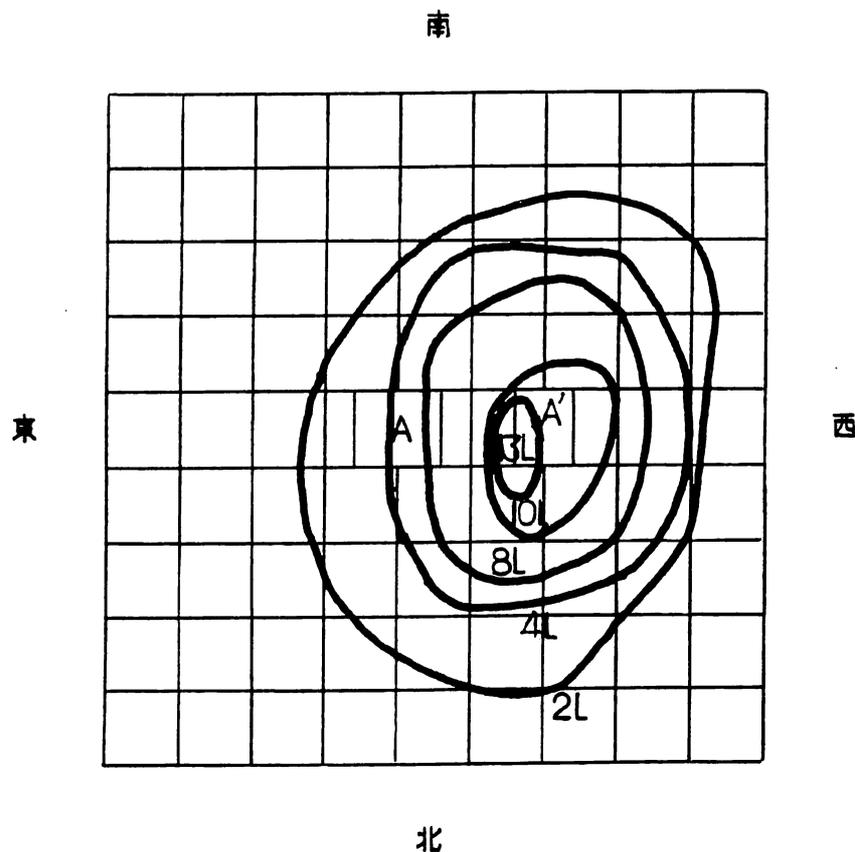


図5-5 第2実験の推定散布密度

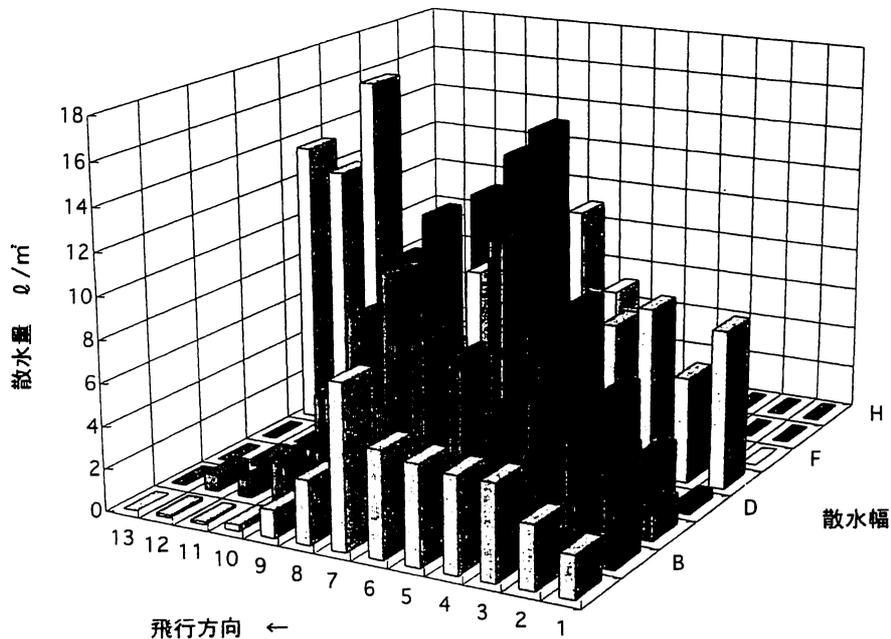


図5-6 第2実験の採水マス計量による散布密度

5. 3. 3 第3実験の散布範囲

第3実験は飛び火火災の火勢抑制が目的で行われ、飛行高度が低く、しかも飛行速度が小さいことから、ほぼ目標家屋に集中的に散布された。水投下回数は、第3実験その1、その2ではそれぞれ6回ずつである。散布範囲は図5-7、図5-8の通りである。第3実験その1、その2の散布密度の分布をそれぞれ、図5-9、図5-10に示した。

飛行速度が小さく、ホバリングに近い低速で行われた実験その2では、家屋に集中的に投下水が散布された。ホバリング状態での散布範囲の面積は約100m²と極端に小さかった。家屋の面積は約50m²である。参考までに対象家屋の大きさは家屋Aが50m²で、家屋AとA'の範囲を含めると110m²である。

第3実験はホバリングに近い低速で行われたので、ほとんどの水投下が家屋に命中した。

5. 4 考察

昨年の八王子で行われた実験と今回の実験を比較すると、散布面積に違いがある。八王子での実験ではバケットを使った場合の散布範囲の、平均の最大長さ42 m、幅12 m、散布面積400m²で今回の実験結果より長さが約1.8倍、幅が約1.3倍、面積は約2倍であった。この違いは、八王子での飛行高度150ftであり、今回の飛行高度よりも高かったためと推測される。

5. 5 まとめ

1) 今回の実験では命中率を高めるため、飛行高度を低くし、かつ事前に各飛行コース上に旗を立てて、飛行コースの微調整が容易に行えるようにしたため、命中率がよかった。さらに、実験終了後パイロットにアンケートを行ったところ、訓練を行って練度を上げること、風横、風下から進入散水すること、一定の高度で散水すること、ヘリの飛行コースの正面及び側面に地上員を配置して、コースの指示や散水のタイミングの指示をすれば、命中率はもっ

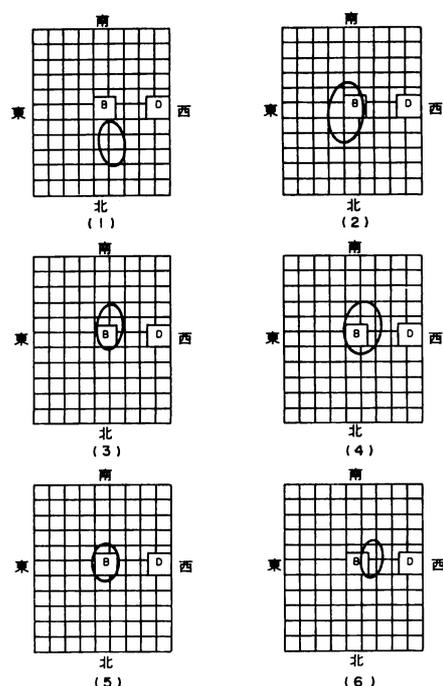


図5-7 第3実験その1 各水投下の散布範囲

と上がると思われるという提案回答が得られた。

2) 強風下であるため、飛行高度が高く、飛行速度が大きいと、投下水が風に流されて霧状になってしまう傾向がみられた。100 ft以上でその傾向が顕著で、高度150 ftでは最大で約30 mほど投下水が風下に流された。

3) 第1実験での散布範囲の平均的な長さは飛行高度70ft、飛行速度20ftで約20m、最大幅が10mほどで、平均散布範囲は約150m²であった。第2実験では、散布範囲がバラツキが大きい、風下の部分については投下水の落下線を外挿して散布範囲を求めたところ、高度80 ft、速度20 kt以下では、散布面積約140m²、高度100 ft、速度20 ktでは散布面積約210m²であった。第3実験では、ホバリングに近い低速度で水投下が行われたので、散布範囲の大きさは小さく、平均的に約100m²であった。

4) 第1実験、第2実験では、それぞれ合計6回、15回の水投下が行われ、その合計の散布密度を求めたところ、第1実験では、採水マスの計量結果とは1 m²あたり2 l以上の散布密度範囲とピーク値は一致したが、ピーク位置が異なった。家屋AとA'の周辺でも一致したが、家屋部分に採水マスを配置しなかったため、家屋部分の比較はできない。

第2実験では、全体的には一致しないが、家屋周辺ではほぼ一致した。ピーク値もほぼ一致している。全体的に一致しないのは、霧状になった投下水を計算に入れていないためと思われる。

参考文献

- 1) 自治省消防庁消防研究所：市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書、消防研究所研究資料第42号（平成10年3月）
- 2) (社)日本火災学会：市街地火災空中消火調査研究報告書（平成9年2月）

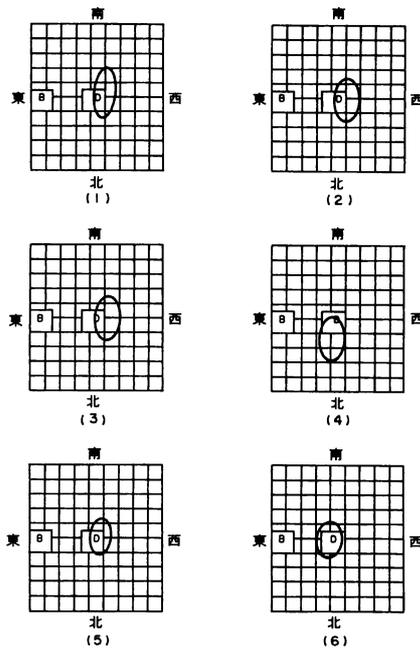


図5-8 第3実験その2各水投下の散布範囲

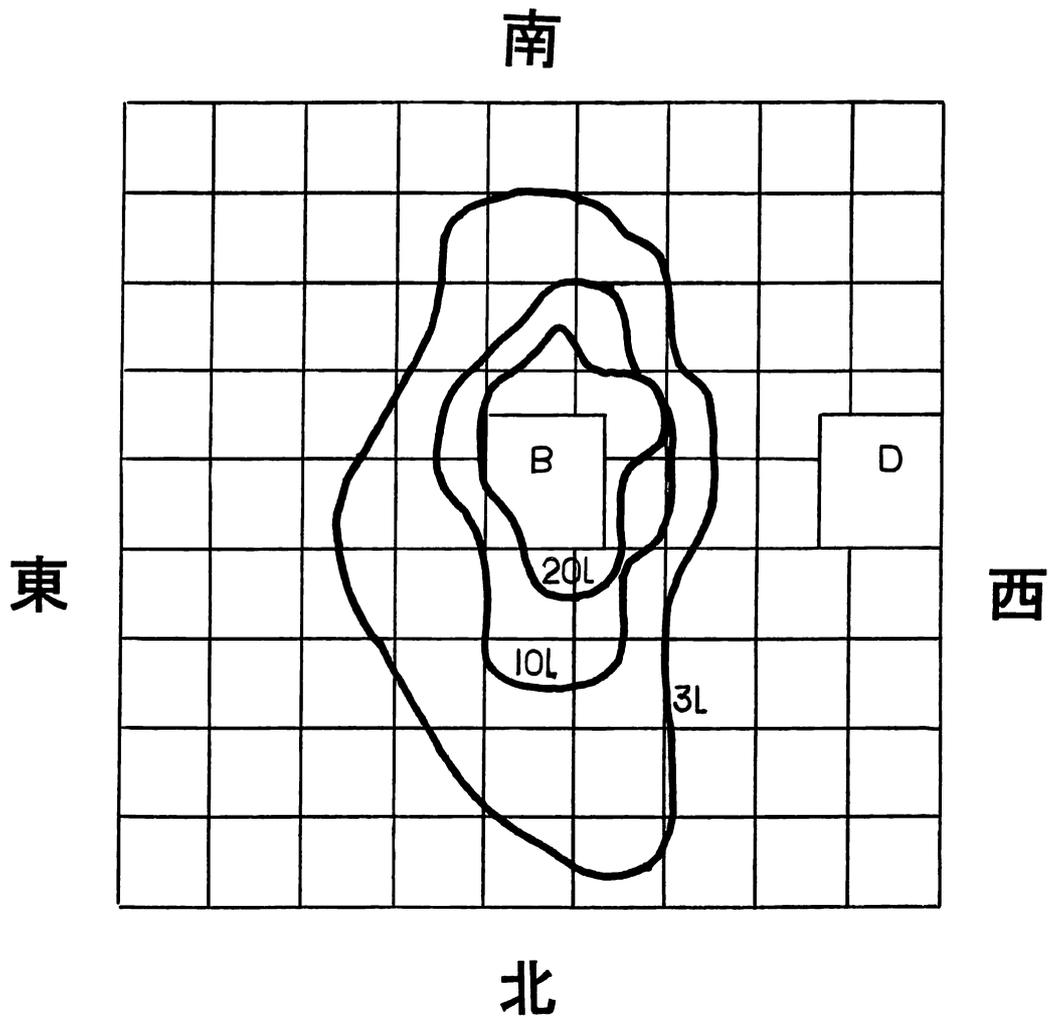


図5-9 第3実験その1の推定散布密度

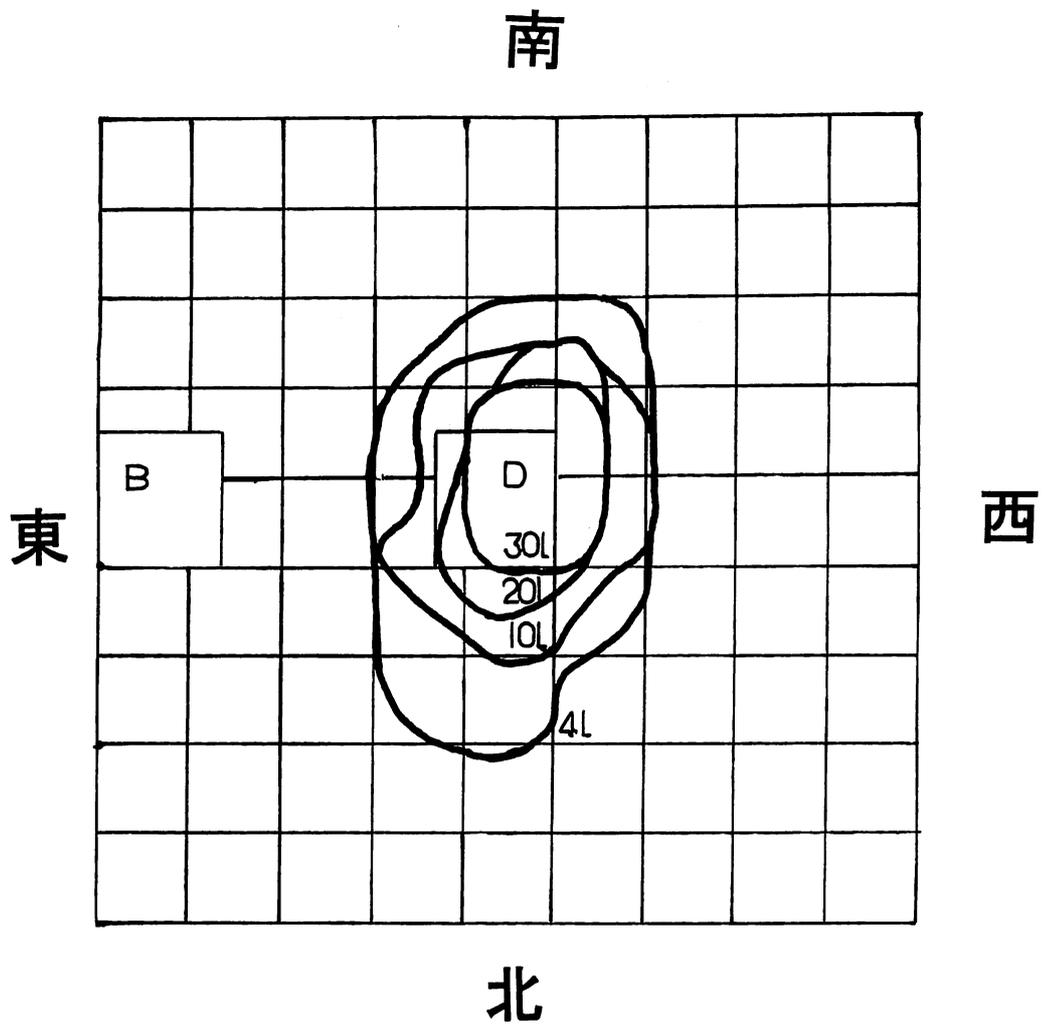


図5-10 第3実験その2の推定散布密度

第6章 火災性状と家屋間における気流温度分布

6.1 はじめに

市街地火災に対するヘリコプターからの水投下（空中消火）の延焼阻止効果は、火災規模や火災の進展段階などに左右されることが予測される。過去に行われた空中消火実験においては、火災の進展が速かったことなどから屋根が燃え落ちてから水投下が開始され、火災の進展と火勢抑止効果の関係について十分に検討できなかった。

今回の実験では水の投下開始時刻を早めるとともに火災荷重を大きくするなどして、火災の進展と水を連続的に投下した時の効果との関係について検討した。

火災の進展に伴って窓・外壁・屋根が破損し、火勢の強さが変化する。このように刻々と変化していく火災に対して水を投下すると、屋根・外壁・火炎などの存在により、燃焼実体に到達できる水量が変わり、火勢抑止効果などに影響が出る。そこで、最初に、家屋の燃焼状況を観測して、ヘリコプターから水投下が行われた時の火災条件を明らかにした。次に、火災の進展に応じて連続的に水を投下した時の効果の違いを火炎長や温度変化から検討した。更に、水投下を中止した後の再燃状況と隣接家屋への延焼拡大状況を観測して水投下の影響を確認した。

6.2 実験条件と観測方法

6.2.1 燃焼状況の観測

供試家屋Aの北西隅に点火した後、その風上にある隣接家屋A'へ延焼拡大する危険性のある火災に対してヘリコプターから水を散布して家屋A'への延焼拡大の阻止を図った。水散布を行わない場合には、炎上家屋Aから放射熱により家屋A'の外壁に延焼着火する危険性がある。また、地上に散乱した可燃物（倒壊した家屋が両家屋間に落下した状態を想定したもの）を媒体として家屋Aから家屋A'に延焼拡大する危険性がある。このような火災に対してヘリコプターから水を投下した。水の投下回数は15回であり、実験中の火災状況をビデオに記録するとともに家屋内部及びその周辺の気流温度を測定した。

家屋Aの大きさは、7.2m×7.2mで、高さは3mである。また、隣接家屋A'の大きさは家屋Aの半分とした。家屋Aの開口部は、北側と南側にそれぞれ1個、西側と東側にそれぞれ2個の窓を設けた。これらの窓の大きさは1.8m×0.9mである。火災の継続時間を長くするため、火災荷重を130 kg/m²とした。両家屋の屋根はトタン葺きで、家屋A'は家屋Aの5メートル西側に配置した。

両家屋の間には中心線からそれぞれ南北に2メートル離れた地点に廃材（可燃物を2列のベルト状に並べた、幅0.9m）を配置した。これらの可燃物の火災荷重は北側ベルトと南側ベルトで異なり、それぞれ30 kg/m²と100 kg/m²とした。火災荷重の違いは、廃材の量と延焼阻止効果の違いを調べるためである。

6.2.2 熱電対の設置箇所

炎上中の建物Aから隣接建物A'へ延焼拡大する火災について、家屋Aの内部及び建物間に熱電対を設置して気流温度を測定した。温度測定箇所は64箇所、図6-1に示すとおり16地点にポールを立て、そのポールに4カ所ずつ熱電対を設置した。熱電対の種類はクロメル・

アルメルで、太さ0.7mmである。気流温度の観測地点から観測小屋まで熱電対を延長して、観測小屋に設置した記録計にデータを保存した。

温度測定のスプリング間隔は1秒とした。この温度記録から点火家屋の内部の火災拡大状況と両家屋間における延焼拡大危険性を推測した。実験の準備作業中に熱電対が切断されることがないように熱電対の束を高さ1.5メートルの足場パイプに固定した。また、投下した水で熱電対の出力に異常が出ないように熱電対を防水シートあるいはアルミホイルで巻いて保護した。このようにして得た気流温度から火災の進展状況と水投下による火勢抑止効果の関係を調べた。

6. 3. 観測結果

6. 3. 1 点火後の火災拡大

点火予定箇所は、家屋Aの北西隅の床上の可燃物表面である。この場所にアルコールを染み込ませた布切れを置き、それに点火棒を使って点火した。

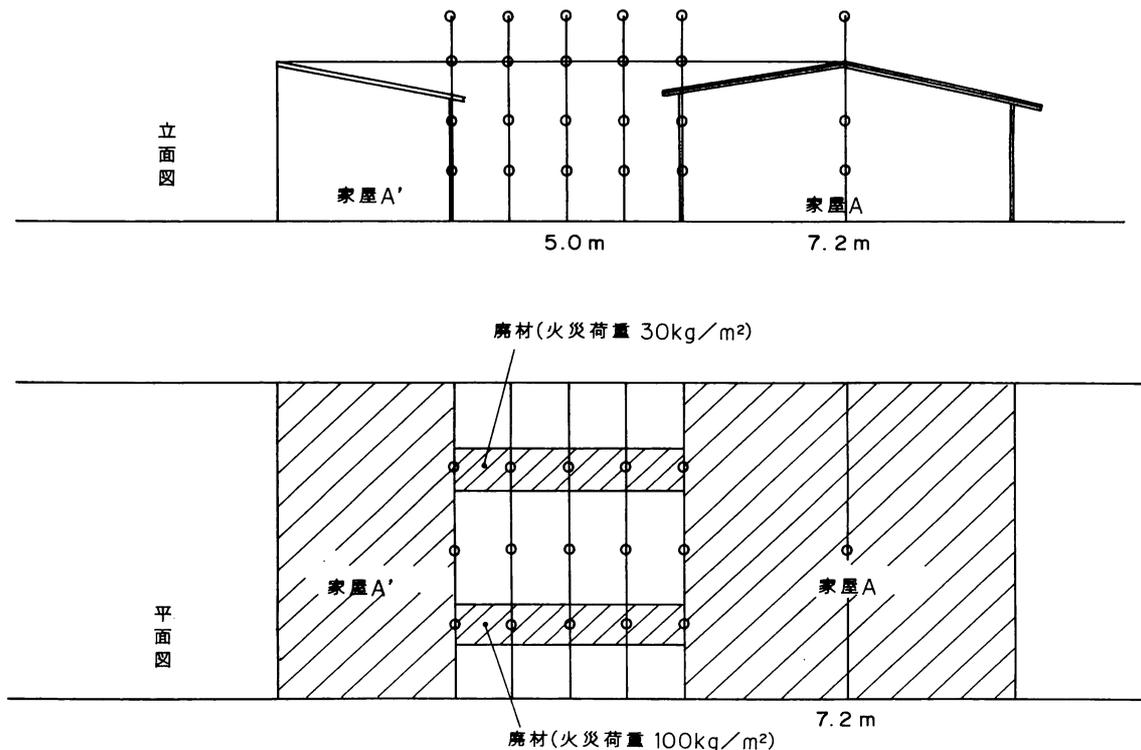


図6-1 温度測定箇所

点火直後に全ての窓ガラスを閉じてから火災の拡大状況をビデオに記録した。点火後数十秒してから西側の軒下から煙が噴出し始め、その後、同じ場所から火炎が噴出し始めた。燃烧域は点火箇所から西側内壁を伝わって上方に拡大し、屋根面にそって家屋全体に拡大した。

風は西南西であったことから窓ガラスが破損した後、燃烧域は西側から東側に、側壁から床上の可燃物表面へ、可燃物表面から可燃物内部へと拡大した。ただし、点火箇所が北西隅であり、しかも風向がやや南よりであることから、延焼拡大にこれらの影響が出た。火炎の噴出状況は、時間と場所で大きく異なった。火炎の噴出開始時期は、建物の東側と北側の窓で早かった。（図6-2参照）

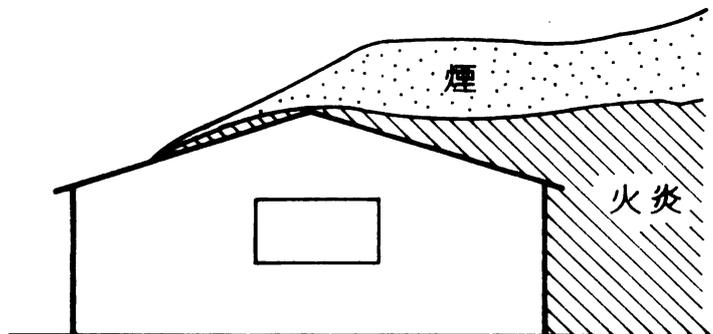


図6-2 火災の噴出状況（点火後10分）

6. 3. 2 廃材を媒体とした延焼拡大

家屋A及びA'間にある廃材を媒体として火災が風上方向に拡大する危険性があったものの水投下を継続している間には両家屋間の廃材には延焼拡大することもなかった。また、放射加熱より家屋A'の外壁表面に延焼着火することはなかった。

しかし、33分頃に水の投下を中止すると火災荷重の小さい方の廃材には延焼拡大することはなかったものの、火災荷重の大きい方の廃材は燃焼し始め、風上方向に向かって拡大した。

水の投下を継続している期間、可燃物の表面を濡らすことで延焼拡大が阻止されていた。しかし、火災荷重が大きい廃材はその内部に十分に水が到達せず、水投下を中止すると廃材内部から延焼拡大したと推定される。

6. 3. 3 気流温度

家屋Aの火炎温度の時間変化を図6-3に示す。観測高度1m, 2m, 3mは家屋Aの内部であり、高度4mは屋根上に位置する。この図から温度が急上昇した時間は観測高度で異なり、高度2及び3mでは1分20秒から、高度1mでは6分40秒から、高度4m地点では10分頃からであった。これらの箇所の温度変化から燃烧域は、点火箇所から西側側壁を伝わって上昇し、建物全体に及び、その後、床上の可燃物表面とその内部が燃え始め、屋根が一部破損した後、火炎がタン屋根の上部に噴出したことを裏づけている。

また、家屋Aから西方2.5m地点の気流温度の時間変化を図6-4に示す。気流温度がピークに達した時刻は9分頃であった。家屋Aから風上方向への火炎噴出は間欠的であり、火炎噴出が盛んな時間帯に気流温度がピークに達した。気流温度の変化は、ポールの位置の高度で異なった。ヘリコプターから水が投下されると、水が拡散した範囲で一時的に気流温度及び火炎温度が減少した。温度の減少度合いは、水のかかり方（水の塊、水滴、霧状など）に依存

した。4回目の水投下の直前と直後の鉛直断面（東西方向）の温度分布（中心線上）を図6-5に示す。気流温度は、それぞれ投下前と投下後の10秒間の平均値として表わしている。

温度の低下度合いは、観測場所で異なり、火炎内部よりも火炎の先端付近で低下幅が大きくなった。火炎中に水が投下されると温度低下が激しく、500度以上も低下した。

第4回目の水投下が始まる直前の家屋Aの外壁付近（外壁表面から約10 cm離れた地点）の鉛直断面（南北）内の温度分布をみると、家屋Aの外壁面近くでは点火後10分頃には二つの開口部から火炎が噴出していたことから、中心軸の両側で温度が高くなった。家屋A'の外壁の近くの鉛直断面（南北）内の温度分布をみると、地上付近で温度がやや高いが、高度3メートル付近で温度が低いことを示している。これは、暖かい気流が下から上方に向かって流れる気流があったことを示している。

6. 4 考察

家屋Aと家屋A'の近傍では、風に対して障害物が二つ存在することから両者間の気流パターンは家屋が1棟の場合より複雑になる。

更に、実験中において風向が西南西で、家屋の中心軸よりも南側によっていたことから気流の三次元分布は中心面に対して非対称になったと推定される。家屋間では渦流が生じて、風は乱れ、地面付近では風は東側から西方に流れた。この流れは、地面上の水が放射熱で加熱されて水蒸気となり、可視化されたことから確認することができた。水の投下を終了した時点から家屋間にある廃材（南側）の一部が盛んに燃え出し、その燃焼域は家屋A'の方向に広がり始めた。この廃材を媒体とした火災拡大は、両家屋間に生じた気流により促進された。火災の進展速度から判断すると、火災を放置すれば、数十分以内に家屋A'まで延焼拡大したと推定される。

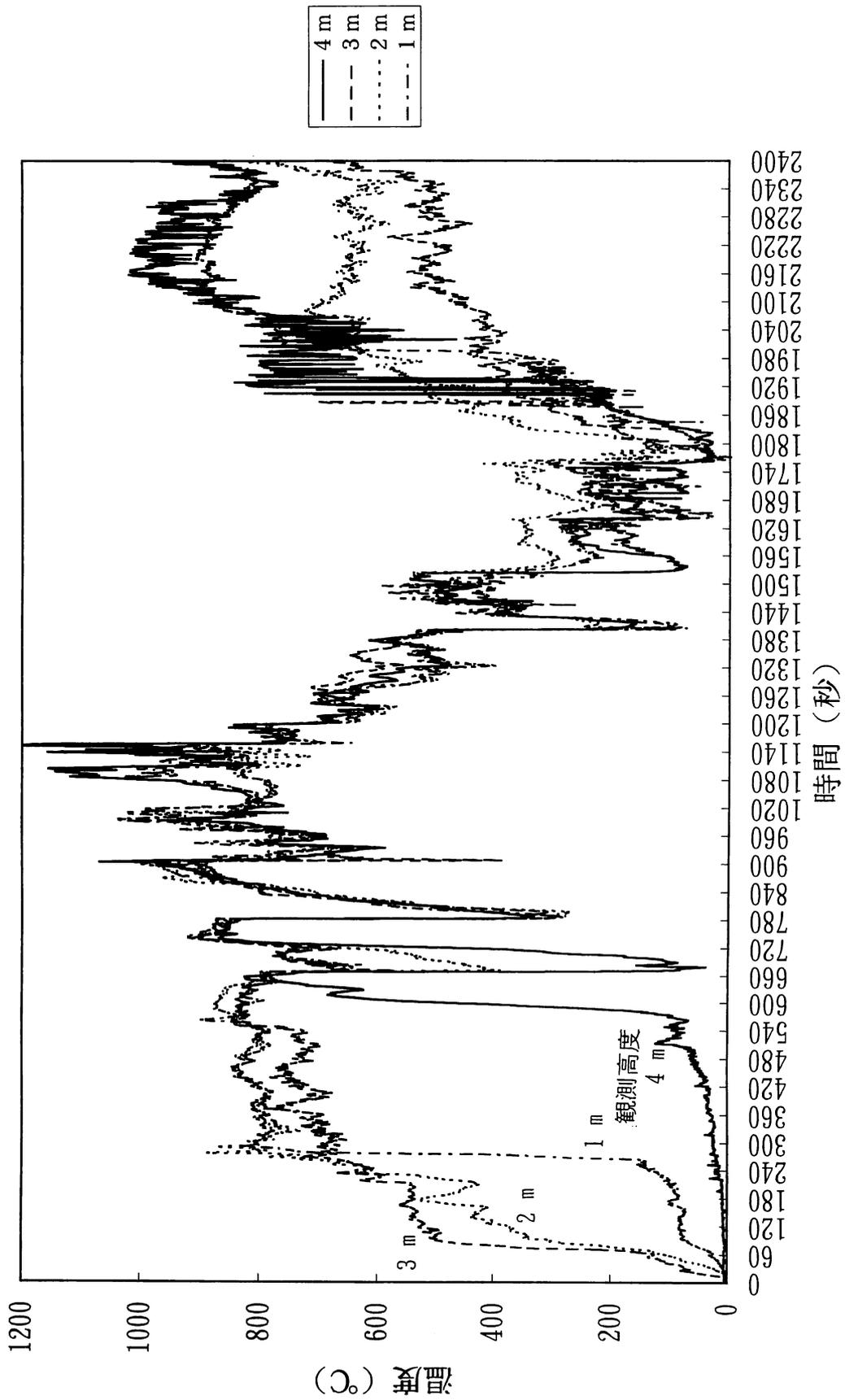


図6-3 温度の時間変化(家屋A) (数値は観測高度)

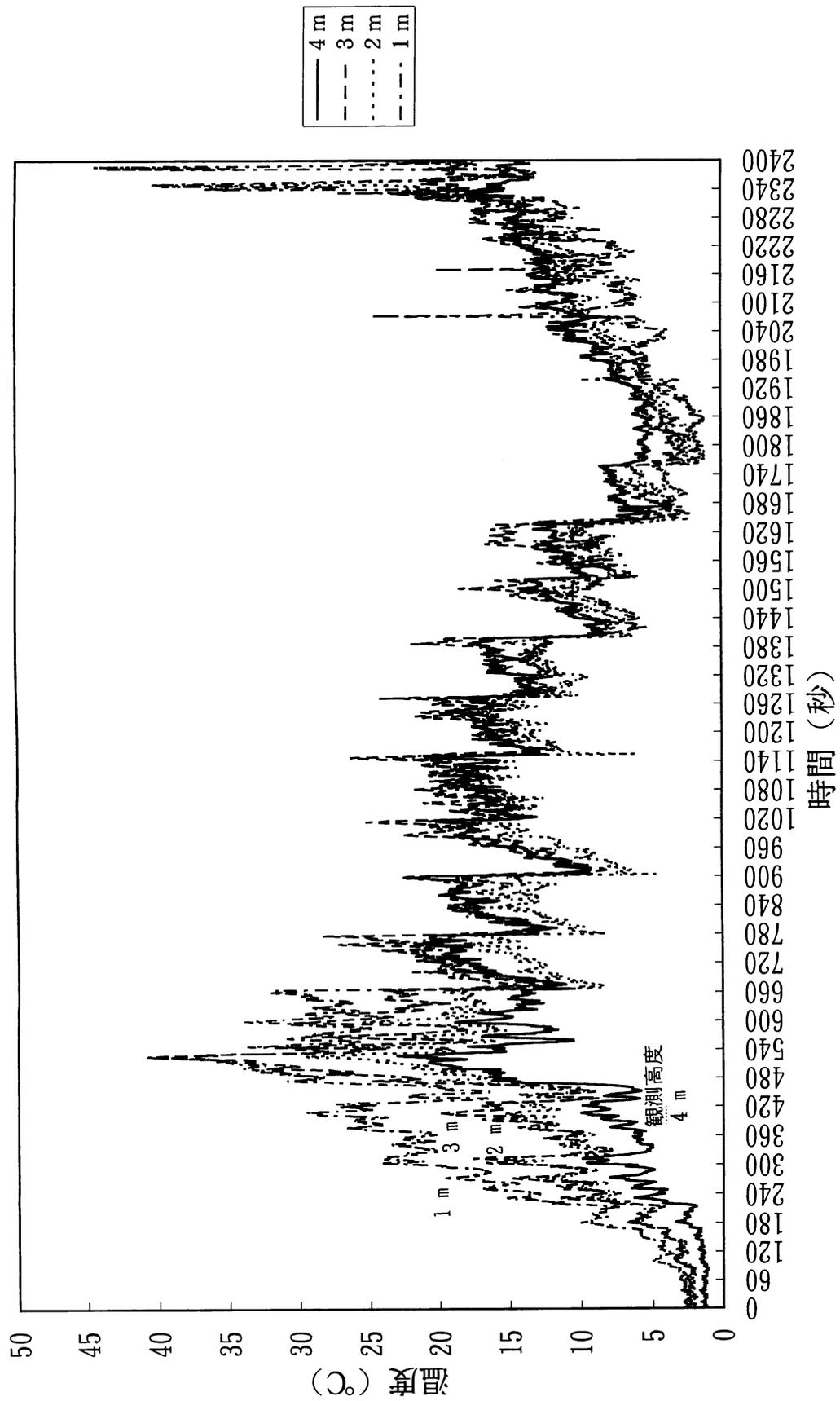


図6-4 気流温度の時間変化 (家屋Aの風上側2.5mの地点)

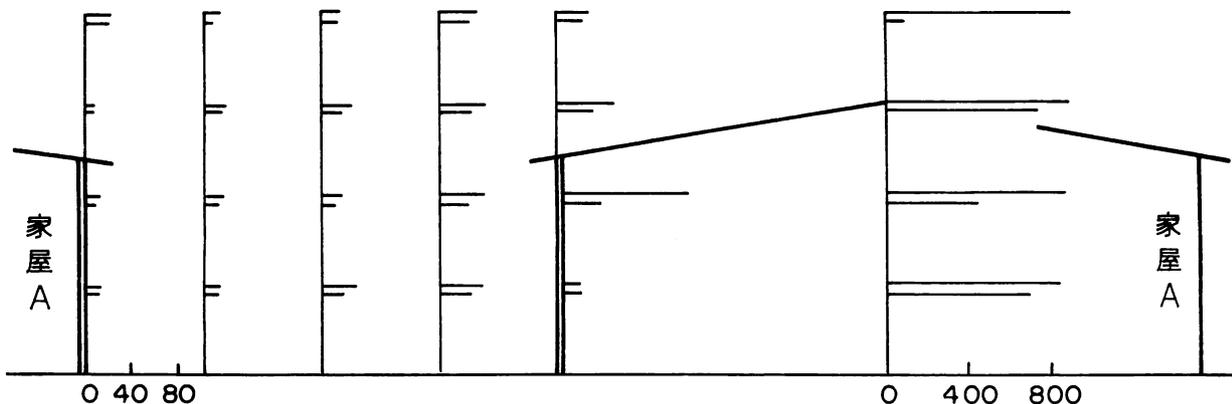


図6-5 鉛直断面の温度分布（東西方向、中心軸上）
散布番号4の前と後の分布

6. 5 まとめ

(1) 火災の進展と水の投下時間

建物火災の進展状況を、火勢と火炎温度から判断すると、火災の拡大期は1～5分、最盛期は5分～19分頃、減衰期19分以降であった。このような火災に対して、点火後5分から33分の間に15回水を投下して、火災の進展と火災抑止効果、延焼阻止効果の関係を観測した。水の投下回数は、火災拡大期に0回、最盛期に8回、減衰期に7回であった。

(2) 火災抑止効果と火災の進展の関係

最盛期に水を投下すると火勢を一時的に弱め、火炎温度も下がるが、数十秒経過すると元の状態に戻った。しかし、連続的に水を投下しても、炎上家屋全体の火勢を弱めることはできなかった。火災の減衰期においては、水を連続的に投下すると火勢が徐々に弱くなり、建物内の火炎温度が減少した。この期間に、水の投下を中止すると火勢は強くなり、火炎温度は再び上昇した。このように減衰期においては屋根や外壁がなくなることから水を連続的に投下している期間だけ火勢を抑止できることがわかった。

(3) 風上方向への延焼阻止

水の投下を継続している期間内には両家屋間に配置した廃材が燃えることはなかった。しかし、33分頃に水の投下を中止すると火災荷重が小さい方の廃材（北側）は燃えなかったものの、火災荷重が大きい方の廃材（南側）は燃焼し始め、風上方向に向かって拡大した。

第7章 放射照度及び外壁表面温度からみた火災抑止効果

7. 1 はじめに

放射計及び熱画像装置を使って火災から受ける放射照度、火炎の熱画像及び隣接家屋A'の壁の表面温度を測定した。これらの結果に基づいて、散布による火災抑止効果について検討した。

7. 2 放射計の配置

実験概要は「第1章 研究概要」に示されているので、ここでは、放射照度等の測定に関連したものに限定して述べる。

第2実験（火災家屋A棟及び延焼家屋A'棟）では家屋A棟の周囲に3台の放射計（東京精工（株）製RE-3）及び熱画像装置（日本アビオニクス（株）TVS100及びTVS8000）を配置した。また、家屋A'の前に2台の放射計を配置した。第3実験でも同様に放射計及び熱画像装置を家屋の周囲に配置して測定を行った（図7-2-1）。

放射計の方向は最大受熱量が得られるように火災の中心に向けて設定した。第2実験においてA'棟の前に設置した放射計の受熱面はA棟に平行になるように設定した。放射計は三脚を用いて高さ約1.2mの位置に固定した。放射計は特別に防水のための措置を施さなかった。放射計からの出力はデータロガーを経て、毎秒1回の取り込み速度でパーソナルコンピュータに記録した。

7. 3 結果及び考察

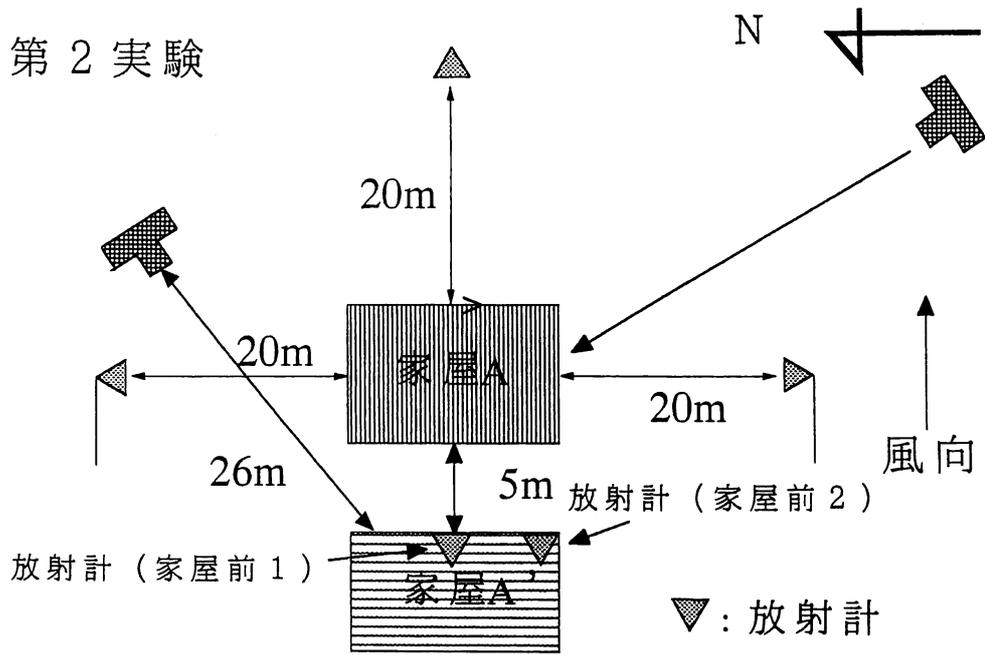
7. 3. 1 放射照度の測定結果

図7-3-1、図7-3-2及び図7-3-3にそれぞれ第2実験、第3実験（その1）、第3実験（その2）における各地点での放射照度の時間変化を示す。図中、横軸は点火1分前からの時間を示す。また、左軸は放射照度を示し、▼はヘリコプターから散布が行われたことを、数字は散布番号を示す。ヘリコプターからの水散布量は全ての実験において900Lであった。散布の条件及び状況については「第5章 水の拡散範囲と散布密度」に示してある。また、散布による燃焼状況の変化については、「第6章 火災性状と家屋間における気流温度分布」に示してある。

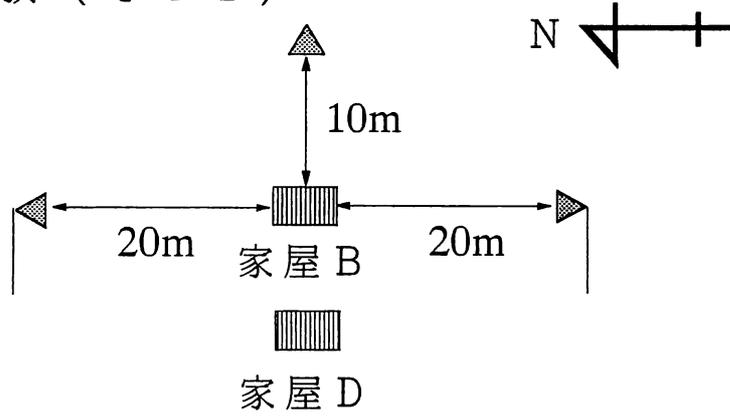
第2実験において散布は合計15回行われた。第3実験（その1）及び第3実験（その2）において散布回数は両者とも6回であった。散布は昨年度までに行われた東京都八王子市での実験[1,2]とは異なり、約2分間隔でほぼ定期的に行われたことから連続的な散布であると思なすことができる。また、今回の実験ではデータの取り込み速度を毎秒1回としたため散布による放射照度の時間変化に対して詳細な検討が行うことができる。

第2実験において、火災の拡大時期であることと散布番号1～散布番号3がA棟から外れたこともあって点火から約10分までは放射照度は時間とともに増加した。その後、散布が火災に命中すると放射照度の低下が見られた。これは火勢が弱まることの他に散布によって生じる水滴や水蒸気が空中に漂うことによって火災からの放射熱量が散布後に遮蔽されたためと考えられる。散布後において放射照度は一時的に減少したがその後再び増加する傾向にあっ

第 2 実験



第 3 実験 (その 1)



第 3 実験 (その 2)

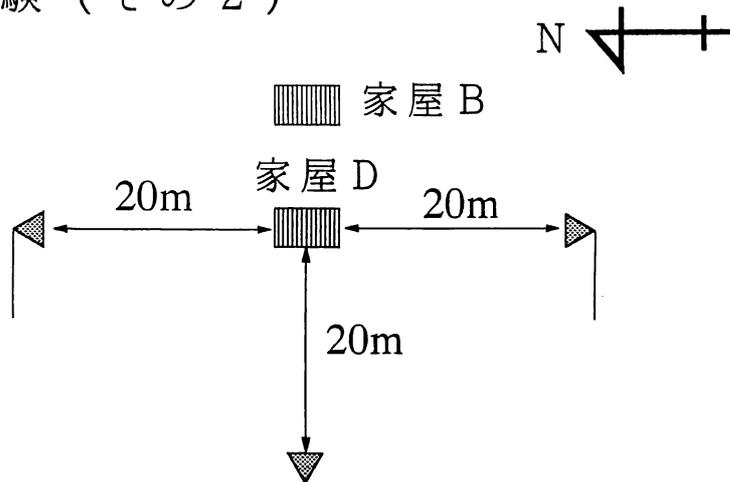


図7-2-1 放射計及び熱画像装置配置図

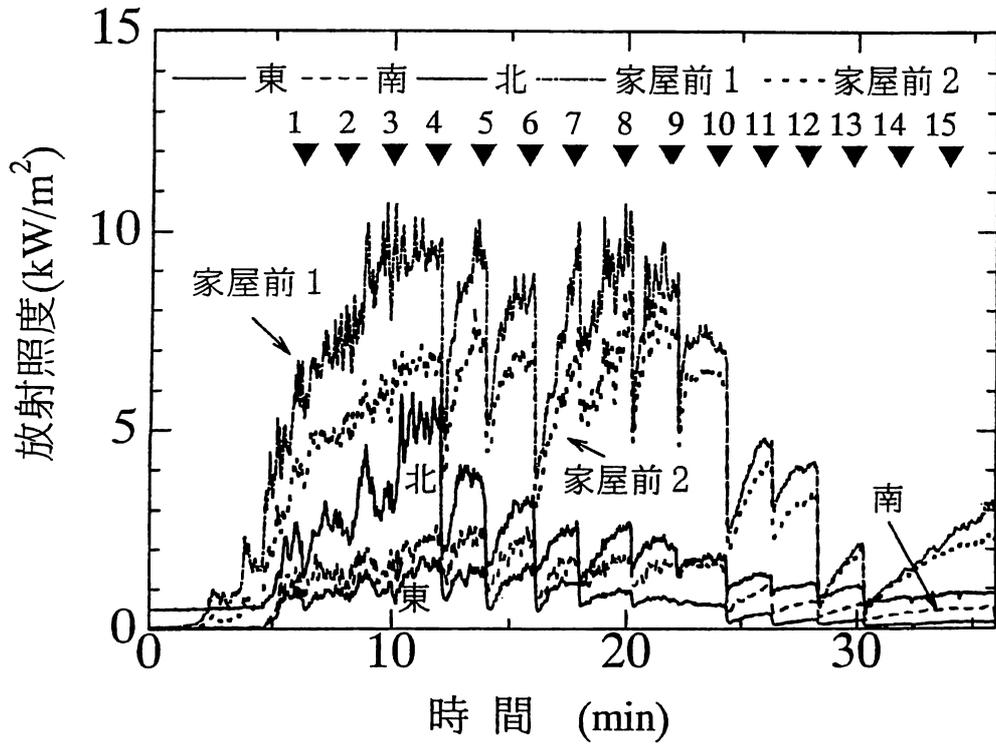


図7-3-1 第2実験における放射照度の時間変化

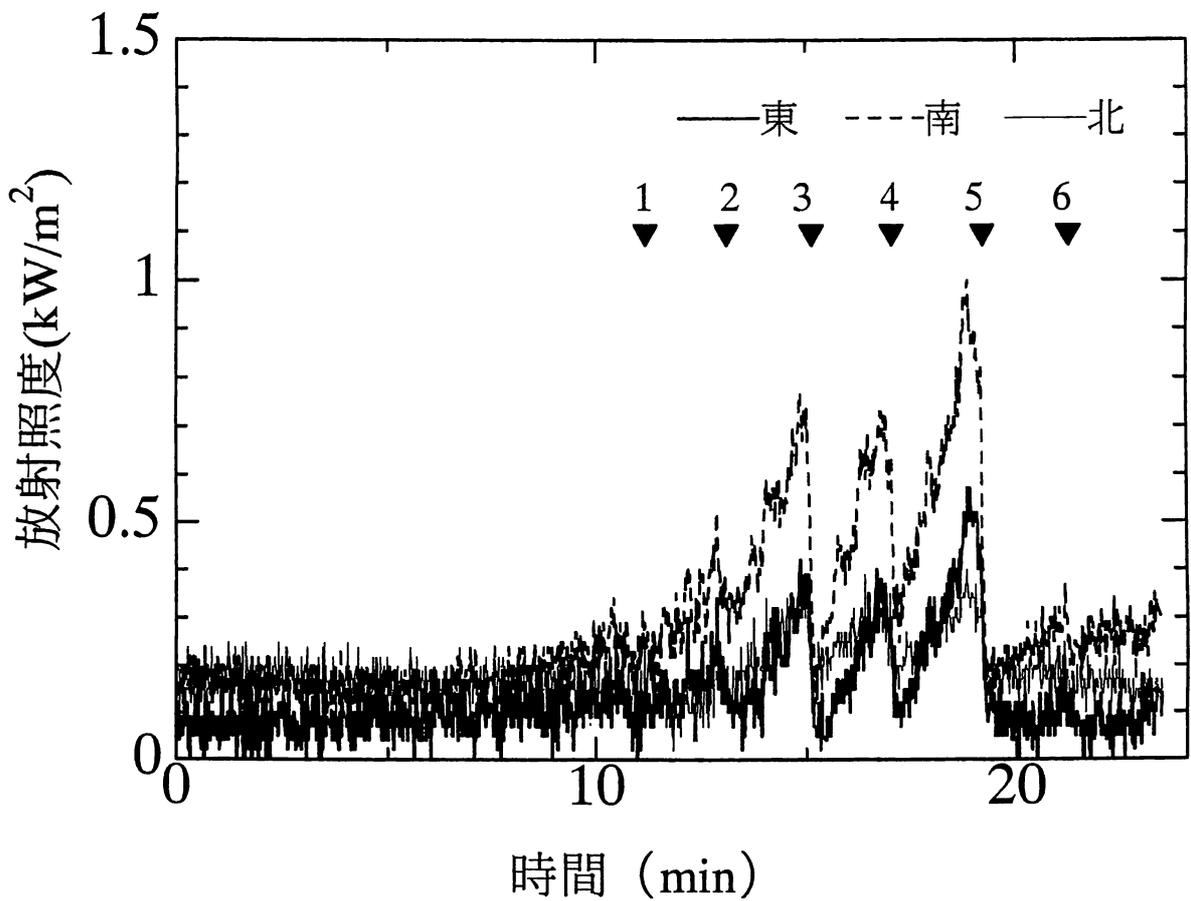


図7-3-2 第3実験 (その1) における放射照度の時間変化

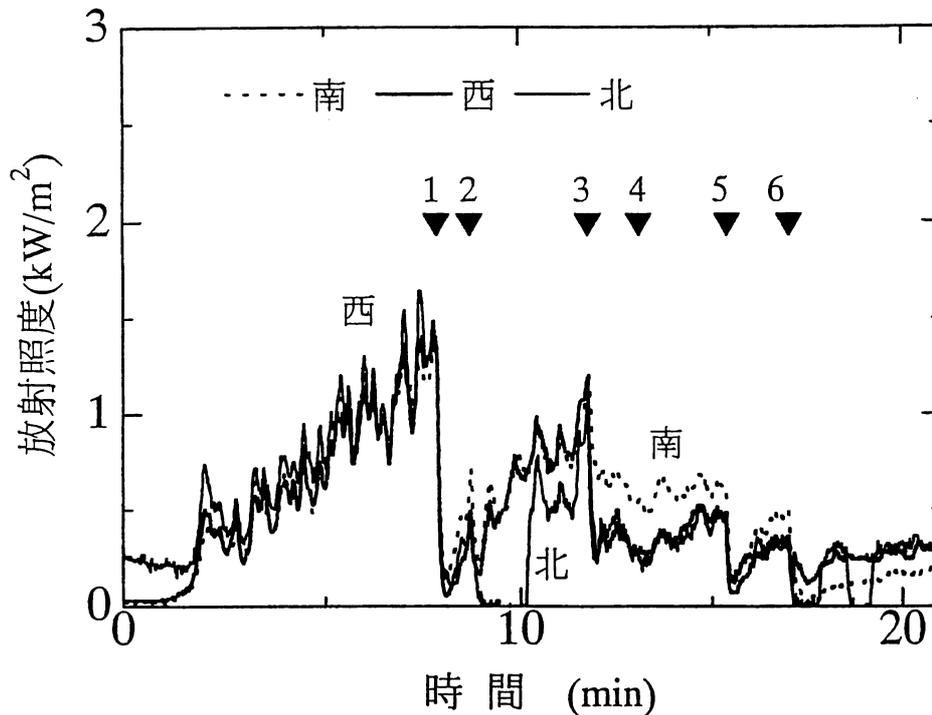


図7-3-3 第3実験（その2）における放射照度の時間変化

た。また、最後の散布（散布番号15）の終了後には放射照度は徐々に増加していった。これは崩れ落ちた木材の中で存在していた火炎が散布終了後に火勢を取り戻したためと考えられる。

第3実験（その1）では木材クリブを用いた飛び火火災に対する火災抑止効果を検討した。木材クリブの含水率が25%以上の部分（東側部分）と木材クリブの含水率が15%以下の部分（西側部分）の2カ所に点火した。点火部分の面積はほぼ同じとした。水散布は散布番号1では家屋Bを外れ、散布番号6では家屋Bの西側の一部分にのみ散布された。その他の散布番号2～散布番号5では家屋Bに対して命中した。家屋B全体の火勢は時間と共に徐々に火勢が強くなっていったが、水散布直後には放射照度は急激に減少した。散布番号2によって、点火用ウェスとその周辺がわずかに燃焼している状態であった含水率の高い部分は消炎した。散布番号3、散布番号4及び散布番号5では放射照度は一時的に減少したが、散布直後から放射照度は増加した。散布番号5直前の放射照度は、散布番号4が行われたにもかかわらず、散布番号4直前の放射照度を上回った。火勢が増加傾向にあるために、散布後でも放射照度は時間の経過と共に増加したと考えられる。散布番号2～散布番号5の中で散布番号5の場合に、散布直後に放射照度が最も大きく減少した。この理由として散布が火炎に効果的に命中したことが考えられる。しかし、散布番号5によって大きく減少した放射照度は、散布番号6が終了すると再び増加する傾向にあった。

第3実験（その2）では木材クリブ火災に対する火災抑止効果の検討を行った。水散布はすべての回で火災に対して命中した。散布番号1では南、西及び北の3方向とも急激な減少があった。実験中に北側の位置に設置した放射計が倒れたが、直ちに立て直した。水散布後に放射照度は3方向とも同じ傾向で低下した。散布後に火炎が一時的に木材クリブ表面から消

えたが、木材クリブ内部に残った火炎の火勢が増して再び放射照度が増加した。例えば、散布番号1の水散布によって木材クリブ表面の火炎は一時的にはほとんど消えたが、木材クリブ内部では燃焼が継続していたことが目視観測の結果判った。これらの様子は熱画像の撮影結果からも明らかになった。

7. 3. 2 散布による放射照度の減少

ヘリコプターからの散布による放射照度の変化を検討するために、散布の前後30秒間の放射照度の平均値 $(q_{av})_{after}$ 、 $(q_{av})_{before}$ から、次のように各方向の放射照度の低減率 λ を定義した。図7-3-4に散布とサンプリング範囲の時間的な関係を模式的に示した。

$$\lambda = (q_{av})_{after} / (q_{av})_{before}$$

λ が100 %より小さいほど放射照度が減少したことを示す。また、 λ が100 %より大きい場合は放射照度が増加したことを示す。第2実験における東、南、北、家屋前1及び家屋前2の測定位置での放射照度の低減率を図7-3-5に示す。家屋A' 前の放射受熱量は他の地点よりも放射照度の低減率が大きく、西方向で散布の効果が大きかったことを表している。

第2実験では散布番号1、散布番号2、散布番号3、散布番号14、散布番号15の散布において低減率が100 %を超えるものが見られた。この理由として、ヘリコプターの散布が燃焼区域に命中しなかったことや散布によって火炎が乱れて瞬間に大きくなったためと考えられた。散布番号4～散布番号13において低減率は全ての測定位置で減少した。火災減衰期の散布では測定位置によって低減率が異なる場合が見られた。すべての散布の中で東、南及び北地点の平均低減率が最も小さくなったのは、散布番号10の時で平均低減率は47.2%であった（家屋前1及び家屋前2の平均値：41.7%）。この理由として、火災の減衰期であったことや散布番号10では家屋Aに十分に散布されていたことが考えられる。前回の実験〔2〕では平均低減率の最小値は54.7%であった。

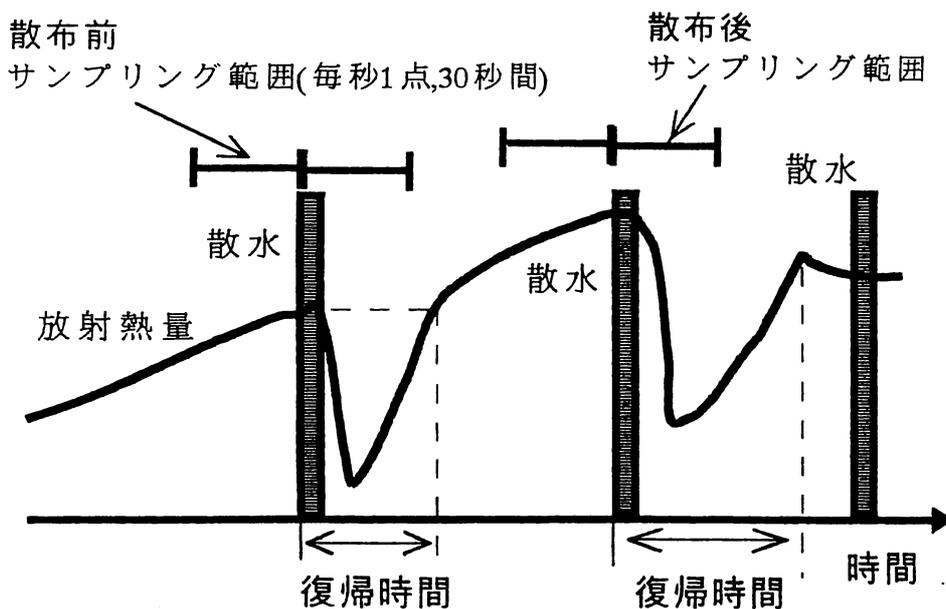


図7-3-4 散布とサンプリング時間の模式図

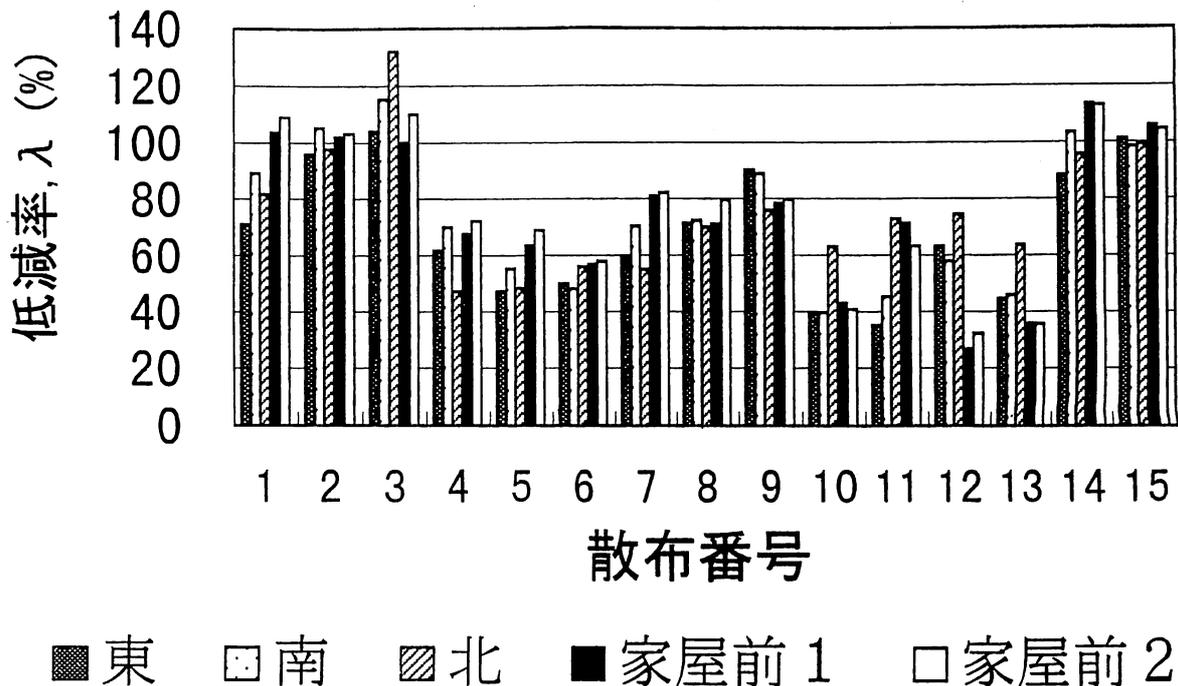


図7-3-5 第2実験における散布ごとの低減率

図7-3-6に第3実験（その2）における西、南及び北の測定位置での低減率を示す。第3実験（その2）では各地点の低減率はほとんど全ての測定位置で小さくなった。第3実験（その2）の6回の散布は、散布した時間により散水番号1と散水番号2、散布番号3と散水番号4、散水番号5散水番号6という3回ずつの連続的な散布が2回行われたと見なすことができる。南、西及び北の位置においてほとんど全ての散布で散布後の放射照度は散布前の値に戻らなかった。また、第2実験の場合よりも、実験後半では散布後に放射照度の減少量が小さくなる現象が顕著に表れていた。散布後に火炎が一時的に木材クリブ表面から消えたが、木材クリブ内部に残った火炎の火勢が増して再び放射照度が増加した。散布4の前には木材クリブ表面には火炎が見えなかったが木材クリブ内部で燃焼していたため、放射照度の減少がほとんど見られなかったと考えられる。同様な理由で散布番号2及び散布番号6による低減率も散布番号1及び散布番号3と比較して大きかった。

7. 3. 3 散布後の放射照度の時間変化

第2実験において散布番号1、散布番号2、散布番号3、散布番号14及び散布番号15の散布範囲が家屋A及びA'からはずれたのでそれらを除いて散布時の放射照度の時間変化を検討した。家屋前1の位置では散布番号4、散布番号6、散布番号7及び散布番号13において散布後の放射照度は散布前の値を上回った。これに対して、北側の位置では全ての散布で散布後の値は散布前の放射照度を下回った。実験の後半（火勢の減衰期）では散布後の放射照度が上昇しにくい傾向にあることがわかる。

放射照度が水散布後に減少して時間の経過と共に、増加していく現象が多くの散布で見られた。図7-3-7に第2実験の家屋前1及び北側における結果から、水散布が行われてから放射

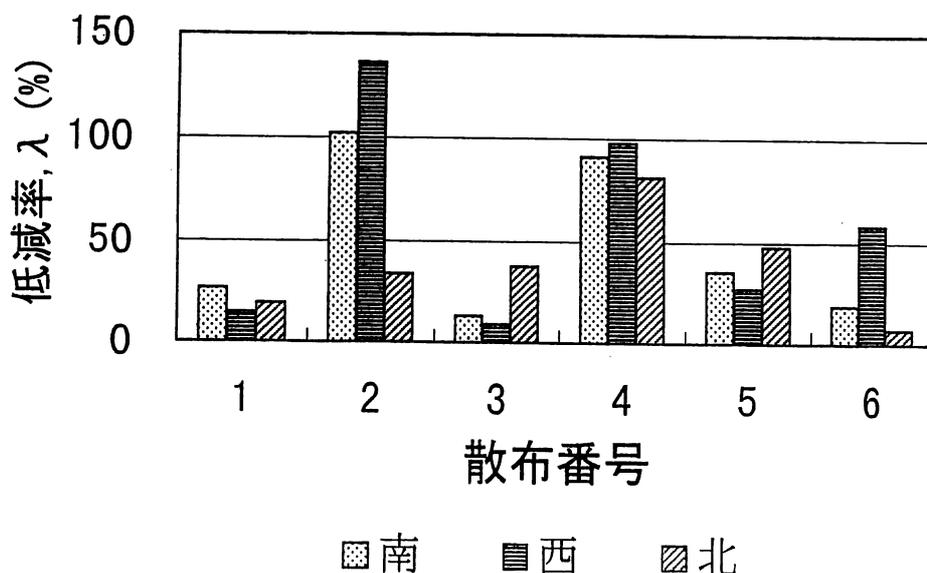


図7-3-6 第3実験（その2）における散布後との低減率

照度が最小値となるまでの時間を示す。散布から約10秒間後に放射照度は最小値となり、その後再び上昇して行くことが2つの測定位置で見られた。散布による火勢への影響について調べるため、ここでは「復帰時間」を次のように定義した。

復帰時間：散布後の放射照度が散布前の値に戻るまでの時間(s)。

散布前の放射照度に戻らない場合は、散布後の放射照度が
(次の散布までの間で) 最大値に達するまでの時間(s)。

図7-3-8に第2実験の家屋前1で測定された放射照度の時間変化から求めた「復帰時間」を示した。「復帰時間」は火災の最盛期には短く、火災の減衰期には長くなる傾向となった。散布番号10以降の「復帰時間」が長い理由については火災の減衰期であったことや家屋Aの壁及び上部が燃え尽きた後に散布が行われたことが考えられる。

7. 3. 4 放射照度の実測値と計算結果の比較

火炎から任意の点における放射照度 q は、次式によって計算することが出来る。

$$q = E \cdot \phi$$

E は、放射体の放射発散度、 ϕ は、火炎と受熱体間の形態係数[3]である。ここでは、火炎を傾いた円筒と仮定して計算した。家屋A'前に設置した放射計Cの結果について、点火後5分、10分及び15分後の火炎の大きさ、傾き及び受熱体までの距離を実験時の写真等から求め計算を行い測定結果との比較を行い、結果を表7-3-1に示した。両結果には、大きな差異はないものと考えられる。

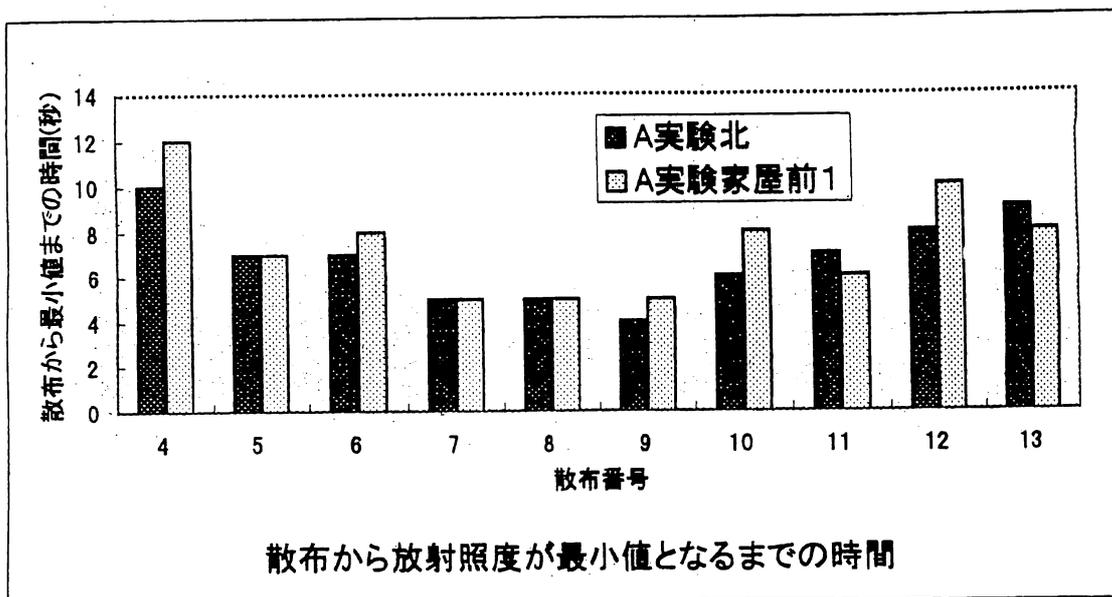


図7-3-7 散布から放射照度が最小値となるまでの時間

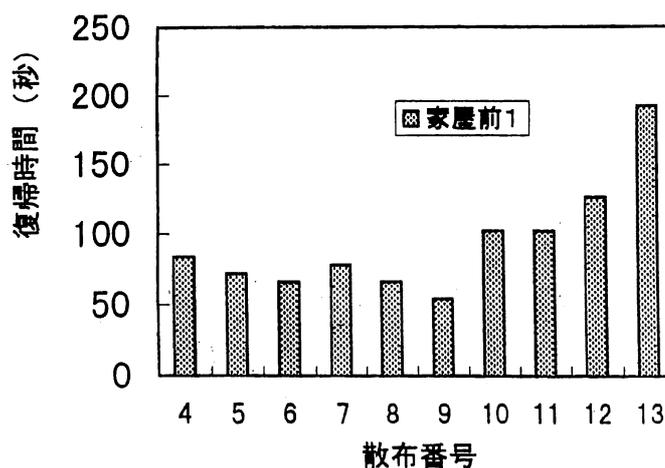


図7-3-8 放射照度の時間変化から求めた「復帰時間」

表7-3-1 家屋A'における放射照度

点火からの時間 (分)	放射照度 (計算結果)	放射照度 (測定結果)
5	6.7	4.0 kW/m ²
10	8.8	9.5
15	8.2	8.2

7. 3. 5 熱画像測定結果

(1) 第2実験における家屋A'表面温度の時間変化

家屋A'が家屋Aに面する表面の温度は、点火後徐々に上昇している。そして、ある一定以上の温度が続いた場合に、発火するものと予想される。木材の発火は、含水割合に大きく影

響を受け、また、測定条件にもっても異なるが、杉板の場合、 $10.5 \sim 13 \text{ kW/m}^2$ の放射照度を8分程度受けた場合、杉板温度は、 420°C 程度になって発炎することが知られている[4]。また、着火限界加熱強度は 10 kW/m^2 とされている[5]。家屋A'への熱伝達は、主として火炎からの放射熱によるものと思われるが、このほか、熱気流による対流分、接炎による伝導分も考慮する必要はあるものと思われる。

そこで、家屋A'の家屋Aに面した側（東側）の壁及び火炎の熱画像をを使って連続的に撮影を行った。熱画像装置の設置位置等は図7-2-1に示した。ここで、家屋壁の放射率 ϵ は1と仮定してStefan-Boltzmannの法則によって温度を求めた。

$$q = \epsilon \sigma \phi T^4$$

ここで、 q は、熱画像装置が受ける放射照度、 ϵ は、対象物(家屋の壁)の放射率、 σ は、Stefan-Boltzmann定数、 ϕ は、火炎と熱画像装置間の形態係数、 T は対象物の絶対温度である。

家屋A'の東側壁面は、幅1.8m、高さ1.5mの2つの窓を有し、幅7.2m、高さ3.0mである(図7-3-9)。図7-3-10(a)~(c)に第8回の水散布の前後の熱画像の変化を示した

家屋A'の東側壁面

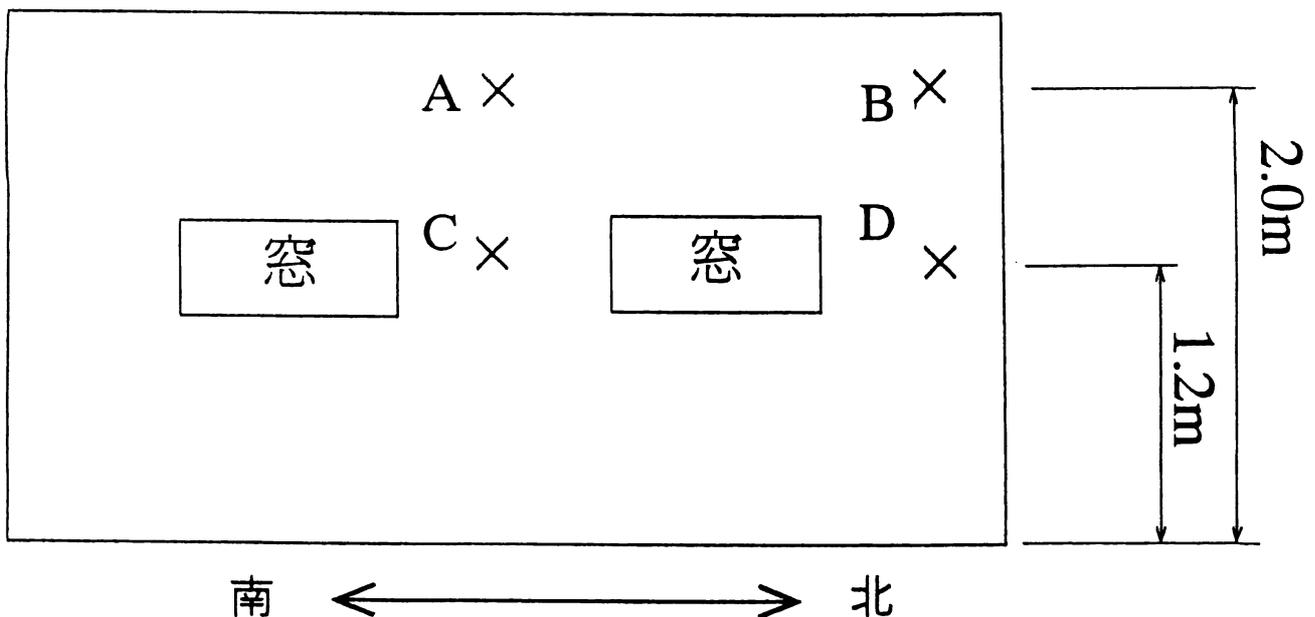


図7-3-9 家屋A'東側壁面の温度測定位置図

ものである。

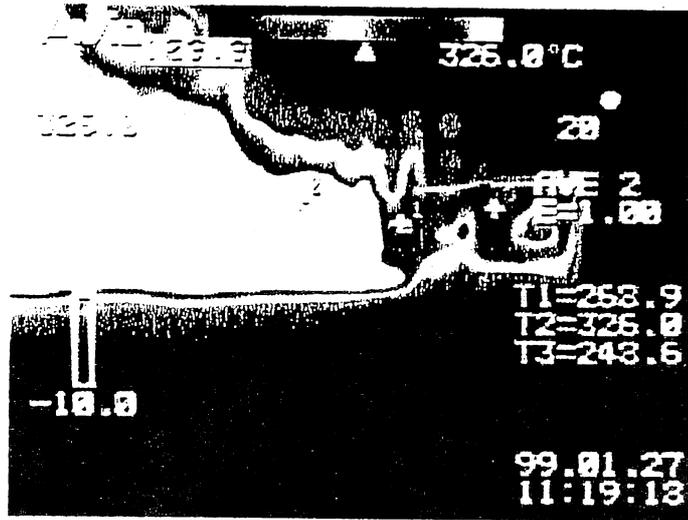
熱画像上の値は、 T_1 及び T_3 は、家屋A'の壁温度、 T_2 は家屋Aの温度を表している。 T_1 及び T_2 が水散布の前後で大きく低下していることが判る。また、窓の温度は、壁よりも低い温度を示しているが、これは、壁と窓の放射率の差も影響していると考えられる。

(a)は、散布前、(b)は、散布直後で最も壁温度が低下した時、(c)は、(b)から更に5秒経過後の様子で壁温度はやや上昇している。第8回の水散布では、水は家屋A及び家屋A'の間に落下して比較的効果があった。散布した水が火炎に直接係った場合や家屋A'に係った場合には、その温度は急激に低下し、その後再び温度は徐々に上昇する。この表面温

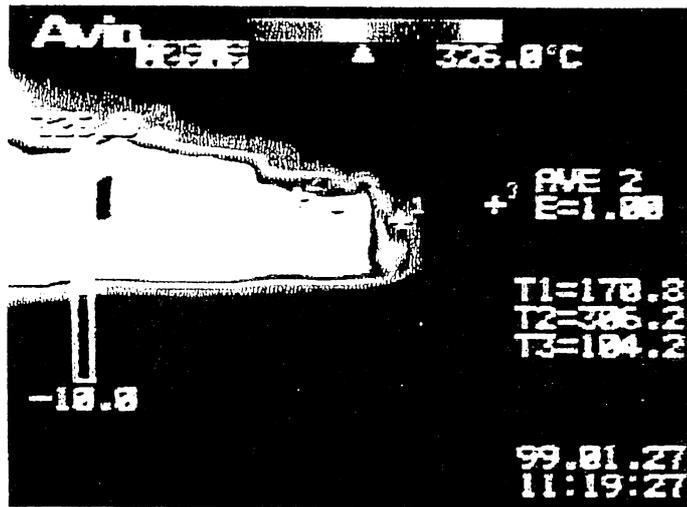
度を測定することで散布効果が判る。

次に、図7-3-9のA、B、C、Dの4点での温度の実験中の経時変化を図7-3-11に示した。C点は家屋前に設置した放射計No.1の位置に相当する。原点は点火開始時間で、図中の▼は散布が行われたことを、数字は散布番号を示す。各測定点での壁面温度は点火10分で最高温度（D点において約300℃）に達した。火災減衰期において散布が行われている間は温度は低下傾向にあったが、散布終了後には再び上昇していった。放射照度は散布後の値が散布前の値よりも高くなることがあったのに対して、散布後の壁面温度は上昇したものの散布前の値より低く建物を冷却させる効果が期待できる。即ち、散布された水は、その大部分が蒸発するまでに時間がかかるために、抑制効果がより長時間継続するためと考えられる。火災最盛期に行われた散布番号4及び散布番号6において家屋A'の壁面温度は大きく低下した。この傾向は放射照度の変化と同様である。

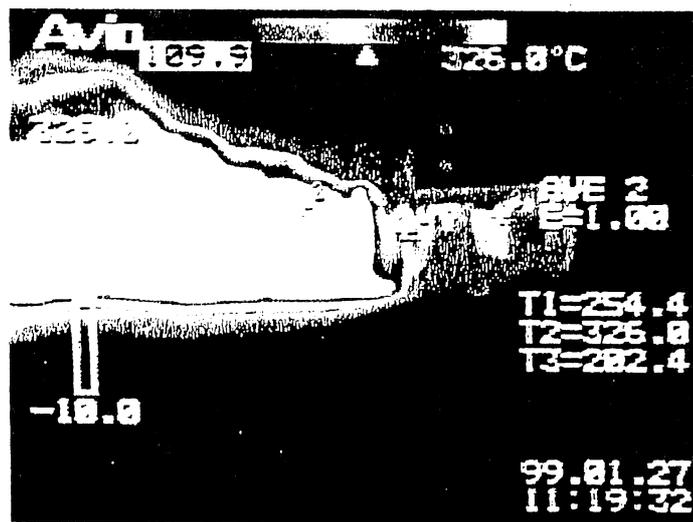
ほとんど家屋A'に当たらなかった散布の場合（散布1）にも温度の低下が見られた。これは、霧状になった散布水がわずかに建物にかかったためと考えられる。この場合でも、散布1が火災最盛期前のために家屋Aからの放射熱が小さく、家屋が散布水のある程度保持したために、若干の効果があったものと推定される。



(a)



(b)



(c)

図7-3-10 第8回の水散布の前後の熱画像の変化

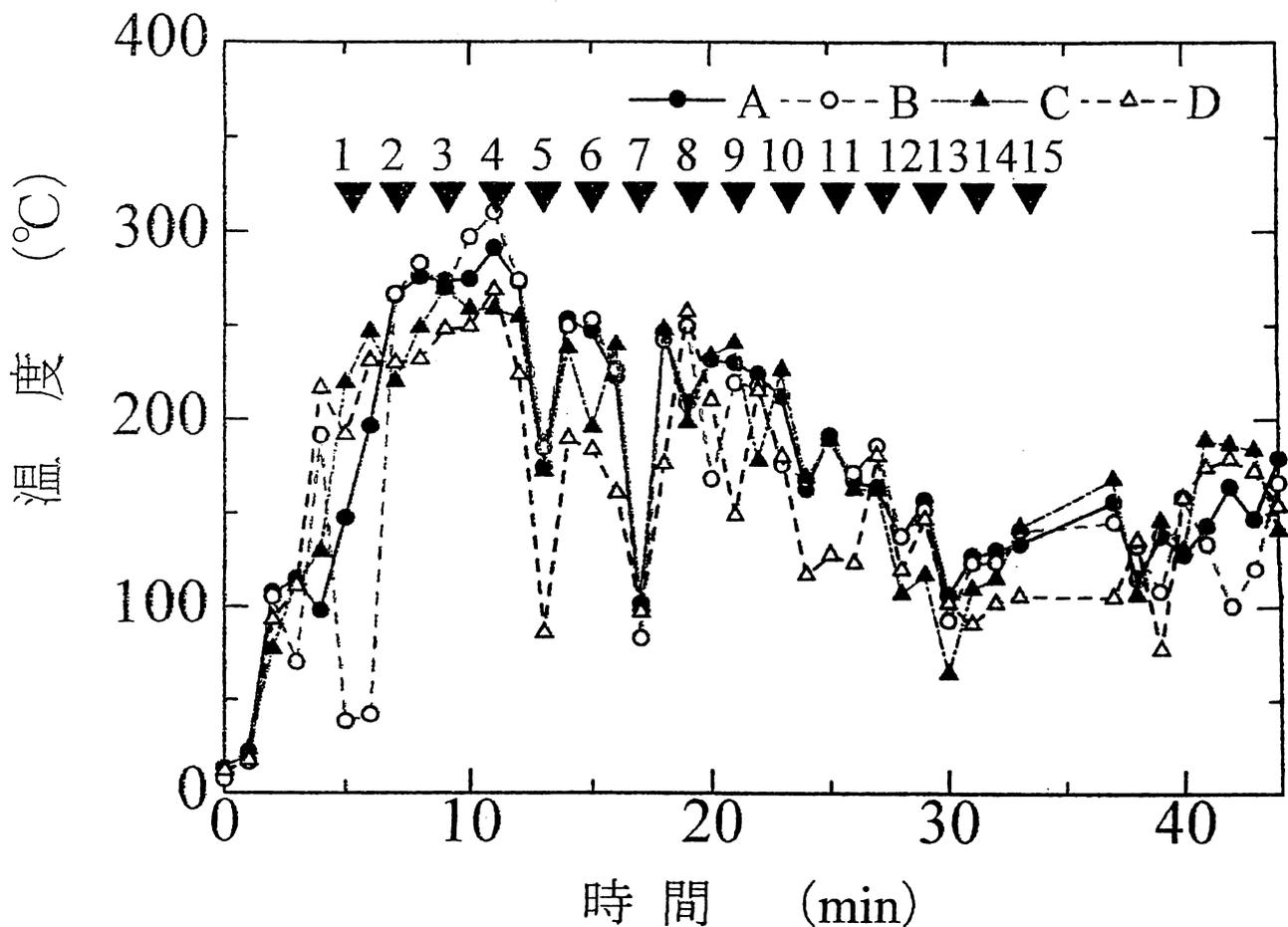


図7-3-11 温度の実験中の経時変化

次に家屋A'の中心軸の表面温度分布の時間変化を調べた(図7-3-12)。図中横軸は、地面からの高さで、縦軸は温度を表している。時間は、点火からの経時時間である。点火直後は温度は最も低く、点火後6分~18分で最も高くなり、最高温度は約260℃にまで達した。水散布が始まった後は、温度が低下した。全体的に地面付近で最も温度が低く、家屋A'の上部の方が温度は高い。これは、家屋A'の表面温度は、火炎からの放射熱によって温度が上昇するものと考えられ、受熱体と家屋A'火炎との形態係数の違いから家屋A'の上部がより温度が高いものと考えられる。しかし、水散布後は、水散布が主に家屋の上部にかかることから表面温度は、高さ2m前後にピークが見られたものと考えられる。しかし、水散布が終了した、点火後37分及び42分の場合には、家屋の下部の方が温度が高いが、これは、家屋AとA'間の可燃物が燃えだして、その火炎のために家屋A'の下部が熱せられて温度が上昇したものと考えられる。

以上の結果から、家屋A'の温度は、木材が発火すると考えられる温度には達しておらず、実験後の目視観察でも、家屋A'の表面は、熱による変色等は見られなかった。

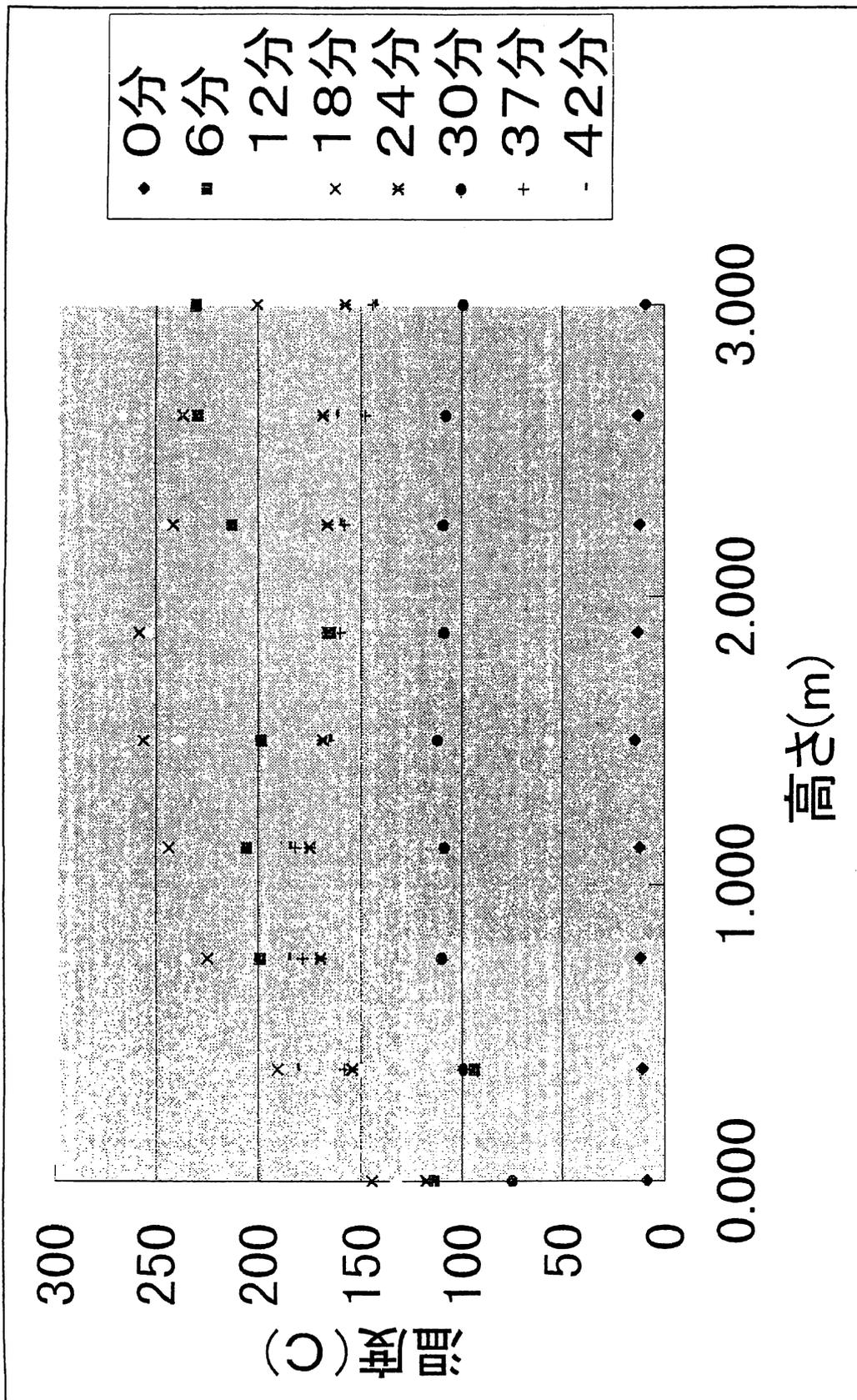


図7-3-12 家屋A'の東側壁面中心軸上の温度分布の時間変化

(2) 放射照度と家屋A'表面温度の比較

図7-3-9中の点Cの位置は、ほぼ放射計No. 1の位置と同じであるために、放射計の出力結果(図7-3-1)と比較した。両者は、類似の傾向を示している。従って、両者が密接な関係にあること、即ち、家屋の表面温度は、火炎からの放射熱によって主に上昇することが判った。しかし、両者を詳しく比べた場合、次のように異なる。

1) 放射照度は、点火後12分位(第4回の散布)まで、上昇しているが、家屋表面温度は、点火後7分以降大きな温度上昇をしていない。前者からは、第1回~第3回までの散布は、ほとんど家屋A及び火炎に当たっていないこと、または、少量の水が火炎にかかっても火炎の抑制の効果がなかったことが推測される。他方、家屋A'の壁には、ある程度の水が散布されたために温度上昇が起こらなかったものと考えられる。即ち、第1回の散布は、風上での散布のために家屋A'には気流によってある程度の水がかかったことが推定され、また、第2回の散布でも家屋A'には直接かかっている。

2) 放射照度から見た場合、第5回、6回、10回、12回の水散布が大きな効果があったことが判る(図7-3-5)。一方、家屋A'の壁温度は、第7回の水散布で最も温度が降下している。また、5回、6回、12回でも大きな温度降下がみられた。これらの散布では、家屋A及びA'に散布がなされており、A'の東側壁面への水のかかり方の違いが影響したものと考えられる。

(3) 家屋A'表面温度測定結果と熱電対による温度測定結果との比較

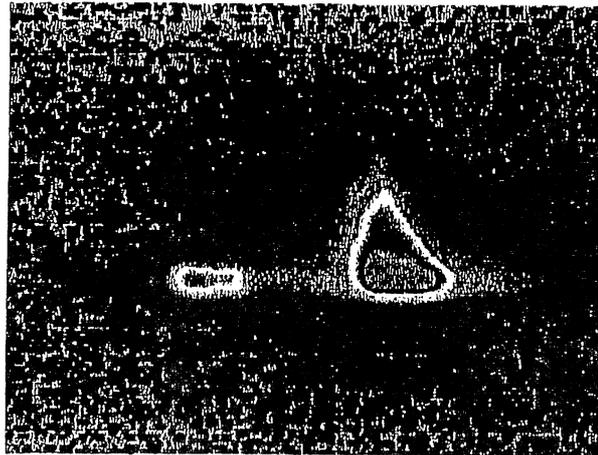
熱電対を家屋壁表面上、数cm離れた点に設置して温度の測定を行った。このようにして得られた温度は、壁表面の空気(気流)の温度を測定しており、壁温度そのものではないが、熱画像装置による温度測定結果と比較することで多くの知見が得られた。

実験中の周囲温度は、ほぼ0℃であり、熱電対は、火炎または火炎から生じる熱気流に触れた場合に、高温度を示し、火炎からの放射熱による温度上昇は無視できるものと考えられる。そのために壁温度に比べて非常に低い結果(点火後10分で最高温度20℃)となり、その温度分布も複雑になったと考えられる。一方、家屋の壁温度は主に放射熱によって温度上昇がなされ、また、壁の上方の方がやや温度が高い傾向にあった。これは、壁の上方ほど、散布水の保持時間が短いこと、火炎との形態係数は上方ほど大きいことから推定出来る。

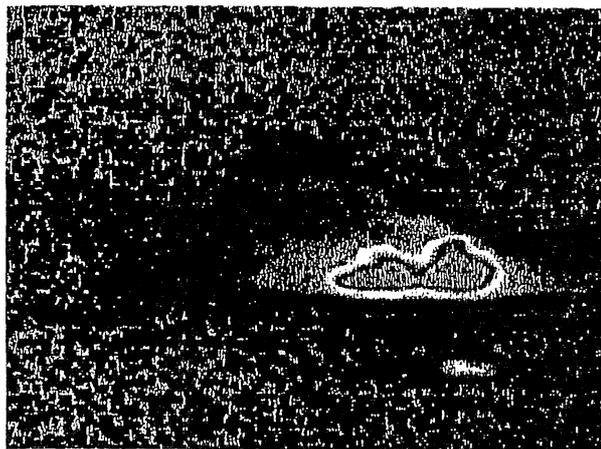
(4) 第3実験(その1)における熱画像の変化

点火は、クリブ上で2カ所で行われた。点火面積は、両者ほぼ同じであったが、クリブの条件が異なり、西側部分は、クリブが乾燥しており(木材クリブの含水率15%以下)、一方、東側部分は、含水率が25%以上と高い。図7-3-13(a)は、点火約8分後で、水散布前の熱画像であるが、前者の方が良く燃焼していることが判る。

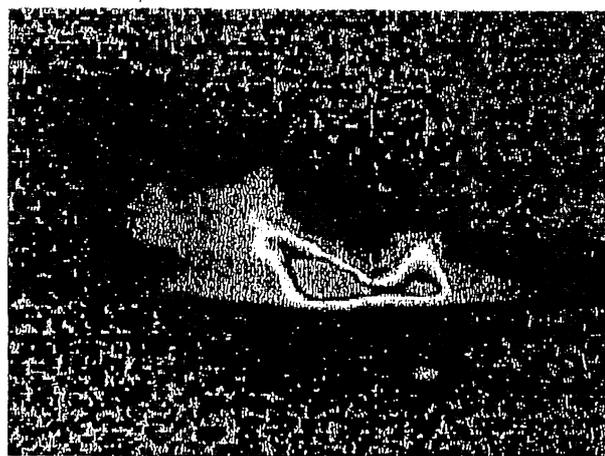
次に、散布6回目直前の熱画像を示した(図7-3-13(b)及び(c))。クリブ内にも火炎が存在していることが判る。外部から見た場合には火炎は小さいが、空中からの水散布ではこれらの火炎の消火は容易ではなく、空中消火の効果を弱めている。



(a)



(b)



(c)

図7-3-13 第3実験（その1）での家屋bの熱画像の変化

(5) 第3実験(その2)における熱画像の変化

第3実験(その1)同様に、第3実験(その2)における空中消火の効果を熱画像から調べた。図7-3-14(a)~(j)は、放射照度の測定結果から効果があったと思われる第1回散布前後における熱画像の6秒ごとの変化を調べた。同熱画像は、西側60mから、撮影を行ったものである。散布は(b)の直前に行われたが、火炎に当たっているために、火炎(ここでは、被写体の放射率を1とした熱画像が与える温度において425°C以上のものと定義した。)は、散布直後には、ほぼ完全に無くなっている((c)及び(d))。熱画像でも南側(図中では、左側)にわずかに火炎が残っているのみである。しかし、散布水は、クリブ内部には十分に届いてはならず、(c)以降、徐々にクリブ内の火炎(図中、左下に点在する高温部分)は大きくなり、数十秒後には、(g)のようにクリブ上にも再び火炎が現れ、更に火炎は大きくなった。このように空中消火によってクリブ火炎が縮小したのは、一時的に過ぎないことが判る。従って、空中消火の効果が限定的であり、クリブ火災の空中消火の難しさが明らかになった。

7.4 まとめ

ヘリコプターによる空中消火の効果を評価するために、火災周囲での放射照度の変化を調べた。また、風下の隣接建物への延焼阻止を考えて、当該建物の表面温度を熱画像装置によって測定した。

火災周囲での放射照度の変化については、八王子での実験から、大量の水散布を連続的に行うことが必要であることが判っているが、今回も風が強い気象条件であったが、同様の結果を得た。隣接建物の表面温度の熱画像測定結果からは、比較的少量の水を風上から散布することでもある程度の時間、建物の表面温度を下げる効果があることが判った。また、隣接建物への延焼は、隣接建物の表面が放射熱によってその温度が上昇して発火に至るために、当該建物表面の温度とその継続時間が重要である。従って、隣接建物への延焼抑止を図るには、その壁温度を低下させるような水散布方法を行う必要がある。

クリブ火災の場合にも、クリブ表面の火炎は、空中からの水散布で容易に消滅するが、クリブ内部に存在する火炎は残り、空中消火によってクリブ火災を完全に消滅することは難しいことが判った。しかし、短時間ではあるが、放射照度の低減等の火炎抑制は可能である。

参考文献

- 1) 日本火災学会、市街地火災空中消火調査研究報告書(平成9年2月)
- 2) 消防研究所研究資料第42号、市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書(平成10年3月)
- 3) Sparrow, E. M. and Cess, R. D., Radiation Heat Transfer, Brooks / Cole Publishing Company, Belmont, California, 1966
- 4) 堀内三郎、建築防火、朝倉書店(昭和49年)
- 5) 日本火災学会、火災便覧(平成9年3月)

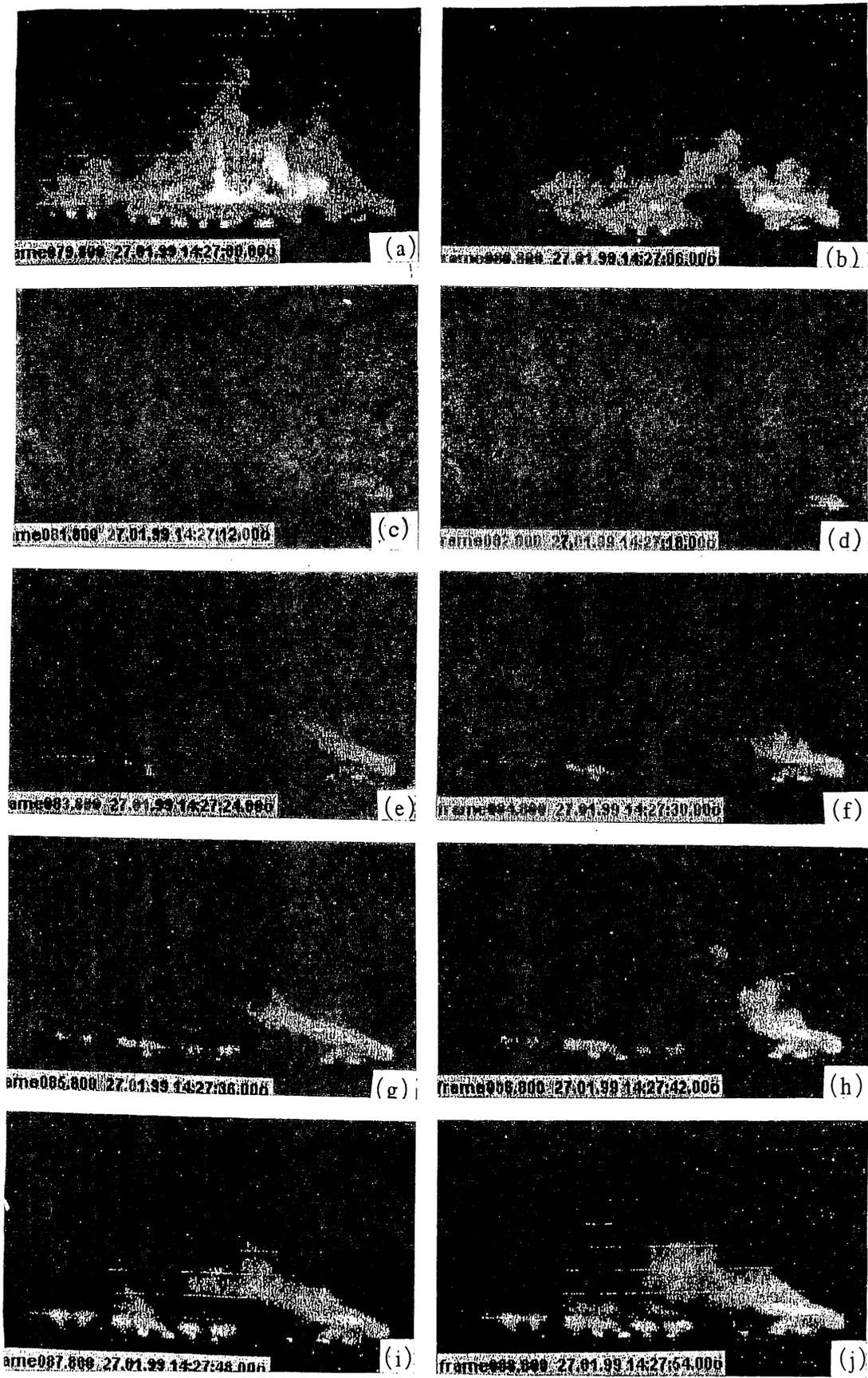


図7-3-14 熱画像の6秒ごとの変化

第8章 家屋間延焼阻止効果及び飛び火火災の火災抑止効果

8. 1 はじめに

独立家屋火災から風上家屋への延焼阻止、並びに大火災時の飛び火による火災への火勢抑止効果を目的に、ヘリコプターからの散布実験を行った。この実験での風上への延焼状況、並びに連続散布による延焼阻止効果、投下水の散布密度の状態による消炎効果等について報告する。

8. 2 分析方法

各実験毎に東西南北の4方向から撮影したビデオテープを用いて、ヘリコプターによる散布状況及び燃焼区域への効果について分析を行った。

家屋A及びA'間の延焼阻止を目的とした第2実験では、南北方向から撮影したビデオテープを中心に分析を行った。また、木材クリブ火災による飛び火火災を想定した第3実験では、風向きが西から南風に変わってきたので、南及び西方向から撮影したビデオテープを中心に分析を行った。

これらの一覧表を基に散布とその効果の状況を記号等で示したものが表8-1～8-3である。表8-1においては、延焼阻止と言う目的から、図8-1に示す家屋Aと家屋A'の間及びそれぞれの家屋の一部分（1～2m）の範囲の散布とその効果の状況を示した。

表8-2及び8-3については、散布範囲とその効果の状況を示した。

なお、これらの表に用いた記号等は以下の通りである。

[投下水の散布状況] ●：超高密度散布、◎：投下水の中心部分の濃い霧状の散布、

○：霧状散布、△：薄い霧状散布、－：散布無し。

[散布の燃焼区域への効果] A：効果大（無炎燃焼状態が60秒以上継続中）、

B：効果有（10～60秒未満の間に再燃）、

C：効果小（10秒未満に再燃）、空欄：効果無。

／：未燃焼、↓：上欄の状態を継続中。

8. 3 結果及び検討

8. 3. 1 風上への延焼阻止効果

第2実験における各飛行毎の燃焼区域等への散布状況とその効果を表8-1に示す。表に示す15回の散布飛行時の風速は6.1～11.9m/sあった。この為か表8-1に示すように、目標位置に効果的な散布が行われなかった。表8-1及び図8-1に示すように、独立火災家屋Aから風上の南側延焼媒体（100kg/m²）への延焼が始まったのは点火後23分22秒頃である。家屋Aへの点火は図8-1に示す北西の位置で、風向きは図に示す方向の西風であったため、南側延焼媒体に近い南側の壁が燃え始めたのは、点火後19分過ぎであった。この壁が燃え落ちた時期を同じくして、南側延焼媒体への延焼が始まっている。

具体的には、点火後21分3秒に燃え残っていた家屋Aの南西側の南壁面が傾き、南側燃焼媒体との境界付近に小火が確認された。その5秒後には、南側延焼媒体の上・中間付近にも小火が発生した。これらの小火は第9回目の霧状散布（点火後21分14秒）で消炎したが、下部は

表8-1 第2実験における各飛行毎の燃焼区域等への散布状況とその効果

飛行番号 (分:秒)	散布状況 と その効果	各ブロック		
		家屋A'	家屋A-A' 間	家屋A
1 (5:15)	散布	-	-	-
	効果	/	/	
2 (7:10)	散布	-	-	-
	効果	/	/ 全体に多量の 水蒸気発生	
3 (9:05)	散布	-	-	-
	効果	/	/	
4 (11:05)	散布	◎	◎	○
	効果	/	/	
5 (13:00)	散布	○	△	△
	効果	/	/	
6 (15:05)	散布	-	△	△
	効果	/	/	
7 (16:59)	散布	-	-	△
	効果	/	/	
8 (19:13)	散布	-	-	-
	効果	/	/	
9 (21:14)	散布	○	△	-
	効果	/	/	
10 (23:22)	散布	-	-	◎
	効果	/	2秒後、南側延焼 媒体で家屋Aとの境 界に小火あり	C
11 (25:23)	散布	-	-	-
	効果	/	9秒後、南側延焼媒 体で家屋Aとの境界 から約10cm延焼	↓
12 (27:18)	散布	△	◎	◎
	効果	/	A (1' 40" 後再燃)	A
13 (29:19)	散布	-	△	○
	効果	/	B (22" 後再燃)	A
14 (31:20)	散布	-	-	-
	効果	/	延焼幅約20cm	↓
15 (33:20)	散布	-	-	-
	効果	/	幅同じ炎高約1m	↓
(33:30)	南北側共	南側延焼媒体で家屋Aとの境界から約 20cm延焼		
(37:00)	南側	南側延焼媒体で家屋Aとの境界から約 20cm延焼		
	北側	南側延焼媒体で家屋Aとの境界から約 1mまで延焼		

注1) 家屋A'側の境界から家屋Aの約2m程度の範囲の散布
状況を示す。注2) 家屋A側の境界から家屋A'の約1m程
度の範囲の散布状況を示す。

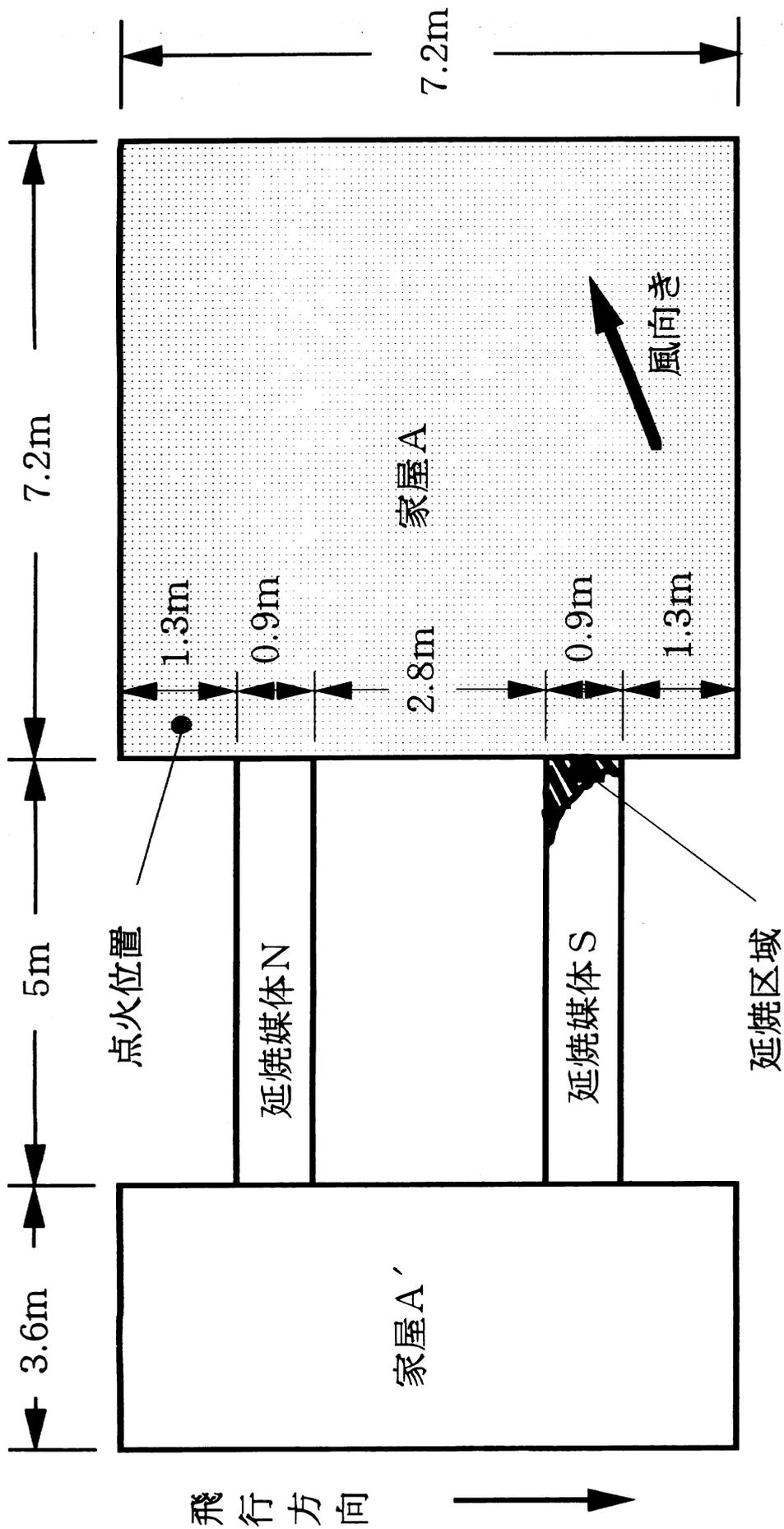
表8-2 第3実験（その1）における各飛行毎の燃焼区域への散布状況とその効果

飛行番号 (分:秒)	散布状況 その効果	各燃焼ブロック		散布位置
		L (低含水率)	H (高含水率)	
1 (10:12)	散布 効果	△ C	—	家屋Bの北西 外
2 (12:10)	散布 効果	△ C	◎ A	Hが中心
3 (14:10)	散布 効果	○ B	△ ↓	Lの南が中心
4 (16:05)	散布 効果	○ C	○ ↓	投下水の中心部 分は南端の一部
5 (18:15)	散布 効果	● A	◎ ↓	Lを中心に家 屋B全体
6 (21:00)	散布 効果	○ A	— ↓	家屋Bの西外

表8-3 第3実験（その2）における各飛行毎の燃焼区域への散布状況とその効果

飛行番号 (分:秒)	散布状況 その効果	南側方向から見た燃焼区域の区分			散布前後の燃焼区域等
		西端から1m以内	中央部	東端から3m以内	
1 (7:06)	散布 効果	◎ B	◎ A	— C	散布直前、可燃物下層部まで全面燃焼。 15秒後東側端から上面は1.8mまで炎、下部 は3.2mまで炎あり。
2 (7:58)	散布 効果	—	● *1 A	—	散布直前、東側端から3mまで、西側端から 1.5mまで炎あり。15秒後東側 端から上面は1.5mまで炎あり。西側端から 可燃物内部は1.5mまで炎あり。
3 (11:02)	散布 効果	○ C *2	— ↓	—	散布直前、東側端から3.2mまで、西側端から 1.6mまで炎あり。 15秒後東側端の炎変わらず。
4 (12:20)	散布 効果	—	— ↓	△ *3 C	散布直前、東側端から3.2mまで、西側端から 可燃物内部は1.8mまで炎あり。 散布4秒後、散布直前と変わらず。
5 (14:39)	散布 効果	◎ B	◎ A	—	散布直前、東側端から3.5mまで、西側端から 1.8mまで炎あり。 散布15秒後東側端から1.8mまで炎あり。
6 (16:15)	散布 効果	—	△ ↓	● *4 A	散布直前、東側端から3.3mまで、北側部分 の西側端から1.3mまで炎あり。 散布30秒後北側部分の西側端付近に小火。

* 1 : 南北方向全域、* 2 : 可燃物内部から再燃、* 3 : 北の端の一部、* 4 : 南側に集中散布



延焼媒体 N (北側) : 火災荷重 30kg/m^2
 延焼媒体 S (南側) : 火災荷重 100kg/m^2

図8-1 第2実験 (家屋 A、A' 及び延焼媒体) の配置



南

(a) 第12回メイン散布 (11:27:18) 直前



北



南

(b) 第12回散布後 (家屋A-A'間：○、家屋A：○)



北



南

(c) 第13回散布後 (家屋A-A'間：△、家屋A：○)



北



南

(d) 第14回散布直後 (家屋A-A'間：一、家屋A：一)
第13回散布後から2分3秒後



南

(e) 第15回散布直後 (家屋A-A'間：一、家屋A：一)
第14回散布後から2分6秒後
第13回散布後から4分9秒後

写真8-1 家屋Aと延焼媒体境界の燃焼状況

29秒後に再燃した。

写真8-1は家屋Aと延焼媒体との境界を主に南側から見た延焼状況を示す。12回目の散布直前には、写真8-1 (a) に示すように、南側延焼媒体よりの家屋Aも火勢を盛り返しつつある状態であったが、投下水の中心部分の濃い霧状の散布により散布後は同写真 (b) に示すように大きな効果があった。散布後1分40秒で再燃し、13回目の散布は薄い霧状散布であったので、散布後22秒で再燃した。

しかし、その後の2回の飛行ではこの区域に散布されなかったため、写真8-1 (d) 及び (e) に示すように徐々に火炎が大きくなり、散布飛行終了後からは本格的に風上への延焼が拡大した。15回目の散布終了時では写真8-1 (e) に示すように延焼は20cm程度であり、13～15回目の飛行時に高密度の散布が連続的に行われていれば、延焼阻止できた可能性は大きかったのではないかと思われる。

図8-2は第13回目の散布飛行が終了してからの南側延焼媒体の延焼状況を示す。同図 (a) は北側から、(b) は南側から見た延焼状況を示す。図8-1に示す風向から判るように延焼媒体の南側面には冷たい強風が吹付けていたため、風下側に相当する北側面 (a) の延焼が大きくなっている。最終散布から10分40秒後（点火から44分後）においては、南側延焼媒体の南側面の延焼距離は約0.5mであるのに対し、北側面では約2.3mまで延焼しているのが判る。

この北側の延焼距離を経過時間で示したグラフが図8-3である。同図に示す14及び15回目の投下水は延焼区域に散布されていない。15回目の最終散布時でも延焼距離は20cm程度と小さかったが、その後は急激に延焼が進んでいることが判る。時間に対する延焼距離は必ずしも直線的ではないが、相関係数0.98で約18cm/minの延焼速度であった。

昨年行った八王子での実験では、点火10分後には2.5m程風上に延焼していたが、今回は図8-3に示すように大幅に延焼が遅れている。これは、表8-1に記載したように家屋A-A'間での水溜まりからの水蒸気の発生、1℃前後の冷たい強風による冷却効果と可燃性ガスの吹き飛ばし等の理由によるものの他、軒下への燃焼物体の落下物がなかったこと、あるいは放射熱による発火現象がなかったためと思われる。

なお、今回の実験において燃焼家屋からの放射熱による延焼媒体からの発火の現象も見られなかった理由としては、次のことが考えられる。これは表8-1に示しているように、第1実験の6回の散布飛行によりできた家屋A-A'間に溜まった水が蒸発し、白色の蒸気が風上の家屋A'側に流れている現象が観測されている。従って、延焼媒体付近の水蒸気が熱放射の影響を和らげる効果があったと思われる他、冷たい強風による冷却効果も加味されて放射熱による発火の現象が発生しなかったものと思われる。

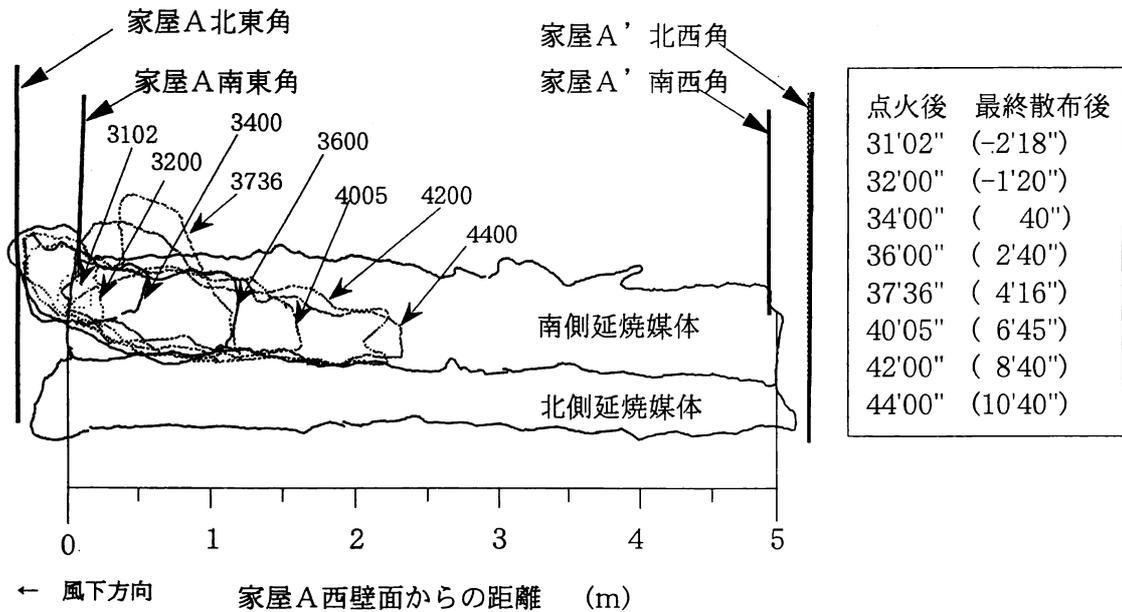
8. 3. 2 飛び火火災への火災抑止効果

8. 3. 2. 1 90cm角規模の飛び火火災

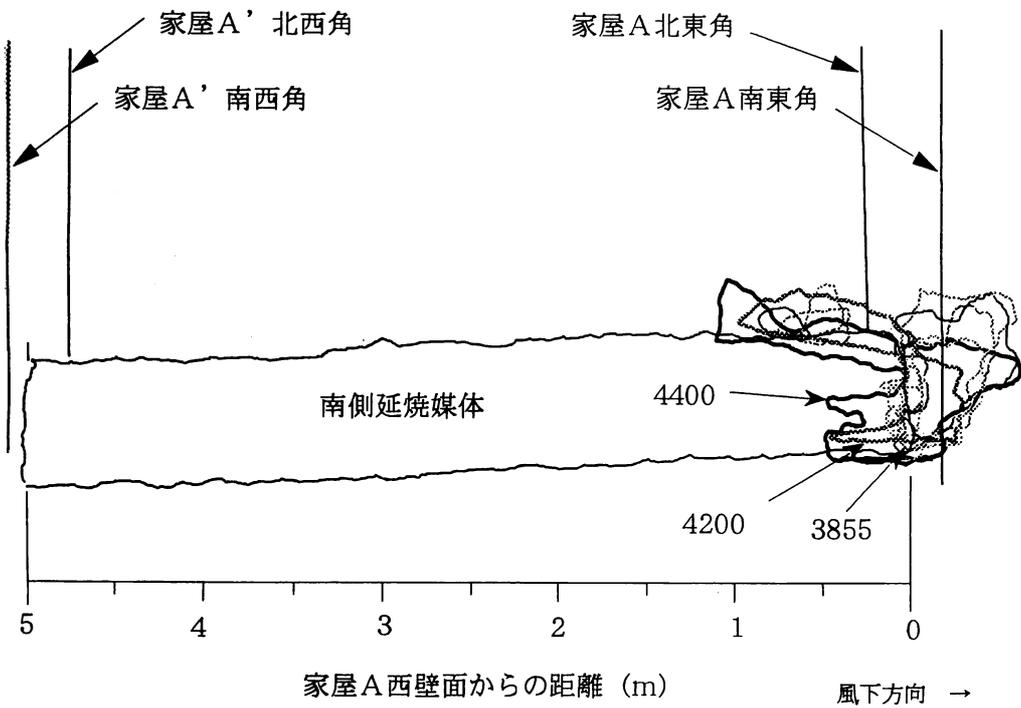
小規模な飛び火火災については同時に同一クリブ上で、含水率25%以上の可燃物区域 (H) と含水率15%以下の可燃物区域 (L) に同時に点火し、燃焼速度の異なる2カ所の飛び火火災に対する抑止効果と散布状況を調べた、その結果を表8-2に示す。

1) 可燃物の含水率が25%以上の場合

含水率の高いH区域は燃え方が悪く、第1回の散布開始時には点火用ウエスとその周辺がわ



(a) 北側から見たの延焼状況



(b) 南側から見た延焼状況

図8-2 南側延焼媒体の延焼状況

ずかに燃えている状態であったので、表8-2に示すように2回目の飛行で投下水の中心部分の密度の高い散布がされ、消炎した。3回目の飛行では薄い霧状散布であったが、少し白煙が生じた程度で、以後は完全に消火状態であった。従って、幅1m前後の飛び火火災で、表面燃焼中に散布をすると消火が可能であるといえる。

2) 可燃物の含水率が15%以下の場合

含水率の低いL区域は表8-2に示すように飛行番号1～4までは効果的な散布が行われなかったが、5回目に効果的な散布が行われた。1分45秒後に第6回の霧状散布が行われたが、第5回散布にプラスアルファの効果を加味され、散布効果は大きかった。しかし、第6回散布から1分6秒後には燃焼区域の風下に当たる東側から本格的に燃え始めた。

従って、深部まで燃焼が進み、かつ風速が大きいと、上層部は消火できても風下側の下層部で延焼が進み、消火は困難であると言えよう。

8. 3. 2. 2 7.3m角規模の飛び火火災

飛び火により拡大した火災を想定した第3実験（その2）の散布状況とその効果について表8-3に示す。また、写真8-2の1/6（第1回散布）～6/6（第6回散布）は散布前後の状況を飛行進行方向（南側）と飛行方向横（西側）から見た映像を示す。

本実験の飛び火火災は7.3m角と燃焼面積が大きく、写真8-2に示すように投下水の飛行方向の散布幅が燃焼幅をカバーできなかったため、飛行進行方向（南側）から見た燃焼幅を3つに区分して、散布状況とその効果を表8-3に示している。

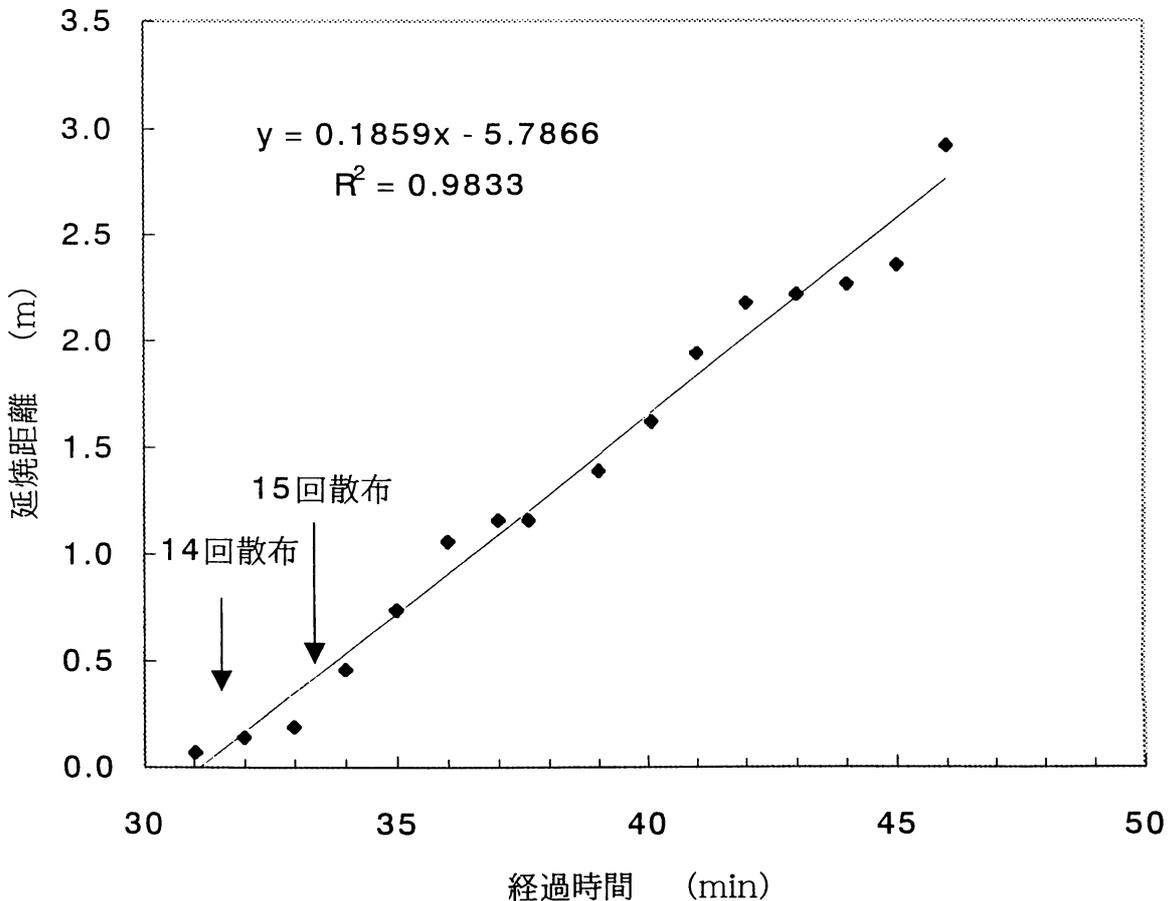


図8-3 南側延焼媒体の北側面からの見た延焼速度

散布開始直前には写真8-2 (1/6) に示すように可燃物の下層部まで全面燃焼の状況であったが、第1回散布は西よりの中央部に投下水の中心部分が散布され、第2回の高密度の散布、第5回にも投下水の中心部分が散布されたので、写真8-3からも明らかなように実験終了時まで無炎燃焼状態が継続した。従って、このように有効に散布が行われると、燃焼区域内にも延焼阻止帯を形成することが可能なのかもしれない。但し、この領域の東西方向の幅は東側が第6回散布まで有効な散布が行われなかったもので、狭まってきた。

図8-4は第3実験（その2）から求めた進行方向から見た投下水の散布の幅を示し、その幅は2.8～4.5mであった。なお、第6回の散布はホバリング状態で、超高密度散布となったが、投下水の幅は2.8mと狭かった。

従って、飛び火火災の面積がこの程度であれば、ホバリングに近い速度で、高密度の散布を行うのは効果的であるが、投下水の幅より大きな燃焼面積の火災抑止を行う場合には、火災抑止に必要な散布密度を考慮して、適切な飛行高度と速度で有効面積を大きくして効果的な散布をする必要がある。

8. 4 まとめ

- 1) 第2実験においては、必要な時期に有効な散布が行われず、最終的には延焼を阻止できなかった。しかし第3実験のその2で観測されたように有効な散布を行えば、延焼阻止帯の形成は可能である。従って、延焼阻止を効果的に行うために火先線に沿って散布する必要があると言える。
- 2) 風上への延焼の遅れあるいは放射熱による発火が見られなかった理由は家屋A-A'間の水溜まりからの水蒸気の発生、冷たい強風による冷却効果と可燃性ガスの吹き飛ばし等によるものと思われる。
- 3) 第2実験において、散布飛行終了後に家屋A-A'間の南側延焼媒体から風上側へ延焼した。これは家屋Aの風上で最後まで燃焼していた部分で、残っていた小火が延焼媒体の下層部に延焼し拡大したものである。14、15回目の散布飛行がこの部分に効果的に散布されていたら、完全に延焼阻止できた可能性は大きかったものと思われる。なお、13回目の散布終了後からの南側延焼媒体の北側面の延焼速度は相関係数0.98で、約18cm/minであった。
- 4) 飛び火火災については、燃焼面積の直径が3m程度で、表面燃焼中に散布をすると火災抑止が可能であろう。
- 5) 燃焼面積の直径が3m程度であっても、深部まで燃焼が進み、かつ風速が大きいと、上層部は消火できても風下側の下層部で延焼が進み、消火は困難であった。
- 6) 第3実験（その2）から求めた進行方向から見た投下水の幅は、2.8～4.5mであった。飛び火火災の幅がこの程度であれば、ホバリングに近い速度で、高密度の散布を行うのは効果的である。しかし、投下水の幅より大きな燃焼幅の火災抑止を行う場合には、火災抑止に必要な散布密度を考慮して、適切な飛行高度と速度で有効面積を大きくして効果的な散布をする必要がある。

参考文献

- 1) 日本火災学会：市街地火災空中消火調査研究報告書(1997.2)

- 2) 自治省消防庁消防研究所：市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書(1998. 3)
- 3) 竹元昭夫、他：市街地火災における空中消火による延焼阻止効果に関する研究-その5 延焼阻止効果、日本火災学会研究発表会概要集、p. 374(1998. 5)



西142704: 散布前



南142705: 散布前



西142705: 散布中



南142706: 散布中



西142707: 散布直後



南142708: 散布直後



西142724: 散布19秒後

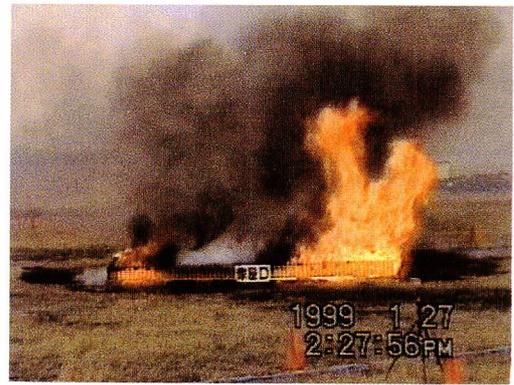


南142728: 散布22秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第1回散布前後の状況（1/6）



西142755: 散布前



南142756: 散布前



西142757: 散布中



南142759: 散布中



西142800: 散布直後



南142801: 散布直後



西142816: 散布19秒後



南142814: 散布15秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第2回散布前後の状況（2/6）



西143058: 散布前



南143058: 散布前



西143059: 散布中



南143059: 散布中



西143103: 散布直後



南143105: 散布直後



西143113: 散布14秒後



南143136: 散布37秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第3回散布前後の状況（3/6）



西143218: 散布前



南143218: 散布前



西143220: 散布中



南143219: 散布中



西143222: 散布直後



南143223: 散布直後



西143233: 散布13秒後



南143233: 散布14秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第4回散布前後の状況（4/6）



西143437: 散布前



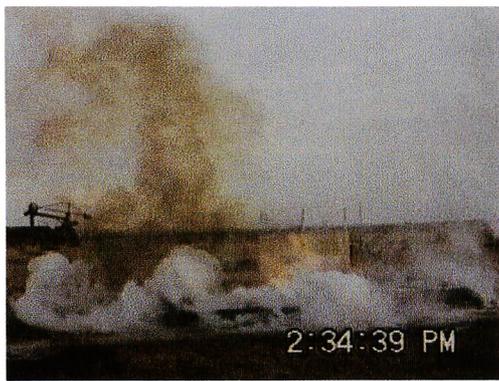
南143438: 散布前



西143438: 散布中



南143439: 散布中



西143439: 散布直後



南143443: 散布直後



西143459: 散布21秒後



南143514: 散布35秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第5回散布前後の状況（5/6）



西143613: 散布前



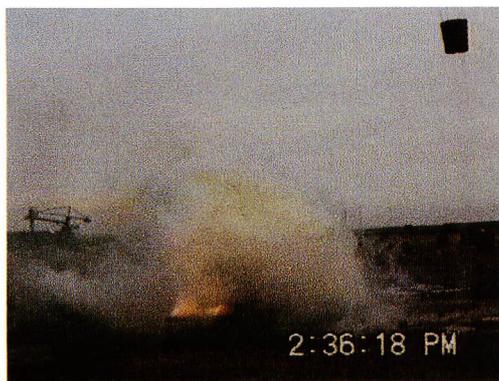
南143614: 散布前



西143614: 散布中



南143616: 散布中



西143618: 散布直後



南143619: 散布直後



西143633: 散布19秒後

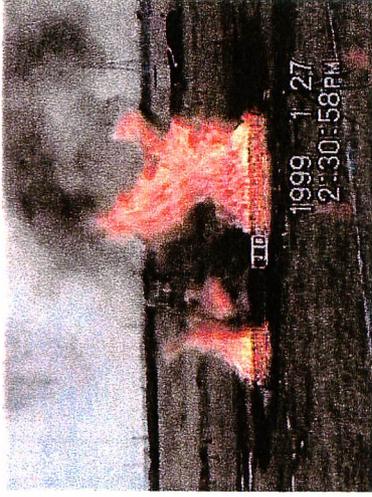


南143644: 散布28秒後

写真8-2 第3-2実験（家屋D）の第6回散布前後の状況（6/6）



第2回散布直前
 (第1回散布から50秒後)
 [第1回散布：東側・中央メイン散布◎
 高度：80ft、速度：20kt]



第3回散布直前
 (第2回散布から3分後)
 [第2回散布：中央超高密度散布●
 高度：80ft、速度：5kt]



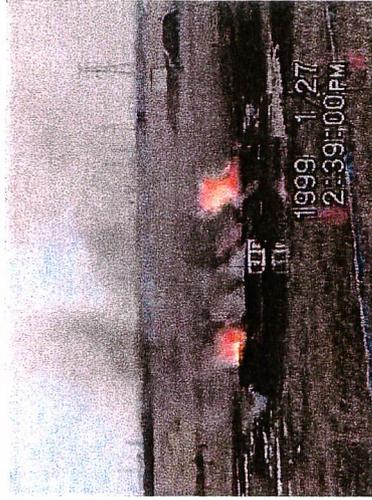
第4回散布直前
 (第3回散布から1分16秒後)
 [第3回散布：西側霧状散布○
 高度：80ft、速度：20kt]



第5回散布直前
 (第4回散布から2分26秒後)
 [第4回散布：散布無一
 高度：75ft、速度：5kt]



第6回散布直前
 (第5回散布から1分45秒後)
 [第5回散布：東側・中央メイン散布◎
 高度：80ft、速度：20kt]



第6回散布2分45秒後
 (第6回散布：点火後16分15秒)
 [第6回散布：東側超高密度散布●
 高度：70ft、速度：0kt]

写真8-3 第3-2実験(家屋D)における中央付近の無炎燃焼の継続状況 [散布水量：900L]

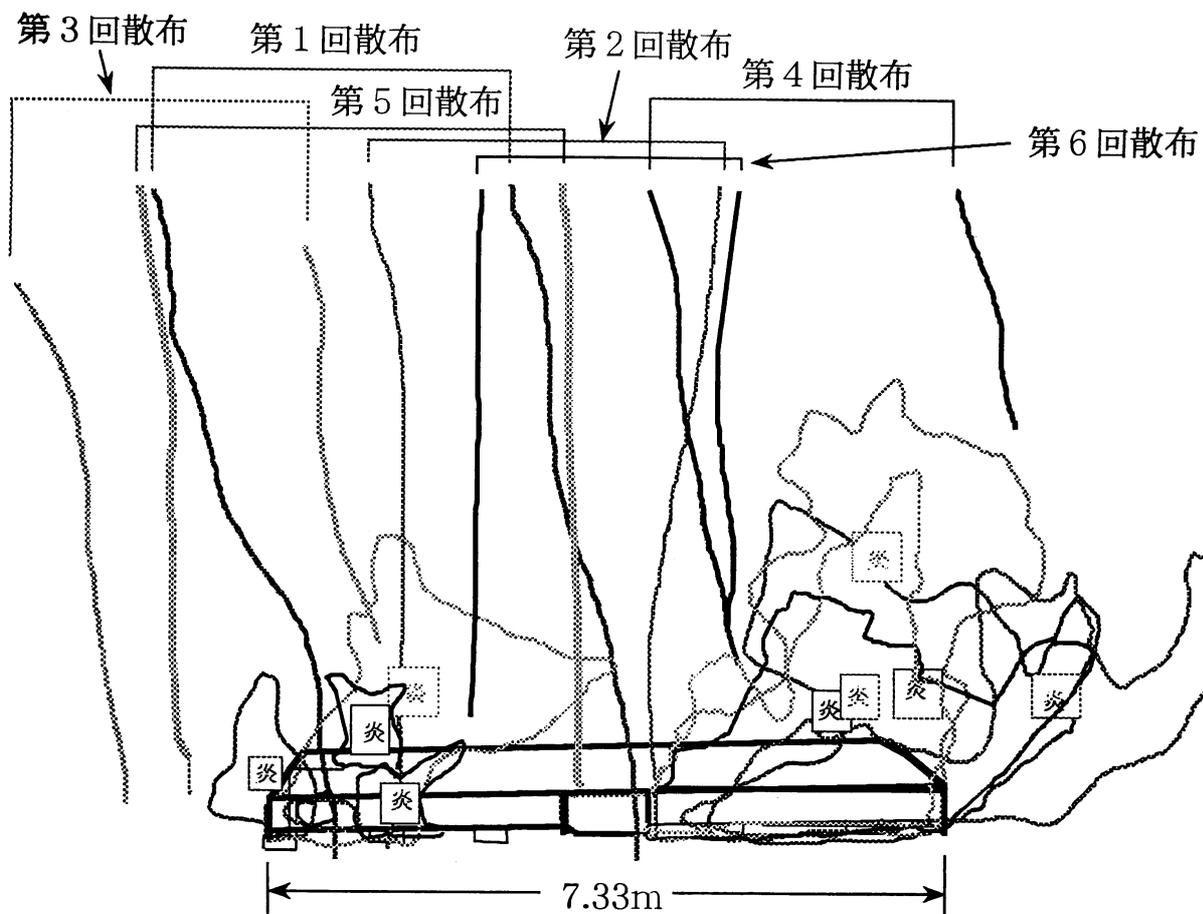


図8-4 第3実験（その2）：投下水の散布幅

第9章 考察及びまとめ

9. 1 空中消火の効果を左右する要因

(1) 投下対象箇所

航空隊によって行われる空中消火は、通常、単独で実施しても大きな効果が期待できないことから地上の消防隊と連携して活動を行う。空中消火を実施する場合には、空中消火の目的と消火対象箇所が指示される。空中消火の目的は、火災を消火することであるが、消火できない場合には次善の方法として、延焼阻止、火災抑止、延焼遅延を図る。地上消防隊の到着が遅れている場合に、水を投下することにより火災の拡大を抑制して時間を稼ぐことができる。

林野火災に対する空中消火方式は、図9-1に示すように間接消火と直接消火に分けられる。直接消火は、燃えている部分に水を投下して直接的に消火を図る方式であり、間接消火は炎上区域の周囲に水を投下して火災拡大を防ぐ。間接消火は、水を投下することにより新たな延焼阻止線を構築したり、既にある道路などの防火線の機能を強化することもできる。

空中消火の効果（延焼阻止、火災抑止等）は表9-1に示すように水の投下条件、火災の条件、気象条件、市街地条件に左右される。空中消火は、このように多くの要因に左右されることから、一つの実験により得られる結果はあくまでも特定の条件下のものである。過去に行われた空中消火実験の実験条件を表9-2に示す。従来の空中消火実験は風速が2~3m/sの弱風下で行われた。今回の実験は、気温が1℃、風速が約10 m/sの低温・強風下に行われた点に特色がある。

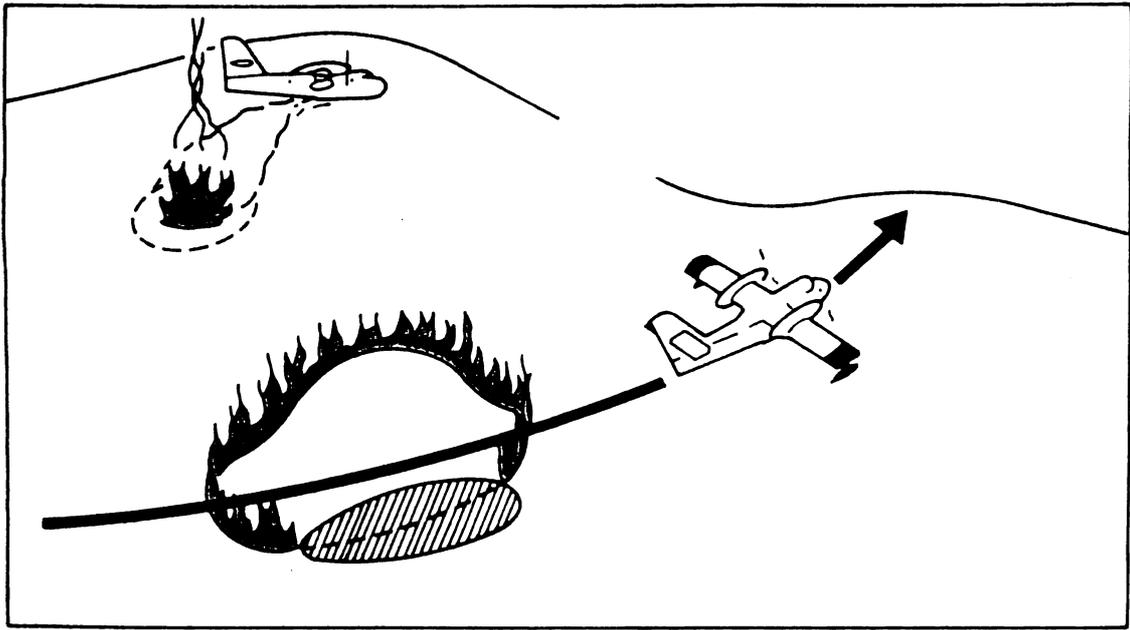
(2) 投水特性

今回の実験は、1棟火災を対象にして空中消火実験を行った。前述した通り、空中消火の効果は火災規模（1棟火災、複数棟火災、街区火災など）に依存する。火災規模が大きくなれば、同じ量の水を投下しても単位面積当たりの散布量が少なくなり、火災全体のコントロールは難しい。しかし、火災規模が大きい街区火災であっても、その初期段階においては1棟火災である。火災を早期に発見して初期段階から空中消火を実施すれば火災の大規模化を防ぐことができる可能性がある。そこで、1棟火災に対する空中消火の火勢抑止効果と延焼阻止効果に焦点をあてて観測した。

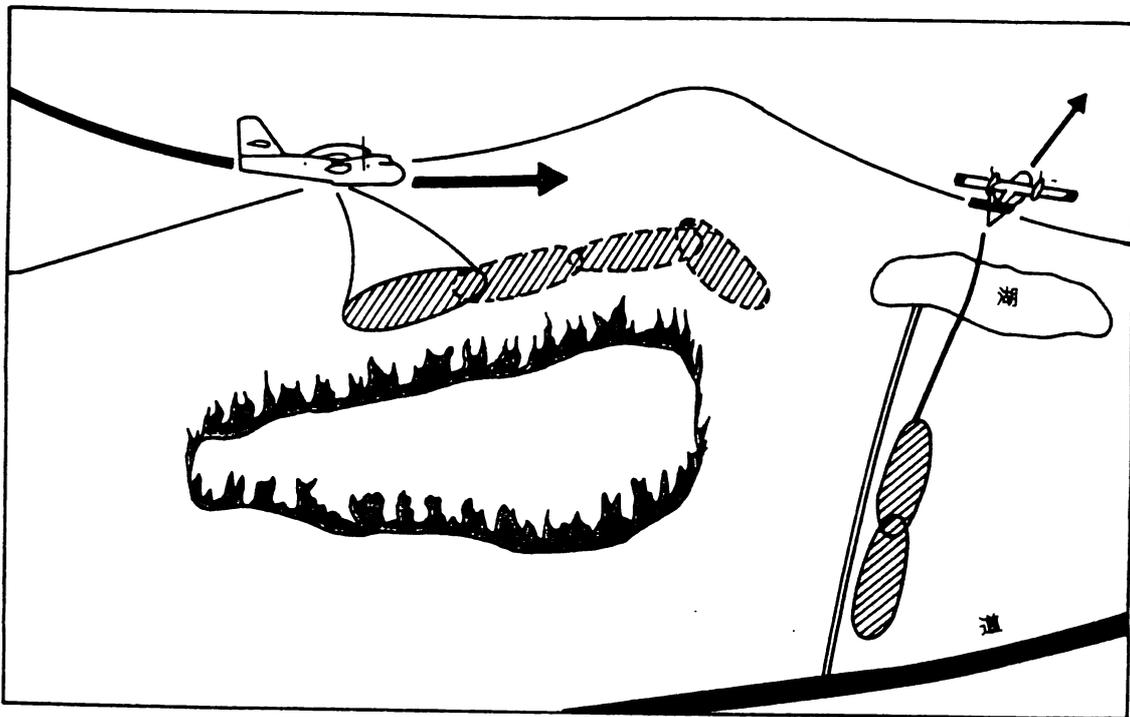
空中消火の効果は、投水条件にも左右される。今回の実験では、2機のヘリコプターを使って水を投下し、2台の大型水槽車とポンプ車を使うことによりバケットへの給水を行い、2-3分毎に燃焼区域に水を投下することができた。空中消火の効果は、単位時間に投下できる最大水量と火災規模に左右される。

空中消火の効果を評価する場合に空中消火に関する諸特性を定義しておくことが必要であり、本報告書では以下の通り定義した。単位時間に火災現場に投下できる水量を投水能（ Q ；トン/時）とした。この量は、ヘリコプターの種類、機数、バケット容量、水源までの距離、給水体制などに依存する。投水速度（ q ；トン/㎡/時間）は単位面積、単位時間あたりの投下水量、投下回数 n （回）は水を投下した全回数、投水時間間隔（ t_0 ；分）はヘリコプターから水を落とす平均時間間隔、投水継続時間（ T ）は投水を開始してから終了までの時間（時）、

投水範囲 ($S ; m^2$) は水を落とした区域面積、消火対象面積 ($S_o ; m^2$) は消火しようとする対象物の面積、投水密度 (Q_o) は単位面積あたりの投下総水量である。



直接消火



間接消火

図9-1 直接消火と間接消火

表9-1 空中消火の効果（延焼阻止、火災抑止等）

<ul style="list-style-type: none"> ・水の投下条件 <ul style="list-style-type: none"> 機種、消火機材、投下水量、投下回数、命中率、水源までの距離など ・火災の条件 <ul style="list-style-type: none"> 火災規模、火災の進展、火炎長、火災正面幅、火炎奥行、火炎温度など ・気象条件 <ul style="list-style-type: none"> 風向、風速、気温、湿度、含水率など ・市街地条件 <ul style="list-style-type: none"> 家屋階数、家屋間距離、道路の有無、家屋の倒壊状況、空き地の有無など

表9-2 実験条件の比較

実験の実施日	供試家屋数	火災規模	気温(℃)	風速	ヘリ数	主催及び協力機関
平成8年9月6日	20 棟	42 m×56 m	26	1.2- 5.0 m/s	4 機	東京消防庁 日本火災学会 消防庁消防研究所
平成9年11月20日	12 棟	26 m×36 m	9	2.5 m/s	6 機	消防研究所 東京消防庁、千葉市 消防局、川崎市消防局 横浜市消防局
平成11年1月27日	第2実験 2 棟 第3実験 2 棟	7.2 m×15 m 7.2 m×7.2 m	1	10 m/s	2 機	消防研究所、北海道防災 航空室、苫小牧市消防本部 胆振東部組合消防本部、 札幌市消防局、東京消防庁 仙台市消防局

表9-3 投水特性

水の投下特性	第1実験	第2実験	第3実験	
			その1	その2
投下目的	命中率測定	延焼阻止 火災抑止	火災抑止	火災抑止
燃焼区域数	なし	1	2	1
投水能 Q (トン/時)	32	27	32	32
消火対象面積 S ₀ (m ²)	52	114	1.8	52
投水速度 q (トン/m ² /時)	0.52	0.24	0.24	0.24
投水継続時間 T(分)	10	30	10	10
投下回数 n	6	15	6	6
投水時間間隔 t。(分)	10/6	30/15	10/6	10/6
投水密度Q ₀ (トン/m ²)	0.10	0.12	0.10	0.10
散水面積 S (m ²)	150	100-210	100	100
みかけ上の有効割合 η	0.35	0.54-1.0	0.02	0.52

第2実験の空中消火の対象区域は、家屋Aと家屋A'及び両家屋間にある可燃物であり、全体の面積は約114 m²であった。この区域に約30分間に15回の水(1回900 L)を投下した。この時の水の投下に関する諸特性を表9-3に示す。

散水面積は投下された水の散布範囲の面積であり、1回毎に異なる。今回の実験では、消火対象面積が比較的にかさかったことから、散水面積(S)は消火対象面積(S₀)よりも大きかった。空中消火の効果は対象家屋への命中率にも左右される。散水面積域の中で消火対象区域上の面積を(S₁)とすると投下した水の有効割合(η)は近似的に以下の式で近似される。

$$\eta = S_1/S$$

この近似式は、投下した水が一様に拡散すると仮定して求めたもので、投下した水がすべて対象区域に落下すると有効割合は1となり、投下した水が対象区域の外に落下すると0となる。この式を使って空中消火の命中率を表すことができる。

街区火災のように消火対象区域が大きい場合には水投下の命中率を高める事は容易である。しかし、飛び火延焼火災や1棟火災のように火災規模が小さい場合には命中率を高めること

は簡単ではない。水投下の命中率を高める為に飛行高度や飛行速度を変えることが必要であり、対象面積の大きさを変えて命中率を高める訓練をすることが必要である。

(3) 強風下の市街地火災の特異性

近年、林野火災に対してヘリコプターを使った空中消火が行われる機会が増大している。道路や水利がない場所で、しかも火災の拡大が速くない林野火災に対して空中消火は火災をコントロールする上でその役割を果たしている。林野火災においては地表可燃物の量は1~2 kg/m²程度と少なく、それらの可燃物が徐々に燃焼している状態の火災に対して空中消火の効果は高い。しかしながら、強風下において風に煽られて拡大する火災の火勢は強く、延焼速度が速い。空中消火により消火できる面積よりも火災が拡大する面積がはるかに大きく、強風下では空中消火単独では火災をコントロールできない場合が多い。

市街地火災と林野火災を比較すると、市街地火災は延焼速度が小さいものの可燃物量が大きいことから火勢が強く、火災継続時間が長い傾向が認められる。また、市街地火災では建物に屋根があることからこの屋根が消火障害となり、火災抑止効果が低減する。

昭和51年10月に、山形県酒田市にて焼損建物面積が15ヘクタールに及ぶ大規模市街地火災が発生した。平均風速が13メートル以上の強風に煽られて火災が拡大した。出火点の風上に幅7mの道路があったために風上側にはそこで焼け止まったものの、風下方向には消防隊が設定した複数地点の延焼阻止帯を超えて拡大し、約800mの風下にあった新井田川(幅員50メートル)で延焼阻止に成功した。この時の延焼速度は約90 m/sであり、多数の飛び火火災が発生した。この事例のように強風下においてはホースから放出された水が火点に届かないことや消防水利が大幅に不足する点が指摘されている。

強風下の市街地火災あるいは大震災時の市街地火災に対して空中消火に期待することは、新規の延焼阻止線の構築、道路などの延焼阻止線の強化、飛び火火災の消火・火災抑止である。

強風下における市街地火災と特徴を抽出したものを表9-4に示す。強風下では、火災の方向依存性が顕著になり、風上、風下、風横で延焼速度が大きく異なり、飛び火火災が多発する。空中消火の効果は消火対象区域の位置や方向によって異なる可能性があり、この点を考慮して観測結果を評価することが必要である。今回の実験でも強風の影響が出たように判断される。第2実験では、強風の影響を受けて風上方向への延焼阻止が容易に成功したし、第3実験では水投下により一度鎮圧された火災が強風の影響で短時間に再燃したことから、空中消火の火災抑止効果が減じた。

9. 2 実験結果のまとめ

(1) 対象家屋への水の命中度

空中消火の効果を高めるためには、燃焼している箇所投下した水を命中させることとその箇所の投水密度を高めることが大切である。

今回の実験では投下した水を効率よく対象家屋に命中させるため、事前に7つの飛行コース上に旗を立て、飛行コースの微調整が容易に行えるようにした。更に、第1実験では飛行速度を抑え、飛行高度を低くして水を投下した。その結果、6回のうち4回まで対象家屋に

命中させることができた。実験終了後、各航空隊の意見をアンケート調査した結果、命中精度を高める為には、訓練を行って練度を上げること、風下から進入散水すること、一定の高度で散水すること、ヘリコプターの飛行コースの正面及び側面に地上員を配置して、コースの指示や散水のタイミングの指示をすれば、命中率はもっと上がるとの意見があった。一方、命中率を下げる要因として、突風などによる風の急変、飛行高度の変更指示、ヘリコプターの進入方向（風下から風上への進入、風の横切る方向への進入）の変更などである。

(2) 投下された水の落下拡散範囲の分析

表9-4 強風下における空中消火の障害要因
(強風の影響 ○増加 ×減少 □変化なし)

	予測される変化	風上	風下	風横
延 焼 拡 大	・熱気流と火炎の傾き	×	○	□
	・風による冷却効果	○	□	○
	・延焼速度	×	○	□
	・建物周辺気流の強さ	○	○	□
	・飛び火火災の発生危険性	×	○	×
	・周辺家屋への放射伝熱量	×	○	×
空 中 消 火	・対象家屋への命中率	×	×	×
	・水の拡散範囲	○	○	×
	・火災上空での視界	○	×	○
	・建物外壁への散布量	○	□	×
	・付着した水の蒸発速度	○	○	○
	・乱気流による飛行障害	□	○	○
	・再燃危険性	○	○	○

(ア) 風により流される距離

飛行高度が高く、かつ飛行速度が大きい時には投下水が霧状になって風に大きく流される傾向がみられた。飛行高度が100 ft以上ではこの傾向が顕著であり、高度150 ftでは最大で約30 mほど投下水が風下に流された。

(イ) 散布面積

第1実験における散布範囲は、飛行高度70ft、飛行速度20ktはほぼ一定であり、その時の散布範囲の長さは、約20m、最大幅が約10mで、平均散布範囲は約150m²であった。第2実験では飛行高度と速度が一定ではないことから散布範囲はかなりのバラツキがあった。飛行高度80 ft、飛行速度20 kt以下では、散布面積約140m²であり、飛行高度100 ft、飛行速度20 ktでは散布面積約210m²であった。第3実験では、ホバリングに近い低速度で水投下が行われたので、散布範囲は小さく、約100m²であった。

(ウ) 投下水の飛行方向への飛散距離

今回使用された消火機材の水タンク容量は共に900 lであり、放水開始から終了までの放水持続時間は4-6秒でほぼ一定であった。このため、ヘリコプターの飛行速度が増加するとその散布範囲は飛行方向へ伸びた。放水開始点と散布中心との距離を散布のずれとして地上風速との関係を調べたところ、風速が6(m/s)未満では明確な相関が得られたが、風速が6(m/s)以上になると相関がほとんどなくなった。地上の横風が6(m/s)未満の風速であれば、飛行速度10(m/s)においても放水開始点と地表の散布範囲中心位置とのずれが40 m以下の確度で、目標に散布できることがわかった。

(3) シミュレーション予測手法の作成

本研究では、ヘリコプターからの散水実験のビデオ画像を進行方向の正面側と側面側から水の落下速度分布を解析し、最多分布として約10m/sの落下速度を得た。また、実験に対応するコンピューターシミュレーションを行い、ビデオ画像と類似するシミュレーション結果を得た。

(4) ヘリコプターの飛行によって生じる後流特性

ヘリコプターの飛行に伴って後流が発生して火災に影響を与え、かつ火災で生じた煙の拡散状況を変えることがあるため、今回、地上に風向風速計を設置して後流の発生状況を観測し、三次元の流れの特性を調べた。水平、垂直成分共に後流速度8(m/s)前後で分かれているが、測定値が分散した。さらに、後流の特徴である旋回流を含んでいることから、発生の確認は水平及び垂直成分の両者に変化が現れ、垂直成分の変化が先に現れることが分かった。最大風速10(m/s)以上となった強風下の飛行においても後流の発生が確認でき、その最大後流速度は飛行速度より高度との相関が高いことが分かった。

(5) 空中消火の火災抑止効果及び延焼阻止効果

第2実験では炎上家屋から風上の隣接家屋に地上の可燃物を媒体として延焼拡大する火災を対象にして空中消火を行い、炎上家屋に対する火災抑止効果と地上の可燃物を媒体として風上方向に拡大する火災に対する延焼阻止効果を温度測定、放射照度測定、及びビデオに記録した映像を基にして分析した。

(ア) 火災抑止効果と延焼阻止効果 (第2実験)

建物火災の進展状況を、火勢と火炎温度から判断すると、火災の拡大期は1~5分、最盛期

は5分～19分頃、減衰期19分以降であった。このような火災に対して、点火後5分から33分の間に15回水を投下して、火災の進展と火災抑止効果、延焼阻止効果の関係を観測した。水の投下回数は、火災拡大期に0回、最盛期に8回、減衰期に7回であった。

最盛期に水を投下すると火勢を一時的に弱め、火炎温度も下がるが、数十秒経過すると元の状態に戻った。しかし、連続的に水を投下しても、炎上家屋全体の火勢を弱めることはできなかった。火災の減衰期においては、水を連続的に投下すると火勢が徐々に弱くなり、建物内の火炎温度が減少した。この期間に、水の投下を中止すると火勢は強くなり、火炎温度は再び上昇した。このように減衰期においては屋根や外壁がなくなることから水を連続的に投下している期間だけ火勢を抑止できることがわかった。

水の投下を継続している期間内には両家屋間に配置した廃材が燃えることはなかった。しかし、33分頃に水の投下を中止すると火災荷重が小さい方の廃材（北側）は燃えなかったものの、火災荷重が大きい方の廃材（南側）は燃焼し始め、風上方向に拡大した。この結果は、空中消火の延焼阻止効果に及ぼす火災荷重の違いを示している。

また、火災周囲の放射照度と炎上建物に隣接する家屋の表面温度を測定して、空中消火の効果の評価した。水を投下する度に放射照度が減少し、一時的に火勢を抑止していることを確認した。また、隣接家屋の表面温度の変化から比較的少量の水を風上側に投下することで風上側隣接建物の表面温度を下げる効果があることが分かった。

（イ）飛び火延焼火災に対する火災抑止効果（第3実験その1、その2）

第3実験では飛び火延焼火災を想定して2個の木材クリブ（7.2m×7.2m、高さ0.36 m）を配置し、点火区域面積を変えて燃焼させてからそれぞれのクリブ火災に水を投下して、火災規模による火災抑止効果の違いを観測した。

第3実験（その1）では、含水率が25%以上の箇所でのクリブ火災は火勢が弱く、しかもクリブ表面のみが燃焼していたことから水を2～3回投下することにより消火された。一方、含水率が15%以下の乾燥した箇所でのクリブ火災は、水を投下することにより一時的に消火できるが、クリブ内部に火炎が残り、数分後に再燃した。

第3実験その2の実験の結果は、その1の実験で乾燥した箇所の実験結果と同じであった。ホバリングに近い状態で水を投下すると、水の散布範囲は幅約2.8～4.5mであり、クリブ表面のみが燃焼しており、火災規模が小さければホバリングした状態で水を投下することにより火災抑止（消火に近い状態）が可能であることが確かめられた。

しかし、風速が大きく、かつ、可燃物の深部まで燃焼が進んでいる状態の火災に対しては水を投下しても燃え残り部分が生じて消火は困難であった。

（飛び火延焼火災に対する火災抑止法についての提案）

ヘリコプターの飛行速度を大きくすることにより広い範囲に水を投下することができるが、その場合には散布密度は小さく、火災抑止効果は小さい。一方、ホバリングした状態で水を投下すると、ダウンウォッシュが発生して火災を煽り、周囲に新たな飛び火火災を起こす危険性がある。しかし、狭い領域に高密度で水を投下することにより可燃物のより深い箇所まで消火することができる。

このようにヘリコプターの飛行高度と飛行速度を変えて水を投下することにより消火特性

が変わる。飛び火延焼火災をコントロールする場合には、その燃焼特性（範囲、深さ）に応じて新たな飛び火火災の発生を防止するために広域に散布しながら、時には可燃物の深部の火災を消火するために10kt程度の低速にて投下することも必要である。

[参考文献]

- 1) 日本火災学会：市街地火災空中消火調査研究報告書(1997. 2)
- 2) 自治省消防庁消防研究所：市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書（1998. 3）
- 3) 自治省消防庁消防研究所：酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書（昭和52年10月）

苫小牧市で空中消火実験を実施するにあたり、北海道防災航空室、苫小牧市消防本部、胆振東部（組）消防本部、札幌市消防局、仙台市消防局、東京消防庁の協力を得ました。強風のために実験実施が危ぶまれましたが、幸い事故もなく所期の目的を達成することが出来ました。ここに記してご協力を頂いた各機関の皆様に心から謝意を表します。

付 属 資 料

- 1) 実験前1週間前の天気図
- 2) 命中精度に関する感想
- 3) 投下した水の落下曲線
- 4) 実験施設の配置
- 5) 家屋の配置
- 6) 標準火災（木材クリブ）の大きさ
- 7) 気象観測点の位置
- 8) 実験概要図（第1実験）
- 9) 実験概要図（第2実験）
- 10) 実験概要図（第3実験）

苫東備蓄 気象週間予測

1999年1月20日 16時30分 発表

[気象概況]

向こう一週間は、気圧の谷が23日と26日から27日かけ通ります。

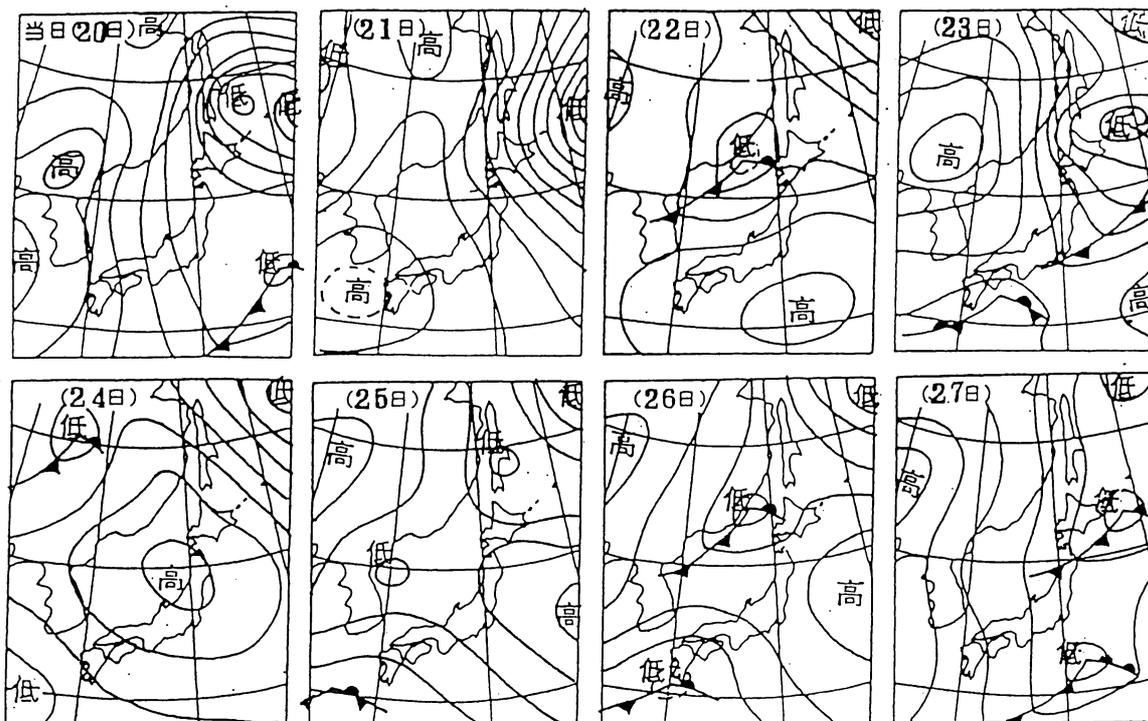
このため、27日の共備残橋付近は低気圧を含む気圧の谷が通るため、南東の風から北東の風が吹きやすく、最大風速は8メートル。天気は雪が降りやすく、日中は気温も高く雨が混じる見込みです。

日	曜日	天気	風向	最大風速 m/s
27	水	曇り一時雪	南東 のち北	8
28	木			
29	金			

週間予測予想気圧配置 (21時)

1999年 1月20日 発表

日本気象協会北海道本部



消防庁消火実験に伴う週間気象情報

1999年 1月 22日 13時発表

(財) 日本気象協会北海道本部

気象情報部 気象情報課

気象概況

26日に文々発達した低気圧が、北海道の北部を通り、オホツ海に進んだ後、27日は冬型の気圧配置が強まり、28日から29日に、徐々に弱まる見込み。

地点 苫東備蓄

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ一時雪	北西	10
28	木	晴れ一時雪	西又は北西	8
29	金	晴れ一時雪	西	7

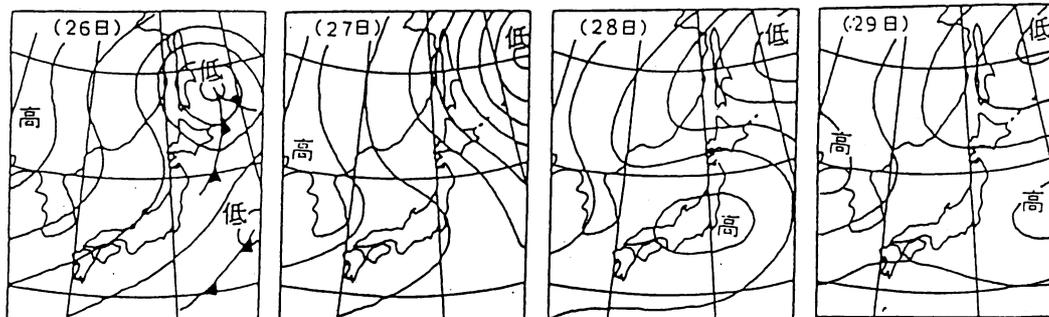
地点 札幌

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	曇り時々雪	北西	12
28	木	雪時々晴れ	西又は北西	10
29	金	晴れ時々雪	西	8

週間予測予想気圧配置 (21時)

1999年 1月 22日 発表

日本気象協会北海道本部



1999年 1月 23日 18時発表

(財) 日本気象協会北海道本部

気象情報部 気象情報課

気象概況

26日に低気圧が発達しながら北海道付近を通り、27日はオホーツク海でさらに発達する。このため26日の後半から冬型の気圧配置が強まり、26日から27日は北西～西の風が強く、雪が降りやすい。しかし28日からは次第に弱まる見込み。

地点 苫東備蓄

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ一時雪	西又は北西	10
28	木	晴れ一時雪	北西	8
29	金	晴れ一時雪	西	7

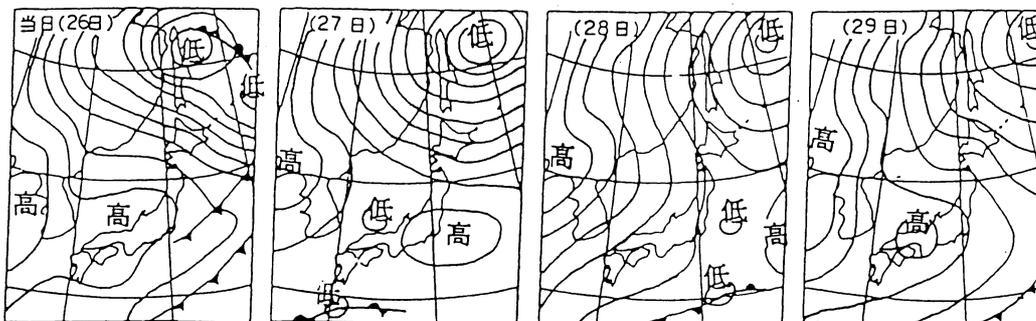
地点 札幌

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	曇り時々雪	西又は北西	10
28	木	晴れ時々雪	北西	8
29	金	晴れ時々雪	西	6

週間予測予想気圧配置 (21時)

1999年 1月 23日 発表

日本気象協会北海道本部



1999年 1月 24日 13時発表

(財)日本気象協会北海道本部
気象情報部 気象情報課

気象概況

気圧の谷の通過は、28日になる模様で、27日は冬型の気圧配置がやみゆき見込み。28日から29日は再び冬型が強まる。このため天気は26日から27日にかけて晴れ間が出るが、27日後半は曇ってくる。札幌では晴れ間が雪も降る。28日から29日は雪が降りやすい。

地点 苫東備蓄

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ後曇り	西	8
28	木	曇り時々雪	西又は北西	10
29	金	曇り一時雪	西	7

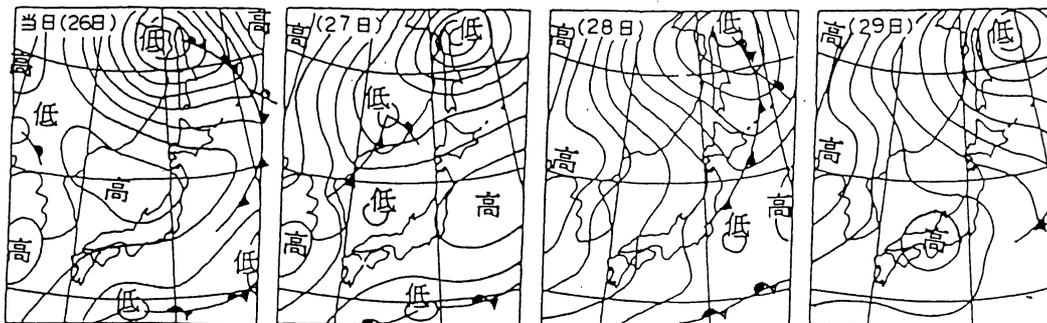
地点 札幌

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ一時雪	西又は南西	6
28	木	曇り時々雪	北西	8
29	金	曇り時々雪	西又は北西	6

週間予測予想気圧配置 (21時)

1999年 1月 24日 発表

日本気象協会北海道本部



消防庁消火実験に伴う週間気象情報

1999年 1月 25日 13時発表

(財) 日本気象協会北海道本部

気象情報部 気象情報課

気象概況

26日の午前中に気圧の谷が通ったあとは、27日にかけて、冬型の気圧配置に転じた。また、27日夜に低気圧が日本海西部に現われ、28日午前中に北海道付近を通る。そのあと、29日にかけて冬型の気圧配置が続く。このため、27日は比較的晴れ間が多い札幌では晴れ時々曇り、苫小牧でも一時雪が降り、28日は曇りがち時々雪が降り、29日は晴れ間が多い札幌では晴れ時々曇り、苫小牧でも一時雪が降り見込んでいる。

地点 苫東備蓄

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ 一時雪	西	8
28	木	曇り 時々雪	西又は北西	10
29	金	晴れ 一時雪		7

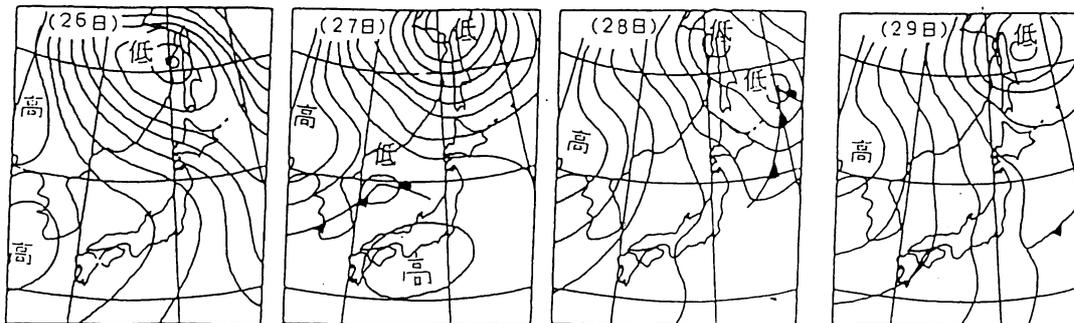
地点 札幌

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	晴れ 時々雪	西又は北西	9
28	木	曇り 時々雪	北西	10
29	金	雪 時々晴れ	北西	8

週間予測予想気圧配置 (21時)

1999年 1月 25日 発表

日本気象協会北海道本部



1999年 1月 26日 13時発表

(財) 日本気象協会北海道本部

気象情報部・気象情報課

気象概況

前線を伴った気圧の谷が通過し、北海道付近は冬型の気圧配置に変わった。その中を27日の朝、弱い気圧の谷が通り、その後上空に強い寒気が入り、西よりの風が一時的強さを見込。28日から29日にかけても冬型の気圧配置が続く。

地点 苫東備蓄

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	曇り時々雪	西南西	16
28	木	曇り時々雪	西北西	10
29	金	曇り一時雪	西	8

地点 札幌

日	曜日	天気	最大風向	最大風速 m/s
27	水	雪時々晴れ	西	10
28	木	雪時々晴れ	西北西	10
29	金	曇り時々雪	西	8

週間予測予想気圧配置 (21時)

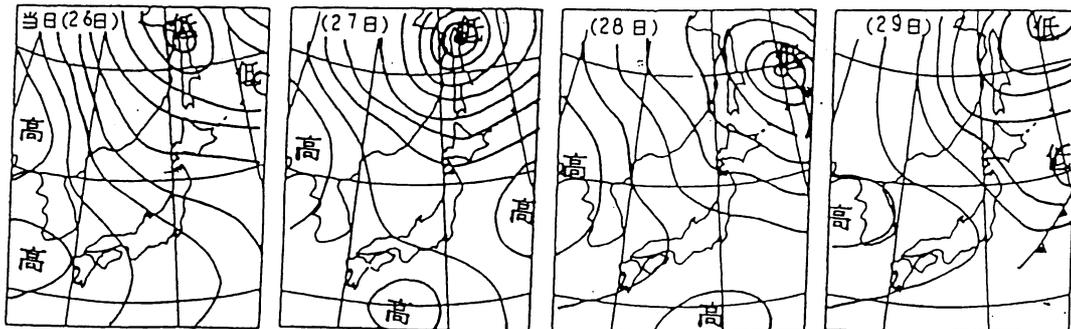


表5 命中度に関する感想記録表

対象建物に対する水の命中精度についてのコメント

(○印を付け、具体的に記入)

(第1実験) 北海道 機種 (はまなす2号) ベル412ED 記録者 (近嵐伸幸)

第1回	投下開始時間 10時00分30秒
風向 (南西)、風速 (7.0) m/s	
パイロットのコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印 (具体的に記入)	
実験を行う前の散水で風の影響を考慮していたのでうまく命中した	
地上観測員のコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印	
第2回	投下開始時間10時04分30秒
風向 (南西)、風速 (6.5) m/s	
パイロットのコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印	
風の影響を考えて飛行したが思っていた以上に風の影響が強かった)	
地上観測員のコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印	
第3回	投下開始時間10時09分30秒
風向 (南西)、風速 (7.0) m/s	
パイロットのコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印	
視程が良くなり、風向、風速に変化がなかったのでうまく命中した	
地上観測員のコメント (うまく命中した、まあまあである、うまくいかなかった) ○印	

表5 命中度に関する感想記録表

<p>命中精度を悪くする要因</p>	<p>(1) 条件を変えての散水 (高度、速度を変えることにより着水地点が予想しづらい)</p> <p>(2) 風下からの進入 (煙等による視程障害)</p> <p>(3) 目標物が小さい場合</p>
<p>命中精度を上げる方法 (提案事項)</p>	<p>(1) 一定の条件下での散水をくりかえすことにより、散水地点を修正しながら命中度は向上する (高度、速度、進入等)</p> <p>(2) 風横、風上からの進入散水 (煙及び風の影響が受けにくい)</p> <p>(3) 目標物が大きい場合</p>

(1) 本調査は第1実験のみで行う。

(2) 命中精度は航空隊員と地上観測員が同じ票に同時に観測して、それぞれの用紙に記入する。

表5 命中度に関する感想記録表

対象建物に対する水の命中精度についてのコメント

その1

(○印を付け、具体的に記入)

(第1実験)

機種 (ベル412SP)

記録者 (竹内)

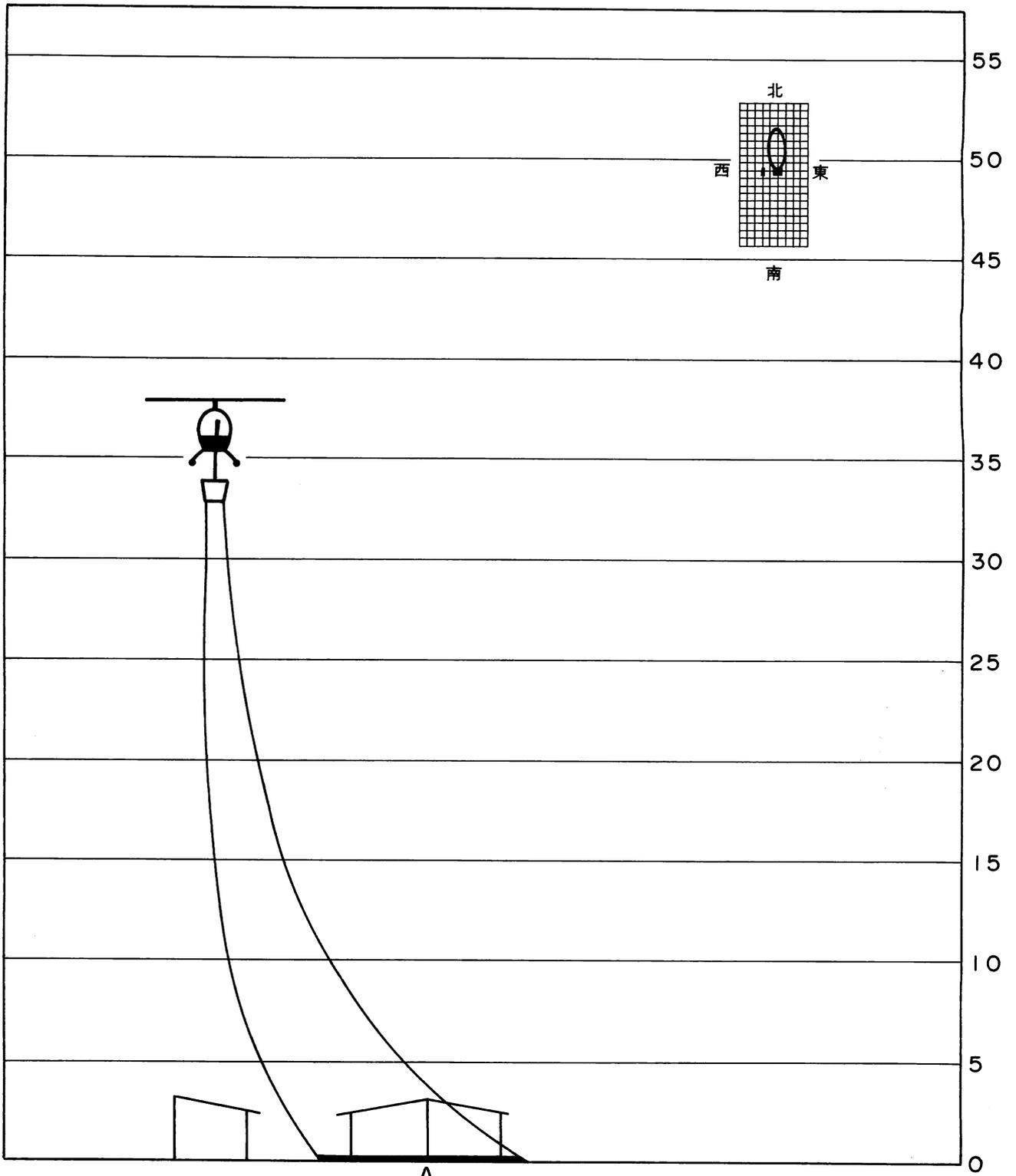
第1回	投下開始時間 10時02分05秒	
風向 (南西)、風速 (7.0) m/s		
パイロットのコメント (うまく命中した、 <u>まあまあである</u> 、うまくいかなかった)		○印
(具体的に記入)		
目標がわかりにくい。		
地上観測員のコメント (<u>うまく命中した</u> 、まあまあである、うまくいかなかった)		○印
思ったより、よく命中した。		
第2回	投下開始時間10時06分25秒	
風向 (南西)、風速 (6.5) m/s		
パイロットのコメント (<u>うまく命中した</u> 、まあまあである、うまくいかなかった)		○印
Aを目標に実施した。		
地上観測員のコメント (<u>うまく命中した</u> 、まあまあである、うまくいかなかった)		○印
よく命中した。		
第3回	投下開始時間10時10分25秒	
風向 (南西)、風速 (7.0) m/s		
パイロットのコメント (うまく命中した、 <u>まあまあである</u> 、うまくいかなかった)		○印
2回目と同じAを目標に実施した。		
地上観測員のコメント (<u>うまく命中した</u> 、まあまあである、うまくいかなかった)		○印

その2

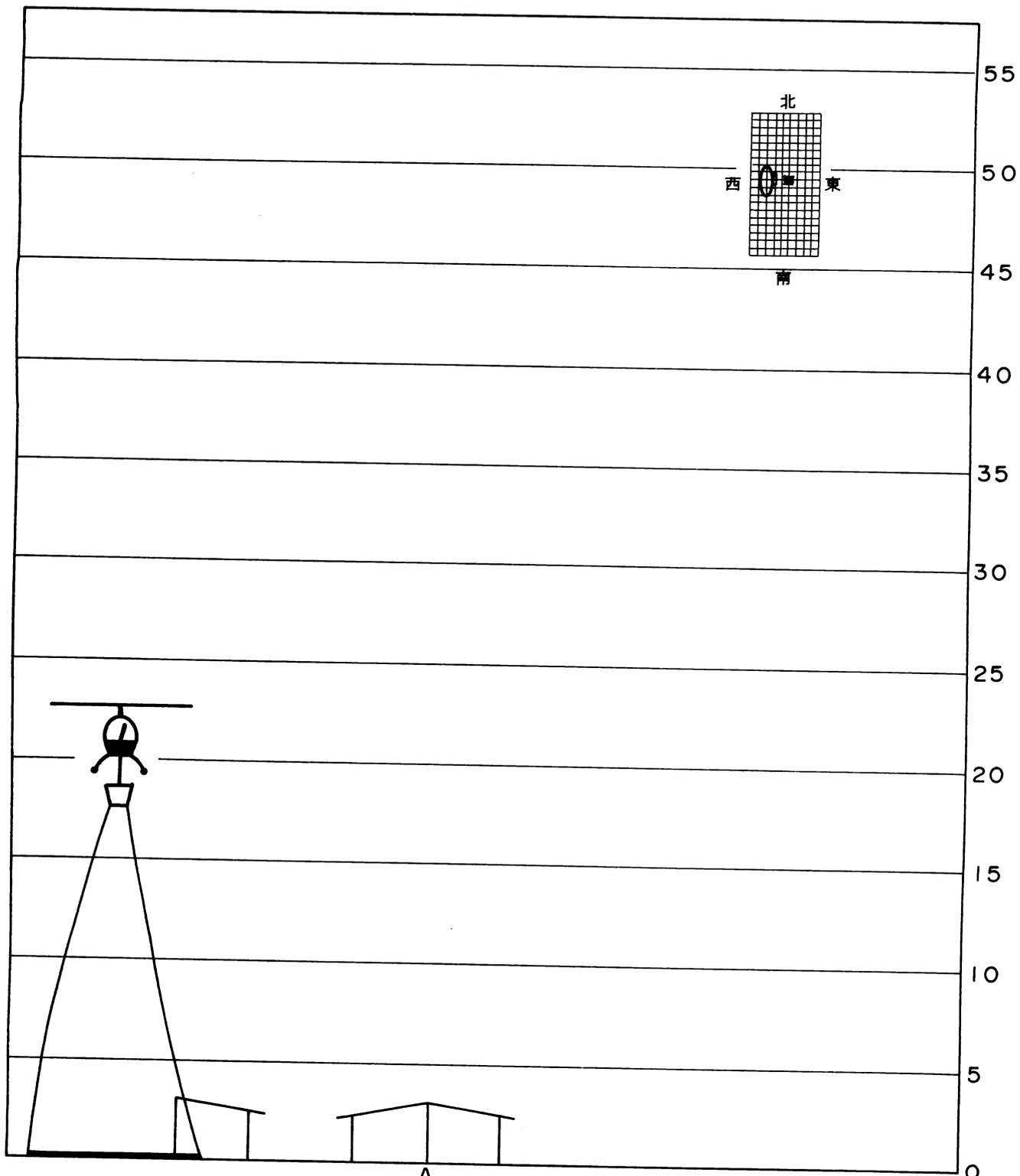
命中精度を悪くする要因	
(1) 風向・風速の急激な変化 (2) 三回の高度変更 (3) 高い高度からの投下	
命中精度を上げる方法 (提案事項)	
(1) 一定の高度で投下する (2) 風上に向かって実施する (3) 訓練を実施して練度を高める (4) 地上部隊からの投下タイミング等の支援	

(1) 本調査は第1実験のみで行う。

(2) 命中精度は航空隊員と地上観測員が同じ票に同時に観測して、それぞれの用紙に記入する。

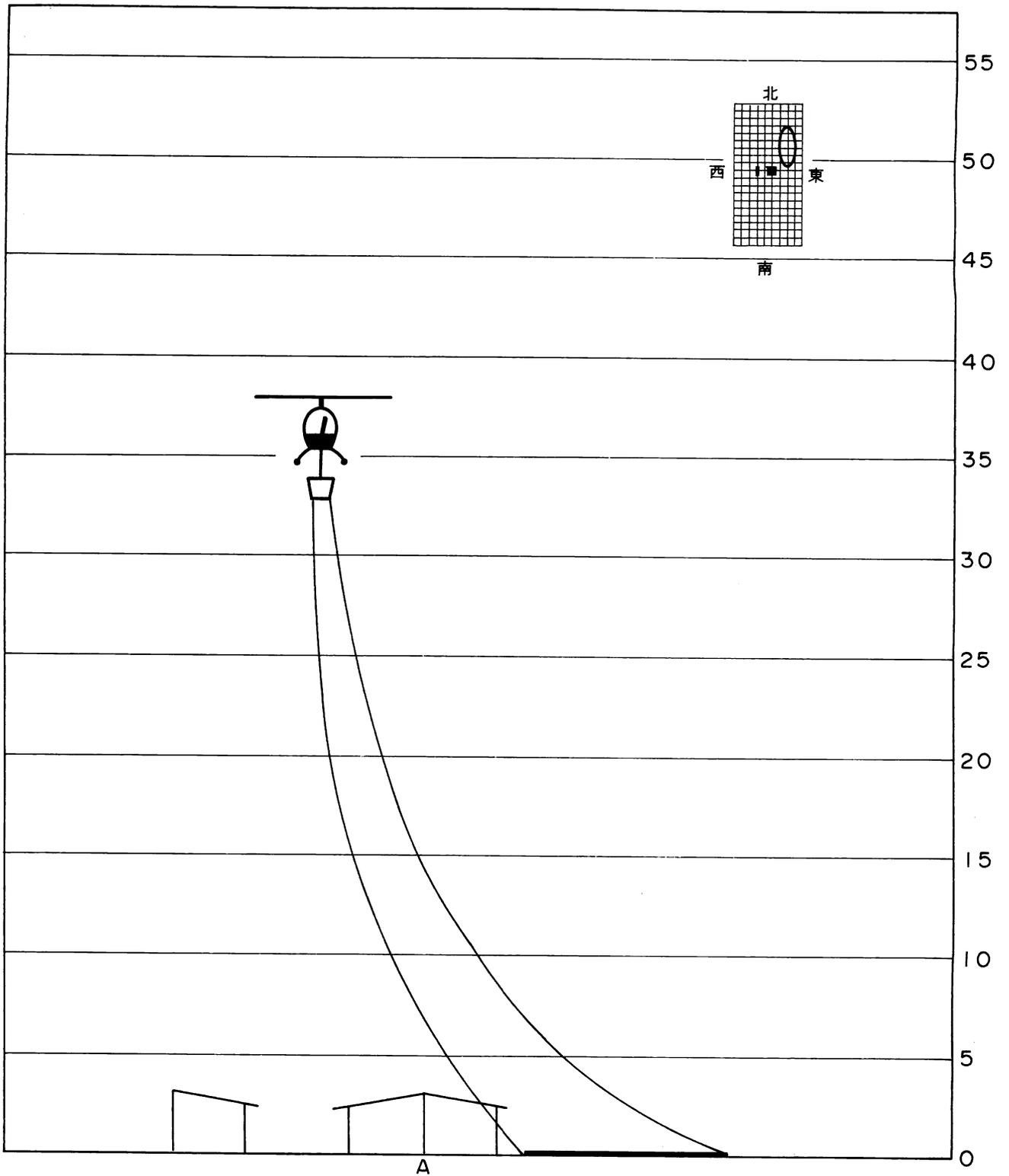


NO. 1
36 m

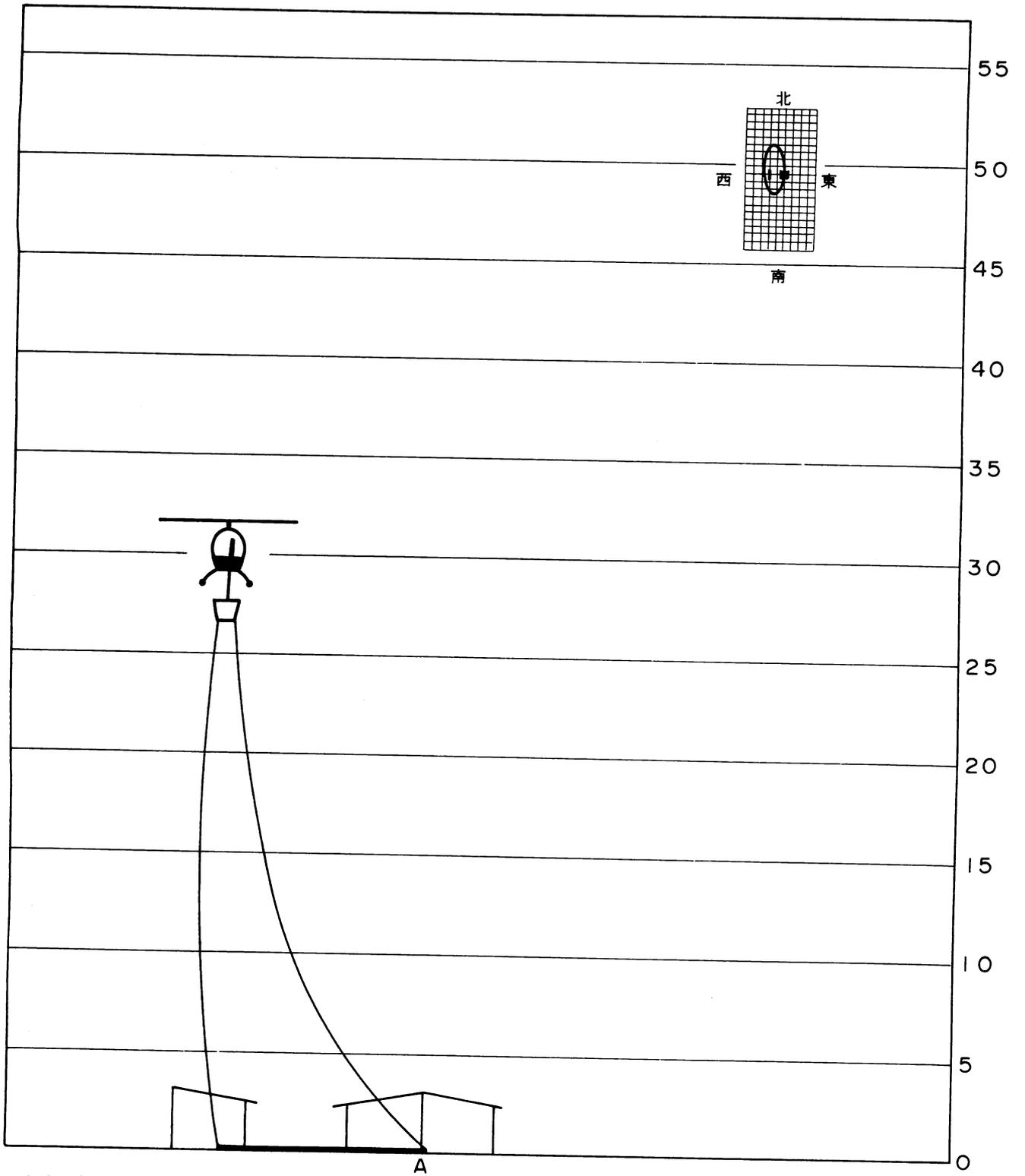


NO. 2
21 m

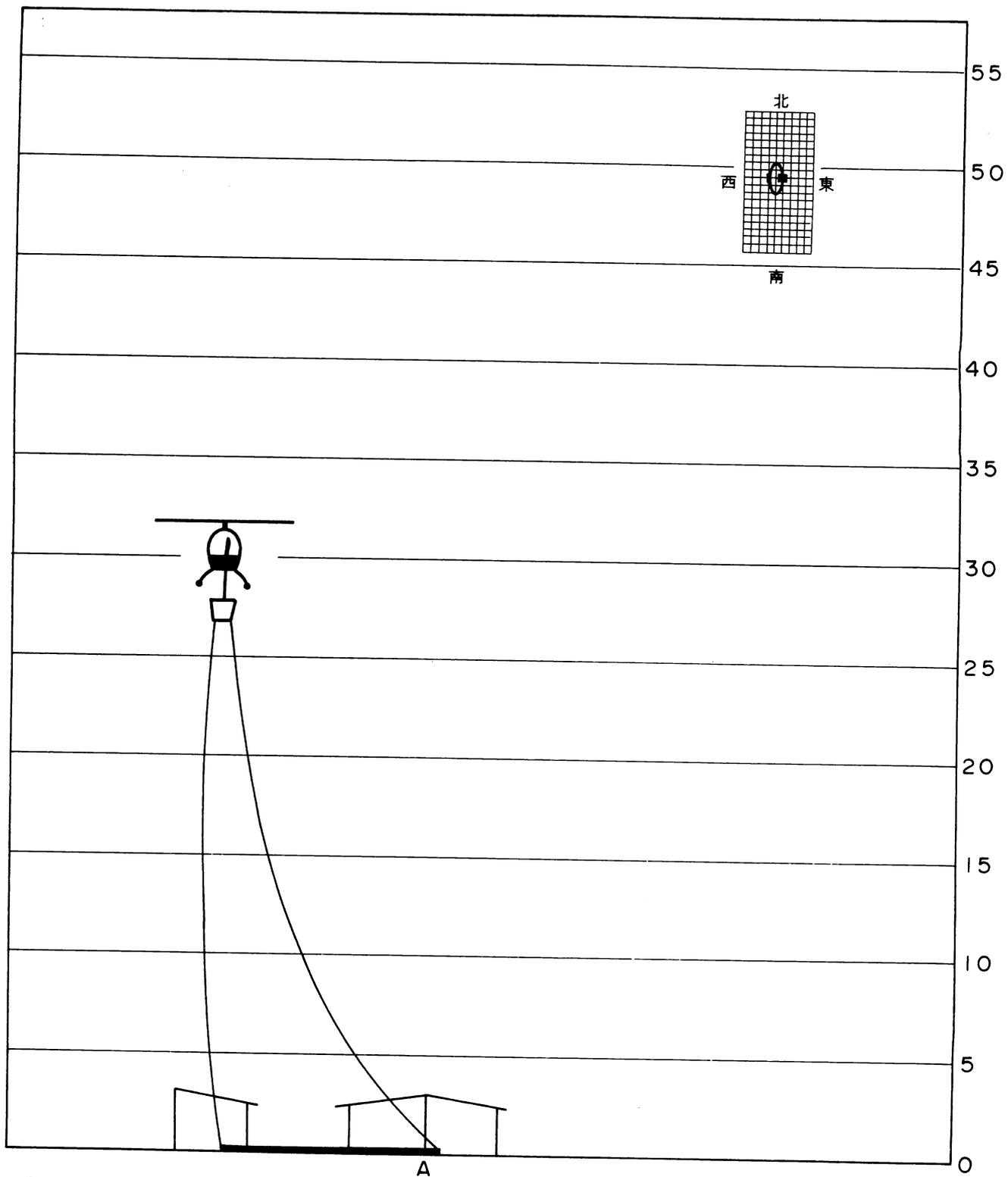
A



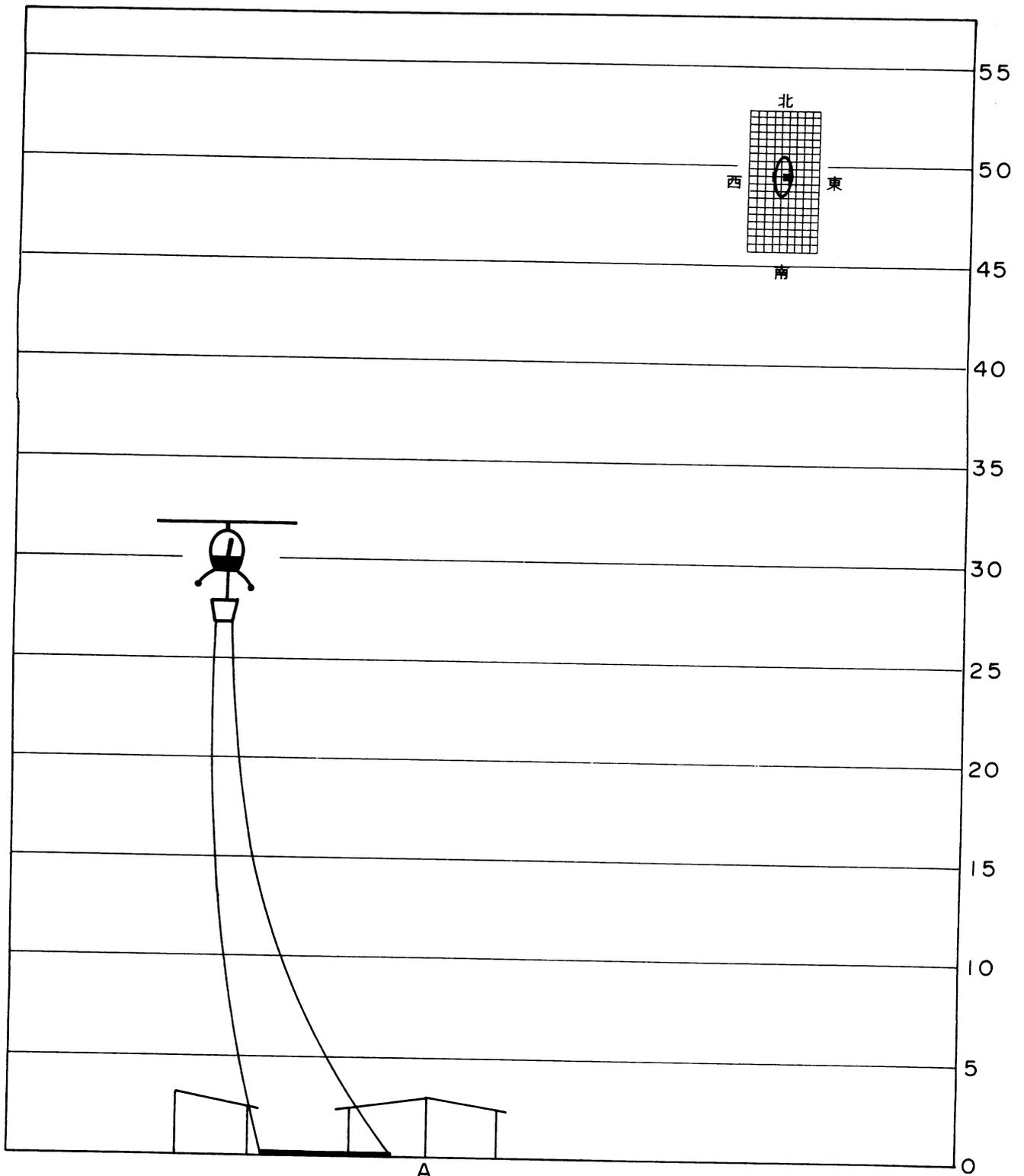
NO. 3
36 m



NO. 4
30 m

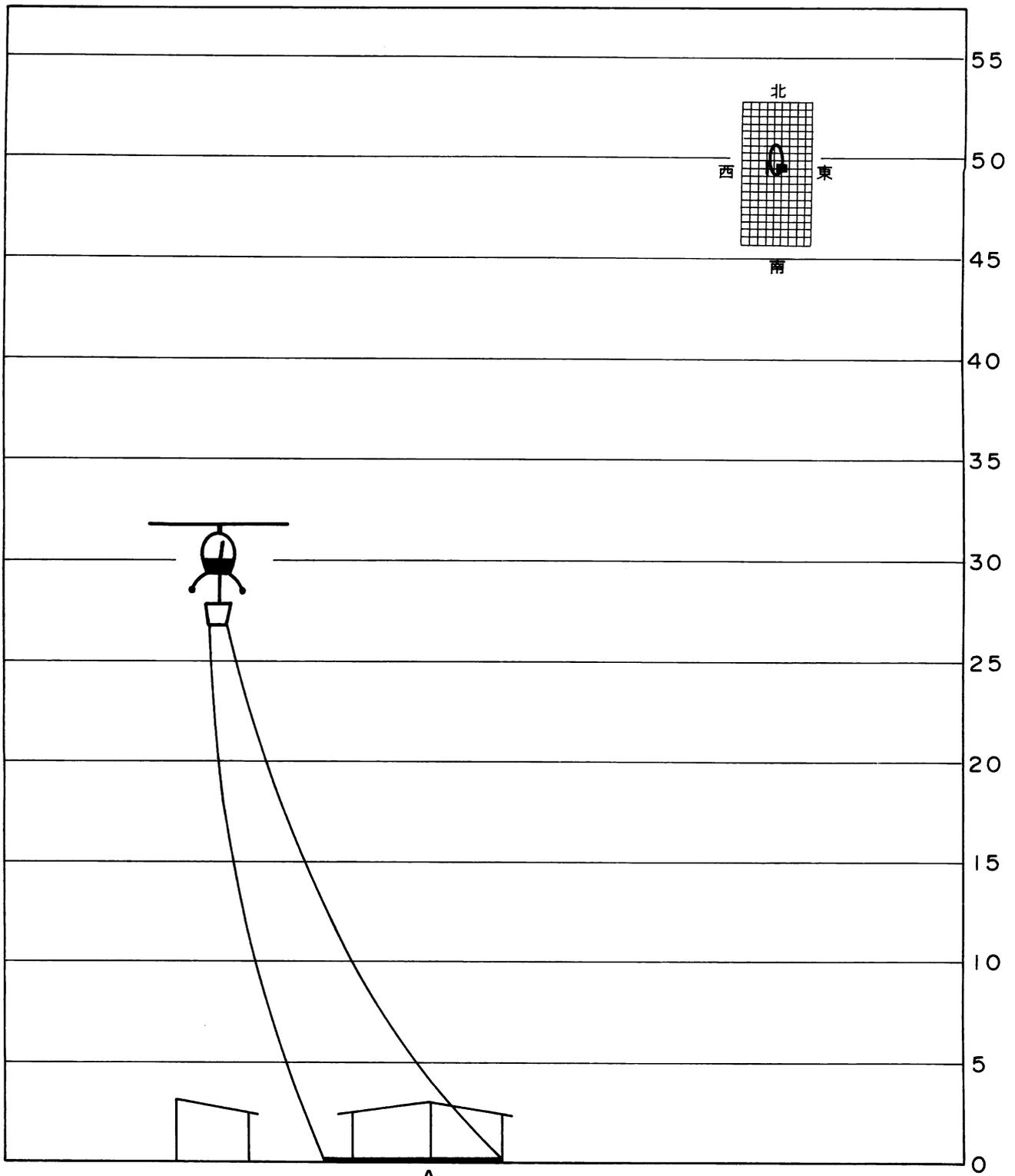


NO. 5
30 m



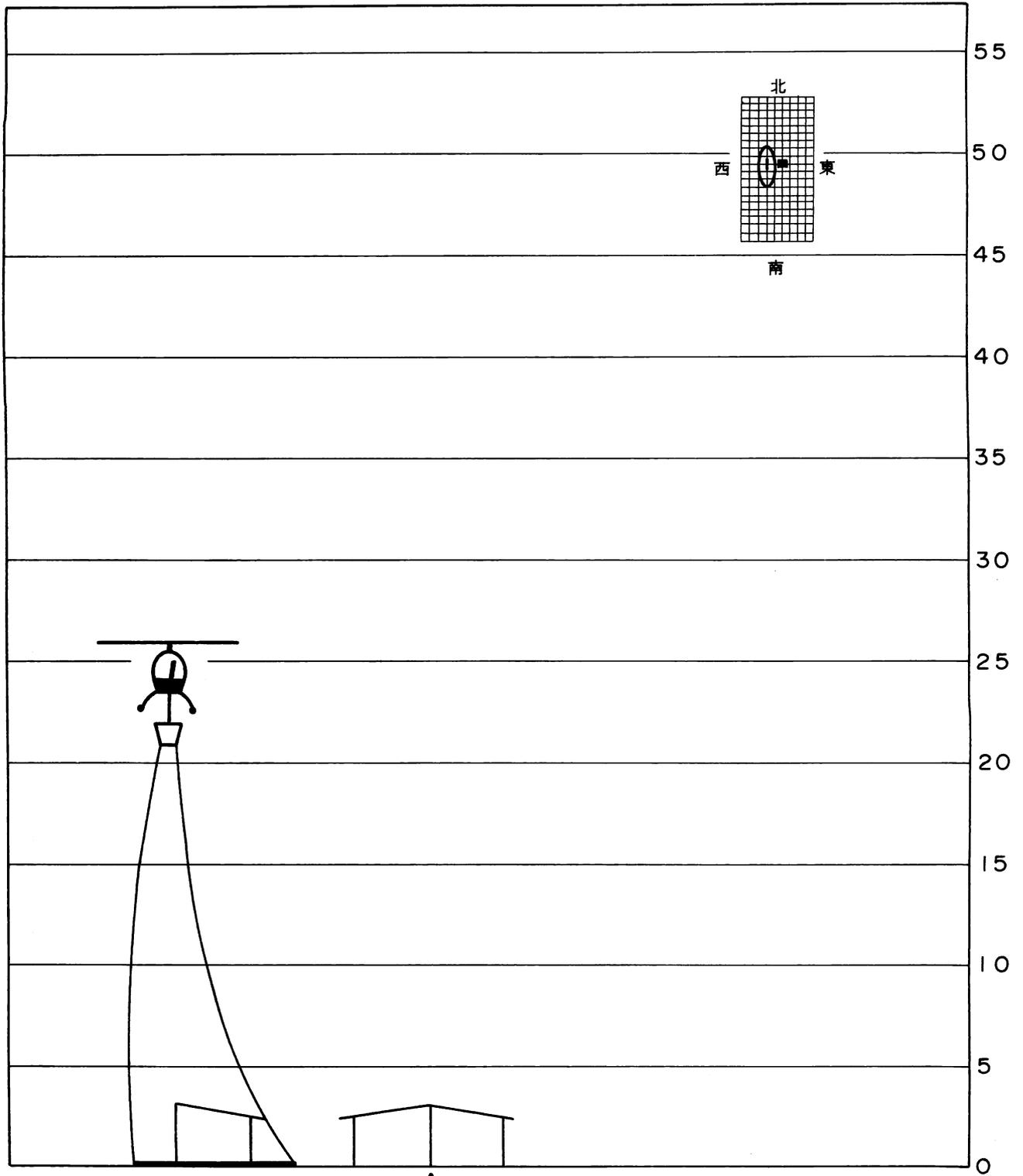
NO. 6
30 m

A



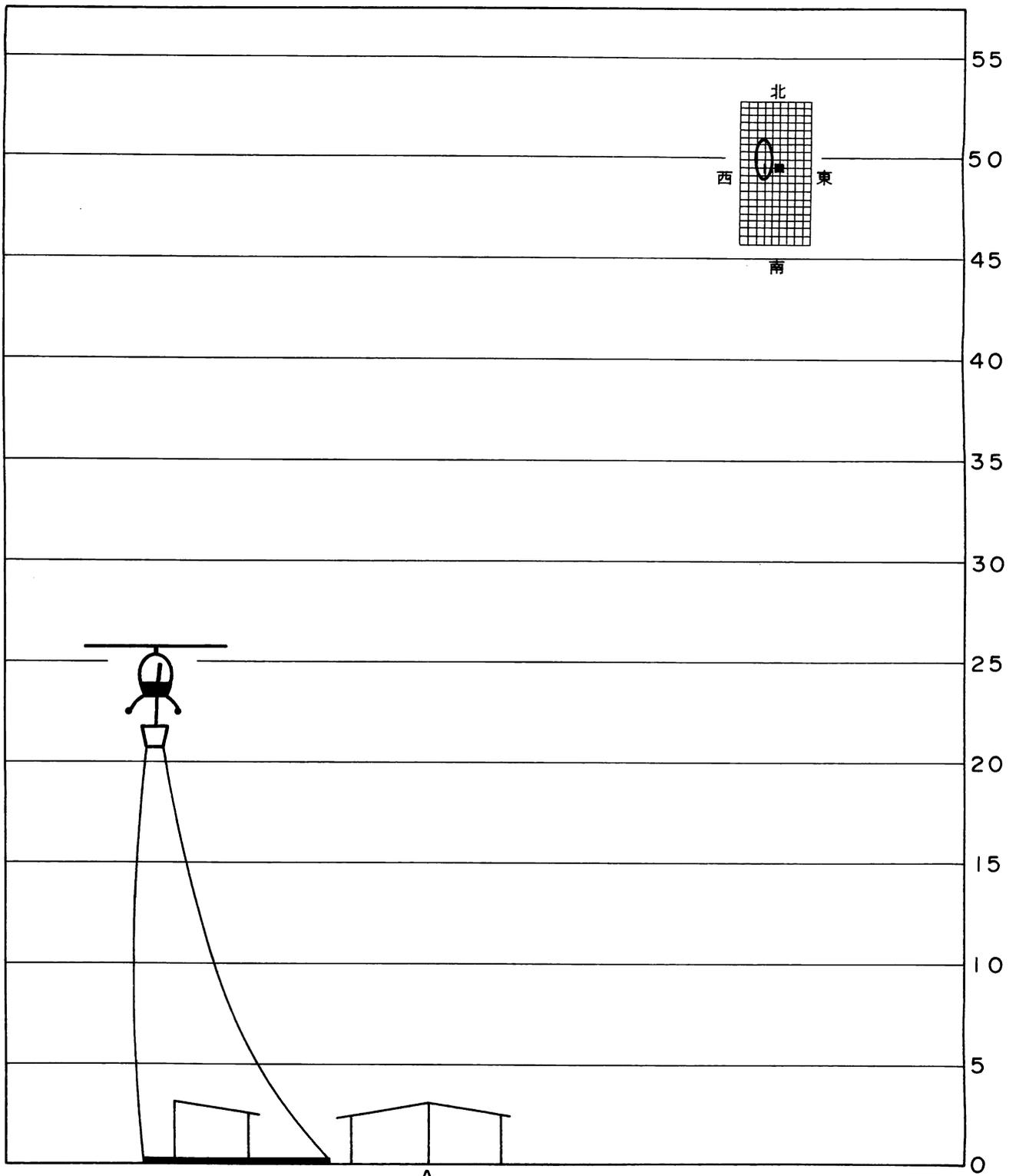
NO. 7
30 m

A



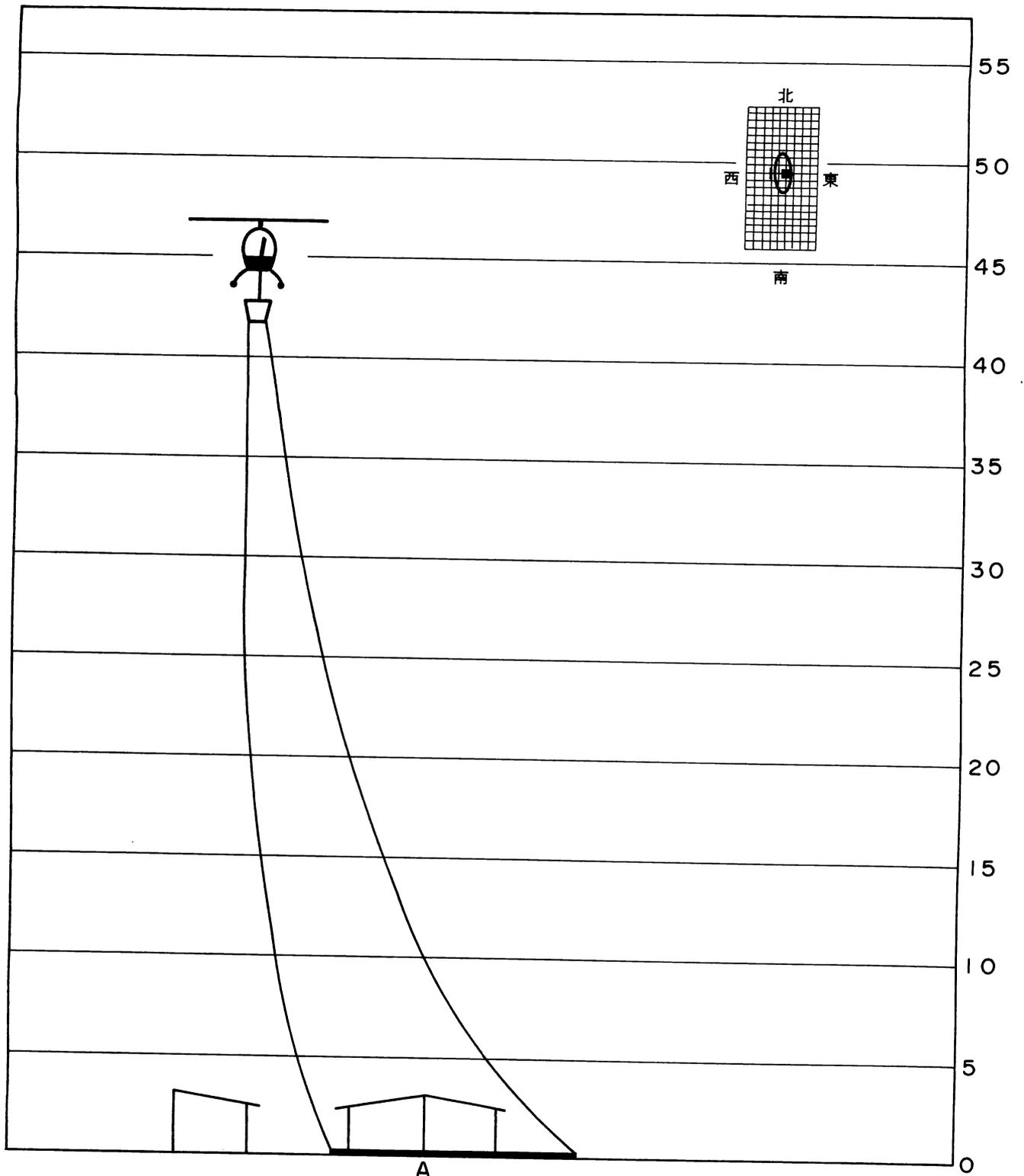
NO. 8
24 m

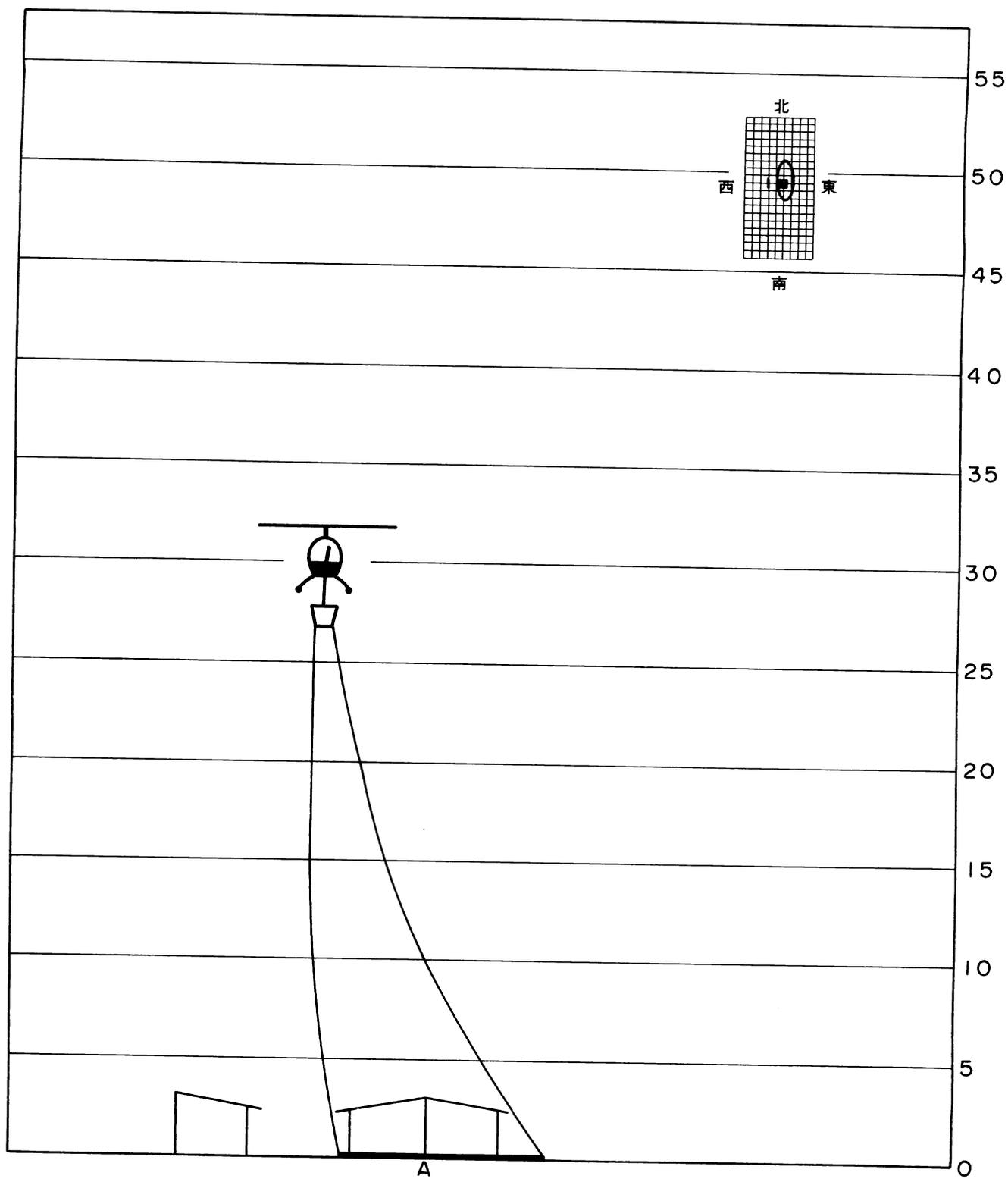
A



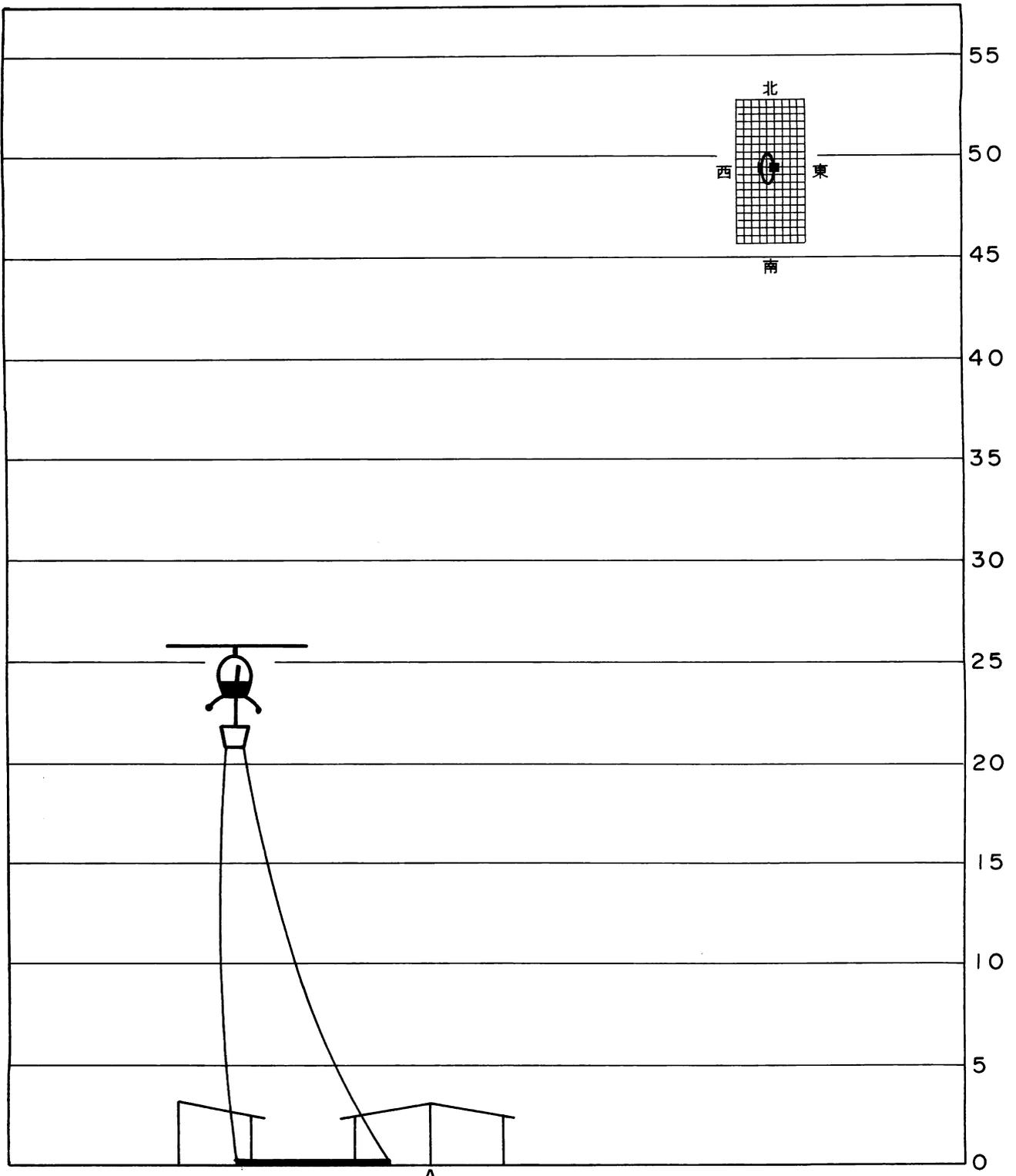
NO. 9
24 m

A

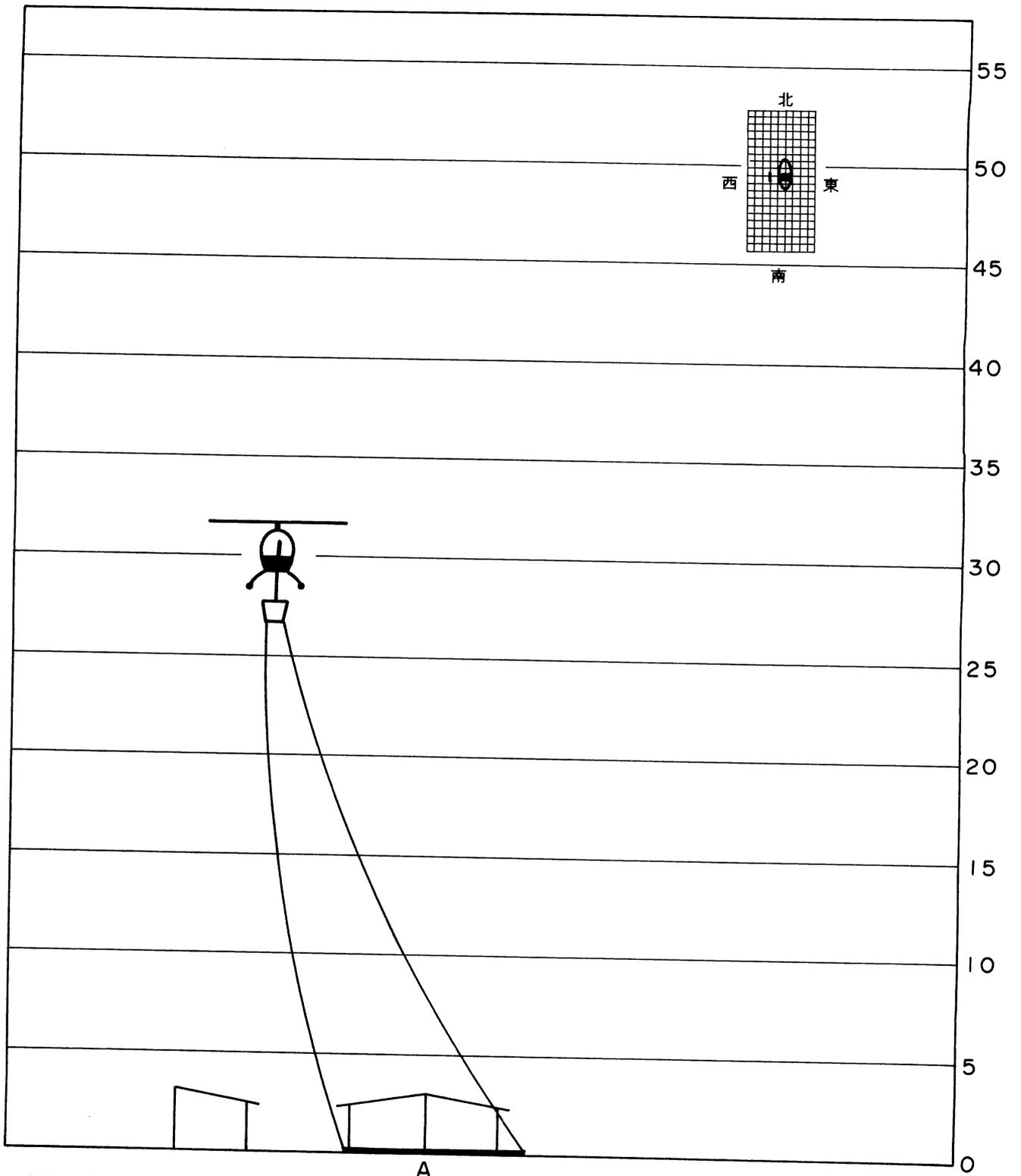




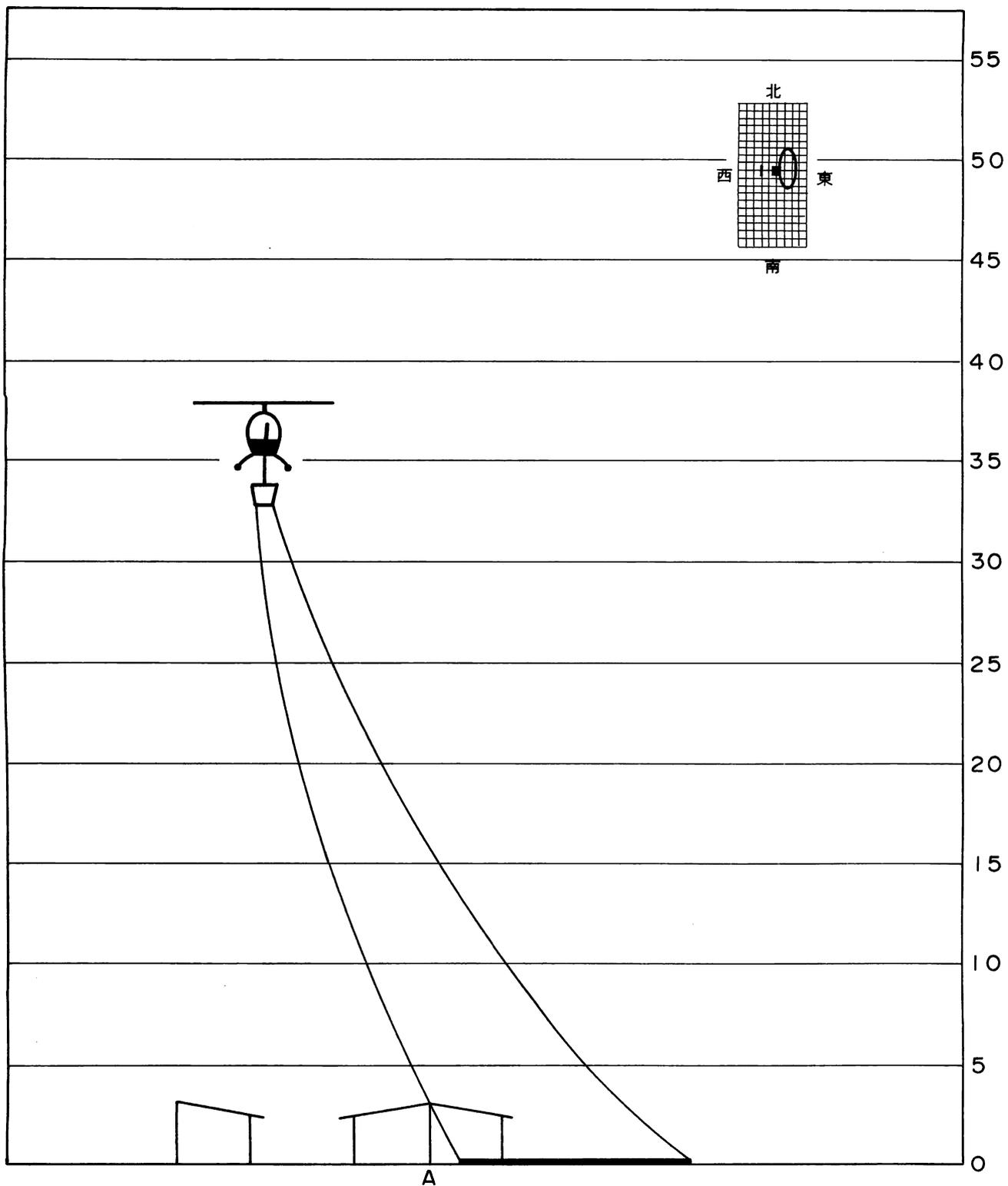
NO. 11
30 m



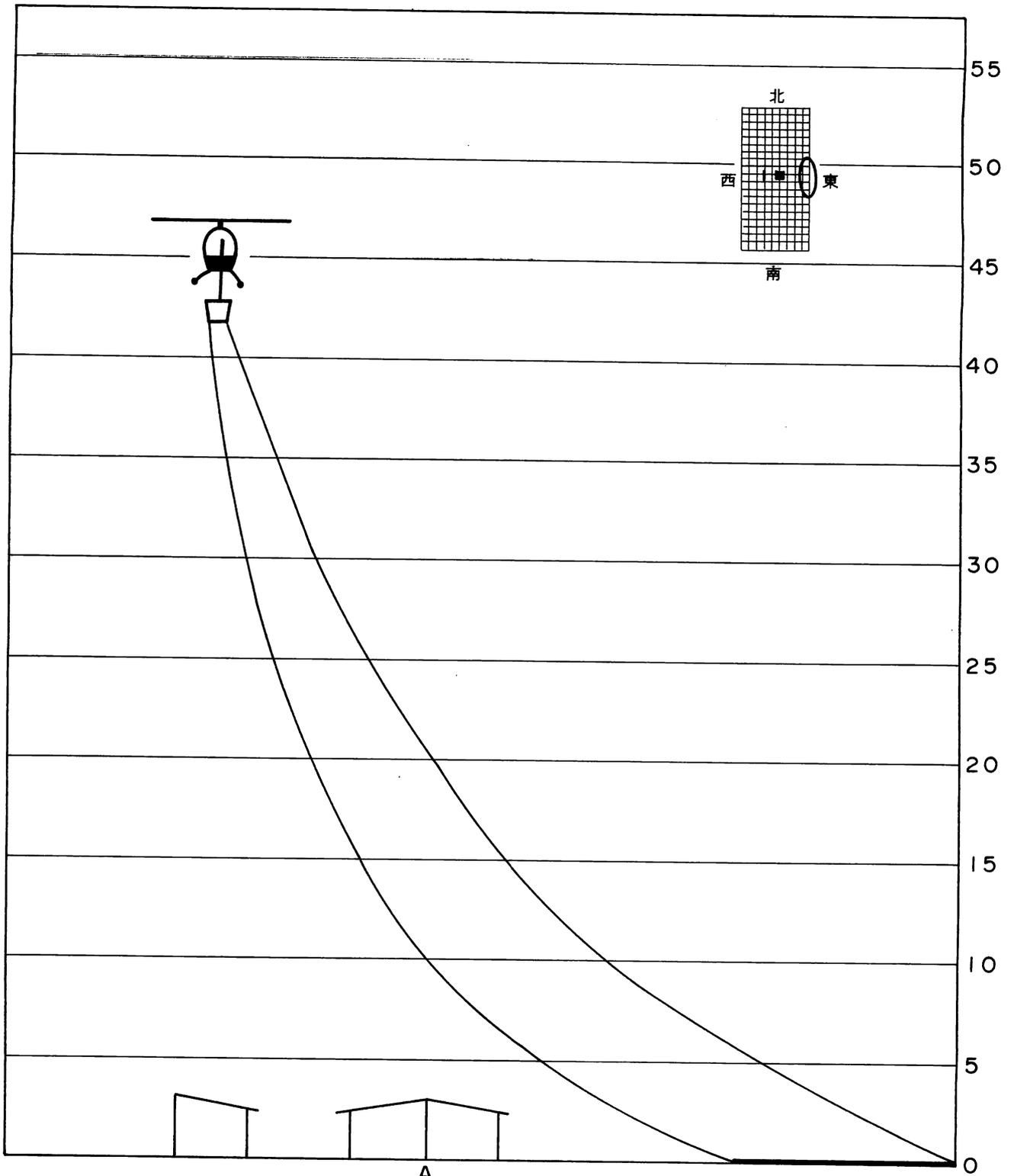
NO. 12
24 m



NO. 13
30 m



NO. 14
36 m



NO. 15
45 m

A

執筆分担

第1章	研究概要	山下邦博
第2章	ヘリコプターの飛行高度と飛行速度	金田節夫
第3章	後流（ダウンウォッシュ）の測定	金田節夫
第4章	ヘリコプターからの投下水の落下拡散性状	佐藤晃由
第5章	水の拡散範囲と散布密度	寒河江幸平
第6章	火災性状と家屋間における気流温度分布	山下邦博
第7章	放射照度及び外壁表面温度からみた火災抑止効果	古積博、岩田雄策
第8章	家屋間延焼阻止効果及び飛び火火災の火災抑止効果	竹元昭夫
第9章	考察及びまとめ	山下邦博

消防研究所資料第45号

市街地火災時における空中消火の
延焼阻止効果に関する研究報告書

平成11年3月

自治省消防庁消防研究所

東京都三鷹市中原3丁目14番1号（〒181-8633）

電話（0422）44-8331（代）

FAX（0422）42-7719

印刷所 株式会社三州社

ISBN4-88391-045-8

消防研究所研究資料一覧

号数	題 名	年月日
1	武蔵野台地における地表水および地下水の測水資料	S 43. 12
2	武蔵野吉祥寺における揚水実験資料	S 44. 12
3	武蔵野台地における帯水層の性状に関する調査資料	S 45. 12
4	地震時における少量危険薬品の出火危険とその対策	S 48. 3
5	大震火災の延焼性状に関する研究野外火災実験 概要報告	S 48. 10
6	市街地火災の延焼性状等に関する研究 旧松尾鉱山廃屋火災実験報告書	S 50. 7
7	四日市市大協石油タンク火災原因調査報告書	S 50. 10
8	石油タンク消火実験結果報告書	S 51. 3
9	呉市山林火災現場附近の小気候	S 52. 3
10	主要繊維・プラスチックの燃焼・熱分解時の重量減少と発生ガス	S 52. 3
11	酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書	S 52. 10
12	炭化水素系燃料による可燃性蒸気雲の爆発特性に関する研究 -ファイヤーボールに関する実験-	S 53. 10
13	震害分布と表層地盤の関係に関する調査資料 -関東地域-	S 55. 1
14	日本海中部地震による危険物施設の挙動に関する調査報告書	S 59. 1
15	水幕と樹木の併用による延焼防止向上効果に関する研究報告書	S 60. 3
16	石油タンクの底板・アニュラー板の裏面腐食に関する研究 -厚さ分布と腐食量について-	S 61. 2
17	円筒貯槽のスロッシングに関する研究報告書	S 61. 3
18	修復石油タンクの水張り試験時AE特性	S 61. 3
19	簡易型火災警報器の非火災報に関する調査・研究	S 61. 3
20	火源の輪郭抽出	S 62. 3
21	林野火災の飛火延焼に関する研究	S 63. 3
22	パソコンを用いた林野火災の拡大予測に関する研究	H 2. 3
23	早期津波予測システムに関する資料	H 3. 3
24	火災規模の防災効果に及ぼす影響に関する研究	H 3. 3
25	火災性状把握システムに関する研究 その1 -非火災報データベースに関する共同研究報告書	H 3. 3
26	火災性状把握システムに関する研究 その2 -火災性状把握システムの試作に関する共同研究報告書	H 3. 3
27	防災物品等を含む火災における発生ガスの毒性に関する研究	H 5. 3
28	火災性状把握システムに関する研究(2次) 実用化をめざしたシステムの改良に関する共同研究報告書	H 5. 3
29	地下利用の特殊空間内における火災性状に関する研究報告書	H 6. 3
30	大火源燃焼試験方法によるカーテンの燃焼性評価に関する研究報告書	H 7. 3
31	阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書	H 8. 3
32	ISO 6941による収縮性、熔融性繊維の燃焼性評価に関する研究報告書	H 8. 3
33	平成5年8月6日鹿児島豪雨災害時における鹿児島市民の災害時の行動に関する調査報告書	H 8. 3
34	火災性状把握避難誘導システムに関する研究(その1 試作システムの概要)	H 8. 3
35	火災性状把握避難誘導システムに関する研究(その2 試作システムのソフトリスト)	H 8. 3
36	地下施設における火災の特性に関する研究報告書	H 9. 3
37	コーンカロリメーターによる防災材料の燃焼性状に関する研究報告書	H 9. 3
38	地下施設における火災の特性に関する研究報告書	H 9. 3
39	少量水による大火災の延焼阻止技術の開発に関する研究報告書	H 9. 1 2
40	被害情報の早期収集システムに関する研究	H 10. 3

消防研究所研究資料一覧(つづき)

号数	題 名	年月日
41	照明灯による舞台幕の着火・燃焼性状に関する実験的研究報告書	H10.3
42	市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書	H10.3
43	実大規模でのカーテン類の燃焼性状に関する実験的研究報告書	H11.3
44	大震火災時における地域防災活動拠点の安全性確保に関する研究報告書	H11.3
45	市街地火災時における空中消火の延焼阻止効果に関する研究報告書	H11.3