

石油タンク火災消火時における  
大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築

平成 26 年 1 月

宮下 達也

## 【目 次】

第 1 章 序論.....	4
1.1 研究の背景.....	4
1.1.1 はじめに.....	4
1.1.2 石油タンク火災.....	4
1.1.3 大容量泡放射システム.....	5
(1) システム概要.....	5
(2) 放射ノズル.....	6
(3) 泡消火剤.....	8
(4) 懸念される点.....	9
1.2 放射特性の定義.....	10
1.2.1 放射軌跡の定義.....	10
1.2.2 放射性能の定義.....	11
1.2.3 放射規模の定義.....	12
1.3 本研究の位置付けと研究目的.....	13
1.4 本研究に関する既往の研究.....	14
1.4.1 小規模放水及び泡放射実験.....	14
1.4.2 中規模放水及び泡放射実験.....	17
(1) 研究目的.....	17
(2) 実験概要及び実験方法.....	17
(3) 実験結果及び結論.....	18
1.4.3 大規模放水及び泡放射実験.....	20
(1) 実験条件のまとめ.....	20
(2) 試験結果のまとめ.....	22
(3) 放射挙動の解析.....	23
(4) 泡消火剤の発泡性能.....	24
1.4.4 タンク全面火災時における消火支援用浮子の開発.....	25
(1) 研究目的.....	25
(2) 研究概要.....	25
(3) 実験結果.....	26
(4) 結論.....	29
1.5 本論文の構成.....	29

第 2 章 大容量放射砲の小型模型による実験的研究.....	31
2.1 屋内小規模放水実験 .....	31
2.1.1 実験目的.....	31
2.1.2 実験概要.....	31
2.1.3 実験結果及び考察 .....	32
(1) 流量 4.7 L/min (圧力 0.08 MPa) .....	32
(2) 流量 3.7 L/min (圧力 0.05 MPa) .....	37
2.1.4 まとめ .....	41
2.2 屋外小規模放水実験 .....	42
2.2.1 実験目的.....	42
2.2.2 実験概要.....	42
2.2.3 実験結果及び考察 .....	42
2.2.4 まとめ .....	45
2.3 屋外中規模放水及び泡放射実験.....	46
2.3.1 実験目的.....	46
2.3.2 実験概要 .....	46
2.3.3 実験結果及び考察 .....	48
2.3.4 まとめ .....	50
2.4 第 2 章のまとめ .....	50
第 3 章 放水軌跡の予測式の構築.....	51
3.1 研究概要 .....	51
3.2 放水軌跡の予測式.....	51
3.2.1 最大射高に関する予測式.....	51
3.2.2 最大射程に関する予測式.....	56
3.3 分散分布の規格化 .....	60
3.3.1 分散分布の評価法 .....	60
(1) 射幅方向の分散分布 .....	61
(2) 射程方向の分散分布 .....	61
3.3.2 射幅方向の分散分布の規格化.....	62
3.3.3 射程方向の分散分布の規格化.....	67
3.4 第 3 章のまとめ .....	70

第4章 MPS法による放射シミュレーション .....	71
4.1 シミュレーションモデル .....	72
4.1.1 MPS法.....	72
(1) 重み関数.....	72
(2) 粒子数密度 .....	73
(3) 勾配モデル .....	73
(4) 発散モデル .....	74
(5) ラプラシアンモデル .....	75
(6) 計算アルゴリズム .....	75
4.1.2 追加モデル .....	78
(1) 水流衝突モデル .....	78
(2) 水塊の分裂モデル.....	78
(3) 泡消火剤の発泡モデル.....	80
(4) 風の計算モデル .....	80
4.2 中規模放射シミュレーション .....	82
4.2.1 計算条件.....	82
4.2.2 妥当性の検証.....	82
4.2.3 放射特性の解析 .....	85
4.3 実大規模放射シミュレーション.....	88
4.3.1 計算条件.....	88
4.3.2 妥当性の検証.....	89
4.3.3 放射特性の解析 .....	91
4.3.4 テーブル化 .....	92
4.4 放射特性の簡易予測式.....	94
4.3.1 簡易予測式の概要 .....	94
4.3.2 妥当性の検証.....	96
4.3.3 消火支援ツールとしての確立.....	97
4.5 第4章のまとめ.....	98
第5章 総括.....	99
【謝辞】 .....	101
【参考文献】 .....	102
【研究実績】 .....	105



# 第1章 序 論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 はじめに

一次エネルギーに占める石油のシェアは、20 世紀末で 40%程度を占めており、21 世紀に入り、多少下落しているものの、依然として一次エネルギー供給源として大宗を占めている。国際エネルギー機関（International Energy Agency, IEA）によれば、この状況は 2030 年まで変わらないと予測されている<sup>1)</sup>。日本では、昭和 30 年代後半から主たる一次エネルギー源が石炭から石油に移行しているが、石油産出国でないため、その 99%以上を輸入に頼っている。そのため、原油の入手難や価格の逐年の高騰、産業の発展に伴う石油需給量の変化に備え、石油の安定的な供給を確保するため、石油を備蓄する必要がある。2011 年 10 月末の時点では、国家備蓄 4,773 万 kL（116 日分）、民間備蓄 3,658 万 kL（89 日分）が全国の備蓄施設で保管されている<sup>2)</sup>。

石油の貯蔵形式には、地上にタンクを設置する地上・地中タンク方式、海上にタンクを浮かべて備蓄する洋上タンク方式、地下に備蓄する地下岩盤タンク方式があり<sup>3)</sup>、特に地上タンク方式は最も設置数が多く一般的である。また、タンクの形式には、縦置円筒型、横置円筒型、球形型などがあり、さらに縦置円筒型については、屋根の形により固定屋根式、浮き屋根式、固定屋根付き浮き屋根式の三つがある<sup>4)</sup>。揮発性の高いナフサやガソリンなどを貯蔵する場合には、鋼製縦置円筒型の浮き屋根式が適している<sup>5)</sup>。浮き屋根式のタンクは、屋根と液体が密着しているため、液体の蒸発を防げるのが特長で、固定屋根式に比べ建設費が高いが、蒸発による損失が少なくなる。また、浮き屋根が液体と空気の接触を防ぐ壁の役割を果たすため、発火防止にも有効である<sup>6)</sup>。

### 1.1.2 石油タンク火災

浮き屋根式の石油タンクで発生する火災は、主にリング（シール）火災と全面火災の二種類に分けられる。リング火災は、浮き屋根とタンク内壁のすき間（シール部分）から揮発油が漏れ、浮き屋根を円形に取り囲むようにして炎が燃え広がる状態である。この場合、コンビナートの固定消火設備で十分消火することができ、消防活動や施設への被害は小さい。他方、全面火災は、浮き屋根が油中に沈み、タンク内に保存されている油がむき出しになることで、油面全体が燃え広がる状態である。火勢が強く、周囲への放射熱も大きくなるため、極めて危険な火災であり、消火も困難となる<sup>7)</sup>。また、原油や重油タンクの場合、ボイルオーバー現象（タンク底部に存在する水が突沸し、爆発的に燃焼する現象）が起こることがあり、より甚大な被害が出る可能性もある<sup>8)</sup>。

タンク全面火災は、国内外を問わず多くの発生事例がある<sup>9, 10)</sup>。国外では、1971 年にポーランドで直径 33 m の固定屋根式石油タンク、2002 年にナイジェリアのシェブロンで浮き屋根式石油タンク、2001 年に米国のルイジアナ州オリオン石油で直径 82 m の浮き屋根式タンク<sup>11)</sup>、2003 年と 2006 年に米国のオクラホマ州グレンプールの浮き屋根式タンクで全面火災が発生している<sup>12)</sup>。いずれも、発生原因は落雷によるもので、国外でのタンク火災発生原因の主要因となっている。日本国内では、1964 年に新潟県新潟市昭和石油新潟製油所の浮き屋根式原油タンク<sup>13)</sup>、1983 年に秋田県秋田市東北電力（株）秋田火力発電所の浮き屋根式原油タンク、1975 年に三重県四日市市大協石油四日市製油所の灯油タンクで全面火災が発生している。発生原因は地震によるものが多く、特に 2003 年 9 月に発生した十勝沖地震（M 8.0）では、

北海道苫小牧市出光興産(株)北海道製油所のナフサタンク（直径 42.7 m、高さ 24.4 m）で大規模な全面火災が発生した。この火災では、長周期地震動により、タンク油面でスロッシング（液面揺動）現象が発生したことで、浮き屋根が油中に沈没し、静電気が着火源となって全面火災に発展した<sup>14)</sup>。当時、浮き屋根式の石油貯蔵タンクは、リング火災に留まる事を想定していたため、泡消火剤放射流量 3,000～4,000 L/min の 3 点セット（大型高所放水車、大型化学消防車、泡原液搬送車）では、全面火災の消火が困難であった。これにより、消火まで 44 時間を要し、被害総額は 5 億 5 千万円、56 万 L の泡消火薬剤が使用された<sup>15)</sup>。この火災を契機に、消防法及び石油コンビナート等災害防止法（以下、石災法）の一部が改正され、平成 20 年 11 月 30 日までに直径 34 m 以上の石油タンクに大容量泡放射砲（放射流量 10,000～40,000 L/min）の設置が義務付けられた<sup>16)</sup>。

### 1.1.3 大容量泡放射システム

#### (1) システム概要

大容量泡放射システムは、図 1.1.1 に示すように①大容量泡放射砲、②遠距離送水システム（展張車・ホースリール）、③泡混合装置、④水中ポンプ、⑤泡消火剤原液で構成されている<sup>17, 18)</sup>。その放射能力は、3 点セット（3,000～4,000 L/min）の約 10 倍の 10,000～40,000 L/min を有している。2001 年の米国ルイジアナ州オリオン石油で発生した直径 82 m の全面火災では、消火開始から 65 分で消火した実績がある<sup>11)</sup>。また、大容量泡放射砲は、浮き屋根が油中に沈没した石油タンクの油面を瞬時に泡消火剤で覆い、発火防止のために使用することもできる。

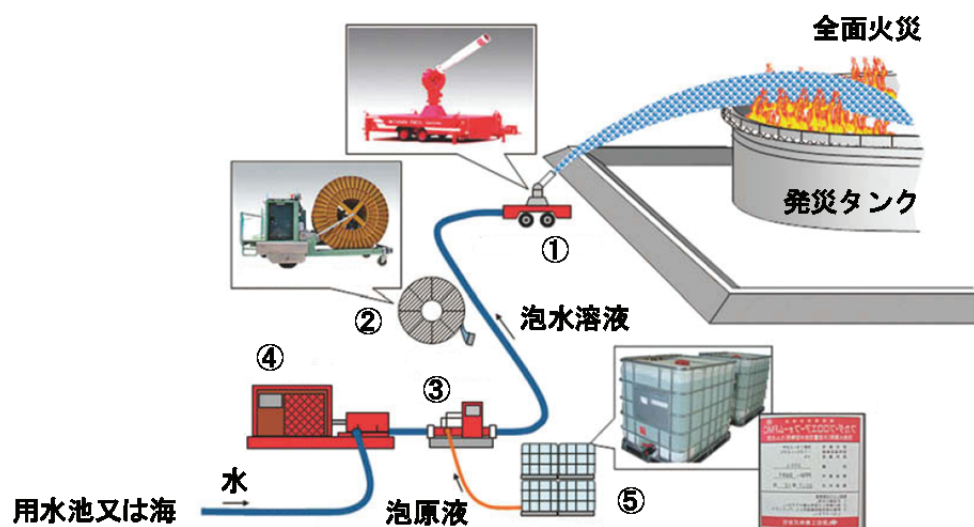


図 1.1.1 大容量泡放射砲システムの概要<sup>18)</sup>

大容量泡放射砲は、屋外タンク火災の燃焼油面に、消火に有効な泡放射を行うことが可能なもので、図 1.1.2、図 1.1.3 に代表的なものを示す。砲から油面までの放射ロス（風、火炎等による散逸、油面での消泡）などを考え、少なくとも 1 基の放射能力が 10,000 L/min 以上で 120 分以上供給できる能力を有するものと定義されている。尚、1 基の屋外タンク火災を消火するための放射量は、火災規模（屋外タンクの油面の面積）に応じ、消火可能な泡供給率を下回らない供給率（ウィリアムズ社が推奨する泡の供給率として、タンク直径に応じて定められている）で、燃焼油面の面積に応じた放射量が必要となる<sup>19)</sup>（表 1.1.1）。



図 1.1.2 Kidde 社 Iron man (30,000 L/min)



図 1.1.3 Williams 社 Ambassador (4,000～22,000 L/min)

表 1.1.1 タンクの直径に応じて投入する泡の供給率及び必要砲水量<sup>19)</sup>

タンク直径 [m]	タンク面積 [m <sup>2</sup> ]	泡供給率 [L/min/m <sup>2</sup> ]	面積×供給率 [L/min]	必要放水量 [L/min]	必要泡原液量※ [L]
34	908	6.5	5,901	10,000	36,000
45	1,590		10,337		
50	1,963	8.0	15,708	20,000	72,000
60	2,827		22,619		
70	3,848	9.0	34,635	40,000	144,000
80	5,026		45,238	50,000	180,000
90	6,362	10.0	63,615	60,000	216,000
100	7,854		78,538	80,000	288,000
110	9,503		95,030		

※混合率 3%で 120 分間放射する場合

## (2) 放射ノズル

大容量泡放射砲のノズルには、泡消火剤を発泡させるため、ノズルに吸気機構を持つ①アスピレート型と吸気機構を持たない②ノンアスピレート型、吸引口をレバーで開閉して切り替え可能な③セミアスピレート型の 3 種類に分けられる<sup>20)</sup>。図 1.1.4 にアスピレート型ノズル、図 1.1.5 にノンアスピレート型ノズル、図 1.1.6 にセミアスピレート型ノズルの発泡機構概要図を示す。

### ① アスピレート型ノズル（内部吸気発泡方式）

アスピレート型は、泡水溶液がノズルに流入すると、図 1.1.4 に示す「吸気」の位置の吸引口から空気を吸引し、ノズル本体のパイプ部分で攪拌、整粒され保水性の高い泡となって放射される。特徴としては、設計時に空気の吸引量が決まるので、泡の性状が予測し易く、また、使用する泡消火薬剤の種類を選ばない。

### ② ノンアスピレート型ノズル（外部吸気発泡方式）

ノンアスピレート型は、空気吸引口のないノズルであるが、ノズル出口付近にディフレクタと呼ばれる円盤型の板が設置されている。泡水溶液は、ノズルとディフレクタの隙間から放射され、ノズル前方で水溶液同士が水流衝突することで、周囲の空気を水流に巻き込んで発泡する（図 1.1.5）。ノズル出口近傍では発泡倍率が低いですが、飛翔中に風等の影響で二次発泡して倍率が高い泡になる。しかし、

空気中の泡散布状況や空気抵抗により、泡性状や放射性能が変わるため放射軌跡の予測が難しい。使用する泡消火薬剤は、水性膜泡消火剤あるいはフッ素蛋白泡消火剤が望ましい。

### ③ セミアスピレート型ノズル

セミアスピレート型は、泡水溶液が本体に加圧流入した際に、ノズルから空気を吸引して発泡し、放射された泡水溶液は水流衝突により外部の空気を巻き込んで発泡する（図 1.1.6）。国内でのセミアスピレート型ノズルによる消火実績は確認されていない。

本論文では、ノンアシピレート型ノズルによる放射挙動および放射軌跡の解析を対象とする。これは、実機による放射試験において最も使用頻度が多く、現在配備されている泡放射砲の主流となっているためである。アシピレート型とノンアシピレート型のノズルによる放水軌跡の変化については、放水時ではどちらのノズルを用いてもほとんど変化は見られないが、泡放射時には発泡により空気抵抗の影響に違いが生じるため、飛行挙動に若干の変化が現れる。しかし、放射軌跡には、ほとんど影響が現れ難く、どちらのノズルを対象として解析を進めても問題はないと考えられる。

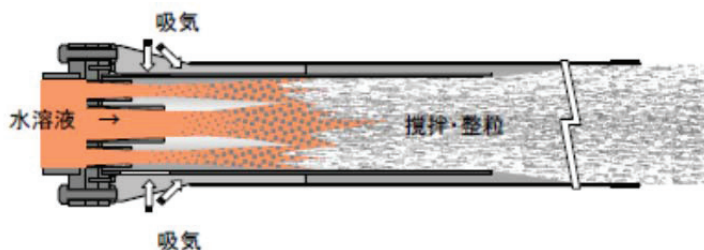


図 1.1.4 アスピレート型ノズルの発泡機構<sup>20)</sup>

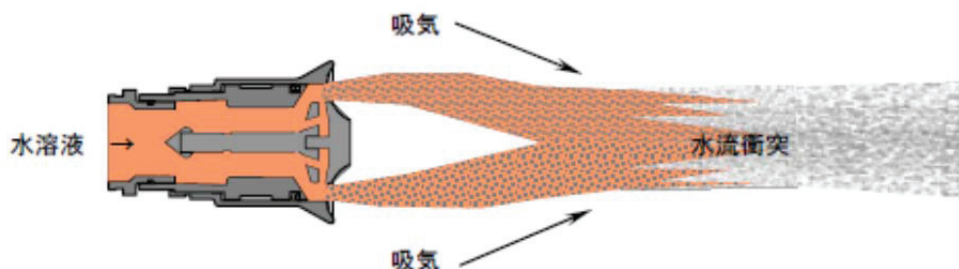


図 1.1.5 ノンアシピレート型ノズルの発泡機構<sup>20)</sup>

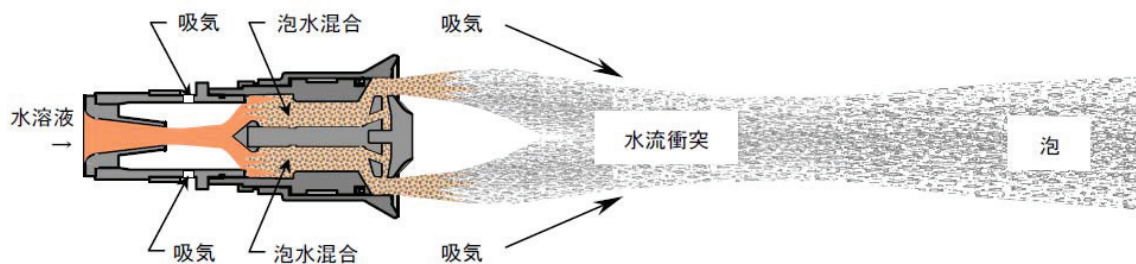


図 1.1.6 セミアスピレート型ノズルの発泡機構<sup>20)</sup>



### (3) 泡消火剤

油火災を消火する泡消火剤には、①たん白泡 (P)、②フッ素たん白泡 (FP)、③合成界面活性剤泡 (SD)、④水成膜泡 (AFFF)、⑤粘性付与水成膜泡 (AR-AFFF) の 5 種類がある<sup>21)</sup>。この中でも特に、大容量泡放射砲で放射する際には、発泡性や油のフッ素たん白泡と粘性付与水成膜泡が適していると考えられている。これらの泡消火剤の特性を以下に記し、泡の物性を表 1.1.2 に示す。

#### ① たん白泡 (P, Protein Foam)

たん白泡の主な成分は、加水分解たん白質、無機鉄塩そしてグリコール系溶剤からなる。また、表 1.1.2 から、水成膜系の泡消火剤と比べ粘度が高い。たん白泡は、油汚染前は、耐熱性、シール性などが良く、高い消火性能を有するが、油汚染すると、泡の破壊、再燃特性など、消火性能が低下すると言われている。また、たん白泡には無機鉄塩を加えており、第一鉄が火炎からの熱により第二鉄に酸化し、たん白と結合するため、泡膜に酸化被膜を形成し火炎に対する抵抗力が増すが、流動性の悪い「硬い泡」を生成する。従って、油面上での展開性能も悪くなり、大容量泡放射砲システムには不向きである。

#### ② フッ素たん白泡 (FP, Fluoroprotein Foam)

フッ素たん白泡は、たん白泡にフッ素界面活性剤を混入して、たん白泡の欠点とする泡の流動性と油汚染を改良した泡消火剤で、耐熱性、再燃性に優れた泡消火剤である。欧米では、油火災に適した泡として、30 年前頃から石油タンクの泡消火設備に使われている。フッ素たん白泡は、通常、アスピレート方式の大容量泡放射砲により使用されるが、ノズルの設計によりノンアスピレート方式の大容量泡放射砲にも使用できることが、志布志石油備蓄基地の泡放射試験で確認された。欧米には、フッ素蛋白泡に類似の泡として、水成膜を形成するフッ素蛋白水成膜泡 (FFFP, Film Forming Fluoro protein) がある。

#### ③ 合成界面活性剤泡 (SD, Syndet Foam)

合成界面活性剤泡は、炭化水素系の界面活性剤とグリコールエーテル系溶剤、そしてグリコール系溶剤が主成分となる高濃度水溶液を得るために、水成膜泡と同様に溶剤、不凍剤を添加する。発泡性がよいので、低発泡、中発泡、高発泡として、A 火災（一般火災）に使用する泡であるが、耐熱性及び耐油性に劣るため、石油タンク火災には使用できない。

#### ④ 水成膜泡 (AFFF, Aqueous Film-Forming Foam)

水成膜泡は、合成界面活性剤泡にフッ素系界面活性剤を混入し生成される。泡の耐熱性は劣るが、油面展開性が良いため流出油の火災に適している。水成の膜は、フッ素系界面活性剤と炭化水素系界面活性剤を含んだ水溶液で形成される。膜構造は分子膜であり、アニオン性炭化水素系界面活性剤とフッ素界面活性剤の両者の分子配向により形成される。油の表面張力の高い軽油や重油には形成するが、ガソリンなどの極めて表面張力の低い油や、燃焼中の高温の油面には形成されず、また油汚染に対する再燃性も懸念される。水成膜泡を、3 点セットや大容量泡放射砲で放射して、空中に放した場合には、空気抵抗によって飛翔中に二次的に発泡して、発泡倍率が 10~20 倍にもなり、泡が飛散するので、風や火炎に対抗して泡をタンクに投入することは困難である。

#### ⑤ 粘性付与水成膜泡 (AR-AFFF, Alcohol-Resistant Aqueous Film-Forming Foam)

AR-AFFF は、水成膜泡に多糖類水溶性高分子を混入し、泡に粘性を付与したものである。水成膜泡に比べ粘性が高く、モニターから泡が放射されたとき、飛翔中の発泡倍率と泡の分散性を抑制するこ

とができる。しかし、水成膜泡と同様、再燃性の問題が懸念されている。水成膜泡を大型の泡放射砲により放射すると、高倍率な泡となり風や火炎で破壊されやすいほか、耐熱性及び保水性の低い泡となるが、粘性を付与した水成膜泡を使用することにより、発泡倍率の抑制と放射中の泡のバラツキを抑えることができる。実際の泡放射試験では、この泡消火剤を用いて行ったものが多く、ノンアスピレート型との相性も良い。アメリカ・ウィリアムズ社がノンアスピレート方式によって、タンク火災を消火したのは、同種の泡消火剤である。

表 1.1.2 各種泡消火剤の物性値 <sup>21)</sup>

種別 (略号)		たん白 (P)	フッ素たん白 (FP)	合成界面活性剤 (SD)	水成膜 (AFFF)	粘性付与水成膜 (AR-AFFF)
物性値 (20℃)	比重 [-]	1.16	1.15	1.03	1.04	1.04
	pH 値 [-]	6.8	6.8	7.9	7.8	7.8
	動粘度 [ $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	0.033	0.036	0.014	0.007	1.8

#### (4) 懸念される点

大容量泡放射砲は、10,000 L/min 以上の泡消火剤放射能力を有し、タンク全面火災の消火に有効とされているが、放射能力が大きくなるほど装置が大型になるため、以下のような点で懸念されている。

##### ① 装置の設置・組み立てに多大な時間を要する

大容量泡放射砲は、火災発生後に各装置を設置するシステムであるため、泡混合装置や水中ポンプなどを所定の位置まで運搬し、各装置をホースで接続する必要がある。石災法によると、「災害発生から放射砲を設置するまでの時間的猶予は、最も遠い距離に所在する該当タンクまでにおいて概ね 8 時間である」<sup>16)</sup>と記載されており、消火活動を開始するまでには最長で 8 時間を要することが分かる。また、訓練時には、放射砲が到着してから放射するまでに 2 時間以上の時間を要することがわかっている。

##### ② 風や上昇気流の影響を受け易い

日本の石油タンクは、高さ 20m 以上のものが多く、海外に比べ 2 倍以上のタンク高である。放射砲は、3 点セットのような高所放水型ではなく、地上からタンクに向かって放射角度 40° 以上で放射するため、放射された泡消火剤の滞空時間が長くなる。従って、風や火炎からの上昇気流の影響を受け易くなり、図 1.1.7 のようにタンクの壁に遮られ地上に落下してしまう。また、油面に対する泡の落下角度が大きくなり、投入した泡は油面との衝撃による消泡や油内への貫入が生じ、効率良く油面を覆うことができないため、窒息消火を行うためには、多量の泡消火剤が必要となる可能性がある。

##### ③ 放射軌跡の予測が困難

大容量泡放射砲から放射された泡消火剤は、最大射程が 100 m 以上、最大射高が 20 m 以上になるため、風速風向などにより射程・射高の値が大きく変化し、正確な予測が困難となる。放射角度や放射方向は、ノズルの角度を調節することで、ある程度の調整が可能であるが、その要領は消防隊員の経験にのみ委ねられている。その経験を養うためには、実大規模の泡放射試験を行う必要があるが、実験場所の確保や実験後の泡の処理に多額の費用が掛かるため、試験回数が少なく訓練が十分に行われ

ていない。また、大容量泡放射砲の小規模模型を用いた放射実験は、多くの実施例があるが、流量規模の違いによる相似則は確認されていないため、その妥当性には不安が残る。



図 1.1.7 大容量泡放射システム性能試験（2005 年志布志市）

## 1.2 放射特性の定義

### 1.2.1 放射軌跡の定義

放射された水あるいは泡消火剤が描く軌跡を放射軌跡（水の場合は放水軌跡）と呼び、図 1.2.1 のような放物線に近い軌跡を描く。軌跡の外側を描くラインは上限ライン、軌跡の内側を描くラインは下限ラインとそれぞれ定義されている。図 1.2.2 は、放射軌跡の各部名称を示し、最も遠くの地点まで到達した水平距離を最大射程、最も高い地点まで到達した高さを最大射高と呼び、どちらも上限ラインに含まれる。下限ライン上での射程・射高は、それぞれ最小射程・最小射高と呼ばれる。また、最大射程と最小射程の中間地点の位置は中心射程と呼ばれ、最大射高と最低射高の位置における水平距離は、それぞれ最大射高水平距離・最低射高水平距離と定義される。軌跡の平面図において、最大射程・最小射程・射幅で囲まれた楕円形の部分は、フットプリント (Footprint) あるいはランディングゾーン (Landing Zone) と呼ばれる。これは、放射された水（泡消火剤）が最も集中する部分であり、放射流量や圧力、角度により楕円の形状が変化する。フットプリントの定義は、消防関係の研究においても曖昧であり、数値的に定められていない。フットプリントの幅は射幅と呼ばれており、放射実験時には最大射程、最大射高とともに測定されることが多く、放射性能を表す値として重要である。



図 1.2.1 放射軌跡の側面図

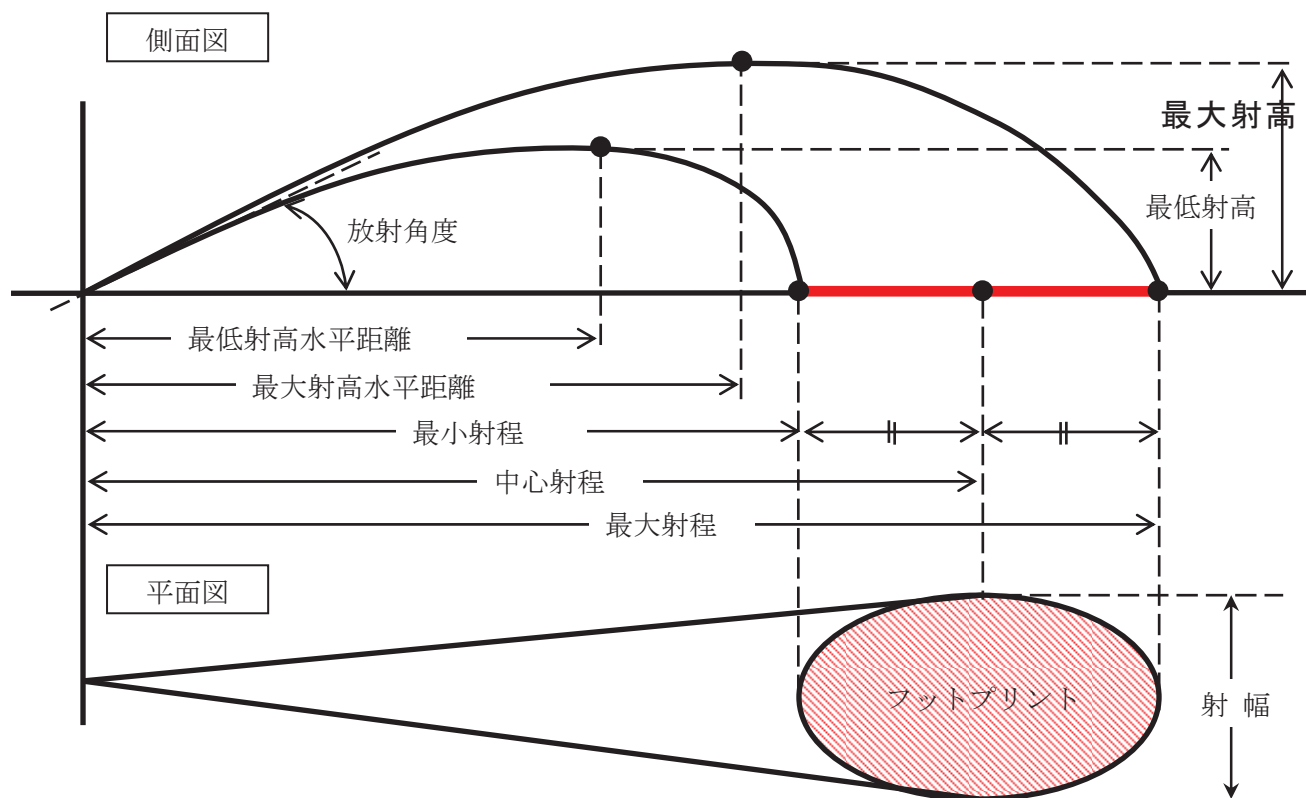


図 1.2.2 放射軌跡の定義

### 1.2.2 放射性能の定義

放射された水あるいは泡消火剤の放射性能には、飛翔中のまとまり具合を表す指標として分散性がある。これは風などの外力による影響の受けやすさを評価するものであり、石油タンクに泡消火剤を投入した際に、泡消火剤の油面上での展開し易さを評価することもできる。油面全体に泡消火剤を展開させる場合、油面上にいち早く“泡の橋頭堡”を築き、そこを拠点として効率良く泡が展開することで、火災の抑制・消火に至る。泡の橋頭堡を早急に築くためには、図 1.2.3 に示すような分散性の低い泡の束で放射する必要がある。まとまった泡の束は、高温の火炎を通過し油面に到達することができるため、油面上に泡の橋頭堡を築きやすくなる。しかし、図 1.2.4 のように分散性が高い場合、風や火炎により泡が飛散・破壊されて、油面に到達することができなくなる。仮に一部の泡が油面に到達したとしても、油面上で橋頭堡が築けず、油面全体に泡が展開することができない<sup>22)</sup>。

分散性を調べる方法として、床面に落下した水あるいは泡の分散分布を測定する方法が一般的である。分散分布は、水捕集用の容器を床面上に設置した後、放水を行い、容器内に溜まった水の重量を測定することで水の等量線図を作成して評価を行う。このような手法は、スプリンクラーの性能試験にも用いられており、水の集中度合やばらつき具合などを数値的に評価することが可能である。また、単位面積、単位時間当たりの泡消火剤体積を分散分布密度と定義しており、放射性能を相対的に評価する指標とされている。

泡消火剤放射時の放射性能を表す指標として、発泡倍率と還元時間がある。発泡倍率（Expansion Ratio：消防法では膨張率）は、泡消火剤の起泡性・保水性・耐熱性などに関連、その値は発泡前の泡消火剤の容積と発生した泡の容積比で定義される。通常は、容積の分かった容器に泡を収集して測定するが、大



流量の場合は発生した泡を大きな容器に放出し、泡放射ノズルの流量との比で求める。また、泡の安定性・保水性は、還元時間で評価され、放射された泡が発泡前の泡消火剤の 25%量あるいは 50%量に還元するまでの時間をもって、25%還元時間あるいは 50%還元時間と表現される<sup>22)</sup>。

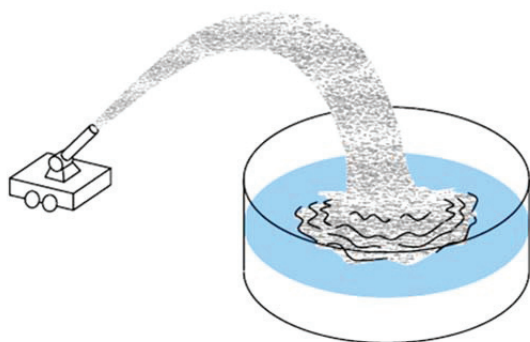


図 3.1.3 分散性が低い放射イメージ

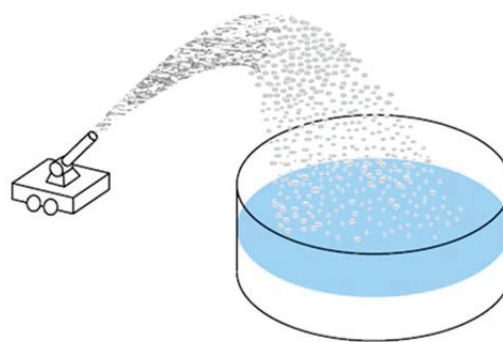


図 3.1.4 分散性が高い放射イメージ

### 1.2.3 放射規模の定義

放射規模を明確に表すため、流量の大きさにより、 $10^2$  L/min 程度までの小規模、 $10^3$  L/min の中規模、 $10^4$  L/min の大規模と定義した。それぞれの規模の放射は、表 1.2.1 に示す通り、火災規模に応じて適用範囲が異なる。例えば、消防団や消防隊員が家屋火災の消火に用いる放水は約 300～500 L/min であり、小規模に分類される。また、ビル火災や航空機火災に使用される高所放水車は、3,000～4,000 L/min で中規模となる。タンク火災に用いられる大容量泡放射砲は、10,000～40,000 L/min であるため大規模放射である。

表 1.2.1 放射規模の定義

放射規模の分類	放射装置	放射流量 [L/min]
小規模 (流量 $10^2$ L/min 以下)	ABC 消火器の噴霧量	3.5～10
	高圧洗浄機	5.0～20
	口径 13～30 mm の水道の蛇口	10～40
	一般人や自衛消防隊が用いる消火栓 <sup>23)</sup>	130～350
	一般的な家屋火災時に消防隊員が使用するノズル <sup>24)</sup>	600
中規模 (流量 $10^3$ L/min)	消防ポンプ自動車・機動隊の高圧放水車	2,000
	三点セットの高所放水車 <sup>25)</sup>	3,000～4,000
	自衛隊の大型破壊機救難消防車	6,000
	大流量スプリンクラー <sup>26)</sup>	1,000～7,000
大規模 (流量 $10^4$ L/min 以上)	海上保安庁の消防艇	10,000～20,000
	大容量泡放射砲	10,000～40,000
	ダムの最大放流量 <sup>27)</sup>	1,000 万～5,000 万

### 1.3 本研究の位置付けと研究目的

タンク全面火災を迅速に消火するためには、必要最小限の泡消火剤で油面全体を効率良く覆い、窒息消火させることが重要である。そのため、放射ノズルの改良や泡消火剤の耐火性能の向上、火災の燃焼挙動の解析・燃焼抑制、消火設備の向上及び消火技術の高度化、燃焼時の煙挙動と放射熱の危険性を予測するための研究が行われている。消防庁消防研究センターや深田工業株式会社では、小型模型を用いた泡消火剤の投入実験を実施し、火災時の上昇気流や熱的影響を考慮した油面での泡展開挙動の解析が行われている<sup>28)</sup>。また、アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) により開発された火災シミュレーションソフトとして、FDS (Fire Dynamics Simulator) や ALOFT (A Large Outdoor Fire Plume Trajectory) があり、火災事象における煙、温度、一酸化炭素などの挙動を予測することができる<sup>29)</sup>。この中で、本研究は大容量泡放射砲に関する研究として位置付けられ、特に放射された泡消火剤（あるいは水）がタンクに到達するまでの飛行挙動を解析し、放射軌跡を予測することで消火支援に役立てるものである。

放射軌跡の予測は、放射砲の有効射程<sup>30, 31)</sup>や放水挙動に関する研究<sup>32, 33)</sup>が行われており、設置後の移動が困難な大容量泡放射砲の初期設置場所を検討する際に役立つだけでなく、発火防止の観点からも有用性が高い。大型の浮き屋根式石油タンクでは、浮き屋根が油中に沈没した際に、油面全体を泡消火剤で覆い、揮発及び発火を防止する必要がある。この時、油面に投入された泡消火剤の量が少ないと沈降帯電して発火する危険性があるため、タンク内に大量の泡消火剤を瞬時に投入しなければならない。そのため、風の影響を考慮した軌跡の予測が求められている。

軌跡の予測モデルについての研究は、石油コンビナートを有する地区の広域共同防災組織による実機を用いた大規模放射実験に基づく実験式、川端らの気流解析と連立した放水砲による放射挙動シミュレーションなどの研究<sup>34)</sup>や㈱FPEC 社製のシミュレーションソフト“FIRE MARSHAL”などがある。いずれも最大射程や最大射高を実験と比較することによりモデルの有用性を評価しており、放射軌跡の予測に有用なモデルである。しかし、放射性能の評価手法の一つである床面に落下した水（泡消火剤）の分散分布については、実験との定量的な比較が行われておらず、またタンク内に到達する流量割合を予測することが困難である。

そこで、本研究では、最大射程や最大射高などの放射軌跡を予測するだけでなく、水（泡消火剤）の分散分布についても予測可能なシミュレーションモデルを構築することを目的とする。モデルの基盤として、自由表面流体の解析に適している MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit Method) を用い、三次元のシミュレーションモデルの構築を試みた。モデルの妥当性を評価するため、小規模と中規模の放水及び泡放射実験を実施し、放射軌跡及び水（泡消火剤）の分散分布を計算値と定量的に比較した。また、最大射程及び最大射高について、物理的機構に基づいた予測式の構築を行い、放水性状の基礎過程の把握、模型実験の妥当性の検証を行った。さらに、風の影響を考慮した放水軌跡及びタンクへの投入率を簡易に予測できるモデルの構築を試みた。これにより、消火活動時に放射軌跡を瞬時に予測することが可能になり、消防計画の立案に役立つことができると考えられる。

ただし、本論では、消火支援システム構築の第一段階として、放水軌跡の解析のみに着目して研究を進めているため、火災からの上昇気流や熱的影響については考慮していない。これらの影響は、第二段階の研究として、水あるいは泡の破壊や表面張力の温度依存性などを考慮したシミュレーションを行い、現実の現象に則した予測を行う必要がある。

## 1.4 本研究に関する既往の研究

### 1.4.1 小規模放水及び泡放射実験

2008 年に千葉県において、放射流量が実スケールの 1/100 の小規模試験ノズルを用いて放水及び泡放射実験が行われた。実験は、放射流量、放射圧力、放射角度、水質（淡水・海水）が発泡倍率及び 25% 還元時間に与える影響を確認し、各放射条件における泡性状の傾向を比較することを目的として行われた。実験の放射流量規模が小さいため、放射条件を細かく変更することや、同条件下での実験を容易に行うことができる。表 1.4.1 に放射条件、図 1.4.1 に放射ノズルを示し、以下に試験の概要を記述する。

- ・ 主 催：北海道地区広域共同防災協議会、櫻護謨株式会社
- ・ 実 施 日：2008 年 7 月 11 日(金)
- ・ 実施場所：日本ドライケミカル(株) 千葉工場  
千葉県山武郡松尾町借毛本郷 625-1
- ・ ノ ズ ル：ノンアスピレート型ノズル
- ・ ノズル径：φ 10.0 mm（流量 15,000 L/min の 1/100 スケール）、φ 13.5 mm（流量 30,000 L/min の 1/100 スケール）、φ 16.0 mm（流量 40,000 L/min の 1/100 スケール）
- ・ 気象条件：風速 1 m/s 以下
- ・ 泡消火剤：Kidde 社製 大容量泡放射システム用泡消火薬剤（1%型水成膜）
- ・ 水 質：淡水（水道水）及び海水（合成海水：組成は下表 1.4.2 参照）

表 1.4.1 放射条件

変更項目	試験番号	ノズル径 [mm φ]	放射圧力 [MPa]	角度 [°]	水質	測定回数
ノズル径 (放射流量)	1	10	0.7	35	淡水+泡	1
	2	13.5				1
	3	16				1
放射圧力	4	16	0.5	35	淡水+泡	1
	3		0.7			1
	5		0.8			1
	6		0.9			2
放射角度	3	16	0.7	35	淡水+泡	1
	7			50		1
	6		0.9	35		2
	8			50		1
水 質	3	16	0.7	35	淡水+泡	1
	9				海水+泡	3

※放射条件は、合計 9 パターンで行った（色付きの試験番号）。

試験番号が同じもの（色無しの試験番号）は、放射条件が同一となるもの。



図 1.4.1 実験で使された放射ノズル

表 1.4.2 合成海水の組成

塩化マグネシウム ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )	1.10 wt%
塩化カルシウム ( $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ )	0.16 wt%
塩化ナトリウム ( $NaCl$ )	2.50 wt%
硫酸ナトリウム ( $Na_2SO_4$ )	0.40 wt%
水	95.84 wt%

各放射条件における試験結果（放射特性及び泡性状）を表 1.4.3 に示す。25%還元時間については、1分間で25%以上の泡が還元してしまい、測定することができなかったため、1分後の還元率を記載する。また、図 1.4.2 に放射試験の様子を示す。

表 1.4.3 より、ノズル径を  $\phi 3\text{ mm}$  ずつ大きくすると、放射流量が 80~120 L/min 増加することが分かったが、放射流量の上昇に伴う射高及び発泡倍率の変化はあまり見られなかった。しかし、最大射程に 1 m の増加が見られたことから、放射流量の変化量を大きくした場合には、射程・射高の増加傾向が見られる可能性がある。放射圧力を 0.1 MPa 上昇させても、最大射程には 1 m 程度の変化しか見られなかった。また、泡消火剤に混合する水質は、淡水と海水でほとんど変化がなかったことから、放水実験時に使用する水質には、特別な配慮は必要ないと考えられる。発泡倍率は、放射圧力が大きく、放射角度が上がるほど高くなることがわかった。従って、空気と接触する時間が長いほど、泡消火剤は発泡し易くなると考えられる。



表 1.4.3 放射特性測定結果

試験 番号	ノズル径 [mm φ]	圧力 [MPa]	角度 [°]	水質	風向 風速 [m/s]	射程 [m]		射高 [m]	発泡 倍率 [-]	1 分後 還元率 [%]
						最小	最大			
1	10	0.7	35	淡水	右横風 2.80	18	20	9.60	2.46	48.0
2	13.5				右横風 2.15	16	25	7.97	2.57	44.2
3	16				追風 2.84	16	26	9.45	2.77	43.1
4	16	0.5	35	淡水	右横風 1.85	16	24	9.99	2.82	44.0
3		0.7			追風 2.84	16	26	9.45	2.77	43.1
5		0.8			右横風 3.34	20	27	10.67	3.10	36.1
6-1		0.9			追風 2.64	20	28	9.71	2.67	41.4
6-2					追風 2.91	22	35	9.85	2.91	37.6
3	16	0.7	35	淡水	追風 2.84	16	26	9.45	2.77	43.1
7			50		追風 2.26	20	28	12.46	2.88	40.6
6-1		0.9	35		追風 2.64	20	28	9.71	2.67	41.4
6-2					追風 2.91	22	35	9.85	2.91	37.6
8			50		右横風 2.89	23	28	16.73	2.98	35.4
3	16	0.7	35	淡水	追風 2.84	16	26	9.45	2.77	43.1
9-1				海水	右横風 2.21	20	26	9.71	2.73	42.9
9-2					右横風 2.40	20	25	9.93	2.74	40.8
9-3					追風 2.71	20	29	10.10	2.74	40.9

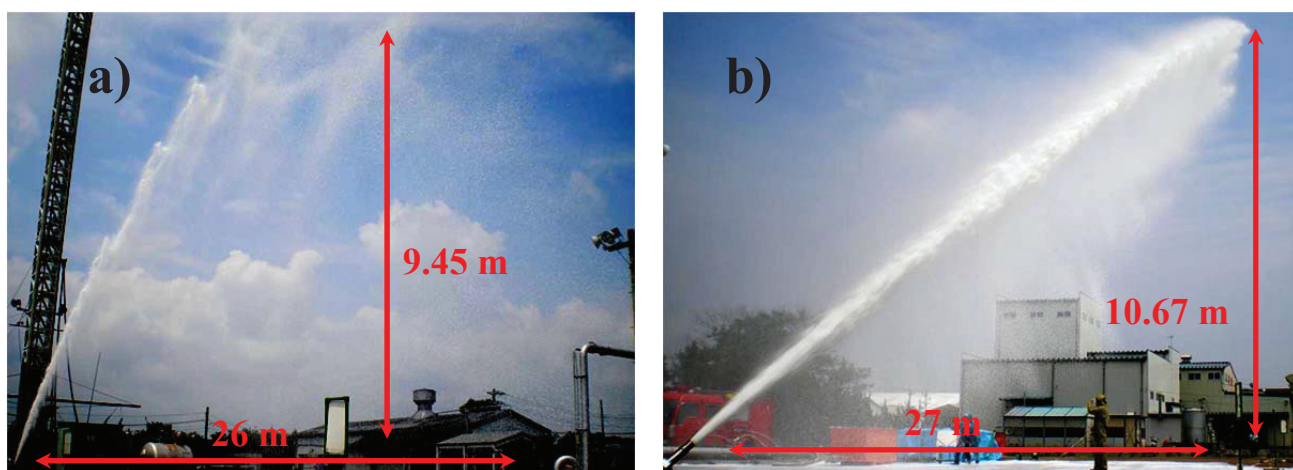


図 1.4.2 各条件における泡放射試験の様子

- a) 試験番号：3、放射流量：322.6 L/min、放射圧力：0.7 MPa、放射角度：35°  
b) 試験番号：5、放射流量：375.6 L/min、放射圧力：0.8 MPa、放射角度：35°

### 1.4.2 中規模放水及び泡放射実験

独立行政法人消防研究所、深田工業株式会社、第一化成産業株式会社が共同で行った研究で、北海道苫小牧のタンク全面火災による大容量泡放射砲の導入にあたり、タンク火災の消火に適した泡消火剤の性能把握と大容量泡放射砲に関する研究として行われた<sup>22)</sup>。放射流量が 5,000 L/min であるため、大容量泡放射砲には含まれないが、現在までに行われた泡放射試験の中で、泡の分散分布密度を測定し、グラフ化した数少ない研究の一つである。分散分布密度についても、明確に定義付けされているため、測定方法や放射特性の解析方法など参考になる部分が多い。

#### (1) 研究目的

大容量泡放射砲の配備決定に伴い、泡放射時の放出量が 570 L/min (0.7MPa)、最大射程約 84 m のノンアスピレート型ノズルを使用し、泡放射実験を行った。放射量より、大容量泡放射砲には属さないが、大容量泡放射実験における測定手法の確立と、基礎データの収集を目的とした。

#### (2) 実験概要及び実験方法

実験は、平成 16 年 5 月 25 日、三重県三重郡楠町昭和四日市石油(株)四日市製油所内の楠タンクヤードにて実施した。泡放射砲は Williams 社のノンアスピレートノズル (Hydro-Foam Nozzle Ranger HFR1。5) を使用し、①合成界面活性剤 (SD)、②水成膜泡 (AFFF)、③粘性付与水成膜泡 (AR-AFFF) 及び④水を放射した。泡消火剤の混合比はいずれも 3% とした。図 1.4.3 に放水升への放射方法についての詳細を示す。測定領域は 30 m×13 m で、測定面積は 390 m<sup>2</sup> とし、また、測定領域に置かれる採水升は、放射方向に 16 個(A～P)、横方向に 7 個(1～7)、計 112 個の採水升により泡を採取し、分散分布密度を計測した。採水升はプラスチック製の内径 0.205 m、高さ 0.25 m、容量 7.5 L の容器を用いた。採水升到採取された泡の高さを計測し体積を算出した (放水時にはメスシリンダーを用いた)。

各放射実験の考察には、「指向性」、「分散性」、「分散分布密度」、「相対分布密度」を使用した。指向性とは、放射目標位置へどれだけの水、泡が到達するのか、放射時の“まとまり”の良さを定性的に判断するものである。逆に分散性とは、目標地点への水、泡の到達率の悪さ、いわゆる“ばらつき”を定性的に判断するものである。分散分布密度は、単位面積、単位時間あたりの体積と定義しており、相対分布密度は、求められた分散分布領域に対する分散分布密度と定義している。具体的には、放射される泡の体積流量が、全て分散分布領域へ到達する時の分散分布密度と考えられる。泡の分散分布領域は、射程の最大距離、最小距離、分布幅から楕円と仮定し、領域の面積を算出し体積流量は、泡の場合、発泡倍率と放射流量が分かれば求めることができる。従って、式(1.1)に示すように、分散分布領域から求められた分散分布密度に対する各測定点で得られた分散分布密度は、相対的な分散分布密度として考えられる。これを用いて、各条件 (泡性状、放射角度、風向・風速など) を包含した、泡の指向・分散性の評価を行った。

$$\text{相対分散分布密度}[\%] = \frac{\text{各測定点に対する分散分布密度}[L/m^2 \text{ min}]}{\text{分散分布領域に対する分散分布密度}[L/m^2 \text{ min}]} \times 100 \quad (1.1)$$

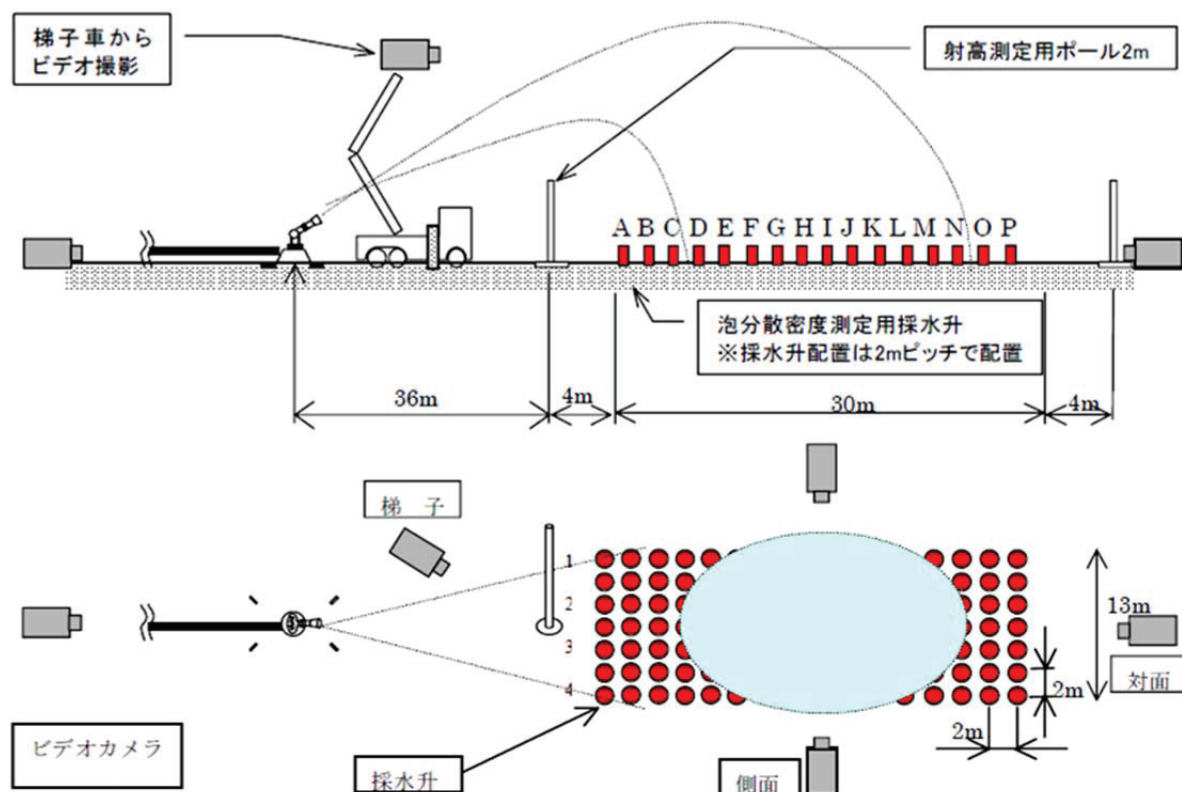


図 1.4.3 昭和四日市製油所 放射実験の概略図

### (3) 実験結果及び結論

各実験条件における放射軌跡の測定結果を表 1.4.4 に示す。また、図 1.4.4 に水及び各泡消火剤の相対分散分布密度の等高線図を示す。この放射実験により以下の結論が得られた。

- ① 合成界面活性剤泡 (SD) は、発泡倍率及び、分散性は水成膜泡 (AFFF)、粘性付与水成膜泡 (AR-AFFF) に比べ比較的 low、高い相対分散分布密度が観測された。
- ② 水の相対分散分布密度を見ると、そのピークが泡の放射に比べ、放射方向下流側へ移行しており、射程が泡の放射に比べ、長くなることが分かった。また、泡の発泡倍率は、射程に大きく影響することが、水の放射から推測された。
- ③ AFFF は、放射角度、風などの外的要因に影響されやすい泡消火薬剤であることが、放射写真、相対分散分布密度より明らかとなった。
- ④ AR-AFFF は、AFFF との相対的な比較で、外的要因の影響を受けにくく、分散性も低いことが分かった。
- ⑤ 泡の分散分布領域の面積は楕円と仮定し、算出したが、高い放射角度、高い発泡倍率では、風等による外的要因の影響を受け、楕円形の分散分布領域にはならないことが明らかとなった。
- ⑥ アスピレートノズルとは異なり、ノンアスピレートノズルでは、消火に適した泡性状、低い分散性、長射程、高い相対分散分布密度などの性能向上を目指すには、適切な泡消火薬剤の選定と、泡消火剤との整合性が取られた放射砲により泡放射を行うことが、非常に重要であると考えられる。

表 1.4.4 各放射時における測定結果

実験	泡消火剤	放射角度 [°]	放射流量 [L/min]	射程 (min~max) [m]	射高 [m]	分散分布密度 [L/m <sup>2</sup> /min]
1	SD	45	5,000	34~66	16	293
2	水	45	5,440	50~72	22	45
3	水	30	5,980	52~75	16	47
4	AFFF	45	6,080	44~64	14	958
5	AR-AFFF	45	6,150	40~66	17	257
6	AR-AFFF	30	6,220	48~70	12	537
7	AFFF	30	6,170	30~60	10	416

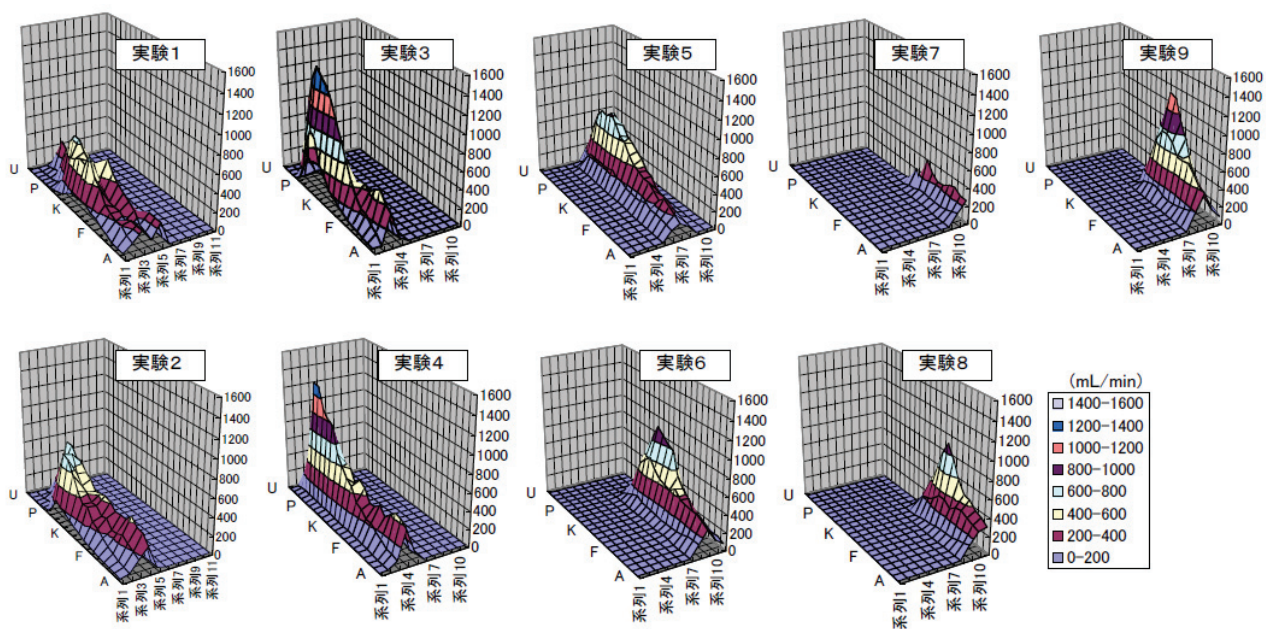


図 1.4.4 水及び各泡消火剤における相対分散分布密度の等高線図



### 1.4.3 大規模放水及び泡放射実験

防災協議会により実施された実機を用いた放水及び泡放射試験の結果<sup>35)</sup>をまとめる。試験は、2008年に愛知県、茨城県、新潟県、米国（テキサス州）、2009年に鹿児島県で行われ、その試験の様子を撮影した。シミュレーションと実射を比較する際、これらの画像や動画と比較することで放射挙動の解析を行った。

#### (1) 実験条件のまとめ

放射試験は、泡放射が14パターン、放水が47パターン、合計で61パターンが実施された。表1.4.5に泡放射試験、表1.4.6に放水試験の放射条件をそれぞれまとめたものを示す。

表 1.4.5 実施された泡放射試験のまとめ

放射流量 [L/min]	放射圧力 [MPa]	放射角度 [°]	試験回数 [回]	試験場所
120	0.7	35	1	千葉
250	0.7	35	1	
350	0.5	35	1	
	0.7	35	4	
		50	1	
	0.8	35	1	
	0.9	35	2	
		50	1	
20,000	0.7	35	2	愛知, 新潟
		45	1	新潟
	0.8	35	1	米国
	0.9	35	1	新潟
25,000	0.7	35	1	愛知
30,000	1.0	35	1	

表 1.4.6 実施された放水試験のまとめ

放射流量 [L/min]	放射圧力 [MPa]	放射角度 [°]	試験回数 [回]	試験場所
10,000	0.7	35	2	茨城
		40	2	
		45	2	
	0.8	40	1	
	0.9	35	2	
		40	2	
		45	2	
15,000	0.7	35	2	茨城, 米国
		40	1	茨城
		45	1	

	0.8	35	1	米国
		50	1	
	0.9	35	1	茨城
		40	1	
		45	1	
20,000	0.7	35	3	茨城, 米国, 鹿児島
		40	2	茨城, 鹿児島
		45	2	
		50	1	米国
	0.8	35	1	
		40	2	茨城, 鹿児島
		50	1	米国
	0.9	35	1	
		40	2	茨城, 鹿児島
		45	2	
25,000	0.7	40	2	茨城, 鹿児島
		45	2	
	0.8	40	2	
		45	2	
	0.9	40	2	
		45	2	
30,000	0.7	35	1	米国
		40	3	茨城, 米国, 鹿児島
		45	2	茨城, 鹿児島
	0.8	35	1	米国
		50	1	
	0.9	35	1	茨城, 米国, 鹿児島
		40	3	
38,000	0.8	35	1	米国
		40	1	
	0.9	35	1	
		40	1	
40,000	0.7	35	1	米国
		40	1	
		45	2	茨城, 鹿児島
	0.8	45	2	茨城, 鹿児島
	0.9	45	2	茨城, 鹿児島

## (2) 試験結果のまとめ

放射軌跡は、使用する大容量泡放射砲の種類や試験条件（風向・風速）などに、大きく影響を受けるため、シミュレーションと実射を単純に比較するだけでは、定量性に欠けると考えられる。しかし、シミュレーション結果を評価するには、放射軌跡の比較は必要不可欠である。そこで、一つの放射条件について、最低二つ以上の測定データ（実射）を比較し、平均的な試験データを得ることとする。また、水と泡の放射軌跡の違いについても比較・評価する。放射条件の比較は、放射プログラムの作成に用いた放射流量 20,000 L/min、放射圧力 0.7 MPa、放射角度 35°、45°と、放射圧力 0.8、0.9 MPa、放射角度 35°について行った。表 1.4.7 に放射軌跡の比較を示す。

表 1.4.7 放射軌跡の比較（放射流量：20,000 L/min）

	放射圧力 [MPa]	放射角度 [°]	最大射程 [m]	最大射高 [m]	射幅 [m]	風向 風速 [m/s]	試験場所
泡	0.7	35	125	29	10	左横風 3.3	愛知
			106	20	15	左横風 1.8	新潟
		45	106	39	24	右横風 1.3	新潟
	0.8	35	93	29	17	向風 3.0	米国
	0.9	35	106	24	19	左横風 2.9	新潟
水	0.7	35	95	20	14	向風 3.1	茨城
			109	27	16	右横風 0.4	米国
			102	26	9	追風 2.3	鹿児島
		45	86	30	13	向風 3.1	茨城
			112	34	6	左横風 0.6	鹿児島
	0.8	35	117	30	15	右横風 1.8	米国
	0.9	35	126	30	15	右横風 0.4	米国

泡放射の場合、最大射程は放射圧力を変化させても 106m 前後でほとんど変わらない。最大射高についても、平均約 25 m となっていた。水放射の場合、圧力が 0.1 MPa 上昇すると伴に最大射程が約 9 m 長くなっている。茨城の放水試験では、向い風 3.0 m/s のために最大射程・最大射高が低くなっていると考えられる。放射角度 45°よりも 35°の最大射程が長いことから、放射角度を大きくすると風の影響を受け易くなることがわかった。水と泡を比較すると、放射角度 35°ではあまり変化が見られないが、角度や圧力を大きくすると 10～20 m の差が現れる。これは、泡消火剤が空気を巻き込んで発泡することにより、粒の直径が大きくなるため、水よりも泡の方が空気抵抗の影響を受け易くなるためであると考えられる。また、同様の放射条件であっても、10～20m の誤差が生じるのは、実施される放射試験ごとに放射ノズルや送水ポンプが異なるためである。従って、シミュレーションと比較する際、放射軌跡の差異が 20% 以下であるなら、十分近似していると考えて問題ないといえる。

シミュレーションで粒子を放射する場合、粒子に与える初速度の大きさを考慮する必要がある。そのため、実規模放射試験において、放射速度を求めなければならない。放射速度は、ノズル開口面積と放

射流量から求めることができるが、ノンアスピレート型ノズルは複雑な形状をしているため、正確な面積を測ることができず、放射速度を求めることができない。そこで、空気抵抗の無い場合の斜方投射の式に最大射高を代入して、初速度を逆算して近似値を求めた。表 1.4.7 から、放射速度を算出した結果を表 1.4.8 に示す。

表 1.4.8 より、放射圧力 0.7 MPa の時の放射速度は 36～40 m/s となることが分かった。ベルヌーイの式  $v = \sqrt{2\Delta P / \rho}$  ( $\Delta P$  : 圧力差、 $\rho$  : 水の密度)<sup>36)</sup>を用いて、圧力から流速  $v$  を求めると、圧力 0.7 MPa で 37.4 m/s、圧力 0.8 MPa で 40.0 m/s、圧力 0.9 MPa で 42.4 m/s となり、実験値との再現性が見られる。従って、実規模泡放射試験のシミュレーションを作成する場合、ベルヌーイの式により求めた放射速度を用いても誤差は小さいと考えられる。

表 1.4.8 放射速度算出結果（放射流量：20,000 L/min）

	放射圧力 [MPa]	放射角度 [°]	最大射高 [m]	放射速度 [m/s]	試験場所
泡	0.7	35	29	40.8	愛知
			20	33.7	新潟
		45	39	38.5	新潟
	0.8	35	29	40.9	米国
	0.9	35	24	36.9	新潟
水	0.7	35	20	33.7	茨城
			27	39.4	米国
			26	38.6	鹿児島
		45	30	33.7	茨城
			34	36.0	鹿児島
	0.8	35	30	41.6	米国
	0.9	35	30	41.6	米国

### (3) 放射挙動の解析

放射試験の動画や画像により、放射挙動の解析を行った。図 1.4.5 に実大規模水放射試験の写真（鹿児島）、図 1.4.6 に実大規模泡放射試験の写真（新潟）を示す。図 1.4.5 において、ノズルから放射された水は、ノズル径の太さの棒状となった水塊が飛んでいく様子が分かる。水塊の表面部分から徐々に水粒が分裂していき、最大射高付近では水粒が瀑状になって落下していた。最大射程付近では、横縞状の模様を描きながら直径 1～7 mm の雨粒のようになって床面に降り注いでいた。図 1.4.6 の泡放射時には、瀑状になって落下する泡粒が多く見られた。最大射程付近では、網目状のような複雑な形状で落下しており、水の場合に比べばらついているように見えた。水の場合も泡の場合も、空気抵抗で塊が分裂していく様子と、後ろの粒が前の粒を追い越して飛んでいく様子が見られた。全体の放射軌跡も水と泡では、あまり違いは確認できなかったが、横風や向い風がある場合に顕著な違いが現れると考えられる。シミュレーションと比較する場合は、このような放射挙動が現れるかに注意して解析を行った。



図 1.4.5 実大規模水放射試験の写真（鹿児島）



図 1.4.6 実大規模泡放射試験の写真（新潟）

#### (4) 泡消火剤の発泡性能

泡放射プログラムを作成する際、泡消火剤の発泡は、粒子の物性値を変化させることで表現している。特に発泡倍率については、放射挙動に大きく影響を与えるため、実射の発泡作用に基づいた設定を行う必要がある。表 1.4.9 には、実機実泡放射試験で測定された泡消火剤の発泡倍率及び25%還元時間を示す。千葉県で行われた中規模泡放射試験において、発泡倍率は、放射角度や放射圧力が大きいほど高くなる傾向が見られた。これは、泡消火剤が周囲の空気を取り込んで発泡するため、滞空時間が長くなるほど発泡し易くなるためであると考えられる。そこで、放射条件により発泡倍率がどの様に変化するかを考察した。

表 1.4.9 発泡倍率及び 25%還元時間の比較

放射流量 [L/min]	放射圧力 [MPa]	放射角度 [°]	最大射程 [m]	最大射高 [m]	発泡倍率 [-]	25%還元時間 [s]	試験 場所
20,000	0.7	35	125	28.9	8.9	144	愛知
			106	20.0	9.52	88	新潟
		45	106	38.7	8.00	78	
	0.8	35	93	29.0	6.26	123	米国
	0.9	35	106	23.8	8.94	97	新潟
25,000	0.7	35	130	31.5	5.9	108	愛知
30,000	1.0	35	140	36.2	6.2	115	

表 1.4.9 より、大規模泡放射での発泡倍率は、放射流量・放射圧力・放射角度・射程・射高などの放射条件にほとんど依存しないことが分かった。25%還元時間においても同様の結果であり、発泡倍率との関連性も見られなかった。実施された試験場所ごとに放射ノズルや泡消火剤の種類が異なるため、それぞれの試験場所ごとに比較を行ったが、特に関連性はなかった。発泡倍率は、落下した直後の泡を回収して測定しているため、最大射程が 100 m 以上の試験規模になると、最大射高に 5~10 m 以上の差が生じ、落下するまでの時間差や、床面との衝撃などの影響で値に法則性がなくなると考えられる。泡消火剤の規格省令において、「水成膜泡の発泡倍率は 5 倍以上」<sup>37, 38)</sup>と規定されていることから、発泡倍率を一定値にすることは難しい。よって、プログラムに用いる発泡倍率は、放射条件に関係なく 5~10 倍の範囲で発泡するように設定した。

#### 1.4.4 タンク全面火災時における消火支援用浮子の開発

##### (1) 研究目的

タンク火災を消火するためには、泡消火剤で油面全体を覆うことで酸素の供給を絶ち、窒息消火を行うことが最も有効な方法である。しかし、高さ 20 m 以上の大型の石油タンクに泡を投入し、消火することは非常に困難である。その要因として、火炎からの上昇気流や自然風の影響により、放射した泡が油面まで到達できないこと、投入時の油面との衝撃で消泡してしまうことなどが挙げられる。そこで、消火支援用浮子（Flame Suppression Ball、以下 FSB）と呼ばれる不燃性の浮力体を油面全体に浮かべることで、可燃性液体の揮発を阻害し、火災の燃焼を抑制する。それにより、上昇気流の影響が小さくなり、泡の投入効率が上昇すると考えられる。また、FSB が泡の受け皿となることで、油面との衝撃を緩和し、消泡し難くなるといった効果も期待できる。本研究では、FSB による燃焼抑制効果を実験的に評価するものである<sup>39)</sup>。

##### (2) 研究概要

燃焼実験は、円形貯蔵タンクをモデルとして、 $\phi$  1.0 m×高さ 0.5 m のオイルパンを用いて行った。油面の嵩増し及び熱によるオイルパンの変形を防止するため、水 94.2 kg（オイルパン底から 0.12 m の高さ）をオイルパンに注入し、その上に燃料である n-ヘプタン 2.7 kg（水面から 0.005 m）を注入した。その後、FSB を油面全体に浮遊させた状態で着火し、燃料の重量減少、火炎高さ、燃料内の温度分布を測定した。図 1.4.7 に実験の概要図を示す。重量減少は、オイルパンの下に定格容量 1 kN のロードセル四つで測定し、火炎高さは、ビデオカメラで撮影した動画から 2 秒毎に読み取った火炎高さの移動平均をとった。温度分布は、オイルパン内にシース型熱電対を底面から 0.1 m、0.12 m、0.125 m、0.14 m、0.17 m、0.19 m の計六本設置して測定した。

実験には、二種類の FSB を使用した。一つは、図 1.4.8 に示すようなガラス製の中空球で、こちらを GB と呼称する。もう一つは、GB にアルミホイルを巻きつけ、表面を鏡面仕上げに加工したもので、GB-AI と呼称する。これは、火炎からの放射熱を反射し、燃料内の温度上昇を抑制させるために行った。図 1.4.9 に GB-AI の写真を示す。二種類とも直径約 0.05 m、重量約  $5 \times 10^{-3}$  kg、見かけ比重 0.09 であった。図 1.4.10 のように GB と GB-AI をそれぞれ油面全体に浮遊させた場合と、比較のために FSB の無い状態で燃焼実験を行い、燃焼抑制効果を評価した。尚、FSB は油面から約 0.026 m 浮き出た状態で浮遊していた。



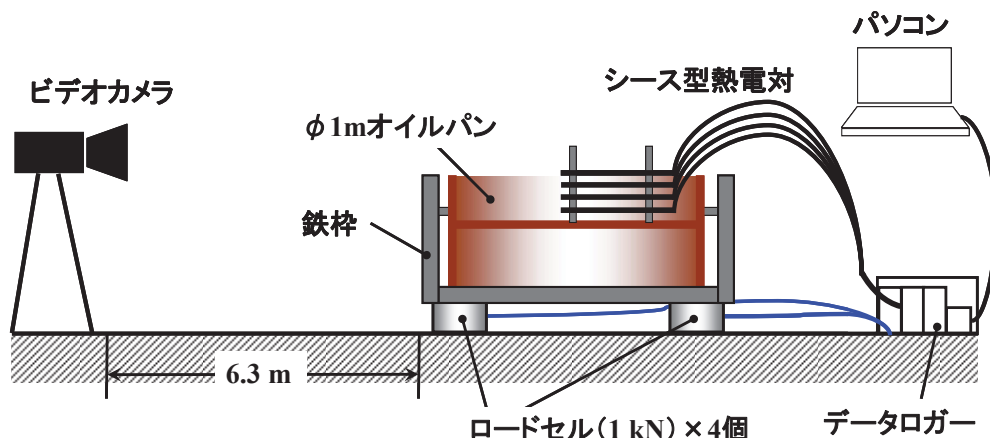


図 1.4.7 燃焼実験概要図

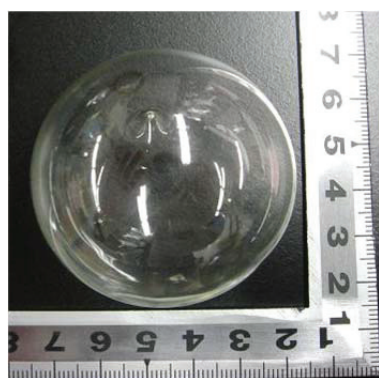


図 1.4.8 GB の概観図

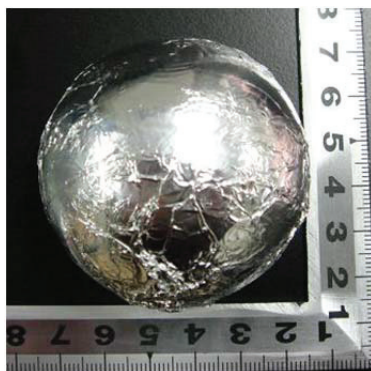


図 1.4.9 GB-AI の概観図



図 1.4.10 FSB 投入時の油面

### (3) 実験結果

図 1.4.11 は、着火から 120 秒後の火炎の様子を示しており、左図が FSB なし、右図が GB 及び GB-AI を油面全体に浮遊させた時のものである。FSB なしの場合には、火炎高さが 2 m 以上になっているが、FSB を投入することで、火炎高さが 1/2 以下に小さくなっていることが分かる。

図 1.4.12～図 1.4.15 は、それぞれ燃料の重量変化、発熱速度、火炎高さ、燃料内（オイルパン底面から 0.12 m の位置）の温度推移を比較したグラフを示す。また、測定したデータからそれぞれ重量減少速度、平均発熱速度、平均火炎高さ、昇温速度を算出した結果を表 1.4.10 にまとめる。これらは燃焼の度合いを評価するための指標であり、値が大きいほど燃焼が激しく、逆に値が小さくなるほど燃焼が抑制されているといえる。尚、重量減少速度、昇温速度は変化が一定になった区間でのグラフの傾きを求めた値であり、発熱速度、火炎高さは燃焼が定常となった区間の平均をとったものである。表 1.4.11 は、GB と GB-AI の各測定項目における燃焼抑制率を示す。これは、表 1.4.11 の値において、GB と GB-AI をそれぞれ FSB なしと比べた時の燃焼抑制した割合を示す。

FSB なしの場合、着火後 30 秒で火炎の高さが最大（約 2 m）となり、そのまま定常状態を保ちながら燃料が燃え尽きるまで燃焼していた。燃焼時間は約 200 秒であった。GB を投入した場合、着火から 120 秒までは GB-AI と同じ燃焼抑制効果があったが、120 秒後には FSB なしと同じ燃焼状態となった。これは 120 秒経過時に半分以上の GB が熱膨張により破裂し、油面が露出したことで燃焼抑制効果が失われた

と考えられる。図 1.4.14 の火炎高さのグラフにおいて、GB の火炎高さが 120 秒付近で激しく変化しているのは、GB の破裂によるものである。しかし、GB の表面に鏡面加工を施した GB-AI では、熱膨張による破裂は生じず、燃料が燃え尽きるまで燃焼抑制効果が持続していた。燃焼時間は、GB が 420 秒、GB-AI が 840 秒で 2 倍以上の遅延が見られた。重量減少速度、平均発熱速度、平均火炎高さ、昇温速度においても、GB が 10～22%、GB-AI が 60～85%の燃焼抑制効果が見られた。FSB を投入することで燃焼抑制効果が得られる要因としては、油面が FSB で覆われることで大気中に露出する面積が小さくなり、油の揮発を阻害したこと、そして FSB の油面から浮き出た部分が断熱層となり、火炎からの放射熱による油の温度上昇を防いだことが考えられる。

GB と GB-AI の燃焼抑制率を比較すると、GB よりも GB-AI の方が 50～60%高いことがわかる。これは、GB-AI の表面が鏡面仕上げになっているため、燃焼時に火炎からの放射熱を反射したことにより、GB-AI の熱膨張による破損を防ぎ、燃料の温度上昇を GB よりも抑制したためであると考えられる。さらに、今回は GB に鏡面加工を施す方法として、アルミホイルで GB を包み込むように巻きつけたため、GB が破裂してもガラスの破片が周囲に飛び散ることはなかった。

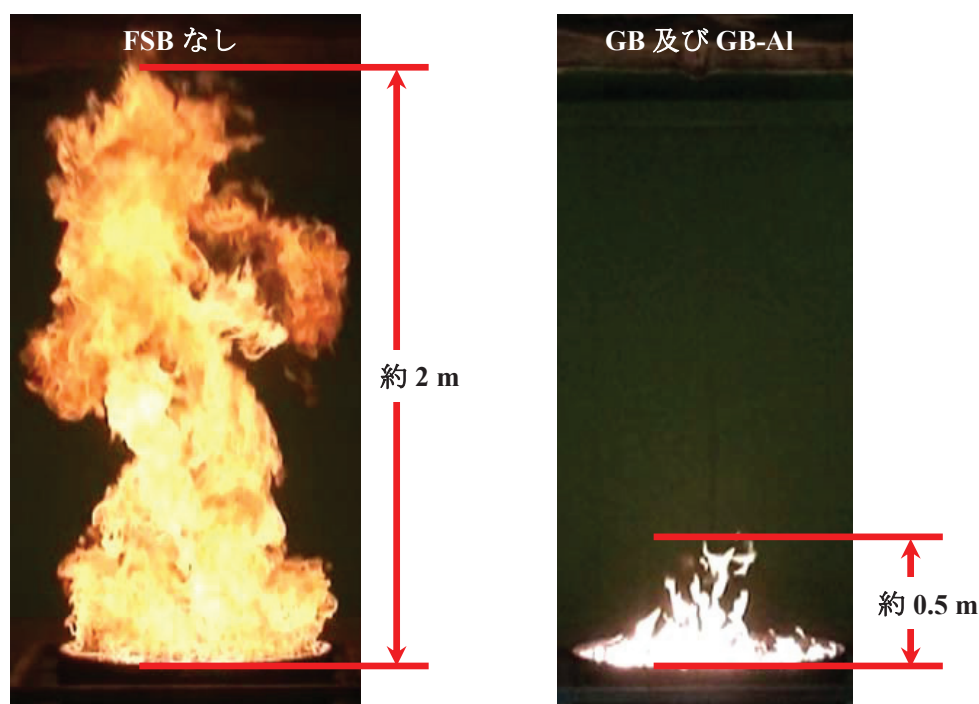


図 1.4.11 実験時の様子（左図：FSB なし、右図：GB 及び GB-AI）



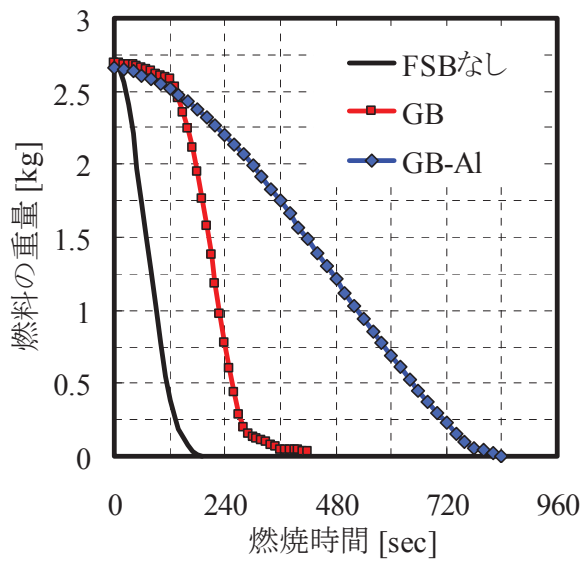


図 1.4.12 燃料の重量変化

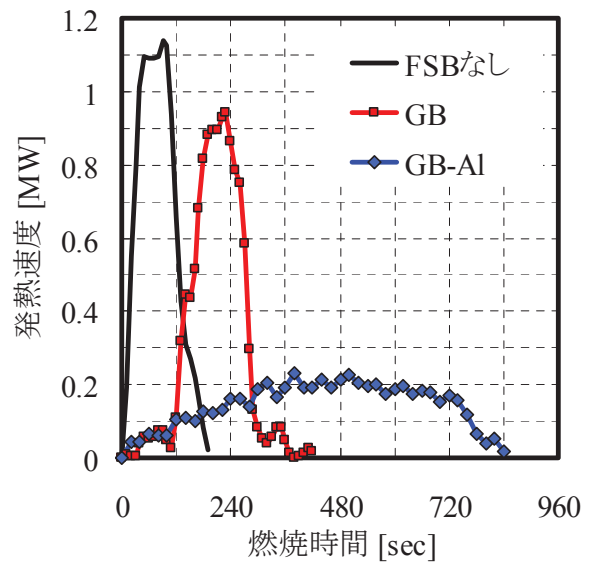


図 1.4.13 燃焼時の発熱速度

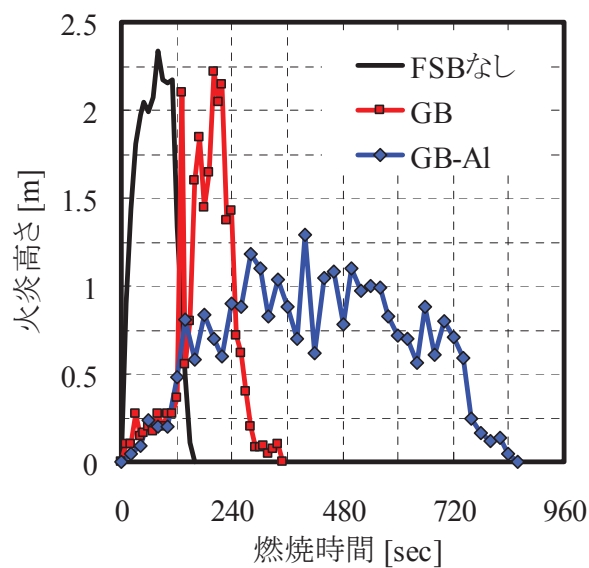


図 1.4.14 燃焼時の火炎高さ推移

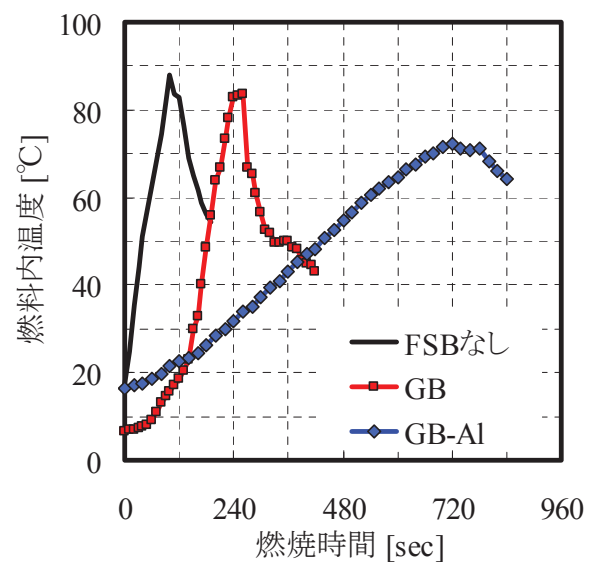


図 1.4.15 燃料内の温度推移

表 1.4.10 燃焼実験測定結果

	重量減少速度 [kg/sec]	平均発熱速度 [MW]	平均火炎高さ [m]	昇温速度 [°C/sec]
FSB なし	0.019	1.04	2.08	0.691
GB	0.018	0.81	1.56	0.585
GB-AI	0.004	0.16	0.75	0.090

表 1.4.11 GB と GB-AI の燃焼抑制率 (FSB なしとの比較)

	各測定項目における GB と GB-AI の燃焼抑制率 [%]			
	重量減少速度 [kg/sec]	平均発熱速度 [MW]	平均火炎高さ [m]	昇温速度 [°C/sec]
GB	8.3	22.0	25.2	15.4
GB-AI	77.8	84.7	63.8	87.0

#### (4) 結論

GB 及び GB-AI を油面に投入することで、燃焼時間、重量減少速度、発熱速度、昇温速度の遅延効果が得られ、火炎高さも 1/4 に抑制されることがわかった。燃焼抑制率は、GB が 10～22%、GB-AI が 60～85% であった。GB-AI のように表面を鏡面加工することにより、燃焼抑制率は GB と比べ 50～60% 上昇することがわかった。以上より実際のタンク全面火災時、GB-AI を油面に投入することで、火災の燃焼が抑制し、燃焼時間が遅延するため、隣接タンクへの延焼防止や泡消火剤の投入効率の上昇などの消火支援を行うことが期待できる。

今後の課題として、GB-AI よりも効果のある FSB の開発（形状、大きさ、材質、コーティング剤の塗布等）、効果的な鏡面加工の方法、タンク油面への FSB 投入方法を検討すること。また、火災の途中で投入した場合にも同様な燃焼抑制効果が得られるか、FSB 投入後に泡消火剤を投入した場合の液面展開性、火災規模の拡大、燃焼時間の長時間化に伴う FSB の耐久性などを実験により検証することが必要である。

### 1.5 本論文の構成

本論文の構成フローチャートを図 1.5.1 に示す。本論の最終的な目標は、石油タンク火災の消火を支援することである。そのための手法として、大容量泡放射砲に関する研究と火災の燃焼抑制に関する研究の二つに分けて取り組んだ。本論では、前者についての研究が主であり、小型模型を用いた放射実験による実験的研究と MPS 法を用いた数値シミュレーション解析の 2 つの方面から研究を進めた。実験的研究では、放射挙動を把握するとともに、最大射程及び最大射高の予測式を構築し、流量規模の異なる放射軌跡に相似則が成立するかを検証した。シミュレーション解析では、モデルの妥当性の検証と実規模のタンクへの放水を想定した計算を行った。

以上の内容を、章ごとに次のように分けて記述した。第 1 章序論では、研究の背景として石油タンク火災と大容量泡放射について説明を行い、放射軌跡・放射特性・放射規模の定義付けをした上で研究目的と本研究に関する既往の研究を示す。第 2 章では、大容量放射砲の小型模型による実験的研究として、シミュレーションモデルの有用性を定量的に評価するための実験データの取得を行った結果を、小規模・中規模・大規模の実験毎に分けて記述する。第 3 章では、放射性能を表す指標として重要な最大射程及び最大射高について、物理的機構に基づいた予測式を構築し、流量規模の異なる放射における相似則の成立の検証と消防活動時の指標を作成した。また、床面に落下した水（泡消火剤）の分散分布について、正規分布や Rosin-Rammler 分布を用いて規格化を行った結果を記述する。第 4 章では、MPS 法を用いて構築した放射シミュレーションモデルの内容を説明し、シミュレーション結果と実験結果の比較

により、モデルの妥当性を検証した結果を記述する。最後に、第 5 章で総括と今後の課題を記述して、本論のまとめとする。

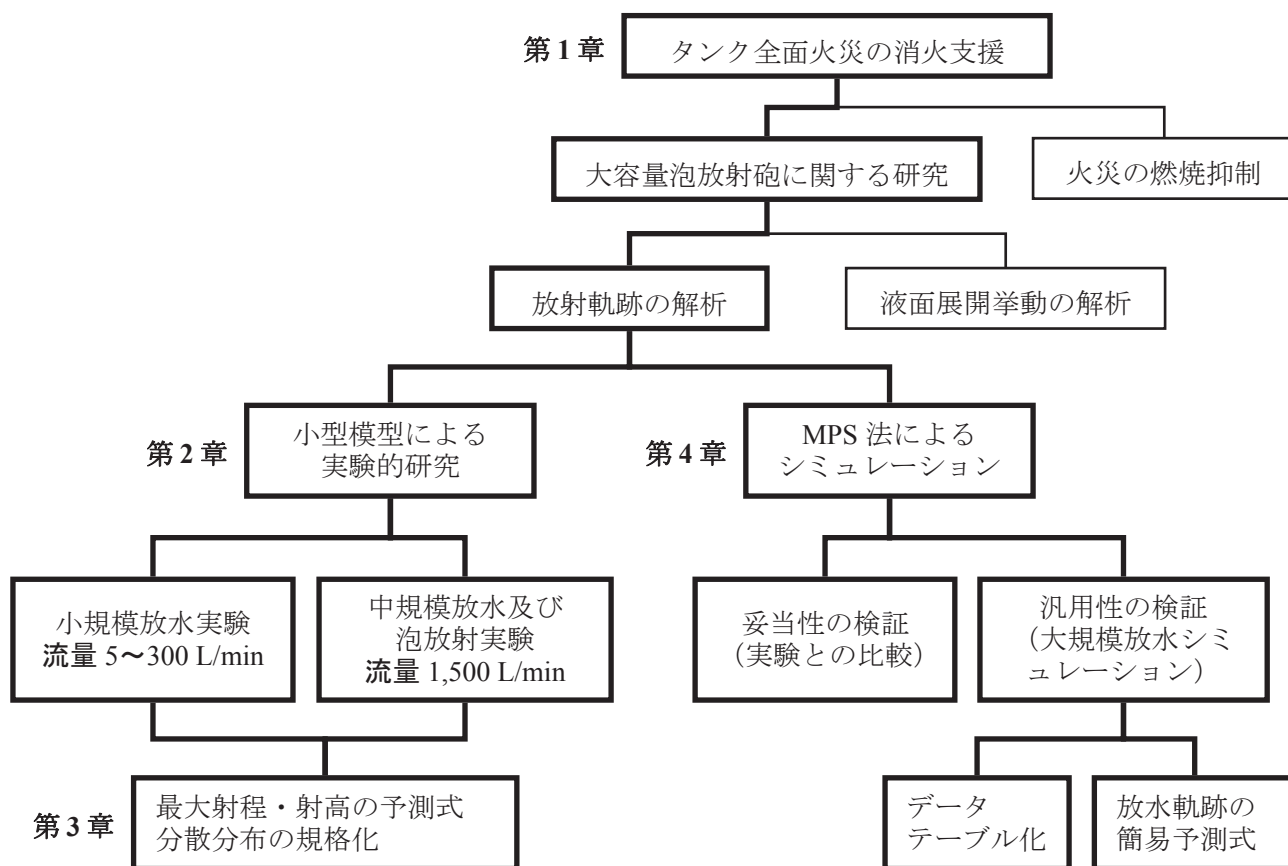


図 1.5.1 本論の構成チャート図

## 第2章 大容量放射砲の小型模型による実験的研究

### 2.1 屋内小規模放水実験

#### 2.1.1 実験目的

棒状放水時におけるシミュレーションの妥当性を検証するためには、射程や射高などの放射軌跡や放射した水の分散パターンなどを測定する必要がある。しかし、放水流量が 1,000 L/min 以上になると、最大射程が 50 m 以上の規模になるため、気象条件の変化に影響を受けやすくなり、着水量の定量的測定実験は容易に実施することができず、放水軌跡や分散分布の正確な測定も困難となる。そこで、放射流量が小さい規模の放水実験を実施し、放射された水粒挙動の解析、放射特性の評価を行った。特に床面に落下した水の分散分布を測定することで、放水性状を把握し、その測定手法を確立させることで、大規模実験時の測定手法に生かすことができると考えられる。また、同条件下におけるシミュレーション結果と定量的な比較を行うためのデータ取得を目的とした。さらに、実規模放水試験との相似則を求めるための足掛かりとなることを期待し、本実験を実施した。

#### 2.1.2 実験概要

実験は、風による影響を無くするため実験棟内で行った。放水には、散水用放水ノズル、圧力計、コンプレッサをホースでつなぎ、貯水容器（容量 20 L）から給水する装置を用いた。放水流量は、貯水容器内の水の重量変化から測定した。放水ノズルの高さは、床面から約 450 mm の位置に固定し、放水角度のみ変えられるようにした。実験は、図 2.1.1 に示す放水ノズルを用い、放水形状を棒状にして行った。ノズル径は  $\phi 6.1$  mm、ディフレクタ径は  $\phi 4.9$  mm であり、隙間の面積（ノズル開口面積）を計算すると  $10.4 \text{ mm}^2$  であった。

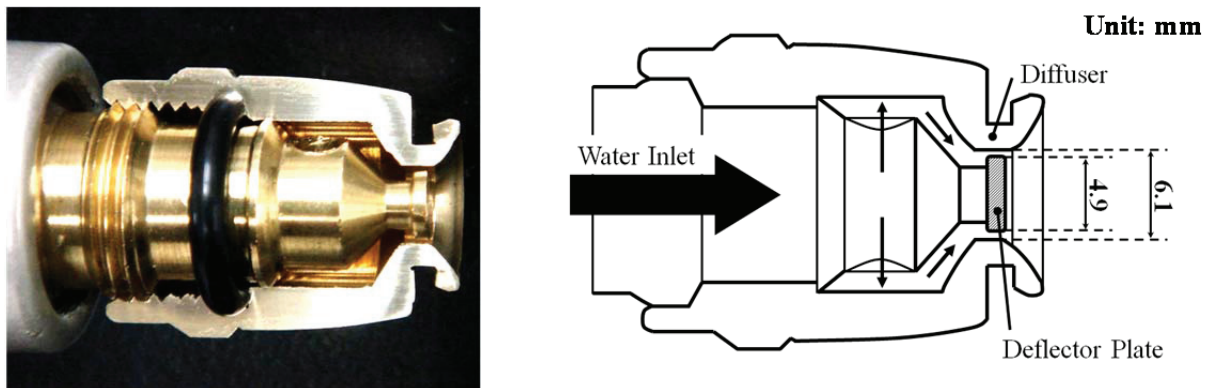


図 2.1.1 放水ノズルの断面図及び概略図

放水流量は、4.7 L/min（放水圧力：0.08 MPa）及び 3.7 L/min（放水圧力：0.05 MPa）の棒状放水とした。また、放水角度を 25°、35°、45°、55°、65°に変えて放水を行い、それぞれの条件において 3～5 回測定を行った。最大射程及び最大射高は、スケールを指標とした目視及び放水軌跡を撮影した画像から計測した。水の分散分布は、図 2.1.2 に示すような一区画の大きさが 65×65 mm の格子状に組み合わせた枠内に、水捕集容器（開口部 60×60 mm、高さ 100 mm）をはめ込んだ装置を床面に設置した。放水された水が枠内に落下し、容器内に溜まった水の重量を測定することで水の分散分布を数値化した。影付のマ

スは、捕集容器を設置した場所を示し、空白部分はその周囲にある水量データの平均値をとった。測定範囲は 520×3640 mm の長方形で、長辺を放水方向となるように設置し、放水後の主たる着水域 (Footprint あるいは Landing Zone) が枠内に納まるように調整した。測定時間は、水捕集容器の限界値から 120 秒間とし、測定終了後に容器内に溜まった水の重量をそれぞれ測定することで落下した水の分散分布を数値化し、等量線グラフを作成した。

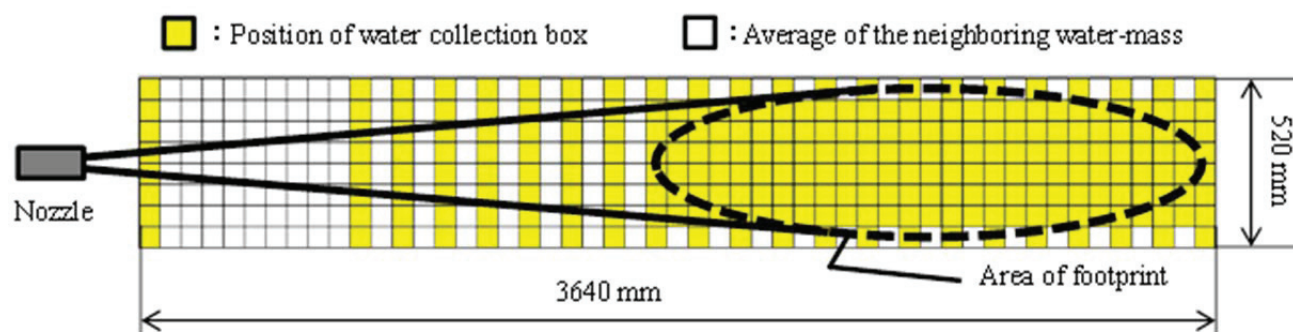


図 2.1.2 水の分散分布測定用の水捕集容器設置位置

### 2.1.3 実験結果及び考察

#### (1) 流量 4.7 L/min（圧力 0.08 MPa）

放射圧力 0.08 MPa の放水実験において、各放射角度による結果を以下に記述する。図 2.1.3 から図 2.1.7 に各放射角度における放水状況の写真を記載する。図中のグラフは、フットプリント中心軸上の分散分布密度をプロットしたものである。また、図 2.1.8 に床面に落下した水の分散分布の等量線図を示す。グラフ中の数値は、水捕集容器の開口面積と放水時間で割った値を用い、消防で一般的に用いられる一分間当たりの値とした。なお、単位に L を用いているが、消防では [g] や [kg] よりも [mL] や [L] を用いるのが通例であるため、本論でもその表記に従うこととする。

表 2.1.1 には、射軌跡及び水の分散分布の測定結果を示す。表中の放射流量は、放射前後の貯水容器の重量変化から算出した値である。ここで、フットプリントの定義として、総放水量を測定領域内に配置した水捕集容器の個数（328 個）で割った値が約 30 g であるので、容器に入った水の重量が 30 g 以上の範囲をフットプリントとした。この値は測定領域に設置した水捕集容器 1 つ当たりが回収する水量の平均となることから、フットプリントは容器に入った水の重量が平均値以上の範囲であることが考えられる。従って、フットプリント内に到達した水量割合（フットプリント到達率）は、フットプリント内の水量合計値を水捕集容器で回収した全水量で割ることで求められる。この割合が大きいほど、水のまとまり性が良く、放射性能が良いと評価することができる。

図 2.1.9 及び図 2.1.10 には、フットプリントの中心を射程方向と射幅方向に通る列の水量の分散分布のグラフを示す。フットプリントの面積は、形状を楕円形と近似すると、図 2.1.10 からフットプリント長さ（長径  $a$ ）を読み取り、実測した射幅の値（短径  $b$ ）を用いると、楕円の面積公式（ $\pi ab/4$ ）で求めることができる。さらに、フットプリント到達量から求めた面積に対する相対分散分布密度を算出した。表 2.1.2 に、フットプリントの面積及び相対分散分布密度を示す。

図 2.1.8～図 2.1.10 より、容器に入った水量が最も多かったのは、放射角度 25° の時で、一つの容器に入った最大水量は 201 g であった。これは、回収量の約 2.8% にあたり、放射した水はバラツキが少なく、



一箇所に固まって落下していることがわかる。図 2.1.8 を見ると、フットプリントの形は、基本的に放射方向に長細い楕円形であるが、放射角度が大きくなるにつれ、その大きさに違いが現れる。表 2.1.2 において、フットプリントの面積は、放射角度 25°の時に極端に小さくなった。これは、フットプリント長さが最大射程に依存しているためであると考えられる。分散分布密度の値からも、放射角度の小さい方が、フットプリントの面積が小さくなり、水の分散性も抑制されバラツキが小さくなることがわかる。

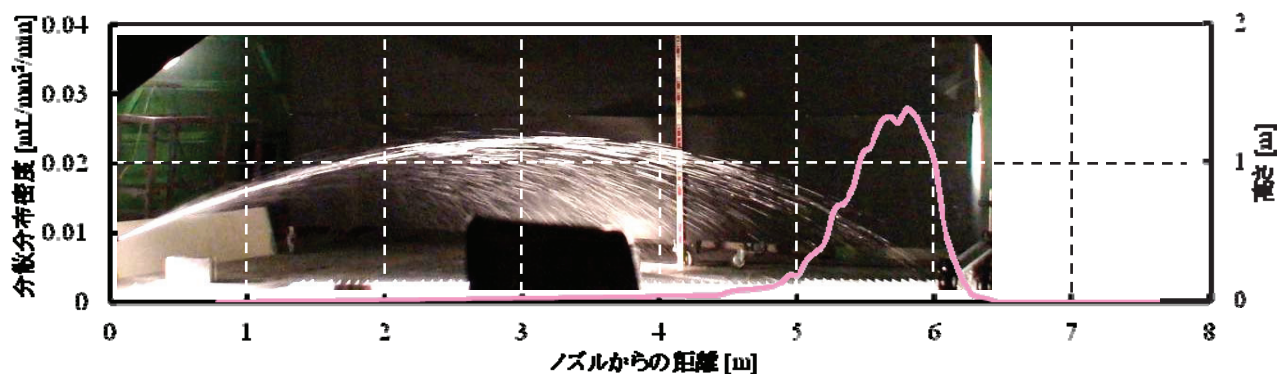


図 2.1.3 放射角度 25°における放水状況

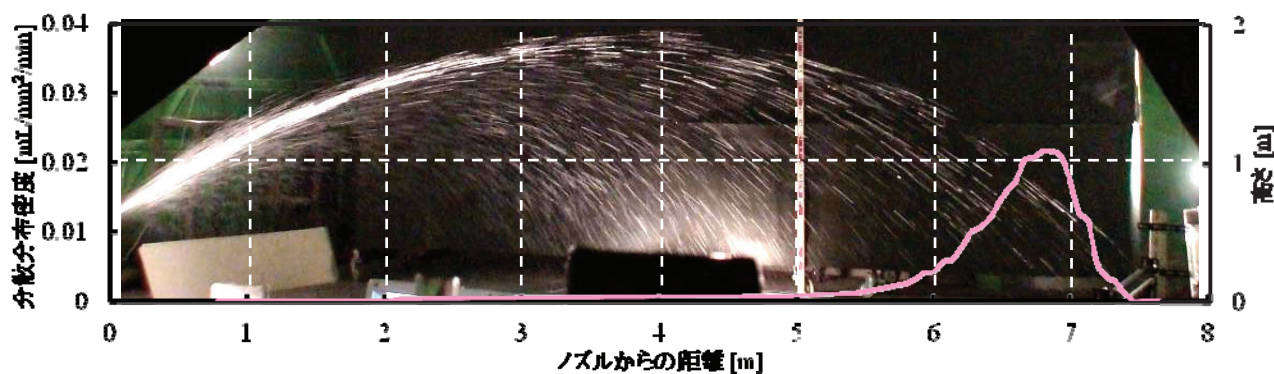


図 2.1.4 放射角度 35°における放水状況

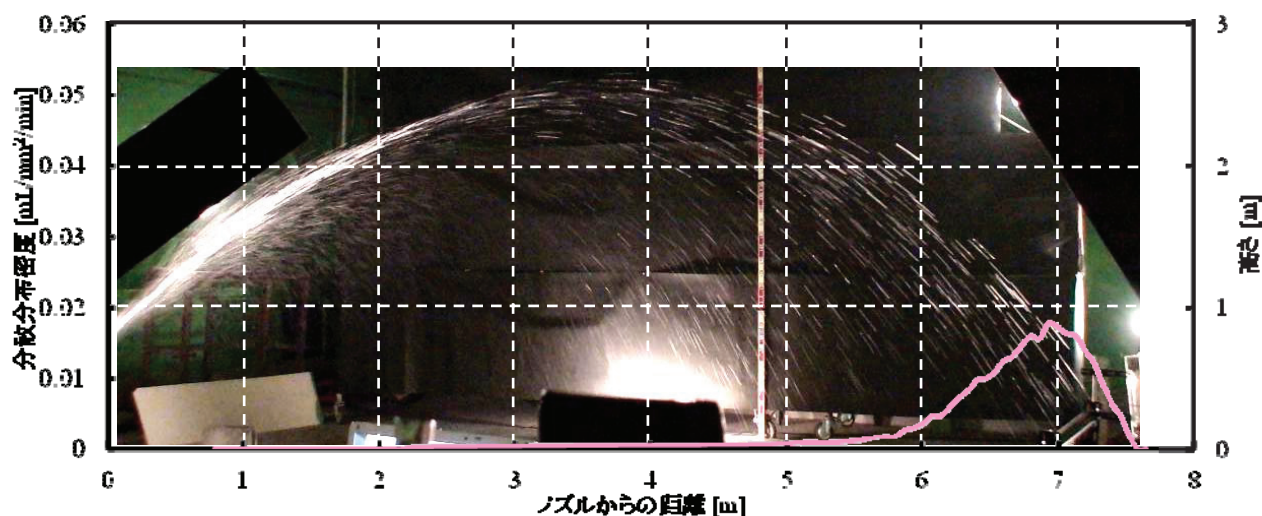


図 2.1.5 放射角度 45°における放水状況

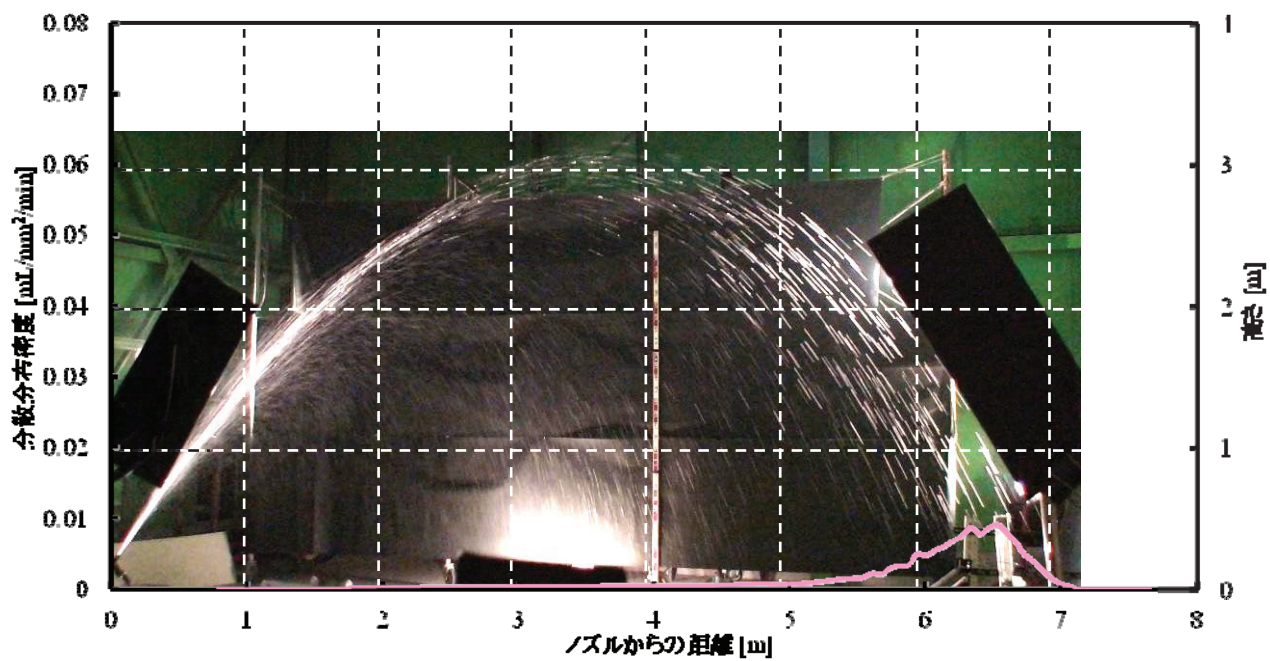


図 2.1.6 放射角度 55°における放水状況

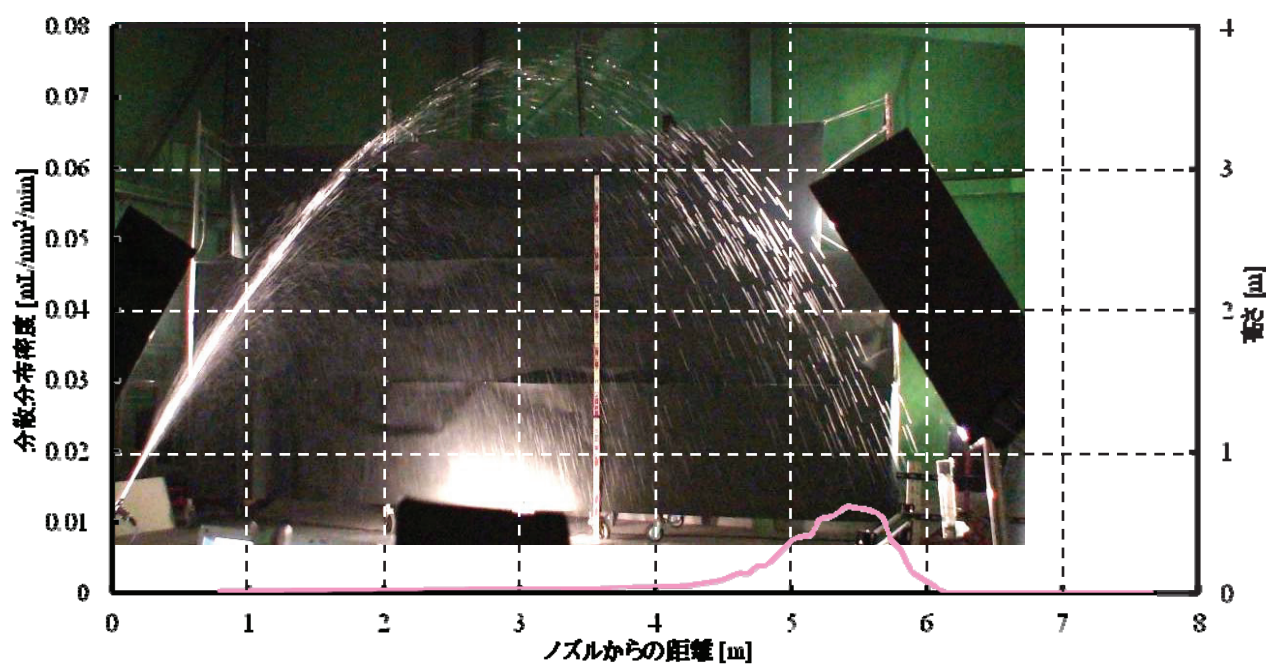


図 2.1.7 放射角度 65°における放水状況

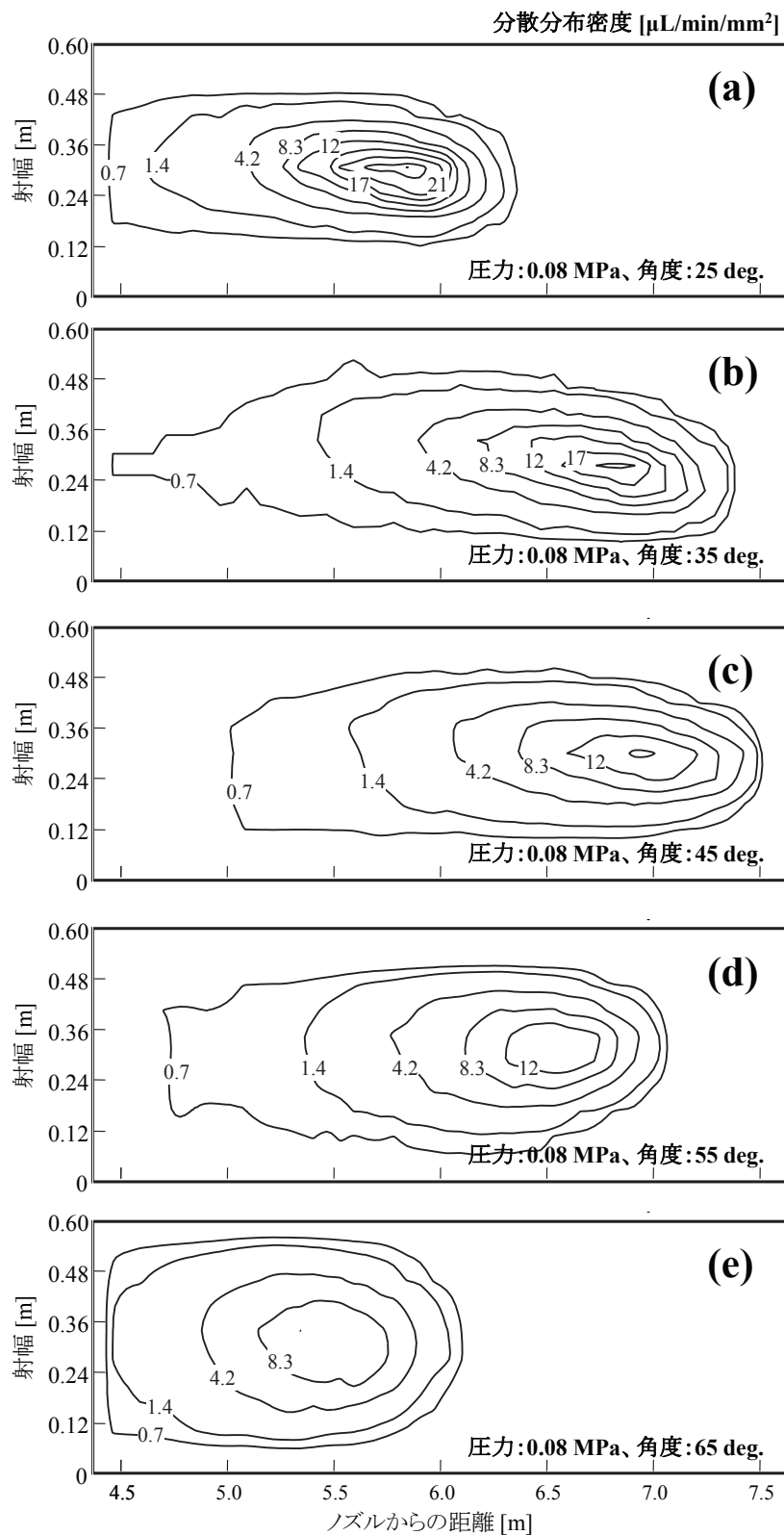


図 2.1.8 床面に落下した水量値の等量線図 (圧力 : 0.08 MPa)

(a) 角度 25°、(b) 角度 35°、(c) 角度 45°、(d) 角度 55°、(e) 角度 65°



表 2.1.1 放射軌跡及び水の分散分布の測定結果（圧力：0.08 MPa）

放射角度 [°]	最大射程 [m]	最大射高 [m]	射 幅 [m]	放射流量 [L/min]	フットプリント 到達率 [%]
25	6.20	1.06	0.17	4.75	64.63
35	7.20	1.80	0.24	4.78	61.00
45	7.35	2.70	0.27	4.66	59.13
55	6.93	3.35	0.33	4.65	57.59
65	5.90	4.00	0.41	4.73	53.53

表 2.1.2 フットプリントの面積（圧力：0.08 MPa）

放射角度 [°]	楕円の長径と短径 [m]		フットプリント の面積 [m <sup>2</sup> ]	相対分散分布密度 [L/m <sup>2</sup> /min]
	フットプリント長さ	射幅		
25	1.386	0.17	0.185	12.55
35	1.584	0.24	0.299	7.51
45	1.617	0.27	0.343	6.09
55	1.386	0.33	0.359	5.46
65	1.287	0.41	0.414	4.57

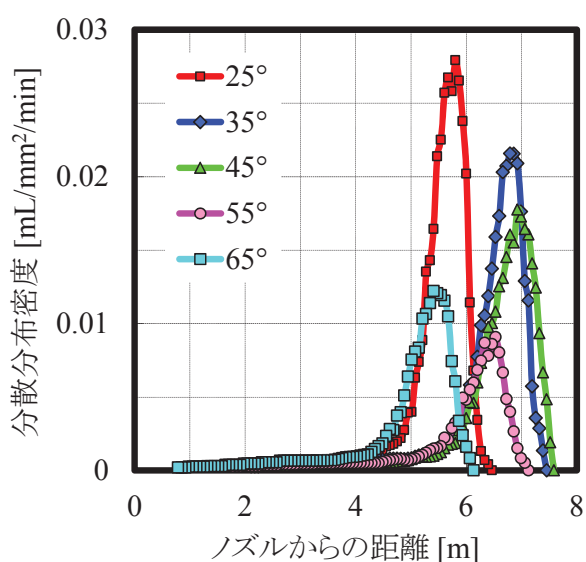


図 2.1.9 射程方向の分散分布（圧力：0.08 MPa）

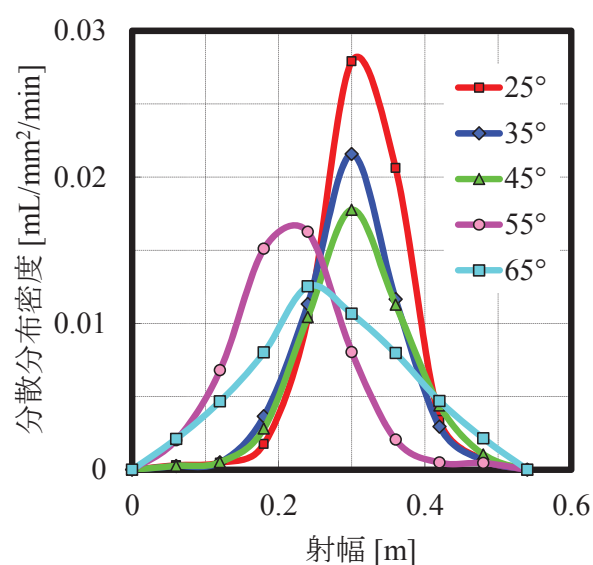


図 2.1.10 射幅方向の分散分布（圧力：0.08 MPa）

## (2) 流量 3.7 L/min (圧力 0.05 MPa)

放射圧力 0.05 MPa の放水実験の結果を 0.08 MPa の場合と同様に示す。図 2.1.11 から図 2.1.15 に放水状況の写真、図 2.1.16 に床面に落下した水の分散分布の等量線図を示す。表 2.1.3 には放射軌跡の測定結果、表 2.1.4 にはフットプリントの面積及び相対分散分布密度の算出結果を示す。また、図 2.1.17 及び図 2.1.18 には、それぞれフットプリントの中心を射程方向と射幅方向に通る列の水量の分散分布のグラフを示す。

放射圧力 0.05 MPa の場合、放射流量は約 3.7 L/min になり、120 秒間の総流量は約 7.36 L であった。最大射程は放射角度  $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$  の時に最大となり、最大射高は放射角度が  $10^{\circ}$  上がるごとに 0.4 m ずつ高くなり、射幅は 0.04 m ずつ広がることがわかった。それに伴い、フットプリントへの到達率は 1~2% ずつ減少する傾向が見られた。

図 2.1.13 及び図 2.1.14 より、容器に入った水量が最も多かったのは放射角度  $25^{\circ}$  の時で、1 つの容器に入った最大水量は 216.5g であった。これは、回収量の約 4.6% にあたる。図 2.1.15 の等高線グラフにおいて、放射角度  $65^{\circ}$  のフットプリントの中心形は、ほぼ円に近い形になっている。これは、放射圧力が低く放射角度が大きいため、 $x$  方向の速度成分が小さくなり、床面とほぼ垂直方向から落下するためであると考えられる。

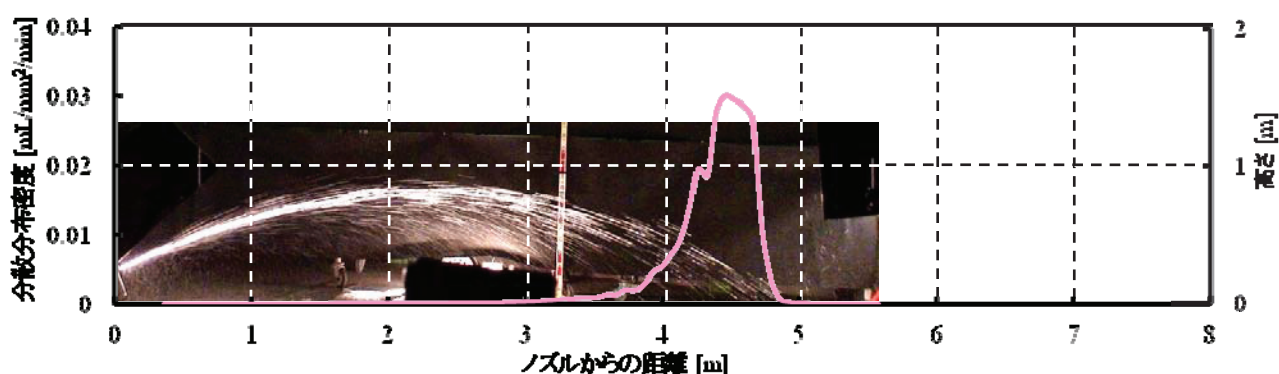


図 2.1.11 放射角度  $25^{\circ}$  における放水状況 (圧力 : 0.05 MPa)

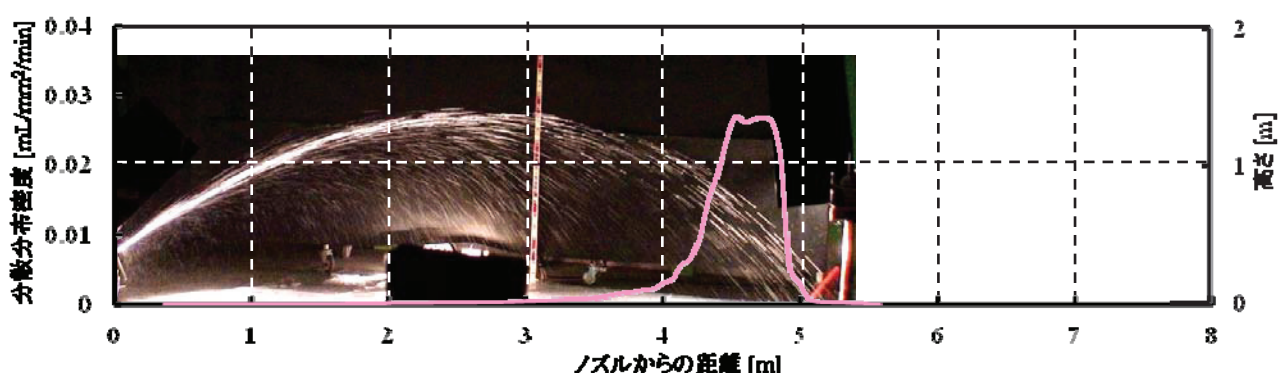


図 2.1.12 放射角度  $35^{\circ}$  における放水状況 (圧力 : 0.05 MPa)

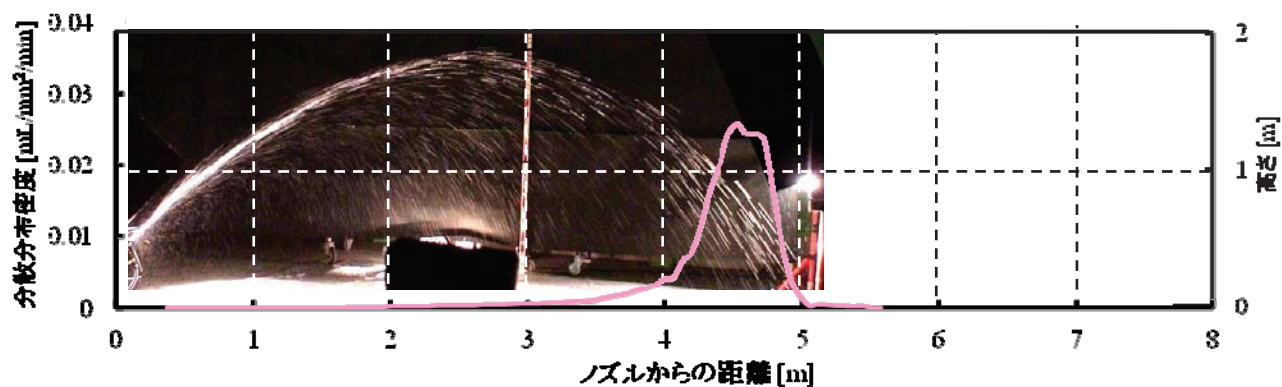


図 2.1.13 放射角度 45°における放水状況（圧力：0.05 MPa）

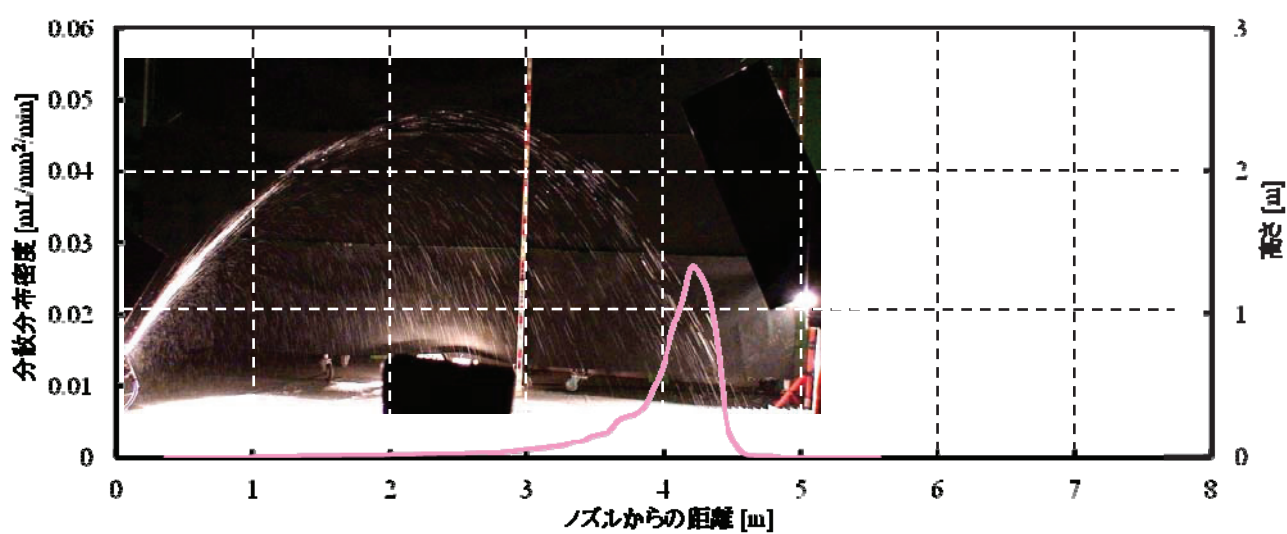


図 2.1.14 放射角度 55°における放水状況（圧力：0.05 MPa）

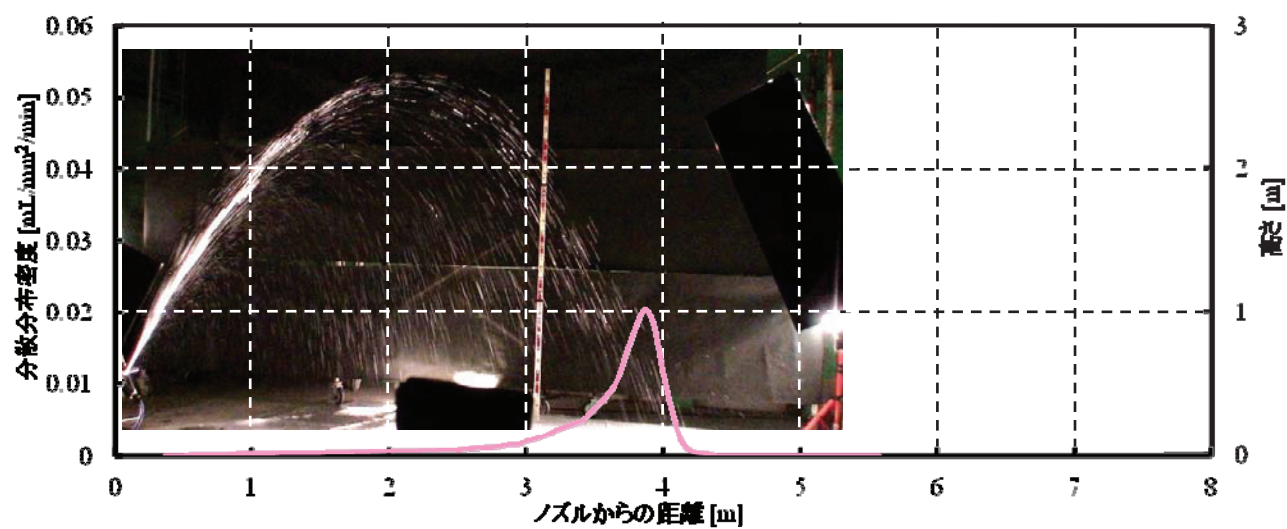


図 2.1.15 放射角度 65°における放水状況（圧力：0.05 MPa）

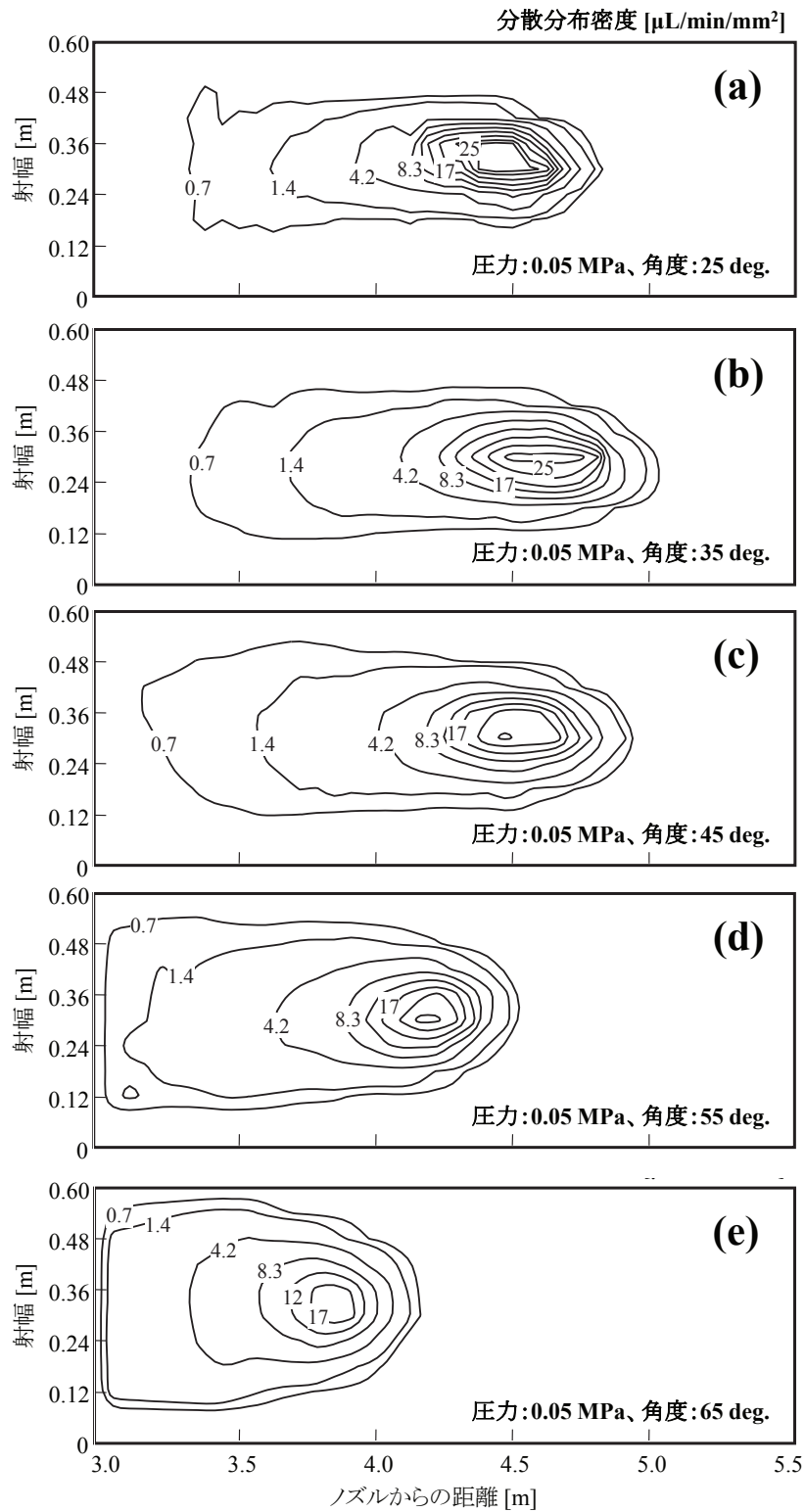


図 2.1.16 床面に落下した水量値の等量線図 (圧力 : 0.05 MPa)

(a) 角度 25°、(b) 角度 35°、(c) 角度 45°、(d) 角度 55°、(e) 角度 65°

表 2.1.3 放射軌跡及び水の分散分布の測定結果（圧力：0.05 MPa）

放射角度 [°]	最大射程 [m]	最大射高 [m]	射 幅 [m]	放射流量 [L/min]	フットプリント 到達率 [%]
25	4.89	0.97	0.12	3.68	73.30
35	5.32	1.50	0.16	3.70	72.68
45	5.30	1.98	0.19	3.70	71.34
55	4.86	2.50	0.23	3.70	69.54
65	4.09	2.83	0.29	3.62	67.23

表 2.1.4 フットプリントの面積（圧力：0.05 MPa）

放射角度 [°]	楕円の長径と短径 [m]		フットプリント の面積 [m <sup>2</sup> ]	相対分散分布密度 [L/m <sup>2</sup> /min]
	フットプリント長さ	射幅		
25	0.94	0.12	0.088	20.38
35	1.00	0.16	0.126	14.65
45	1.06	0.19	0.158	12.11
55	1.06	0.23	0.191	9.69
65	0.99	0.29	0.225	8.00

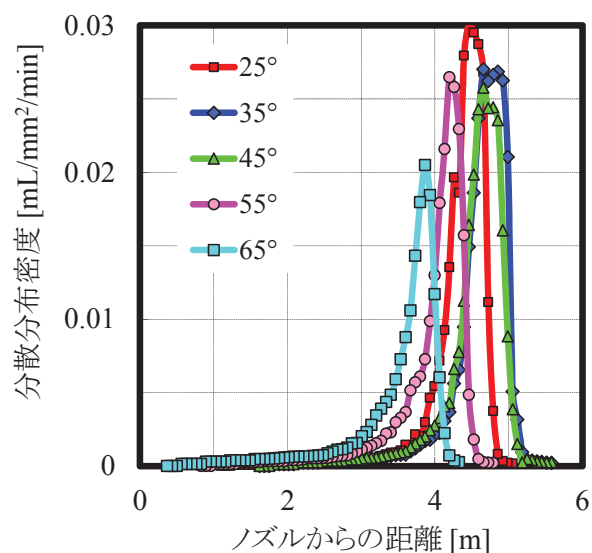


図 2.1.17 射程方向の分散分布（圧力：0.05 MPa）

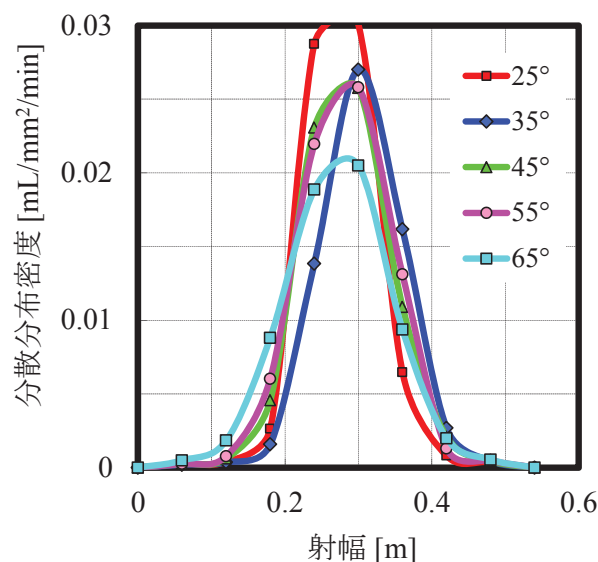


図 2.1.18 射幅方向の分散分布（圧力：0.05 MPa）



#### 2.1.4 まとめ

分散分布密度は、放射角度を大きくするにつれ 20～40%ずつ減少していくことが分かった。これは、放射角度の上昇に伴う最大射程あるいは最大射高の増加により、放射された水の滞空時間が長くなるため、空気抵抗の影響で水粒が分散しやすくなるためであると考えられる。放射圧力を 0.05 MPa から 0.08 MPa に増加させると、最大射程や最大射高は 40%上昇するが、その分射幅も広くなるため、分散分布密度は減少する。

測定したデータから放射特性の評価を行った結果、今回実施した放水実験においては、放射角度 35°～45°で放射した場合に最も放射性能が高くなることがわかった。しかし、より正確な放射特性評価を行うため、放射角度の増加幅を細かくし、水粒の落下速度や風の影響などの評価項目を追加する必要がある。

スケールを指標とした最大射程、最大射高、射幅の測定や、水捕集容器による分散分布密度の測定など、定量的なデータを取得することができた。これらのデータをシミュレーション結果と比較することで、粒子法の有用性を評価することができると考えられる。

実規模放水試験との相似則については、放射圧力のパターンを増やしたり、ノズル径を変化させたりするなど、放射条件を増やした上で考慮すべきであるが、今回の放水実験により、今後の方向性が見えた。また、小規模実験（放射流量 3.7～4.7 L/min）と大規模放水試験（放射流量 10,000～40,000 L/min）の中間の実験として、放射流量 100～1,000 L/min の放水試験を行う必要がある。

## 2.2 屋外小規模放水実験

### 2.2.1 実験目的

本実験では、小規模と中規模の中間的な位置付けとして、相似則のデータを補完すべく、流量 10～270 L/min、圧力 0.1～0.7 MPa、角度 35°～45°の屋外小規模放水実験を実施した。また、一般的な建物に設置されている消火設備を使用した放水実験を行い、実際の消火活動時における知見を深めることを目的とした。さらに、本実験は、流量 1,500 L/min の中規模放水及び泡放射実験の予備実験として実施され、放射軌跡の測定方法や水の分散分布測定時における捕集柵の配置方法を検討し、定量的なデータを取得できる実験方法を確立させた。

### 2.2.2 実験概要

実験は、容量 300 L の貯水タンクに水を溜め、窒素ガス 3 本で同時に加圧することでノズルから放水を行った。貯水タンクからは、 $\phi 25$  mm の高圧ホースでノズルに接続し、ノズルには圧力計を取り付けて放水圧力（ノズル圧力）を測定した。また、流量を変化させるため、表 2.2.1 に示すようなオリフィス径  $\phi 2.7$ 、6.0、9.4、13.0、14.2、18.8 mm のフラットスプレーノズル（スプレーイングシステムスジャパン製、VeeJet、スプレー角度 0°）を用い、ノズル先端を付け換えて実験を行った。ノズルは、床面からの高さ 0.45 m のノズル台に固定し、角度を変化させて放水を行った。

放水条件は、表 2.2.2 に示すように流量、圧力、角度を変化させた。Exp. 1、Exp. 2、Exp. 3 は、中規模及び大規模放水と比較するため、圧力を 0.7 MPa とし、流量の変化による放水軌跡を測定する目的で実施した。Exp. 3 及び Exp. 4 は、流量を 150 L/min とし、圧力の変化による放水軌跡を測定した。Exp. 6 は、一般的な屋内消火栓（1 号消火栓）を用いた放水実験であり、圧力は消防法の規定通りピトーゲージにて測定した。最大射程及び射幅は、デジタルビデオカメラで放水軌跡を撮影した画像から読み取った値とスケールを指標とした目視により、測定した値の平均を採った。最大射高においては、三角測量により測定した値と放水軌跡の撮影画像から読み取った値の平均値とした。また、今回は風速風向を正確に測定することが困難であったため、なるべく風の影響を受けないように風速 1.0 m/s 以下の時に測定を行った。

### 2.2.3 実験結果及び考察

表 2.2.1 に各放水条件における最大射程・射高・射幅の測定結果を示す。また、図 2.2.1 及び図 2.2.2 は放水実験の様子を示し、代表として Exp. 2-1、Exp. 3-2、Exp. 4-1、Exp. 5-1 を記載する。どの放水条件においても、最大射高までは水塊が棒状にまとまって飛翔しており、その後水粒に分裂して落下していることが分かる。空気抵抗の無い場合、放水軌跡は放物線を描くため、放水圧力（放水速度）が大きくなるほど、射程・射高は大きくなる。そのため、図 2.2.1 (a) 及び図 2.2.1 (b) に示すように圧力が一定であれば、流量の大きい方が空気抵抗の影響を受け難く、放物線に近い軌跡を描くため、射高が高く、射程が長くなる。他方、流量が一定である場合には、圧力の上昇に伴い射程・射高が大きくなるが、ある圧力値以上になると射程がほとんど伸びなくなる。これは、図 2.2.1 (b) 及び図 2.2.1 (c) に示すように圧力が上昇するにつれ、飛翔中に水塊が分裂し易くなり、空気抵抗の影響を大きく受けるためである。図 2.2.1 (c) 及び図 2.2.1 (d) においては、流量が 50 L/min 増加しているにもかかわらず、圧力が 0.1 MPa 低下したことで、射程が約 1.5 m 短くなっており、射程は圧力と流量の兼ね合いに大きく左右されることが分かる。

表 2.2.1 ノズル外観写真

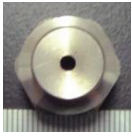
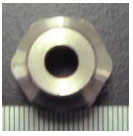
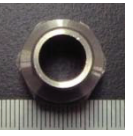
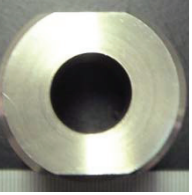
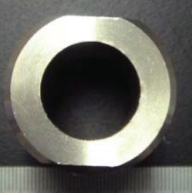

ノズル径 [mmØ]	2.7	6.0	9.4	14.2	18.8	13.0
流量 サイズ [L/min]	20	100	250	570	1,000	500
ノズル 外観						

表 2.2.2 各放水条件における最大射程・射高・射幅

Exp.	ノズル径 [mmØ]	流量 [L/min]	圧力 [MPa]	角度 [°]	最大射程 [m]	最大射高 [m]	射 幅 [m]
1-1	2.7	12	0.7	35	9.5	5.8	3
2-1	6.0	60	0.7	35	20.0	7.5	2.6
2-2				45	20.2	10.4	3
3-1	9.4	120	0.45	35	23.3	7.6	1.8
3-2		150	0.7	35	21.0	7.7	3.0
3-3				45	22.3	11.5	3.0
4-1	14.2	150	0.2	35	21.5	5.3	1.4
4-2				45	21.5	8.0	2.4
5-1	18.8	200	0.1	35	18.9	4.1	0.6
5-2				45	20.8	5.5	0.75
6-1	13.0	270	0.6	35	36.9	13.9	2.7
6-2				40	38.0	17.2	2.5
6-3				45	29.0	20.2	2.0

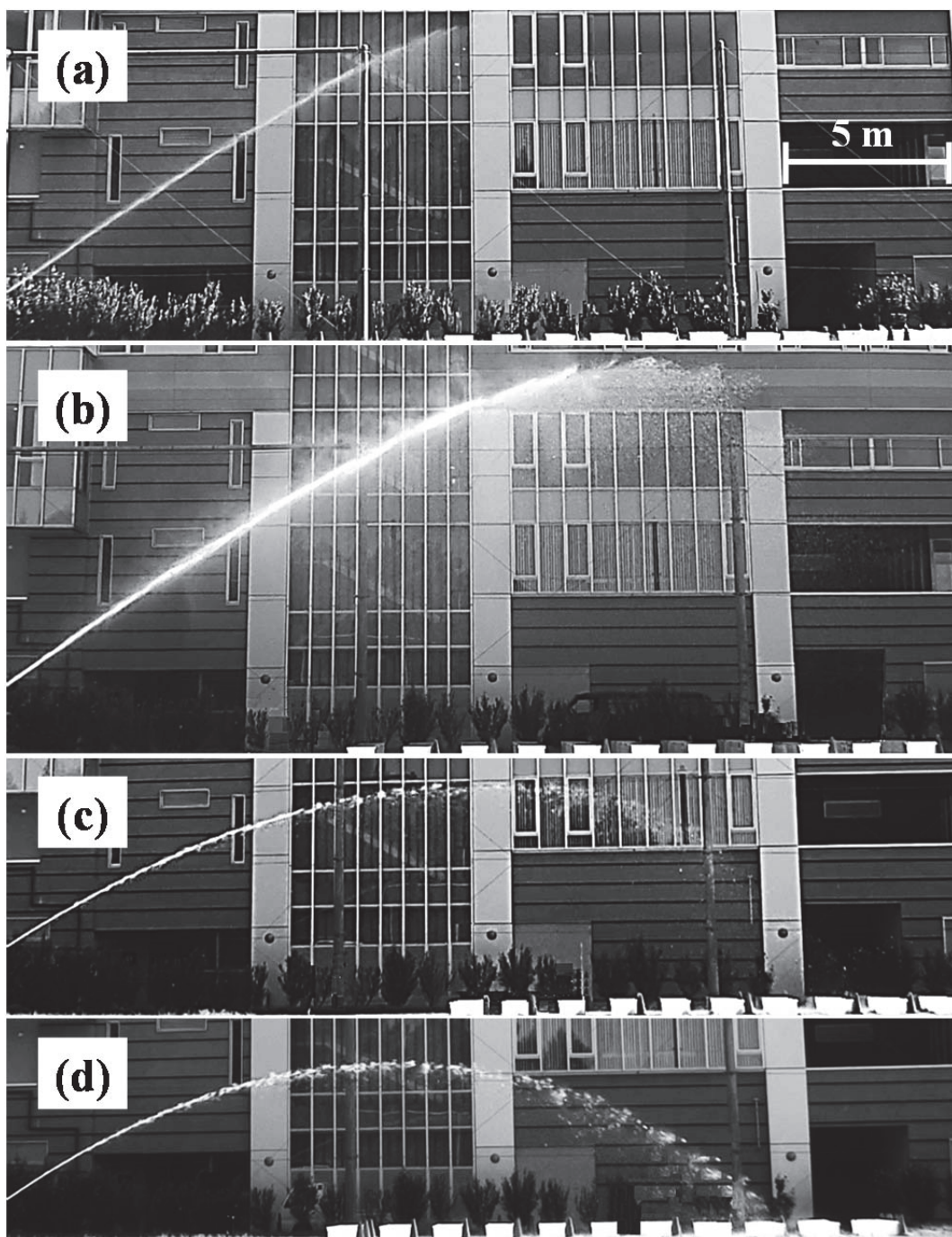


図 2.2.1 小規模放水実験の様子

- (a) 流量 60 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°
- (b) 流量 150 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°
- (c) 流量 150 L/min、圧力 0.2 MPa、角度 35°
- (d) 流量 200 L/min、圧力 0.1 MPa、角度 35°



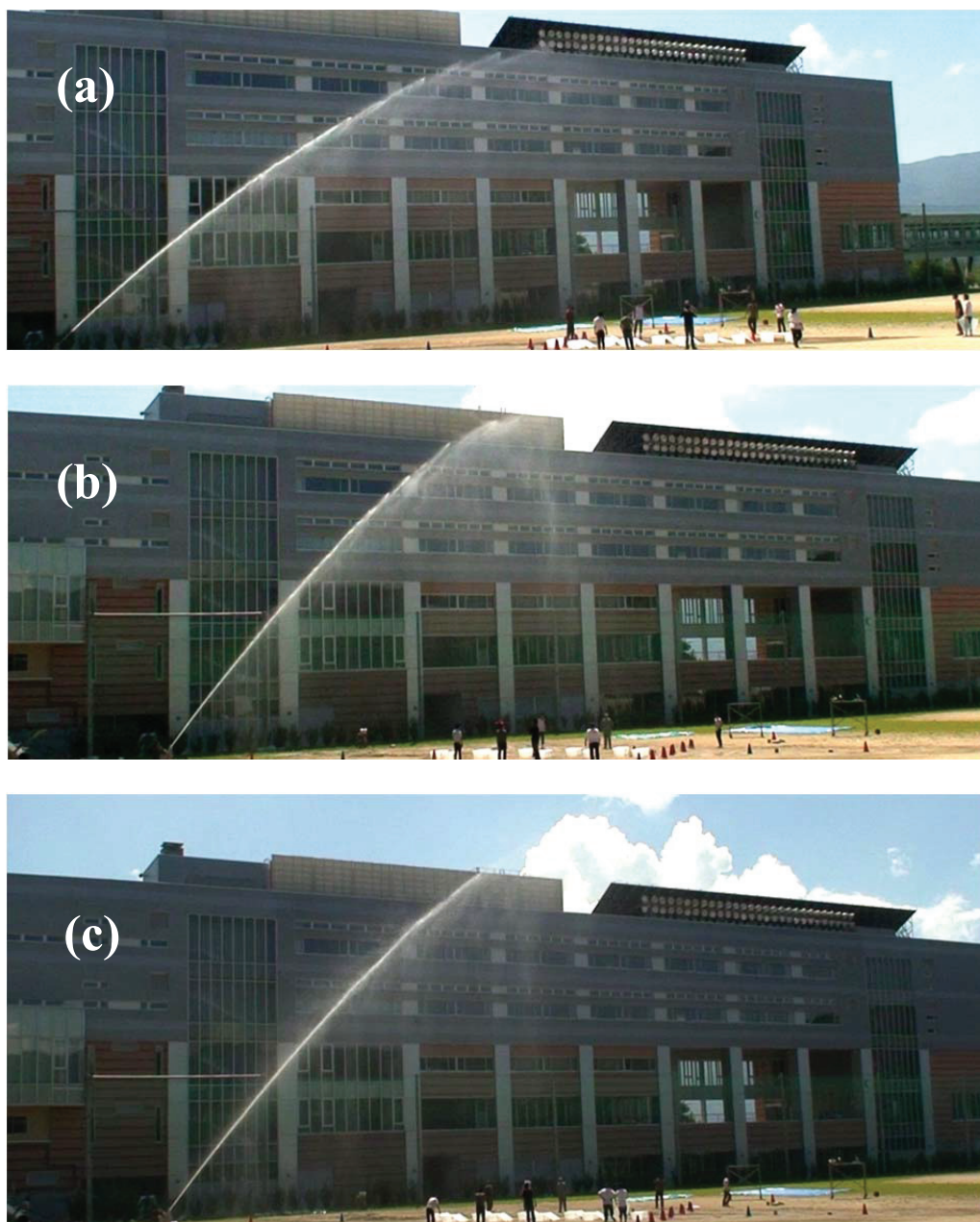


図 2.2.2 小規模放水実験の様子（流量 270 L/min、圧力 0.6 MPa）

(a) 角度 35°、(b) 角度 40°、(c) 角度 45°

#### 2.2.4 まとめ

小規模（流量 5 L/min）と中規模（流量 1,500 L/min）の中間的な位置付けとして、流量 10～270 L/min の屋外放水実験を実施し、最大射程・最大射高・射幅についてのデータを取得することができた。また、流量及び圧力の変化により飛翔中の水粒の挙動が変化し、放水軌跡が顕著に変化することを確認した。圧力が一定であれば、流量の大きい方が空気抵抗の影響を受け難く、放物線に近い軌跡を描くため、射高が高く、射程が長くなる。他方、流量が一定である場合には、圧力の上昇と共に射程・射高が大きくなるが、ある圧力値以上になると射程がほとんど伸びなくなることが示唆された。



## 2.3 屋外中規模放水及び泡放射実験

### 2.3.1 実験目的

本実験では、中規模と実大規模の中間的な位置付けとして、相似則のデータを補完すべく、放射軌跡の測定を行った。また、床面に落下した水の分散分布を測定し、放射角度の違いによる分布形状の変化について考察する。さらに放水時と泡放射時の放射特性の違いを明らかにし、泡放射時の発泡機構をモデル化する足がかりとなることを期待して実験を行った。

### 2.3.2 実験概要

実験は、深田工業株式会社小牧工場にて、放射圧力 0.7 MPa、放射流量 1 500 L/min の屋外放水及び泡放射を行った。泡消火剤薬剤は、粘性付与水性膜泡消火剤 AR-AFFF（フカダ・ライトニング AR）を使用し、水との混合比は 3%とした。実験に用いた放射砲は、実際に消火活動で用いられる大容量泡放射砲<sup>3)</sup>を試験用に小型化した模型装置で、図 2.3.1 に外観写真を示す。放射ノズルは、AR-AFFF と相性の良いノンアスピレート型ノズル（深田工業㈱製、NAN-1500）を用い、図 2.3.2 にノズル断面の概略図を示す。ノズルの内径は  $\phi 0.106$  m、ディフレクタ径は  $\phi 0.075$  m であり、開口面積を計算すると  $4.41 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ であった。ノズル高さは、床面から 1.2 m の高さに固定した。放射角度（仰角）は、30°、35°、40°、45°とし、それぞれの条件について 2～3 回実験を行った。

測定項目は、放射軌跡（最大射程・最大射高・射幅）及び水（泡）の分散分布（放射方向・射幅方向）とした。ノズルからの水平距離で水が最も遠くに到達した位置を「最大射程」、それと直角方向への水の広がりを「射幅」、鉛直方向における床面からの最大到達位置を「最大射高」と定義する。分散分布の測定には、床面に開口 0.47 m×奥行 0.30 m×高さ 0.30 m（内寸）、容量 42 L の水捕集容器 60 個を用いた。測定は、放射挙動が準定常的であるとみなせる 120 秒間に蓋を開閉して捕集容器内に水を溜め、水の重量を測定することで分布の定量的データを取得した。「射程方向」と「射幅方向」の分散分布を測定するため、水捕集容器はノズルから放射方向の中心軸上を一直線に配置したパターンと、主たる着水域（フットプリントあるいはランディングゾーン）で放射軸と直角方向に 10 列配置したパターンの二つに分けて設置した（図 2.3.2 参照）。測定した放射方向の分散分布からは最大射程を読み取り、射幅方向の分散分布からは最大水量の 50%以上の範囲（正規分布で近似した時の半値全幅）を射幅として読み取った。また、最大射高は三角測量により測定を行った。その他、発泡倍率・25%還元時間・動粘度などの泡性状、地上から高さ 10 m 地点の風向・風速を測定した。泡性状は、実験開始時に泡コレクターを使用して床面に落下した泡の性状を測定した。風向・風速は、風向風速計（ヤング社製）を用いて放射開始から放射終了まで 1 秒間隔で測定を行った。

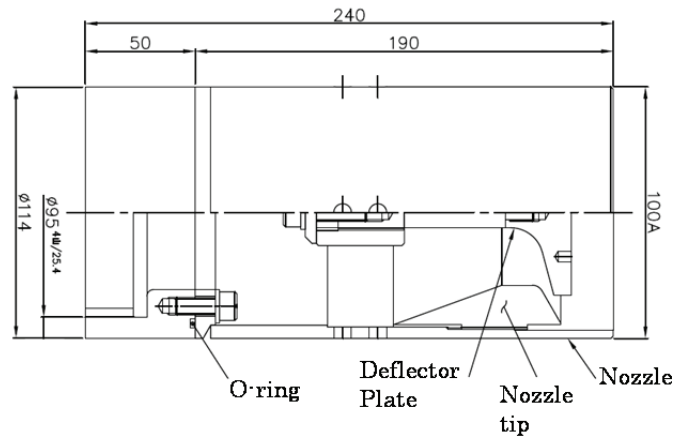
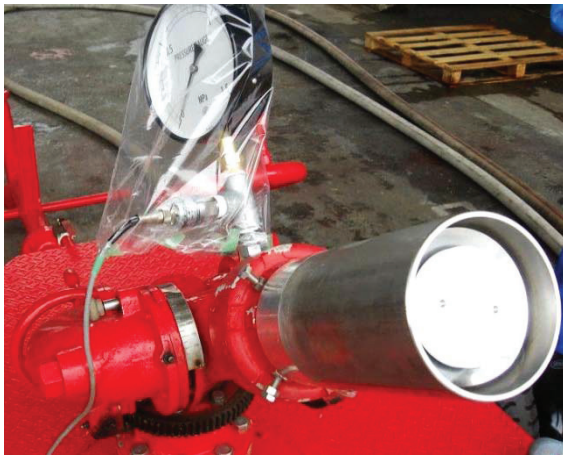


図 2.3.1 実験に使用したノズルの外観図及び断面図（深田工業(株)製）

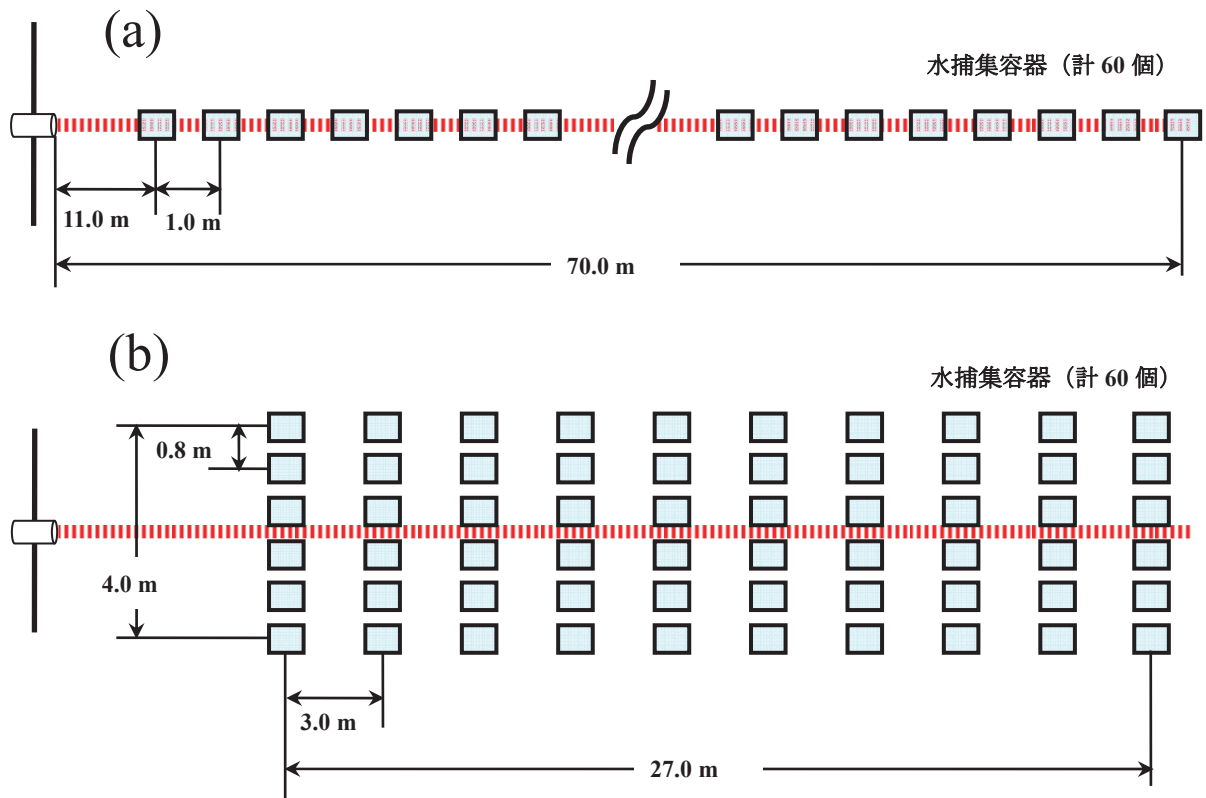


図 2.3.2 水捕集容器の配置方法

(a) 射程方向の分散分布測定用

(b) 射幅方向の分散分布測定用

### 2.3.3 実験結果及び考察

表 2.3.1 に最大射程、最大射高の結果（平均値）を示す。風向・風速は、放射角度 30°、35°の時は放水方向に対し 1.0 m/s 以下の追い風、40°、45°、泡放射の時は約 2.0 m/s の向かい風であった。全放射量に対する水（泡）の回収率は約 8 %であった。表 2.3.1 より、最大射程は放射角度 30°の時に一番長くなり角度上昇と共に短くなった。ここで、小規模無風条件の実験では放射角度 45°の時に最も長い射程となり今回の結果とは異なっている。この理由は、放射流量の上昇に伴い、射高が 10 m 以上高くなったことで、滞空時間が長くなり、空気抵抗を受ける時間が長くなったためであると考えられる。放水時と泡放射時の比較においては、最大射程、最大射高に大きな差は見られなかった。

図 2.3.3 は放射角度 35°における放水および泡放射の様子を示す。図 2.3.4～図 2.3.8 には各放射角度における分散分布の等量線図を示す。また、図 2.3.9 に各放射角度における射程方向の分散分布を示す。図 2.3.4～図 2.3.8 及び図 2.3.9 より、水の分散分布は放射角度 30°が一番密な形となり、角度上昇に伴い射幅が広くなり広範囲に分布することがわかった。また、泡放射の場合は、放水と比べ広範囲に分布することがわかる。これは、泡水溶液が空中で発泡し泡となることで風や空気抵抗の影響を水より大きく受けるためである。

表 2.3.1 最大射程、最大射高、射幅の測定結果（平均値）

放射角度 [°]		最大射程 [m]	最大射高 [m]	射幅 [m]
放水	30	65.0	13.7	3.1
	35	59.0	15.7	3.8
	40	55.0	16.3	3.7
	45	54.0	19.4	4.2
泡放射	35	60.0	14.1	4.6

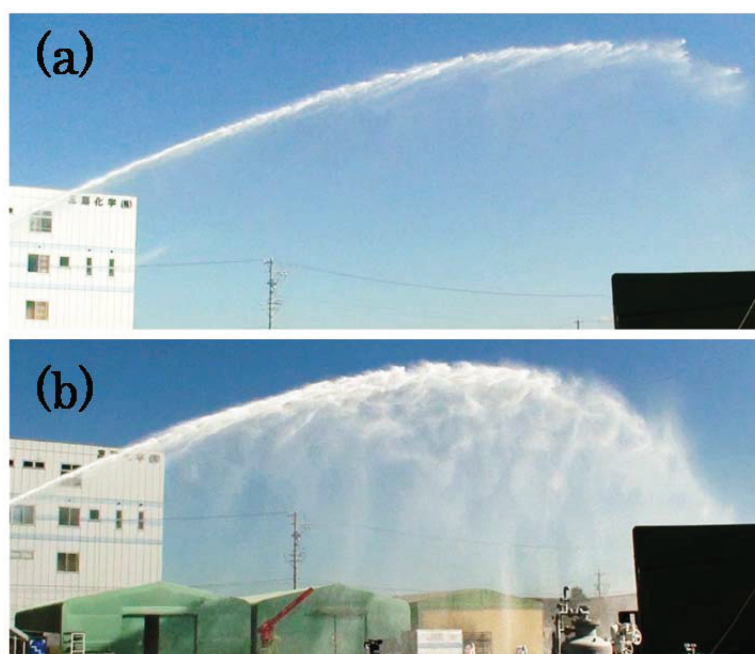


図 2.3.3 放射角度 35°における(a)放水及び(b)泡放射の様子

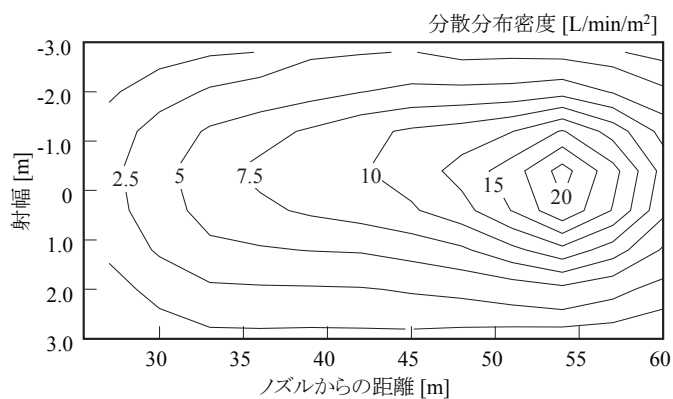


図 2.3.4 角度 30°における分散分布（放水）

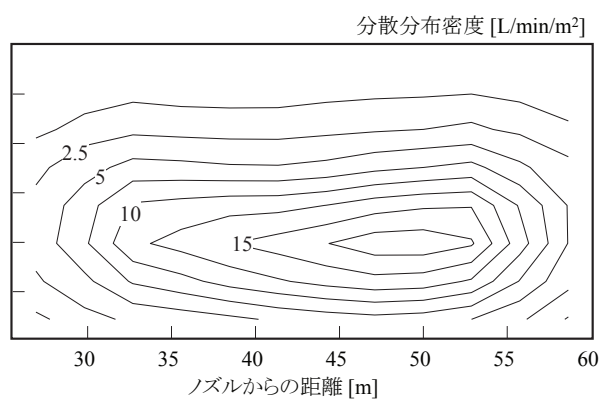


図 2.3.5 角度 35°における分散分布（放水）

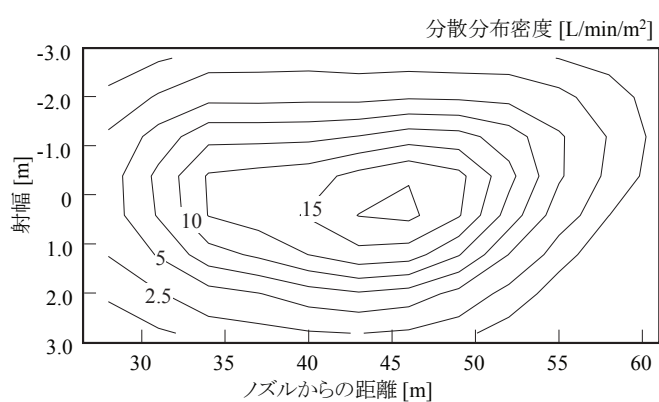


図 2.3.6 角度 40°における分散分布（放水）

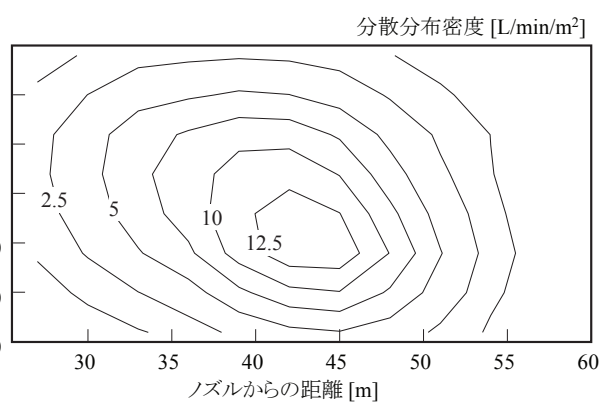


図 2.3.7 角度 45°における分散分布（放水）

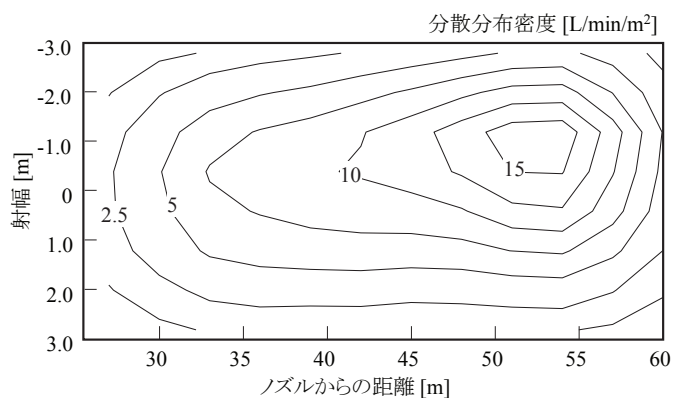


図 2.3.8 角度 35°における分散分布（泡放射）

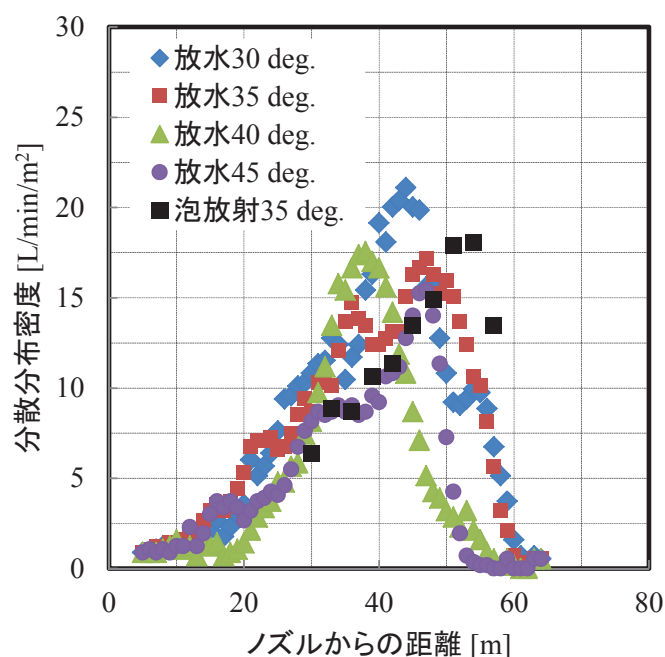


図 2.3.9 各放射角度における射程方向の分散分布

#### 2.3.4 まとめ

放射流量 1,500 L/min の放水及び泡放射実験を行い、放射軌跡と水の分散分布の測定を行った。実験を通じて、放射角度を約 35°とすると最も遠くまで放水できることが分かった。実際の消防隊も 30～35°で放射しており、本実験結果は経験則的な観点からも妥当な結果であると考えられる。また、水の分散分布は放射角度 30°が一番密な形となり、角度上昇に伴い射幅が広くなり広範囲に分布することがわかった。また、泡放射の場合は、放水と比べ広範囲に分布することがわかる。これは、泡水溶液が空中で発泡し泡となることで風や空気抵抗の影響を水より大きく受けるためである。

### 2.4 第 2 章のまとめ

放射流量 5～200 L/min の小規模放水実験及び放射流量 1,500 L/min の中規模放水実験を実施し、放射軌跡及び水の分散分布を測定した。これにより、大規模放水実験では測定が困難であったデータの取得をすることができた。このデータを基に放水軌跡の予測式の構築やシミュレーションモデルの有用性を定量的に評価するための比較に役立つことができると考えられる。また、中規模泡放射実験により放水時と泡放射時の違いについても知見を得ることができた。



## 第3章 放水軌跡の予測式の構築

### 3.1 研究概要

本章では、棒状放水時の放水性能を表す指標として重要な最大射程（最大到達距離）および最大射高（最大到達高さ）に着目し、物理的機構に基づいた予測式の構築を試みた。この予測式は、空気抵抗を考慮した球体の放物運動を基盤として作成し、また、予測式の妥当性・有用性を評価するため、既往の研究での大規模放水射実験や第2章の放水実験で測定された最大射程・最大射高と計算値を比較した。さらに、地面に落下した水の分散分布についても、予測モデルを構築するため、分散分布の規格化を試みた。分散分布を射幅方向と射程方向に分け、それぞれについて正規分布や Rosin-Rammler 分布を用いてフィッティングすることで規格化を行った。

### 3.2 放水軌跡の予測式

棒状放水時の放水特性を数値的に表す指標である最大射程および最大射高について、物理的機構に基づいた予測式を導出する。この予測では、棒状に放水された水塊の挙動を、球体の放物運動と仮定してモデル化し、運動方程式から求積法により算出した（以下、式の導出時は“水塊”あるいは“水粒”を便宜上、“球体”と表記する）。ここで、初速度  $V_0$  [m/s] は、放水圧力  $P$  [Pa] からベルヌーイの式(3.2.1)を用いて算出し、放水角度から水平方向の速度成分  $u_0$  [m/s] と鉛直方向の速度成分  $v_0$  [m/s] を求めた。放水の飛翔角度  $\theta$  [°] は、水平から反時計回りを正として定義する。

$$\begin{aligned} V_0 &= \sqrt{2P/\rho_w} \\ u_0 &= V_0 \cdot \cos \theta \\ v_0 &= V_0 \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

予測式により算出された値は、放水実験で測定された値と比較することで評価を行った。以下では、棒状放水時の最大射高と最大射程を、出来る限り単純化した仮定の下に定式化し、解析解によって求め、実験と比較して検証を行った。これにより、棒状放水時の最大射高と最大射程が、どのような物理過程で定まるかを知ることができる。

#### 3.2.1 最大射高に関する予測式

ノズルから放水された水は、最大射高に到達するまでは、ほぼ棒状にまとまって飛翔しており、連続的な水流のように見える。最大射高以降は、細かな球体に分裂していることが分かる。そこで、予備的な計算により、長い円柱がその表面に軸方向の抗力を受けながら飛翔すると仮定して最大射高を計算してみると、最大射高は実験値の2倍以上大きな値となることが分かった。このことは、最大射高までの放水性状が連続体に見えていても、水は細切れに分散し、大きな抗力を受けていると考える必要があることを示唆している。

一般に、ある形状の物体が速度  $V$  で静止流体中を飛翔する時、物体が受ける抗力  $D$  は、

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho_a S V^2$$

で表される<sup>40, 41, 42)</sup>。ここに、 $C_D$  は抵抗係数、 $\rho_a$  は流体（ここでは空気）の密度、 $S$  は特性断面積で通常は速度  $V$  に垂直な断面積とする。ここで、放水後の飛翔状態を、直径  $d$  の円柱が直径あるいはその数倍程度の長さで細切れになって飛翔しているとして、その端面に流体抵抗を受けるとすると、断面積  $S$  は直径  $d$  の円の面積であり、抵抗係数  $C_D$  は 0.8 程度である<sup>43, 44)</sup>。他方、水が直径  $d$  の球体に分散して飛翔しているとして、断面積はやはり直径  $d$  の円の面積であり、抵抗係数  $C_D$  は今回対象とするレイノルズ数の範囲で 0.5～0.6 程度である<sup>40)</sup>。すなわち、有限長の円柱の集合と見ても、球体の集合と見ても大きな差はないので、ここでは最大射高以降とも統一的に扱えるように、最大射高までは直径  $d$  がノズル径  $d_n$  程度の球体の集合として扱うこととする。この等価的な直径は、元来最適化すべきパラメータであるが、以下の計算の結果、ノズル径  $d_n$  としても、この近似の範囲では十分よい結果が得られたので、ここでは簡単のために  $d \cong d_n$  とする。なお、今回対象とするレイノルズ数  $Re = V \cdot L / \mu$  は、屋内小規模放水実験時に最小値となる。ここで、粒子速度  $V$  は放水圧力 0.05～0.08 MPa からベルヌーイの式を用いて  $V=8.0 \sim 10.0$  m/s と算出され、代表長さ  $L$  はノズル径である 0.006 m、動粘性係数  $\mu$  は空気の動粘性係数  $1.8 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s となる。これより、レイノルズ数は  $Re=2700 \sim 3300$  となることから、図 3.2.1 よりレイノルズ数がこの数値以上であれば空気抵抗係数を 0.5～0.6 の一定値として扱っても良いことになる。

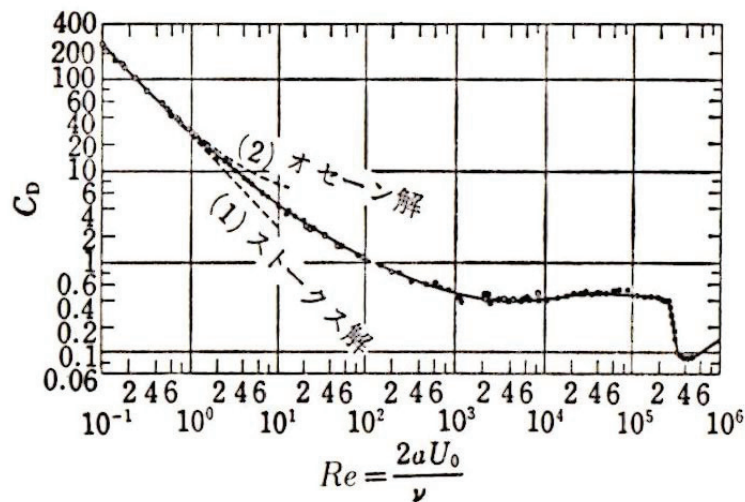


図 3.2.1 球の抵抗係数<sup>40)</sup>

いま、水平方向を  $x$ 、その速度を  $u$ 、垂直上向きを  $z$ 、速度を  $v$  として、それぞれに球体の運動方程式を求める。水塊が  $x$  方向と  $z$  方向に受ける流体抵抗は以下ようになる（ここでは、簡単のために絶対値のみを議論する）。

$$D_x = D \cos \theta = \frac{1}{2} C_D \rho_a S V^2 \cos \theta$$

$$D_z = D \sin \theta = \frac{1}{2} C_D \rho_a S V^2 \sin \theta$$

他方、 $V^2 = u^2 + v^2$ であるから、 $x$  方向の運動方程式に  $z$  方向速度が、 $z$  方向の運動方程式に  $x$  方向速度が寄与する。このような取り扱いも数値解によれば可能であるが<sup>45)</sup>、ここでは出来る限り解析的な解を求めて、現象を支配する基本的なパラメータを導出し、飛翔過程の基礎的な把握をすることを目的とするため、以下の簡単化を行う。すなわち、それぞれの抵抗成分  $D_x$  と  $D_z$  が、それぞれその方向の速度成分  $u^2$  及び  $v^2$  に比例すると近似する。近似値を  $D_x'$  と  $D_z'$  と書くと、

$$D_x' = \frac{1}{2} C_D \rho_a S u^2 = \frac{1}{2} C_D \rho_a S V^2 \cos^2 \theta$$

$$D_z' = \frac{1}{2} C_D \rho_a S v^2 = \frac{1}{2} C_D \rho_a S V^2 \sin^2 \theta$$

この近似による誤差を、 $(D_x' - D_x)/D$  及び  $(D_z' - D_z)/D$  で評価すると、誤差はそれぞれ  $\cos \theta (1 - \cos \theta)$  と  $\sin \theta (1 - \sin \theta)$  となり、図 3.2.2 に示すように最大でも 25%で今回の近似の範囲では十分に小さい。特に、飛翔の大きな部分を占める角度がゼロ付近では、その誤差はさらに小さい。

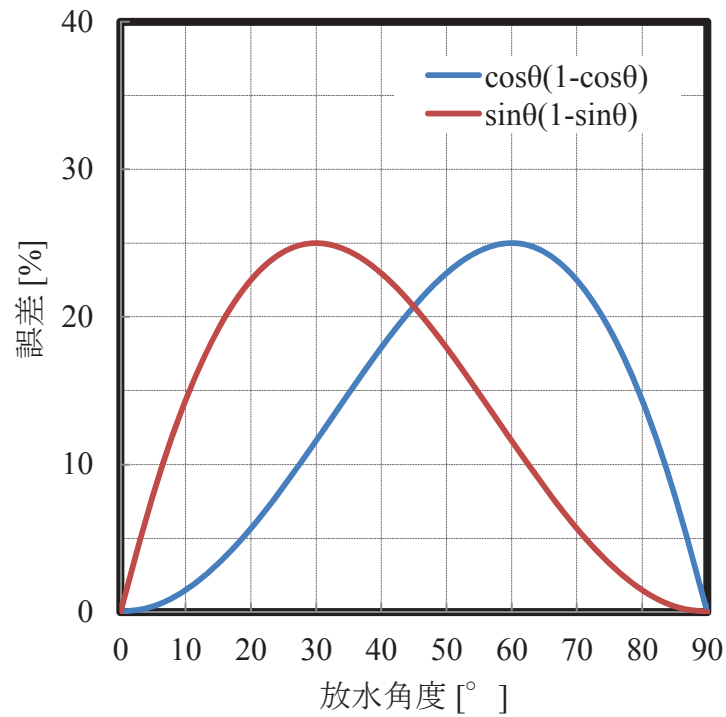


図 3.2.2 式の簡単化による誤差範囲

以上の仮定と簡単化の結果、最大射高までの  $z$  方向の運動方程式は、以下のように表される。

$$m \frac{dv}{dt} = -mg - \frac{1}{2} C_D \rho_a S v^2$$

$$\frac{dv}{dt} = -g - \frac{3}{4} C_D \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{1}{d_n} v^2$$

ここで、係数をまとめて式(3.2.2)とおく。

$$\alpha_1 = \frac{3}{4} C_D \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{1}{d_n} \quad (3.2.2)$$

式(3.2.2)を用いて以下のように変形する。

$$\frac{dv}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = -g - \alpha_1 v^2$$

$dz/dt = v$  なので、

$$\frac{dv}{dz} \cdot v = -\alpha_1 \left( \frac{g}{\alpha_1} + v^2 \right) \quad (3.2.3)$$

鉛直方向に初速度  $v_0$  で投射された球体は、最大射高  $H$  で  $v = 0$  となるので、この式を  $v = v_0$  から  $v = 0$  まで、 $z = 0$  から  $z = H$  まで積分する。

$$H_{cal} = \frac{1}{2\alpha_1} \ln \left( \frac{\alpha_1}{g} v_0^2 + 1 \right) \quad (3.2.4)$$

以上より、最大射高を与える予測式(3.2.4)が求められる。この式は、圧力と角度（鉛直方向の初速度）、ノズル径（流量）に依存していることが分かる。

図 3.2.3 は、最大射高の計算値  $H_{cal}$ （横軸）と本実験および過去に実施された小規模・中規模・大規模放水実験で測定された実験値  $H_{exp}$ （縦軸）を比較したグラフを示す。両者の値は、ほぼ一致するような傾向にあることから、流量規模に関わらず、射高に関する予測式の妥当性が確認された。空気抵抗係数  $C_D$  は、レイノルズ数が大きい範囲では  $C_D = 0.5 \sim 0.6$  程度で一定値となるが、ここでは  $C_D = 0.8$  で一定とする時、実験値と良い一致を得た。

図 3.2.4 は、計算値  $H_{cal}$  と実験値  $H_{exp}$  の差異におけるヒストグラム及び累積分布を示す。これより、全データのうち約 60% が差異 20% 以下で一致したことが分かった。実際の放射試験において、射程及び射高、射幅の測定は目視やビデオ撮影による方法が一般的であるが、放水形状は風などの影響に大きく左右されるため、非常に流動的であり、放射軌跡は実験中に 20% 前後の変化をしている。従って、差異が 20% 以下であれば、比較的良く一致していると評価することができる。

また、参考データとして流量 300~20,000 L/min の泡放射（AR-AFFF 3%）に関しても、放水時と同様の式を用いて比較を行った。その結果、10 m 以上の範囲で良い一致が得られたことから、泡放射時の射高は放水時とほとんど変化が無いことが分かった。さらに、第 4 章で構築した三次元シミュレーションモデルにより算出した最大射高と計算値を比較した結果、両者の値はほぼ一致したことが分かった。

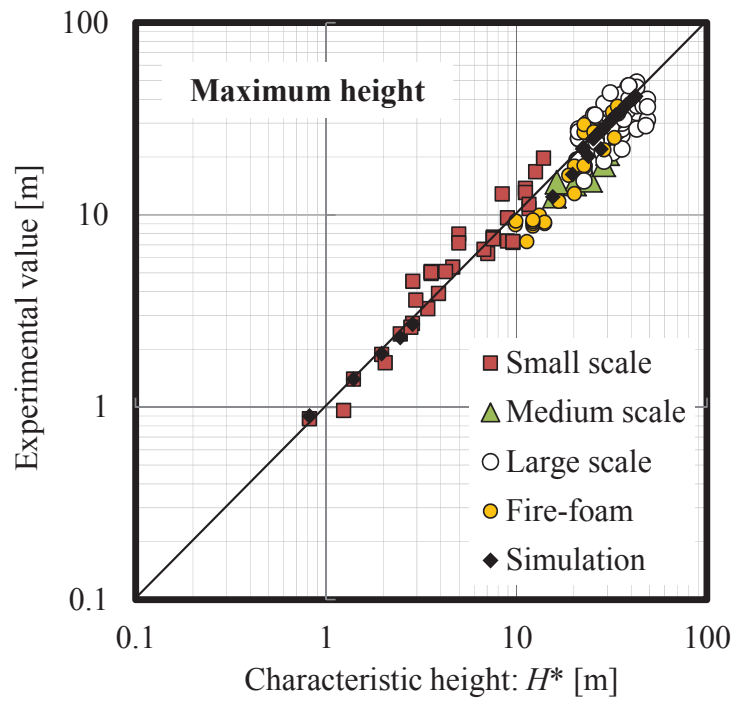


図 3.2.3 最大射高の計算値  $H_{cal}$  と実験値及びシミュレーション値  $H_{exp}$  の比較

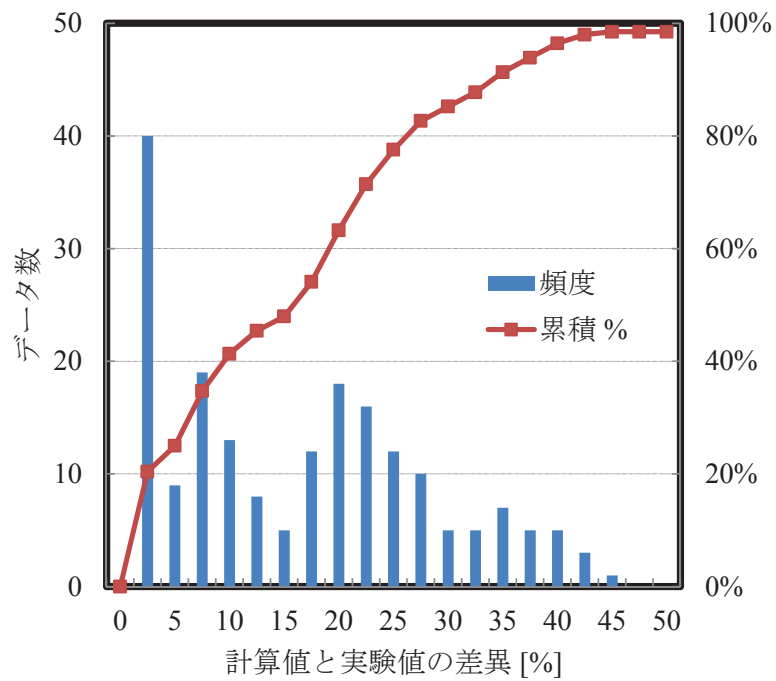


図 3.2.4 最大射高における計算値  $H_{cal}$  と実験値  $H_{exp}$  の差異



### 3.2.2 最大射程に関する予測式

最大射程  $R_{cal}$  については、図 3.2.5 に示すように最大射高到達時までの距離  $R_1$  とそこから地面に落下するまでの距離  $R_2$  に分けると、式(3.2.5)から求められる。

$$R_{cal} = R_1 + R_2 \quad (3.2.5)$$

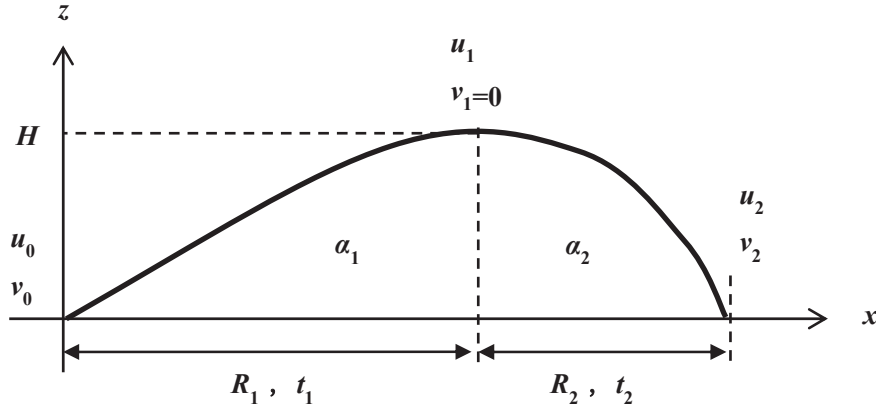


図 3.2.5 放水軌跡に関わる物理量の定義

$x$  方向及び  $z$  方向の初速度をそれぞれ  $u_0$ ,  $v_0$  とする時、最大射高到達時の速度をそれぞれ  $u_1$ ,  $v_1$  とし、その時の時間を  $t_1$  とする。また、地面に落下時の速度をそれぞれ  $u_2$ ,  $v_2$  とし、最大射高点から落下までの時間を  $t_2$  とする。ここで、水塊は、最大射高付近で水粒に分裂すると仮定し、最大射高を通過中に空気抵抗の係数値が変化すると考える。従って、最大射高まではノズル径  $d_n$  を直径とした球体の係数値  $\alpha_1$  (式(3.2.2)) を用い、最大射高通過以降は分裂後の水粒径  $d_w$  を直径とした球体の係数値  $\alpha_2$  (式(3.2.6)) を用いて計算する。ここでは、理論上最大の水粒径を想定し、空気抵抗による圧力と水の表面張力の釣り合い式(3.2.7)から算出した。

$$\alpha_2 = \frac{3}{4} C_D \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{1}{d_w} \quad (3.2.6)$$

$$d_w = \left\{ \frac{6 \sigma}{(\rho_w - \rho_a) g} \right\}^{0.5} \quad (3.2.7)$$

最大射高導出時と同様に、水塊に作用する水平方向の力は以下のように表せる。

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_D \rho_a S u^2$$

$$\frac{du}{dt} = -\alpha_1 u^2$$

初速度  $u_0$  で投射された球体は、時間  $t$  秒後に速度  $u$  となるので、この式を初期条件  $u = u_0$  ,  $t = 0$  として積分すると、以下の式が得られる。

$$u(t) = \frac{u_0}{1 + \alpha_1 u_0 t} \quad (3.2.8)$$

従って、速度  $u(t)$  を時間  $t = 0$  から  $t_1$  まで積分すれば、距離  $R_1$  を求めることができる。

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} \ln(1 + \alpha_1 u_0 t_1) \quad (3.2.9)$$

最大射高以降についても同様に、速度  $u(t)$  を時間  $t = 0$  から  $t_2$  まで積分して、次式を得る。

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} \ln(1 + \alpha_2 u_1 t_2) \quad (3.2.10)$$

ここで、最大射高到達時の水平方向速度  $u_1$  は、式(3.2.8)より  $t = t_1$  として以下のように導出できる。

$$u_1 = \frac{u_0}{1 + \alpha_1 u_0 t_1} \quad (3.2.11)$$

次に、 $t_1$  を求めるため、鉛直方向に作用する力を以下のように表すと、

$$\frac{dv}{dt} = -g - \alpha_1 v^2$$

$$\frac{dv}{g + \alpha_1 v^2} = -dt$$

最大射高到達までの時間  $t_1$  は、上式を初速度  $v_0$  から  $v = 0$  まで、時間  $t_0 = 0$  から  $t_1$  まで積分して以下のように求められる。

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 g}} \tan^{-1} \left( v_0 \sqrt{\frac{\alpha_1}{g}} \right) \quad (3.2.12)$$

同様に地面に落下するまでの時間  $t_2$  は、

$$\frac{dv}{dt} = -g + \alpha_2 v^2$$

$$\frac{dv}{\alpha_2 v^2 - g} = dt$$

上式を速度  $v = 0$  から  $v_2$  まで、時間  $t = 0$  から  $t_2$  まで積分して以下のように求められる<sup>46)</sup>。

$$t_2 = \frac{1}{2\sqrt{\alpha_2 g}} \ln \left( \frac{1 + v_2 \sqrt{\alpha_2/g}}{1 - v_2 \sqrt{\alpha_2/g}} \right) \quad (3.2.13)$$

最後に、式(3.2.13)中に含まれる地面に落下時の速度  $v_2$  を求める。式(2)を最大射高以降の落下に適用するため、 $-\alpha_1$  を  $\alpha_2$  と置き直して、

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dz} \cdot v &= -\alpha_2 \left( \frac{g}{\alpha_2} - v^2 \right) \\ -\frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{v dv}{\frac{g}{\alpha_2} - v^2} &= dz \end{aligned}$$

上式について、速度を  $v_1 = 0$  から  $v_2$  まで、 $z$  方向距離を最大射高  $H$  から地上面  $z = 0$  まで積分すると、以下の式が得られる。

$$v_2 = \sqrt{\frac{g}{\alpha_2} (1 - \exp(-2\alpha_2 H))} \quad (3.2.14)$$

以上をまとめると、最大射程  $R_{cal}$  は式(3.2.2)、式(3.2.6)、式(3.2.11)、式(3.2.12)、式(3.2.13)、式(3.2.14)を用いて式(3.2.15)により算出できる。

$$\begin{aligned} R_{cal} &= R_1 + R_2 \\ &= \frac{1}{\alpha_1} \ln(1 + \alpha_1 u_0 t_1) + \frac{1}{\alpha_2} \ln(1 + \alpha_2 u_1 t_2) \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

図 3.2.6 に最大射程の計算値  $R_{cal}$  (横軸) と実験値  $R_{exp}$  (縦軸) との比較を示す。最大水粒直径  $d_w$  は、式(3.2.7)から求めた結果、 $d_w = 6.7 \times 10^{-3}$  [m] を全ての流量規模に代表径として用いた。図に見るように、最大射程においても流量規模に関わらず、良い予測結果を与えることが分かった。図 3.2.7 は、計算値  $R_{cal}$  と実験値  $R_{exp}$  の差異におけるヒストグラム及び累積分布を示す。これより、最大射程の計算値においても全データのうち約 60% が差異 20% 以下で一致したことが分かった。

これにより、大容量泡放射砲による棒状放水時の放水軌跡を解析するために実施された模型実験（小規模及び中規模放水実験）の妥当性が確認された<sup>47)</sup>。また、流量 300～20,000 L/min の泡放射（AR-AFFF 3%）のデータも予測値に良く一致することから、射程が 10 m 以上の範囲においては、泡放射は通常の放水時とほとんど変化が無いと推察できる。大規模になるほど同じ放水条件でも実験値にバラツキが現れるのは、自然風や測定誤差による影響があるためと考えられる。さらに、第 4 章で構築した三次元シミュレーションモデルにより算出した最大射程と計算値を比較した結果、両者の値がほぼ一致したことから、シミュレーションモデルの妥当性が検証された。

以上より、棒状放水時の最大射程及び最大射高について、それぞれ物理的機構および観察結果に基づくモデル化を行い、計算値  $R_{cal}$ 、 $H_{cal}$  を導出した。この計算値と実験値を比較した結果、流量 5～40,000 L/min、圧力 0.05～1.0 MPa、角度 25°～65°の棒状放水の範囲において、良い予測結果が得られたことから、棒状放水に関する模型実験の妥当性を得ることができた。また、本モデルは、放水特性を記述できる新たな特性値として用いられ、消防戦術を構築するに当たっての消火支援になると考えられる。

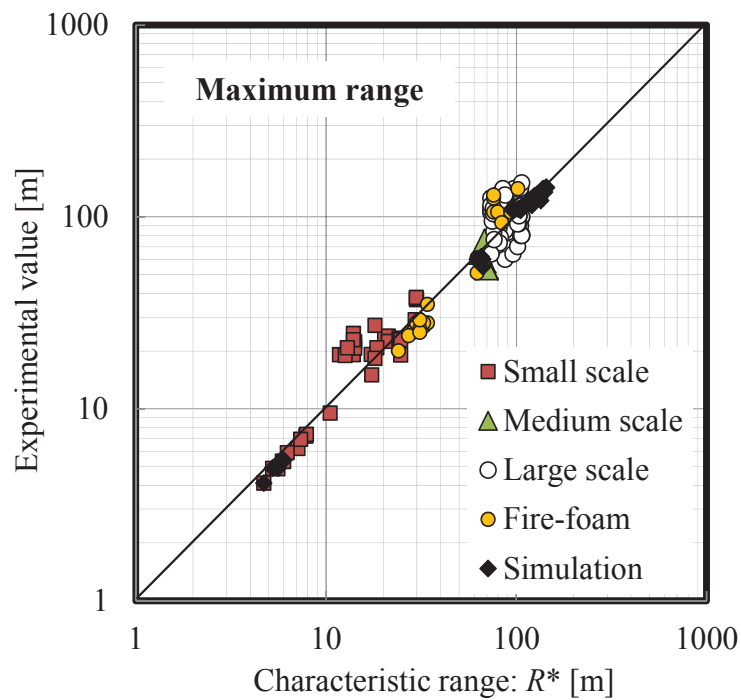


図 3.2.6 最大射程の計算値  $R_{cal}$  と実験値及びシミュレーション値  $R_{exp}$  の比較

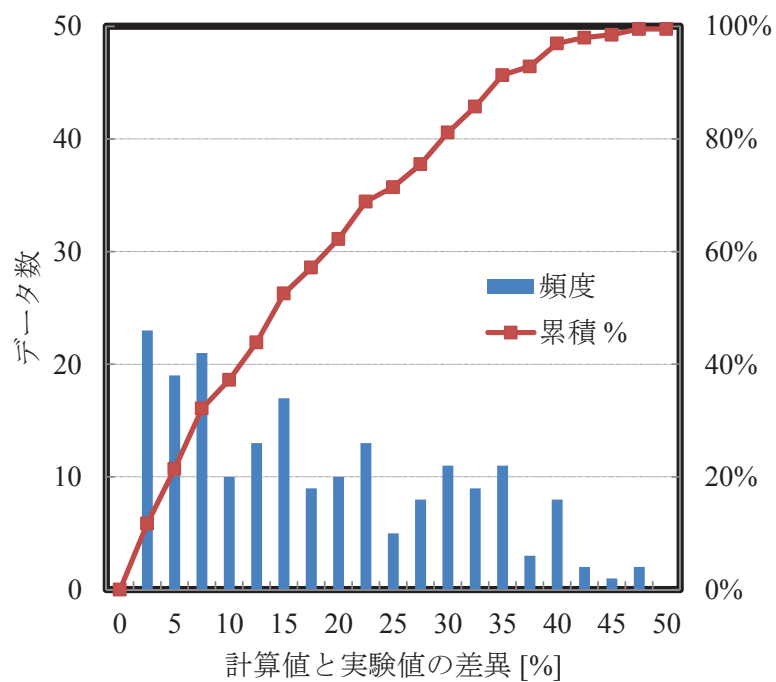


図 3.2.7 最大射程における計算値  $R_{cal}$  と実験値  $R_{exp}$  の差異

### 3.3 分散分布の規格化

#### 3.3.1 分散分布の評価法

水の分散分布を評価することは、放水特性を把握する上で重要な指標の一つとなる。図 3.3.1 は、放水角度 35°の放水実験時に測定した水の分散分布の等量線図を示す。ここで、放水流量の 60%以上の範囲（グラフの実線部分）を Footprint と定義すると、放水方向を長辺とする楕円型に近い形状をしていることが分かる。ここで、図 3.3.1 内の影付の帯で示す範囲（最大水量を通る水量データ）を代表値として着目し、ノズルから放水方向にフットプリントの中心軸を通る分布を「射程方向の分散分布」、放水方向と直角方向（射幅方向）の分布を「射幅方向の分散分布」とする。水の分散分布を予測するためには、射幅方向の分散分布（図 3.3.2 の正面図）と射程方向（図 3.3.2 の側面図）のそれぞれについて規格化を行う必要がある。そこで、射幅方向の分散分布には正規分布、射程方向の分散分布には Rosin-Rammler 分布を用いてそれぞれ規格化を試みた。

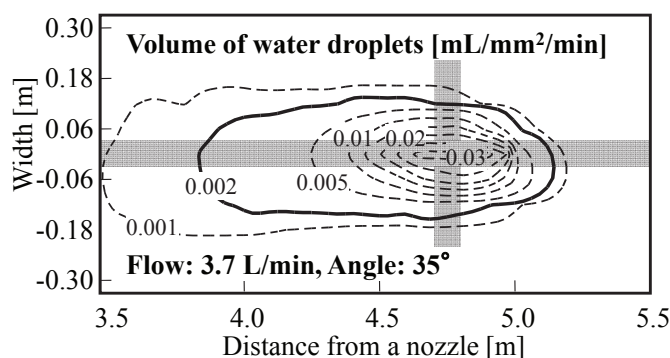


図 3.3.1 水の分散分布の等量線図

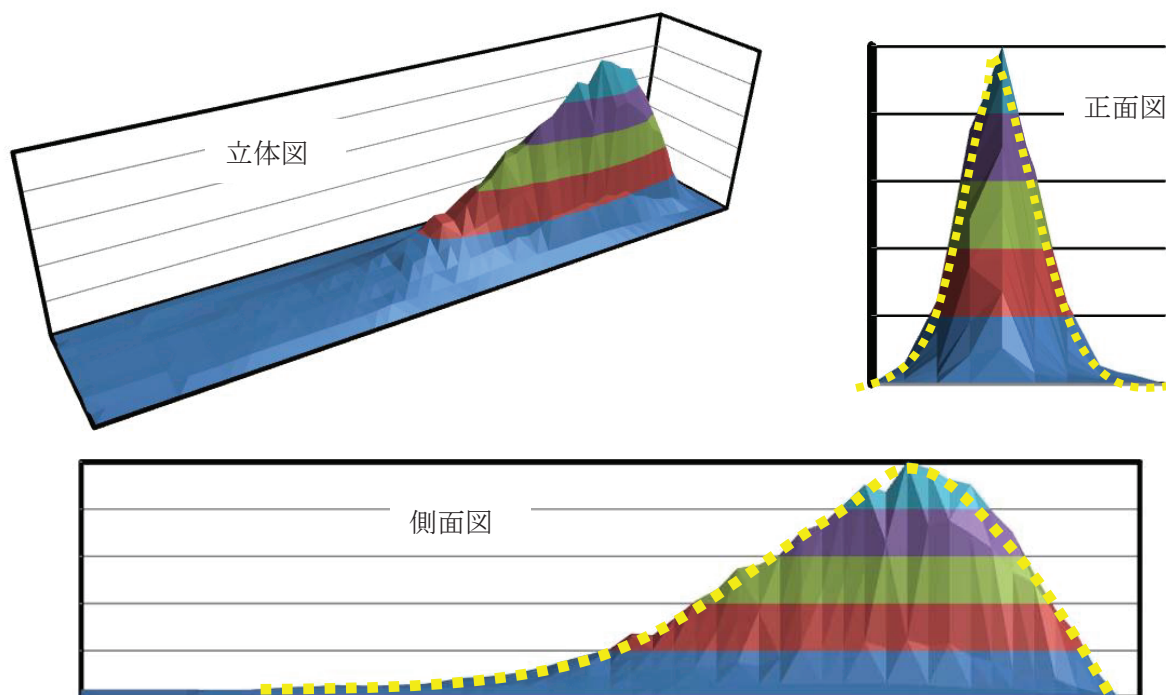


図 3.3.2 水の分散分布の 3D 等量線図



### (1) 射幅方向の分散分布

最大水量域をフットプリントの中心域とし、その直角方向（射幅方向）の列にある水量データから最大水量値を基準値（= 1）とした水量比を採ったところ正規分布により近似した。正規分布は、半値幅の値を変化させることで尖度と歪度を調整した結果、図 3.3.3（放水角度 35°の場合）に示すように、射幅方向の水量値と正規分布のグラフは良い一致を示した。従って、流量変化に伴う半値幅の変化を解析すれば、ノズルからの距離と正規分布の半値幅の間で相似則が成り立つと考えられる。

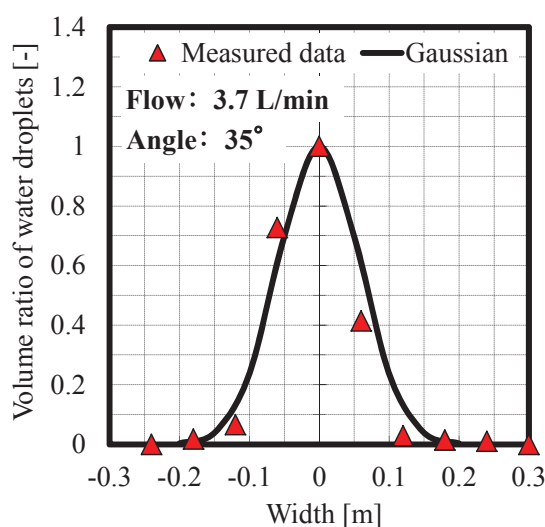


図 3.3.3 射幅方向の分散分布と正規分布の比較（流量 3.7 L/min、角度 35°）

### (2) 射程方向の分散分布

図 3.3.4 は、放水方向の中心軸上を通る水量値をプロットしたグラフを示す。水量値は、捕集容器の開口面積と放水時間で割った値を用い、消防で一般的に用いられる一分間当たりの水量値とした。また、図より最大射程の正確な距離が明確になり、計算値と定量的な比較ができる。ここで、フットプリントは放水流量の 60%以上の範囲と前述したが、中心軸上を通るグラフにおいては、最大水量の 10%以上の範囲がこれに相当する。

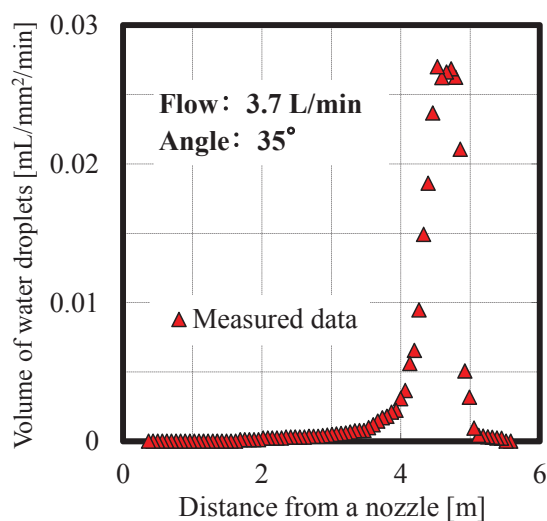


図 3.3.4 射程方向の分散分布（流量 3.7 L/min、角度 35°）

### 3.3.2 射幅方向の分散分布の規格化

正規分布（ガウス分布）は、平均値の付近に集積するようなデータの分布を表した連続的な変数に関する確率分布であり、平均を $\mu$ 、分散を $\sigma^2$ とする時、式(3.3.1)で表される確率密度関数を持つ<sup>48)</sup>。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3.1)$$

ここで、平均値 $\mu = 0$ での確率を $P_x$ すると、式(3.3.1)は半値幅 $\beta$ を用いて式(3.3.2)のように単純化できる。半値幅は、図 3.3.5 に示すように山形の関数の広がり の程度を表す指標であり、半値全幅 (Full Width at Half Maximum, FWHM) とも呼ばれる。これは、 $f(x)$ の極大値の 1/2 の位置における $x$ 座標での左右の広がり の幅を表しており、半値幅を $2\sqrt{2\ln 2} = 2.4$ で割ると標準偏差が得られる。

$$f(x) = P_x \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{\beta}\right) \quad (3.3.2)$$

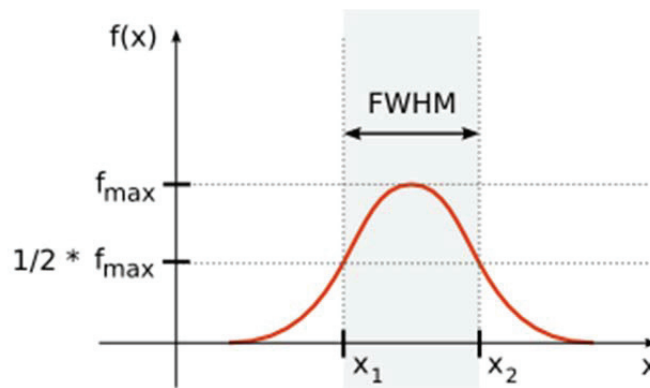


図 3.3.5 半値幅（半値全幅）の定義

式(3.3.2)より、正規分布は半値幅 $\beta$ と平均値 $\mu = 0$ での確率 $Q$ を変数として、変化することが分かる。従って、射幅方向の分散分布を正規分布で規格化するためには、放水実験で得られた水量データと射幅から、正規分布の半値幅 $\beta$ を算出し、ノズルからの距離による半値幅の変化を解析する必要がある。そのため、放水実験で得られた水量値から図 3.3.6（流量 1,500L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40°）に示すような最大水量を 1 とした水量比の等量線図を作成し、規格化に必要なパラメータを次のように定義する。まず、水量比 $Q_p$ は、測定した水量値を $Q$  [L/min/m<sup>2</sup>]、水量値の中で最大となる値を $Q_{max}$  [L/min/m<sup>2</sup>]とすると、 $Q_p = Q/Q_{max}$  [-]で表せる。また、射程方向の中心軸上を通る水量値（ $Q_{max}$ を含む）を $Q_c$  [-]、ノズルからの距離を $L$  [m]、射幅方向におけるフットプリント中心軸からの距離を $w$  [m]、最大射程を $R$  [m]、最大射高を $H$  [m]とする。

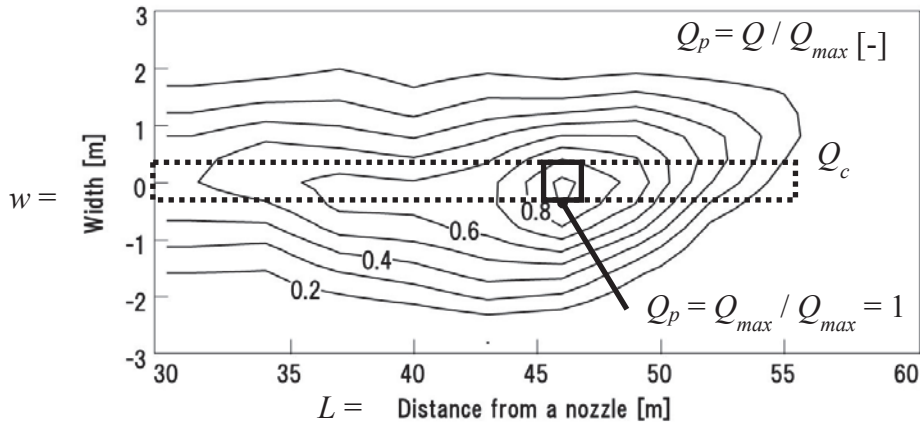


図 3.3.6 最大水量を 1 とした水量比の等量線図

以上より、射幅方向におけるフットプリント中心軸からの距離  $w$  [m] における水量比  $Q_p$  は、半値幅  $\beta$  と射程方向の中心軸上を通る水量値  $Q_c$  を用いて、式(3.3.3)で表せる。半値幅  $\beta$  [m] は、正規分布の式(3.3.3)を  $\beta$  について解き、式(3.3.4)で求めることができる。この時求めた半値幅は、測定した水量データの数だけ算出できるため、それらの平均値をとり、代表値として使用する。また、 $Q_c$  からは、半値幅を求めることができない (式(3.3.4)の分母が  $\ln 1 = 0$  でゼロになる) ため、 $Q_c$  の半値幅は除外して平均値を求めた。

$$Q_p = Q_c \exp\left(-\frac{w}{\beta}\right)^2 \quad (3.3.3)$$

$$\beta = \frac{w}{\left(-2 \ln\left(\frac{Q_p}{Q_c}\right)\right)^{1/2}} \quad (3.3.4)$$

図 3.3.7 は、図 3.3.6 の等量線図における水量データ (流量 1,500L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40°) の比  $Q_p$  と、式 3.3.4 を用いて算出した半値幅  $\beta$  による正規分布を比較したグラフである。射幅方向の水量比は、ノズルからの距離に関わらず、正規分布で再現することができる。また、 $Q_c$  の値は、最大水量値  $Q_{max}$  から離れるにつれ小さくなっていることが分かる。また、この時の半値幅は、ノズルからの距離が変化しても約 1.5 でほぼ一定の値になっている。従って、フットプリント内の分散分布は、半値幅が決定すれば  $Q_c$  の変化を把握することで、分布全体を再現できると考えられる。

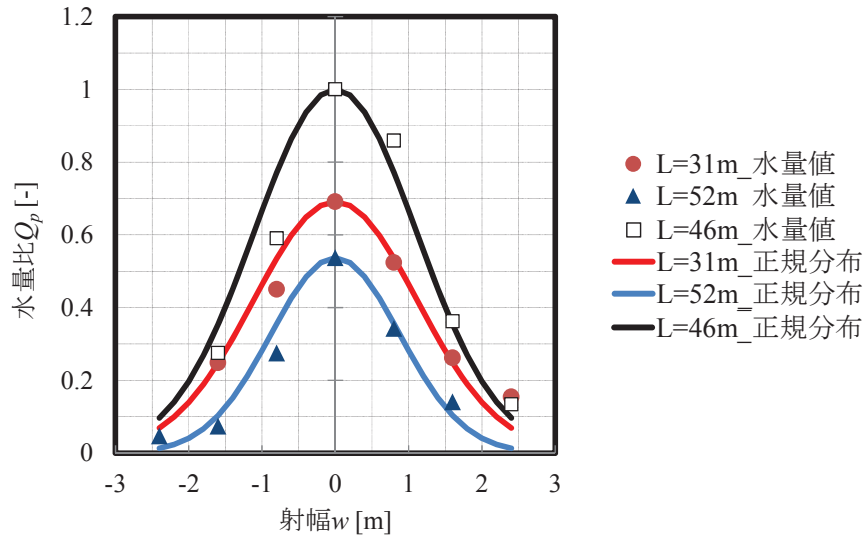


図 3.3.7 射幅方向の水量比と正規分布の比較

以上で求めた半値幅を、様々な放水条件で適用できるようにするため、新たな無次元数を定義して規格化を行う。ここで、正規分布の半値幅は、射幅の大きさ（広がり）を現しており、放水の分散性が高い場合、半値幅も大きくなる。放水の分散性は、水塊に作用する空気抵抗の大きさに依存し、空気抵抗を受ける時間が長くなるほど射幅方向への広がりが大きくなる。従って、最大射高が大きくなるに従い、滞空時間が長くなるため、放水の分散性が高くなり、半値幅も大きくなると考えられる。そこで、半値幅 $\beta$ と最大射高 $H$ の比をとった無次元半値幅 $\beta^*$ を式(3.3.5)のように定義する。また、ノズルからの距離 $L$ と最大射程 $R$ の比をとった無次元距離 $L^*$ を式(3.3.6)のように定義し、 $\beta^*$ との関係性を調べる。

$$\beta^* = \beta/H \quad (3.3.5)$$

$$L^* = L/R \quad (3.3.6)$$

図 3.3.8～図 3.3.10 は、小規模及び中規模放水実験の分散分布測定結果から $\beta^*$ と $L^*$ を算出し、グラフにまとめたものである。図 3.3.8 の凡例中の表記は、第 3 章の表 3.1.1 に記載した実験番号と一致させている。図 3.3.10 (a)は 270 L/min の放水実験、図 3.3.10 (b)は 1,500 L/min の中規模放水実験の結果をそれぞれ示している。また、屋内と屋外での放水実験に分けてまとめたグラフを図 3.3.11 に示す。

図 3.3.8 において、屋内小規模放水時における $\beta^*$ は、流量及び角度に関わらず 0.05 でほぼ一定になっている。図 3.3.9 及び図 3.3.10 において、屋外小規模及び中規模放水時における $\beta^*$ は、どの条件においても $L^*$ の大きさに依らず、0.11 でほぼ一定の値を示している。これらの結果は、半値幅 $\beta$ が最大射高 $H$ にのみ依存して変化することを示しており、放水圧力や角度が増加しても、最大射高 $H$ が分かれば半値幅 $\beta$ を予測する事が可能であると考えられる。また、屋内と屋外では、 $\beta^*$ の値に差異が生じていることから、射幅は風の影響を受け易く、半値幅 $\beta$ の予測には屋内外で分けて考える必要がある。実際の消火活動は、屋外で行われており、風の影響を考慮する必要があるため、本論では $\beta^* = 0.11$ として規格化を行う。No.3-1\_5 や No.4-2\_2 が 0.2 以上の値になっているのは、風の影響により分散分布が放水方向中心軸から左右にずれてしまい、フットプリントの形状が楕円形にならなかったために、半値幅が大きくばらつい

たと考えられる。なお、図 3.3.8 において、放水角度  $25^\circ$  の時の  $\beta^*$  が 0.1 になっているが、これは水捕集容器の大きさが射幅に対して大き過ぎ、適切な分解能で測定が行えなかったために値が大きく現れたと考えられる。

以上より、無次元半値幅  $\beta^*$  が 0.11 で一定値になったことから、最大射程・最大射高及び射程方向中心軸上の水量比  $Q_c$  を算出できるモデル式を構築すれば、フットプリント内の分散分布を三次元的に再現する事が可能となる。

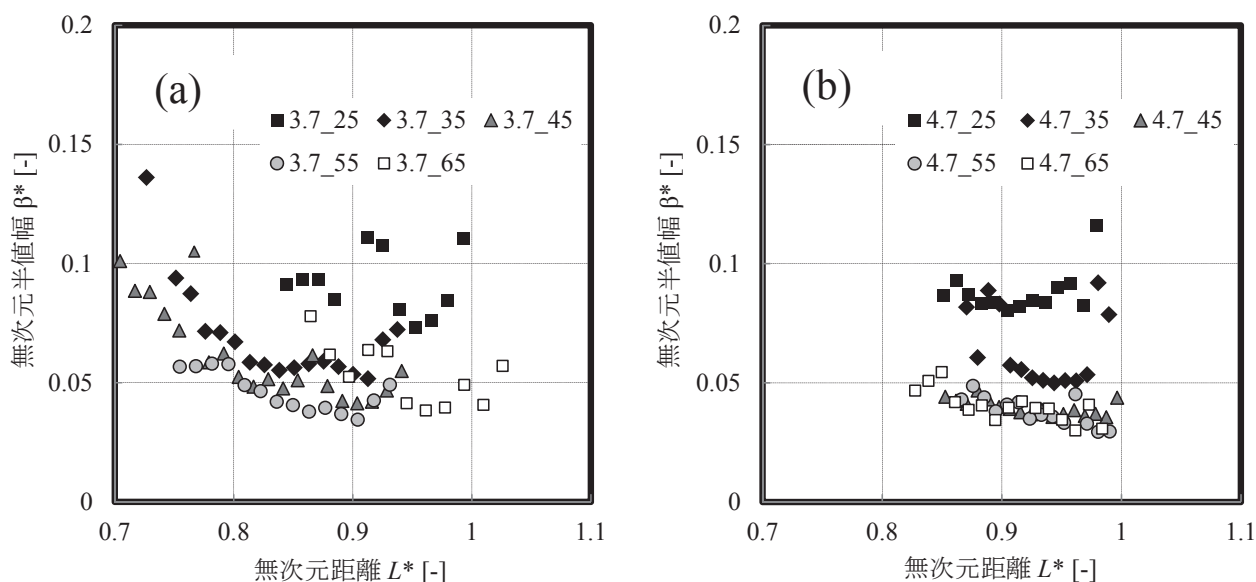


図 3.3.8 無次元半値幅  $\beta^*$  と無次元距離  $L^*$  の関係（屋内小規模：流量 3.7～4.7 L/min）

(a) 流量 3.7 L/min、(b) 流量 4.7 L/min

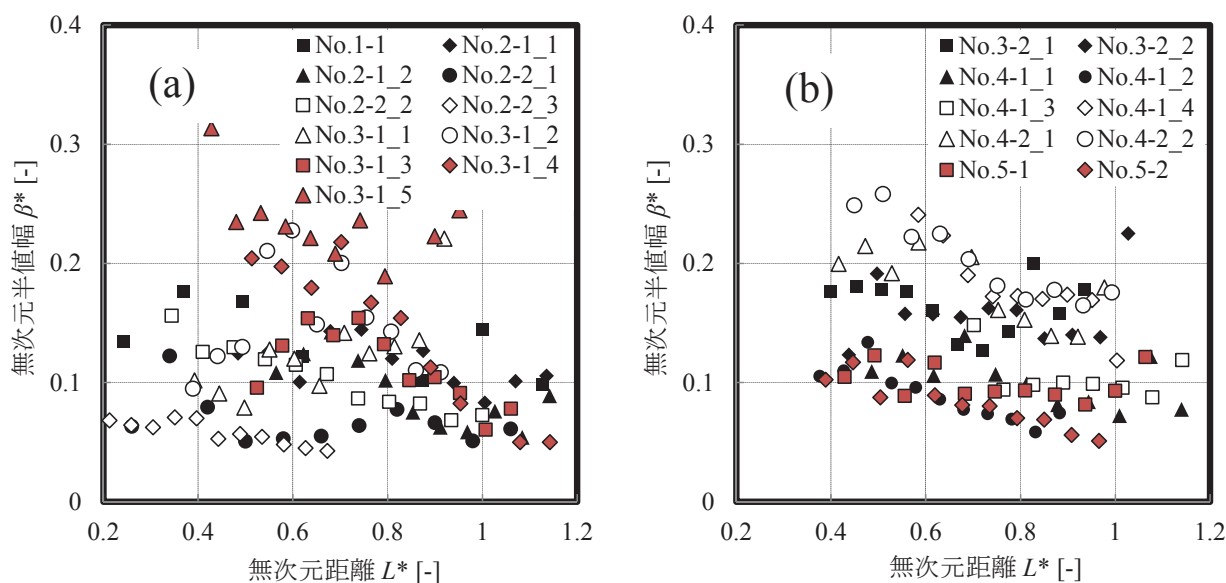


図 3.3.9 無次元半値幅  $\beta^*$  と無次元距離  $L^*$  の関係（屋外小規模：流量 10～200 L/min）

(a) 実験番号 No.1-1～No.3-1、(b) 実験番号 No.3-2～No.5-2



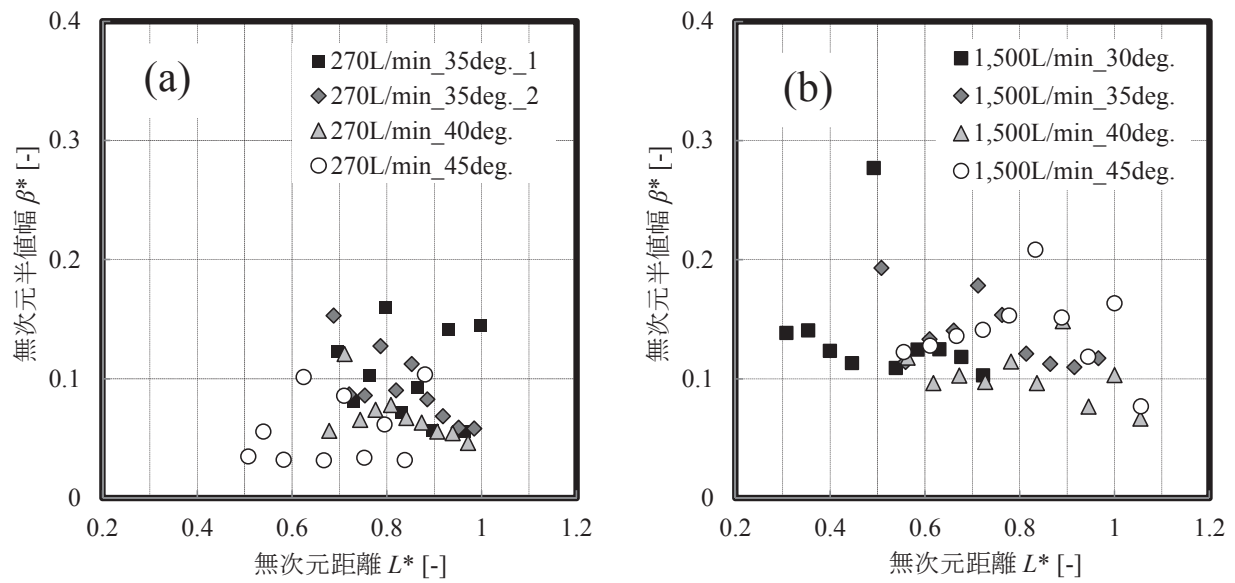


図 3.3.10 無次元半値幅 $\beta^*$ と無次元距離 $L^*$ の関係

(a) 屋外小規模（流量 270 L/min）、(b) 中規模（1,500 L/min）

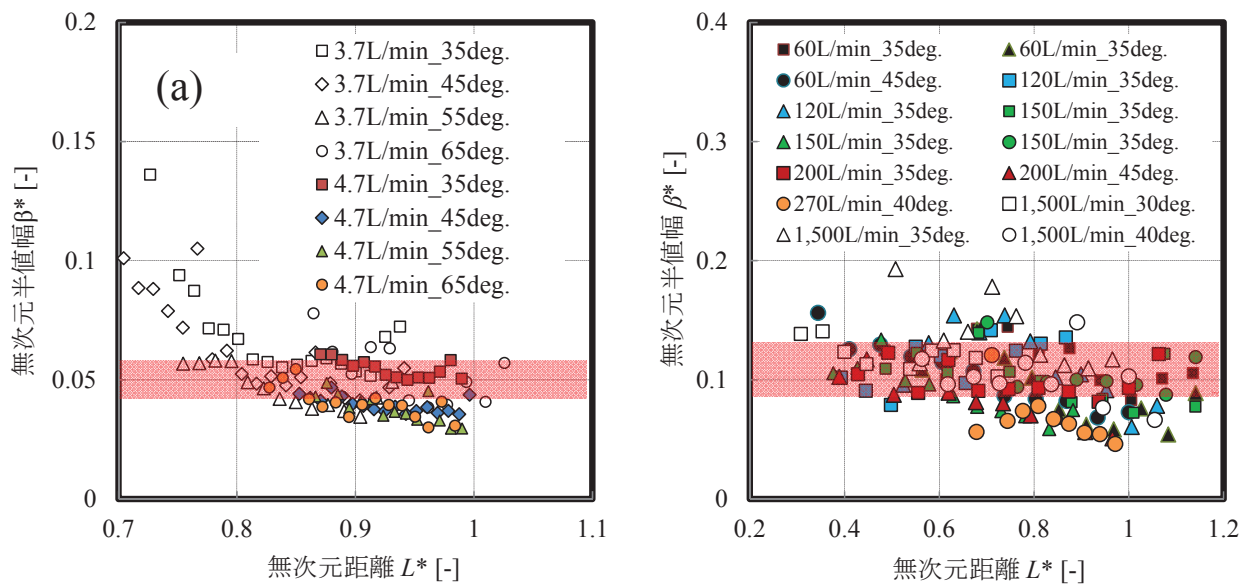


図 3.3.11 無次元半値幅 $\beta^*$ と無次元距離 $L^*$ の関係

(a) 屋内放水実験（ $\beta^* \approx 0.05$ ）、(b) 屋外放水実験（ $\beta^* \approx 0.11$ ）

### 3.3.3 射程方向の分散分布の規格化

射程方向の分散分布は、フットプリントの中心軸を通る水量値 $Q_c$ について、Rosin-Rammler 分布により規格化を試みた。Rosin-Rammler 分布を適用した理由は、正規分布と異なり、極大値の前後で左右非対称の分布形状であるため、図 3.3.2 の側面図や図 3.3.4 のような分布を再現できると考えたためである。特に石油タンク内に泡消火剤を投入する際には、極大値以降の水量値を把握することが重要となるため、この分布による近似が効果的であると考えられる。

Rosin-Rammler 分布は、石炭粉砕物の積算ふるい上分布（オーバーサイズ質量分布）を表すのに用いられた粒度分布式で、粒子直径を $d$ 、平均粒子直径を $d_m$ 、均等数を $n$ とすると、残留質量分率 $R_m$ は以下の式(3.3.4)で表される<sup>49, 50, 51</sup>。ここで、右辺に含まれる 0.693 の数値は、 $R_m = 50$  [%]の中位径（平均粒子径） $d_m$ を代入した際に式に現れた $\ln 2 = 0.693$ の数値である。

$$R_m = \exp\left(-0.693\left(\frac{d}{d_m}\right)^n\right) \quad (3.3.4)$$

図 3.3.12 は、 $d_m = 1.0$  [mm]と置いた時に $n$  の値を 0.4、1.4、2.4、3.4 とした時の積算分布と、それを微分して求めた頻度分布のグラフを示す。積算分布が 50%の時、すなわち平均粒子径は 1 mm となり、そこを基点として分布の形が変化していることが分かる。また、 $n$  の値が大きくなるほど分布が狭く、小さくなるほど分布の広がりが大きくなっている。つまり、Rosin-Rammler 分布のグラフは、平均粒子直径 $d_m$ と均等数 $n$ に依存して分布形状が変化することが分かる。従って、射程方向の分散分布を規格化するためには、Rosin-Rammler 係数（平均粒子直径 $d_m$ 及び均等数 $n$ ）と放水パラメータ（放水圧力、流量、角度、射程距離など）との相関性を見つけることが重要となる。そのために、まずは各放水実験で測定された水量値から Rosin-Rammler 係数を求めることとする。

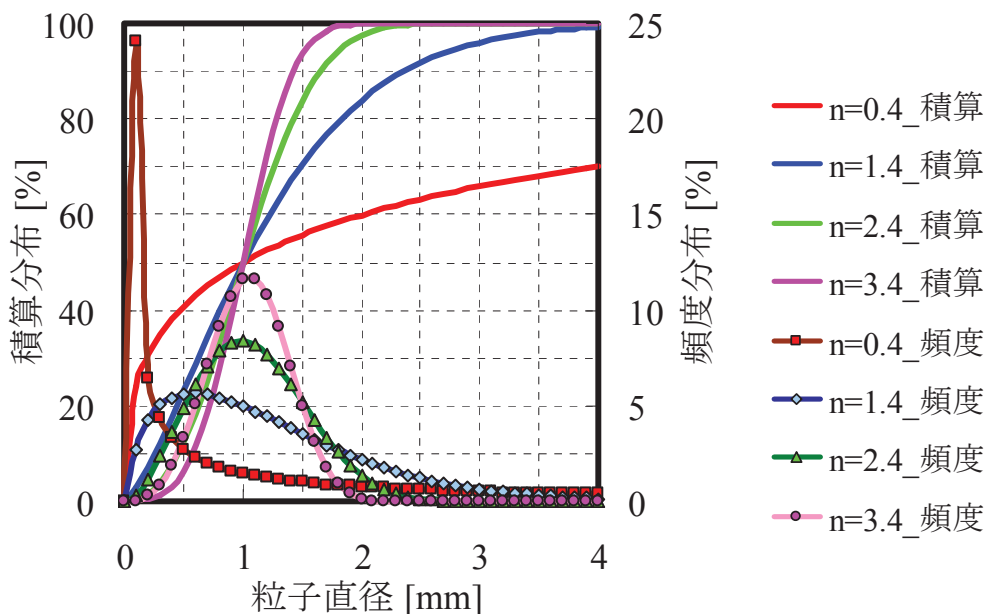


図 3.3.12 Rosin-Rammler 分布の積算分布及び頻度分布

Rosin-Rammler 分布は、本来ならば粉体の粒子直径を表す式であるため、横軸は粒子直径 $d$  [mm]である。しかし、ここでは射程方向の分散分布を Rosin-Rammler 分布で近似するため、便宜上粒子直径 $d$  [mm]をノズルからの距離（射程距離） $L$  [m]、平均粒子直径 $d_m$  [mm]を平均射程距離 $L_m$  [m]と見なす。これは、粉体の分級操作（粒子特性の差に従って分離する操作）を行う際に、水平流形重力分級機による手法を参考としている。この装置は、粒子の慣性力を利用したもので、粒子を水平気流中に投入すると、大きな粒子は手前（粗粒側）に落下し、小さな粒子は気流に乗って水平方向に移動して投入口から離れた位置（微粒側）に落下することで分離する<sup>49, 52)</sup>。本実験の場合で考えると、径の大きな粒子は慣性力が大きいために空気抵抗を受け難く遠くまで飛翔する。逆に径の小さい粒子は慣性力が小さく、空気抵抗を受けてすぐに落下する。従って、粒子径と粒子の飛翔距離の間には、物理的な関連性があると考えられる。

以上より、式(3.3.4)の粒子直径 $d$ をノズルからの距離（射程距離） $L$ に置き換え、射程距離 $L$ について解くと式(3.3.5)が得られる。

$$L = \left( -\frac{\ln(1 - R_m)}{0.693} \right)^{\frac{1}{n}} \times L_m \quad (3.3.5)$$

ここで、射程距離 $L$ が最大射程 $R$  [m]となる時には $R_m = 0.99$ となる。従って、平均射程距離 $L_m$ が分かれば、式(3.3.6)により均等数 $n$ を求めることができる。

$$\begin{aligned} R &= \left( -\frac{\ln(1 - 0.99)}{0.693} \right)^{\frac{1}{n}} \times L_m \\ &= (6.645)^{\frac{1}{n}} \times L_m \\ n &= \log_{\left(\frac{R}{L_m}\right)} 6.645 \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

均等数 $n$ を求めるため、図 3.3.13 に示すような頻度分布及び積算分布のグラフを作成する（ここでは、代表として、流量 1,500 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40°の中規模放水実験で測定された水量値のグラフ）。まず、放水実験で得られた射程方向中心軸上の水量値 $Q$  [L/min/m<sup>2</sup>]の合計値を $Q_s$  [L/min/m<sup>2</sup>]とすると、それぞれの水量値を $Q_s$ で割った値 $Q/Q_s$  [-]は頻度分布のグラフとなる。そして、 $Q/Q_s$  [-]を水捕集升の設置間隔で微分すると積算分布のグラフが得られる。この積算分布のグラフにおいて、 $R_m = 50$  [%]となる値（中位径）、すなわち平均射程距離 $L_m$ を読み取る。実測された最大射程 $R$ と平均射程距離 $L_m$ から、式(3.3.6)を用いて均等数 $n$ を求める。

以上の手順により、各放水実験で測定された分散分布から、Rosin-Rammler 分布の均等数 $n$ を求めることができた。図 3.3.14 に実験値と Rosin-Rammler 分布との比較を示すように、射程方向の分散分布を再現できていることが分かる。その他の実験データにおいても、上記手順を用いて均等数を算出したところ、それぞれ良い一致が得られた。

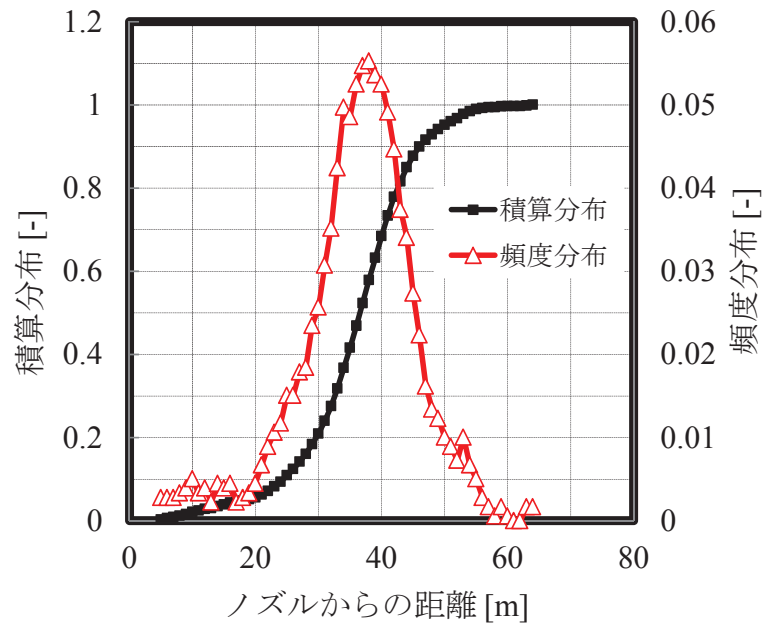


図 3.3.13 実験値から算出した積算分布及び頻度分布のグラフ

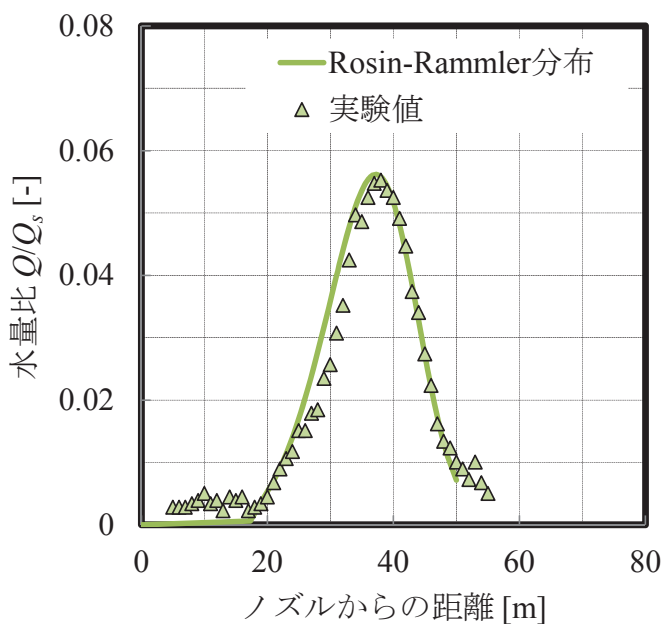


図 3.3.14 実験値と Rosin-Rammler 分布の比較

次に、均等数  $n$  と放水時のパラメータとの相関性について検討する。均等数  $n$  は、分布の広がり起因するパラメータであり、最大射程や圧力、流量、角度等と関係性があると考えられる。ここで、最大射程  $R$  [m] の無次元数  $R^*$  を式(3.3.7)のように定義する。

$$R^* = \frac{gR}{V^2} \quad (3.3.7)$$

ただし、重力加速度を  $g$  ( $=9.8 \text{ m/s}^2$ )、放水圧力から式(3.2.1)を用いて算出した放水速度を  $V$  [m/s] とする。図 3.3.15 は、無次元射程  $R^*$  を横軸とし、均等数  $n$  を縦軸に取ったグラフを示す。両者の間には強い相関が見られるため、均等数  $n$  は式(3.3.8)を用いて算出可能であることが示唆された。

$$n = 4.35R^* + 3.5 \quad (3.3.7)$$

最大射程 $R$ は、3.2.2節の最大射程に関する予測式より、ノズル径と圧力から求めることができるため、式(3.3.12)を用いて平均射程距離 $L_m$ も算出でき、分布を予測することが可能となった。ただし、小規模放水実験（流量 4.7 L/min、圧力 0.08 MPa）のデータについては、図 3.3.15 中において近似直線から大きく外れている。これは、ノズル形状の違いや屋内と屋外での風の有無による違いのためであると考えられるが、現段階ではこれ以上の相関性を見つける事ができなかった。今後、均等数 $n$ と放水パラメータとの関連性について再検討を行い、流量規模に依存しないパラメータの導出・有用性の検討を行う必要がある。

この規格化では、縦軸を水量比 $Q/Q_s$ としているが、各水量比を最大水量比で割ることにより、図 3.3.4 のような最大水量を 1 とした水量比が得られる。従って、Rosin-Rammler 分布により、射程方向中心軸上の水量比 $Q_c$ を予測する事が可能となり、射幅方向の正規分布と組み合わせて、分散分布の予測が出来ると考えられる。しかし、水量値を $Q$  [L/min/m<sup>2</sup>]を求めるには、最大水量値 $Q_{max}$  [L/min/m<sup>2</sup>]を知る必要があるため、実際の水量分布を予測することはできない。従って、最大水量値 $Q_{max}$ と放水パラメータの関係性について考察を行い、近似式により算出する必要がある。

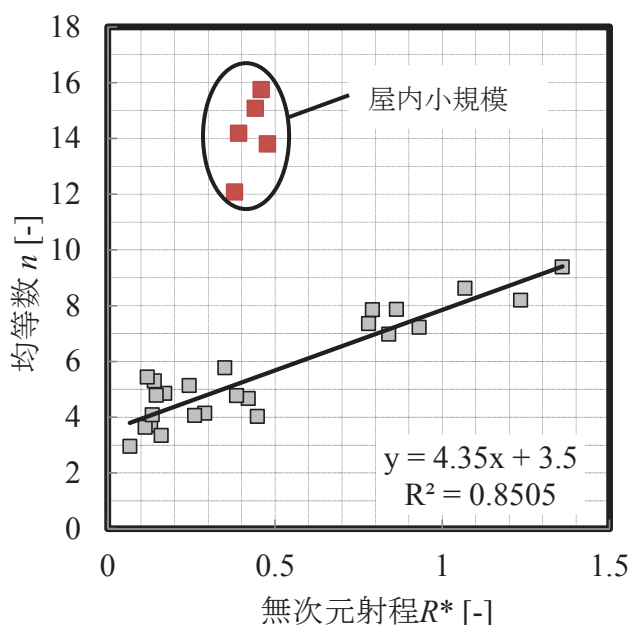


図 3.3.15 均等数 $n$ と無次元射程 $R^*$ との関係

### 3.4 第3章のまとめ

棒状放水時の最大射程及び最大射高について、それぞれ物理的機構および観察結果に基づくモデル化を行い、計算値 $R_{cal}$ 、 $H_{cal}$ を導出した。この計算値と実験値を比較した結果、流量 5～40,000 L/min、圧力 0.05～1.0 MPa、角度 25°～65°の棒状放水の範囲において、良い予測結果が得られたことから、棒状放水に関する模型実験の妥当性を得ることができた。

射幅方向及び射程方向の分散分布について、正規分布や Rosin-Rammler 分布により規格化を行い、分散分布を予測することが可能となった。ただし、5 L/min 以下の小規模流量については、再検討が必要である。また、実際の水量値を予測するため、最大水量値 $Q_{max}$ と放水パラメータの関係性についても考察を行う必要がある。



## 第4章 MPS法による放射シミュレーション

粒子法は、連続体を有限個の粒子によって表し、連続体の挙動を粒子の運動により計算する方法である。各粒子は速度や圧力といった変数を保持しながら移動するため、従来の差分法や有限要素法に必要な格子は使わない。そのため、複雑形状に対する最適な格子生成の作業が不要となる。また、連続体の挙動を記述するのに、ラグランジュ法を用いているため、支配方程式に対流項が現れないので、対流項を離散化すると生じる数値拡散や数値振動の心配がなく、また流体の移動に伴う格子のゆがみがないという利点がある。これは、流体解析における自由表面を有する流れや混相流、構造解析における大変形を伴う超弾性体解析や破壊、さらに流体と構造物の相互作用する場合に適している。本研究では、数ある粒子法の中でも、特に MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いて計算を行った。MPS 法は、東京大学大学院の越塚誠一教授らによって提案された粒子法の一つで、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて連続体の支配方程式を離散化するものである<sup>53, 54, 55)</sup>。非圧縮性流れの解析のために半陰的アルゴリズムを用いて開発されたため、水柱の崩壊や碎波が計算され、自由表面の大変形のみならず、激しい水面の変化や飛沫の発生、液体の分裂や合体といった自由表面流れの計算を安定的に解くことができる<sup>56, 57)</sup>。

本研究に粒子法を用いた理由は、泡の放射が粒子の分裂や合体を伴う非圧縮性の流れであり、空気の巻き込みや泡消火剤の発泡による物性値の変化などの計算が行えること。タンク内に泡を投入する場合、油と泡の混相流を考える必要があり、液面での各粒子の挙動を解析するのに適していること。また、3次元シミュレーションに拡張する場合、基本的に粒子間距離の計算に第3番目の次元を追加するだけであり、プログラミングが容易であることが挙げられる。さらに、火災による熱伝導に伴う、粒子の温度変化や沸騰といった相変化の現象にもモデル化することができるため、今後の研究を幅広く行うことが期待できる。

MPS 法と同じ粒子法の一手法に SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法がある。SPH 法は、シミュレーションの歴史が長く、MPS 法とは物理量分布の定義が異なる<sup>58, 59)</sup>。両者の間に本質的な違いはほとんど無いが、MPS 法が水や速度の遅い空気 (流速 $\ll$ 音速) のような非圧縮性流れの解析を対象として提案された手法であることが、本論で同手法を用いた理由である。また、MPS 法での自由液面は、粒子数密度の低下により判定するので、液面形状を描く必要が無く、流体の分裂や合体を計算する際にも特別な取り扱いが不要であるため、界面の大変形を伴う解析を容易に扱うことができる。本論で取り扱う現象は、空気中における水流の変化を解析するものであり、水粒の分裂や合体を計算する必要がある。さらに、最大射程 100 m 以上の大空間の解析に加えて、1~7 mm の水粒の挙動を表現する必要があるため、界面の変化が大きい現象の解析が可能で、近似的なモデルを取り入れやすい MPS 法を選択した。

MPS 法の欠点としては、タイムステップ毎に近傍粒子の検索及び近傍粒子との相互作用を計算するため、計算労力が大きいことが挙げられる。特に流体計算だけでなく気流計算を行う場合には、空気の粒子を構築する必要があるため、厳密に計算するためには計算時間が膨大になる<sup>60)</sup>。本論では流体計算のみを行う 1-way の手法を用いるため、近似的なモデル (水塊の分裂モデルや発泡モデル) を提案した。

## 4.1 シミュレーションモデル

### 4.1.1 MPS 法

MPS 法では、非圧縮性流れの支配方程式として以下のものを用いる。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4.1.1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} \quad (4.1.2)$$

式(4.1.1)は質量保存則（連続の式）、式(4.1.2)は運動量保存則（Navier-Stokes 方程式）である。連続の式は、密度が時間に対して一定であり、同時に速度の発散もゼロになる。 $D/Dt$ はラグランジュ微分で、流体とともに移動する視点からの時間微分であり、ラグランジュ法ではこれがそのまま時間微分となる。Navier-Stokes 方程式の左辺は、速度ベクトルに対するラグランジュ微分である。右辺第 1 項は圧力勾配項、第 2 項は粘性項、第 3 項は重力項である。ここで、 $\nu$ は動粘性係数である。

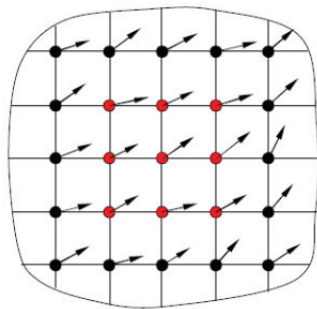
粒子法の基本的な課題は、格子を用いずにどのように微分方程式を離散化するかということである。MPS 法では、勾配、発散、ラプラシアンといったベクトル解析の微分演算子に対して、それぞれに粒子間相互作用モデルを用意したものを利用する。以下に MPS 法の離散化の基本的な考え方を説明する。

#### (1) 重み関数

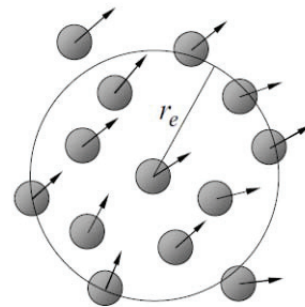
粒子間相互作用モデルには、式(4.1.3)で表される重み関数 $w$ を利用する<sup>61)</sup>。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r \leq r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (4.1.3)$$

ここで $r$ は粒子間距離である。従って、式(4.1.1)の重み関数を用いると、粒子間距離がパラメータ $r_e$ より短い場合のみ粒子間で相互作用することになる。 $r = 0$ で $w$ は無限大になるが、これは非圧縮性流れの解析において計算を安定にする効果がある。パラメータ $r_e$ は小さいほど相互作用する粒子の数が減るので計算時間が短くなるが、小さすぎると計算が不安定になる。そこで、計算時間と計算の安定性のバランスから、パラメータ $r_e$ を粒子間距離の 2～4 倍としている。この場合、相互作用する近傍粒子の数が 2 次元では 12～44 個程度になる。差分法では、隣接する格子点の数は 4～8 個で、粒子法より計算時間が短くなるが、3 次元化に伴い、微分演算子を展開すると項の数が著しく増加するため、プログラムが困難になる（図 4.1.1 参照）。しかし、MPS 法の粒子間相互作用モデルでは、基本的に粒子間距離の計算に第 3 番目の次元を追加するだけであり、プログラミングが簡単である。



差分法／有限要素法による格子間相互作用



MPS 法による粒子間相互作用

図 4.1.1 粒子間相互作用

## (2) 粒子数密度

粒子数密度とは、粒子 $i$  及びその近傍粒子 $j$  の位置ベクトルをそれぞれ $\vec{r}_i$ 、 $\vec{r}_j$ とすると、粒子 $i$ の位置における重み関数の和をとったものである（図 4.1.2 参照）。よって、粒子数密度 $n_i$  は、式(4.1.4)のように示される。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (4.1.4)$$

粒子数密度 $n_i$  は、流体の密度 $\rho$  に比例する。非圧縮性流れでは流体の密度は一定であるため、粒子数密度も一定でなければならない。この一定値を $n^0$ とすると、初期粒子配置において十分内部にある粒子（重み関数の半径 $r_e$ の中に自由表面がない）の粒子数密度を計算することで求められる（図 4.1.3 参照）。

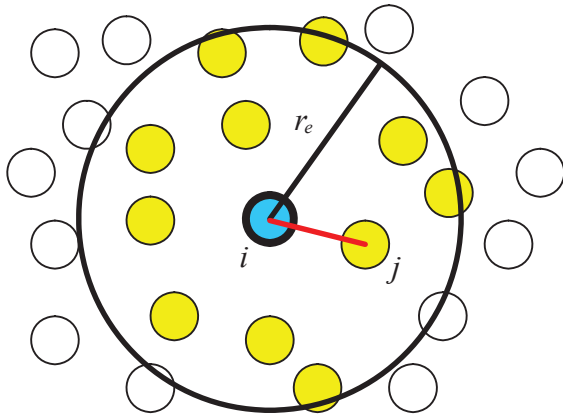


図 4.1.2 粒子数密度 $n_i$ の計算

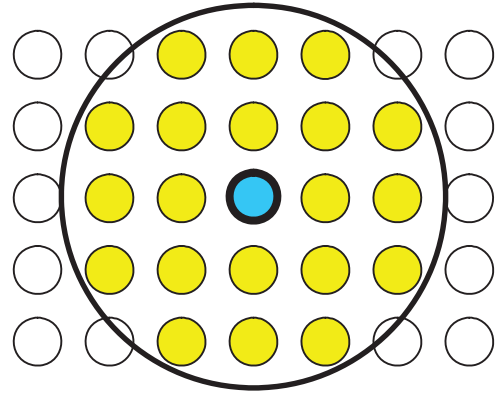


図 4.1.3 基準となる粒子数密度 $n^0 = \text{const}$

## (3) 勾配モデル

粒子 $i$  の位置における物理量 $\phi$ （圧力などのスカラー変数値）の勾配（Gradient）モデルは、式(4.1.5)に表される。図 4.1.4 及び図 4.1.5 に示すように、勾配モデルは、粒子 $i$  とその近傍粒子 $j$  との間で単純な勾配ベクトルを定義し、重み関数を掛けて平均を取ったものである。ここで、 $d$  は空間の次元数である。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4.1.5)$$

SPH 法の場合には、まず物理量の分布をカーネル関数（MPS 法の重み関数に相当）の重ね合わせで表現し、この分布を微分するため、空間微分はカーネル関数の微分の重ね合わせになる。SPH 法と MPS 法の空間微分を比較すると、粒子配置が乱雑である場合には、MPS 法の方が微分値がばらつきにくい。

MPS 法の勾配モデルは、有限体積法の考え方を踏襲している。有限体積法では、セル中心に配置された変数の 1 階微分はセル境界に現れ、セル中心で 1 階微分が必要なときは、セル境界での 1 階微分を平均化する。粒子法では、粒子がセルに相当すると考えると、1 階微分は粒子間に現れると考えるのが順当であろう、そして、粒子位置での 1 階微分は粒子間で得られる微分値を重み関数で平均化したものとする。

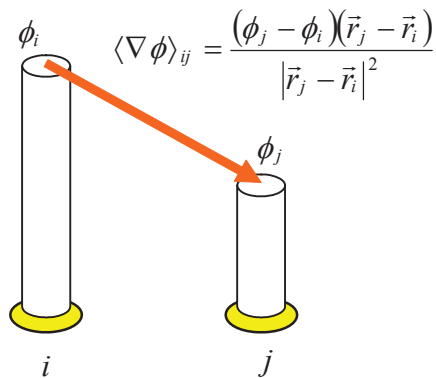


図 4.1.4 粒子間での勾配モデル

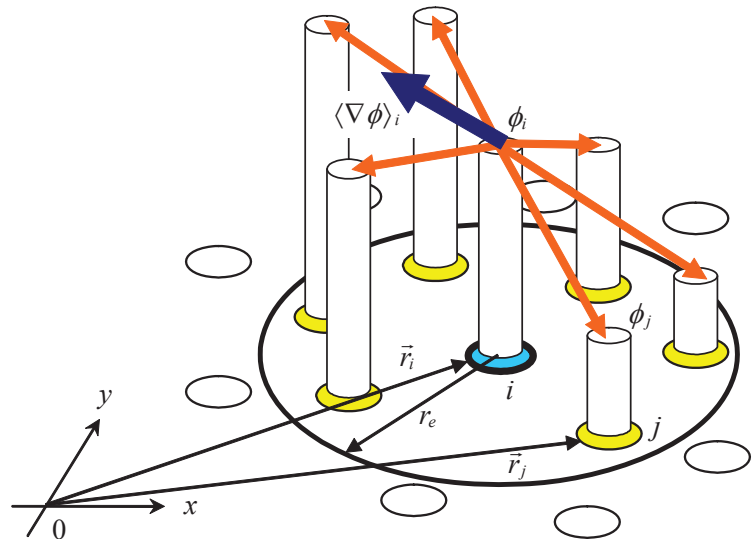


図 4.1.5 粒子位置での勾配モデル

#### (4) 発散モデル

発散 (Divergence) は、ベクトルに作用してスカラーが得られる演算子である (図 4.1.6)。粒子  $i$  とその近傍の粒子  $j$  が、それぞれ位置ベクトル  $\vec{r}_i$ 、 $\vec{r}_j$  と、ベクトル変数値  $\vec{u}_i$ 、 $\vec{u}_j$  を保持しているとする、発散モデルは式(4.1.6)で表される。ここで、ベクトル変数が粒子間  $ij$  に配置されている場合には、 $\vec{u}_j - \vec{u}_i$  を  $\vec{u}_{ij}$  と置き換えることとする。

$$\langle \nabla \cdot \vec{u} \rangle_i = \frac{2d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{\vec{u}_{ij} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4.1.6)$$

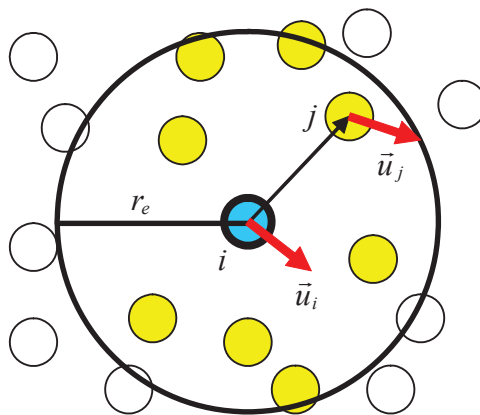


図 4.1.6 発散モデル

## (5) ラプラシアンモデル

ラプラシアン (Laplacian) モデルを次の式(4.1.7)で与える。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (4.1.7)$$

これは図 4.1.7 に示すように、粒子*i*の変数値の一部を近傍粒子*j*に重み関数の分布で分配することを意味している。ここで、係数 $\lambda$ は、分布の統計的な分散の増加を解析解と一致させるために導入する (式 (4.1.8))。係数 $\lambda$ を具体的に求めるには、初期粒子配置で十分内部の粒子において計算したものを用いる。

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} [|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2 w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)]}{\sum_{j \neq i} [w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)]} \quad (4.1.8)$$

ラプラシアンは物理的には拡散を意味しており、各粒子が保持している物理量をラプラシアンモデルとしてガウス分布による分配を行う。ここで、計算時間を節約するため、重み関数を用いて有限の距離までしか達しない分布で分配するようにする。

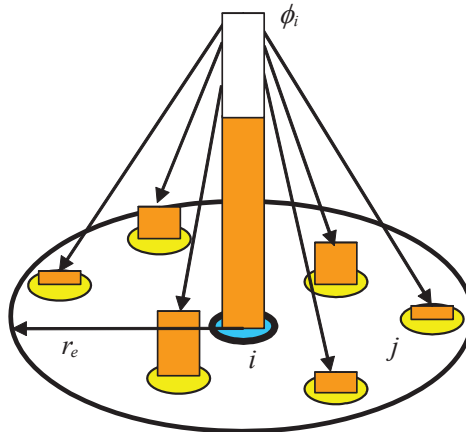


図 4.1.7 ラプラシアンモデル

## (6) 計算アルゴリズム

非圧縮性の計算アルゴリズムとして、SMAC (Simplified MAC) 法と同様な半陰的アルゴリズムを適用する (図 4.1.8)。アルゴリズム全体として、時間進行の計算を繰り返しながら過去から未来に向かって進めていくようにする。各時間ステップでは、時*k*刻における各粒子の位置 $\vec{r}_i^k$ 、速度 $\vec{u}_i^k$ 、圧力 $P_i^k$ がわかっているとして、新しい時刻*k* + 1 の値 $\vec{r}_i^{k+1}$ 、 $\vec{u}_i^{k+1}$ 、 $P_i^{k+1}$ を計算する。各時間ステップの計算は陽的な部分と陰的な部分に分かれる。支配方程式では、連続の式と Navier-Stokes 方程式の圧力勾配項を陰に (時刻*k* + 1 の値で)、粘性項と重力項を陽に (時刻*k* の値で) 計算する<sup>62)</sup>。

$$\left[ \frac{D\rho}{Dt} \right]^{k+1} = 0 \quad (4.1.9)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = - \left[ \frac{1}{\rho} \nabla P \right]^{k+1} + [v \nabla^2 \vec{u}]^k + [\vec{g}]^k \quad (4.1.10)$$



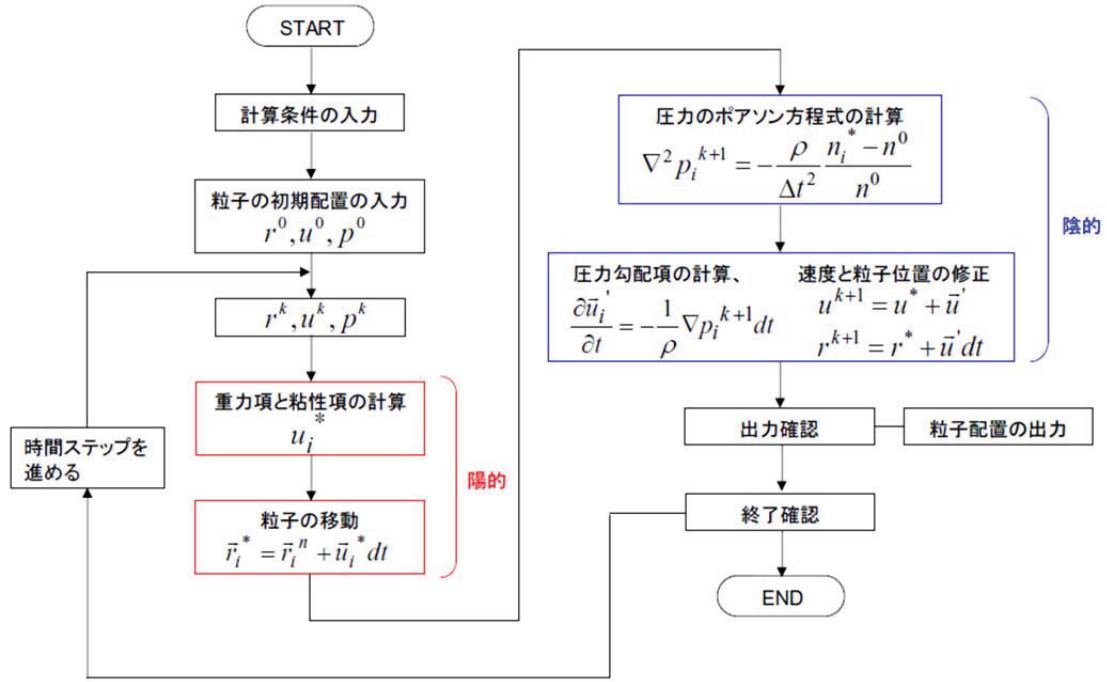


図 4.1.8 非圧縮性流れの計算アルゴリズム

式(4.1.9)と式(4.1.10)を次の手順で計算する。まず、陽的な部分である粘性項と重力項を計算し、粒子の仮の速度 $\vec{u}^*$ と位置 $\vec{r}^*$ を得る。

$$\vec{u}^* = \vec{u}^k + \Delta t [v \nabla^2 \vec{u} + \vec{g}]^k \quad (4.1.11)$$

$$\vec{r}^* = \vec{r}^k + \Delta t \vec{u}^* \quad (4.1.12)$$

式(4.1.11)の右辺には時刻 $k$ の値しか用いられていないため、代入するだけで仮の速度が求められる。式(4.1.12)の右辺における仮の速度 $\vec{u}^*$ は式(4.1.11)ですでに得られているので、やはり代入するだけで仮の位置 $\vec{r}^*$ が求められる。式(4.1.11)の右辺の粘性項にはラプラシアンが含まれており、ここにラプラシアンモデル (式(4.1.7)) を適用する。流体の密度は粒子数密度に比例しているため、連続の式の密度一定条件 (密度の一定値 $\rho_0$ ) は、粒子数密度一定条件と同一で、この時の粒子数密度を $n^0$ とする。

$$\langle \nabla^2 \vec{u} \rangle_i^k = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\vec{u}_j^k - \vec{u}_i^k) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (4.1.13)$$

陽的な部分の計算が終了した段階での粒子数密度を $n^*$ とすると、これは $n^0$ になっていないため、次の陰的な部分で粒子数密度を $n^0$ に戻すことを考える。このとき、粒子の位置、速度、圧力も修正され、その結果として新しい時刻 $k+1$ の値が確定する。

$$n^0 = n^{k+1} = n^* + n' \quad (4.1.14)$$

$$\vec{u}^{k+1} = \vec{u}^* + \vec{u}' \quad (4.1.15)$$

$$\vec{r}^{k+1} = \vec{r}^* + \Delta t \vec{u}' \quad (4.1.16)$$

ここで、 $n'$ は粒子数密度の修正量であり、 $\vec{u}'$ は速度の修正量で陰的な圧力勾配項によって生じるとする。

$$\vec{u}' = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla p^{k+1} \quad (4.1.17)$$

速度の修正量と粒子密度の修正量は、圧縮性流れの質量保存則（式(4.1.18)）より、左辺第 2 項の  $\rho$  を一定値  $\rho_0$  で近似すると式(4.1.19)になる。流体の密度は粒子数密度に比例しているので、式(4.1.20)のように書き換えられる。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.1.18)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.1.19)$$

$$\frac{1}{n^0} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.1.20)$$

ここで、粒子数密度の修正量  $n'$  は、速度の修正量  $\vec{u}'$  によって生じるとし、同時に時間に対して離散化する（式(4.1.21)）。式(4.1.17)の発散をとり、式(4.1.21)に代入すると、式(4.1.22)のような圧力のポアソン方程式が得られる。

$$\frac{n'}{n^0 \Delta t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.1.21)$$

$$\nabla^2 P^{k+1} = -\frac{\rho_0}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (4.1.22)$$

式(4.1.22)の左辺を各粒子位置においてラプラシアンモデル（式(4.1.7)）で離散化すると、未知数  $P_i^{k+1}$  に対する連立 1 次方程式(4.1.23)が得られ、これを解いて新しい時刻  $k+1$  の圧力を求める。

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(P_j^{k+1} - P_i^{k+1}) w(|\vec{r}_j^* - \vec{r}_i^*|)] \quad (4.1.23)$$

連立 1 次方程式の解法としては、CG（Conjugate Gradient）法あるいは ICCG（Incomplete Cholesky Decomposition Conjugate Gradient）法を使う<sup>63)</sup>。求めた圧力を式(4.1.17)に代入すると速度の修正量が得られ、その結果を式(4.1.15)と式(4.1.16)に代入すると、新しい時刻における粒子の速度及び位置が確定する。

式(4.1.17)の圧力勾配項の計算では右辺に勾配演算子があり、ここに勾配モデルを用いるが、数値安定性のため、式(4.1.5)を少し修正した次式(4.1.24)を使う。

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \left( \frac{P_j^{k+1} - \hat{P}_i^{k+1}}{|\vec{r}_j^* - \vec{r}_i^*|^2} \right) (\vec{r}_j^* - \vec{r}_i^*) w(|\vec{r}_j^* - \vec{r}_i^*|) \right] \quad (4.1.24)$$

$$\hat{P}_i = \min_{j \in J} (P_i, P_j), \quad J = \{j : w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \neq 0\}$$

ここで、 $\hat{P}_i$  は粒子  $i$  の圧力  $P_i$  と、その近傍の複数粒子  $j$  における圧力  $P_j$  中の最低値とする。また、粒子  $i$  の近傍で他の粒子が均等に配置されている場合、以下の式(4.1.25)が満たされ、式(4.1.24)は式(4.1.5)と等しくなる。

$$0 = \sum_{j \neq i} \left[ \frac{1}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4.1.25)$$

#### 4.1.2 追加モデル

##### (1) 水流衝突モデル

実際の大容量泡放射砲に使用されるノズルは、空気の吸引方法（泡の発生方法）により三種類に分けられ、今回用いたノンアスピレート型ノズルは、ノズル本体に空気を吸引する機構を持たないタイプである。このノズルで放射された泡水溶液は、空気中で衝突（水流衝突）した際に外部の空気を水流に取り込んで発泡する<sup>22)</sup>。水流衝突現象は、放水時（泡消火薬剤を混合していない場合）にも発生しており、ノズルから棒状に放射された水が収束し、衝突後に噴流拡散する。図 4.1.9 (a)は、流量 15,000 L/min の実規模放水試験時にノズル付近を撮影した写真を示し、水流衝突が視覚的に認められる。また、本実験（流量 1,500 L/min）でも同様の現象を確認しており、図 4.1.9 (b)に示すノズル付近の拡大写真では、大容量の放水実験に比較すれば顕著ではないものの、水流衝突が生じていることが分かる。本研究では、この現象を流体計算のみ行う計算モデル（1-way）で再現するため、ノズル出口付近にテーパを付けることで、強制的に水流衝突を起こした。

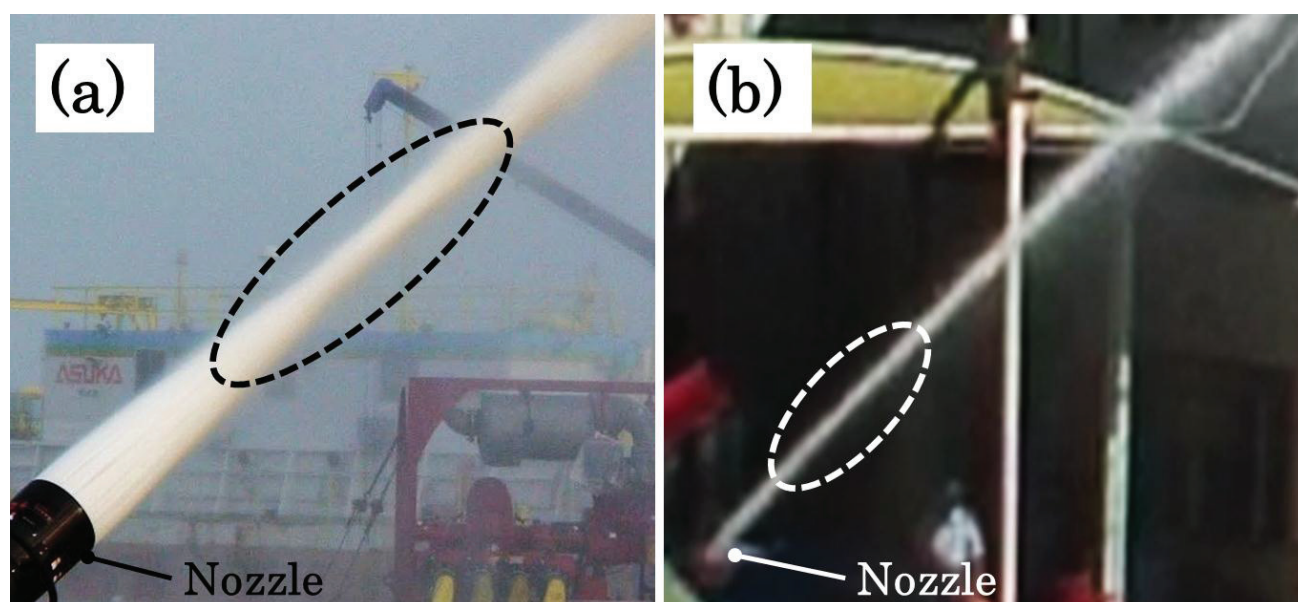


図 4.1.9 ノズルから放射された水塊の水流衝突

(a) 放射流量 15,000 L/min (b) 放射流量 1,500 L/min

流体粒子の放射は、新規流入粒子の初速度に実射と同じ放射速度を与えることで再現した。放射速度は、ベルヌーイの式を用いて放射圧力から算出した結果、37.0 m/s とした。また、放射直後の水流速度を PIV 解析により測定した研究<sup>33)</sup>では、放射速度に約 3% の速度分布が見られたと報告されている。そこで、初速度に $\pm 3\%$ の一様乱数を与えた。放射時間は 60 秒、ノズル高さは 1.2 m、初期粒子間距離は 0.015 m とした。

##### (2) 水塊の分裂モデル

実射において放射された水塊は、空気抵抗の影響を受けて 0.4~7.0 mm の水粒へ分裂した後、地面に落下する。この挙動を正確に計算するためには、最大 100 m の計算領域に対し 1 mm 以下の粒子サイズにする必要があり、計算機の性能に大きく依存してしまう。そこで、各流体粒子に外力として空気抵抗の計

算を取り入れることで、水の流体計算のみ行った。空気抵抗は、式(4.1.26)で示される式で計算される。ここで、粒子の抵抗係数 $C_D$  は、粒子レイノルズ数 $R_e$  が 300～20,000 の範囲であるため、 $C_D = 0.5$  で一定値として計算した<sup>40)</sup>。

$$\vec{F} = \vec{g} - \frac{1}{2m} C_w C_D \rho_{air} S (\vec{u} - \vec{U}) |\vec{u} - \vec{U}| \quad (4.1.26)$$

水塊に掛かる空気抵抗力は、水塊の表面部分のみに作用すると考えられるため、周辺粒子の多少により変化する。そこで、式(4.1.27)に示す低減係数 $C_w$  を用いて重み付けを行った。

$$C_w = 1/N_i \quad (N_i > 0) \quad (4.1.27)$$

$$N_i = \sum_{j \neq i} \frac{r_0}{r} \cdot \frac{|\vec{u}_j|}{|\vec{u}_i|} \quad (r < r'_e) \quad (4.1.28)$$

式(4.1.28)は、空気抵抗用の粒子数密度 $N_i$  を求める式で、MPS 法の粒子数密度 $n_i$  を求める式(4)を応用し、各粒子の影響半径内にある他粒子（近傍粒子）の位置と速度から算出する。影響半径は、図 4.1.10 に示すように進行方向を  $0^\circ$  として $\pm 90^\circ$ の半球形状（二次元の計算では半円形状）とした。これにより、粒子 $i$  の進行方向に近傍粒子 $j$  が十分ある場合には、空気抵抗の影響を受け難くなる。空気抵抗の影響半径 $r'_e$ は、重み関数の影響半径 $r_e$  の 3 倍とした。

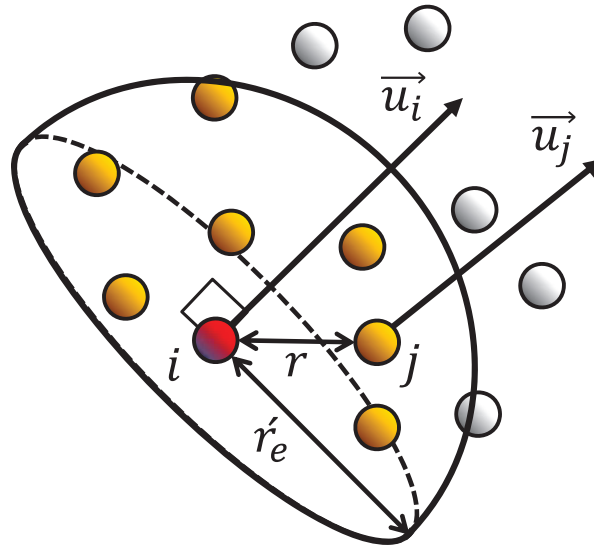


図 4.1.10 空気抵抗計算時における粒子数密度の影響半径

ここで、粒子 $i$  の粒子数密度 $N_i$ がゼロ以上（影響半径内に他粒子がある場合）の状態を水塊と定義する。すると、粒子 $i$  の $N_i$ がゼロになった場合は、他粒子からの相互作用を受けなくなった状態であるため、水塊から分裂したとみなし、剛体球の落体運動として計算を行う<sup>64)</sup>。この時、変化させる流体粒子の径には、式(4.1.29)の Rosin-Rammler 分布<sup>51)</sup>に従う粒径分布を与えることで、水塊が分裂する挙動を近似的に求めた。

$$d = \left( -\frac{\ln(1 - R_m)}{0.693} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot d_m \quad (4.1.29)$$

質量分率 $R_m$ を 0.01~0.99 の一様乱数とすると、分布形を決める $n$  と $d_m$  は、最小粒子径 $d_{min}$ と最大粒子径 $d_{max}$ が決まれば、連立方程式により求めることができる。ここで、 $d_{min}$ と $d_{max}$ は、屋内小規模放水実験時に測定した値と空気抵抗と表面張力の釣り合いの式から計算した値より $d_{min} = 0.4$ 、 $d_{max} = 7.0$ と求められるため、 $n = 2.14$ 、 $d_m = 2.89$ と算出した。本報では、放水時、泡放射時（発泡前）のどちらの場合もこの値を用いて計算を行った。

### (3) 泡消火剤の発泡モデル

泡消火剤（泡水溶液）の発泡には、放射直後の水流衝突による一次発泡と飛翔中に周囲空気を巻き込んで発泡する二次発泡の二種類がある<sup>22)</sup>。この内、一次発泡では発泡倍率が低く、発泡による影響が小さいため、本モデルでは二次発泡のみを考慮した。従って、飛翔中に空気抵抗の影響を大きく受けた粒子、すなわち式(7)の粒子数密度 $N_i$  がゼロになった粒子は、空気の巻き込みにより発泡すると仮定し、発泡判定を与えた。この判定基準は、実際の発泡挙動が正確に分からないため、ここでは取り敢えずの値として定めたが、発泡のし易さを決めるパラメータの一つとして、今後も検討する必要がある。また、泡消火剤の種類やノズルが変化した場合には、この値を調整することで対応できると考えられる。粒子の発泡は、粒子径 $d$ 、密度 $\rho$ 、動粘度 $\nu$  の 3 つの値を変化させることで表現し、発泡の前後で各粒子に掛かる空気抵抗の大きさが変化するようにした。泡消火剤が $\beta$  倍に発泡する場合、発泡後の粒子直径は $d \times \beta^{1/3}$ （泡粒を球形と仮定）、密度は $\rho/\beta$ （発泡前は  $1,000 \text{ kg/m}^3$ ）とした。動粘度については、発泡前は水の動粘度  $8.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$  とし、発泡後は実験時に測定した泡の動粘度  $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$  に変化させた。また、実験時に測定した発泡倍率は約 6 倍であったため、発泡倍率 $\beta$  の分布には平均 6.0、分散 1.0 の正規分布を与えた。泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令<sup>65)</sup>により、薬剤を認定する際に規定の濃度が決まっているため、泡の物性値は上記と大きく異なることはない。また、泡から水への還元に伴う粒子の消滅については、着地までの時間が短い（最大で約 3 秒）ので飛行中の消滅は考慮しない事とした。

### (4) 風の計算モデル

風速は、地表面との摩擦のため境界層流れとなり、高度によってその大きさが変化する<sup>66)</sup>。そこで、各流体粒子に掛かる風速は、式(4.1.30)により粒子の高さ方向座標に基づく風速に換算した値を用いた。式(4.1.30)は、千葉県のパークヤードで観測された風速データより、地上から 10 m 地点で測定した平均風速を各高度での風速に換算する式である<sup>67)</sup>。これにより、流体粒子の高さが高くなるほど、風速が大きくなり、逆に地表付近では風の影響をほとんど受けなくなる。

$$\vec{U} = \frac{\vec{U}_{10}}{(10/h)^{0.25}} \quad (4.1.30)$$

また、放射実験時、風向・風速の値は一定でなく、風速が $\pm 1.0 \text{ m/s}$ 、風向が $\pm 40^\circ$ の乱れが見られた。この乱れの影響により放射軸が射幅方向に揺れ動くため、射幅方向の分散分布は、乱れの無い時と比べ 2 ~ 3 倍に広がると考えられる。この乱れをシミュレーションに取り入れるため、平均風速を  $0.0 \text{ m/s}$  とした風速の測定データと風向の平均値を  $0^\circ$ とした風向の測定データをそれぞれフーリエ解析した。解析結果で得られた振幅スペクトルのグラフから主要な周波数を風速の場合は 6 つ、風向の場合は 7 つ抜き出し、それぞれ式(4.1.31)の振幅と周波数に代入して正弦波を足し合わせた関数を作成した<sup>68)</sup>。



$$f(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t) + \cdots + A_n \sin(2\pi f_n t) \quad (4.1.31)$$

合成関数は、各放射条件で測定された値からそれぞれ係数を算出し、シミュレーション時には各放射条件に対応する係数を用いた。ただし、シミュレーションの計算時間は 60 秒であり、分散分布の測定を行った時間の 1/2 であるため、関数の周期は 2 倍にして計算を行った。図 4.1.11 及び図 4.1.12 は、作成した合成関数と実際の測定データの比較であり、それぞれ風速と風向の乱れを示す。また、代表として放射角度 35°と 40°の放水時と放射角度 35°の泡放射時のデータを比較する。図 4.1.11 (c)や図 4.1.12 (c)のような比較的単純な波形のものは、合成関数でおおよそ近似することができるが、それ以外のあまり周期性が見られないデータは、波形に多少の違いが見られた。しかし、図 4.1.11 (a)、図 4.1.11 (b)や図 4.1.12 (a)、図 4.1.12 (b)の最大振幅や周期は、10%程度の差異で近似できているため、シミュレーションに取り入れるには、十分再現されていると考えられる。

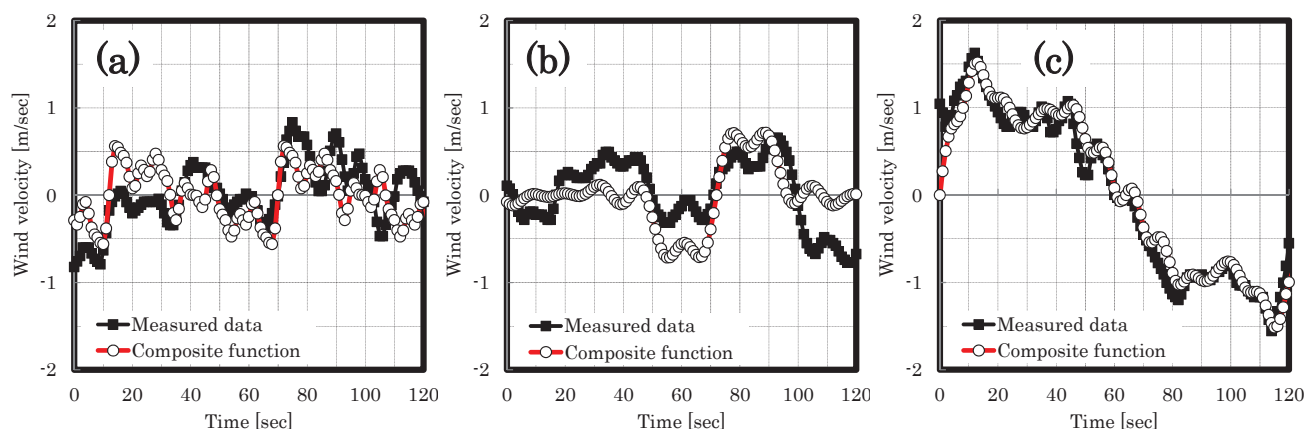


図 4.1.11 風速の測定値と合成関数の比較

(a) 放水角度 35° (b) 放水角度 40° (c) 泡放射角度 35°

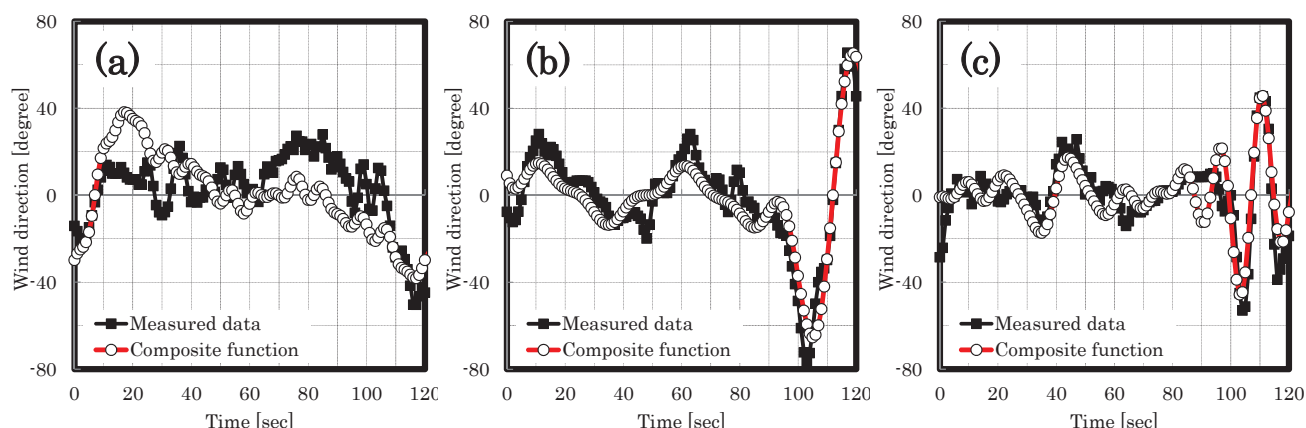


図 4.1.12 風向の測定値と合成関数の比較

(a) 放水角度 35° (b) 放水角度 40° (c) 泡放射角度 35°

## 4.2 中規模放射シミュレーション

### 4.2.1 計算条件

シミュレーションの放射条件は、基本的に実験時と同様に設定した。流体粒子に与える初速度は、放水圧力からベルヌーイの式を用いて算出した値を用い、各放水圧力によって変化させた。ノズル高さは、どの放射条件においても実験時と同様に 1.2 m で統一した。風速風向については、実験時の風速風向値をフーリエ変換して作成した正弦関数の合成関数を用いることで、実験時に近似した風で計算を行った。計算の時間間隔は  $1.0 \times 10^{-4}$  秒、3.00 GHz の CPU で計算を行った。

### 4.2.2 妥当性の検証

シミュレーション結果の妥当性は、放射軌跡を真横から撮影した静止画像による比較と放射軌跡（最大射程・最大射高・射幅）による比較とした。静止画像による比較は、水あるいは泡消火剤の粒が飛翔時に創り出す模様を視覚的に比較した。放射軌跡による比較は、実験時に測定された結果とシミュレーションの値を比較し差異を求めることで、数値的な比較を行った。

図 4.2.1 に、放射流量 1,500 L/min の三次元シミュレーション結果の中から、代表として放射角度 35°、追い風 2.0 m/s における放水の結果を示す。放射直後に流体粒子が収束して水流衝突が発生し、その後広がっていく挙動が見られる。また、フットプリント付近に落下する流体粒子が楕円形に広がっていることが分かる。図 4.2.2 には屋外放水および泡放射実験の様子を示し、図 4.2.3 には放射から 10 秒後の瞬間におけるシミュレーション結果を二次元に投影した画像を示す。放水軌跡をビデオカメラで撮影した場合、図 4.2.2 (a) に示すように放射直後の水塊は白い棒状に写っているが、最大射高以降は、細かい水粒に分裂するため写真では捉え難くなる。泡放射の場合は、泡消火剤の発泡で泡粒が大きくなるため、図 4.2.2 (b) のように放水時よりも写真に写り易くなる。そこで、シミュレーション結果の画像では、流体粒子を径の大きさに伴って表示するように設定することで、水塊状態（粒子数密度  $N_t$  がゼロ以上）の粒子や分裂後の粒子径が 6~7 mm の粒子が表示され、それ以下の径の粒子は表示され難くなるようにした（図 4.2.3 (a)）。泡放射に関しても放水と同様の設定で表示した（図 4.2.3 (b)）。実験と計算の画像を比較すると、最大射高付近で水あるいは泡の粒が合体と分裂を繰り返すことで生じる速度の空間的な乱れにより、横縞模様を形成する挙動を再現することができた。泡放射についても、泡粒が瀑状に落下する挙動や最大射高付近で網目状の複雑な模様を形成する挙動を再現できた。

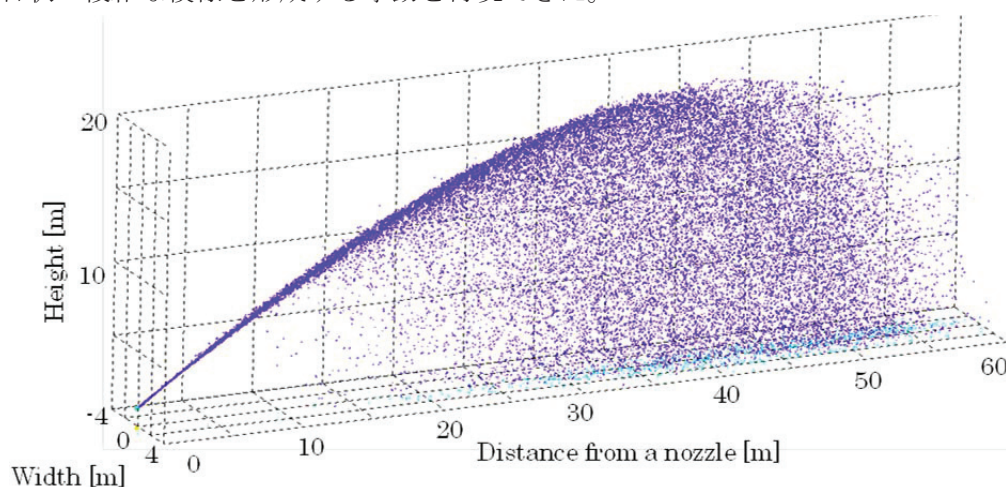


図 4.2.1 流量 1,500 L/min、角度 35°における三次元シミュレーション結果

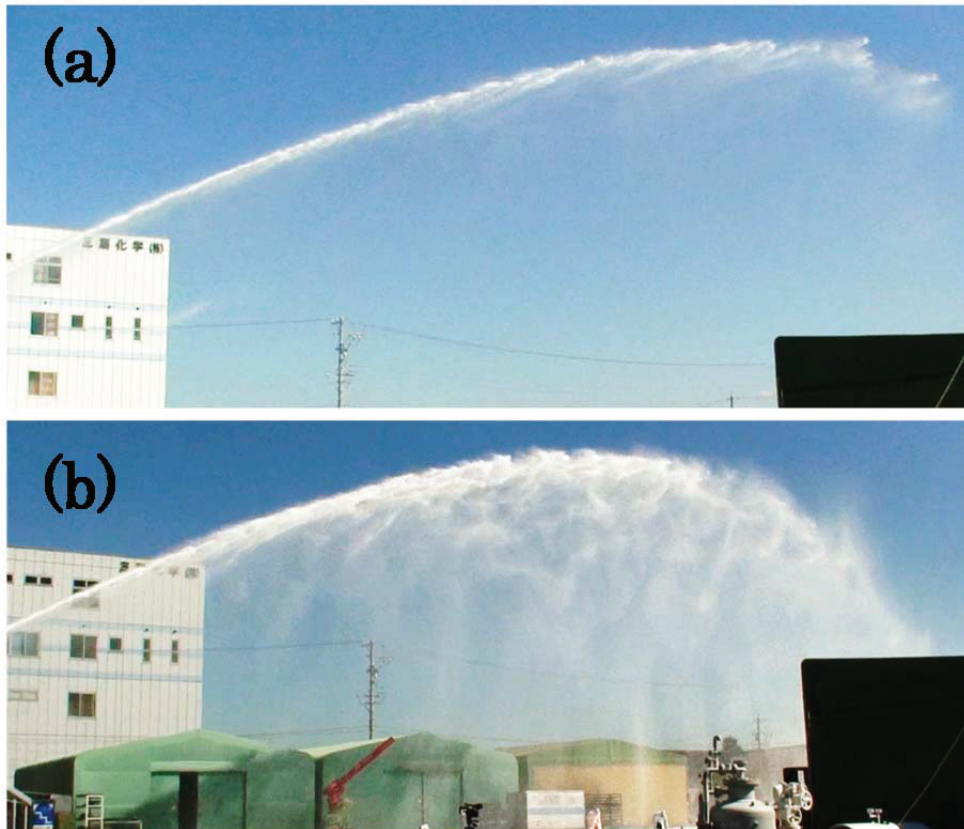


図 4.2.2 放射流量 1,500 L/min、角度 35°における(a)放水及び(b)泡放射実験の様子

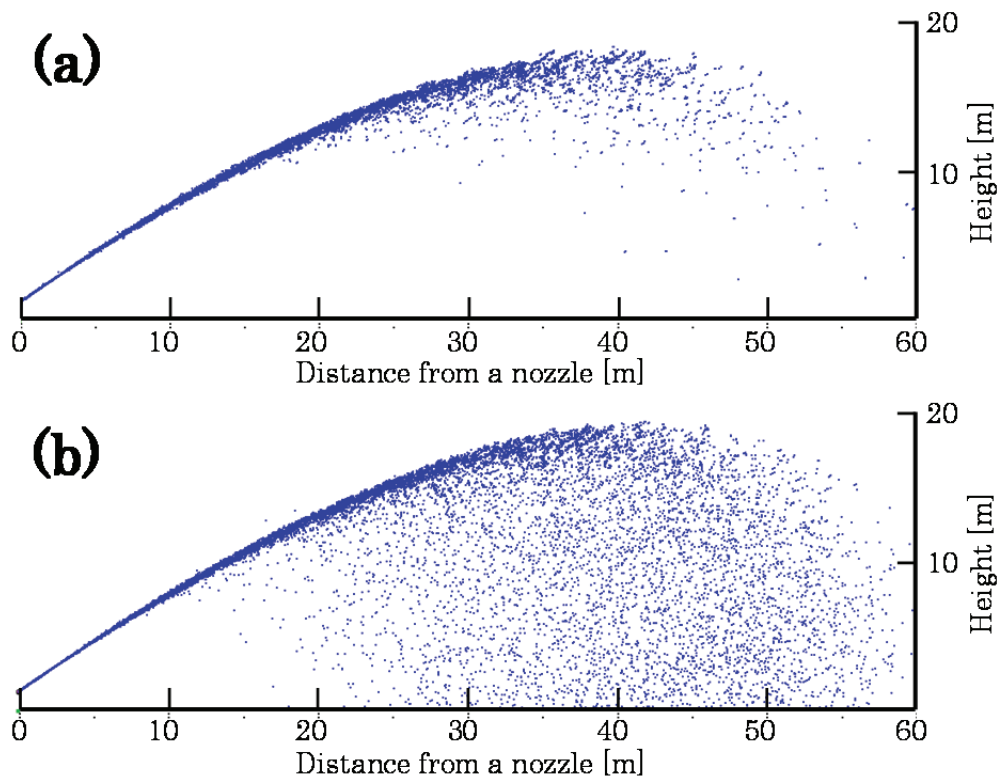


図 4.2.3 放射流量 1,500 L/min、角度 35°における(a)放水及び(b)泡放射シミュレーション

各放射角度における最大射程、最大射高、射幅を実験値と計算値で比較し、差異を算出した結果を表 4.2.1 に示す。射幅に関しては、明確な定義や測定方法が存在しておらず、目視及び画像解析による測定では風による影響で値が大幅に変化してしまう。ここでは、射幅の測定方法として、射幅方向の分散分布を正規分布により近似し、その時の半値全幅から計算を行った。表 4.2.1 より放水時の最大射程と射幅は、10%以下の差異で近似できることが分かった。しかし、最大射高においては、最大で 23%の差異が生じていた。この原因は、三角測量による最大射高測定時、水塊から分裂した水粒が見え難かった事や縞状に流動して最高点が定まり難かったために、実際よりも低い値で測定されたことが考えられる。泡放射では、実験値に比べ計算値の方が射幅の分散分布形状が狭く、約 11%の差異が生じた。この原因として、発泡モデルで設定した発泡倍率の分布が飛翔中の発泡倍率と異なるため、空気抵抗や風の影響に差が生じたと考えられる。実験時に測定した発泡倍率は、地面に落下する直前の泡を採取して測定したため、空気抵抗や水への還元などで飛翔中よりも発泡倍率が低下していることが推察できる。より高精度で射幅方向の分布を予測するためには、飛翔中の発泡倍率を設定する必要があるが、測定が困難であるため、発泡倍率の分布を徐々に変化させてシミュレーションを行い、最適値を決定する必要がある。ただし、正規分布による測定方法は、升の幅に依存して射幅の精度が変化する点も留意する必要がある。使用した捕集升の幅は 0.3 m であり、両端の升幅を考慮すると最大で 0.6 m の差が現れるため、4.6 m の射幅では 13%の誤差が生じる可能性がある。従って、射幅の差異が 13%以下であれば、測定方法による誤差の許容範囲内であると考えられる。

表 4.2.1 実験値とシミュレーション値の放射軌跡の比較

	Angle [°]		Range [m]	Dev. [%]	Height [m]	Dev. [%]	Width [m]	Dev. [%]
放 水	30	M	65.0	8.3	13.7	0.4	3.1	3.2
		S	60.0		13.6		3.0	
	35	M	59.0	4.8	15.7	9.8	3.8	5.2
		S	62.0		17.4		3.6	
	40	M	55.0	8.3	16.3	23.7*	3.7	8.1
		S	60.0		21.4		3.4	
	45	M	54.0	1.8	19.4	16.2*	4.2	4.8
		S	55.0		23.2		4.4	
泡放射	35	M	60.0	1.6	14.1	16.1*	4.6	11.0
		S	61.0		16.8		4.1	

\* 実験値とシミュレーション値の差異が大きいのは、実験値の測定が困難のため

M：実験値、S：シミュレーション値



### 4.2.3 放射特性の解析

図 4.2.4 は、放射角度  $35^\circ$  における放射方向の分散分布を計算値と実験値で比較したものである。60 秒間(実験値は 120 秒間)に捕集した水量を升の開口面積で割ることで  $1\text{ m}^2$  当りに落下する水量を算出し、これを図中の縦軸にとった。また、放水時のシミュレーションは、比較のため風の乱れのある場合と無い場合の結果をプロットした。図 4.2.4 (a)において、風の乱れが無い場合には、最大水量が実験値の約 3 倍大きい値になっているが、風の乱れを入れることで射幅方向へ適度に分散され、実験値と良く一致することが分かる。図 4.2.4 (b)において、泡放射実験時の捕集升配置方法は、射幅方向の分散分布測定のための配置(フットプリント内で放射軸と直角方向に 10 列配置)としたため、放射軸中心付近の水量データは二通り現れる。従って、実験値は二通り分の水量データをプロットし、計算値と比較を行った。計算値の分布形状は、実験値と良く近似しており、20~40 m の範囲の水量分布や最大水量も良く一致している。しかし、実験値の水量がノズルから 40~50 m の範囲で急激に減少している。これは、実験時にフットプリントが測定範囲から外れないように、ノズルを風の方向に対して左右に動かしたため、フットプリント内の最大水量値が大きくなり、その手前の水量が急激に減少したと考えられる。泡放射の再実験を行い、実験データの再現性を検証する必要がある。

図 4.2.5 は、射幅方向の分散分布を示したもので、分布状態を把握するため、最大水量を 1 とする水量比を縦軸にとった。放水時において、風の乱れが無い場合には尖度が大きくピークの鋭い正規分布になっているが、乱れのある場合では尖度の小さい丸みがあったピークとなり、実験値と同様に半値全幅 3.8 m の正規分布で近似できた。泡放射時は、実験値に比べ計算値の方が射幅の分散分布形状が狭くなっているが、分布形状はおおよそ近似しており、十分再現性があると考えられる。また、実験値の分布形状は、中心ではほぼ左右対称な形状をしているのに対し、計算値では左右で若干の偏りが見られる。シミュレーションでは、ノズルの向きは放射方向に固定されているため、射幅方向の分布形状は風の乱れのみを受けることで偏りが現れたと考えられる。放水時と泡放射時と比較すると、泡放射の方が射幅の分散分布が広がっており、泡消火剤は水に比べて分散性が高く、空気抵抗や風の影響を受け易いことがわかる。

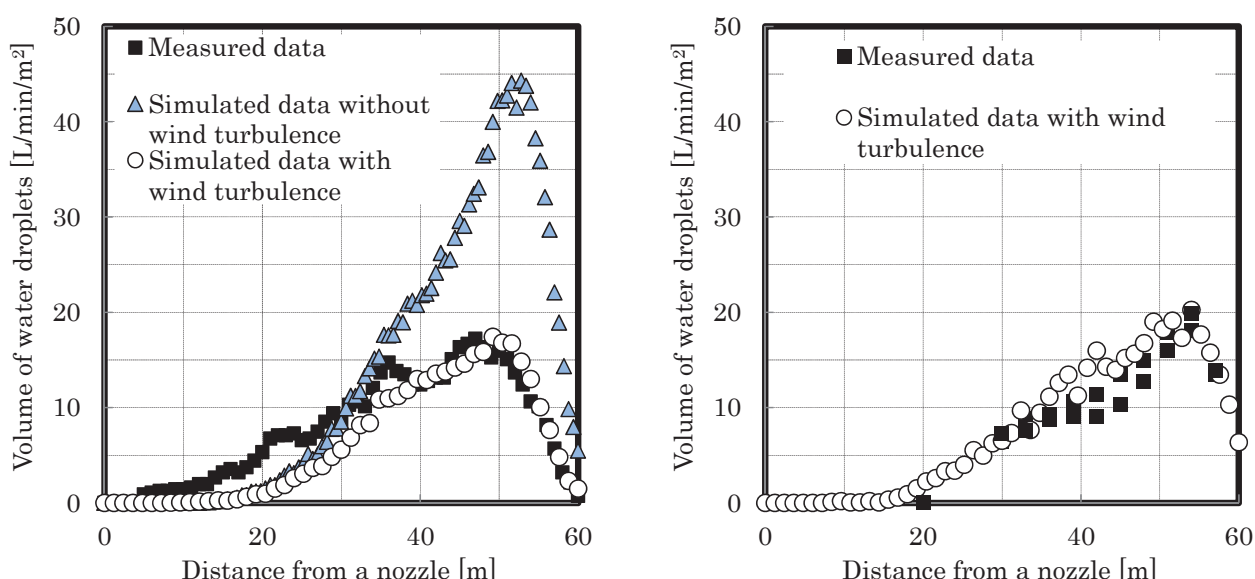


図 4.2.4 射程方向の分散分布における実験値とシミュレーションの比較 (a)放水、(b)泡放射



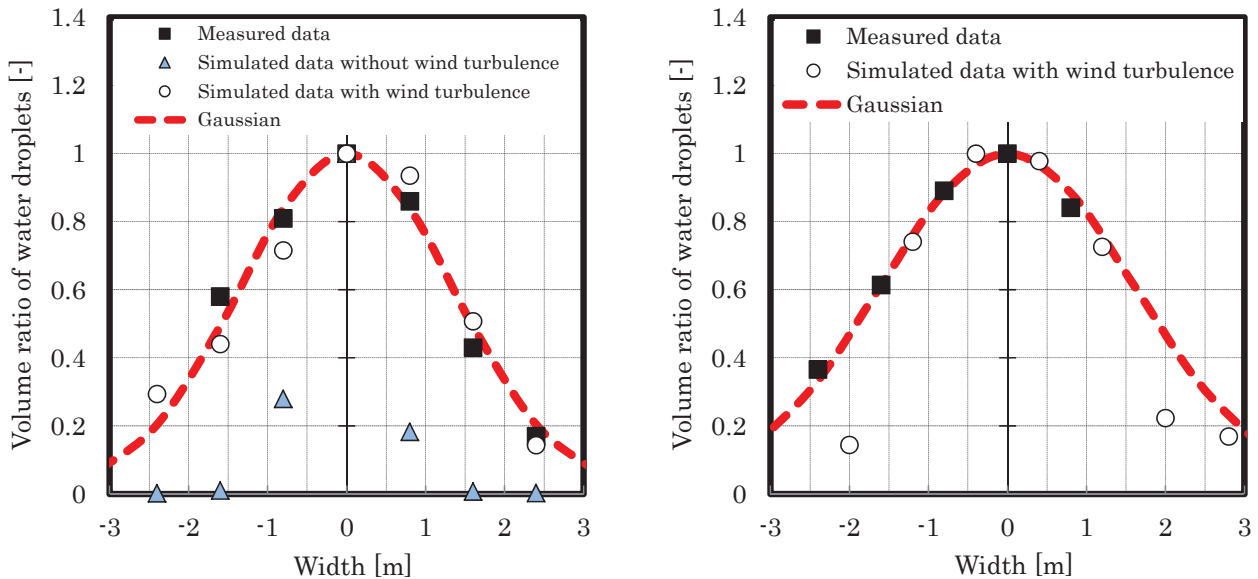


図 4.2.5 射幅方向の分散分布における実験値とシミュレーションの比較 (a)放水、(b)泡放射

図 4.2.6 は、放射流量 1,500 L/min の放射条件でシミュレートされた流体粒子の座標から、各射程距離における流体粒子数の存在率をプロットし、多項式近似により放射軌跡を描いたものである。ここでは、代表として放射角度 35° のグラフを示す。流体粒子の存在率は、放射量に対するタンク内への到達率を現しており、存在率 100% の時の放射軌跡が最大射程及び最大射高となる。また、存在 20% の軌跡を最小射程とすると、ノズルから 40～60 m の範囲がフットプリントと定義でき、水が最も集中して落下する範囲であることが分かる。

タンク内へ効率良く投入できる放射条件（有効射程）を考察するため、図 4.2.6 の四角に示すような直径 20 m、高さ 10 m の仮想タンクへの放水を考える。ここで、ノズルからタンクまでの距離をノズル設置距離とし、放射軌跡とタンク上面部との交点で区画される部分の割合をタンク内到達率とする。ノズル設置距離が 35 m の場合、到達率は約 60% と算出できる。表 4.2.2 は、放射角度とノズル設置距離を変化させた時の到達率をそれぞれ算出した結果を示す。ノズル設置距離を 30～35 m にすれば、どの放射角度でも 50% 以上の投入率が得られることが分かる。また、地形的な問題により、タンクから 35 m 以上離れなければならない場合には放射角度 35°～40° で放射し、35 m よりもタンクに近づく場合には放射角度 45° で放射すれば、効率良くタンクに投入できる。

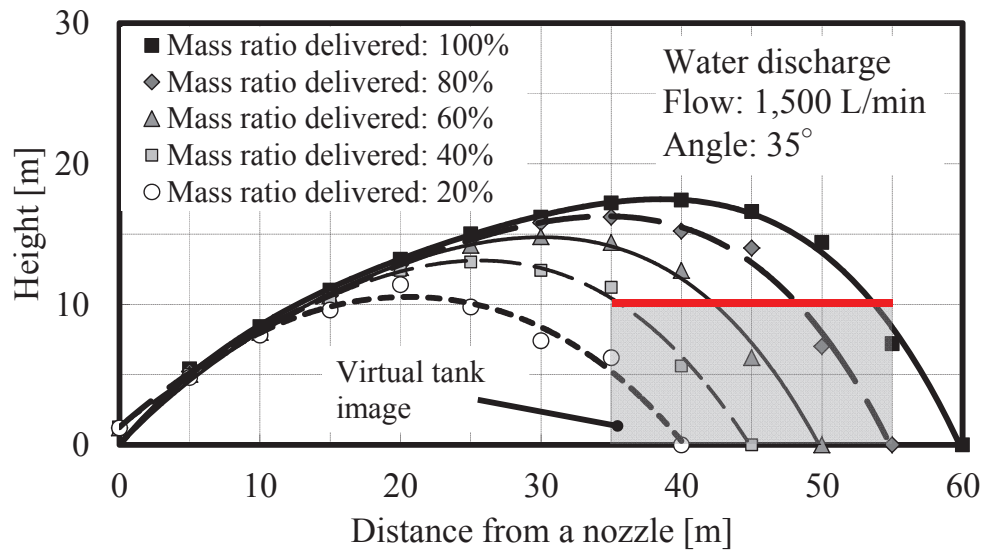


図 4.2.6 流量 1,500 L/min、角度 35°における到達率の軌跡  
(灰色の四角は、直径 20 m、高さ 10 m の仮想タンク)

表 4.2.2 放射角度とノズル設置距離を変化させた時の仮想タンク内への到達率

角度 [°]	Delivery mass ratio into a virtual tank [%]						
	20 m	25 m	30 m	35 m	40 m	45 m	50 m
30	0	50	60	50	40	20	0
35	30	50	60	60	50	35	20
40	20	40	55	65	55	40	20
45	40	60	65	60	40	20	0

### 4.3 実大規模放射シミュレーション

#### 4.3.1 計算条件

実大規模放射シミュレーションでは、放射特性の解析と放射特性データテーブルの作成を目的として計算を行った。データテーブルの作成については、放射軌跡とタンク内への投入率をまとめるため、シミュレーションの放射条件を2通りに分けた。放射軌跡のデータテーブル作成については、放射流量を10,000、20,000、30,000、40,000 L/min、放射圧力を0.6、0.7、0.8、0.9 MPa（放射速度34.6、37.4、40.0、42.4 m/s）、放射角度を30°、35°、40°、45°、50°、風速を0.0、2.0、4.0、6.0、8.0 m/s、風向を追い風及び向かい風（マイナスの記号で表記）とした。また、この場合は風の乱れを取り入れず、火炎からの上昇気流や泡消火剤の発泡は考慮していない。

タンク内への投入率のデータテーブル作成については、放射流量を20,000、30,000、40,000 L/minとし、それぞれ放射圧力を0.7、0.8、0.9 MPa（放射速度37.4、40.0、42.4 m/s）、放射角度を35°、40°、45°とした計算を行った。また、投入を想定するタンクは、石油コンビナートの警防活動計画（2008年）13)を参考に、タンクA：直径φ50 m・高さ20 mとタンクB：直径φ80 m・高さ25 mの2種類を代表とした。各タンクの設置位置は、ノズルから50 mと80 m離れた位置に設置することで計4種類のタンクへの放水をシミュレートした。風速は、実大規模の放水試験時の平均的な値である2 m/s、風向は風の影響が最も大きく現れる横風とし、図4.3.1で示した関数による乱れを与えた（比較のため全ての計算条件で同一の値に設定）。火炎からの上昇気流の影響や泡消火剤の発泡は考慮していない。図2は、MPS法による仮想タンクへの放水の様子を示す。

測定項目は、放射軌跡（最大射程・最大射高・射幅）、地面に落下した水粒子の分散分布、各タンク内への投入率とした。ノズルは、大容量泡放射砲と同様のノンアスピレート型とし、ノズル高さは全ての条件で2.0 mに統一した。計算の時間間隔は $1.0 \times 10^{-4}$ 秒、3.00 GHzのCPUで計算を行った。

表 4.3.1 合成関数の振幅  $A$  と周波数  $f$  の組み合わせ

風 速				風 向			
$A_1$	0.50	$f_1$	0.02	$A_1$	10.76	$f_1$	0.02
$A_2$	0.23	$f_2$	0.03	$A_2$	11.96	$f_2$	0.05
$A_3$	0.52	$f_3$	0.05	$A_3$	7.68	$f_3$	0.07
$A_4$	0.27	$f_4$	0.08	$A_4$	6.19	$f_4$	0.10
$A_5$	0.17	$f_5$	0.09	$A_5$	7.81	$f_5$	0.13
$A_6$	0.13	$f_6$	0.14	$A_6$	5.14	$f_6$	0.15
				$A_7$	5.74	$f_7$	0.20

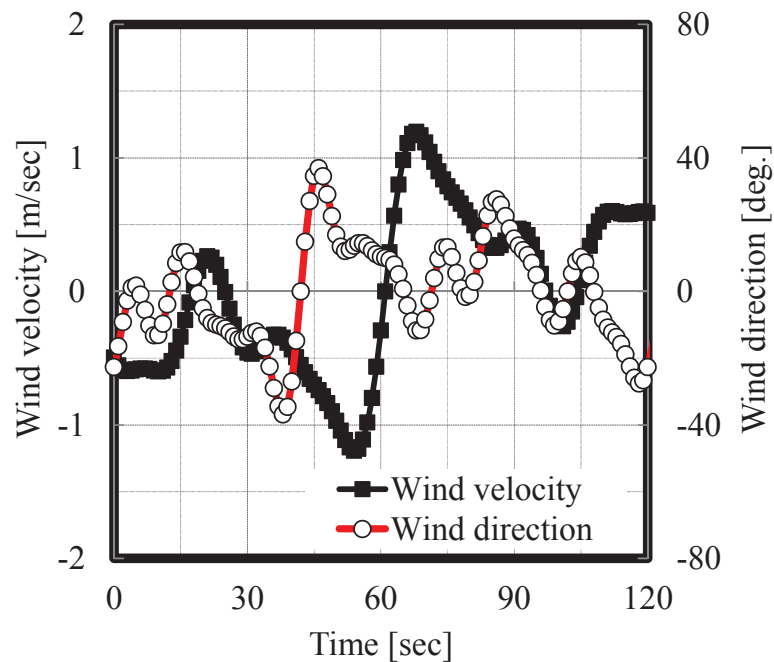


図 4.3.1 合成関数による風速風向のモデル化

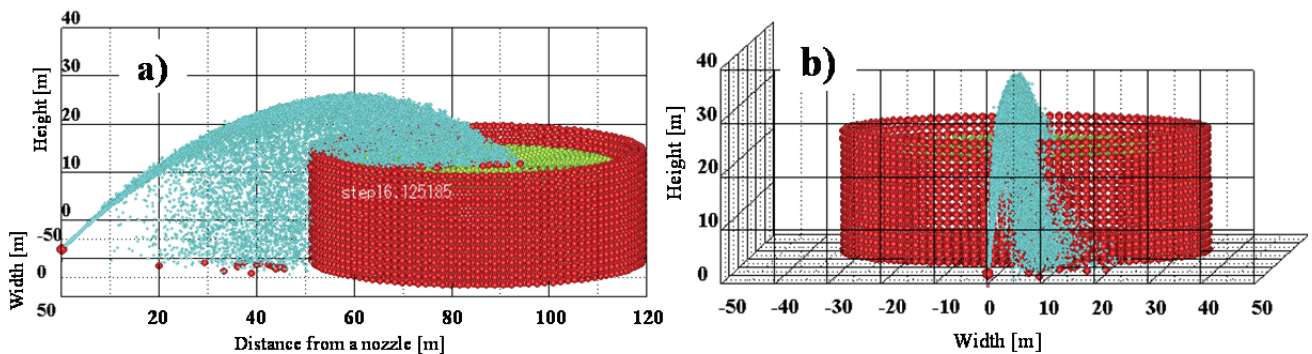


図 4.3.2 MPS 法による仮想タンクへの放水 a) 側面図、b) 背面図

#### 4.3.2 妥当性の検証

シミュレーションで得られた放射軌跡と実際の放水との再現性を検証するため、2009 年に鹿児島で行われた実大規模放水試験 1)と比較した。図 4.3.3 は、放射流量 20,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°における試験時の様子と同放射条件のシミュレーションを示す。図 4.3.3 b)は、放射から 10 秒後の瞬間におけるシミュレーション結果を二次元に投影した画像である。実験写真と比較するため、直径  $\phi 7$  mm 以上の粒子のみ表示し、図 4.3.3 a)に写っている部分と同じ位置の軌跡を抜き出した。放射直後に落下する細かい水粒は写り難く、最大射高付近から落下する水粒が良く一致している。また、放射挙動を比較すると、最大射高付近から徐々に水塊が分裂し、最大射程付近で横縞模様を形成しながら落下する挙動を再現することができた。

表 4.3.2 は、実大規模放水試験の各放射条件において、最大射程・最大射高・射幅を実験値と計算値で比較し、差異を算出した結果である。射程と射高については、どの放射条件においても差異 0.5～10%で良く一致したことから、シミュレーション結果の妥当性が得られたと考えられる。しかし、射幅の比較

では、差異 5～7%で一致している条件や、30～50%の差異が現れている条件もある。これは、風速風向の値や風の乱れが実験時と異なったために生じたと考えられる。特に射幅は、風の影響を非常に受け易く、風向や風の乱れの度合いで大きく変動する。従って、射幅の正確な値を再現するためには、実験時と同じ風の乱れを設定する必要がある。

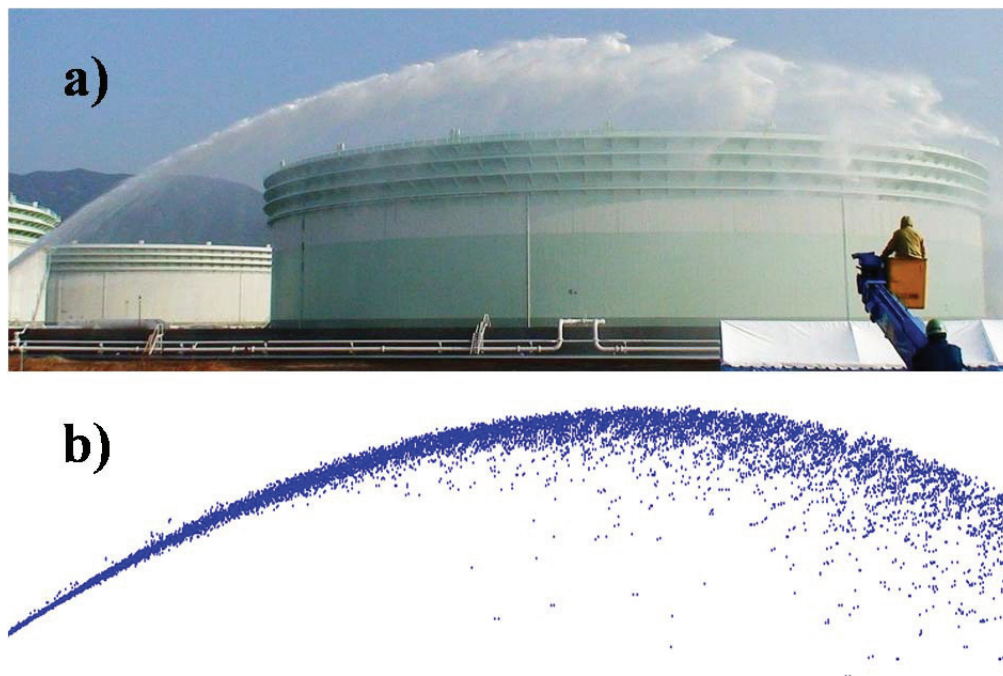


図 4.3.3 流量 20,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°における放射軌跡の比較  
a) 実大規模放水試験（2009 年鹿児島） b) 放水シミュレーション

表 4.3.2 実大規模放水試験とシミュレーションの比較

流量 [L/min]	圧力 [MPa]	角度 [°]		射程 [m]	差異 [%]	射高 [m]	差異 [%]	射幅 [m]	差異 [%]
20,000	0.7	35	Exp.	102	6.7	26	7.7	9	32.2
			Sim.	108.8		24.0		6.1	
		40	Exp.	101	8.5	32	8.6	11	32.6
			Sim.	109.6		29.2		7.4	
		45	Exp.	112	3.5	34	1.8	6	44.6
			Sim.	108.0		34.6		8.7	
	0.8	40	Exp.	119	0.5	32	2.0	8	7.3
			Sim.	118.3		32.6		8.6	
20,000	0.9	40	Exp.	123	2.2	32	11.9	9	5.9
			Sim.	125.7		35.8		9.5	
		45	Exp.	125	3.0	40	5.8	7	57.1
			Sim.	121.3		42.3		11.0	



30,000	0.7	40	Exp.	119.0	2.6	29.0	1.9	9.0	15.1
			Sim.	115.9		29.5		7.6	
		45	Exp.	124.0	6.4	35.0	0.0	9.0	4.8
			Sim.	116.1		35.0		9.4	
	0.9	40	Exp.	141.0	3.5	37.0	1.9	8.0	19.4
			Sim.	136.1		36.3		9.5	
40,000	0.7	45	Exp.	140.0	14.7	39.0	9.9	7.0	30.3
			Sim.	119.4		35.1		9.1	
	0.8	45	Exp.	140.0	6.0	41.0	3.9	9.0	11.3
			Sim.	131.7		39.4		10.0	
	0.9	45	Exp.	150.0	5.4	48.0	9.5	8.0	38.6
			Sim.	142.0		43.4		11.1	

### 4.3.3 放射特性の解析

図 4.3.4 は、代表例として角度 35°における流量と圧力の変化に伴う放射挙動の画像比較を示す。図 4.3.4 a)の流量 20,000 L、圧力 0.7 MPa のシミュレーション結果を基準とし、流量及び圧力の変化について考察する。図 4.3.4 b)は、流量のみを 40,000 L に増加させた場合であり、水塊の分裂が少なく、射程が 7%伸び、20,000 L の時よりも粒子がまとまって落下することが分かる。一方、図 4.3.4 c)は、圧力のみを 0.9 MPa に増加させた場合であり、放射初速度の増加により射程が 16%増加するが、最大射程付近では粒子の分散が大きくなっていることが分かる。図 4.3.4 d)は、流量、圧力をともに増加させた場合で、射程が 29%増加し、図 4.3.4 c)に比べ最大射程付近の分散性も小さくなっている。

図 4.3.5 は、地面に落下した粒子の分散分布を等量線図で表したグラフである。どのグラフも着水域（フットプリント）が楕円形になっていることが確認できる。また、横風 2 m/s の影響を受け、中心軸から右側に偏っている。画像比較の時と同様に図 4.3.5 a)を基準とすると、図 4.3.5 b)及び図 5 d)のように流量が増加するほど中心からのずれが小さく、粒子が集中している。これは、流量の増加により水塊が大きくなり、風の影響を受け難くなるためである。図 4.3.5 c)では、他のグラフに比べて等量線が疎になっており、粒子の分散が大きくなっていることが分かる。また、中心から大きく広がっていることから、風の影響を受け易いことも推察できる。

放射軌跡及び分散分布は、流量と圧力に依って次のような傾向で変化する。①流量のみ増加させた場合、射程はあまり変化しないが、粒子の分散性が小さく、風の影響を受け難くなる。②圧力のみ増加させた場合、射程は長くなるが、粒子の分散性が大きくなり、風の影響を受け易くなる。③放射角度が増加するにつれ滞空時間が長く、空気抵抗や風の影響を受ける時間が長くなる。従って、本論で実施したシミュレーションの中で最も風の影響を受け易い放射条件は、流量 20,000 L/min、圧力 0.9 MPa、角度 45°である。同様に、最も風の影響を受け難いのは、流量 40,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°である。

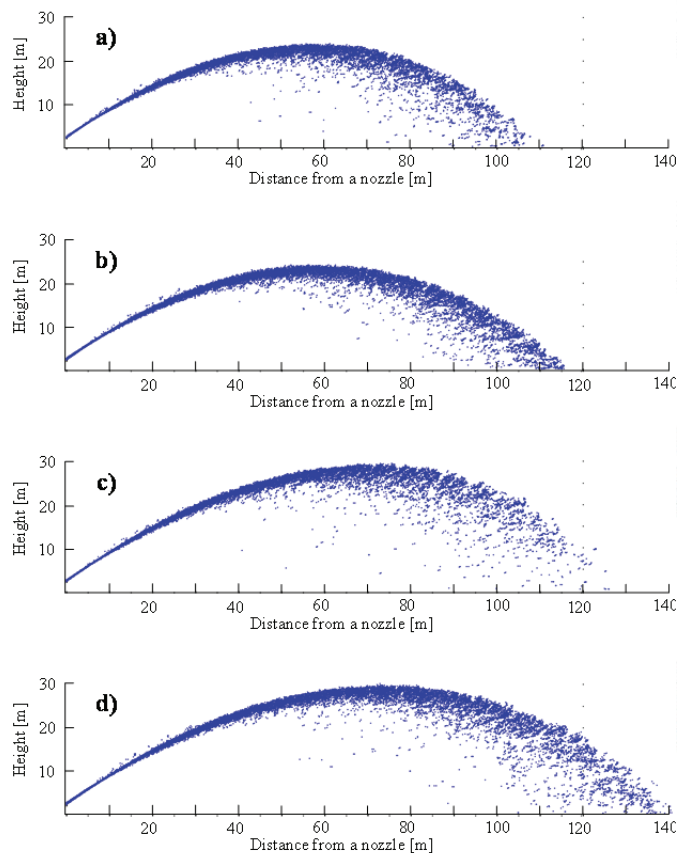


図4 放水シミュレーション側面図

a) 流量 20,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°  
c) 流量 20,000 L/min、圧力 0.9 MPa、角度 35°

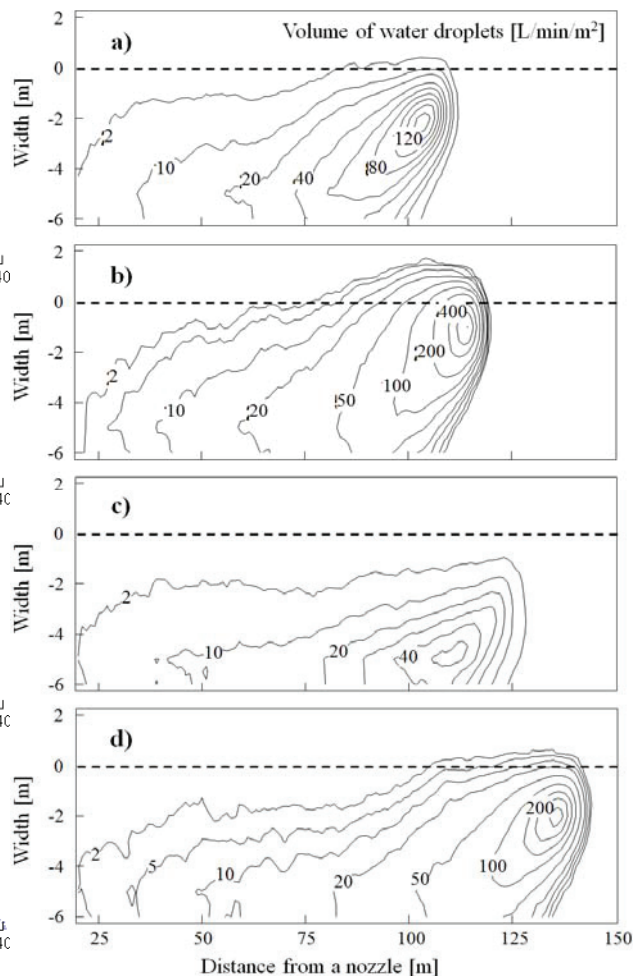


図5 水の分散分布の等量線図

b) 流量 40,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 35°  
d) 流量 40,000 L/min、圧力 0.9 MPa、角度 35°

#### 4.3.4 テーブル化

表 4.3.3 は、各放射条件における放射軌跡及びタンク A・B への投入率をデータベース化したものを示す。投入率が 70%、80%、90%以上の部分をそれぞれ濃淡で示し、特に 90%以上の部分は白抜き文字で示した。タンク位置がノズルから 50 m 離れている場合、タンク A では圧力を 0.9 MPa にすると、射程が長くなり過ぎ、投入率が低下する。また、タンク A は、圧力 0.7、0.8 MPa、角度 35°で 80～90%の投入率が得られるが、タンク B では 10%以下の投入率になっている。これは、タンク B が 25 m の高さであり、それ以下の射高では壁に遮られてしまうためである。従って、タンク B に投入するためには、角度を 40°以上にするか、圧力を 0.9 MPa にする必要がある。また、地形的な問題により、ノズルの位置をタンクから 80 m 以上離す必要がある場合、流量 40,000 L 以上で圧力 0.8 MPa 以上でないと効果的な投入は行えない。以上より、タンク A・B の両方へ効率良く投入できる放射条件は、タンク位置をノズルから 50 m 離れた地点、流量 30,000～40,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40～45°である。

表 4.3.3 各放射条件における放射軌跡及びタンク内投入率のデータベース

流量 [L/min]	圧力 [MPa]	角度 [°]	射程 [m]	射高 [m]	射幅 [m]	タンク内投入率 [%]			
						タンク位置 50 m		タンク位置 80 m	
						タンク A	タンク B	タンク A	タンク B
20,000	0.7	35	108.8	24.0	6.1	85.5	0.0	1.3	0.0
		40	109.6	29.2	7.4	85.2	78.9	35.5	2.1
		45	108.0	34.6	8.7	83.5	82.2	35.8	27.4
	0.8	35	118.7	26.9	6.9	90.7	4.6	47.3	0.8
		40	118.3	32.6	8.6	84.1	85.6	48.3	41.1
		45	115.0	38.5	9.9	79.5	83.1	41.5	39.7
	0.9	35	126.0	29.4	7.6	79.7	72.0	58.6	44.2
		40	125.7	35.8	9.5	72.1	89.7	55.8	53.3
		45	121.3	42.3	11.0	72.3	85.8	46.3	46.5
30,000	0.7	35	113.8	24.2	6.1	87.4	0.0	11.9	0.0
		40	115.9	29.5	7.6	89.2	84.7	55.8	18.5
		45	116.1	35.0	9.4	90.6	90.0	59.2	52.4
	0.8	35	125.1	27.0	7.1	91.5	7.4	62.4	8.2
		40	127.2	33.0	8.9	65.3	88.1	64.6	59.1
		45	126.4	39.2	10.1	61.6	91.3	63.5	62.6
	0.9	35	135.2	29.9	7.9	58.2	76.6	71.7	61.4
		40	136.1	36.3	9.5	51.7	90.2	67.8	66.5
		45	134.6	43.2	11.0	53.6	90.5	64.2	64.6
40,000	0.7	35	116.2	24.3	6.2	89.3	0.0	19.0	0.0
		40	119.5	29.6	7.5	93.2	89.3	68.3	30.4
		45	119.4	35.1	9.1	87.2	90.7	67.7	62.1
	0.8	35	128.7	27.2	6.9	91.2	7.8	70.5	13.2
		40	131.5	33.2	8.4	51.6	90.8	72.9	69.6
		45	131.7	39.4	10.0	48.5	93.5	73.0	72.4
	0.9	35	140.2	30.0	7.6	45.6	78.4	77.4	70.3
		40	142.4	36.5	9.5	39.7	91.6	74.3	73.5
		45	142.0	43.4	11.1	41.6	94.8	74.8	75.2

タンク A : 直径 φ50 m、高さ 20 m

タンク B : 直径 φ80 m、高さ 25 m

## 4.4 放射特性の簡易予測式

### 4.3.1 簡易予測式の概要

MPS 法によるシミュレーションは、微細な放射挙動や放射軌跡及びタンク内投入率のデータベースを作成する事ができるが、計算結果が得られるまでに長時間を要する。そこで、放射特性の簡易予測モデルを構築するため、風速 2、4、6、8 m/s における追い風と向かい風（風速値をマイナスの符号で表記）及び無風時（風速 0 m/s）の MPS 法による詳細シミュレーションを行った。放射条件は、代表として流量 20,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40°とし、風の影響は、一方向のみを考慮し、風の乱れは入っていない。

モデル式を作成するため、放射から 15 秒の瞬間における粒子座標を対象とした（射幅方向の座標は考慮しない）。各射程における粒子の存在率に着目し、その推移により軌跡を描いた。図 6 は、無風時において粒子の存在率を 20%ごとにプロットし、それぞれを多項式（三次関数）の近似により放射軌跡を描いたものである。存在率の軌跡は、放射量に対するタンク内への到達割合を表しており、存在率 100%の放射軌跡が最大射程及び最大射高となる。図中の枠は、投入を想定するタンク（直径  $\phi$  50 m、高さ 20 m、タンク設置位置 50 m）を模擬しており、タンクの大きさや設置位置は任意に設定できる。また、存在率の軌跡と枠上面との交点からタンク内への投入率を求めることができ、図 6 の場合 40%と 100%の軌跡が交わっていることから投入率を約 60%と計算できる。

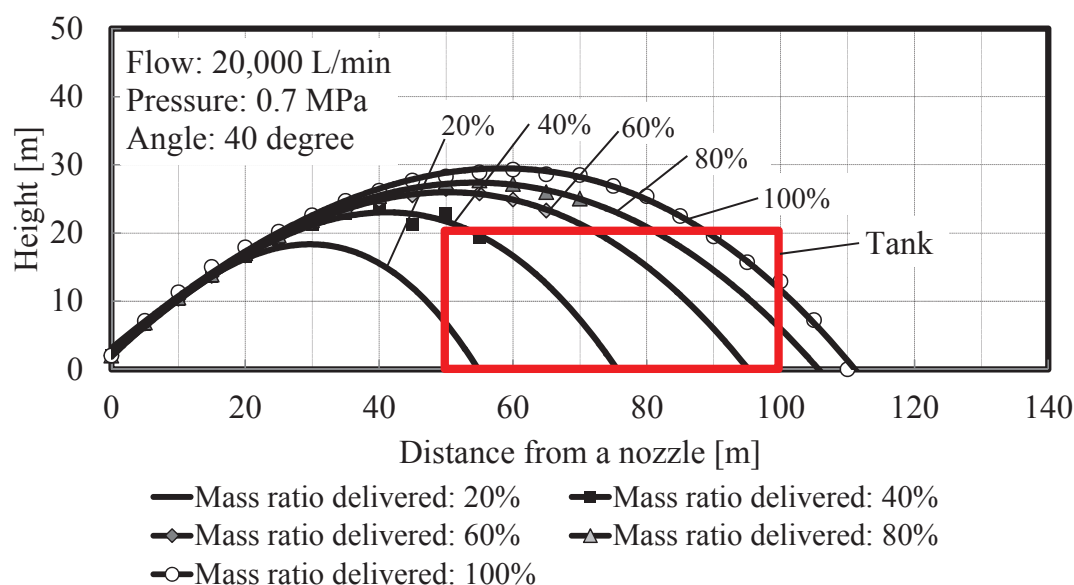


図 4.3.6 無風時における各粒子の存在率の軌跡

全ての放水軌跡が三次関数により近似できると仮定すると、関数の各項にある係数を流量、圧力、角度、風速をパラメータとして変化させることで放水軌跡を再現することが可能である。そこで、空気抵抗の無い場合の斜方投射の式における各項の係数を基準とし、パラメータの増減に伴う係数の変化をそれぞれ関数化した。以上より、式(4.3.2)～(4.3.14)に示すパラメータの関数 $G$ を係数とした簡易予測式(4.3.1)を提案する。

$$h = a_0 G_3(U) G_3(Q) G_3(\theta) M^{-n} x^3 + b_0 G_2(U) G_2(Q) G_2(\theta) G_2(P) x^2 + c_0 G_1(\theta) x + d_0 \quad (4.3.1)$$

$$n = 1.2 + 1.9 \times 10^{-2} U' + 2.1 \times 10^{-3} U'^2 \quad (4.3.2)$$

$$G_3(U) = 1.0 - 0.15 U' + 4.9 \times 10^{-3} U'^2 \quad (4.3.3)$$

$$G_2(U) = 1.0 + 5.0 \times 10^{-2} U' \quad (4.3.4)$$

$$G_3(Q) = Q'^{-0.8} \quad (4.3.5)$$

$$G_2(Q) = 1.0 - \exp(-(Q' + 0.1)/5) \quad (4.3.6)$$

$$G_3(\theta) = 1.0 - 2.86 \theta + 3.0 \theta^2 \quad (4.3.7)$$

$$G_2(\theta) = (\cos \theta)^{-2} \quad (4.3.8)$$

$$G_1(\theta) = \tan \theta \quad (4.3.9)$$

$$G_2(P) = P'^{-1} \quad (4.3.10)$$

係数

$$a_0 = -7.0 \times 10^{-4} \quad [1/m^2]$$

$$b_0 = -2.0 \times 10^{-3} \quad [1/m]$$

$$c_0 = 1.0 \quad [-]$$

$$d_0 = h_0 \quad [m]$$

ここで、到達率 $M$  : 0.1～1 [-] (10～100 [%])、風速 $U$  : -8.0～8.0 [m/s]、放水角度 $\theta$  : 0.52～0.87 [rad] (30～50 [°])、放水圧力 $P$  : 0.6～0.9 [MPa]、放水流量 $Q$  : 10～40 m<sup>3</sup>/min (10,000～40,000 [L/min])、射高 $h$  [m]、ノズルからの距離 $x$  [m]、ノズル高さ $h_0$  : 2.0 [m]とする。風速 $U$ や圧力 $P$ 、流量 $Q$ の値は、それぞれ代表値で割ることで無次元数 $U'$ 、 $P'$ 、 $Q'$ とした。このモデルは、ノズルからの距離 $x$ において、各パラメータの変化に応じた射高 $h$ を求める式である。到達率は、放水流量に対する水の到達割合を示しており、100%の軌跡は最大射程及び最大射高を示す。それ以外の到達率の軌跡は、最小射程及び最小射高を示している。



### 4.3.2 妥当性の検証

簡易予測式の妥当性を検証するため、協議会推奨上限・下限ライン<sup>69)</sup>と比較を行う。図 4.3.7 a)及び図 4.3.7 b)は、代表として流量 30,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 45°、向かい風 0.8 m/s における放水軌跡の比較を示す。到達率 100%の軌跡が上限ラインと、60%及び 70%の軌跡が下限ラインとそれぞれ良く一致していることが分かる。その他の条件についても、両者の軌跡は良く一致していたことから、簡易予測式の妥当性が得られたと考えられる。また、下限ラインが到達率 60%及び 70%の軌跡であることが明らかになったことから、フットプリントは放水流量の 30～40%が集中する範囲であることが示唆された。

各パラメータ値の入力範囲は、今回シミュレーションを行った範囲内であれば、高精度で軌跡を再現できることが分かった。しかし、その範囲外（例えば、流量 50,000 L/min 以上、圧力 1.0 MPa 以上、風速 8.0 m/s 以上）の値に関しては、計算上は再現可能であるがシミュレーションによる解析を行っていない範囲であるため、精度の保証はできない。ここで、簡易予測式の汎用性を検証する一考察として、過去に実施した流量 1,500 L/min、圧力 0.7 MPa の放水実験と比較を行った結果、最大射程及び最大射高は、どの角度においても良く一致することが分かった。従って、流量 1,000 L/min 以下の放水に関しても再現できる可能性がある。

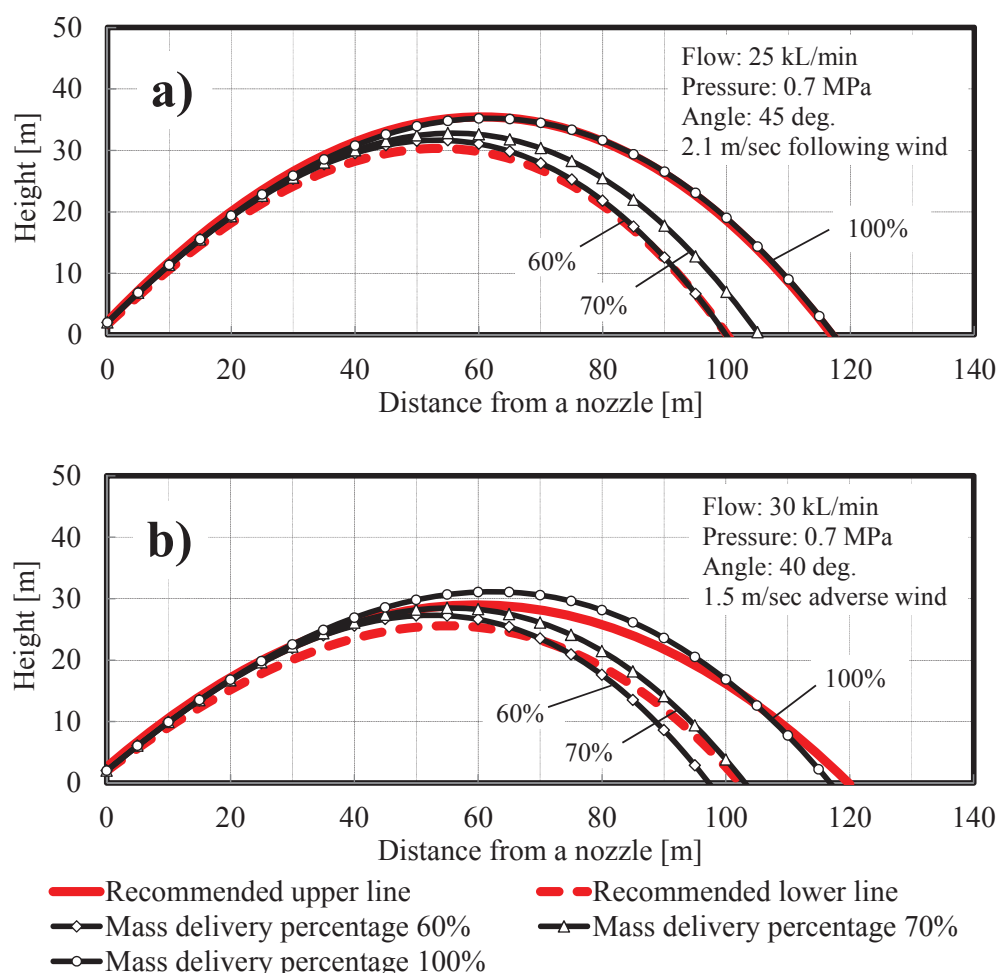


図 4.3.7 放水軌跡の簡易予測モデルと協議会推奨ラインの比較

a) 流量 25,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 45°、追い風 2.1 m/s

b) 流量 30,000 L/min、圧力 0.7 MPa、角度 40°向かい風 1.5 m/s

### 4.3.3 消火支援ツールとしての確立

上述した簡易予測式は、一般的な表計算ソフトを用いることで、放水軌跡を簡易に再現することができる。図 4.3.8 は、マイクロソフトエクセル（ver.2010）を使用した例を示し、各パラメータ（図中の太線・網掛け部分のセル）を任意の値に入力すれば、右のグラフに軌跡が描写される。放水軌跡のグラフ中にある枠は、投入を想定するタンクを示しており、枠の大きさを変化させることで任意のタンク形状への投入率を予測する事が可能である。図③の場合、直径 50 m、高さ 20 m のタンクを想定しており、到達率 40%と 100%の軌跡がタンク上面で接しているため、その差を計算して投入率 60%（=100-40）であると予測する事ができる。

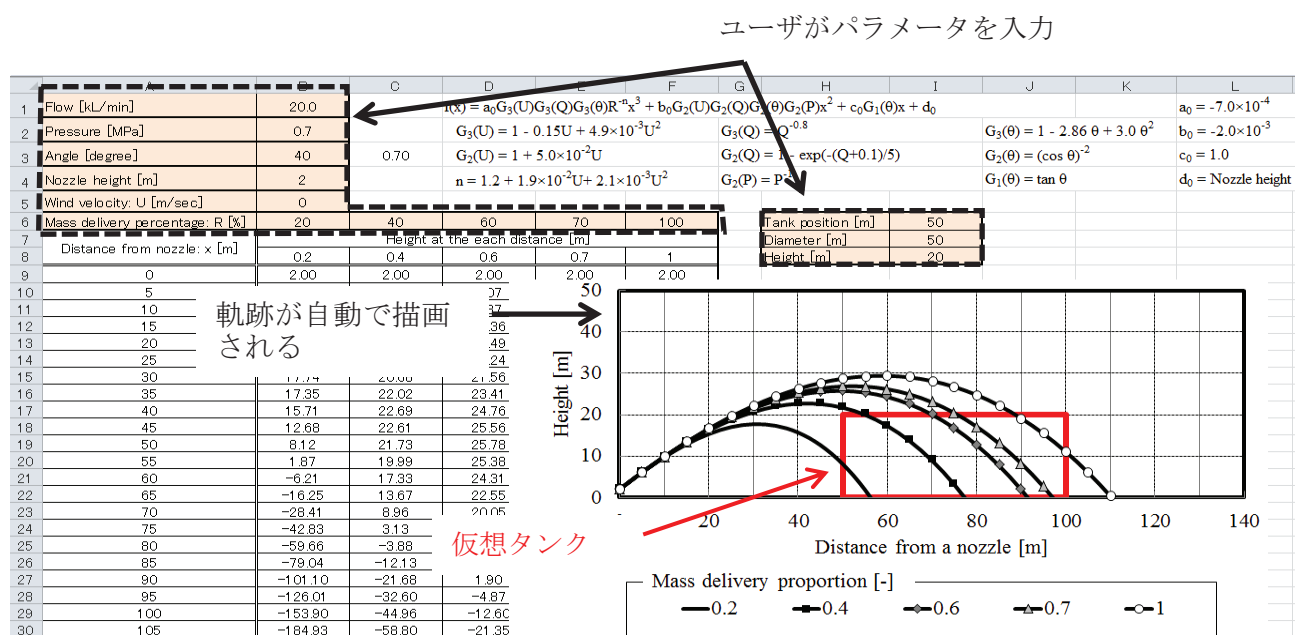


図 4.3.8 マイクロソフトエクセルを用いた放水軌跡の簡易予測モデルの使用例

## 4.5 第4章のまとめ

MPS 法を基盤とし、大容量泡放射砲の三次元放射シミュレーションモデルを構築した。水塊の分裂モデルや泡消火剤の発泡モデルには、Rosin-Rammler 分布と MPS 法の重み関数を応用したモデルを組み込んだ。モデルの妥当性を検証するため、放射流量 1,500 L/min の放水及び泡放射実験と比較を行い、放射軌跡と水の分散分布の定量的な比較を行った。シミュレーションモデルにより計算した放射軌跡（最大射程・射幅）は、実験値と 1～11%の差異で再現することができた。最大射高については、測定困難さもあり、16～24%の差異であった。フットプリントの分散分布は、放射直後に水流衝突を与え、風向・風速に乱れを与えたモデルを組み込むことで、実験値と良く一致する結果が得られた。放射方向の分散分布は、分布形状と最大水量が良く一致し、射幅方向の分散分布は、実験値と計算値ともに正規分布により近似でき、高い再現性が確認できた。実験及びシミュレーションを通じて、放射角度を約 35°とすると最も遠くまで放水できることが分かった。実際の消防隊も 30～35°で放射しており、本実験結果は経験則的な観点からも妥当な結果であると考えられる。以上より、このシミュレーションモデルを用い、実際の消火活動時の気象条件に即した放射軌跡を予測することで、消防計画の立案に役立つことが期待される。

構築した三次元シミュレーションモデルを用い、風の乱れを考慮した大容量放水シミュレーションを行った。実大規模放水試験と比較すると、10%以下の差異で近似したことから、大規模流量範囲におけるモデルの妥当性・汎用性を実証した。流量、圧力、角度を変化させ、計 27 パターンの放射条件における放射軌跡（射程・射高・射幅）をデータテーブル化した。これにより、放水条件の違いによる放射挙動の変化や風の影響の受け易さについての知見が得られた。また、4 種類の実大規模仮想タンクへの放水を想定し、各放射条件におけるタンク内投入率及び投入後の粒子速度をデータテーブル化した。タンク内投入率が 70%以上となる放射条件を明確にすることで、タンク火災を効率良く消火するために最適な放射条件を提案することが可能となった。

シミュレーションした粒子座標から放射特性を簡易に予測できるモデル式を作成し、実大規模の放水試験に基づく実験式（協議会推奨上限・下限ライン）と比較した。その結果、両者の軌跡が良く一致したことから、各パラメータ値の入力範囲が今回シミュレーションを行った範囲内であれば、高精度で軌跡を再現できることが分かった。また、下限ラインが到達率 60%及び 70%の軌跡であることが明らかになったことから、フットプリントは放水流量の 30～40%が集中する範囲であることが示唆された。このモデルにより、風速や存在率の軌跡、タンクの大きさや設置位置を任意の値に設定し、タンク内投入率を予測することができると考えられる。シミュレーション結果が出るまでの間、消火効率の良い放射条件を迅速に提案できるツールとして、役立つことが期待できる。

## 第5章 総 括

本研究では、石油タンク全面火災の消火活動時に使用される大容量泡放射砲を対象として、小型模型による実験、シミュレーション解析を行った。以下に本研究で得た主要な成果を要約し、本論文の結論とする。

第1章では、本研究の位置付けを示し、研究の構成の全体像を示した。

第2章では、放射砲の小型模型を用いた屋内での小規模放水実験、流量 10~270 L/min の屋外小規模放水実験、流量 1,500 L/min の中規模放水及び泡放射実験を実施し、放射軌跡及び水の分散分布を測定した。流量、圧力、角度などの放射条件の変化に応じた放射特性の違いを観察し、データ取得を行った。また、風が放射挙動に及ぼす影響や放水時と泡放射時の違いについて、実験によって検証し考察を深めた。これにより、大規模放射実験では測定が困難であった放射軌跡及び水の分散分布の正確なデータ取得を行うことができた。

第3章では、棒状放水時の最大射程及び最大射高について、それぞれ物理的機構および観察結果に基づくモデル化を行い、計算値を導出した。この計算値と実験値を比較した結果、流量 5~40,000 L/min、圧力 0.05~1.0 MPa、角度 25°~65°の棒状放水の範囲において、良い予測結果が得られたことから、棒状放水に関する模型実験の妥当性を得ることができた。また、射幅方向及び射程方向の分散分布について、正規分布や Rosin-Rammler 分布を用いて規格化することにより、分散分布を予測することが可能となった。

第4章では、MPS 法を基盤とし、大容量泡放射砲の三次元放射シミュレーションモデルを構築した。水塊の分裂モデルや泡消火剤の発泡モデルには、Rosin-Rammler 分布と MPS 法の重み関数を応用したモデルを組み込んだ。モデルの妥当性を検証するため、流量 1,500 L/min の放水及び泡放射実験と比較を行い、放射軌跡と水の分散分布の定量的な比較を行った結果、モデルにより計算した最大射程及び射幅は、実験値と 1~11%の差異で再現することができた。最大射高については、測定困難さもあり 16~24%の差異であったが、測定時の変動誤差範囲内である。フットプリントの分散分布は、放射直後に水流衝突を与え、風向・風速に乱れを与えたモデルを組み込むことで、実験値と良く一致する結果が得られた。放射方向の分散分布は、分布形状と最大水量が良く一致し、射幅方向の分散分布は、実験値と計算値ともに正規分布により近似でき、高い再現性が確認できた。実験及びシミュレーションを通じて、放射角度を約 35°とすると最も遠くまで放水できることが分かった。実際の消防隊も 30°~35°で放射しており、本実験結果は経験則的な観点からも妥当な結果であると考えられる。このシミュレーションモデルを用い、実際の消火活動時の気象条件に即した放射軌跡を予測することで、消防計画の立案に役立つことが期待される。

さらに、シミュレーションした粒子座標から放射特性を簡易に予測できるモデル式を作成し、実大規模の放水試験に基づく実験式（協議会推奨上限・下限ライン）と比較した。その結果、両者の軌跡が良く一致したことから、各パラメータ値の入力範囲が今回シミュレーションを行った範囲内であれば、高精度で軌跡を再現できることが分かった。また、下限ラインが到達率 60%及び 70%の軌跡であることが明らかになったことから、フットプリントは放水流量の 30~40%が集中する範囲であることが示唆された。このモデルにより、風速や存在率の軌跡、タンクの大きさや設置位置を任意の値に設定し、タンク内投入率を予測することができると考えられる。

以上より、本研究を通じて大容量泡放射砲の棒状放射時における放射軌跡を予測するため、以下の三つのモデルを構築した。

- ・ 最大射程及び最大射高の予測式
- ・ 軌跡の簡易予測モデル
- ・ 三次元放射シミュレーションモデル

これらのモデルは、予測結果の精度と算出までの所要時間の兼ね合いから、それぞれ適用用途が異なる。「最大射程及び最大射高の予測式」は、現場の消防隊員が放水を行う際に、おおよその放射軌跡を一目で把握できる指標となるものであり、速効性を要する場面で使用する。また、小規模から大規模まで流量範囲を問わずに予測する事ができるため、一般的な家屋火災の消火時においても役立つことが期待できる。「軌跡の簡易予測モデル」は、表計算ソフトを用いることで放射軌跡を視覚的に表現することができ、対象物への放射をイメージし易いことが利点である。また、流量や圧力、角度、風速風向のパラメータを変更し、様々な条件での放射を瞬時に予測できるだけでなく、タンクへの投入率も予測できることから、放射砲の設置位置など短中期的な消防戦術の検討に役立てられる。「三次元放射シミュレーションモデル」に関しては、水粒あるいは泡消火剤の飛翔挙動を詳細に知ることができ、高い精度で軌跡及び分散分布の予測が可能である。ただし、計算結果が出るまでには数日から一週間程度の時間が必要になるため、中長期的な防災計画の立案に役立つことが考えられる。

今後の課題として、小規模放水及び中規模放水実験について、測定した射程・射高・射幅のデータが再現性のあるデータであるか、再実験を行い評価する必要がある。放水軌跡の予測式については、ノズルの形状や風の影響を予測式に取り入れることで、より精度の高い予測結果が得られると考えられる。分散分布については、実際の水量値を予測できるようにするため、最大水量値と放水パラメータの関係性について考察を行う。三次元シミュレーションモデルについて、現在のプログラムでは、大容量の泡放射シミュレーション時に粒子の持つ変数が多くなり、限られた粒子数しか使用できない問題がある。そのため、アルゴリズムの効率化・簡単化、新しいモデルの構築が必要である。放射特性の簡易予測モデルについては、流量 1,000 L/min 以下の小規模放水においても適用可能であるか、実際に放水実験を行って妥当性を評価する必要がある。さらに、今回のシミュレーションにより、タンク内投入時の粒子座標が得られたことから、それを用いて油面上で粒子が展開する挙動をシミュレーションすることで、油面を効率良く覆うための放射条件を考察する予定である。



## 【謝 辞】

本論文の執筆にあたり、東京理科大学理工学部機械工学科 川口靖夫博士には、博士後期課程入学からの4年間、適切な御助言と懇切な御指導を賜りました。ここに深甚な感謝の意を表する次第である。また、本研究の全過程にわたり、細部に至るまで終始一貫して御指導を賜った諏訪東京理科大学システム工学部機械システムデザイン工学科兼東京理科大学総合研究所火災化学研究部門教授 須川修身博士に謹んで感謝の意を表する。御多忙の中、本論文の審査をして頂いた東京理科大学理工学部機械工学科 岡田裕先生、上野一郎先生、木村吉郎先生、二瓶泰雄先生に深く感謝する次第である。

諏訪東京理科大学システム工学部システム工学科 今村友彦博士（工学）には、学会発表や進学について、有益なご指導・ご助言を頂いた。日本法医工学株式会社 上矢恭子博士には、実験について多くのご助言や熱心なご指導を頂戴した。諏訪東京理科大学システム工学部機械システムデザイン工学科 河村洋教授には、本研究テーマの理論的な背景についての理解と計算原理に関する貴重な御助言を賜った。近畿大学理工学部機械工学科 和田義孝准教授には、粒子系モデルについて貴重な御助言を賜った。諸先生方に心より感謝の意を表する。

実験を実施するにあたり、深田工業株式会社 高嶋武士氏、石川亮氏に多くの御助力を頂いた。また、諏訪東京理科大学 須川研究室の皆様には、多大な協力を頂くとともに大変楽しい時間を共有できた。皆様方に心から感謝する次第である。

最後に、9年にわたる大学生活を全面的に支援してくれた両親に衷心より謝意を表する。

年 月 日

氏名 \_\_\_\_\_

## 【参考文献】

- 1) JX 日鉱日石エネルギー株式会社：石油便覧，第 1 編第 1 章第 2 節 エネルギー需給と石油の位置付け，URL: <http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/>
- 2) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）：石油備蓄データ，国家備蓄・民間備蓄の現状，URL: [http://www.jogmec.go.jp/jogmec\\_activities/stockpiling\\_oil/deta/index.html](http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/stockpiling_oil/deta/index.html)
- 3) 北海道石油共同備蓄株式会社：タンクについて，URL: <http://www.hjos.co.jp/bitiku-3.html>
- 4) JX 日鉱日石エネルギー株式会社：石油便覧，第 4 編第 4 章第 2 節 製油所の設備機器
- 5) 鶴戸口英善ほか：JIS 石油貯槽 - 解釈と計算例 - ，日本規格協会，1987.5
- 6) Philip E. Myers: “Aboveground Storage Tanks”, McGraw-Hill , pp.340-343, 1997
- 7) 畑山健，座間信作，西春樹，山田寛，廣川幹浩：2003 年十勝沖地震による長周期地震動と石油タンクの被害，独立行政法人消防研究所，p.30, 2004.4.1
- 8) 古積博：ボイルオーバーの事例解析，第 42 回 安全工学研究発表会 講演予稿集，pp.109-112, 2009
- 9) Swedish National Testing and Research Institute, SP: Fire, Risk and Safety, URL: <http://www.sp.se/EN/Sidor/default.aspx>
- 10) 座間信作：トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震による石油タンク被害，RUMPES(Certification for Inspection of Welds NEWS) vol.17 No.4, 社団法人 日本溶接協会，pp.4-7, 2003
- 11) Henry Person, Anders Lonnermark: “Tank Fires Review of the incidents 1951-2003”, SP Technical Research Institute of Sweden Fire Technology, Fire Protection, p.B14, 2004
- 12) National Transportation Safety Board: Pipeline Accident Report - Storage Tank Explosion and Fire in Glenpool, Oklahoma April 7, 2003
- 13) 赤塚広隆、小林英男：新潟地震による石油タンク等の火災，失敗知識データベース - 失敗百選，畑村創造工学研究所
- 14) 畑山健，座間信作，西晴樹，山田寛，廣川幹浩：2003 年十勝沖地震による長周期地震動と石油タンクの被害，公益社団法人日本地震学会，地震第 2 輯，57 巻，2 号，pp. 83-103, 2004
- 15) 危険物保安技術協会：平成 15 年十勝沖地震危険物施設の被害記録，pp.46-50, 2004.12
- 16) 危険物保安技術協会：平成 20 年度版 石油コンビナート等災害防止法令・通達集，p.461, pp.484-486, 2008
- 17) 総務省消防庁：平成 16 年版 消防白書 第 1 章災害の現況と課題
- 18) 深田工業㈱：屋外タンク貯蔵所の泡消火設備，Safety & Tomorrow, No.136, pp.18-35, 2011.2
- 19) 総務省消防庁：平成 17 年度 石油コンビナート等防災体制検討会 検討結果報告書，pp.23-27, 2005
- 20) 竹元昭夫：大容量泡放射砲の泡放射特性について，第 9 回消防防災研究講演会，独立行政法人消防研究所，pp.59-60, 2006.2
- 21) 内藤浩由：全面火災に対する安全対策～泡消火剤の消火性能について～，独立行政法人消防研究所，第 9 回消防防災研究講演会資料，pp.78-80, 2006.2.24
- 22) 竹元昭夫，木戸健二，田中良樹ほか：消防研究所研究資料第 73 号 石油タンク火災の安全確保に関する研究報告書～石油タンク火災に使用される泡消火薬剤の消火特性～，独立行政法人消防研究所，

pp.17-19, p.187, pp.139-153, 2006.3

- 23) 財団法人長野県消防協会：長野県消防ポンプ操法大会 操法実施要領 操法大会審査要領, pp.6-7, 2003.4
- 24) 消防法施行令 第二款消火設備に関する基準（屋外消火栓設備に関する基準） 第十九条, 1961
- 25) 石油コンビナート等災害防止法施行令 第三章 特定事業者に係る災害予防 第八条～第十三条, 1976
- 26) スプレーイング システムズ ジャパン株式会社：工業用スプレーノズル総合カタログ, p.246
- 27) 国土交通省：ダム諸量一覧表, URL: <http://www.river.go.jp/nrpc0701gDisp.do>
- 28) 佐澤潔, 内藤浩由, 佐宗祐子, 遠藤千秋：石油タンク火災用の泡消火剤について（第 9 報）-泡の被覆面積における放射熱抑制効果-, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.94-95, 2012
- 29) Howard R. Baum and Kevin B. McGrattan: Simulation of Oil Tank Fires, International Interflam Conference, 8th Proceedings, Volume 2, pp.1117-1128, 1999
- 30) 新居六郎：消防用噴流の有効射程について（第 1 報） - 有効射程に関する実験式 -, 消防研究所報告, vol.4 No.1, pp.1-12, 1953
- 31) 笠原保信, 平賀俊哉, 金田節夫（独立行政法人消防研究所）：消火用泡の有効射程, 火災誌 vol.27 No.3 通巻 108 号, 1977
- 32) 佐宗祐子, 内藤浩由, 金田節夫, 田中太, 川端信義：泡放射砲の放水挙動に関する研究（その 1）風向風速と分散分布計測, 平成 20 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.22-23, 2008.5
- 33) 田中太, 川端信義, 内藤浩由, 金田節夫, 佐宗祐子：泡放射砲の放水挙動に関する研究（その 2）放射水流の速度分布計測, 平成 20 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.24-25, 2008.5
- 34) 川端信義, 佐宗祐子, 内藤浩由, 金田節夫：大容量放射砲の放水シミュレーション, 平成 19 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.96-97, 2007.5
- 35) 大容量泡放射システムの有効性の確認・検証に係る性能試験結果報告書 資料 2-2：北陸地区広域共同防災協議会、大阪・和歌山広域共同防災協議会、南九州広域共同防災協議会、沖縄地区広域共同防災協議会, 2009.3
- 36) 東京消防庁：3 訂版ポンプ車運用技術, (財)東京連合防火協会・東京法令出版, pp.21-26, 2009
- 37) 日本消防検定協会：消防機器早わかり講座 泡消火剤, URL: <http://www.jfeii.or.jp/>
- 38) 築地千春：泡消火剤の消火性能試験基準について, 安産工学 vol.46 No.2 通巻 257 号, コロナ社, pp.96-101, 2007
- 39) 田中初実, 宮下達也, 石川亮, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子：全面タンク火災消火支援用浮子の実験的評価, 平成 22 年度 日本火災学会研究発表会概要集, pp.206-207, 2010
- 40) 日野幹雄：流体力学, 朝倉書店, pp.233-234, 1992
- 41) 生井武文, 井上雅弘：機械工学基礎講座 粘性流体の力学, 理工学社, pp.20-27, pp.228-231, 1978.3
- 42) 和田明, 遠藤茂勝, 落合実：やさしい水理学, 森北出版株式会社, pp.81-84, 2005
- 43) R. D. Blevins: “Applied Fluid Dynamics Handbook”, van Nostrand Reinhold Company, pp.332-333, 1984
- 44) 炭谷圭二, 前田和宏, 一之瀬健一：自動車と流体力学 車体周り流れと空力特性, トヨタ自動車株式会社, p.448, 2004
- 45) 原島鮮：力学（三訂版）, 裳華房, pp.42-43, 1973

- 46) 森口繁一, 宇田川銑久, 一松信: 数学公式 I 微分積分・平面曲線, 岩波書店, pp.77-78, 1988
- 47) 江守一郎: 模型実験の理論と応用 (第2版), 技報堂出版, pp.59-94, 1985
- 48) 粉体工学会: 粉体工学叢書第1巻粉体の基礎物性, 日刊工業新聞社, pp.12-16, 2005
- 49) 羽多野重信, 山崎量平, 浅井信義: はじめての粉体技術, 工業調査会, pp.15-21, 2013.7
- 50) 金岡千嘉男, 牧野尚夫: はじめての集じん技術 基礎から応用まで, 日刊工業新聞社, pp.4-5, pp.49-51, 2013.1
- 51) 水谷幸夫: 燃焼工学(第2版), 森北出版株式会社, pp.139-140, 1989
- 52) 清水伸二ほか: ものづくり高品位化のための微粒子技術, 公益社団法人砥粒加工学会 微粒子技術専門委員会, pp.104-111, 2012
- 53) 越塚誠一: 計算力学レクチャーシリーズ⑤粒子法, 日本計算工学会, 丸善株式会社, pp.1-28, pp.63-66, 2005
- 54) 越塚誠一: 粒子法シミュレーション 物理ベース CG 入門, 培風館, pp.21-34, 2008
- 55) 越塚誠一: 粒子法による流れの数値解析, ながれ 第21巻第3号, 日本流体力学会, pp.230-239, 2002.6
- 56) 近澤佳隆, 越塚誠一, 岡芳明: MPS 法を用いた液面と構造物の大変形を伴うスロッシングの数値解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 637 号, 論文 No.98-1222, pp.18-24, 1999.9
- 57) 池田博和, 松浦文生, 越塚誠一, 岡芳明: MPS 法による蒸気爆発の液体金属細粒化過程の数値解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻 624 号, 論文 No.96-1704, pp.65-71, 1998.8
- 58) 越塚誠一: 粒子法シミュレーションの大規模化と高速化, スーパーコンピューティングニュース Vol.11 特集号, pp.123-137, 2009
- 59) 五十里洋行: 粒子法による自由表面流の数値解析とその水工学への応用に関する研究, 京都大学, pp.9-14, 2007
- 60) 吉田郁政, 大庭啓輔, 中瀬仁: MPS 法による地震応答解析の安定限界となる時間刻みに関する検討, 土木学会, 応用力学論文集 Vol.13, pp.545-554, 2010
- 61) K. Nomura, S. Koshizuka, Y. Oka and H. Obata: Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 38, No. 12, p. 1057-1064, 2001
- 62) S. Koshizuka: Moving Particle Semi-Implicit (MPS) Method -A Particle Method for Fluid and Solid Dynamics-, IACM expressions, No.18, pp.4-9, 2005
- 63) 平田光穂, 須田精二郎, 竹本宣弘: パソコンによる数値計算, 朝倉書店, pp.78-88, 1982
- 64) 石井英二, 石川亨, 田辺好之: 粒子法とグリット法のハイブリット化による液膜の分裂予測, 日本機械学会計算力学講演会講演論文集, 17 巻, pp.769-770, 2004.11
- 65) 泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令 第三章 大容量泡放水砲用泡消火薬剤: 消防法第二十一条の二第二項の規定に基づき制定, 2008.3
- 66) 藤本盛久, 羽倉弘人: 現代建築防災工学, オーム社, p.101, 1981.3
- 67) (財)消防科学総合センター: 千葉県石油コンビナート防災アセスメント中間報告書 参考資料 2-2 対象地域の気象条件, 2009
- 68) 新井仁之: フーリエ解析と関数解析学, 培風館, pp.9-10, 2001.7
- 69) 京葉臨海中部地区共同防災協議会: 平成 20 年度警防活動計画, 配備対象タンク一覧表, 泡放水砲の平面配置計画, 2008

## 【研究実績】

### ・学術論文（\*：学位論文を構成する論文）

- [1\*] Tatsuya Miyashita, Osami Sugawa, Tomohiko Imamura, Kyoko Kamiya and Yasuo Kawaguchi: “Modeling and Analysis of Water Discharge Trajectory with Large Capacity Monitor”, The International Association for Fire Safety Science (IAFSS), Fire Safety Journal. (掲載決定：2013年9月3日)
- [2\*] 宮下達也, 須川修身, 和田義孝, 川口靖夫: “MPS 法による放水及び泡放射の三次元シミュレーションモデルの構築”, 安全工学, Vol. 51, No. 2, pp.2-11, 2012.
- [3\*] 宮下達也, 須川修身, 和田義孝, 石川亮, 川口靖夫: “消防用放水の二次元簡易計算モデルと放水特性評価”, 日本火災学会論文集, Vol. 62, No. 1, pp.13-19, 2012.
- [4] 今村友彦, 宮下達也, 上矢恭子, 須川修身: “A2L 冷媒滞留雰囲気下における市販電子ライターでの着火危険性評価”, 安全工学, Vol. 52, No. 2, pp.91-98, 2013.
- [5] 今村友彦, 宮下達也, 上矢恭子, 森本崇徳, 須川修身: “微燃性冷媒搭載空調機器と化石燃料系暖房機器の同時使用時におけるフィジカルハザード評価”, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 29, No. 4, pp.401-411, 2012.

### ・国際会議発表論文

- [6] Tatsuya Miyashita, Ryo Ishikawa, Osami Sugawa, Tomohiko Imamura, Kyoko Kamiya and Yasuo Kawaguchi: “Development of Simulation Model for Water and Fire-Foam Discharge using MPS Method”, Proceeding of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS), pp.254-257, 2011.
- [7] Ryo Ishikawa, Tatsuya Miyashita, Osami Sugawa, Tomohiko Imamura and Kyoko Kamiya: “Experimental Study of The Water Discharge Behavior for Firefighting”, Proceeding of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS), pp.340-343, 2011.
- [8] Tatsuya Miyashita, Osami Sugawa, Ryo Ishikawa, Yoshitaka Wada and Yasuo Kawaguchi: “Simulation of fire foam flying behavior using MPS method”, Proceeding of 8th Asia-Oceania Symposium on Fire Safety Technology (AOSFST), Paper 3-3, 2010.
- [9] Tatsuya Miyashita, Osami Sugawa and Yoshitaka Wada: “Simulation on Flying Behavior of Fire Foam using MPS Method”, Proceeding of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS), pp.37-40, 2009.
- [10] Hatsumi Tanaka, Osami Sugawa and Tatsuya Miyashita: “Fire Fighting Assistant of Buoyant Object for Oil Tank Fire”, Proceeding of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS), pp.97-100, 2009.

### ・主な口頭発表（国内）

- [11] 宮下達也, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子, 川口靖夫: “消防用棒状放水時の射程と射高に関する予測式の導出”, 第45回安全工学研究発表会講演予稿集, No.20, pp.57-60, 2012.



- [12] 宮下達也, 須川修身, 今村友彦, 川口靖夫, 上矢恭子: “棒状放水時における放水軌跡の簡易予測式の提案”, 第 60 回全国消防技術者会議資料, pp.280-284, 2012.
- [13] 宮下達也, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子, 川口靖夫: “棒状放水時における放水軌跡の簡易予測式”, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, No.A11, pp.26-27, 2012.
- [14] 宮下達也, 川口靖夫, 石川亮, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子: “風の乱れを考慮した放水及び泡放射の三次元シミュレーション解析”, 第 44 回安全工学研究発表会講演予稿集, No.68, pp.219-220, 2011.
- [15] 宮下達也, 石川亮, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子, 川口靖夫: “MPS 法による泡放射挙動の 3 次元シミュレーション解析”, 平成 23 年度日本火災学会研究発表会概要集, No.B12, pp.94-95, 2011.
- [16] 宮下達也, 川口靖夫, 石川亮, 田中初実, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子: “粒子法による放水及び泡放射シミュレーション”, 第 43 回安全工学研究発表会講演予稿集, No.23, pp.63-64, 2010.
- [17] 宮下達也, 田中初実, 石川亮, 須川修身, 今村友彦, 上矢恭子: “粒子法による泡消火剤投入シミュレーション”, 平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集, No.A40, pp.210-211, 2010.
- [18] 宮下達也, 須川修身, 和田義孝: “粒子法による泡消火剤投入シミュレーション”, 第 42 回安全工学研究発表会講演予稿集, No.16, pp.47-48, 2009.
- [19] 宮下達也, 田中初実, 須川修身, 和田義孝: “粒子法による泡消火剤投入シミュレーション”, 平成 21 年度日本火災学会研究発表会概要集, No.A24, pp.152-153, 2009.
- [20] 宮下達也, 須川修身, 和田義孝: “粒子法による泡消火剤投入シミュレーション”, 第 41 回安全工学研究発表会講演予稿集, No.63, pp.179-180, 2008.
- [21] 宮下達也, 須川修身: “全面タンク火災消火支援用浮子の実験的評価”, 平成 20 年度日本火災学会研究発表会概要集, No.A14, pp.32-33, 2008.

・主な所属組織刊行物発表論文（表彰）

- [22] 宮下達也, 須川修身, 和田義孝, 川口靖夫: “MPS 法による放水及び泡放射の三次元シミュレーションモデルの構築”, 2012 年安全工学論文賞, 特定非営利活動法人安全工学会, 2013.
- [23] 宮下達也, 須川修身, 川口靖夫, 今村友彦, 上矢恭子: “棒状放水時における放水軌跡の簡易予測式の提案”, 平成 24 年度消防防災機器等の開発・改良, 消防防災科学論文及び原因調査事例報告に関する表彰, 奨励賞, 総務省消防庁, 2012.