

ナトリウム漏洩燃焼形態の予測手法 に関する研究

1997年3月

東京大学工学部附属原子力工学研究施設

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

ナトリウム漏洩燃焼形態の予測手法に関する研究

岡 芳明、越塚誠一

液体ナトリウムの漏洩燃焼挙動を予測することは、液体金属冷却高速増殖炉の安全性にとって重要である。なかでも、漏洩規模が小さい場合には、周囲の障害物や気流の影響などを受けやすい。落下する液体ナトリウムは分裂・飛散するなど変形が著しいだけでなく、燃焼・堆積など様々な作用が加わる複合問題である。従来の差分法は計算格子を用いる必要があるため、流体の分裂・飛散を扱うことが非常に難しく、液体ナトリウムの小規模漏洩の数値解析はできなかった。一方、MPS法(Moving Particle Semi-implicit Method)は東京大学によって開発された新しい数値解析法で、流体をマクロ粒子の集まりで表現し、支配方程式をこれと等価な粒子間相互作用に置き換えて計算する。計算格子を必要としないので、流体の分裂・飛散を容易に扱うことができる。また、流体の動きが粒子の動きと同じであり、燃焼・堆積などの作用を組み込むことが容易であると考えられる。そこで本研究の目的はMPS法を用いた比較的小規模のナトリウム漏洩燃焼形態の予測手法の開発である。具体的には、流体として常温の水を用いた小規模ナトリウム漏洩模擬実験を行なうとともに、同じ条件で3次元MPSコードによる数値解析を行なった。

水を用いた模擬実験では、まず3種類の漏洩口と4種類の漏洩量の組み合わせで、漏洩口における漏洩形態の観察をおこなった。漏洩口や流量の影響は余り見られず、いずれの場合も流体が塊に分裂しつつ落下する様子が観察された。次に、空調ダクト模擬物を配置して、漏洩水の落下位置分布を10x10cm区画の落下水受けを用いて測定した。漏洩水のうち約85%はダクト表面を伝ってダクト下部に落下した。残りの15%はダクト前方に飛散した。

3次元MPSコードおよびそのポストプロセッサーは動燃によって開発され、これを用いて模擬実験の条件で数値解析を行なった。ダクト前方に飛散する水の落下位置分布はおおよそ実験と一致したが、ダクト表面を伝う流れについては計算されなかった。これは漏洩量が少なく、水を表す粒子数が少ないため、粒子間相互作用が適切に働くかなかったためと考えられる。

本報告書は、東京大学工学部附属原子力工学研究施設が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した研究の成果である。

契約番号：084F049

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター安全工学部熱流体技術開発室

佐藤 和二郎

Prediction of Sodium Leakage and Combustion Phenomena

Yoshiaki Oka* and Seiichi Koshizuka*

Abstract

Prediction of sodium leakage and combustion phenomena is important for the safety of liquid metal fast breeder reactors. In particular, small leakage is sensitive to obstacles and air flows. Falling liquid sodium is strongly deformed by separation and dispersion as well as various phenomena, such as combustion and accumulation, are combined. Since the existing finite difference methods need computational grids, it is so difficult to calculate separation and dispersion that small leakage of liquid sodium cannot be analyzed. MPS (Moving Particle Semi-implicit) method is a new numerical method, which is being developed in Univ of Tokyo. In the MPS method fluids are represented by macroscopic particles and governing equations are converted to equivalent particle interactions. Since computational grids are not necessary, separation and dispersion of fluids are easily calculated. Addition of combustion and accumulation will be easy as well because the fluid motion is just simulated by the particle motion. Thus, the objective of the present study is development of a numerical method to predict small size sodium leakage and combustion phenomena. In this paper, a model experiment using water and numerical calculations for this experiment are presented.

In the model experiment using water, the behavior of leakage is investigated with three types of the outlet and four flow rates. Water spills out of the outlet as separated droplets. Little effect of the outlet and the flow rate is observed. The distribution of falling water is then measured on the ground with a receiver divided by 10x10cm squares. Approximately 85% of the falling water is received under the air duct model after flowing along the duct surface. The remainder (15%) is dispersed ahead of the air duct model.

A three-dimensional MPS code and its post-processor are developed by PNC. Numerical analysis of the experiment is carried out by using these codes. The dispersed water distribution roughly agrees with the experimental ones, though the flow along the duct surface is not calculated. This is because the flow rate is not large enough to represent the fluid with a satisfactory number of particles for the interactions among them.

* Nuclear Engineering Research Laboratory, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

目 次

| | | |
|-----------------------|-------|----|
| 1. 序論 | ..... | 1 |
| 1.1 研究の背景 | ..... | 2 |
| 1.1.1 液体ナトリウムの漏洩燃焼 | ..... | 2 |
| 1.1.2 数値シミュレーションの現状 | ..... | 3 |
| 1.2 研究の目的 | ..... | 6 |
| 2. 水を用いたナトリウム漏洩の模擬実験 | ..... | 7 |
| 2.1 実験装置 | ..... | 8 |
| 2.1.1 もんじゅにおけるナトリウム漏洩 | ..... | 8 |
| 2.1.2 水模擬実験の体系 | ..... | 8 |
| 2.2 実験条件 | ..... | 10 |
| 2.2.1 漏洩口からの漏洩形態の実験 | ..... | 10 |
| 2.2.2 落下水分布の実験 | ..... | 11 |
| 2.3 実験結果 | ..... | 12 |
| 2.3.1 漏洩口からの漏洩形態 | ..... | 12 |
| 2.3.2 落下水の分布 | ..... | 13 |
| 2.4 考察 | ..... | 16 |
| 2.4.1 漏洩流量 | ..... | 16 |
| 2.4.2 ダクト模擬物前方への飛散 | ..... | 17 |
| 表 | ..... | 20 |
| 図 | ..... | 25 |

| | | |
|-----------------------------------|-------|----|
| 3. MPS法を用いた模擬実験の数値シミュレーション | ..... | 58 |
| 3.1 計算コード | ..... | 59 |
| 3.1.1 3次元MPSコード | ..... | 59 |
| 3.1.2 ポストプロセッシング | ..... | 60 |
| 3.2 計算条件 | ..... | 61 |
| 3.2.1 空調ダクト模擬物 | ..... | 61 |
| 3.2.2 漏洩水 | ..... | 61 |
| 3.2.3 水とダクトの衝突モデル | ..... | 62 |
| 3.3 計算結果および考察 | ..... | 64 |
| 3.3.1 表面張力モデルがない場合の計算結果 | ..... | 64 |
| 3.3.2 表面張力モデルがある場合の計算結果 | ..... | 64 |
| 3.3.3 考察 | ..... | 65 |
| 表 | ..... | 66 |
| 図 | ..... | 68 |
| 4. 結論 | ..... | 84 |
| 参考文献 | ..... | 86 |

表 目 次

第2章

| | | | |
|-------|------------------------------|-------|----|
| 表 2-1 | 漏洩口からの漏洩形態 | ..... | 20 |
| 表 2-2 | 空調ダクト模擬物下部での水位 | ..... | 21 |
| 表 2-3 | 空調ダクト模擬物前方での水位($x < 0$ の領域) | ..... | 22 |
| 表 2-4 | 空調ダクト模擬物前方での水位($x > 0$ の領域) | ..... | 23 |
| 表 2-5 | 漏洩水の総量の評価 | ..... | 24 |

第3章

| | | | |
|-------|----------------------------------|-------|----|
| 表 3-1 | MPS法による落下水の蓄積量分布の計算結果（表面張力モデルなし） | ..... | 66 |
| 表 3-2 | MPS法による落下水の蓄積量分布の計算結果（表面張力モデルあり） | ..... | 67 |

図 目 次

第2章

| | |
|--|----|
| 図 2-1 もんじゅにおける液体ナトリウム小規模漏洩現場の垂直断面 | 25 |
| 図 2-2 漏洩口となった機器 | 26 |
| 図 2-3 水模擬実験の全体図 | 27 |
| 図 2-4 流量計 | 28 |
| 図 2-5 漏洩口 | 28 |
| 図 2-6 漏洩口の形状 | 29 |
| 図 2-7 ビデオ撮影の位置 | 30 |
| 図 2-8 ビデオ画面の視野と漏洩水の落下位置 | 31 |
| 図 2-9 落下水分布測定の体系 | 32 |
| 図 2-10 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、25cc/sec） | 33 |
| 図 2-11 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、50cc/sec） | 34 |
| 図 2-12 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、100cc/sec） | 35 |
| 図 2-13 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、150cc/sec） | 36 |
| 図 2-14 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、25cc/sec） | 37 |
| 図 2-15 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、50cc/sec） | 38 |
| 図 2-16 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、100cc/sec） | 39 |
| 図 2-17 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、150cc/sec） | 40 |
| 図 2-18 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、25cc/sec） | 41 |
| 図 2-19 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、50cc/sec） | 42 |
| 図 2-20 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、100cc/sec） | 43 |
| 図 2-21 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、150cc/sec） | 44 |
| 図 2-22 空調ダクト模擬物を設置した実験 | 45 |
| 図 2-23 落下水分布の測定 | 48 |

| | | |
|---|-------|----|
| 図 2-24 空調ダクト模擬物下部での落下水分布 | ..... | 49 |
| 図 2-25 空調ダクト模擬物前方での落下水分布($x>0$) | ..... | 50 |
| 図 2-26 空調ダクト模擬物前方での落下水分布($x<0$) | ..... | 51 |
| 図 2-27 中心軸($x=0$)に沿った落下水分布 | ..... | 52 |
| 図 2-28 空調ダクト模擬物前方への水跳ね | ..... | 53 |
| 図 2-29 速度 $u=2.0\text{m/sec}$ 一定で立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布 | ..... | 54 |
| 図 2-30 速度は $u=0\sim2.0\text{m/sec}$ の範囲で一様な分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布 | ..... | 55 |
| 図 2-31 速度は $u=0\sim4.0\text{m/sec}$ の範囲で一様な分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布 | ..... | 56 |
| 図 2-32 速度は $u=0\sim2.0\text{m/sec}$ の範囲で u に比例した分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布 | ..... | 57 |

第 3 章

| | | |
|--|-------|----|
| 図 3-1 3 次元MPSコードの構成 | ..... | 68 |
| 図 3-2 3 次元MPSコードのデータファイルの例 | ..... | 69 |
| 図 3-3 3 次元MPSコードのグリッドファイルの例 | ..... | 70 |
| 図 3-4 3 次元MPSコードのポストプロセッサーのファイル構成 | ... | 71 |
| 図 3-5 3 次元MPSコードポストプロセッサーの初期画面とポップアップメニュー | ..... | 73 |
| 図 3-6 粒子による空調ダクト模擬物の表現 | ..... | 74 |
| 図 3-7 空調ダクト模擬物のモデル | ..... | 75 |
| 図 3-8 計算結果（表面張力なし、 $t=1.0\text{sec}$） | ..... | 76 |
| 図 3-9 空調ダクト模擬物への漏洩水の衝突位置付近（表面張力なし、 $t=1.0\text{sec}$） | ..... | 77 |
| 図 3-10 落下水分布の計算結果（表面張力モデルなし） | ..... | 78 |

| | |
|---|----|
| 図 3-11 落下水分布の計算結果（表面張力モデルなし） - 飛散した水の落下位置分布 - | 79 |
| 図 3-12 落下水分布の計算結果（表面張力モデルあり） | 80 |
| 図 3-13 落下水分布の計算結果（表面張力モデルあり） - 飛散した水の落下位置分布 - | 81 |
| 図 3-14 落下水分布の実験結果と計算結果の比較 | 82 |
| 図 3-15 落下水分布の実験結果と計算結果の比較 - 飛散した水の落下位置分布 - | 83 |

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 液体ナトリウムの漏洩燃焼

液体ナトリウムの漏洩燃焼挙動を予測することは、液体金属冷却高速増殖炉の安全性にとって重要である。なかでも、漏洩規模が小さい場合には、周囲の障害物や気流の影響などを受けやすく、その事象を正確に予測することが難しい。

液体ナトリウムが2次系配管から小規模漏洩する場合を考えてみると、まず、液体ナトリウムは破断口から連続的あるいは液滴状になって噴出あるいは落下する。近くに障害物があれば、これに沿って流れ落ちたり、跳ねて飛散したりした後、最終的には床に落下する。その間に高温の液体ナトリウムは空気に触れ燃焼する。床に落下した後も燃焼を持続しながら、床の形状に沿って流れ、やがて燃焼生成物として固化する。

さらにそれぞれの過程を詳細に考えてみると、破断口からの漏洩では、漏洩量や破断口の形状によって漏洩形態、すなわち連続的な流れになるのかあるいは液滴状になるのかといったようなこと、が影響を受けると考えられる。連続的な流れであれば空気に触れる液体ナトリウムの表面積は小さく、燃焼反応が抑制されると考えられるが、液滴状になった場合には表面積は大きくなり、燃焼反応も激しくなると予想される。

次に障害物の影響だが、落下してくる液体ナトリウムがこれと接触した場合に、これに伝うように流れ落ちたり、あるいは逆に跳ね上がって飛散することが考えられる。そしてこれは、液体ナトリウムの漏洩形態とともに、漏洩量や落下量にも関係すると予想される。また、障害物の材質や形状にも影響されるであろう。障害物を伝って流れる現象は、液体ナトリウムの表面張力と、障害物との濡れ性に関係する。そして障害物の最も低い位置まで伝った液体ナトリウムは、その位置から落下する。また、跳ね上がって飛散する場合には、どれだけの量のナトリウムがどの位置に飛散するかを予測することも必要であろう。

こうして液体ナトリウムが漏洩し落下する間に空気に触れて燃焼する。これは、先ほど述べた漏洩形態だけでなく、液体ナトリウムや空気の温度、気流などに影響されると考えられる。さらに、燃焼に伴って金属ナトリウムは酸化ナトリウムに組成が変

化するとともに、反応熱によって加熱されることになる。

最終的に液体ナトリウムは床に落下するが、あまり燃焼が進んでいなければ落下しても液体として振る舞い、床の形状に従った流れが生じる。既に燃焼が進んでいれば反応生成物が床に堆積することになる。また、その中間として、落下した後に流動しながら燃焼が進み、やがて反応生成物となって動かなくなることも考えられる。

1.1.2 数値シミュレーションの現状

差分法や有限要素法などの既存の数値シミュレーション手法は、これまでに多くの研究が行なわれ、実際的な3次元複雑形状内の熱流動解析が行なえるようになった。また、VOF(volume of fluid)法[1]や格子移動法などによって、界面を有する流れの解析も行なえる。

VOF法では、計算領域を予め全て格子分割において、それぞれのセル（格子線で囲まれた単位）が体積割合を変数として持つ。そのセルが流体で満たされていれば体積割合が1で、全く無ければ0である。1と0の中間の値であれば、そのセルの中に界面が存在すると見なす。VOF法ではこの体積割合の輸送方程式を計算しなければならないが、ここに計算誤差として数値拡散が入り込み、計算が進むに従って界面がぼやけてくるという欠点がある。

界面を計算格子の格子線に一致させて、流体の動きとともに格子を移動させる格子移動法では、VOF法で見られるような界面のぼやけは生じない。そのため、流体-構造連成振動やスロッシングのような問題では精度の高い計算ができる[2]。しかしながら、界面の移動が大きくなると、これとともに移動する格子の変形も大きくなり、計算が難しくなる。さらに、流体が分裂したり合体するような、トポロジーまで変化する場合には、極めて解析が困難になる。

粒子法は連続体を粒子の集まりで表し、粒子の動きによって連続体の挙動を解析する方法である。それぞれの粒子が変数を保持して移動するので、数値拡散によって界面がぼやけることは無い。また、界面の変形が大きくても問題なく計算を進めることができる。さらに、空間が3次元であっても計算コードがあまり複雑にならないという利点もある。

粒子法には大別してミクロ粒子法とマクロ粒子法がある。ミクロ粒子法では連続体がそもそも分子から構成されていることを考え、分子運動を計算し、その統計平均としてマクロな連続体の振る舞いを予測しようとするものである。ミクロ粒子法では粒子は実在する分子を表しており、粒子間相互作用として分子間力を与える。しかしながら、連続体としての振る舞いを記述するためには膨大な数の分子を長時間にわたって計算してその平均を取らなければならないので、計算負荷が大きくなる。一方、マクロ粒子法では連続体の離散化の手段として粒子を導入する。従って、それぞれの粒子は単に移動する計算点としての意味しか持たず、強いて言えばそれぞれの粒子が流体塊を表している。マクロ粒子法では差分法における格子点が粒子に置き換えられたようなものであるから、基本的に計算時間は従来の差分法と同程度である。

マクロ粒子を用いた代表的な計算法について以下に述べる。MAC(marker and cell)法[3]では格子と粒子の両方を用いる。流れは格子を用いた通常の差分法で解き、その流速場に従って粒子の移動を計算する。従って、粒子は流体の存在を示すために用いられており、自由液面を明瞭に捉えることができる。PIC(particle in cell)法[4]では粒子の移動によって移流項の計算を行なう。移流項以外の項は格子を用いた差分法で計算する。移流が粒子の移動によって計算されているので、自由液面だけでなく温度場などにおける界面も明確に捉えることができる。以上的方法は、流れの計算には基本的に格子を用い、界面を捉えるという目的のために粒子を導入しているものである。

計算格子を全く用いないマクロ粒子法としてSPH(smoothed particle hydrodynamics)がある[5]。これはカーネル関数を用いて変数の空間分布を近似する方法で、圧縮性非粘性流れを解析でき、主に天文学の問題に適用されている。MPS(moving particle semi-implicit)法は、微分演算子を粒子間相互作用モデルで置き換えて計算する方法で、非圧縮性粘性流れを解析することができる。これまでに、流体の分裂や合体を伴うような自由液面流れや、碎波と浮体の相互作用、大変形を伴う薄肉構造物と流体の相互作用、相変化を伴う多相・多成分熱流動、の2次元数値シミュレーションが行なわれた[6-10]。

液体ナトリウムの漏洩燃焼挙動を解析するためには、流体の分裂や合体はもちろん、温度場、燃焼反応、凝固なども同時に扱えなくてはならない。マクロ粒子法ではそれ

ぞれの粒子が変数を保持しながら移動していくので、流体の分裂や合体が容易に扱えるだけでなく、様々な素過程をモデルとして組み込むことも容易である。MPS法では非圧縮性流体である液体ナトリウムを扱うことができる粒子法であり、その漏洩燃焼挙動の解析に適している。また、計算格子を必要としないので、複雑な形状の障害物も組み込みやすいと考えられる。

1.2 研究の目的

本研究では、液体ナトリウムの漏洩燃焼形態の予測のため、マクロ粒子法であるMPS法に基づいた3次元液体ナトリウム漏洩燃焼挙動解析コードを開発する。また、水を用いた模擬実験を行なうとともに、開発した解析コードで模擬実験の数値シミュレーションも行ない、計算精度を検討する。

第 2 章

水を用いたナトリウム漏洩の模擬実験

2.1 実験装置

2.1.1 もんじゅにおけるナトリウム漏洩

高速増殖原型炉「もんじゅ」のCループ2次主冷却系において、平成7年12月8日に小規模ナトリウム漏洩が生じた。漏洩現場の垂直断面図を図2-1に示す。漏洩は2次主冷却系配管に設置された温度計より生じ、位置は床面より3.6m上方であった。漏洩口下部には空調用の円筒形ダクトがあり、矩形の換気孔が下向き、および横向きに配置されていた。また、空調ダクトの下方にはグレーチングがあり、これは形状としては金属製の網である。

漏洩口の詳細図を図2-2に示す。2次主冷却系配管に設置された温度計は熱電対のであり、さや管の中に収められ、配管壁より配管中央部にはり出すように設置されていた。さや管は2次主冷却系配管壁外部のコネクタに繋がっており、熱電対の信号が外部に取り出せるようになっていた。ナトリウムは流力振動によってさや管が破損することによってさや管内に漏洩し、その内側を伝い、コネクタより外部に流出した。コネクタの一方の口は下方を向いており、ここより50cc/secの流量で流出したと考えられている。

漏洩したナトリウムは空調ダクトに当り、一部はそこで跳ね、残りはダクトを伝い、床面に落下した。落下の途中で、高温の液体ナトリウムは空気中の酸素と燃焼反応を生じた。最終的にはナトリウムは燃焼生成物に変わり、床面に堆積した。

2.1.2 水模擬実験の体系

もんじゅにおけるナトリウム小規模漏洩の模擬として、水を用いた実験を行なった。実験体系の概要を図2-3に示す。実験場所は東京大学工学部附属原子力工学研究施設の屋外である。水は一般水道よりビニールホースにより、研究棟2階のベランダに送る。ビニールホースの先に流量調節弁を取付ける。流量調節弁より先は塩ビの円管である。途中に流量計を接続し、これを見ながら流量調節弁により流量を調節する。塩ビ管の先に鋼製の漏洩口を取付ける。漏洩口の下には空調ダクトを模擬したステンレス製の円筒を設置する。これは地面よりアングルで支える。空調ダクトに接続されて

いた換気孔、およびグレーチングを模擬するものは設置しなかった。

使用した流量計を図2-4に示す。日本フローセル株式会社製の面積式流量計SGA-1型である。測定範囲は1.0～10.0 l/minで、測定誤差はフルスケール5%以内、と記載されている。

漏洩口の鋼製円管および曲管を図2-5に示す。円管には、内径3/4インチのものと、3/8インチの2種類を用いた。内径が小さいものも用いた理由は、もんじゅのさや管の内側に導線などが入っていて流路が狭くなっていることを模擬するためである。また、曲管には内径3/4インチのものと、1+1/2インチのものを用いた。大きい内径の曲管を用いた理由は、もんじゅのコネクタでは漏洩口と比較して大きい空間が内側にあることを模擬するためである。ただし、漏洩口では内径3/4インチになるように、ジョイントを取付けて用いた。本実験ではこれらを組み合わせて3種類の漏洩口で実験を行なった。これらの寸法を図2-6に示す。円管や曲管のインチ表示の寸法は規格の数値であり、漏洩口直径の実際の寸法とはやや異なっている。本実験で用いた漏洩口の直径は、ネジを切ってある内側の内径で25mmであった。

2.2 実験条件

実験は漏洩口からの漏洩形態を調べるものと、落下水の分布を調べるもの2種類について行なった。

2.2.1 漏洩口からの漏洩形態の実験

流体が漏洩口から流出する場合、比較的まとまって真直ぐに流出する場合もあれば、ばらばらになって飛び散る場合もある。こうした漏洩形態は漏洩口の形状や流量によって影響されることが考えられるので、本研究ではまずこれを調べる実験を行なった。漏洩口は以下の3種類とした。

- (1) 3/4インチ曲管+3/8インチ円管
- (2) 3/4インチ曲管+3/4インチ円管
- (3) 1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管

流量については以下の4種類とした。

- (1) 25 cc/sec (1.5 l/min)
- (2) 50 cc/sec (3.0 l/min)
- (3) 100 cc/sec (6.0 l/min)
- (4) 150 cc/sec (9.0 l/min)

これらの組み合わせである合計12ケースについて実験した。

実験結果はビデオに収録し、これより漏洩口での漏洩形態、および漏洩水の地上での落下位置について評価した。ビデオは家庭用の携帯用のもので、図2-7に示すように、漏洩口前方4.75m、地上からの高さ0.65mのところに設置した。

この実験では空調ダクトの模擬物は設置せず、漏洩水が直接地上に落下するようにした。また、落下形態の前後方向の様子も見るために、破断口までの水平配管の方向

を斜めに30度ずらした。破断口の真下の地面には、水平配管の方向に沿ってテープを張り、落下水の前後の位置が分かるようにした。図2-8に地面に張ったテープの位置関係を示す。実験時に漏洩口の真下の位置を測定したところ、(1) 3/4インチ曲管+3/8インチ円管、(2) 3/4インチ曲管+3/4インチ円管、の場合には横方向に50mmずれており、(3) 1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管、の場合にはさらに前方向に70mmずれていた。

2.2.2 落下水の分布の実験

次に落下水の分布を調べる実験を行なった。今度は空調ダクトの模擬物を設置した。水平配管の方向もダクトの中心軸方向と垂直にした。漏洩口は前項のケース(2) (3/4インチ曲管+3/4インチ円管)、流量は前項のケース(2) (50 cc/sec) を用いた。

落下水受けは、1枚の板の上に、細長いアルミ板を組み合わせて横x縦x高さ10x10x10cmの区画を10x10個作った。従って1個の落下水受けは100x100cmの面積を占める。このような落下水受けを合計4個作成した。区画の間のすき間は水漏れをしないようにシリコンで埋めた。

実験は2回に分けて行なった。1回目は、1個の落下水受けを空調ダクトの下に配置し、主にダクトを伝う水を受けた。位置関係を図2-9に示す。ダクトをアングルで支えているため、これが障害となり、図のように斜めに落下水受けを設置せざるを得なかった。この状態で漏洩口より水を漏洩させ、各区画に溜った水の水位を定規で測定した。

2回目は4個の落下水受けをダクト前方に配置し、漏洩口より落下した水がダクトに衝突して跳ねるものを受けた。

2.3 実験結果

2.3.1 漏洩口からの漏洩形態

合計12ケースにおいて、漏洩口の様子および地上での落下の様子を図2-10から2-21まで示す。

漏洩口が「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」の場合に、流量が25cc/secと50cc/secでは、漏洩水は細長い糸状に落下している。ただ、流れとしては切れ切れになっていて、決して滑らかではない。落下位置は漏洩口の真下である。流量が100cc/secになると、漏洩口の前方側の縁に付着しつつ前方に落下する。また、一部の水は後方にも飛散する。流量が150cc/secでは、漏洩口の縁全体に付着しつつ、やや後方に落下する。

漏洩口が「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」の場合では、流量が25cc/secの時は漏洩水が縁に付着しつつ落下する。ただし、付着する位置が動きまわり、安定しない。落下位置は真下より横方向に5~10cm離れた所である。流量が50cc/secになると、やや前方に真直ぐ落下するようになり、落下位置も前方5cmである。流量が100cc/secでは漏洩口に付着しつつ前方に落下する。漏洩水の飛散も激しく、落下位置は前方25cmである。流量が150cc/secになると、かえって飛散が少なくなり、前方20cmの位置に落下する。

漏洩口が「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」の場合については、流量が25cc/secと50cc/secのどちらも糸状になりあまり飛散せず、前方20cmの位置に落下する。曲管の中の空間が大きいので、円管を流れてきた水がそのままの勢いで前方に向けて飛び出しているものと思われる。流量が100cc/secになると、漏洩水が漏洩口の縁に付着するようになり、ほぼ真下に落下する。また、一部の水は漏洩口より後方に飛散する。流量が150cc/secになると、今度は漏洩口の後方の縁に水が付着し、後方20cmの位置に落下する。

全般的には、流量が小さいと、漏洩水は余り飛散することなく、糸状に真下に落下する傾向がある。流量が増えると、水が漏洩口の縁に付着することにより流れが乱され、飛散が激しくなる。漏洩口の縁に水が付着する場合には、前方側に付着すれば前方に、後方側に付着すれば後方側に漏洩水は落下する。漏洩口の形状の影響としては、

円管部の直径は3/4インチであっても3/8インチであっても、特に大きな違いは見られなかった。曲管部については、3/4インチよりも1+1/2インチの方が内部の空間が広く、流量が小さい場合に漏洩水が前方に飛び出す傾向が見られた。これらの結果をまとめて表2-1に示す。

2.3.2 落下水の分布

落下水の分布の測定は空調ダクトの模擬物を置いて行なった。図2-22に落下水受けを置かない状態での漏洩の様子を示す。図2-22-(a)は漏洩口から空調ダクト模擬物の方向を見たものである。漏洩水が空調ダクト模擬物の曲面上に落下している様子がわかる。図2-22-(b)は空調ダクト模擬物より下側の様子である。漏洩水の多くがダクト模擬物の曲面を伝って下側に回り込み、地上に落下しているのが見える。図2-22-(c)は漏洩口と空調ダクト模擬物の間の漏洩水を撮影したものである。落下している水はまとまって真下に落下しているが、連続的ではなく、塊に分かれている。図2-22-(d)は漏洩口からの漏洩水が空調ダクト模擬物に衝突しているところを拡大したものである。黒マジックの十字の中心の真上に漏洩口がある。衝突点は写真上やや右側(x軸で負の側)にずれている。衝突した水は約幅10cmの液膜状に広がり、空調ダクト模擬物を伝っていることが分かる。図2-22-(e)は斜め方向から見た空調ダクト模擬物の下側である。液膜は空調ダクトを伝っていくに従って細くなり、ほぼ真下まで回り込んでから地上に落下している。図2-22-(f)は空調ダクト模擬物の下側の拡大写真で、模擬物の下まで回り込んだ水が、横方向にも伝って水滴となって落下している。

空調ダクト模擬物の下に落下水受けを置いた時の、それぞれの区画の水位を表2-2に示す。座標は図2-9にあるように、空調ダクト模擬物の先端中央の真下を原点とし、x軸は正面から見て左方向が正、y軸は正面から見て手前の方向が正、とした。区画内の水位が上昇してくると、その上に落下した水が跳ねて周囲の区画にも影響を与える。そこで、区画の高さ100mmに対し、その半分程度まで水位が上昇したら実験を終えることとした。これより、実験時間は4分間となった。実験の様子を図2-23に示す。図2-23-(a)にあるように、空調ダクト模擬物を支えるアングルが障害になって、落下水受けを斜めに置かざるを得なかった。実験後に落下水受けに水がたまっている様子は

図2-23-(b)に示されている。

図2-24に落下水水位分布を示す。水は漏洩口よりややx座標で負の側に落下したため、落下水分布もその方向に偏っている。どのxにおいても $y > -30\text{cm}$ では水位は殆ど無く、ダクトを伝う水は、途中では殆ど落下しないことがわかる。 $x=0\text{cm}$ では $y < -40\text{cm}$ で水位が高くなり、最高値は $y=-68.787\text{cm}$ である。これよりyが小さくなると、水位は徐々に減っていく。円筒形である空調ダクト模擬物の外径は90cmであり、その中心軸は $y=-45\text{cm}$ のところである。これよりyが小さい側の区画の水位が高い理由は、ダクトに伝ってきた水がダクトを離れて落下する位置はおおよそ $y=-45\text{cm}$ なのだが、ある程度の周方向速度を持って離れるためである。 $x=7.071\text{cm}$ および -7.071cm でも同様の傾向がある。しかしながら、 $x=14.142\text{cm}$ および -14.142cm の位置では、 $y=-40\text{cm}$ の区画に小さいピークがあり、ここが最高値になっている。これは、図2-22-fにあるように、ダクトの最低位置($y=-45\text{cm}$)まで伝ってきた水が、さらに左右に伝いつつ、水滴状になって落下するためである。この水滴の伝う長さの方が、ダクトを伝う流れの広がり(約10cm)よりも広いため、 $y=-40\text{cm}$ のところにピークを生じたのである。空調ダクト模擬物下部での測定では、落下水受けの端の区画でも水位があり、落下水受けの外にこぼれた水も多くある。

次に、空調ダクト模擬物前方に跳ねた水の落下位置の分布の結果を表2-3($x > 0$)と2-4($x < 0$)に示す。実験時間は90分であった。データの欠落があるのは、区画の防水が不完全で、水が漏れてしまったものである。結果のグラフを図2-25($x > 0$)と2-26($x < 0$)に示す。どのyの位置においても、最大水位はおおよそ $x=65\text{cm}$ のところに現れる。また、 $x=150\text{cm}$ を超えて遠方に跳ねた水は殆ど無い。また、 $x=25\text{cm}$ の区画でも水位があり、 $x < 20\text{cm}$ の位置に落下した水もあると思われるが、全体に比べれば余り多くない。すなわち、本実験で落下した水のうち、空調ダクト模擬物の前方に跳ねた水の殆どは回収されていると考えられる。

最後に、漏洩水の総量の評価を行なう。漏洩水は50cc/secで流出させた。まず、この流量についての誤差評価を行なう。流量計はフルスケールで誤差5%以内と記載されている。フルスケールは10 l/minであり、漏洩水流量は3 l/minである。これを誤差5%とすると、0.15 l/minすなわち2.5cc/secの誤差になる。流量計は目測で読み取り、流

量を調節した。流量計の1目盛りは0.2 l/minであり、およそ0.05 l/min程度の読み取り誤差が考えられる。これは1.67cc/secになる。合計すると、4.17cc/secとなり漏洩水総量の8.34%となる。次に、落下水受けの区画に溜った水であるが、総量はダクト模擬物下部で9,570cc/4minであり、39.875cc/secに相当する。一方、ダクト模擬物前方では回収総量が37,350cc/90minである。データ欠落部については、周囲の区画の平均値と仮定すると2,420cc/90minとなり、合計39,770cc/90minである。これは7.365cc/secに相当する。落下水の水位は定規を立て、目測で値を読み取っており、1mm単位である。従つて、0.5mm程度の読み取り誤差があると考えられるが、系統的誤差がなければ総量に対する誤差は小さくなるものと考えられる。また、データ欠落部については、0.448cc/secに相当し、総量50cc/secの1%に至らないので、その誤差は考慮しない。まとめを表2-5に示す。回収水量の合計は47.24cc/secであり、総量50cc/secよりも小さい。この差は、回収されなかった漏洩水と考えられる。この量は2.76cc/secあり、全体の5.52%である。ダクト模擬物の下部での落下水分布の測定では、落下水受けの外側にも多くの水が落下したと考えられるので、未回収分の殆どはここで失われたと考えられる。ただし、落下水の流量に対する誤差が4.17cc/secと見積られているので、未回収水の総量も0～6.93cc/secの範囲で考えるべきである。結論として、漏洩水のうちおよそ85%は空調ダクト模擬物を伝ってその下部に落下し、残りの15%が前方に跳ねたと評価できる。

2つの測定データを、中心(x=0cm)に沿って単位時間当りの分布に整理したもの図2-27に示す。ダクト模擬物前方に跳ねる水よりも、模擬物を下側まで伝う水の方がはるかに多いことが分かる。

2.4 考察

2.4.1 漏洩流量

漏洩流量が漏洩形態の与える影響について考察する。まず、本実験での漏洩流量によって、漏洩口でどの程度の流速になるかを計算してみる。漏洩口の直径を25mmとすると、断面積は 4.9cm^2 である。この断面積から均一に流出すると、それぞれの漏洩流量に対して、次の流速になる。

| | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|
| 流量 | 25 | 50 | 100 | 150 | cc/sec |
| 流速 | 0.051 | 0.102 | 0.204 | 0.306 | m/sec |

一方、水平円管中心から漏洩口までの距離は、3/4インチ曲管で35mm、1+1/2インチ曲管で72mmである。この距離の自由落下を考えると、3/4インチ曲管で 0.827m/sec 、1+1/2インチ曲管で 1.187m/sec の落下速度になる。これは、漏洩口に対して均一に流出とした流速よりもはるかに大きいので、何かしらの減速力が均一に働く限り均一に流出することはない。このような減速力が安定に作用することは考えられないで、実験で見られるように、漏洩水は漏洩口全体には広がらないものと考えられる。自由落下速度と均一流速が等しくなる流量は、3/4インチ曲管で 405cc/sec 、1+1/2インチ曲管で 582cc/sec である。これらの値よりも大きい流量では、流量が漏洩形態に影響を与えるようになると考えられる。

また、漏洩形態には表面張力による漏洩口の縁と水との付着が見られる。これが生じると、漏洩口からの水の飛散がやや大きくなる。本実験では流量が小さい場合にはこのような付着は生じず、比較的まとまって流出している。しかしながら、この場合でも滑らかではなく、水がばらばらになって塊を形成しながら落下しており、縁に付着して落下するのと本質的な違いはないと考えられる。さらに、縁との付着がある場合には、どの位置で付着するかにより、水が前方、横方向、あるいは後方に落下する。そして、どの位置の縁と付着するかについては、まとまった傾向が見られていない。これについては、空調ダクト模擬物に落下する位置が違ってくるので、結果に影響が

あると考えられるが、予測することは困難である。

2.4.2 ダクト模擬物前方への飛散

空調ダクト模擬物前方へ飛散する水の落下位置の分布について理論的に考察する。本実験では、漏洩水量のうち、およそ15%がダクト模擬物前方へ飛散している。このメカニズムとして、(1) 水滴の弾性衝突、(2) 圧力上昇による飛散、が考えられる。

まず、水滴の弾性衝突であるが、水滴を剛体球とみなして、ダクト模擬物と弾性衝突により飛散すると考える。図2-28に衝突位置の概念図を示す。衝突位置での接平面を考えると、これは水平面と47.167度の角度をなしている。水滴が自由落下により速度を得たとすると4.087m/secになり、これで完全弾性衝突を考えると、衝突後の水滴は水平面と-4.33度の角度をなし、水平方向速度成分が4.075m/sec、垂直方向速度成分が0.309m/secである。これは空調ダクト模擬物に再衝突することなく、0.7184sec後に地上に落下し、その位置はダクト模擬物前方2.808mである。また、全ての水滴が弾性衝突したとすると、全ての水がこの位置に落下することになる。また、非弾性衝突で衝突後の速度が小さくなつたとしても、どこか1ヶ所に落下することに変わりはない。実験結果では1.5mより遠方に飛散した水は殆ど無く、また、分布が前方の1ヶ所を中心広がっている、という形態ではないので、弾性衝突が飛散の機構であるとは考えにくい。

次に、圧力上昇による飛散について、考察する。液体が塊となって次々と落下すると、空気を巻き込むことにより衝突時に局所的に高い圧力が発生すると考えられる。圧力による力は等方的であるので、水は当方的に跳ねると予想される。今、図2-28に示すように、落下点から半球面状の分布で水が跳ねることを考える。立体角は半球面のさらに半分 ($x>0$ のみ) を180分割x90分割で離散化し、その方向の立体角の面積に比例した重みをつける。そして、離散化された立体角それぞれの方向に跳んだ水の軌跡を計算し、落下位置を導く。そして、落下地点は実験と同様に10x10cmの区画で分けておき、その落下地点の区画にその立体角の重みを加える。また、空調ダクト模擬物の中心軸の高さでの通過点を計算し、これが模擬物の中にある場合には、模擬物に再衝突したものとみなし、これは再び跳ねることなくダクト模擬物を伝って流れると

考え、計算から除外する。

まず、跳ねた水は 2m/sec の一定の速度を保ちつつ、立体角上に均一に分布するものとして落下位置を計算した結果を図2-29に示す。正面に跳ねた水はおよそ $y=130\sim 150\text{cm}$ の所に集中する。また、 $x=95\text{cm}$ でもおよそ $y=100\sim 110\text{cm}$ のところに集中する。また、実験では正面に多くの水が落下し、横方向にいくほど落下水の量が減っているが、この計算では横方向にいっても落下水量は殆ど変わらない。これは実験結果と大きく異なる。

次に、 $u=0\sim 2\text{m/sec}$ の速度分布を持って飛散する場合について計算した。まず、跳ねた後の速度の絶対値 u の分布を、 $0\sim 2\text{m/sec}$ の間で一様とする。本計算では100分割で離散化し、それぞれの速度について半球面状に均一に跳ねるとして計算した。結果を図2-30に示す。これは一定速度による分布（図2-29）よりも実験結果との一致が良い。しかしながら、 y 方向のピークが理論では $y=20\sim 40\text{cm}$ であるのに対し、実験では $y=60\sim 70\text{cm}$ である。また、理論では、跳ねた水の総量のうち、ダクト模擬物に再衝突することなく地上に落下したものの割合はわずかに0.48%であるが、実験では約15%である。飛散する水の速度を $u=0\sim 4\text{m/sec}$ の一様分布とした時の計算結果を図2-31に示す。最高速度を2倍にしても、全体的な落下水の分布は変わらない。ただ、遠方まで水が飛ぶようになった。実験では、 $y>150\text{cm}$ には殆ど水が飛んでいないので、これは合っていない。ダクト模擬物に再衝突することなく地上まで到達した水の割合は0.62%と、依然として少ない。

そこで、 $u=0\sim 2\text{m/sec}$ の範囲で u に比例する分布をつけて計算した。すなわち、飛散速度が遅いものは少なく、速いものは多くしたのである。結果を図2-32に示す。速度分布を一様にした場合（図2-30と2-31）と比較して、横方向に飛散する水の量が相対的に増えていることがわかる。ダクト模擬物に再衝突することなく地上まで到達した水の割合は9.73%と大きく増加する。

以上示した落下水分布の理論的予測と実験結果との比較より以下のことが言えよう。落下水の跳ねた後の速度は、落下水の到達距離より、せいぜい 2.0m/sec であると考えられる。また、実験ではダクト模擬物の近傍に落下する水の量が理論値よりも少なかつたが、この理由としては、跳ねた水の飛ぶ方向が立体角に対して一様でないからであ

ると考えられる。実際、落下水による水跳ねは斜め方向に多い。他にも、飛散した水同士の衝突による効果、ダクト模擬物に再衝突した際の跳ねの影響、跳ねた水の流速分布の効果、ダクト模擬物を伝う流れの影響、なども考えられる。

表面張力や物体との濡れ性によって、漏洩水の多く（85%程度）は空調ダクト模擬物を伝って模擬物下部に落下した。この落下には2種類の形態があり、まず1つは、ダクト模擬物を離れるときに周方向速度をもって落下するもので、この場合の落下点はダクト模擬物の中心軸よりも奥になる。もう1つはダクト模擬物の最低位置より水滴となつたり落ちるもので、中心軸の真下に落下する。こうした現象については、理論的な考察ができなかった。この定量的な評価を行なうためには、表面張力や濡れ性の現象論に戻り、これを計算モデルとして組み込んで数値解析を行なうのが適切であろう。こうすれば、体系が異なる場合にも適用でき、汎用性の高い予測手法となる。

表 2-1 漏洩口からの漏洩形態

| | | 3/4in曲管 + 3/8in円管 | 3/4in曲管 + 3/4in円管 | 1+1/2in曲管 + 3/8in円管 |
|-----------|------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
| 25 g/sec | 形状 落下位置 | 糸状、少量飛散有り 真下 | 漏洩口に付着、安定せず 横5~10cm | 糸状 前方20cm |
| 50 g/sec | 形状 落下位置 | 糸状、少量飛散有り 真下 | 糸状、少量飛散有り 前方5cm | 糸状 前方20cm |
| 100 g/sec | 形状 落下位置 | 漏洩口に付着、少量飛散有り 前方25cm | 漏洩口に付着、後飛散 前方25cm | 漏洩口に付着、少量飛散有り 真下 |
| 150 g/sec | 形状 落下位置 | 漏洩口全体に付着、後飛散 後方5cm | 漏洩口に付着、後糸状 前方20cm | 糸状、安定せず 後方20cm |

表 2-2 空調ダクト模擬物下部での水位

実験時間：4分、10x10cm区画内水位[mm]、(x,y)座標：区画の中心[cm]

| y \ x | -42.426 | -35.355 | -28.284 | -21.213 | -14.142 | -7.071 | 0.0 | 7.071 | 14.142 | 21.213 | 28.284 | 35.355 | 42.426 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| -12.219 | 0.0 | | 0.0 | | 0.0 | | 1.0 | | 0.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| -19.290 | | 0.0 | | 0.0 | | 2.0 | | 2.0 | | 0.0 | | 0.0 | |
| -26.361 | 0.0 | | 0.0 | | 3.0 | | 6.0 | | 2.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| -33.432 | | 0.0 | | 3.0 | | 16.0 | | 12.0 | | 0.0 | | 0.0 | |
| -40.503 | 0.0 | | 1.0 | | 29.0 | | 59.0 | | 12.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| -47.574 | | 0.0 | | 7.0 | | 62.0 | | 39.0 | | 2.0 | | 0.0 | |
| -54.645 | 0.0 | | 2.0 | | 27.0 | | 66.0 | | 10.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| -61.716 | | 0.0 | | 9.0 | | 64.0 | | 40.0 | | 3.0 | | 0.0 | |
| -68.787 | 0.0 | | 3.0 | | 28.0 | | 67.0 | | 11.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| -75.858 | | 0.0 | | 8.0 | | 58.0 | | 35.0 | | 3.0 | | 0.0 | |
| -82.929 | | | 3.0 | | 27.0 | | 55.0 | | 9.0 | | 0.0 | | |
| -90.000 | | | | 7.0 | | 44.0 | | 27.0 | | 2.0 | | | |
| -97.071 | | | | | 12.0 | | 36.0 | | 5.0 | | | | |
| -104.142 | | | | | | 21.0 | | 11.0 | | | | | |
| -111.213 | | | | | | | 6.0 | | | | | | |

空欄は区画の無かつたところ

表 2-3 空調ダクト模擬物前方での水位 (x<0の領域)

実験時間：90分、蓄積量：10x10cm区画内水位[mm]、(x,y)座標：区画の中心[cm]

| y \ x | -95.0 | -85.0 | -75.0 | -65.0 | -55.0 | -45.0 | -35.0 | -25.0 | -15.0 | -5.0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 25.0 | 5.0 | 6.0 | 6.0 | 8.0 | 9.0 | 9.0 | 11.0 | 14.0 | 21.0 | 34.0 |
| 35.0 | 6.0 | 7.0 | 9.0 | 10.0 | 13.0 | 15.0 | 18.0 | 25.0 | 35.0 | 48.0 |
| 45.0 | 7.0 | 9.0 | 10.0 | 13.0 | | 20.0 | 26.0 | 34.0 | 47.0 | |
| 55.0 | 7.0 | 10.0 | 12.0 | 18.0 | | 25.0 | 31.0 | 41.0 | 55.0 | 69.0 |
| 65.0 | 8.0 | 10.0 | 12.0 | 15.0 | 20.0 | 26.0 | 32.0 | 42.0 | 56.0 | 68.0 |
| 75.0 | 7.0 | 9.0 | 11.0 | 15.0 | 20.0 | 25.0 | 32.0 | 42.0 | 53.0 | 62.0 |
| 85.0 | 7.0 | 6.0 | 10.0 | 12.0 | 15.0 | 21.0 | 28.0 | 36.0 | 44.0 | 50.0 |
| 95.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 10.0 | 12.0 | 17.0 | 21.0 | 28.0 | 35.0 | |
| 105.0 | 3.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 9.0 | 12.0 | 15.0 | 19.0 | 22.0 | 26.0 |
| 115.0 | 2.0 | 2.0 | | 4.0 | | 8.0 | 10.0 | | 14.0 | 16.0 |
| 125.0 | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 2.0 | 4.0 | 4.0 | | 8.0 | 9.0 | |
| 135.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 4.0 | 4.0 |
| 145.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 155.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 165.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 175.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 185.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 195.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 205.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 215.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

空欄は測定データが取得できなかったところ

表 2-4 空調ダクト模擬物前方での水位 ($x>0$ の領域)

実験時間：90分、蓄積量：10x10cm区画内水位[mm]、(x,y)座標：区画の中心[cm]

| y \ x | 5.0 | 15.0 | 25.0 | 35.0 | 45.0 | 55.0 | 65.0 | 75.0 | 85.0 | 95.0 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 25.0 | 30.0 | 19.0 | 13.0 | 11.0 | 9.0 | 9.0 | 8.0 | 7.0 | 2.0 | 0.0 |
| 35.0 | 44.0 | 30.0 | 21.0 | 17.0 | 13.0 | 11.0 | 10.0 | 8.0 | 7.0 | 6.0 |
| 45.0 | | 41.0 | 30.0 | 23.0 | 18.0 | 15.0 | 12.0 | 10.0 | 8.0 | |
| 55.0 | 64.0 | 48.0 | 37.0 | 28.0 | 22.0 | 17.0 | 13.0 | 11.0 | 9.0 | 8.0 |
| 65.0 | 64.0 | 51.0 | 40.0 | 30.0 | 23.0 | 19.0 | 14.0 | 11.0 | 9.0 | 7.0 |
| 75.0 | 59.0 | 48.0 | 38.0 | 28.0 | 21.0 | 17.0 | 13.0 | 10.0 | 8.0 | 7.0 |
| 85.0 | 49.0 | 41.0 | 32.0 | 25.0 | 19.0 | 16.0 | 11.0 | 9.0 | 7.0 | 6.0 |
| 95.0 | 37.0 | 32.0 | 26.0 | 20.0 | 16.0 | 12.0 | 9.0 | 7.0 | 6.0 | 4.0 |
| 105.0 | 24.0 | 23.0 | 18.0 | 13.0 | 11.0 | 9.0 | 7.0 | 5.0 | 4.0 | 3.0 |
| 115.0 | 12.0 | 14.0 | 11.0 | 9.0 | 7.0 | 6.0 | 5.0 | | 3.0 | 0.0 |
| 125.0 | | 7.0 | 5.0 | 5.0 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 135.0 | 5.0 | 4.0 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 145.0 | | 2.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 155.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 165.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 175.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 185.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 195.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 205.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 215.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

空欄は測定データが取得できなかつたところ

表2-5 漏洩水の総量の評価

| | 測定データ | 1秒当たり | (割合) |
|-----------------|-----------------|---------------|----------|
| 漏洩水総量 | | 50 cc/sec | (100%) |
| ダクト下部での回収水量 | 9,570 cc/4min | 39.875 cc/sec | (79.75%) |
| ダクト前方 | | | |
| 回収水量 | 37,350 cc/90min | | |
| データ欠落位置での回収水予測量 | 2,420 cc/90min | | |
| 計 | 39,770 cc/90min | 7.365 cc/sec | (14.73%) |
| 回収されなかったもの | | 2.76 cc/sec | (5.52%) |

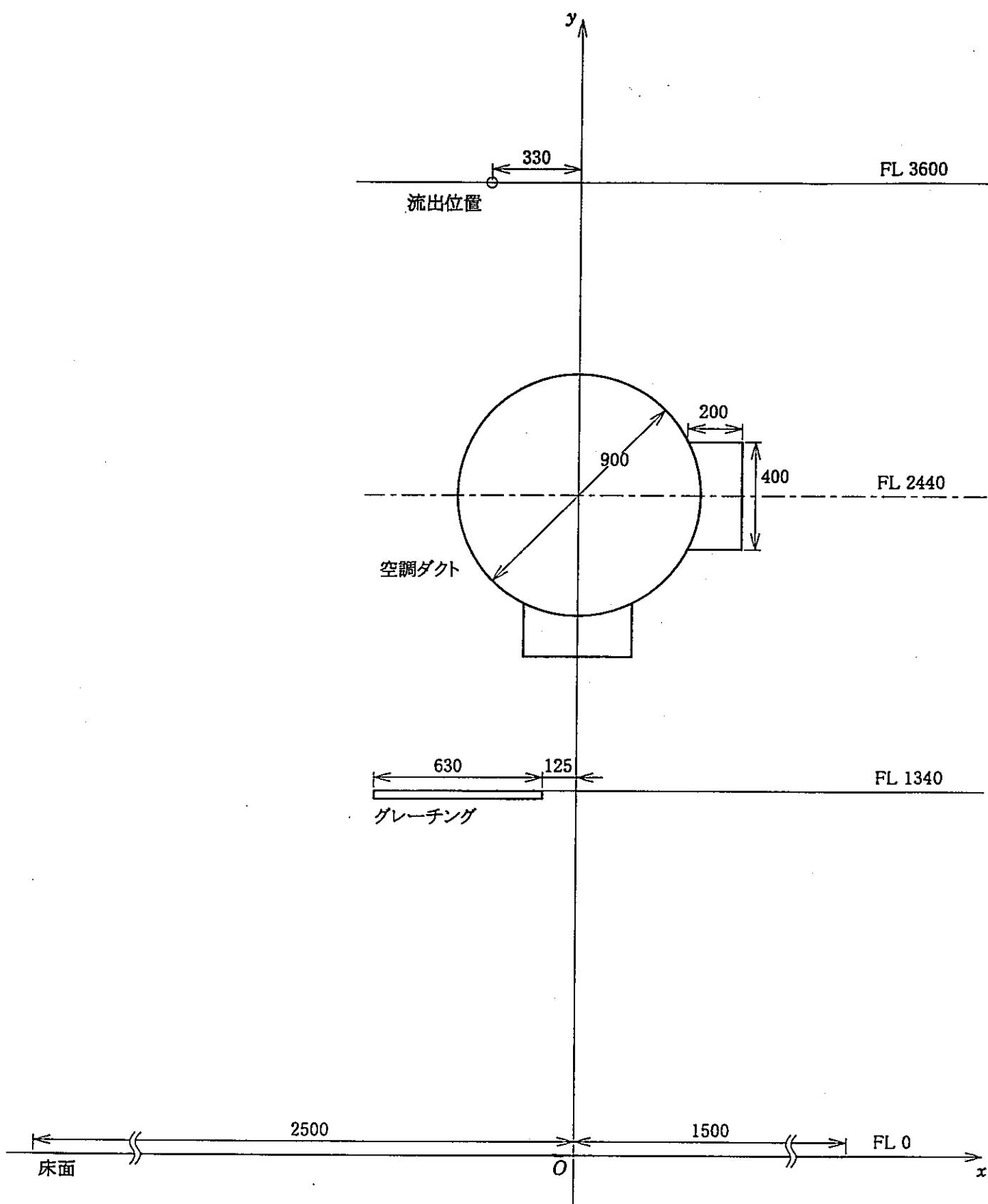


図 2-1 もんじゅにおける液体ナトリウム小規模漏洩現場の垂直断面

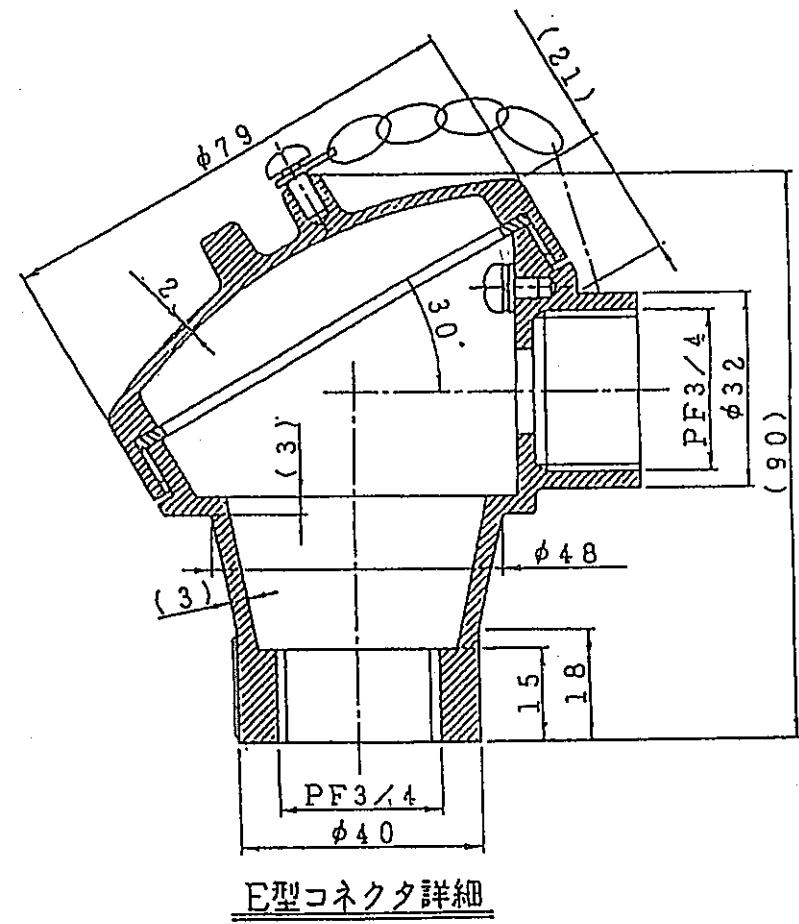
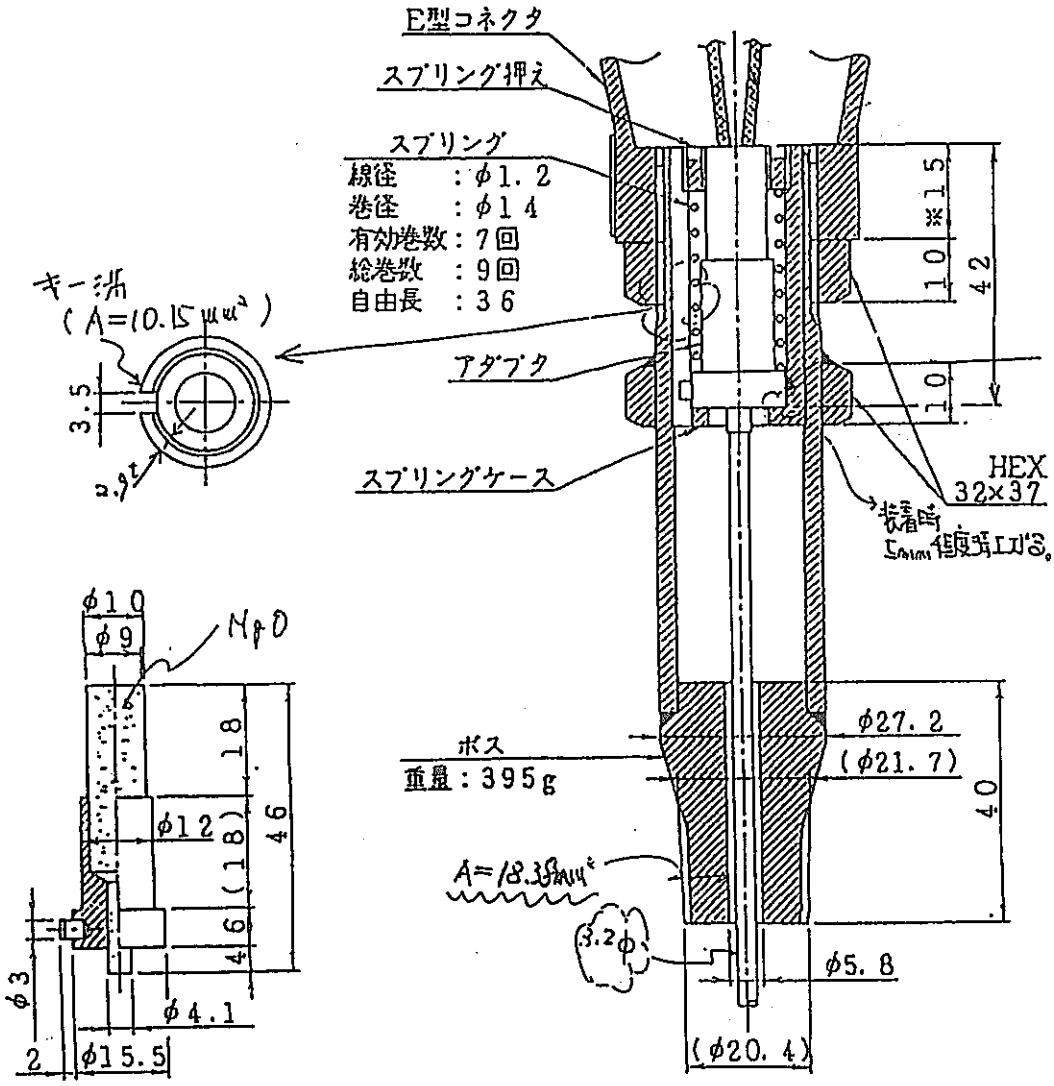


図 2-2 漏洩口となつた機器

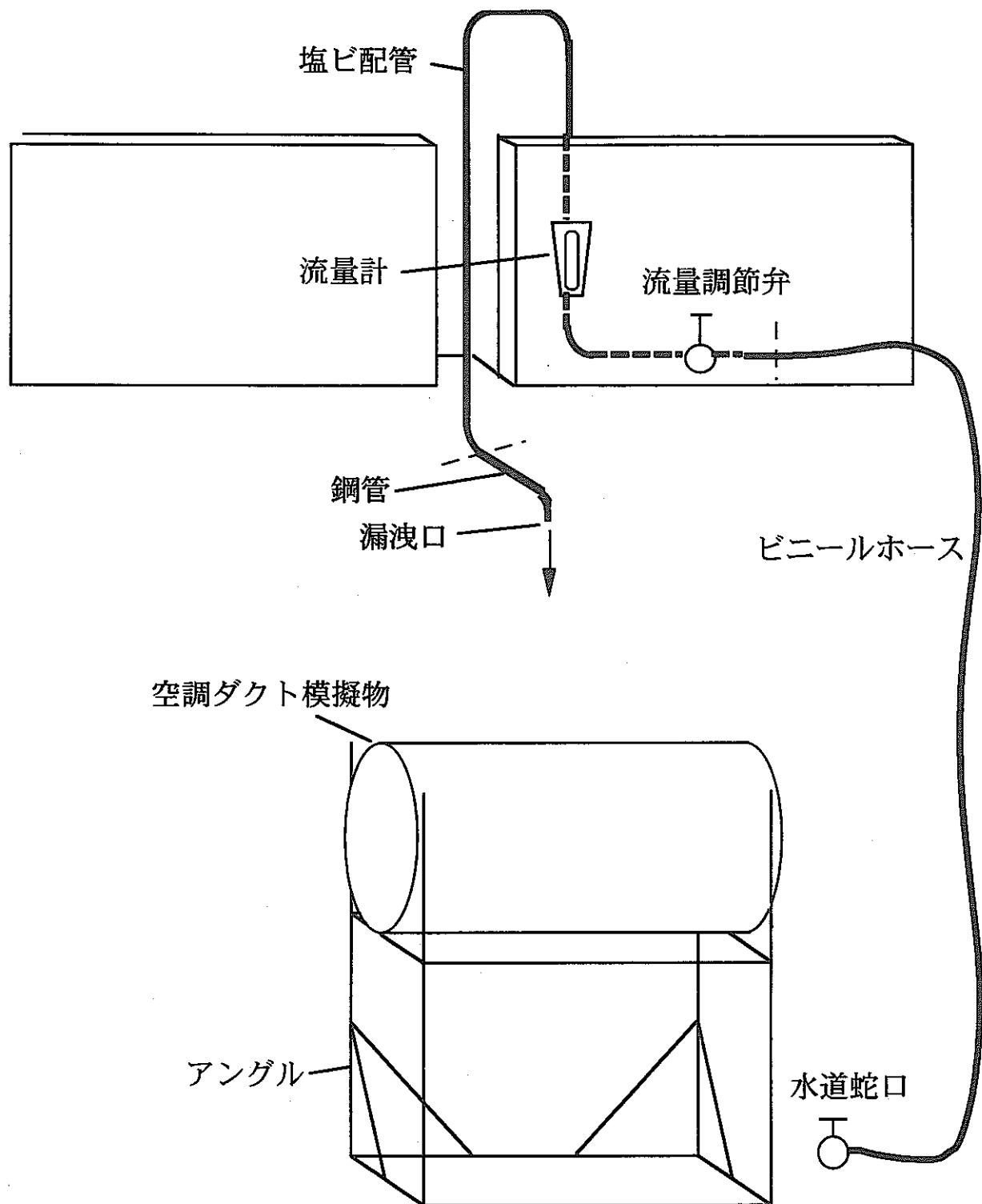


図 2-3 水模擬実験の全体図

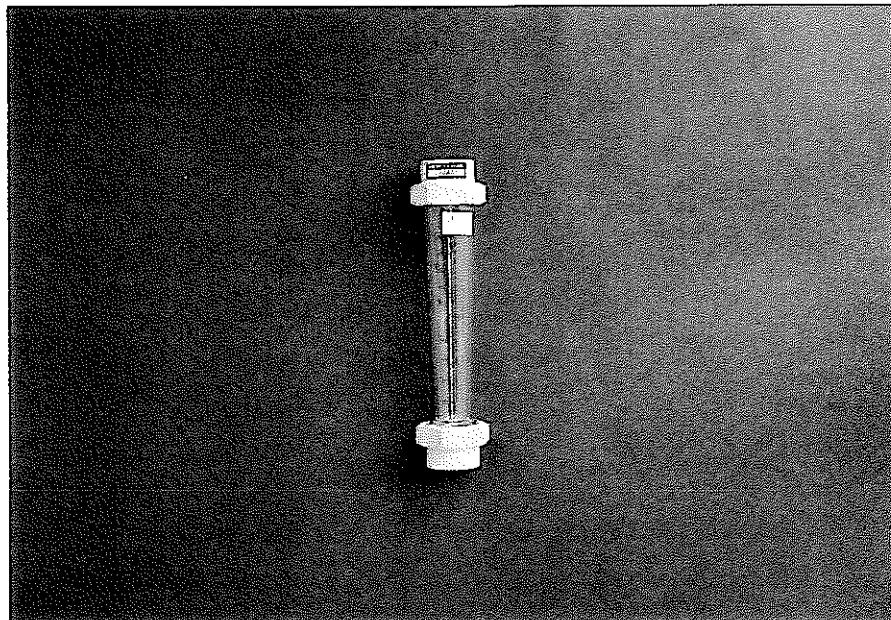


図 2-4 流量計

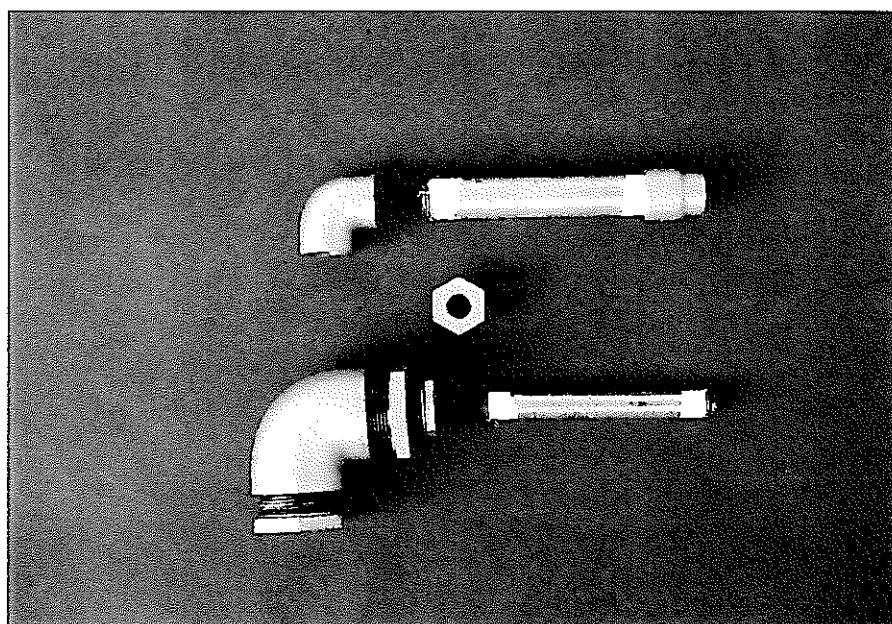
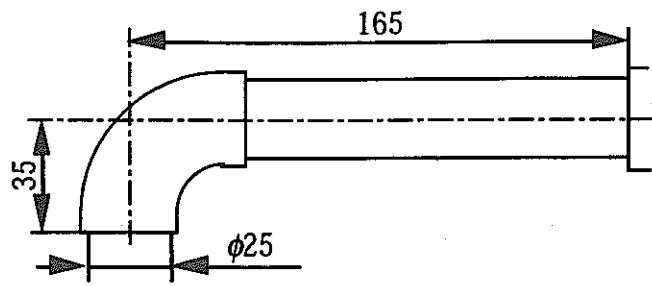
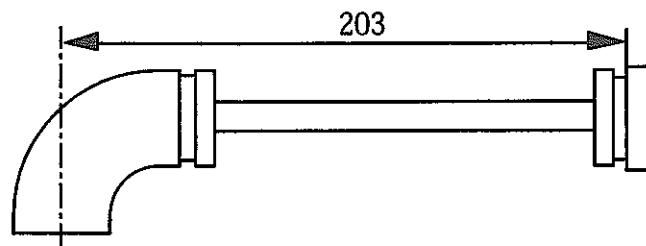


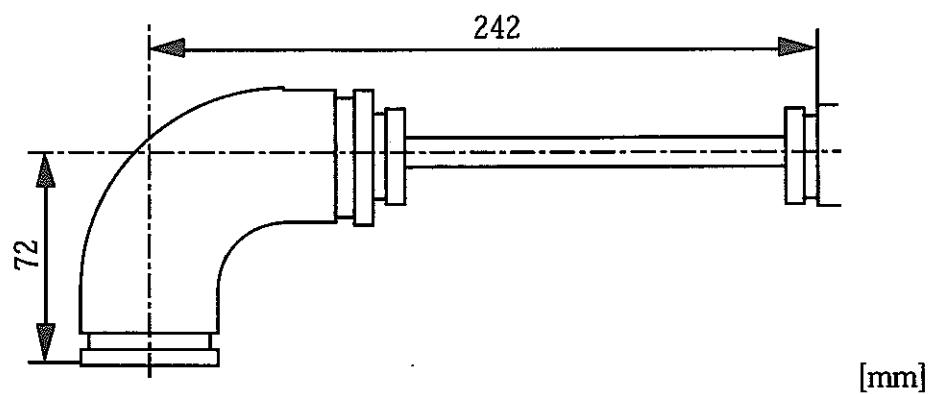
図 2-5 漏洩口



(a) 3/4インチ曲管+3/4インチ円管



(b) 3/4インチ曲管+3/8インチ円管



(c) 1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管

図 2-6 漏洩口の形状

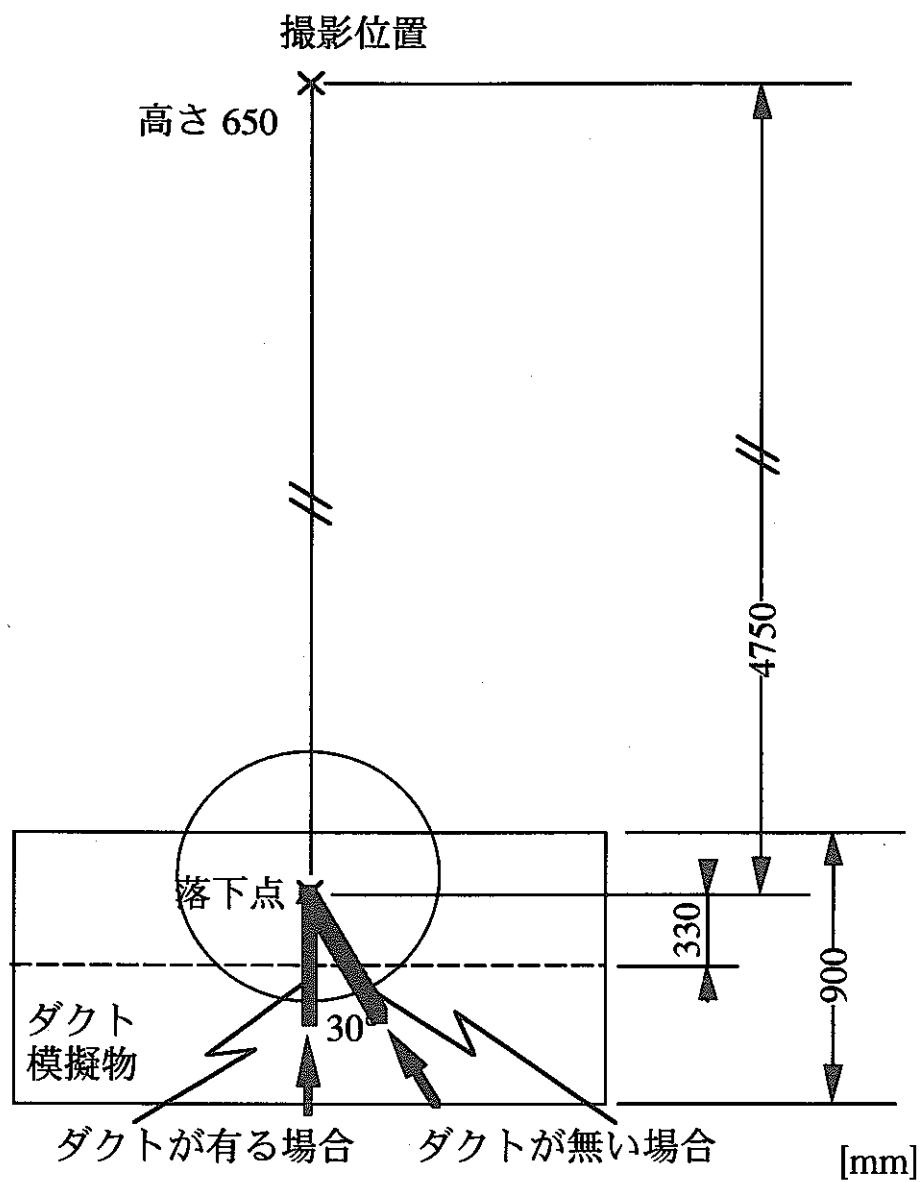


図 2-7 ビデオ撮影の位置

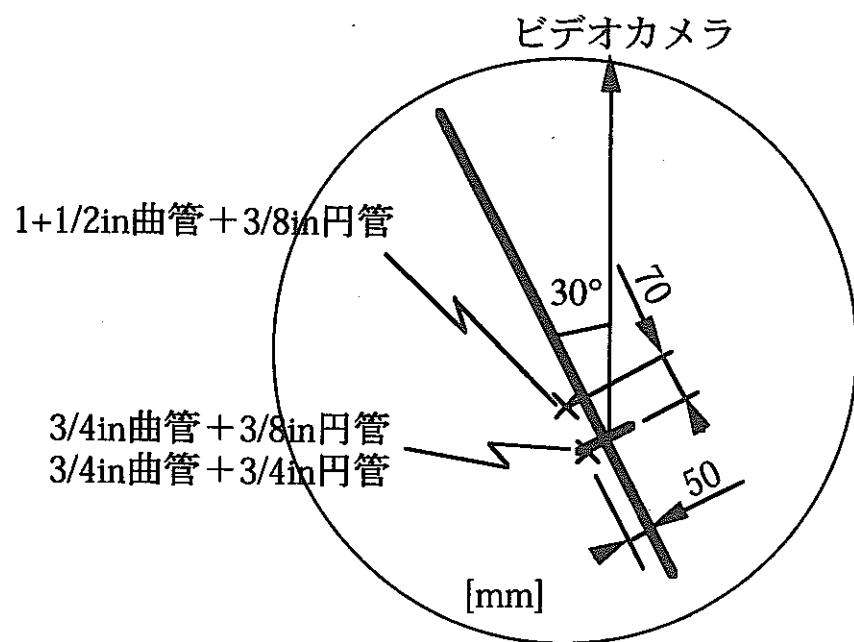
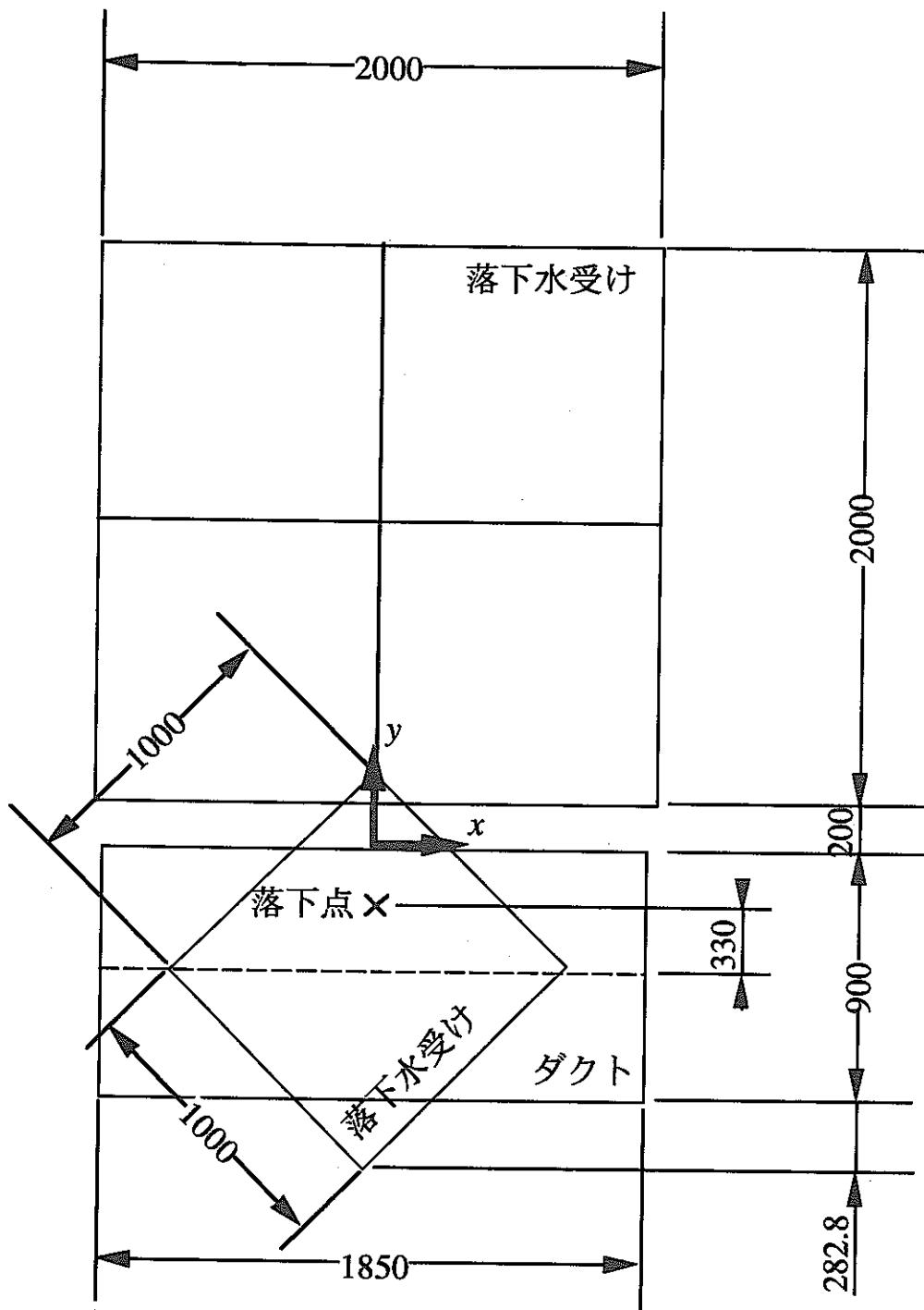


図 2-8 ビデオ画面の視野と漏洩水の落下位置

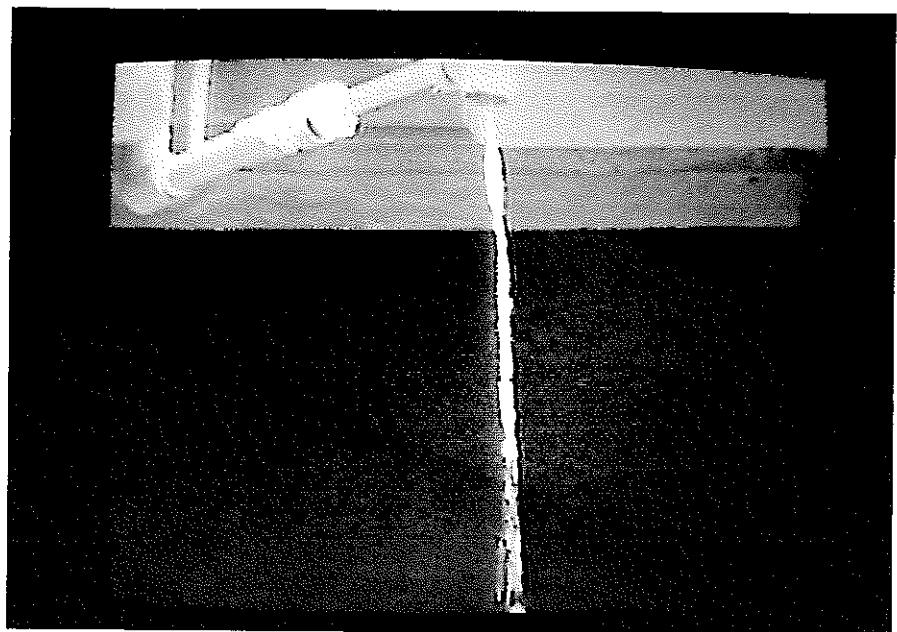


漏洩口 : 3/4in曲管 + 3/4in円管

[mm]

流量 : 50 cc/sec

図 2-9 落下水分布測定の体系

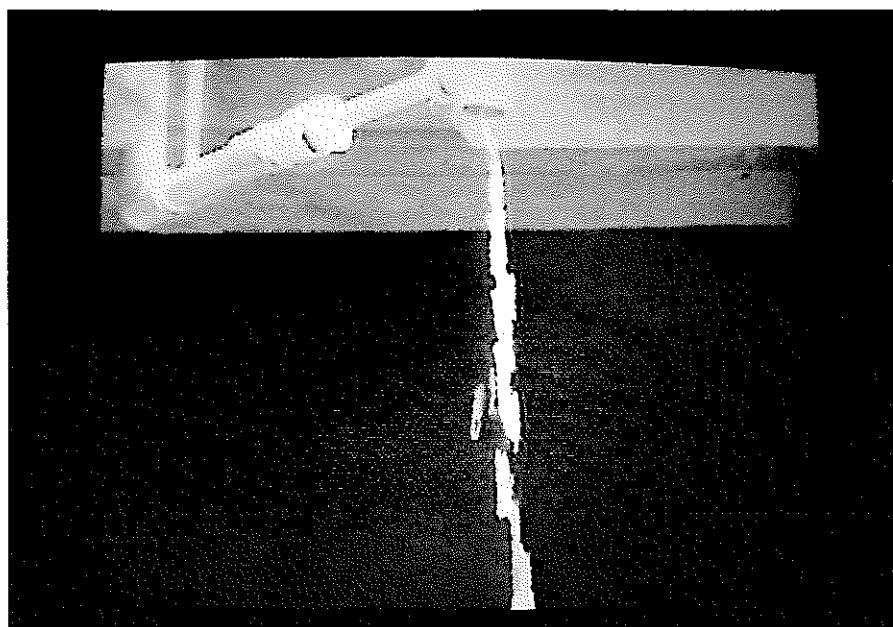


(a) 漏洩口での様子

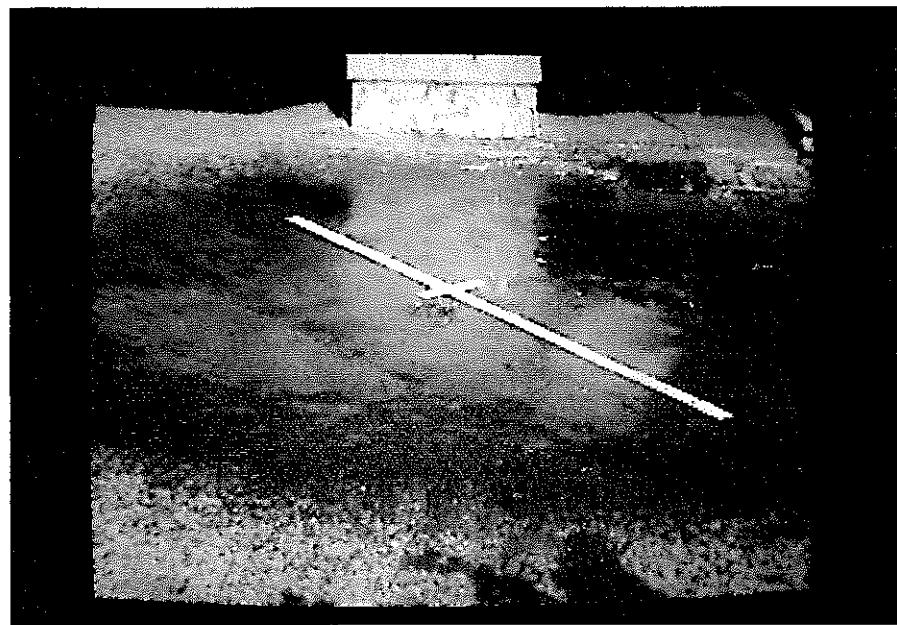


(b) 落下点での様子

図 2-10 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、25cc/sec）

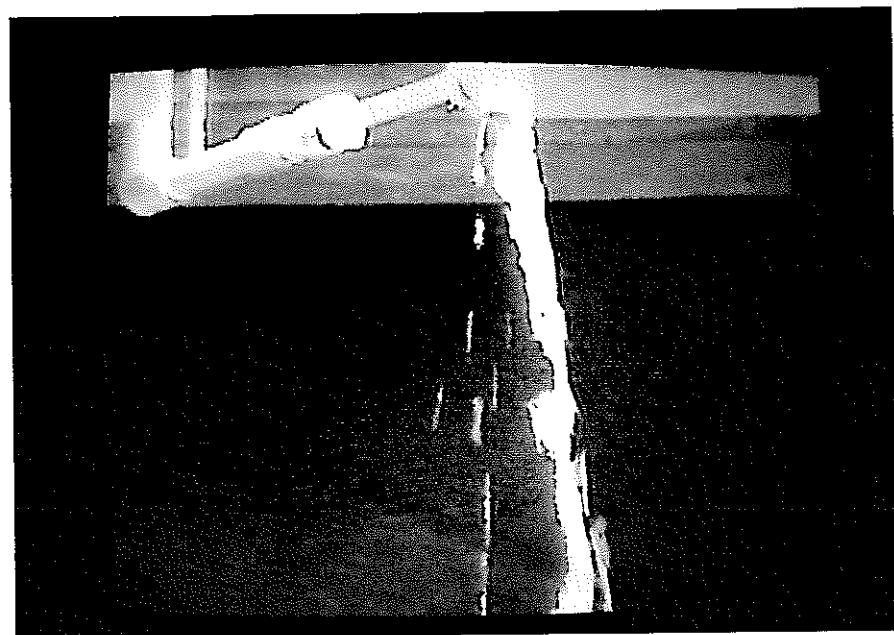


(a) 漏洩口での様子

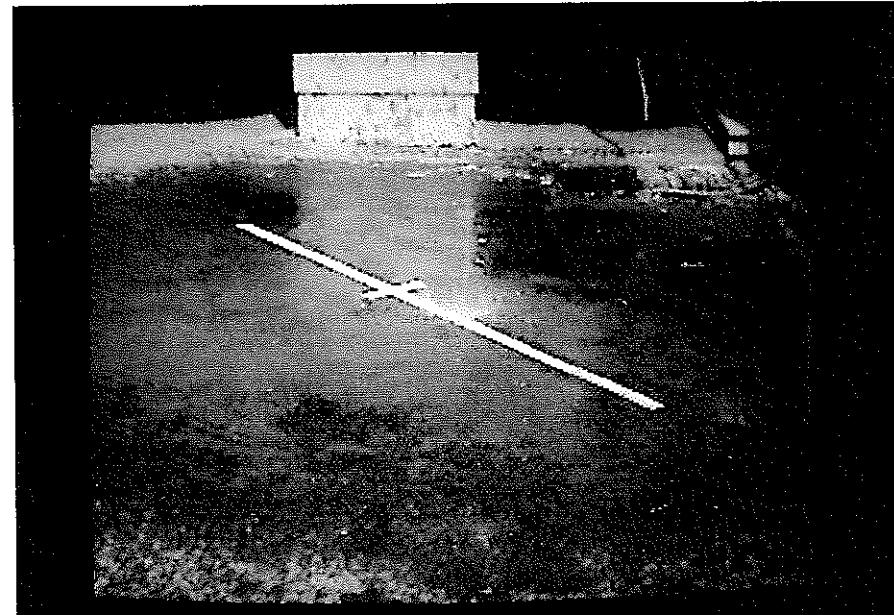


(b) 落下点での様子

図 2-11 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、50cc/sec）

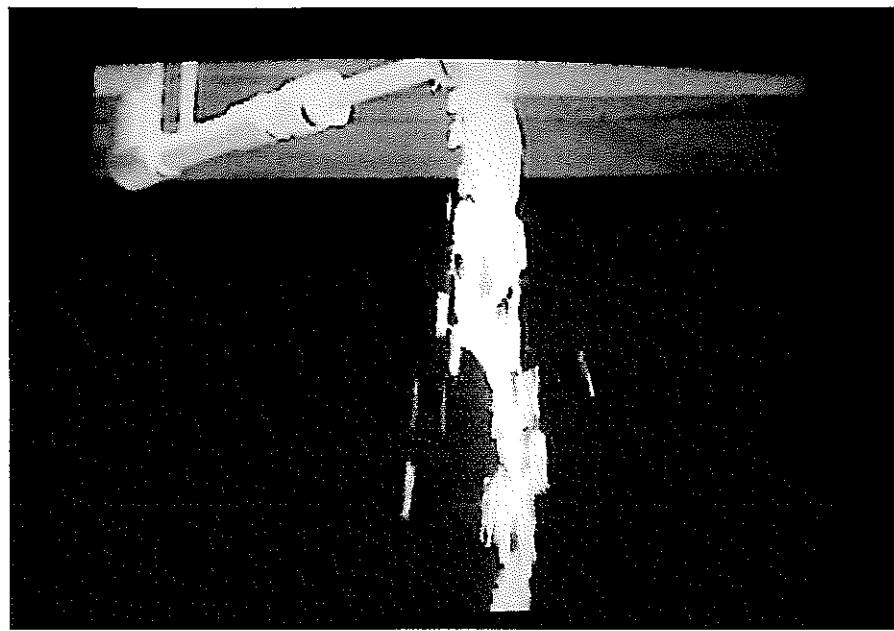


(a) 漏洩口での様子

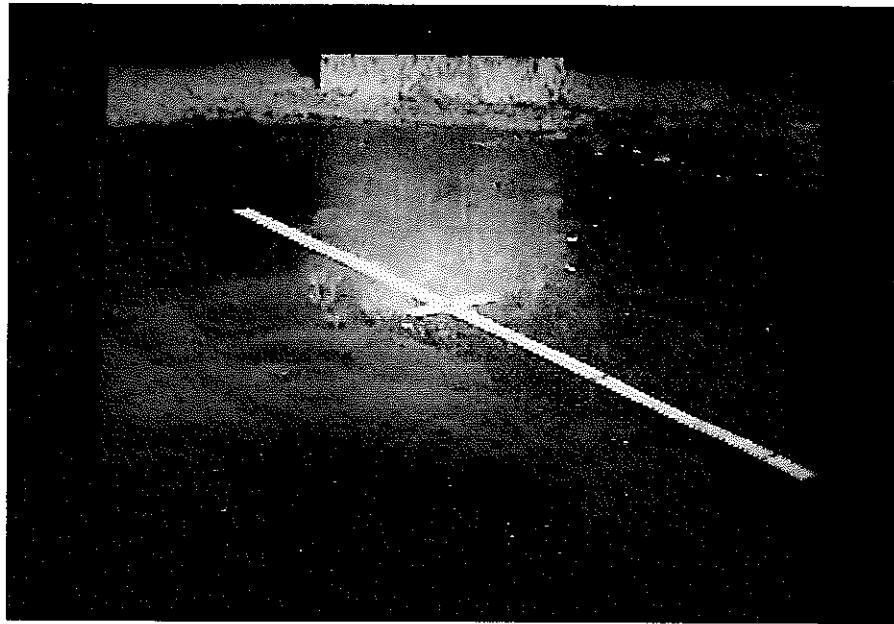


(b) 落下点での様子

図 2-12 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、100cc/sec）



(a) 漏洩口での様子



(b) 落下点での様子

図 2-13 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/8インチ円管」、150cc/sec）

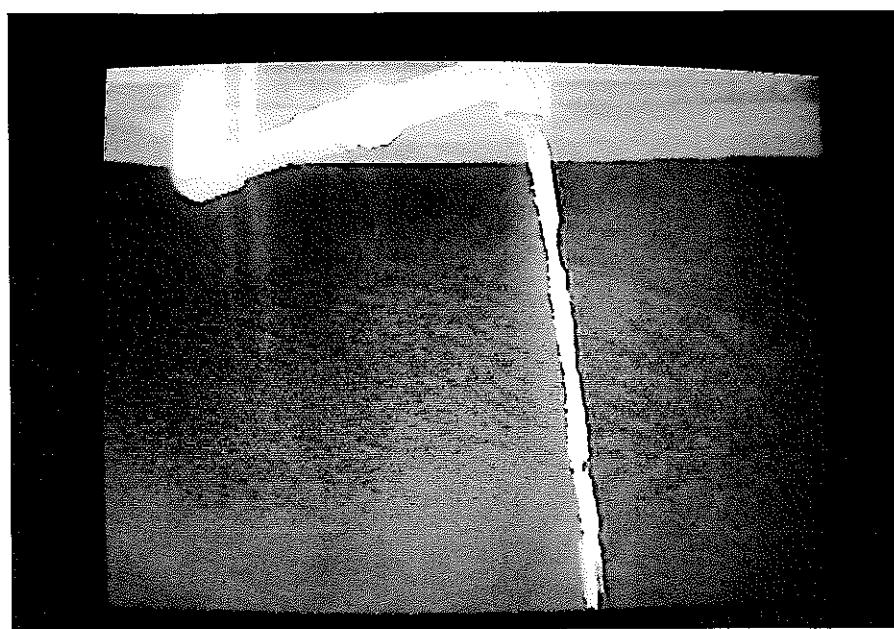


(a) 漏洩口での様子

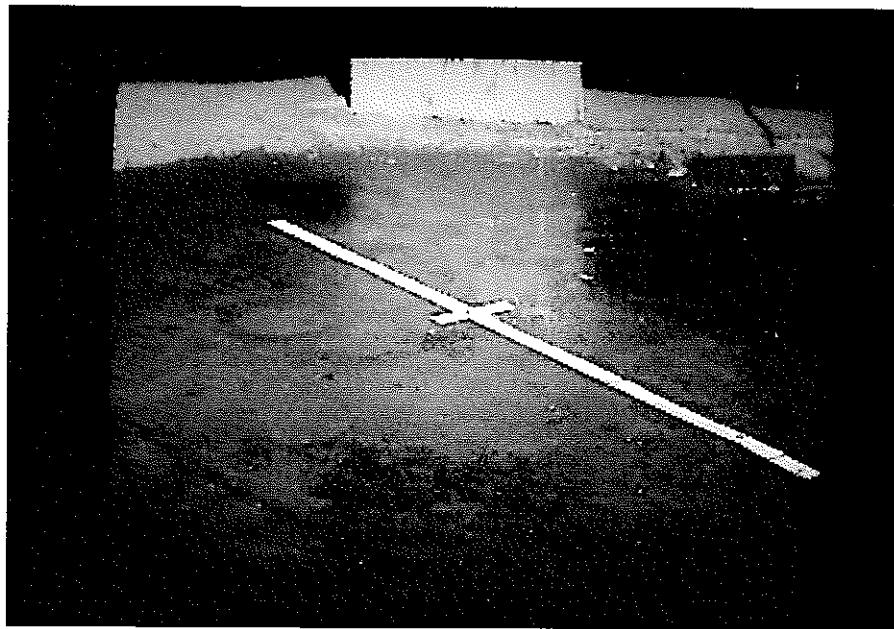


(b) 落下点での様子

図 2-14 漏洩形態（「3/4インチ曲管 + 3/4インチ円管」、25cc/sec）

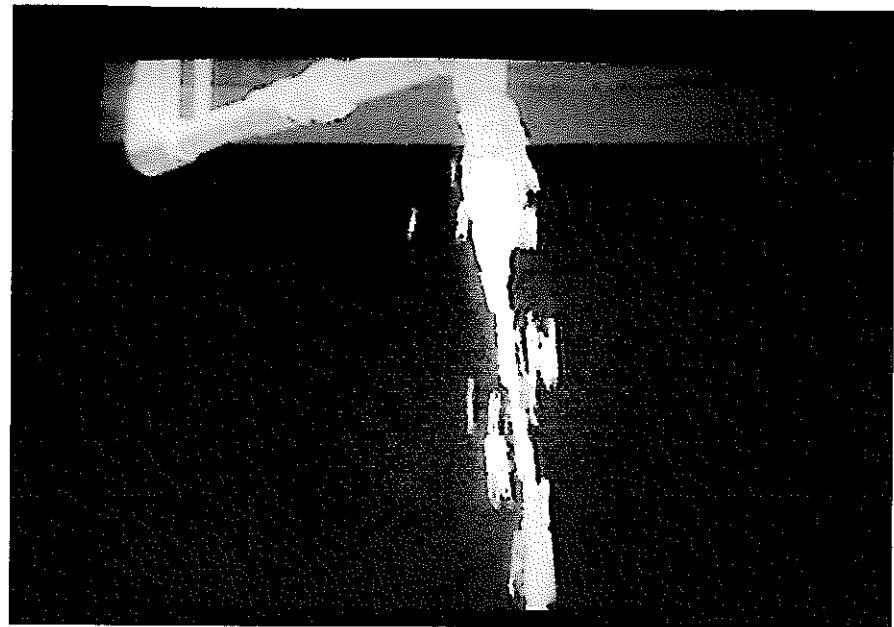


(a) 漏洩口での様子



(b) 落下点での様子

図 2-15 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、50cc/sec）

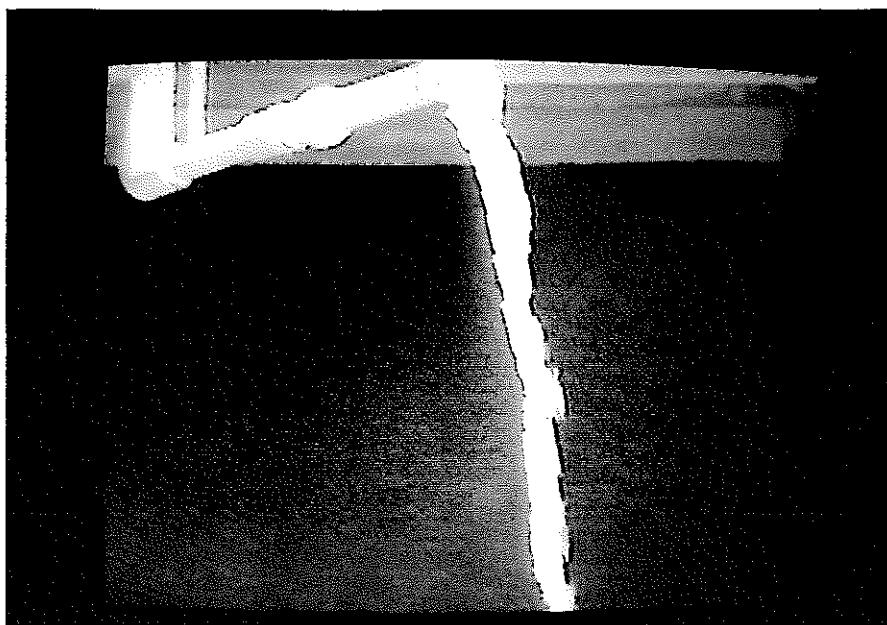


(a) 漏洩口での様子



(b) 落下点での様子

図 2-16 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、100cc/sec）

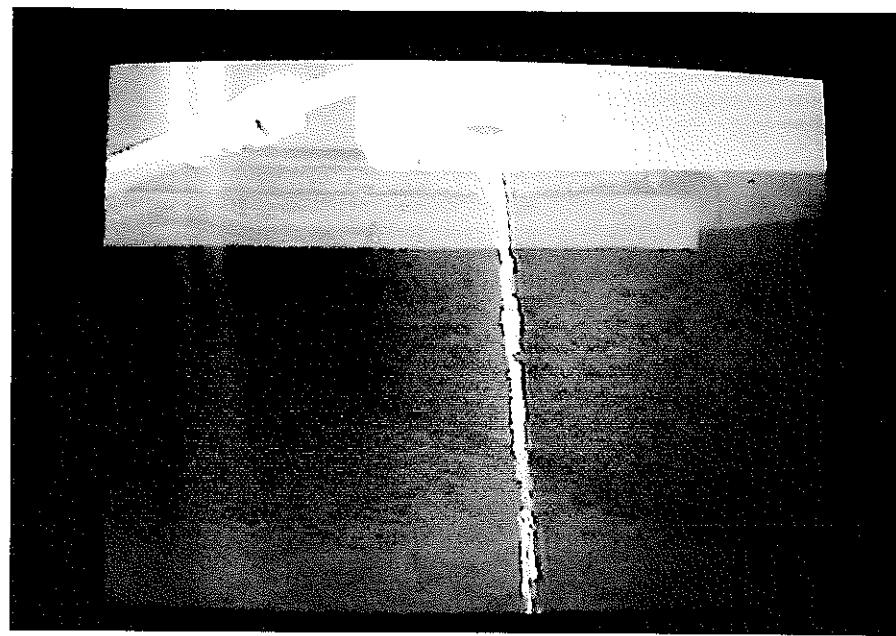


(a) 漏洩口での様子

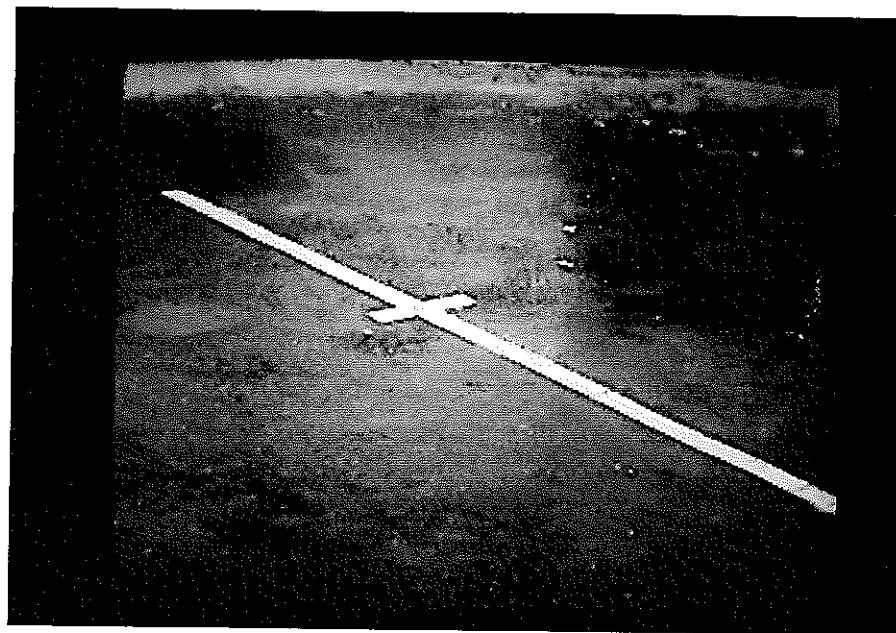


(b) 落下点での様子

図 2-17 漏洩形態（「3/4インチ曲管+3/4インチ円管」、150cc/sec）

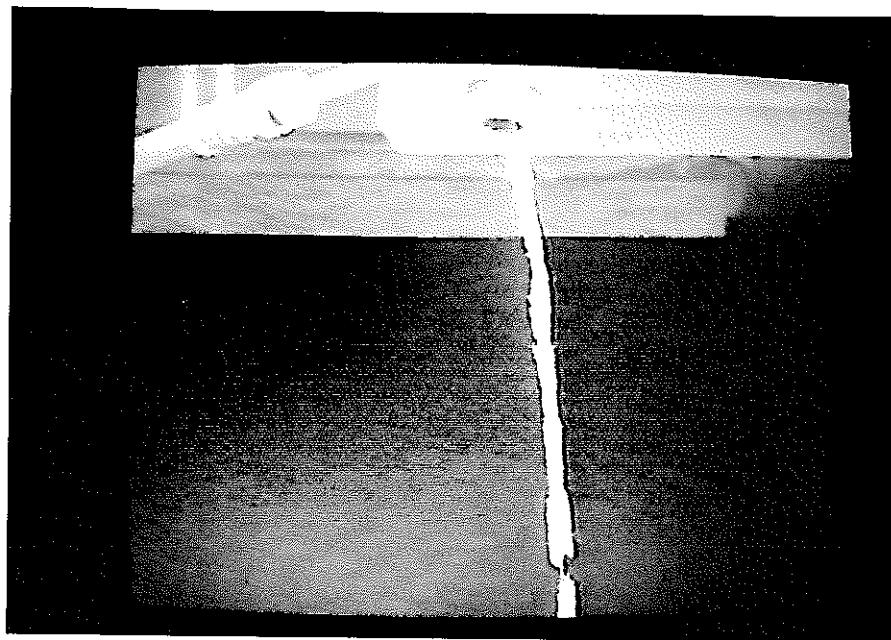


(a) 漏洩口での様子

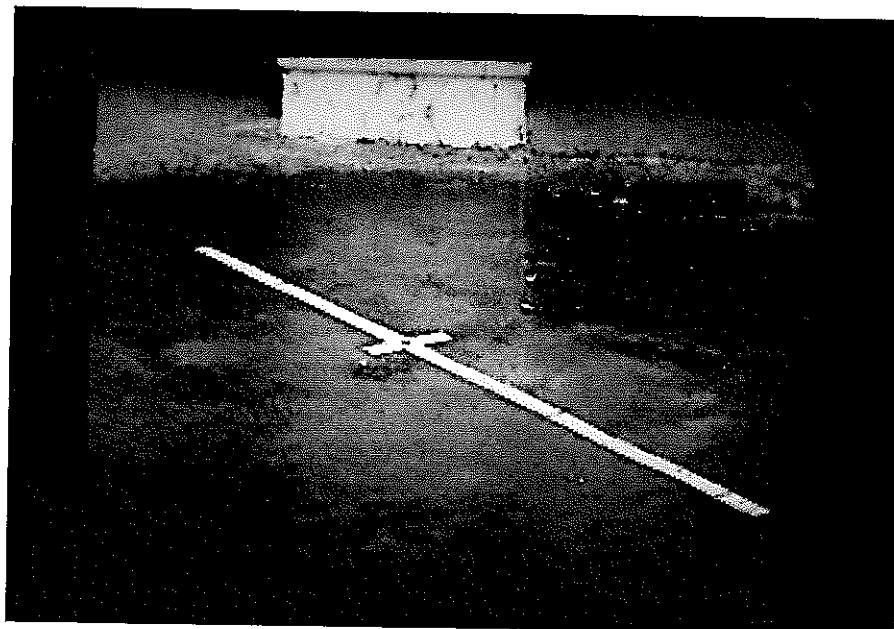


(b) 落下点での様子

図 2-18 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、25cc/sec）

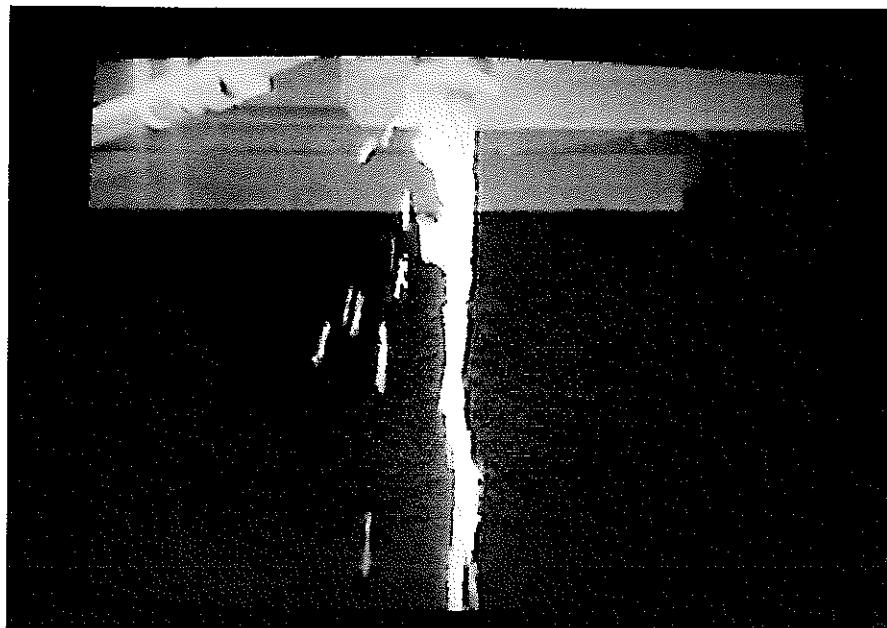


(a) 漏洩口での様子

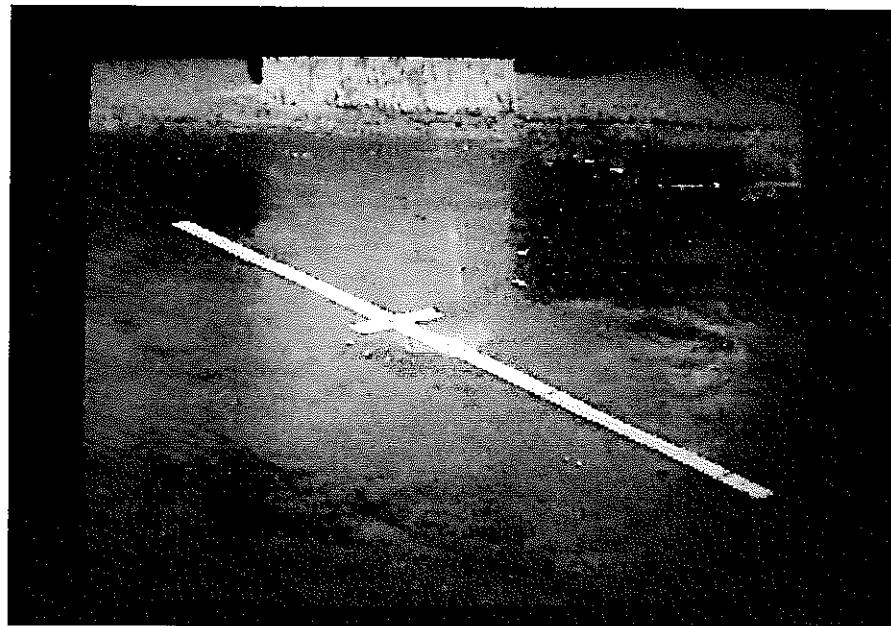


(b) 落下点での様子

図 2-19 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、50cc/sec）

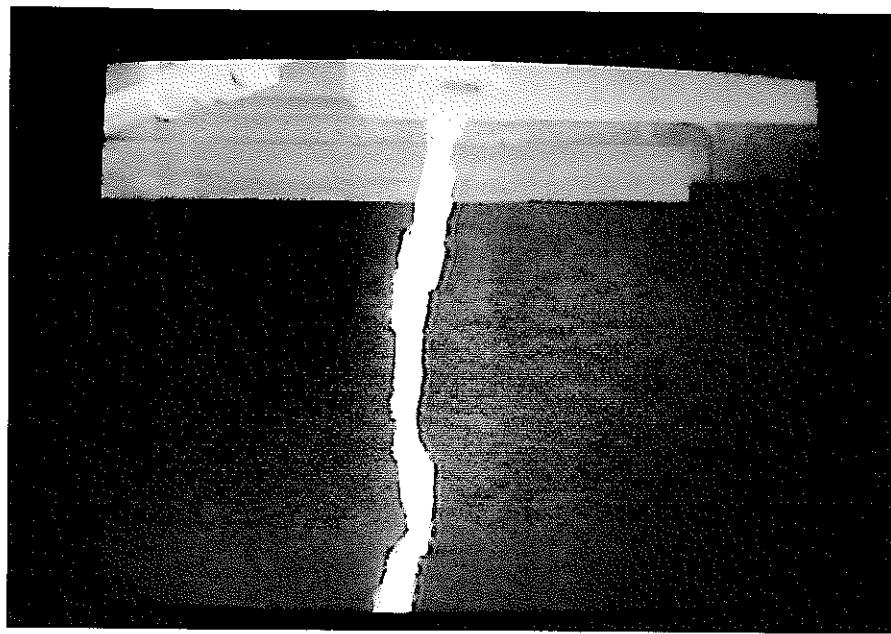


(a) 漏洩口での様子

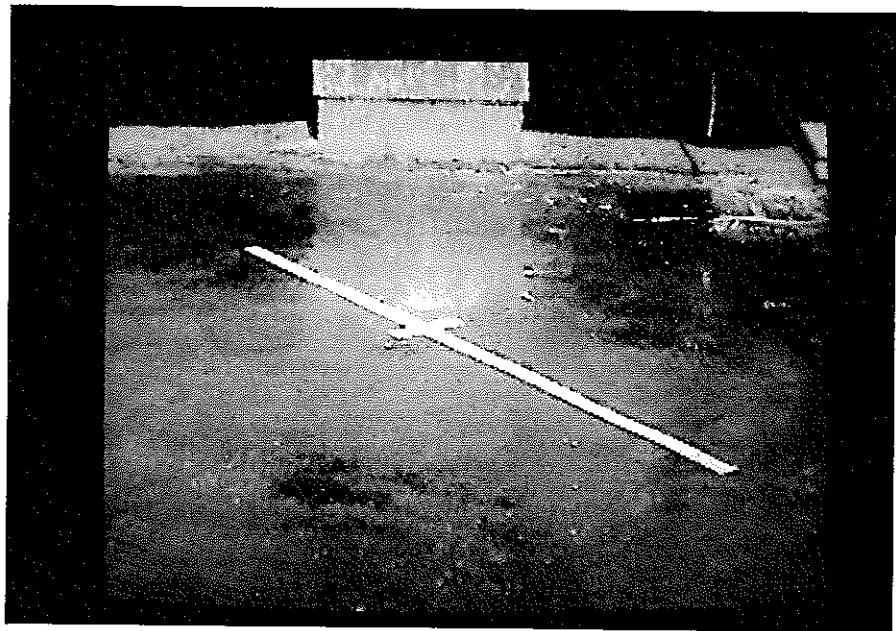


(b) 落下点での様子

図 2-20 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、100cc/sec）

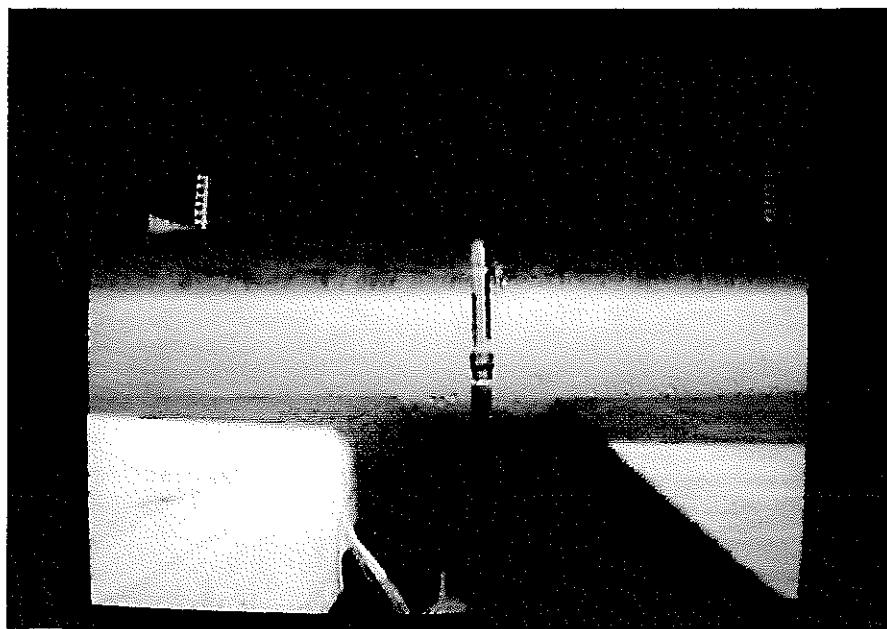


(a) 漏洩口での様子

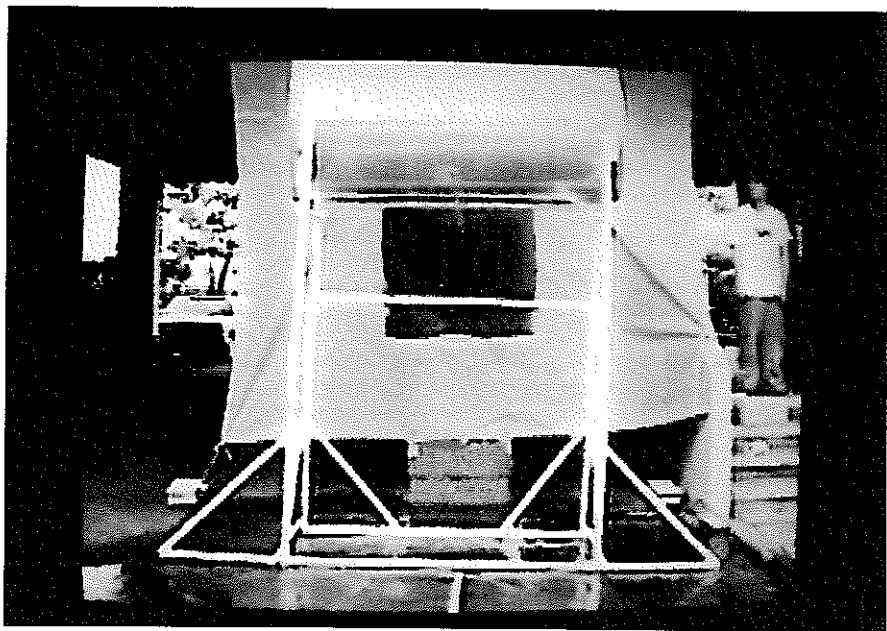


(b) 落下点での様子

図 2-21 漏洩形態（「1+1/2インチ曲管+3/8インチ円管」、150cc/sec）

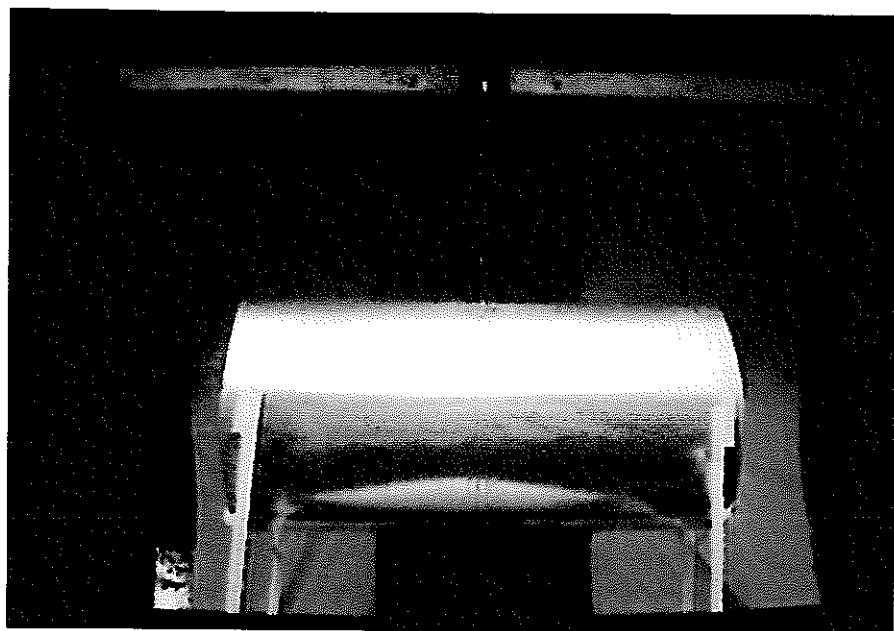


(a) 漏洩口から下の方向を見た写真

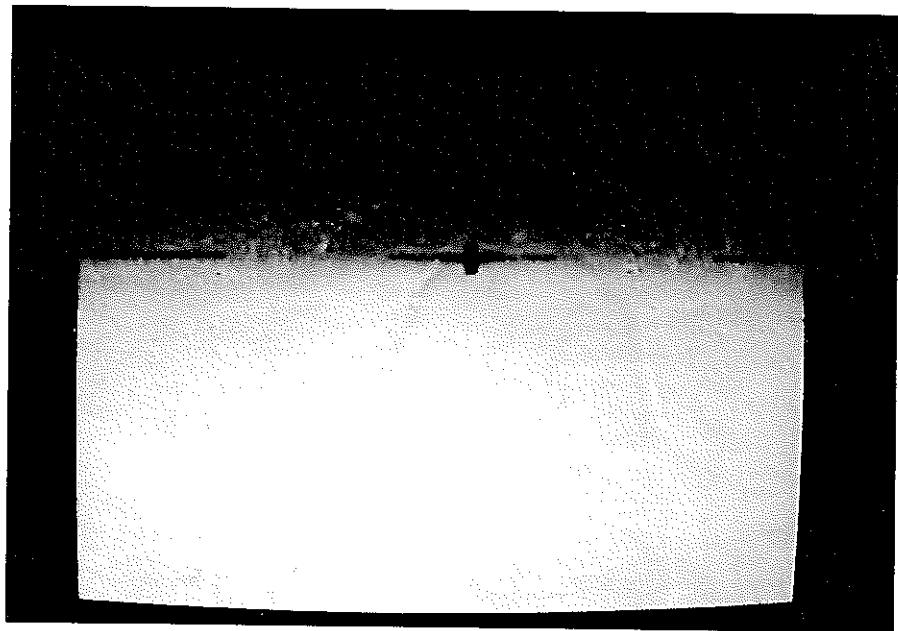


(b) 正面より空調ダクト模擬物を見た写真

図 2-22 空調ダクト模擬物を設置した実験

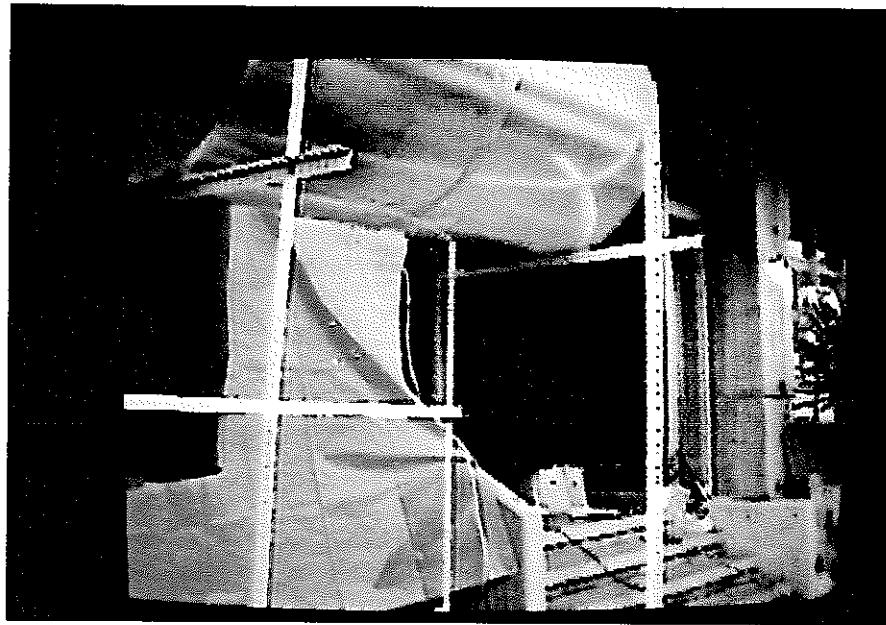


(c) 漏洩口からの水の落下の様子

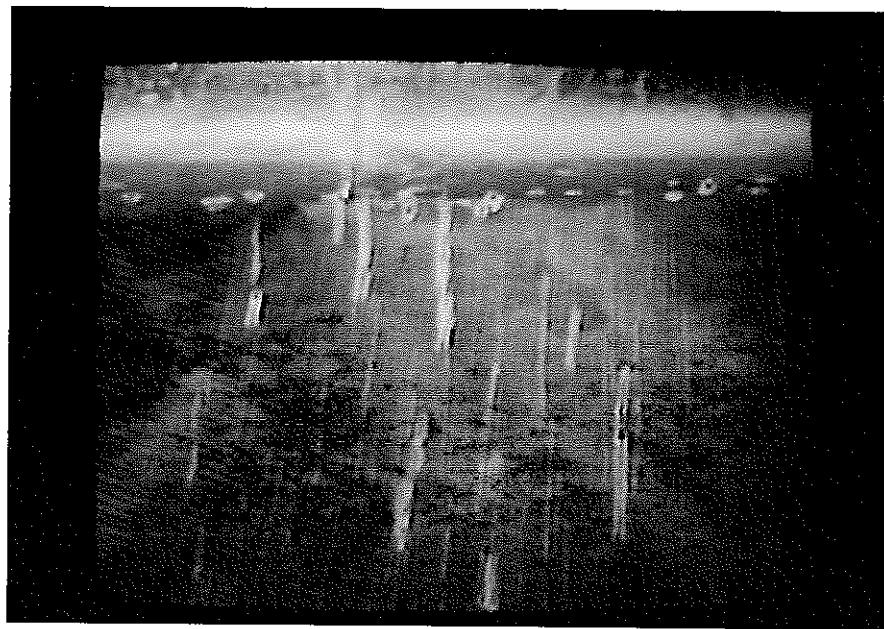


(d) 空調ダクト模擬物上の落下付近の様子

図 2-22 空調ダクト模擬物を設置した実験（つづき）

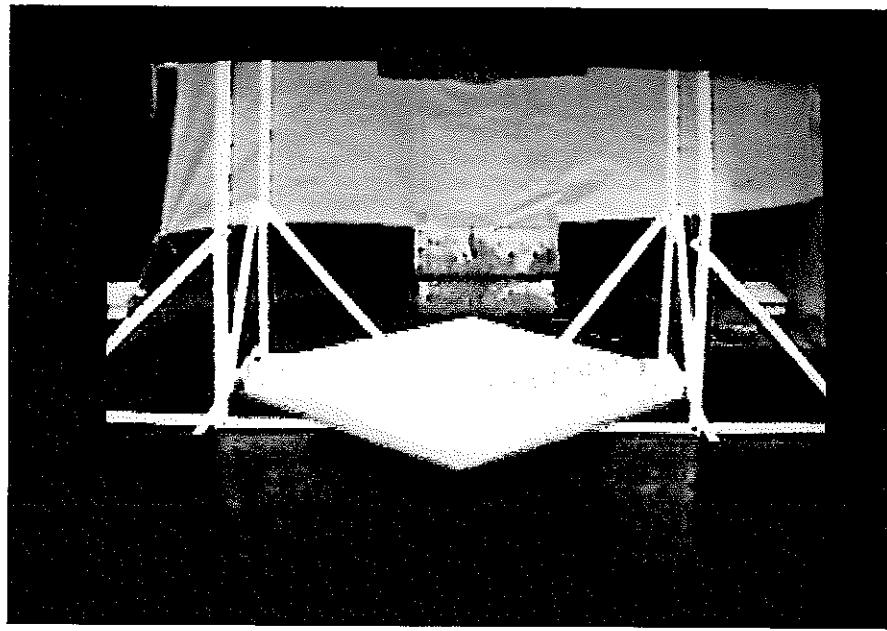


(e) 空調ダクト模擬物下側を斜めから見た写真

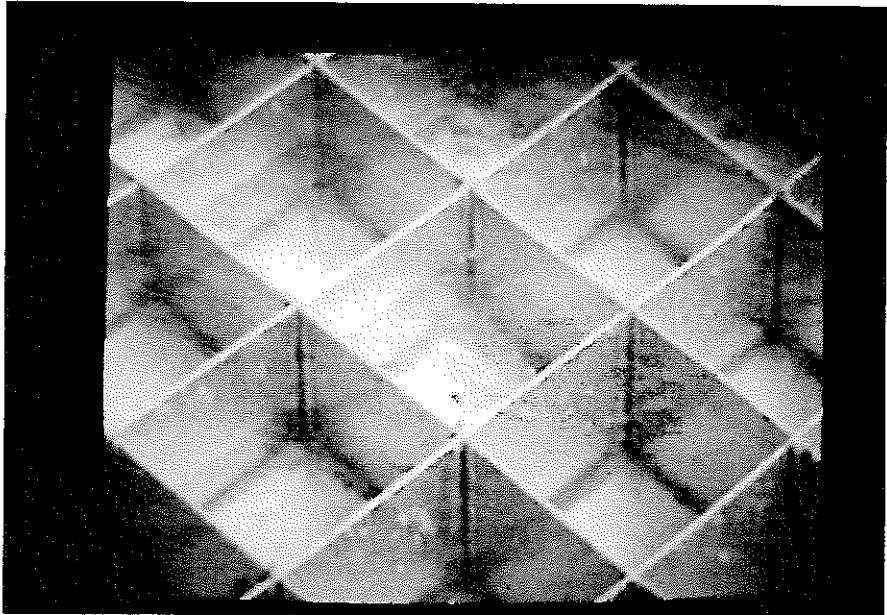


(f) 空調ダクト模擬物下側表面の拡大写真

図 2-22 空調ダクト模擬物を設置した実験（つづき）



(a) 空調ダクト模擬物下部に落下水受けを設置したところ



(b) 落下水受けの区画にたまつた水の様子

図 2-23 落下水分布の測定

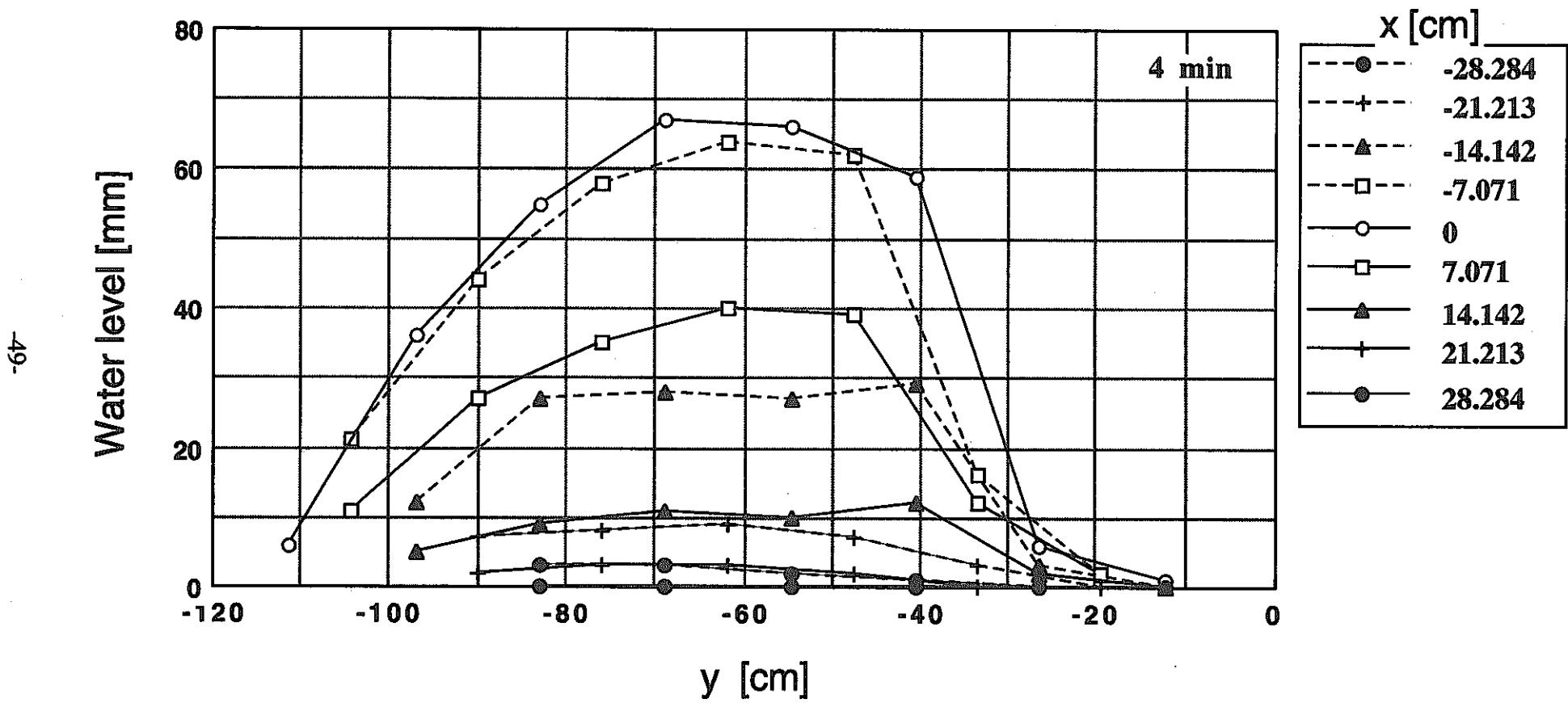


図 2-24 空調ダクト模擬物下部での落下水分布

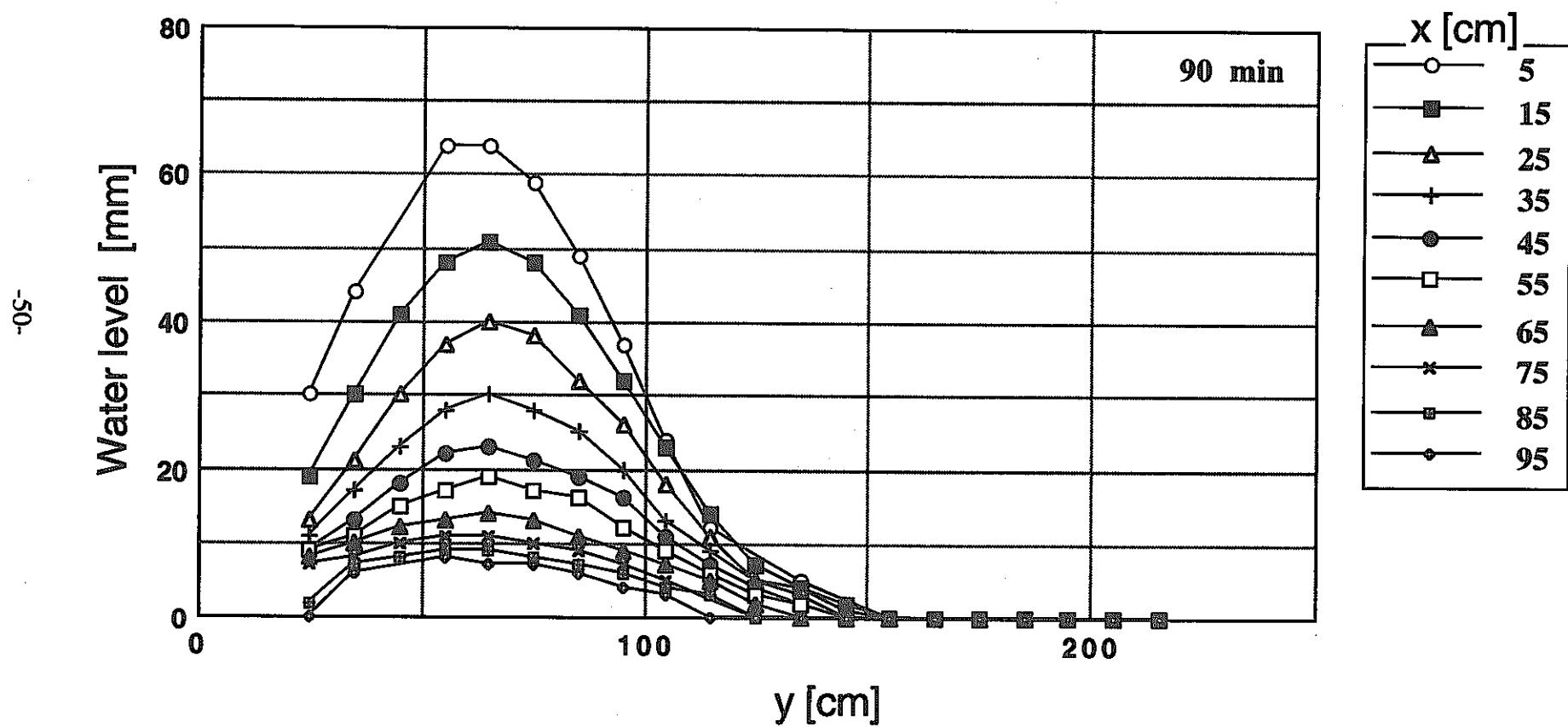


図 2-25 空調ダクト模擬物前方での落下水分布($x>0$)

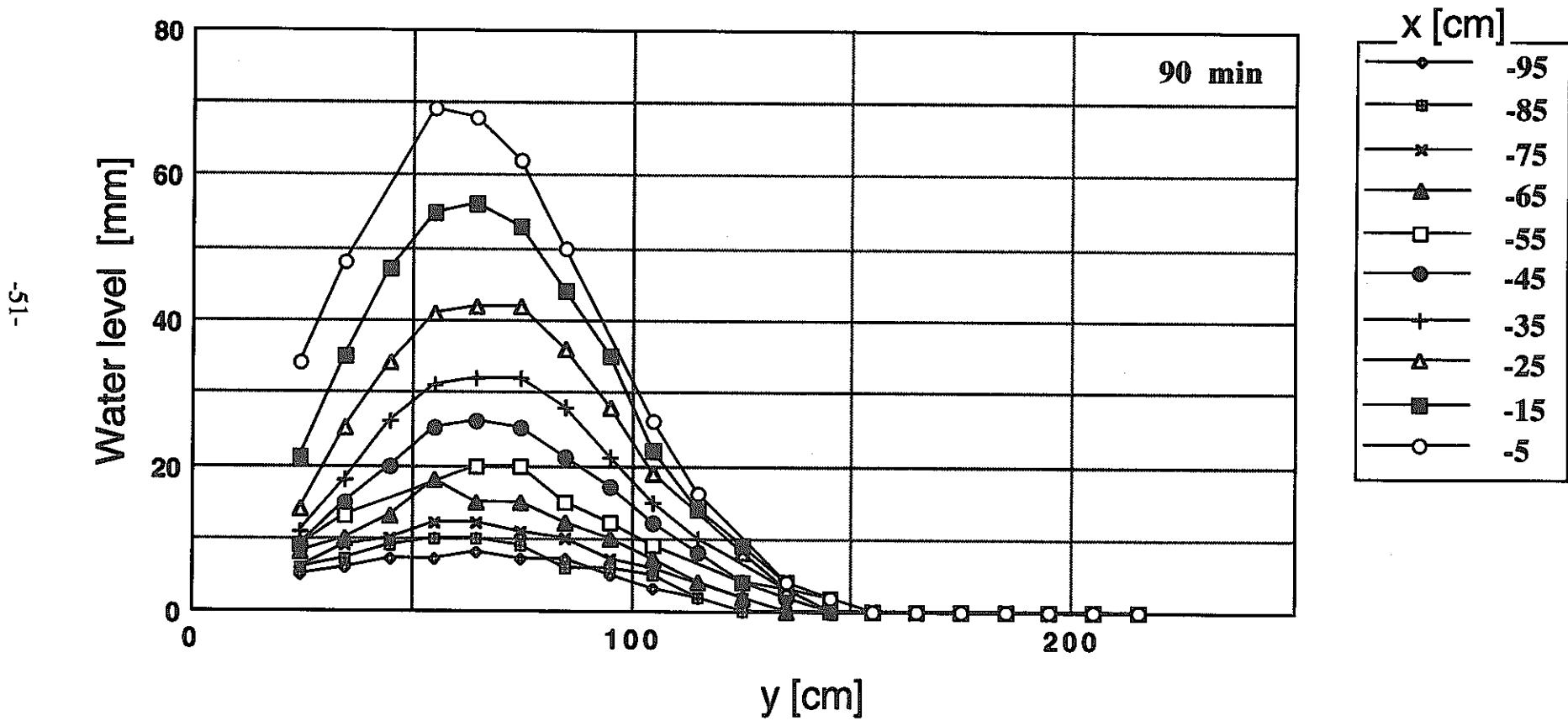


図 2-26 空調ダクト模擬物前方での落下水分布($x < 0$)

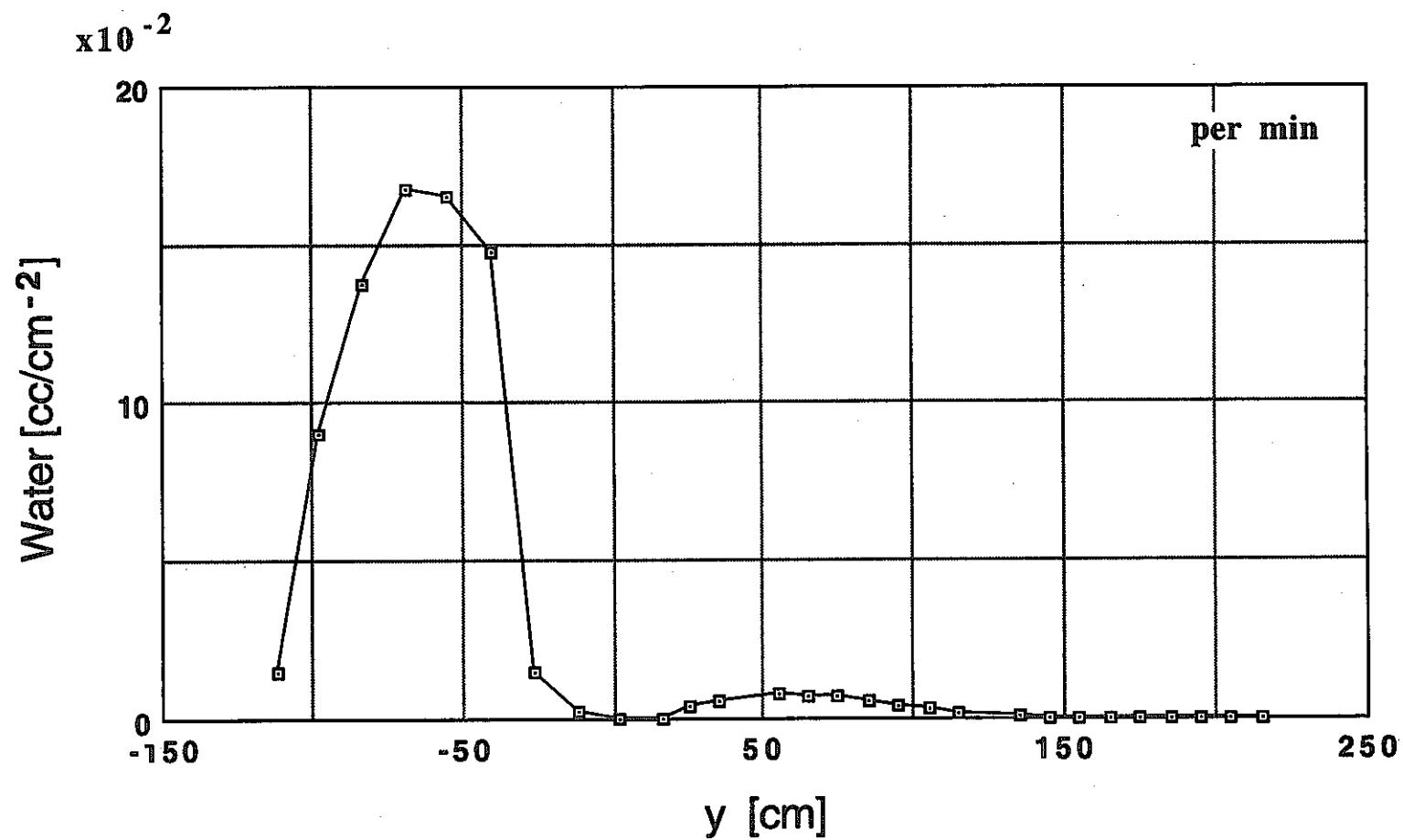


図 2-27 中心軸($x=0$)に沿った落下水分布

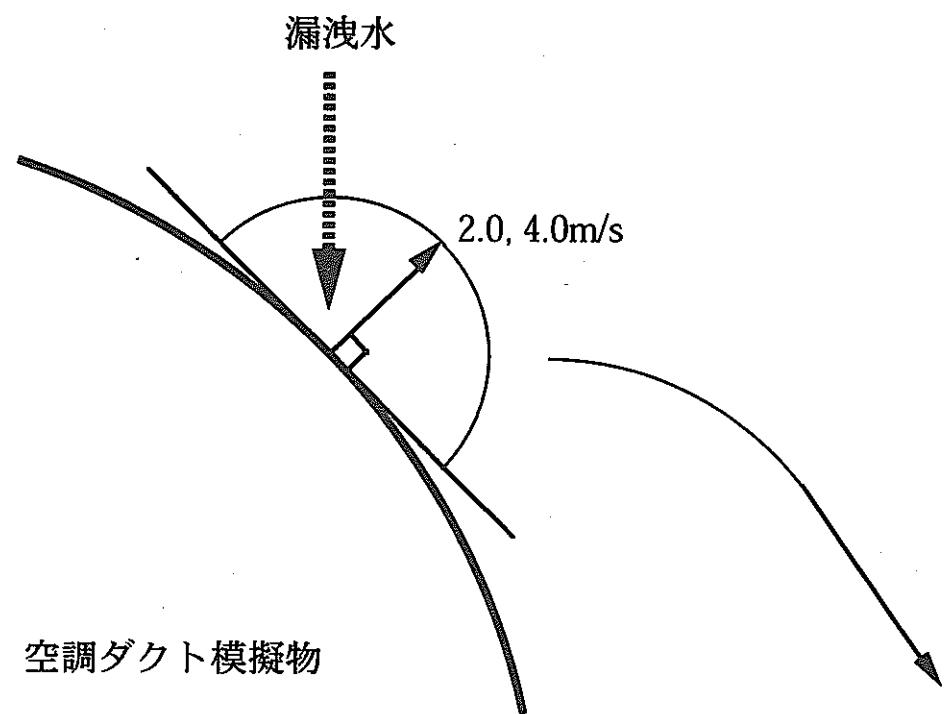


図 2-28 空調ダクト模擬物前方への水跳ね

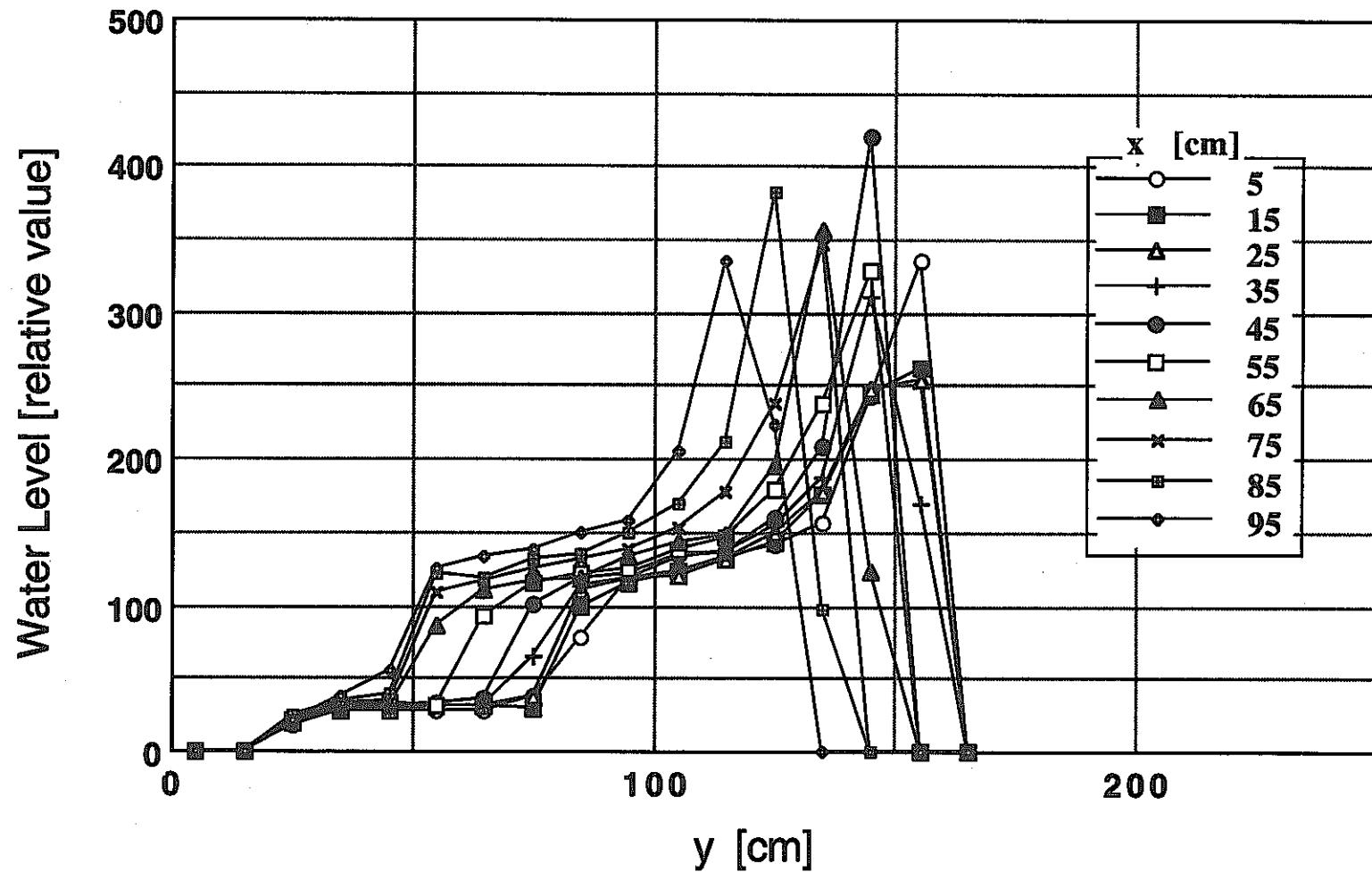


図 2-29 速度 $u=2.0\text{m/sec}$ 一定で立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布

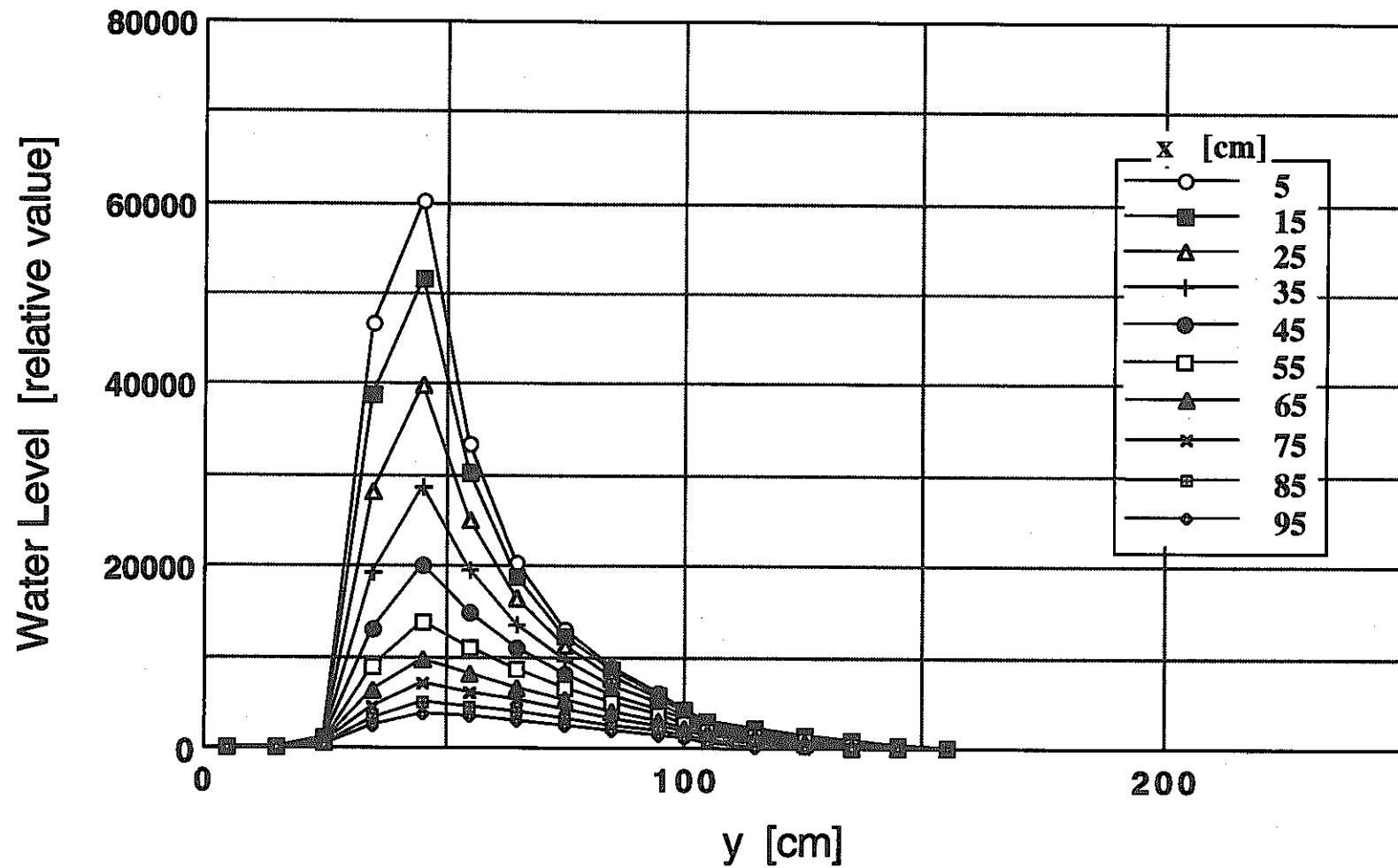


図 2-30 速度は $u=0\sim2.0\text{m/sec}$ の範囲で一様な分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布

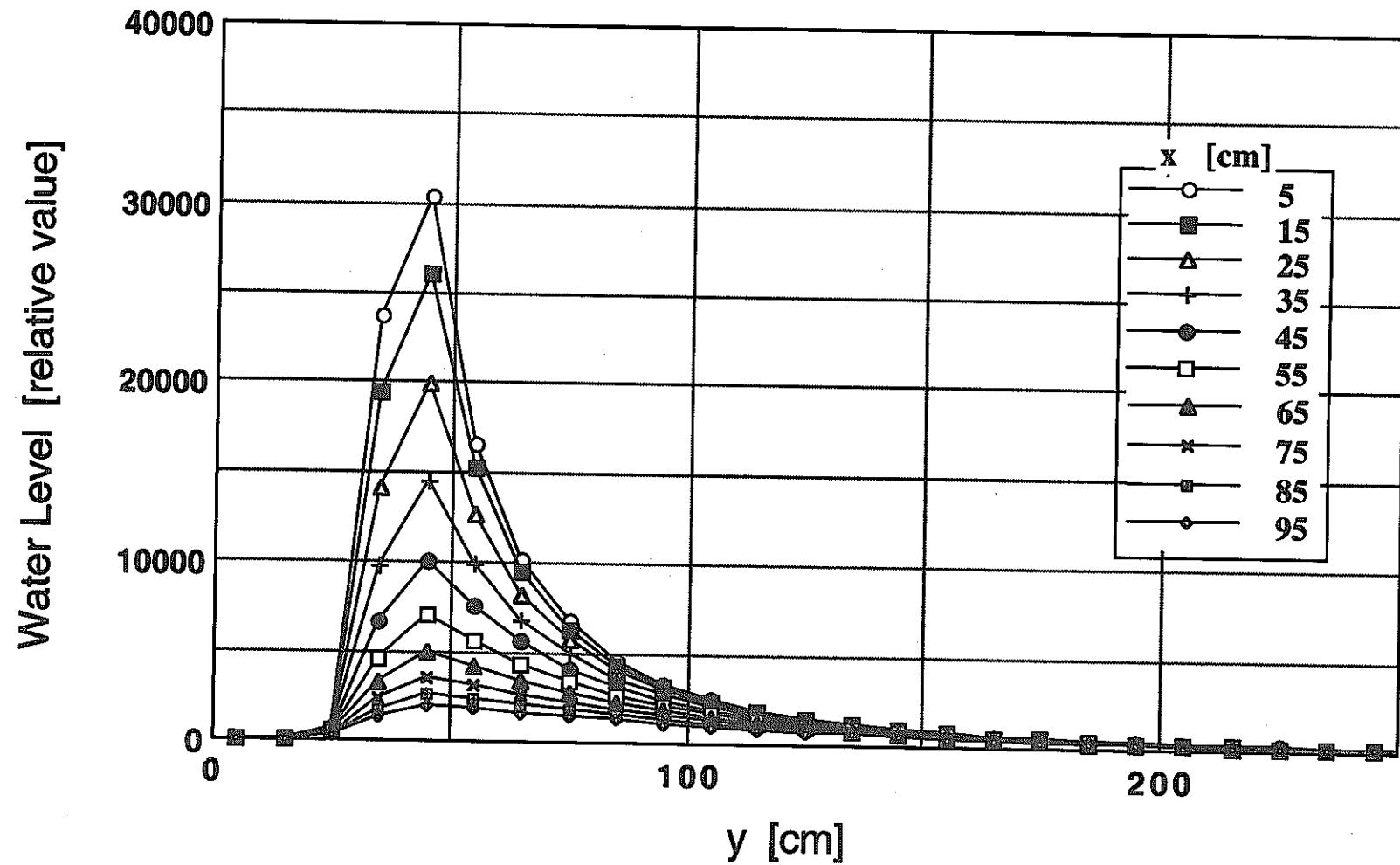


図 2-31 速度は $u=0\sim4.0\text{m/sec}$ の範囲で一様な分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布

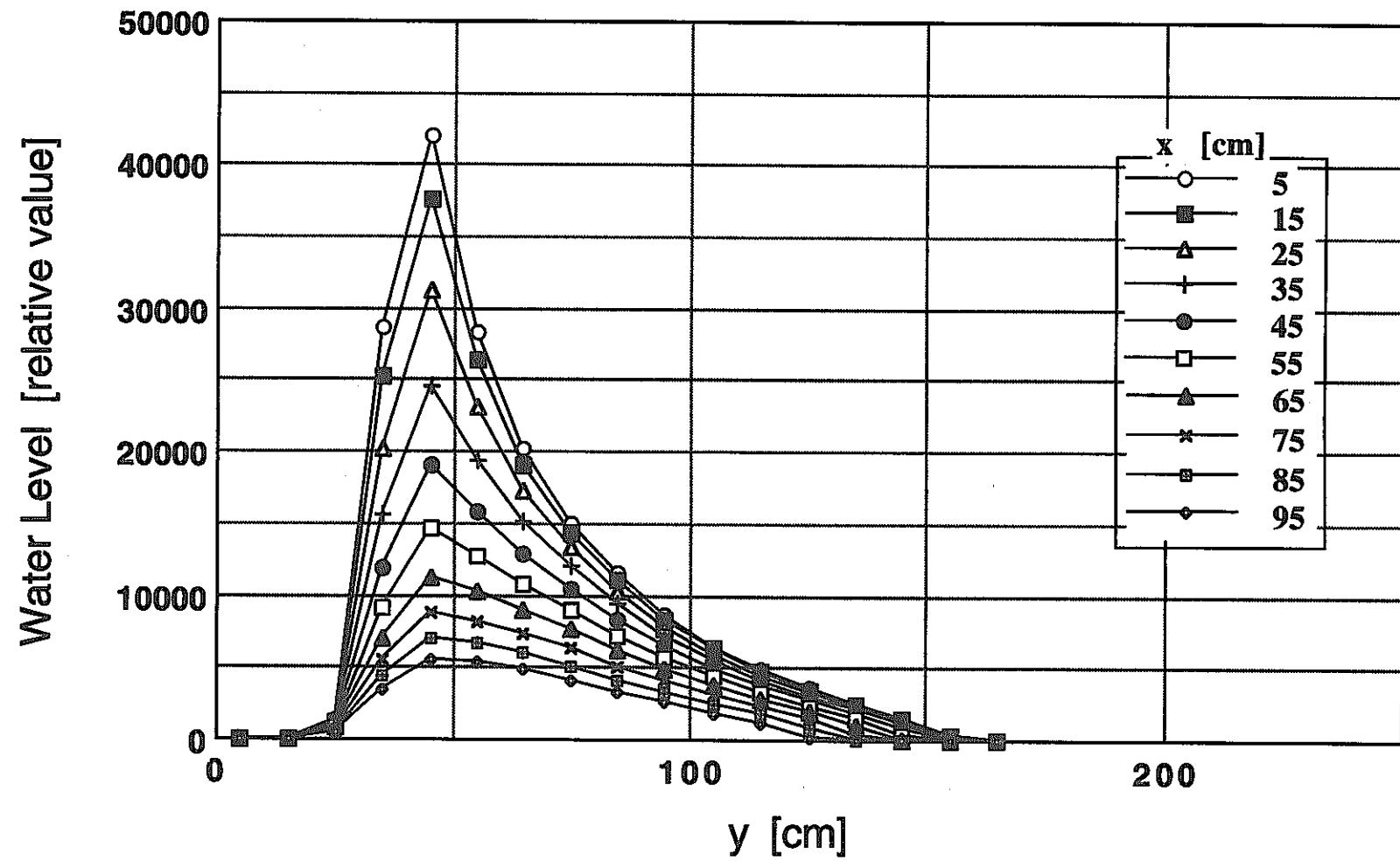


図 2-32 速度は $u=0\sim2.0\text{m/sec}$ の範囲で u に比例した分布とし立体角に均一に飛散すると仮定した時の落下水分布

第 3 章

MPS法を用いた模擬実験の 数値シミュレーション

3.1 計算コード

3.1.1 3次元MPSコード

MPS法では粒子をマクロ粒子に集まりで表し、流れの支配方程式を粒子間相互作用に置き換えて解く数値解析法である。これまで空間2次元の解析しか行なわれていなかつたが、飯田がはじめてこれを空間3次元に拡張した。MPS法では粒子間相互作用が粒子間距離の関数として表されているため、空間が2次元から3次元になっても、基本的には単に距離の計算の際に3番目の次元の効果を加えるだけによく、差分法のように計算すべき項の数が増えるわけではない。

飯田の開発した3次元MPSコード"mps3d"の構成を図3-1に示す。コードはC言語で書かれており、基本的にはこれまでの2次元コードをそのまま3次元に拡張したものである。また、近傍粒子のテーブルとして、実際に相互作用を行なう粒子に対するものと、それよりもやや広い範囲のものの2種類を用意することで、粒子法において最も計算時間が必要とする近傍粒子の検索の高速化を行なっている。さらに、メモリの割り当てをダイナミックに行なうなど、計算容量や計算速度の節約にも配慮されている。

"mps3d"を動かすには、2種類のファイルが必要である。1つは計算条件や物性などを与えるデータファイルで、拡張子"data"によって表される。もう1つは、粒子の初期配置を与えるグリッドファイルで、拡張子"grid"によって表される。それぞれのファイルの具体例を図3-2、3-3に示す。グリッドファイルでは図3-3に示すように先頭の5行とそれに続く多くの行より構成される。先頭の5行では、スカラー変数の数、時間、粒子总数、が記載されている。その後に、粒子总数の行数のデータがつづく。それぞれの行は1つの粒子の情報を表していて、1列目の整数が粒子の種類、2～4列目の実数が座標(x, y, z)、5～7列目の実数が速度(u, v, w)、その後に指定された数のスカラー変数が書かれている。スカラー変数は、圧力、温度などである。

2つの入力ファイルを指定して計算を開始すると、計算の進展に伴い、ある一定の時間間隔で出力が得られる。各時刻の出力はグリッドファイルと同じ形式となっていて、新しい時刻の粒子の情報がファイルの後ろに追加されていく。従って、出力ファ

イルはグリッドファイルが複数つながったようになっている。出力ファイルは、拡張子"prof"で表される。出力ファイルの1つの時刻の情報を抜取り、それをグリッドファイルとして計算を始めれば、その時刻から再計算できる。

3.1.2 ポストプロセッシング

計算結果の表示（ポストプロセッシング）は計算結果を理解するために重要である。特に、3次元の計算結果の全体像を理解するためには、3次元グラフィックスを用いた処理が有用である。粒子法では、計算点である粒子が時々刻々移動していくので、計算点が固定されている差分法以上に、グラフィック処理が有効である。高速で使いやすい3次元出力結果の表示手段がなければ、コード開発自体が困難になる。

これまでの2次元コードでは、一定の時間間隔で出力される粒子情報を、連続的に表示させる機能を持ったポストプロセッサーが開発されていた。今回も同様な機能を持つ3次元ポストプロセッサーが動力炉・核燃料開発事業団により開発され、東京大学において高速化等の改良がなされた。

ポストプロセッサーの構成を図3-4に示す。コードはC言語で書かれ、複数のファイルをmakeによって1つの実行プログラムを作る。3次元グラフィックスはCからGLライブラリのファンクションを呼び出すことによって実現される。GLはSilicon Graphics社のグラフィック・ワークステーション上で動作する。

本ポストプロセッサーによる画像の例を図3-5に示す。ポストプロセッサーはまず出力ファイル(*.prof)を読み込み、初期の3次元画像を表示する。ユーザーはマウスの移動とマウスのボタンを組み合わせることで、移動、回転、拡大・縮小、によって視点を移動することができる。このようにユーザーの意志によって自在に視点を変えられることが、3次元的な分布を理解するために不可欠である。また、マウスの右ボタンのオンによってコマンド・メニューが図3-5のように表示され、実行したいコマンド上にマウスのカーソルを移動した後、ボタンをオフにすればそのコマンドが実行される。"Vector"は速度ベクトルの表示、"Scalar"はスカラー変数の色調による表示、"Time Control"は表示している時刻の変更で、時間の進行の方向に連続的に表示することもできる。

3.2 計算条件

3.2.1 空調ダクト模擬物

計算は3次元MPSコードを用いて行なった。粒子の大きさは 1cm^3 とし、5232個の粒子で空調ダクト模擬物を図3-6のように表した。円筒の周方向に1.273度毎に71個の粒子を並べた。これは合計で約90度になり、漏洩水の落下点を含む1/4の円周を表す。周方向下側の48個(61.11度)に対しては、軸方向の長さの360mmに対して36個の粒子を並べ、厚さ方向に対して3個の粒子を並べた。また、周方向上側の24個(30.56度)に対しては、軸方向の長さ20mmに対して2個の粒子を並べ、厚さ方向に対して1個の粒子を並べた。こうした理由は、水粒子は落下点より高い位置のダクトに水粒子は殆ど接触しないので、空調ダクト粒子の数を減らし計算容量を節約するためである。図3-7に粒子によって表した空調ダクト模擬物のモデルを示す。これは合計5232個の粒子より構成されている。

3.2.2 漏洩水

落下水は 50cc/sec とし、地上よりの高さ3.6mから初速度ゼロで自由落下させる。水粒子1個の大きさは 1cc であるので、0.02秒間隔に1つ水粒子を発生させる。これとともに、時間刻み幅の最大値を0.02秒に制限する。実際には、クーラン条件の方が厳しくなり、これよりも1桁程度小さい時間刻み幅で計算される。実験でも見られるように、漏洩水は塊に分裂し、やや広がりをもって落下するので、計算でもこれを模擬して、初期水粒子位置を少しずつ移動させた。初期水粒子位置は、座標(0.33, 0.0, 3.6) [m]を中心、半径0.01mの円周上を移動させる。その際の角速度を $17.19\text{度(ラジアン)} / 0.02\text{秒}$ とした。

$$\begin{cases} x = 0.01\sin\theta + 0.33 \\ y = 0.01\cos\theta \\ z = 3.6 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\theta = 17.19 \frac{T}{0.02}$$

従って、何周しても全く同じ位置に水粒子が配置されることはない。

水粒子が落下し、空調ダクトに衝突し、最終的に地上に落下するまでを計算する。地上まで落下した粒子($z<0$ で判定する)は、 $10\times 10\text{cm}$ の区画のどの位置に落下したかを記録し、計算から除外する。計算では左右対称を仮定し、 $y<0$ の粒子に対しても $y>0$ で同じ絶対値の区画に落下したものとする。水粒子として200個を用意しておき、最初は全て計算から除外しておく。時間の経過とともに0.02秒おきに水粒子を発生させる。水粒子発生は、除外されていた水粒子を活性化させることによって行なう。落下水はおよそ1秒で地上に落下するので、活性化されている水粒子数は常時50個程度である。落下位置分布を出すためには、長い時間計算しなければならないので、水粒子は活性化と除外を何回も繰り返すことになる。

3.2.3 水とダクトとの衝突モデル

水粒子数が少ないので、水粒子のふるまいは連続体としての相互作用よりも、空調ダクトに衝突したときの跳ね返りの相互作用によって殆ど決まってしまう。粒子間の跳ね返りの相互作用モデルは、水粒子が壁を突き抜けてしまうことを防ぐために、対処療法的に導入された相互作用で、2つの粒子の間の距離がある一定の長さ未満になつたら、両者の間に弾性衝突を生じさせるというものである。2次元の計算では、この相互作用が例外的にしか働かず、計算結果に影響を与えない範囲で用いていた。しかしながら、本計算では跳ね返りの相互作用がなければ、水粒子が殆ど全て空調ダクトを突き抜けてしまうので、この相互作用を適切に与える必要がある。

ここでは跳ね返りの相互作用として以下のものを与えた。

(1) 水粒子速度が 1.0m/sec より大きい場合には、完全な非弾性散乱が生じるものとする。すなわち、衝突後の速度はゼロにする。

(2) 水粒子速度が 1.0m/sec 以下の場合には、空調ダクトの径方向速度をゼロとともに周方向速度は変化しないとする。

従って、落下してきた水粒子が空調ダクトに衝突すると、まずその位置に止る。その後、重力の作用により周方向速度が与えられ、空調ダクト表面をすべり落ちる。やがて空調ダクトから離れて自由落下する。

実験より、塊となって落下する水の間に空気を巻き込むことにより、空調ダクト表面で局所的に圧力が高くなり、これによって等方的に水が飛散すると考えられる。本計算による跳ね返りの相互作用では、水粒子が空調ダクト上の落下位置に集まるため、この位置で粒子数密度が高くなり、MPS法の非圧縮性条件の相互作用モデルが働いて圧力が上昇し、水粒子を飛散させる。従って、比較的少ない粒子数でありながら、圧力上昇による水を飛散を表現できるものとなっている。

3.3 計算結果および考察

3.3.1 表面張力モデルがない場合の計算結果

表面張力モデルがない場合の計算結果を表3-1に示す。計算した時間は600秒間で、発生させた水粒子の総数は30,000個、うち地上まで落下したものの数は29,942個である。残りの58個については、計算終了時で落下途中のものである。落下した水粒子のうち、 $-100 < x < 100, -45 < y < 205$ cm の範囲に入ったものは25,339個で、84.6%である。実験と同様の90分間あたりの落下水を見積り、水位として表したもののが図3-10である。 $y=30$ cmのところに鋭いピークがあるが、これは水粒子が空調ダクト模擬物を滑り落ちた位置である。従って、この部分については実際には空調ダクトを伝って、下側に回り込んでから地上に落下するものと考えられる。

このピーク以外のところの分布を見るためにスケールを変えた落下水分布を図3-11に示す。ピーク部分を除いても、実験と比較して約1～2倍（計算では $x < 0$ の落下水を $x > 0$ の側に加えているが、図2-25や2-26ではそれぞれの側の分布しか示されていないことに注意）の蓄積量がある。また、 $y > 150$ cmの遠方には実験では殆ど飛散していないが、計算では多少の蓄積がある。

3.3.2 表面張力モデルがある場合の計算結果

飯田によって作成された表面張力モデルがある場合の計算結果を表3-2に示す。計算した時間は1,380秒間で、発生させた水粒子の総数は69,000個、うち地上まで落下したものの数は68,940個である。落下した水粒子のうち、 $-100 < x < 100, -45 < y < 205$ cm の範囲に入ったものは61,507個で、89.2%である。実験と同様の90分間あたりの落下水を見積り、水位として表したもののが図3-12である。 $y=30$ cmのところに鋭いピークがあるが、表面張力がない場合よりもこのピーク部分の水量はやや多くなっている。これは、表面張力モデルがあると、漏洩口から空調ダクトまで落下する間に粒子が互いに接近することによって、かえって粒子間に反発力が生じ、より広がって空調ダクトに衝突するためである。広がって衝突すると、発生圧力も低くなり、従って飛散量も減少する。その分、空調ダクトを滑らかに滑り落ちる水量が増える。

このピーク以外のところの分布を見るためにスケールを変えた落下水分布を図3-13に示す。表面張力のない場合と比較して、空調ダクト正面の方向にはより多くの蓄積量があり、横方向にはより少ない蓄積量となっている。また、 $y=100\text{cm}$ のところにも小さなピークがあり、 x が増加するに従いピークの y 座標が小さくなっている。これは2.4項の理論的考察で示したように、ある一定の跳ね返り速度で立体角に一様に飛散した場合の落下水分布と同じ傾向である。跳ね返り速度が 2.0m/s の場合の落下水分布は図2-29に示されているが、ピークは $y=150\text{cm}$ のところにある。本計算ではこれよりもやや y 座標が小さいところにピークがあるので、一様に跳ね返りが起きている水粒子の速度は 2.0m/s より小さい。

3.3.3 考察

図3-14に空調ダクト模擬物前方の落下水分布($x=5, 65\text{cm}$)の実験結果および2つの計算結果の比較を示す。スケールを変えて比較しやすくしたもの図3-15に示す。計算結果では以下の点が実験結果と異なっている。

- (1) 空調ダクト模擬物を伝う現象が模擬されておらず、漏洩水が殆ど全て空調ダクト模擬物前方に落下している。
- (2) 飛散した水の量は実験よりも多い。

まず、(1)の不一致点については、今後表面張力モデルの改良、あるいは、物体表面との粘着力のモデル化、によって、改善していかなければならない。あるいは、実験で考察したように、漏洩水の落下形態としては、漏洩量がある程度増えても変わらないと考えられるので、より漏洩水量を多くして計算することも考えられる。水粒子が多数ある方が、表面張力モデルが適切に働くと思われる。

次に、(2)の不一致点であるが、水の飛散は空調ダクトへの落下地点における跳ね返りモデルに大きく依存しているため、この改良によって改善されると考えられる。ただし、水が空調ダクトを伝う現象の計算を行なうためにモデルの改良等を行なうと、当然飛散する水の分布も変わると考えられるので、(1)と合わせて検討していかなくてはならない。

表 3-1 MPS法による落下水の蓄積量分布の計算結果（表面張力モデルなし）

時間：600秒、落下水総量：29942cc、区画内水総量：25339cc、蓄積量：10x10cm区画内[cc]、(x,y)座標：区画の中心[cm]

| v \ x | 5.0 | 15.0 | 25.0 | 35.0 | 45.0 | 55.0 | 65.0 | 75.0 | 85.0 | 95.0 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| -40.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -20.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -10.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10.0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| 20.0 | 107 | 90 | 103 | 77 | 52 | 31 | 14 | 11 | 4 | 10 |
| 30.0 | 3899 | 3089 | 2277 | 1290 | 743 | 463 | 317 | 212 | 176 | 156 |
| 40.0 | 672 | 680 | 547 | 462 | 290 | 236 | 173 | 109 | 109 | 112 |
| 50.0 | 387 | 332 | 301 | 245 | 199 | 145 | 134 | 69 | 67 | 68 |
| 60.0 | 240 | 233 | 212 | 183 | 153 | 133 | 109 | 83 | 75 | 58 |
| 70.0 | 181 | 147 | 156 | 141 | 102 | 96 | 101 | 114 | 74 | 50 |
| 80.0 | 151 | 134 | 112 | 97 | 99 | 76 | 99 | 75 | 65 | 46 |
| 90.0 | 110 | 123 | 103 | 78 | 79 | 107 | 74 | 51 | 50 | 43 |
| 100.0 | 116 | 121 | 103 | 99 | 102 | 66 | 62 | 43 | 31 | 16 |
| 110.0 | 87 | 84 | 52 | 55 | 41 | 22 | 29 | 26 | 23 | 12 |
| 120.0 | 45 | 42 | 31 | 42 | 35 | 27 | 19 | 16 | 13 | 24 |
| 130.0 | 37 | 35 | 28 | 32 | 15 | 14 | 12 | 14 | 15 | 15 |
| 140.0 | 37 | 22 | 25 | 14 | 17 | 17 | 12 | 8 | 8 | 7 |
| 150.0 | 20 | 26 | 16 | 19 | 16 | 15 | 8 | 9 | 8 | 5 |
| 160.0 | 28 | 11 | 17 | 18 | 11 | 7 | 10 | 9 | 6 | 6 |
| 170.0 | 22 | 15 | 8 | 9 | 14 | 8 | 8 | 5 | 4 | 4 |
| 180.0 | 16 | 10 | 10 | 15 | 9 | 10 | 11 | 9 | 6 | 5 |
| 190.0 | 18 | 13 | 7 | 7 | 8 | 5 | 7 | 7 | 7 | 2 |
| 200.0 | 8 | 9 | 3 | 3 | 4 | 5 | 2 | 5 | 6 | 1 |

表 3-2 MPS法による落下水の蓄積量分布の計算結果（表面張力モデルあり）

時間：1380秒、落下水総量：68940cc、区画内水総量：61507cc、蓄積量：10x10cm区画内[cc]、(x,y)座標：区画の中心[cm]

| v \ x | 5.0 | 15.0 | 25.0 | 35.0 | 45.0 | 55.0 | 65.0 | 75.0 | 85.0 | 95.0 |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| -40.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -20.0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -10.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10.0 | 9 | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 20.0 | 324 | 299 | 200 | 140 | 76 | 43 | 24 | 18 | 14 | 5 |
| 30.0 | 14778 | 5693 | 2883 | 1539 | 877 | 570 | 374 | 249 | 196 | 193 |
| 40.0 | 4866 | 2168 | 1161 | 713 | 445 | 280 | 208 | 118 | 128 | 108 |
| 50.0 | 1525 | 1178 | 819 | 563 | 325 | 228 | 129 | 115 | 77 | 84 |
| 60.0 | 850 | 736 | 570 | 452 | 286 | 203 | 171 | 108 | 87 | 51 |
| 70.0 | 600 | 489 | 464 | 363 | 258 | 186 | 150 | 111 | 122 | 59 |
| 80.0 | 442 | 439 | 372 | 293 | 213 | 172 | 150 | 147 | 86 | 82 |
| 90.0 | 376 | 339 | 311 | 279 | 234 | 221 | 162 | 117 | 74 | 68 |
| 100.0 | 377 | 350 | 383 | 297 | 243 | 167 | 111 | 75 | 46 | 38 |
| 110.0 | 283 | 257 | 205 | 170 | 120 | 105 | 76 | 59 | 29 | 30 |
| 120.0 | 133 | 148 | 137 | 106 | 87 | 80 | 67 | 46 | 19 | 25 |
| 130.0 | 101 | 110 | 99 | 80 | 68 | 54 | 46 | 33 | 31 | 26 |
| 140.0 | 85 | 65 | 70 | 59 | 64 | 55 | 44 | 32 | 20 | 18 |
| 150.0 | 67 | 42 | 45 | 46 | 39 | 22 | 35 | 20 | 30 | 22 |
| 160.0 | 45 | 45 | 41 | 43 | 30 | 25 | 26 | 11 | 22 | 15 |
| 170.0 | 25 | 27 | 27 | 30 | 26 | 30 | 20 | 13 | 25 | 19 |
| 180.0 | 26 | 21 | 28 | 32 | 24 | 17 | 14 | 22 | 10 | 12 |
| 190.0 | 16 | 17 | 23 | 22 | 25 | 15 | 19 | 16 | 13 | 10 |
| 200.0 | 14 | 9 | 18 | 15 | 17 | 11 | 15 | 11 | 13 | 9 |

mps3d

mps3d.h

double MtKvTF

mps3d.c

void GradP

void main

void PCG

void *mallocem

int ICD

void *reallocem

int UUSolver

FILE *fopenem

double Source

char *TimeStr

void CMatrix

char *dFixStr

void NrstWFDst

FILE *DbgMsgOut

void ExitCode

FILE *RptMsgOut

void Collision

FILE *NulMsgNul

void WriteLatticeData

void DampMatrix

void CmdLine

void ReadParameter

void ReadParticleData

void WriteParticleData

double *LcVV

double Norm

double Norm2

double IpVV

void mulMV

double TimeStep

void AddList

void SetRadar

void SetNeigh

void NDensity

double weight

double WtIntR

double WtInt

double DACoeff

図 3-1 3 次元MPSコードの構成
(mps3d.c以下のものはファンクション名)

exp.data

[Comment]

exp.data : Parameter file for MPS3D.EXE

[Parameter]

| | | | | | | |
|----------------|-----------|---|---|------------------------------------|--|--|
| MaxTime | 6.0 | /* Max Timelength of Simulation [s] */ | | | | |
| MaxDt | 0.02 | /* Max Timestep [s] */ | | | | |
| MaxCourant | 0.2 | /* Max Courant Number */ | | | | |
| Convergence | 1.0e-6 | /* Convergence Condition */ | | | | |
| MinPresIter | 5 | /* Min Iteration Count */ | | | | |
| MaxPresIter | 100 | /* Max Iteration Count */ | | | | |
| OutputInterval | 1.0 | /* Output Interval Time [s] (if 0 or negative, output every time step) */ | | | | |
| RadarInterval | 10 | /* Radar Table Update Interval */ | | | | |
| PTypeCount | 4 | /* Number of Particle Type */ | | | | |
| AvrDistance | 0.01 | /* Averaged Particle Distance [m] */ | | | | |
| RRRadar | 20.0 | /* Range of Radar-list search */ | | | | |
| RRUncompress | 2.1 | /* Uncompressivity [-] */ | | | | |
| RRICCG | 4.0 | /* Coefficient Matrix [-] */ | | | | |
| RRDiffusion | 4.0 | /* Diffusion [-] */ | | | | |
| RRCollision | 0.5 | /* Collision [-] */ | | | | |
| RRSfTention | 3.0 | /* Collision [-] */ | | | | |
| CollCoef | 1.0 | /* Collision Coeffisient */ | | | | |
| CollCoefBi | 0.0 | /* Collision Coeffisient */ | | | | |
| SurfaceTh | 0.8 | /* Threshold ratio of n to n0 for free surface */ | | | | |
| Gravity | 0.0 | 0.0 | -9.78 | /* Gravity Acccelaration [m/s2] */ | | |
| RepresentPND | 14.418575 | 123.991565 | /* Representative Particle Number Density. n0, n0i */ | | | |
| n0Particle | 0 | /* Representative Particle for n0, n0i. if n0=0 then this was used */ | | | | |
| FlagCollision | 0 | /* 1:Calculate Particle Collision */ | | | | |
| FlagViscose | 0 | /* Viscosity */ | | | | |
| FlagHeat | 0 | /* Heat Diffusion */ | | | | |
| FlagSurface | 0 | /* Surface Tention */ | | | | |
| FlagField | 1 | /* Field force of Air flow*/ | | | | |
| FlagReaction | 0 | /* Chemical Reaction */ | | | | |
| FlagFlowgate | 0 | /* Flow Gate of Particle */ | | | | |
| Flag10Digits | 0 | /* 1:Output each value in 10 digits */ | | | | |

[Property]

| | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| Movable | 1 | 1 | 0 | 0 |
| PressCalc | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Density | 1000.0 | 100.0 | 1000.0 | 1000.0 |
| Viscosity | 2.81e-4 | 2.81e-4 | 2.81e-4 | 2.81e-4 |
| HConductivity | 72.3 | 72.3 | 48.0 | 48.0 |

図 3-2 3 次元MPSコードのデータファイルの例

exp.data

| | | | | | |
|------------------|--------|--|----------------------------|--|--|
| SpecHeat | 1.3e3 | 1.3e3 | 599 | 599 | /* Specific Heat [J/K kg] */ |
| SfTension | 1 | 1 | 1 | 0 | /* Surface Tention [N/m] */ |
| SfEnthtopy | 0.6 | 0.6 | 0 | 0 | /* Surface Enthropy Ratio to Surface Tension [-] */ |
| MeltTemp | 100.0 | 100.0 | 100 | 100 | /* Melting Temperature [K] */ |
| PNDFactor | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 3.0 | /* Factor for PND Calcuration */ |
| [Reaction] | | | | | |
| OxidationRate | 0.9 | /* Maximum Oxidation Speed */ | | | |
| NumDensityTh | 0.8 | /* Threshold of Reaction. ratio to n0 */ | | | |
| BurnHeat | 1.7e6 | /* Burning Heat [J/mol] */ | | | |
| VFOxide | 1.0e+5 | /* Viscosity Factor of Oxidation */ | | | |
| VFFreeze | 1.0e+5 | /* Freezing */ | | | |
| FNaViscSatTh | 0.5 | /* Threshold Na Fraction for Viscosity Saturation */ | | | |
| [ForceField] | | | | | |
| AirDensity | 1.2 | /* Density of Surrounding Air [kg/m3] */ | | | |
| RngeX | -5.0 | 5.0 | /* Range of Force-Field */ | | |
| RngeY | -5.0 | 5.0 | | | |
| RngeZ | 0.0 | 5.0 | | | |
| DivNumber | 1 | 1 | 1 | /* Number of Division, x, y, z */ | |
| Field | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | /* AreaNumber(x,y,z) & AirVelocity(u,v,w) */ | |
| Field | -1 | -1 | -1 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | /* End Mark */ | |
| [FlowGate] | | | | | |
| NpStart | 100 | /* Start particle number to apply Type change */ | | | |
| NpEnd | -1 | /* End (-1:End=last particle) */ | | | |
| NRate | 660 | /* Number of Type change at unit time [1/s] */ | | | |
| TpChange | 0 | /* Type number Changing to */ | | | |
| MaxPtbRatio | 0.5 | /* Velocity perturbation ratio */ | | | |
| IniVerocity | 0.0 | 0.0 | -0.2 | /* Initial velocity of particle */ | |

図 3-2 3次元MPSコードのデータファイルの例（つづき）

exp.grid

4
 Experiment
 #####
 0
 5432

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 0.445000 | -0.175000 | 2.440000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.435000 | -0.175000 | 2.440000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.425000 | -0.175000 | 2.440000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.444890 | -0.175000 | 2.449888 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.434893 | -0.175000 | 2.449666 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.424895 | -0.175000 | 2.449444 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.444561 | -0.175000 | 2.459771 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.434570 | -0.175000 | 2.459327 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.424580 | -0.175000 | 2.458883 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.444011 | -0.175000 | 2.469645 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.434034 | -0.175000 | 2.468978 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.424056 | -0.175000 | 2.468312 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.443243 | -0.175000 | 2.479503 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.433283 | -0.175000 | 2.478616 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.423322 | -0.175000 | 2.477728 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.442256 | -0.175000 | 2.489343 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.432318 | -0.175000 | 2.488234 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.221626 | 0.175000 | 2.802639 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.223561 | 0.175000 | 2.824767 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.218537 | 0.175000 | 2.816121 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.213513 | 0.175000 | 2.807474 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

スカラー変数の数 5232個

コメント

コメント

時間

粒子総数 200個

図 3-3 3次元MPSコードのグリッドファイルの例

draw_particle

| | |
|--------------|-----------------|
| bin/ | |
| draw* | |
| data/ | |
| sample.dat | |
| test.grid | |
| include/ | |
| DMYlib/ | |
| ITEMlib/ | |
| include/ | |
| usr_types.h | |
| item/ | |
| button.c | |
| button.h | |
| dmain.c | |
| k.c | |
| keyin.c | |
| keyin.h | |
| makefile | |
| menu.c | |
| plate.c | |
| plate.h | |
| slider.c | |
| NET_RMBVlib/ | |
| RMBVlib/ | |
| libVTR.a | |
| libnaka.a | |
| lib/ | |
| data.h | |
| file_io.h | |
| geometry.h | |
| screen.h | |
| switch.h | |
| | src/ |
| | cntr.c |
| | device.c |
| | draw.c |
| | draw_contour.c |
| | draw_particle.c |
| | draw_scalar.c |
| | draw_vector.c |
| | file.c |
| | irotate.c |
| | item.c |
| | light.c |
| | main.c |
| | makefile |
| | menu.c |
| | next_data.c |
| | particle.c |
| | proc_loop.c |
| | read_data.c |
| | read_geometry.c |
| | reading_data.c |
| | rewind_data.c |
| | slider.c |
| | string.c |
| | tags |
| | timeset.c |
| | vect.c |
| | window.c |

図 3-4 3 次元MPSコードのポストプロセッサーのファイル構成

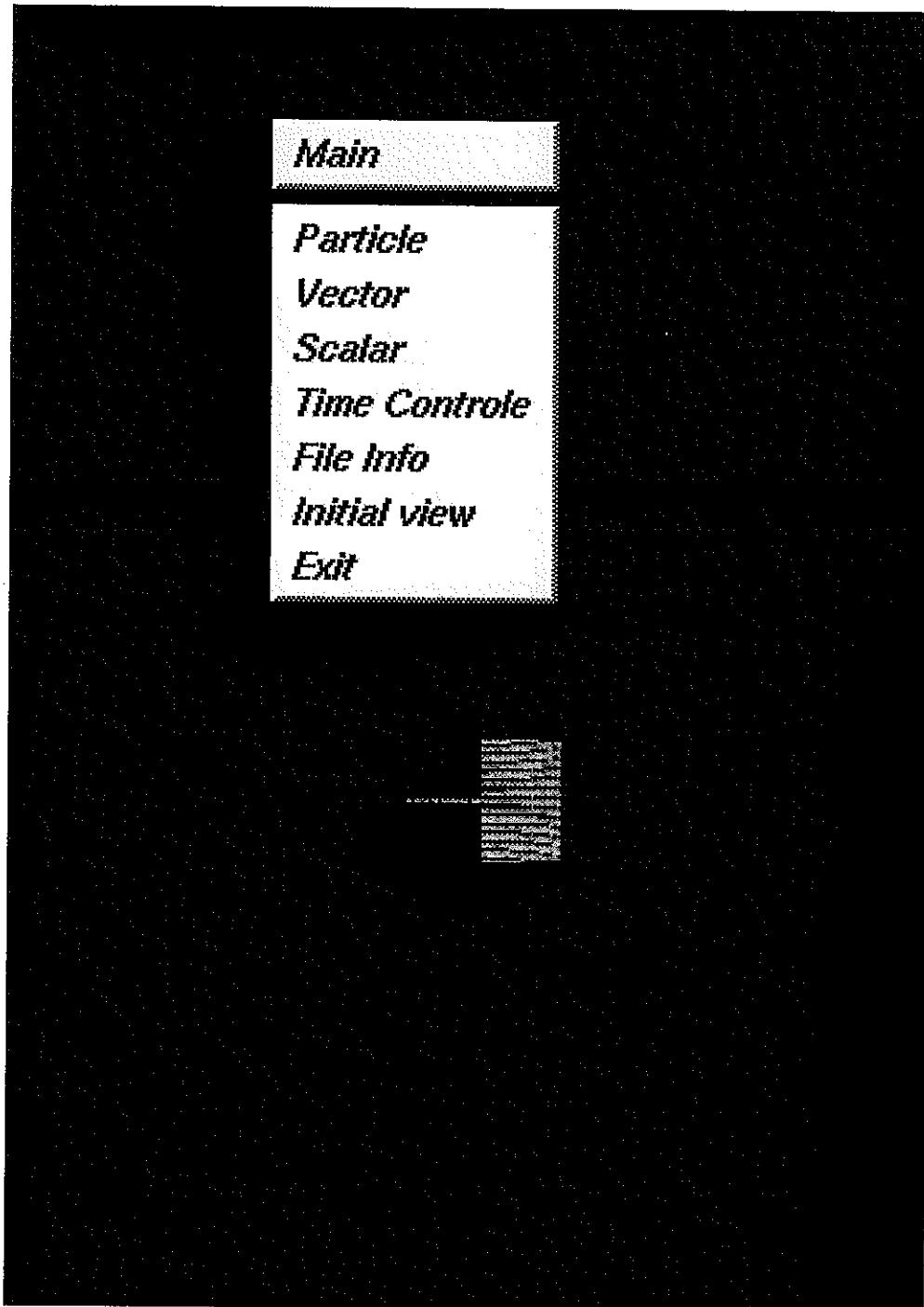


図3-5 3次元MPSコードポストプロセッサーの初期画面とポップアップメニュー

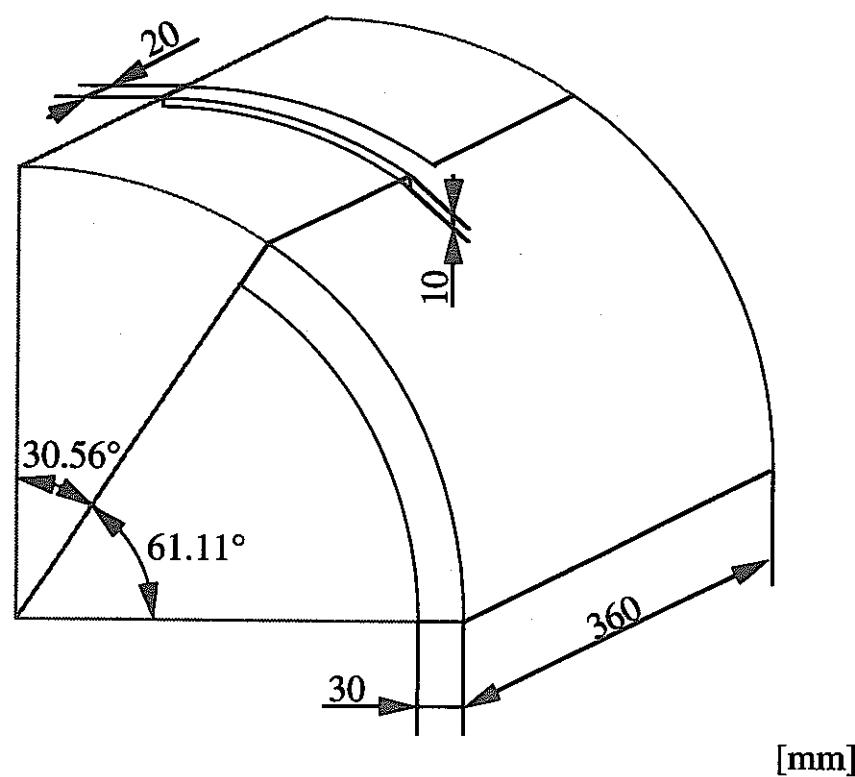


図 3-6 粒子による空調ダクト模擬物の表現

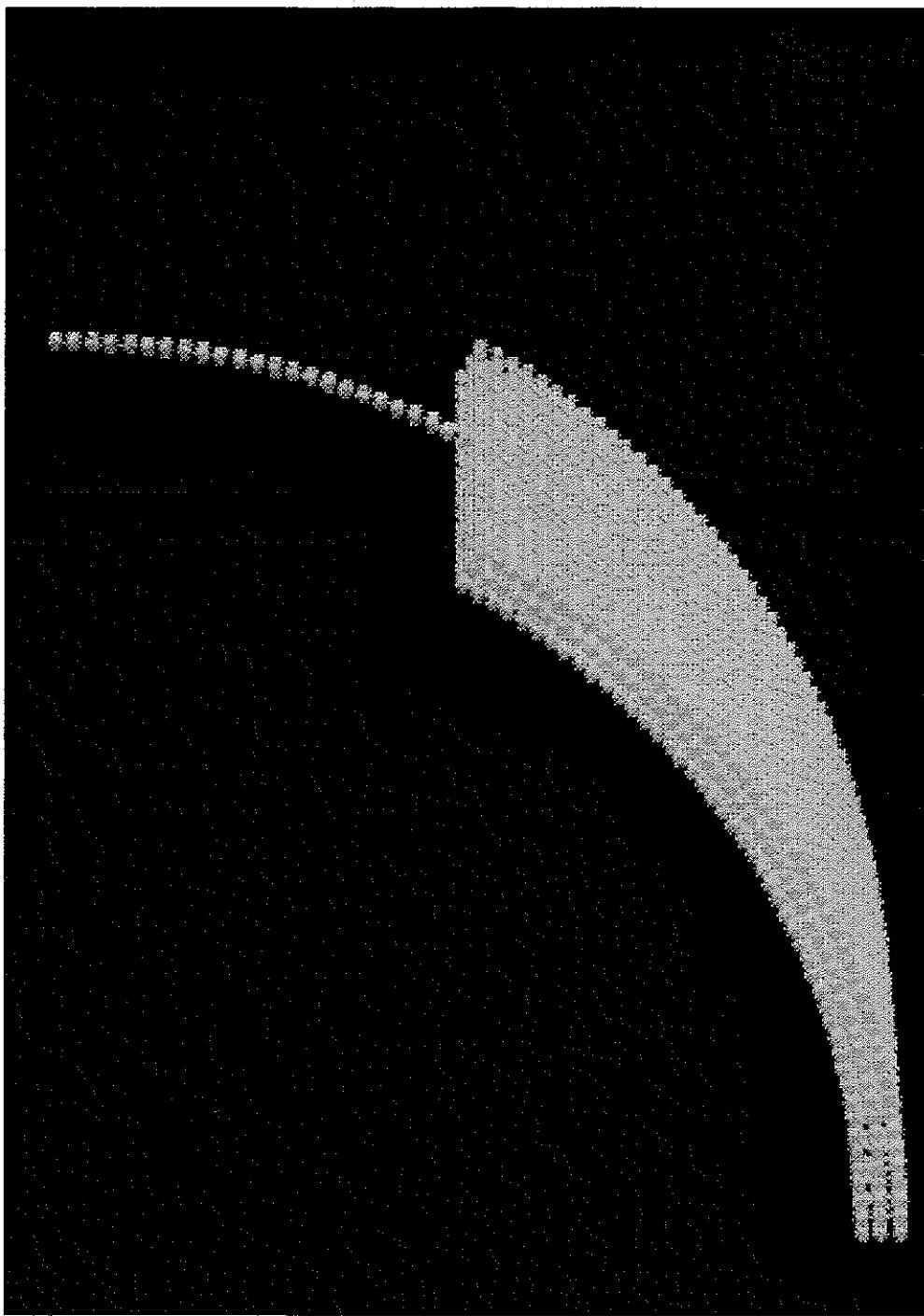


図 3-7 空調ダクト模擬物のモデル

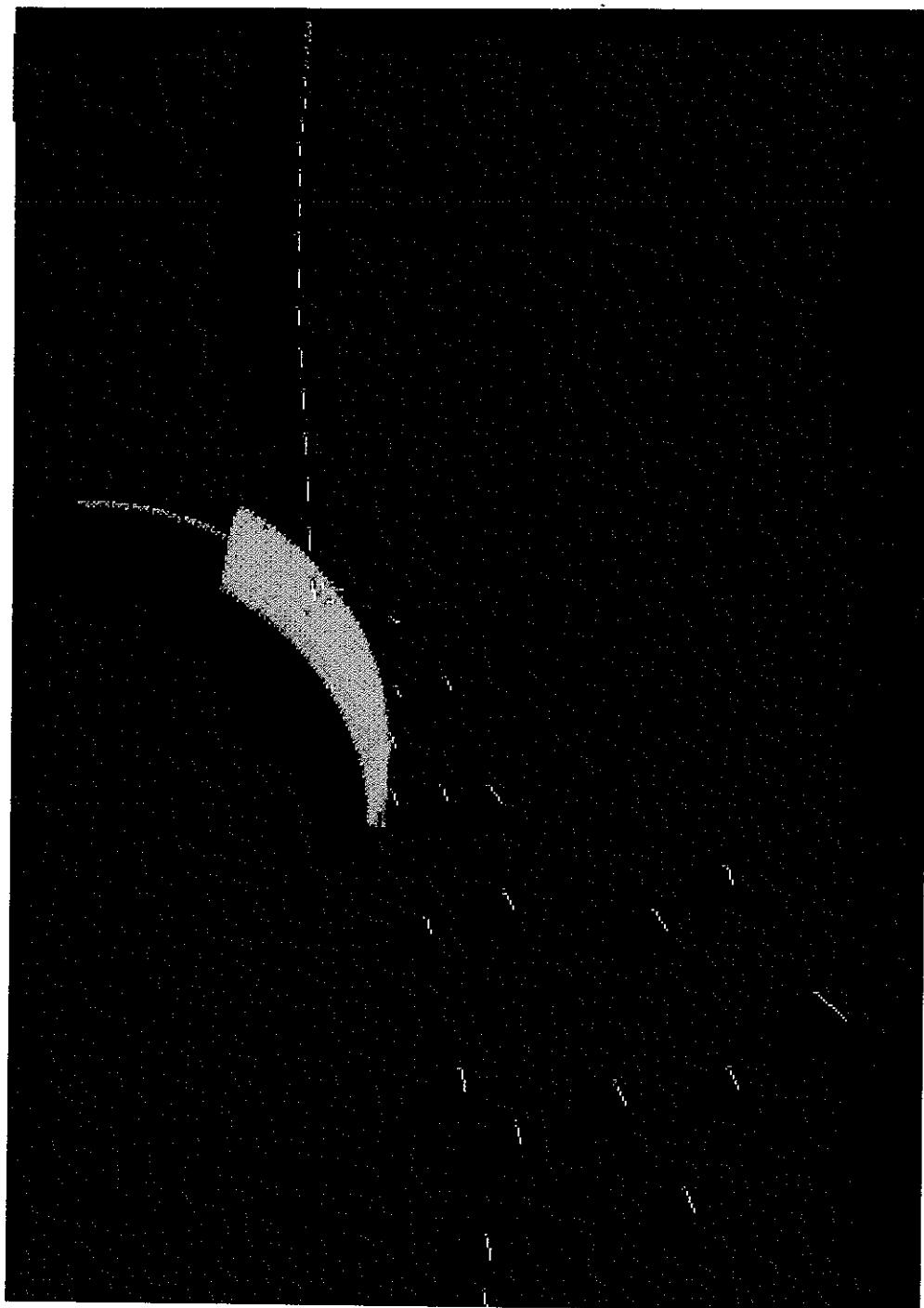


図 3-8 計算結果（表面張力なし、 $t=1.0\text{sec}$ ）

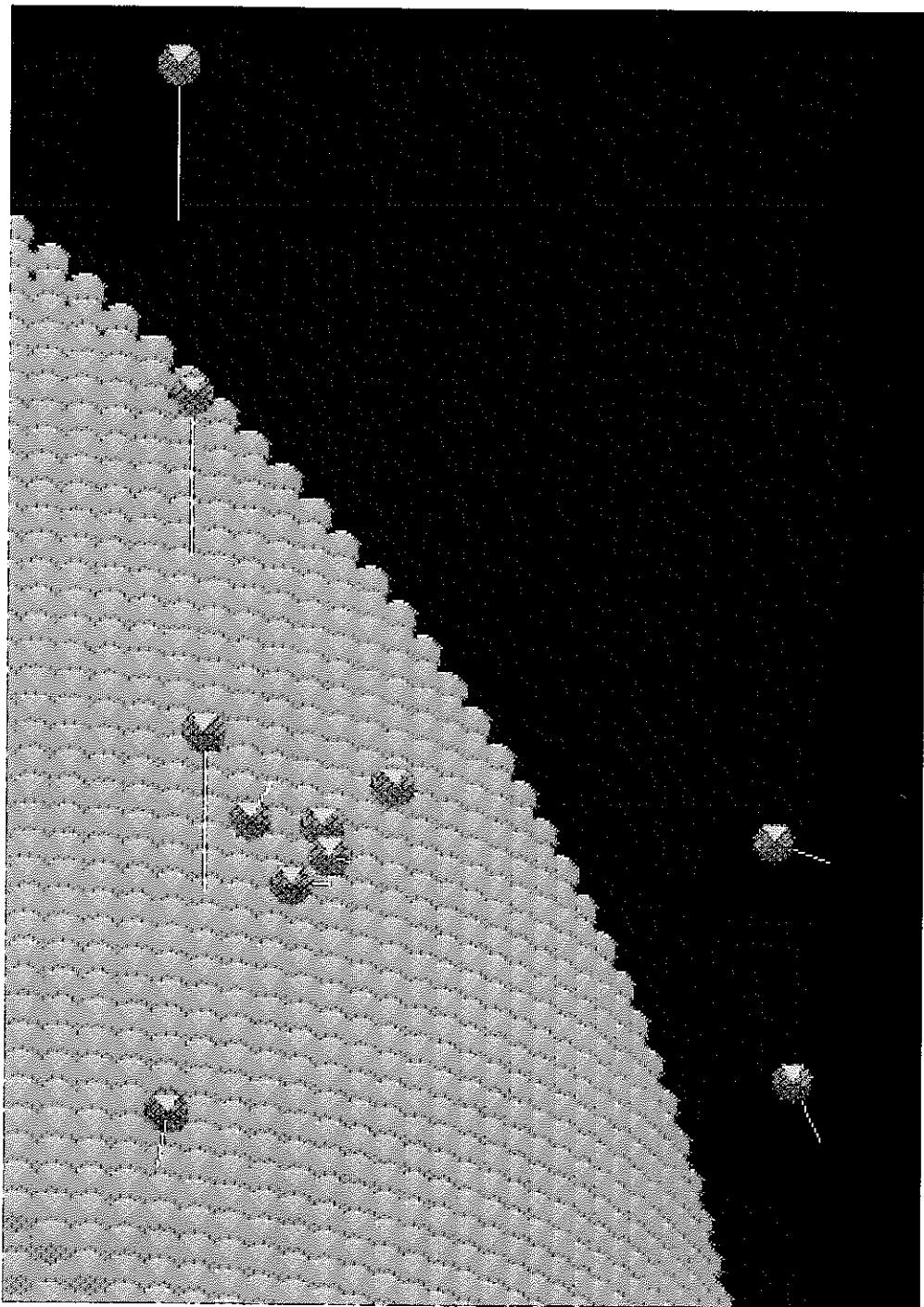


図 3-9 空調ダクト模擬物への漏洩水の衝突位置付近（表面張力なし、 $t=1.0\text{sec}$ ）

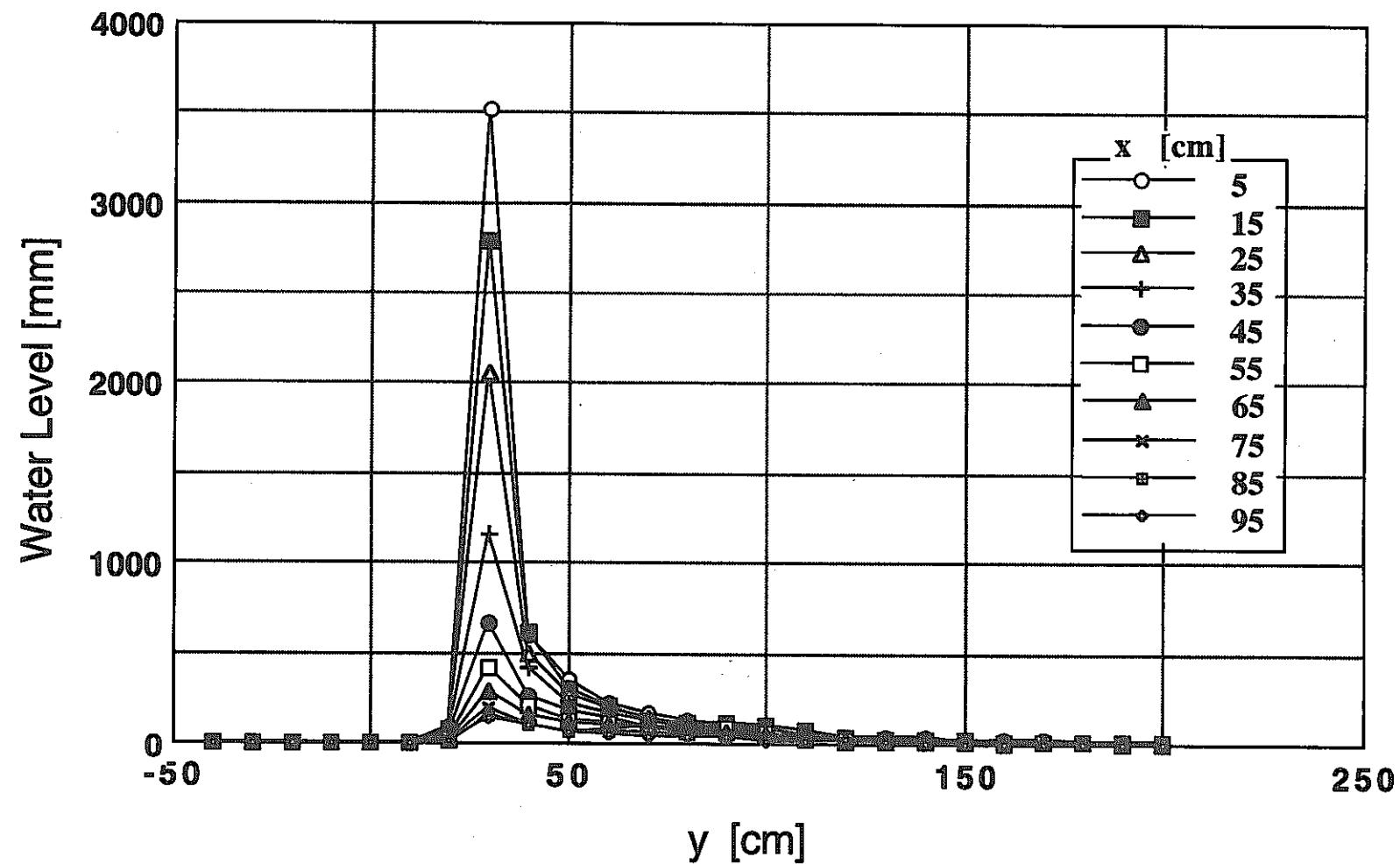


図 3-10 落下水分布の計算結果（表面張力モデルなし）

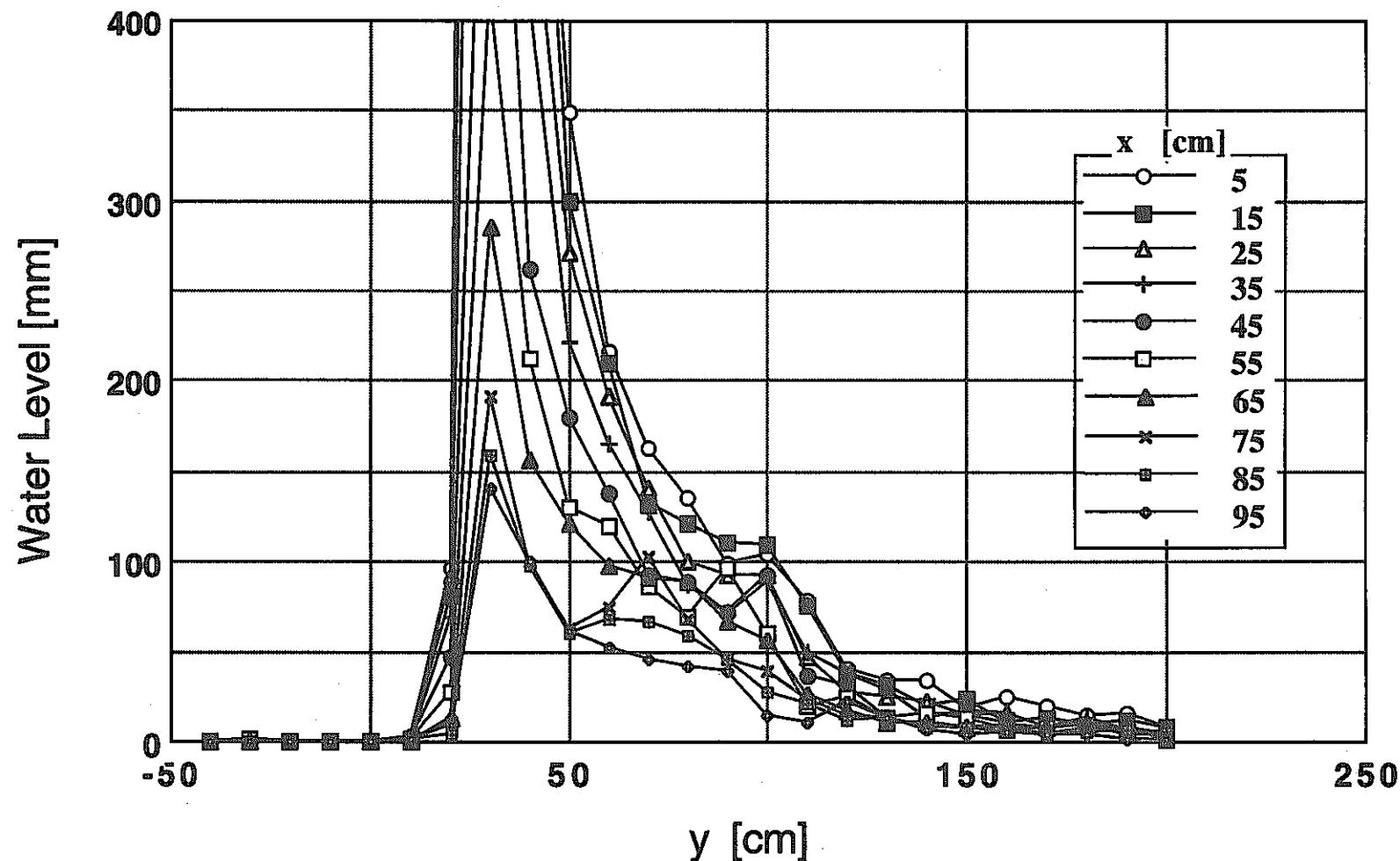


図 3-11 落下水分布の計算結果（表面張力モデルなし）-飛散した水の落下位置分布-

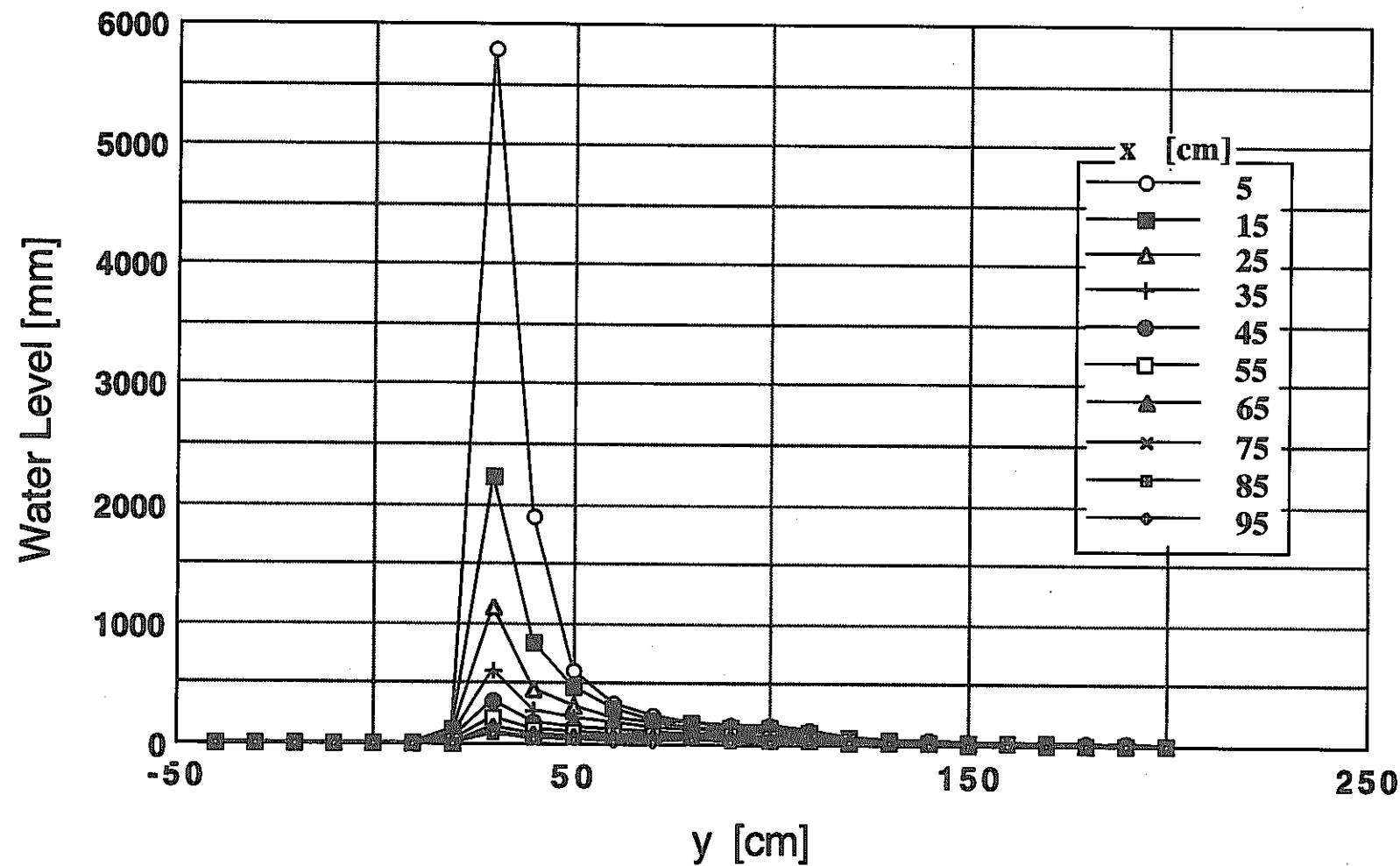


図 3-12 落下水分布の計算結果（表面張力モデルあり）

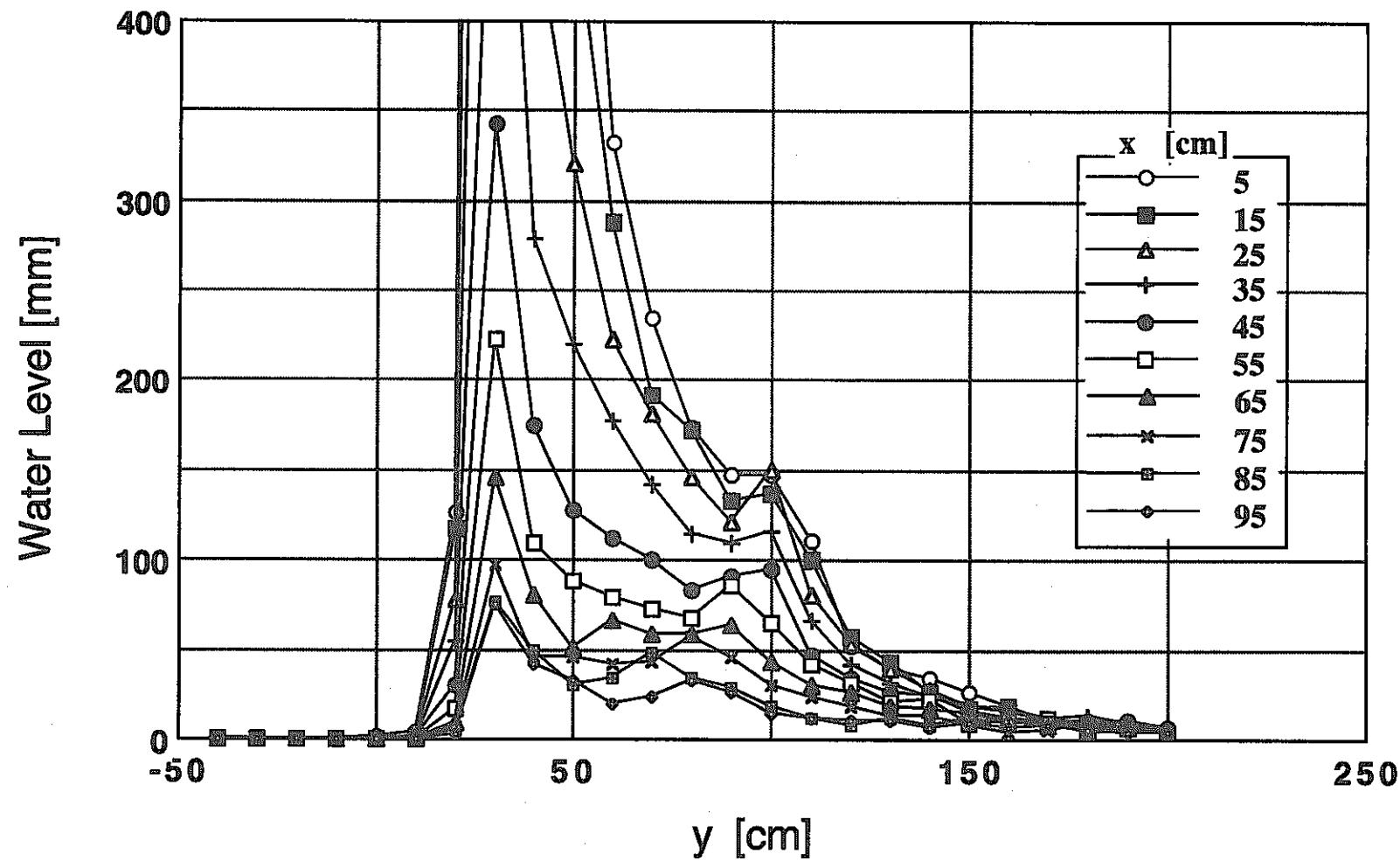


図 3-13 落下水分布の計算結果（表面張力モデルあり）- 飛散した水の落下位置分布 -

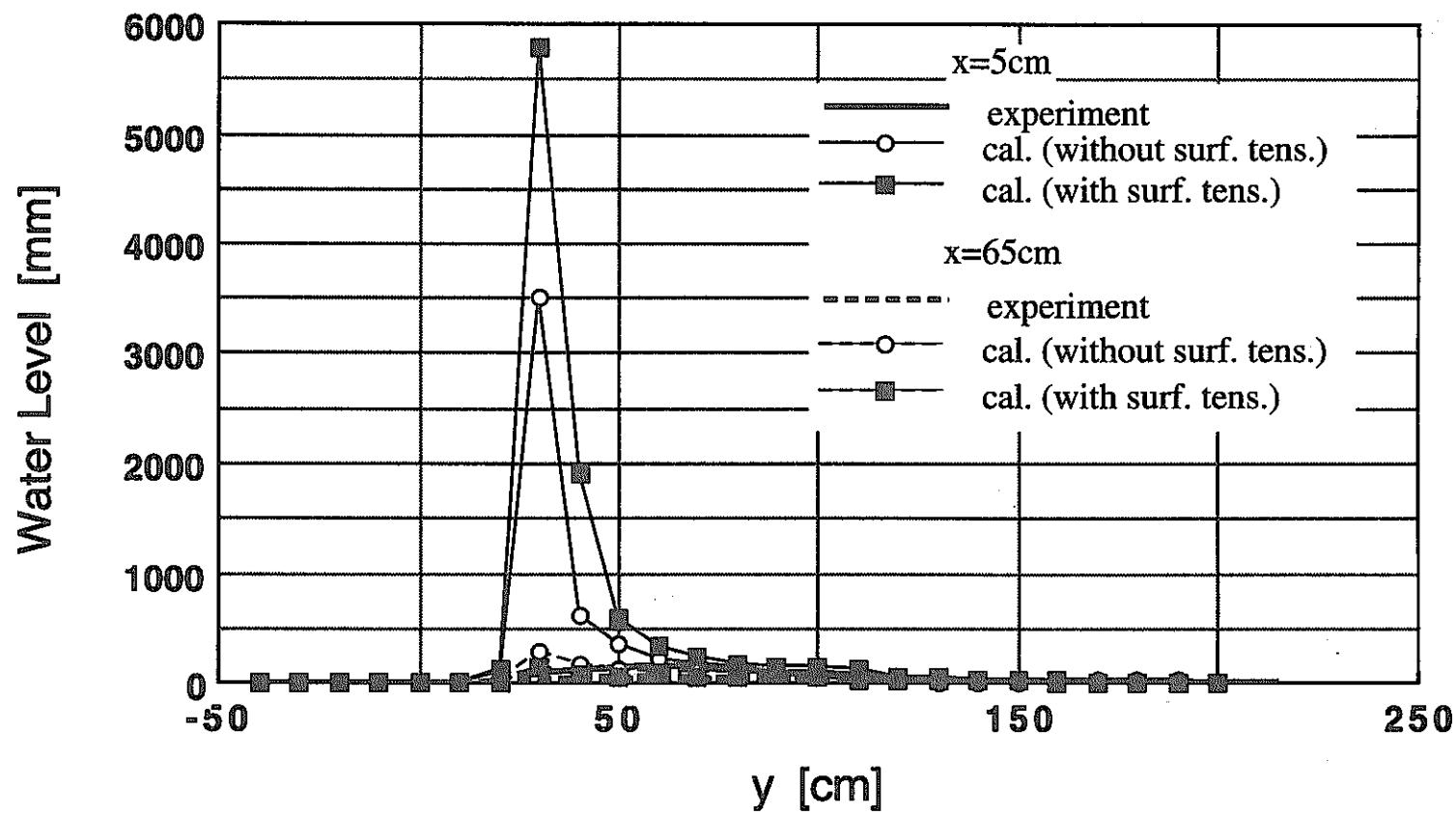


図 3-14 落下水分布の実験結果と計算結果の比較

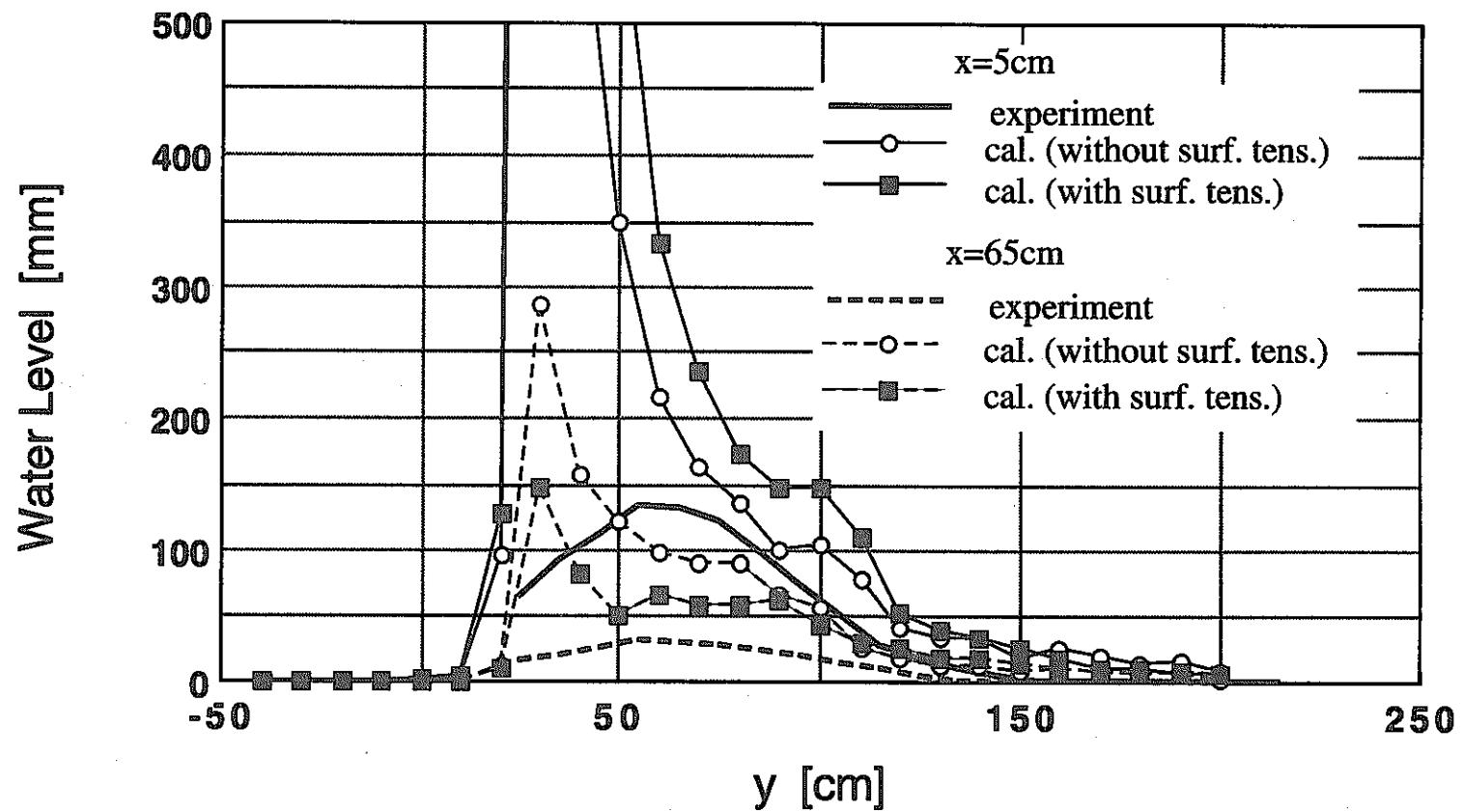


図 3-15 落下水分布の実験結果と計算結果の比較 - 飛散した水の落下位置分布 -

第 4 章

結 論

本研究では、まず液体ナトリウムの小規模漏洩を水で模擬した実験を行なった。漏洩口として3種類、漏洩流量を25, 50, 100, 150cc/secの4種類について、それぞれを組み合わせた条件で漏洩形態を観察したところ、いずれの場合にも漏洩水は塊に分裂しつつ落下することが分かった。漏洩口や流量は殆どこれに影響がなかった。次に、空調ダクト模擬物を配置して50cc/secの流量で漏洩させ、地上に落下した水の分布を測定したところ、約85%の水はダクト模擬物を伝って下部から後方にかけて落下し、ダクト模擬物前方には約15%の水が跳ね飛んだ。跳ね飛んだ水は殆ど全て空調ダクト模擬物の端から150cm以内に落下しており、これは跳ねた水の初期速度が2m/sec以下であることを意味している。また、水跳ねを立体角に対して一様であると仮定して落下水分布を理論的に計算したところ、おおよそ実験を再現する分布が得られたが、ピークの位置が実験よりもダクト模擬物に近くなつた。

次に、3次元MPSコードで実験と同じ条件で計算を行なった。空調ダクトと落下水との衝突時には完全非弾性散乱（散乱後の速度がゼロ）するものとした。また、表面張力モデルを入れないものと入れたものの2種類の計算を行なつた。しかしながら、どちらの場合もダクトを伝う現象については模擬できなかつた。これは水粒子の大きさと比較して漏洩流量が少なく、空調ダクト模擬物表面の水粒子数が少なすぎ、モデルが有効に働くなかつたためと考えられる。水粒子が空調ダクト模擬物を滑り落ちるため、実験では見られなかつた位置に大量の水粒子が蓄積されるが、これを除くと、飛散した水の分布は実験と計算で比較的よく合つてゐる。しかしながら、両者の差は多いところで2倍程度あつた。今後計算精度を上げ、漏洩水の落下分布を定量的に予測できるようにするために、条件を変えて実験を繰り返し、実験データの再現性の確認や実験条件の影響の評価を行なうとともに、計算についても漏洩形態や漏洩量を変えた場合について計算を積み重ねていく必要がある。

参考文献

- [1] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *J. Comput. Phys.* **39**, 201-225 (1981).
- [2] A. Takizawa, S. Koshizuka and S. Kondo, "Generalization of Physical Component Boundary Fitted Co-ordinate (PCBFC) Method for the Analysis of Free-Surface Flow", *Int. J. Num. Methods in Fluids* **15**, 1213-1237 (1992).
- [3] F. H. Harlow and J. E. Welch, "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", *Phys. Fluids* **8**, 2182-2189 (1965).
- [4] J. U. Brackbill and H. M. Ruppel "FLIP: A Method for Adaptively Zoned, Particle-in-Cell Calculations of Fluid Flows in Two Dimensions", *J. Comput. Phys.* **65**, 314-343 (1986).
- [5] J. J. Monaghan, "An Introduction to SPH", *Comput. Phys. Commun.* **48**, 89-96 (1988).
- [6] S. Koshizuka, H. Tamako, and Y. Oka, "A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation", *Computational Fluid Dynamics J.* **4**, 29-46 (1995).
- [7] S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", *Nucl. Sci. Eng.* **123**, 421-434 (1996).
- [8] S. Koshizuka and Y. Oka, "Numerical Analysis of Breaking Waves with Fluid Fragmentation and Coalescence Using Moving Particle Semi-implicit Method", *Proc. CFD Symp. for Free-Surface Flows*, 1996, p.71-80
- [9] S. Koshizuka and Y. Oka, "Development of a Particle Method for Calculating Fragmentation of Incompressible Viscous Fluid", *Proc. US/Japan Joint Seminar: A Multidisciplinary Int. Seminar on Intense Multiphase Interactions*, 1995, p.145-158
- [10] S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving Particle Semi-implicit Method: A Gridless Approach Based on Particle Interactions for Incompressible Flow Simulation", *Proc. 3rd Workshop on Supersimulators for Nuclear Power Plants*, 1995, p.43-49