

JAERI-M

7127

温度の高くない排気の上昇  
—野外実験結果と評価式の比較—

1977年6月

角田 道生

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

温度の低い排気の上昇  
—— 野外実験結果と評価式の比較 ——

日本原子力研究所東海研究所保健物理安全管理部  
角田 道生

(1977年5月27日受理)

平常運転時の2つの研究炉排気筒からの煙の上昇が写真撮影の方法で測定された。合計16回の放出実験が行われたが、排気と周囲大気との温度差は20℃以内、排出速度と風速の比は0.5 - 2.8の範囲である。上昇の観測値が、よく用いられるいくつかの評価式計算値と比較される。上昇中の流軸の形などを考えると、Briggsの浮力のないときの上昇式が今回の観測結果を最もよく説明するようにみえる。

JAERI-M 7127

Rise of a Cold Plume — Results of a Field Experiment  
and Comparison with Estimation Formulas

Michio KAKUTA

Division of Health Physics and Safety, Tokai, JAERI

( Received May 27, 1977 )

The rise of smoke from the stacks of two research reactors in normal operation was measured by photogrametric method. The temperature of effluent gas is less than 20°C higher than that of the ambient air ( heat emission of the order  $10^4 \text{ cal s}^{-1}$  ), and the efflux velocity divided by the wind speed is between 0.5 and 2.8 in all 16 smoke runs. The field data obtained within downwind distance of 150m are compared with those by plume rise formulas presently available. Considering the shape of bending-over plume, the Briggs' formula for 'jet' gives a reasonable explanation of the observed plume rise.

## 目 次

1. はじめに	1
2. 放出条件	1
3. 撮 影	3
4. 気象観測	4
5. 読みとりと地形補正	4
6. 結果および各種評価式との比較	6
7. ま と め	11
記 号	14
文 献	14

CONTENTS

1. INTRODUCTION .....	1
2. STACK PARAMETERS .....	1
3. SMOKE PHOTOGRAPHY .....	3
4. METEOROLOGICAL OBSERVATION .....	4
5. PHOTOGRAMETRIC TECHNIQUES, CORRECTION FACTORS ....	4
6. EXPERIMENTAL RESULTS, COMPARISON WITH ESTIMATION FORMULAS .....	6
7. SUMMARY .....	11
NOMENCLATURE .....	14
REFERENCES .....	14

## 表 目 次

Table 1	排気筒諸元 .....	3
Table 2	北西風時の地表の起伏と煙の中心軸 .....	5
Table 3	整理に用いた地形補正值 .....	5
Table 4	測定結果一覧 .....	7
Table 5	今回の実験のパラメータ範囲 .....	6
Table 6	$\Delta h_{max}$ : 実測値と計算値 .....	12
Table 7	$\Delta h_{max}$ : 実測値と計算値の比(8回のRUN平均値) .....	13

## 図 目 次

Fig. 1	地形と排気筒の位置 .....	2
Fig. 2	地形による煙の軸の変形 .....	5
Fig. 3	上昇過程の計算値と実験値の比較 .....	8
Fig. 4	.....	13

## TABLE CONTENTS

Table 1	Stack Parameters .....	3
Table 2	Undulation of ground surface and plume center line in NW wind .....	5
Table 3	Effect of terrain irregularities .....	5
Table 4	Summary of the observed values .....	7
Table 5	Range of the parameters for the 16 smoke runs .....	6
Table 6	$\Delta h_{max}$ , observed and calculated .....	12
Table 7	Ratio of calculated to observed plume rise .....	13

## FIGURE CONTENTS

Fig. 1	The terrain around the two stacks .....	2
Fig. 2	Modification with terrain of the shape of plume axis .....	5
Fig. 3	Comparison of the calculated and observed rise of bending-over plume .....	8
Fig. 4	Comparison of the calculated and observed final rise .....	13

## 1. はじめに

大気放出物の地表濃度に対する排気筒の希釈効果に関連して、排出速度や浮力による放出物の上昇が古くから問題とされてきた。この上昇の程度は、排気系の諸条件と環境条件の双方に複雑に依存すると思われるが、大気汚染の実用的な要請もあって、排気の上昇高を求める理論式、実験式は数多く提案されており、また風洞実験や野外観測と各種評価式の比較を含むレビューも少なからずまとめられている。<sup>1), 2), 3)</sup> これまでの実用上の関心は、火力発電プラント排気筒のように、高温の排気で浮力上昇の大きなものに主として注がれており、原子炉排気筒のように外気温とあまり変わらぬ排気の上昇については、計算式と実規模観測値との対比検討の例がきわめて少ない。また通常の大気汚染では、着地最大濃度が主として問題となり最終上昇高を求めることに関心が集るが、原子炉環境管理では放出雲からの $r$ 線の地上照射率が問題となるので、最終上昇高だけでなく上昇過程の平均的な煙軸の形なども知る必要がある。

1965年、原研東海研の二つの研究炉排気筒を用い、通常の運転条件で、発煙筒を用いた煙の上昇実験が行われたが、この結果を再整理し、被曝評価の実用式選択のバックデータとする必要が感じられた。特に原子力関係で最近よく引用される Briggs の評価式と対比して、放出点近傍の上昇中の煙軸の形を検討することは有用であると考えた。

この実験は、写真撮影の方法で行われたので、夜間安定時のデータは得られていない。また実験時の排出速度は通常の原子力発電所の排気筒に比べるとかなり小さい。実験回数は16回であるが、データは冬の日中に限られ、強風、静穏の時のデータはない。

## 2. 放出条件

実験は、原研東海研構内の JRR-2 および JPDR の2つの排気筒を用いて行われた。海岸線からの距離はそれぞれ 700 m および 250 m である。排気筒の配置と周辺地形を Fig. 1 に示す。発煙実験は大部分平常運転時と排気条件を同じにして行なった。JRR-2 の場合は、換気を調節して排気速度を段階的に変化させようと試みたが、広範囲に変えることはできなかった。これら排気筒の諸元を Table 1 に示す。

今回の排気上昇には、温度より流速の効果の方が大きいと予想されたので、排気流速の測定を実験前後にかなり綿密に行なった。JRR-2 では、2系統の地下煙道それぞれ(いずれも矩形断面で、面積は  $1.85 \text{ m}^2$  および  $1.89 \text{ m}^2$ )につき、25点の5分間風程を小型ロビンソン風速計を並べて測定し、この合計流量から出口平均風速を計算で求めた。

JPDR では、排気筒出口から 30 cm 内部で、円形断面(面積  $1.77 \text{ m}^2$ )内 24点の3分間風程を、回転面が鉛直になるように小型ロビンソン風速計を配置して測定し、これから平均排出速度を求めた。鉛直面廻転風程については、原研内の風洞で校正を行なった。

JRR-2 煙道内の風速分布はかなり不均一であったが、JPDR 排気筒出口では予想以上に一様な分布を示した。



## 1. は じ め に

大気放出物の地表濃度に対する排気筒の希釈効果に関連して、排出速度や浮力による放出物の上昇が古くから問題とされてきた。この上昇の程度は、排気系の諸条件と環境条件の双方に複雑に依存すると思われるが、大気汚染の実用的な要請もあって、排気の上昇高を求める理論式、実験式は数多く提案されており、また風洞実験や野外観測と各種評価式の比較を含むレビューも少なからずまとめられている。<sup>1), 2), 3)</sup> これまでの実用上の関心は、火力発電プラント排気筒のように、高温の排気で浮力上昇の大きなものに主として注がれており、原子炉排気筒のように外気温とあまり変わらぬ排気の上昇については、計算式と実規模観測値との対比検討の例がきわめて少ない。また通常の大気汚染では、着地最大濃度が主として問題となり最終上昇高を求めることに関心が集るが、原子炉環境管理では放出雲からの $r$ 線の地上照射率が問題となるので、最終上昇高だけでなく上昇過程の平均的な煙軸の形なども知る必要がある。

1965年、原研東海研の二つの研究炉排気筒を用い、通常の運転条件で、発煙筒を用いた煙の上昇実験が行われたが、この結果を再整理し、被曝評価の実用式選択のバックデータとする必要が感じられた。特に原子力関係で最近よく引用されるBriggsの評価式と対比して、放出点近傍の上昇中の煙軸の形を検討することは有用であると考えた。

この実験は、写真撮影の方法で行われたので、夜間安定時のデータは得られていない。また実験時の排出速度は通常の原子力発電所の排気筒に比べるとかなり小さい。実験回数は16回であるが、データは冬の日中に限られ、強風、静穏の時のデータはない。

## 2. 放 出 条 件

実験は、原研東海研構内のJRR-2およびJPDRの2つの排気筒を用いて行われた。海岸線からの距離はそれぞれ700mおよび250mである。排気筒の配置と周辺地形をFig.1に示す。発煙実験は大部分平常運転時と排気条件を同じにして行なった。JRR-2の場合は、換気を調節して排気速度を段階的に変化させようと試みたが、広範囲に変えることはできなかった。これら排気筒の諸元をTable 1に示す。

今回の排気上昇には、温度より流速の効果の方が大きいと予想されたので、排気流速の測定を実験前後にかなり綿密に行なった。JRR-2では、2系統の地下煙道それぞれ(いずれも矩形断面で、面積は $1.85\text{ m}^2$  および $1.89\text{ m}^2$ )につき、25点の5分間風程を小型ロビンソン風速計を並べて測定し、この合計流量から出口平均風速を計算で求めた。

JPDRでは、排気筒出口から30cm内部で、円形断面(面積 $1.77\text{ m}^2$ )内24点の3分間風程を、回転面が鉛直になるように小型ロビンソン風速計を配置して測定し、これから平均排出速度を求めた。鉛直面廻転風程については、原研内の風洞で校正を行なった。

JRR-2煙道内の風速分布はかなり不均一であったが、JPDR排気筒出口では予想以上に一様な分布を示した。

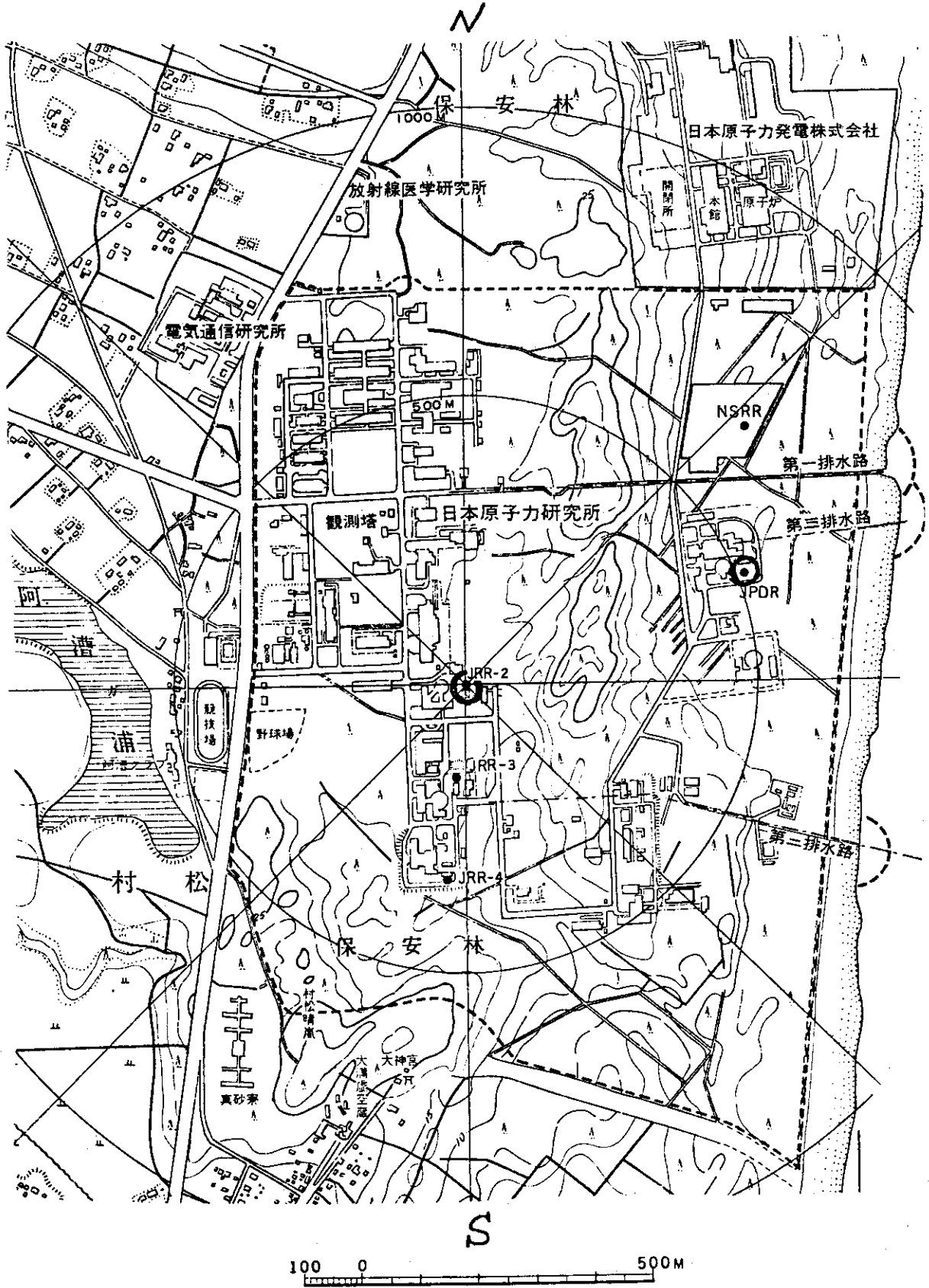


Fig. 1 地形と排気筒の位置

Table 1 排気筒諸元

	JRR-2主排気筒	JPDR主排気筒
ベース海面高度 m	20.2	9.8
煙突地上高 m	40.0	55.0
放出端内径 m	2.2	1.5
底部内径 m	3.6	5.1
流量 $m^3/s$	12.6	11.3
出口平均流速 $m/s$	3.3	6.4
排気温度	室温 ( $\sim 20^\circ C$ )	同左

排気温度については、実験時の実測データが得られていない。別の機会に行われた排気系調査のデータにつき、冬季の排気温度を参照すると、いずれの炉についても約 $20^\circ C$ であったので、解析のさいは、外気温にかかわらず排気温度を $20.0^\circ C$ として扱った。

発煙には、細谷火工製の $13kg$ の発煙筒をもちいた。排気筒の底部煙道内で発煙筒を燃焼させ、塩化亜鉛を主成分とする白煙を発生させた。燃焼のさいの発熱による排気の昇温は、いずれの排気筒についても無視できる程度である。発煙持続時間は約 $20$ 分である。

### 3. 撮 影

排気筒のまわりには、気象観測塔を含め、放出点に近い高さで、いくつかの撮影地点を選ぶことができる。補正のさいの誤差を少なくするために、排気筒先端から放出された白煙をできるだけ真横から、放出高に近い位置で撮影するように、放出点から $400\sim 800m$ の距離範囲で、実験時の風向により撮影地点をその都度選択した。

カメラは、キャノンP、レンズは $50mm f1.8$ 、フィルムは、フジネオパンSS,36EXを用い、フィルターは使用しなかった。

煙軸のメアンダーによる変動を平均化するために、一回のRUNについて、 $15$ 秒間隔で、 $15$ 分 $60$ 枚の撮影を行なった。

なお、画面の傾角は、正確に地図に記入されている地物が多いので比較的容易に求められた。撮影に当っては、画面が鉛直になるように3脚でカメラを固定した。なお、平均の煙の流向は気象観測塔のコーンペーンで観測された平均風向をとり、煙突真下で流れを観察して風向記録器とのズレをチェックした。

Table 1 排気筒諸元

	JRR-2主排気筒	JPDR主排気筒
ベース海面高度 m	20.2	9.8
煙突地上高 m	40.0	55.0
放出端内径 m	2.2	1.5
底部内径 m	3.6	5.1
流量 $m^3/s$	12.6	11.3
出口平均流速 $m/s$	3.3	6.4
排気温度	室温 ( $\sim 20^\circ C$ )	同左

排気温度については、実験時の実測データが得られていない。別の機会に行われた排気系調査のデータにつき、冬季の排気温度を参照すると、いずれの炉についても約 $20^\circ C$ であったので、解析のさいは、外気温にかかわらず排気温度を $20.0^\circ C$ として扱った。

発煙には、細谷火工製の $13kg$ の発煙筒をもちいた。排気筒の底部煙道内で発煙筒を燃焼させ、塩化亜鉛を主成分とする白煙を発生させた。燃焼のさいの発熱による排気の昇温は、いずれの排気筒についても無視できる程度である。発煙持続時間は約 $20$ 分である。

### 3. 撮 影

排気筒のまわりには、気象観測塔を含め、放出点に近い高さで、いくつかの撮影地点を選ぶことができる。補正のさいの誤差を少なくするために、排気筒先端から放出された白煙をできるだけ真横から、放出高に近い位置で撮影するように、放出点から $400\sim 800m$ の距離範囲で、実験時の風向により撮影地点をその都度選択した。

カメラは、キャノンP、レンズは $50mm f1.8$ 、フィルムは、フジネオパンSS,36EXを用い、フィルターは使用しなかった。

煙軸のメアンダーによる変動を平均化するために、一回のRUNについて、 $15$ 秒間隔で、 $15$ 分 $60$ 枚の撮影を行なった。

なお、画面の傾角は、正確に地図に記入されている地物が多いので比較的容易に求められた。撮影に当っては、画面が鉛直になるように3脚でカメラを固定した。なお、平均の煙の流向は気象観測塔のコーンペーンで観測された平均風向をとり、煙突真下で流れを観察して風向記録器とのズレをチェックした。

## 4. 気 象 観 測

構内気象観測塔のルーチン観測値を利用することとし、排気筒地点での特別な観測は人手の関係で行なわなかった。JRR-2の場合はこれで充分と思われるが、JPDRは海岸線に近く、観測塔との間に丘があることなどから、大気成層や風の構造が観測地点と異なる場合も起り得る。(Fig. 1参照)

風向・風速は、コーシン・ベーンにより、地上高5, 11.5, 22, 45, 60mについて、紙送り15mm/hで記録している。必要に応じて45mの記録を早まわしに切りかえた。JRR-2の排煙に対しては45mの風速値をJPDRに対しては、風速対数分布を仮定した55mの内挿値をとり、解析にはこれらの値を用いた。

気温勾配は、20m-5m, 20m-10m, 40m-10m,の気温差を、通風抵抗温度計で連続記録させている。

## 5. 読みとりと地形補正

撮影したフィルムをプロジェクターで拡大し、RUN毎に画面と流向軸を考慮して求めた風下距離25m, 50m, 75m, 100m, 150mの各位置で煙の上端および下端を一駒ずつ読取った。この肉視識別限界の midpoint が煙の中心軸であると定義し、風下各距離におけるこの midpoint の位置と排気筒出口レベルの差を各距離における上昇高とし、15分間の平均値を計算した。

こうして得られた値について、再び流向、カメラの画角を考慮した拡大率で上昇高を計算したのち、地形の影響の補正をつぎのような考え方でおこなった。

実験時には西寄りの風が多かったが、この場合JRR-2排気筒からの煙は標高差約5-10m, 樹高3-10mの樹木でおおわれた丘を越すことになる。またJPDR排気筒からの煙は、標高差10mの海面に傾斜する砂浜の上に流れる。地形による流跡線の変化には、風のシア、大気の成層状態などが複雑に影響すると思われる。しかし、今回の放出高度と地形起伏の程度に対しては流跡線が近似的に地形に平行して起伏するとした補正が妥当であると考えた。このことは、拡散調査のため以前東海研構内で行った発煙実験結果からもいえる。これらは気象観測塔60mの高さで煙を放出したものであるが、排出運動量および熱量による上昇はほとんど無視できる。北西風時の4回の実験について、平均した煙の軸の高さと地形との関係をTable 2およびFig. 2に示す。これらを考慮して、今回の上昇実験について、実験時に風向対応した地形補正値をTable 3のように与えた。

## 4. 気 象 観 測

構内気象観測塔のルーチン観測値を利用することとし、排気筒地点での特別な観測は入手の関係で行なわなかった。JRR-2の場合はこれで充分と思われるが、JPDRは海岸線に近く、観測塔との間に丘があることなどから、大気成層や風の構造が観測地点と異なる場合も起り得る。(Fig. 1参照)

風向・風速は、コーン・ベーンにより、地上高5, 11.5, 22, 45, 60mについて、紙送り15mm/hで記録している。必要に応じて45mの記録を早まわしに切りかえた。JRR-2の排煙に対しては45mの風速値をJPDRに対しては、風速対数分布を仮定した55mの内挿値をとり、解析にはこれらの値を用いた。

気温勾配は、20m-5m, 20m-10m, 40m-10m,の気温差を、通風抵抗温度計で連続記録させている。

## 5. 読みとりと地形補正

撮影したフィルムをプロジェクターで拡大し、RUN毎に画面と流向軸を考慮して求めた風下距離25m, 50m, 75m, 100m, 150mの各位置で煙の上端および下端を一駒ずつ読取った。この肉視識別限界の midpoint が煙の中心軸であると定義し、風下各距離におけるこの midpoint の位置と排気筒出口レベルの差を各距離における上昇高とし、15分間の平均値を計算した。

こうして得られた値について、再び流向、カメラの画角を考慮した拡大率で上昇高を計算したのち、地形の影響の補正をつぎのような考え方でおこなった。

実験時には西寄りの風が多かったが、この場合JRR-2排気筒からの煙は標高差約5-10m, 樹高3-10mの樹木でおおわれた丘を越すことになる。またJPDR排気筒からの煙は、標高差10mの海面に傾斜する砂浜の上に流れる。地形による流跡線の変化には、風のター、大気の成層状態などが複雑に影響すると思われる。しかし、今回の放出高度と地形起伏の程度に対しては流跡線が近似的に地形に平行して起伏するとした補正が妥当であると考えた。このことは、拡散調査のため以前東海研構内で行った発煙実験結果からもいえる。これらは気象観測塔60mの高さで煙を放出したものであるが、排出運動量および熱量による上昇はほとんど無視できる。北西風時の4回の実験について、平均した煙の軸の高さと地形との関係をTable 2およびFig. 2に示す。これらを考慮して、今回の上昇実験について、実験時に風向対応した地形補正値をTable 3のように与えた。

Table 2 北西風時の地表の起伏と煙の中心軸

風下距離(m)	100	200	300	400	500	600	700
地表レベル(m)	19	19	21	29	19	16	13
樹木(m)	0	13	10	5	5	2	0
放出高との差(m)	0	13	12	15	5	-1	-6
煙の軸の放出高との差(m)	5.1	12.4	14.3	14.5	-12.1	-22.3	-29.5

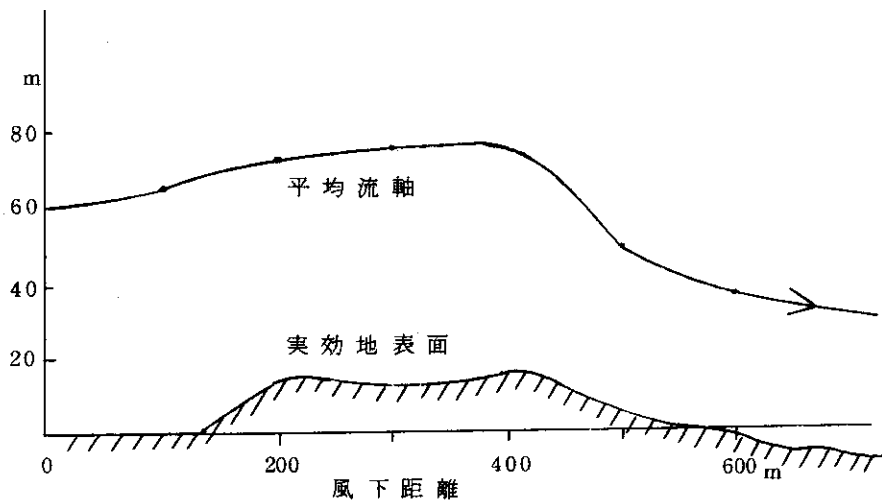


Fig. 2 地形による煙の軸の変形

Table 3 整理にもちいた地形補正值<sup>(\*)</sup>

風向 風下距離	JRR-2				JPDR			
	WSW	W	WNW	NW	SW	W	NW	NNE
0 m	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2	-1	0	3	-1	-1	-1	0
50	4	1	1	7	-2	-2	-2	0
75	4	2	2	15	-3	-3	-3	0
100	4	5	3	5	-3	-4	-3	0
150	8	9	7	-1	-5	-6	-5	0

(\*) 符号のプラスは、地形による上昇、マイナスは沈降、単位はm

## 6. 結果および各種評価式との比較

2つの排気筒で各8回、計16回の実験を行なった。実験時の気象および上昇高の測定結果をまとめてTable4に示す。

今回の実験は、Table5にみられるように、通常の原子力発電所の排気筒にくらべ、排出流量がかなり少さく、出口流速(排出速度)  $w$  と平均風速  $u$  の比  $w/u$  の範囲も3以下に限られた。また写真撮影の方法によったため、夜間の強い安定大気のもとでの上昇データは得られなかった。風下距離も、画像識別が遠距離では不確かとなるため、150mまでにとどまり、最高上昇高に達していない例も少なくなかった。

Table 5 今回の実験のパラメータ範囲

パラメータ	実験データ範囲
$w/\bar{u}$	0.5 — 2.8
流量 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	8.4 , 11.3 , 12.6
流出熱量 $Q_H$ ( $\text{cal s}^{-1}$ )	$1.9 \times 10^4$ — $7.9 \times 10^4$

このように、今回の実験は、最大上昇高の確認という点では不十分な例が多いが、plumeの上昇の過程はかなり細かく観測されている。そこで、まず上昇中の煙軸の形を与える評価式との比較を行なう。

Briggs<sup>3)</sup>は、有風時の排気筒近傍における bent-over plume の式として(1)をあげ、浮力が支配的なときは(2)式を、また運動量が支配的なときは(3)式を実用式として示している。

(記号の定義は文末にまとめた)

$$\Delta h = 2.3 F_m^{1/3} u^{-2/3} x^{1/3} \left( 1 + \frac{F x}{2 F_m u} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$\Delta h = 1.6 F^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (2)$$

$$\Delta h = 2.3 F_m^{1/3} u^{-2/3} x^{1/3} \quad (3)$$

運動量による上昇が支配的なときの最終上昇高度として、Briggsは、 $w/u \geq 4$  のとき実験結果にもとづいて(4)式を与えており、少なくともこの高さまでは(3)式が適用できるとしている。

$$\Delta h = 3.0 w u^{-1} d \quad (4)$$

Bent-over plume を表わすやや古いがよく知られた式として、浮力項が支配的なときの Bosanquet (1957)<sup>4)</sup> の式(5)がある。



Table 4 測定結果一覽

RUN	月 日	時刻	排出速度	撮影点	象 要 素										風 下 距 離 (m)					
					風 向	U <sub>22</sub>	U <sub>45</sub>	U <sub>55</sub>	U <sub>60</sub>	T <sub>40</sub>	$\Delta T_{40-10}$	安定度	2.5	5.0	7.5	10.0	15.0			
1	39.12.2	1000	JBR-2 3.3 m/s	Pu研	WSW	6.0	6.0	-	-	7.2°C	-0.9°C	A-B	0.6	-0.3	0.1	2.0	0.4			
2	39.12.3	0648 0705	"	"	WNW	-	5.0	-	-	-0.3	1.9	(F)	5.0	6.0	8.1	9.8	9.3			
3	"	0716 0730	"	JPDR	WNW	-	5.3	-	-	1.5	1.8	(F)	5.0	6.2	7.1	7.7	7.3			
4	"	0941 0958	"	"	WNW	0.8	2.0	2.1	2.1	10.5	-0.7	A-B	12.6	19.3	26.8	-	-			
5	"	1018 1035	2.2	Pu研	W	1.0	2.0	2.2	2.2	12.5	-1.2	A-B	4.5	4.4	5.1	5.4	4.7			
6	"	1058 1114	"	"	WSW	3.0	3.0	3.5	3.5	11.3	-1.0	A-B	3.5	3.0	5.5	8.0	5.2			
7	39.12.4	0955 1012	3.3	"	W	3.0	3.0	3.4	3.4	9.2	0.0	B	4.4	4.3	5.4	3.0	4.1			
8	"	1020 1037	"	"	WNW	3.5	3.3	2.5	2.5	10.5	0.1	B	3.7	5.3	7.5	6.6	9.0			
9	39.12.25	1503 1511	6.4	氣象観測塔	NNE	5.5	6.3	7.0	8.0	9.6	-0.9	C	5.2	-	-	-	-			
10	39.12.26	0729 0738	"	"	NNE	4.3	6.0	6.3	6.5	5.5	-0.3	D	4.9	6.4	8.1	8.1	8.9			
11	40.1.14	0733 0751	"	再処理研	W	3.0	3.0	3.5	-	0.0	0.6	C	4.6	6.2	7.8	8.5	10.9			
12	"	0952 1007	"	"	W	-	3.5	4.0	-	7.0	-0.2	B	5.3	5.2	4.6	4.4	8.1			
13	"	1124 1140	"	"	W	4.5	3.7	4.5	-	10.3	-0.4	C	7.7	9.1	10.8	1.1.4	1.25			
14	40.2.5	0901 0918	"	"	NW	2.0	2.0	2.3	2.5	2.7	0.5	A-B	8.6	11.3	13.8	1.5.4	1.93			
15	"	1105 1114	"	"	SW	3.2	4.6	5.1	5.5	7.3	-1.8	B	4.0	2.7	-	-	-			
16	"	1130 1150	"	氣象観測塔	SW	3.3	3.1	3.7	4.0	7.7	-2.1	B	8.1	6.5	2.5	-	-			
注		有効撮影時間			U:地上amの風速 $\Delta T_{40-10}$ :地上40mと10mの気温差 安定度: PASQUILLの分類	対数即による内挿値	放出点を含む水平面からの上昇高 単位: m													

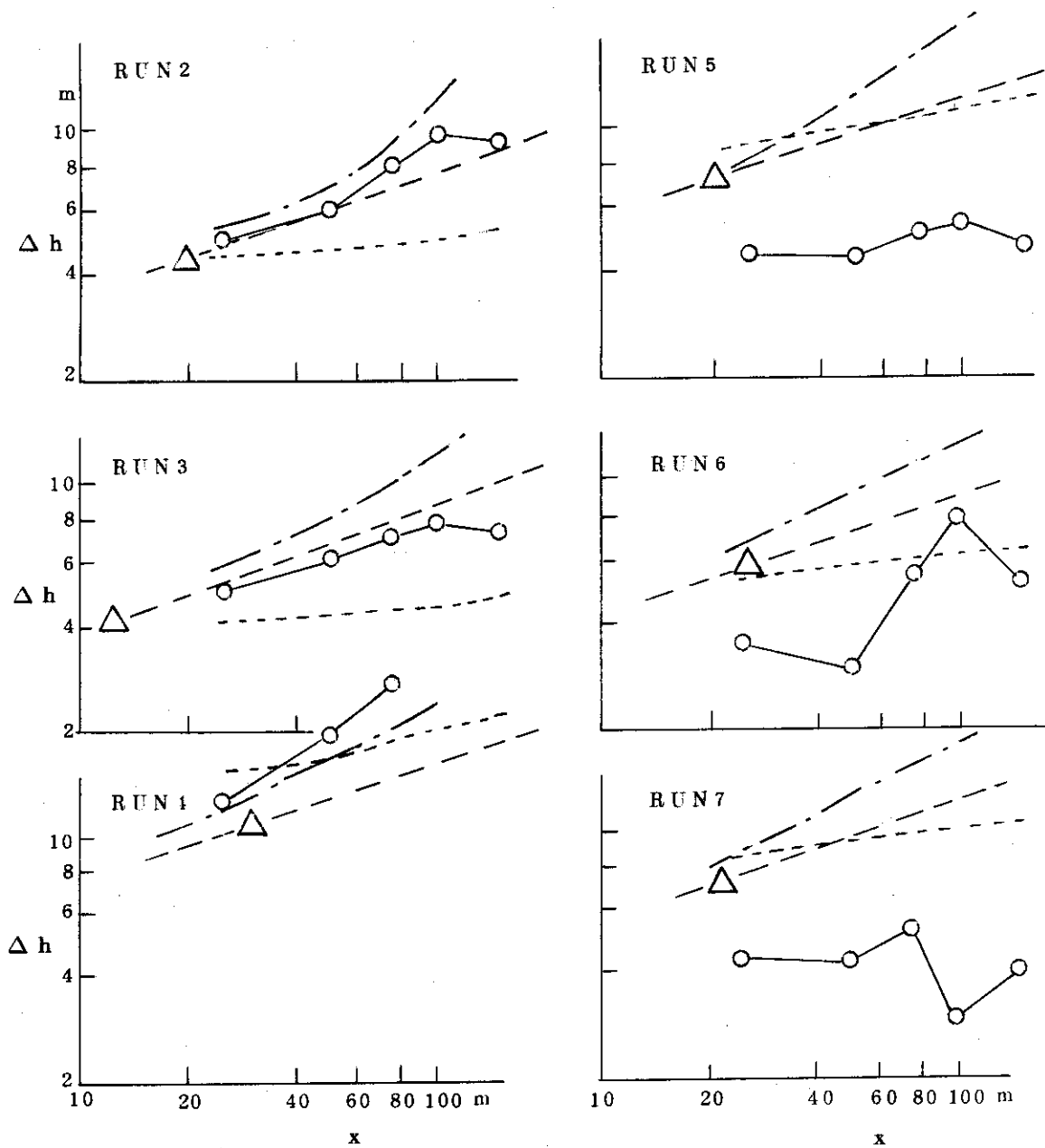


Fig. 3 上昇過程の計算値と実験値の比較

- 実験値
- Briggs の jet の上昇式 (本文(3)式)
- △  $\Delta h = 3 \frac{wd}{u}$  の点 (4)式
- Briggs の (jet + 浮力) の上昇式 (1)式
- Bosanquet の浮力上昇式 (5)式

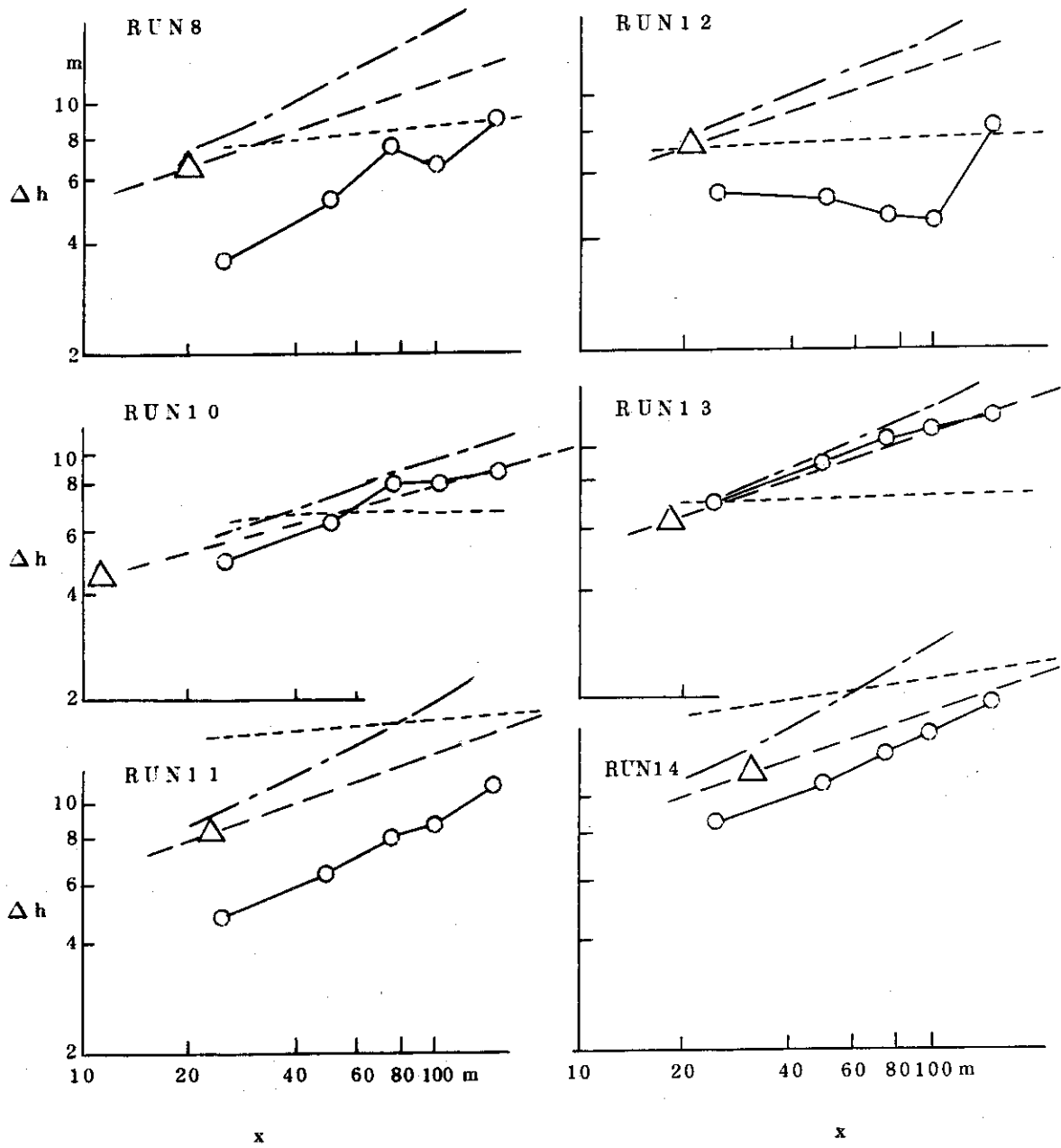


Fig. 3 (つづき)

$$\Delta h = 29.6L \left\{ F_1(X) + F_2(X_0) - \frac{0.615X_0^{1/2}}{[(w/u)^2 + 0.57]^{1/2}} \right\} \quad (5)$$

$$L = \frac{F}{u^3}$$

$$X_0 = 0.180 \frac{T_s}{T} \left( \frac{u^2 T}{d g \Delta T} \right)^2$$

$$X = X_0 + 0.034 \frac{x}{L}$$

ただし、 $F_1(X)$ 、 $F_2(X_0)$  は数値的に与えられているがここでは省略する。(この値については、Meteorology and Atomic Energy - 1968, TID24190, p192 に原論文からの再録がある。)

Fig. 3 は、風下距離  $x$  と、上昇高  $\Delta h$  の関係を両対数目盛でプロットしたものである。観測値と、式(1)、(3)、(4)、(5)による計算値を比較した。この比較から次のような傾向が指摘できる。

① Briggs は、熱による上昇が支配的なときは、煙軸の上昇は  $x^{2/3}$  に比例し、運動量による上昇が支配的なときは  $x^{1/3}$  に比例するとしているが、今回の実験では、Run 4、Run 8 が距離 75 m まで  $x^{2/3}$  に近い勾配を示している以外は、 $x^{1/3}$  の勾配に近い例が多い。

Run 10、13 では、上昇高の値も勾配も(3)式とほぼ一致している。

② Briggs は、運動量のみによる上昇(jet)の式を(3)で与えるとともに、安全側に評価するためには(上昇高を過大に見積らないためには)、この式の適用を(4)式の  $\Delta h$  の高さまでにとどめるよう勧告しているが、今回の実験との対比では、より大きな  $\Delta h$  (より大きな  $x$ ) に対して(3)式は通用しそうに見える。今回のパラメータの範囲では、(3)式上で  $\Delta h = 3wdu^{-1}$  となる距離  $x/d$  は、10 前後ときわめて小さい。

③ Briggs が(3)式を導くに当たり、参照できた実験のパラメータ範囲が  $w/u \geq 4$  であったことから、(3)、(4)式の適用には、 $w/u \geq 4$  の条件が付されているが、 $w/u$  が 0.5 - 2.8 の範囲の今回の実験に対し、bent-over plume 評価式の中では相対的に、(3)式との対応は良い。

④ Briggs の(運動量)+(浮力)の(1)式は、今回の距離範囲( $x/d$  が 10~100)では、両対数図上の勾配が実験値よりも大きめで、 $\Delta h$  の値自体も観測値を大巾に上まわることが多い。

⑤ Bosanquet の浮力による上昇の式(5)式は、今回の排出熱量範囲( $10^4 \sim 10^5 \text{ cal s}^{-1}$ )では上昇の冪勾配( $\Delta h \propto x^n$  の  $n$ )を著しく過少評価することになる。

⑥ 排気が居室温度程度に調節される原子炉排気について、冬季の実験データで、上昇に対する浮力効果にくらべ運動量効果が支配的なことが上記のように明らかにされたと思われるので、評価式は一般に運動量項のみを考慮したものでよさそうである。

つぎに、定数上昇高（最高上昇高）を与える各種評価式と、実験結果を比較する。Table 6 は比較の一覧である。表の「実測」の欄には、上昇勾配からみた推定値をとったが、 $x=150\text{m}$  以降も  $x^{1/3}$  より大きな幂で上昇を続けるように思われたものは、不等号記号で区別してある。表の注記にあるように、評価式としては、原子力分野で比較的良好に用いられるものとして Holland の式<sup>5)</sup>（運動量項のみと、運動量+浮力の2式）、Davidson - Bryant の式<sup>6)</sup>（運動量のみと、運動量+浮力の2式）、Bosanquet の cold plume の式<sup>4)</sup>、Briggs の(4)式、Briggs の浮力項が支配的なきの式<sup>3)</sup>をとった。この最後の Briggs の(11)式では、 $x=5x^*$  における  $\Delta h$  の値をとった。評価式の形は表の説明を、記号の定義は文末を参照されたい。

$\Delta h_{max}$  が実測値から一応推定できる Run 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 13 の8回について、計算値と実測値の各 Run ごとの比  $\Delta h$ （計算値）/ $\Delta h$ （実測値）の8回の Run の平均値と、標準偏差を Table 7 にまとめた。また Fig 4 には、無次元化した上最商  $\Delta h/d$  と、無次元化した排出速度  $w/u$  の関係を示し、これを Holland の(6)式、および Briggs の(4)式と比較した。

Table 6 および Table 7 でわかるように、ここでとりあげたどの評価式についても実験値との対応はあまり良くなく、バラッキは大きい。8回の Run の平均でみれば Briggs の(4)式の値が一番近いが、 $\sigma/\text{mean}$  は、他の評価式と同じく50%を越えている。Table 7 および Fig. 4 に示されるように、今回の実験の範囲では、古くから普及している Holland の式は、明らかに上昇高を過少に評価することになる。

## 7. ま と め

通常運転の2つの研究炉排気筒を用いて、16回の発煙実験を行ない、風下150mまでの煙の上昇高を測定した。結果をいくつかの実用評価式と比べ検討したが、今回の限られたパラメータ範囲ではあるが、次の結論が得られた。

室温程度の排気に対しては（強い安定、無風時は別として）、浮力を無視した Briggs の式（本文(3)式、(4)式）が適用できそうである。これは  $w/u$  が0.4よりもかなり小さい範囲まで適用でき、また  $\Delta h$  の値が  $3wu^{-1}d$  になる風下距離よりもかなり大きな距離範囲まで  $x^{1/3}$  に比例する上昇が続くようである。

実用的な上昇評価としては、 $\Delta h = 3.0wu^{-1}d$  とすれば、上昇を過大に評価する心配はなさそうであるが、Holland の  $\Delta h = 1.5wu^{-1}d$  は、これに排熱による上昇の項を加えてもあまりに過少に評価する結果となる。

最後に、この実験の計画と実施にあたり、指導と協力をいただいた環境放射能課（当時）の伊藤直次、今井和彦の両氏および実験を援助していただいた同課（当時）飯嶋敏哲氏、大和田忠明、笹沼義雄の各氏に感謝します。

つぎに、定数上昇高（最高上昇高）を与える各種評価式と、実験結果を比較する。Table 6 は比較の一覧である。表の「実測」の欄には、上昇勾配からみた推定値をとったが、 $x=150\text{m}$  以降も  $x^{1/3}$  より大きな幂で上昇を続けるように思われたものは、不等号記号で区別してある。表の注記にあるように、評価式としては、原子力分野で比較的良好に用いられるものとして Holland の式<sup>5)</sup>（運動量項のみと、運動量+浮力の2式）、Davidson - Bryant の式<sup>6)</sup>（運動量のみと、運動量+浮力の2式）、Bosanquet の cold plume の式<sup>4)</sup>、Briggs の(4)式、Briggs の浮力項が支配的なきの式<sup>3)</sup>をとった。この最後の Briggs の(11)式では、 $x=5x^*$  における  $\Delta h$  の値をとった。評価式の形は表の説明を、記号の定義は文末を参照されたい。

$\Delta h_{\text{max}}$  が実測値から一応推定できる Run 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 13 の8回について、計算値と実測値の各 Run ごとの比  $\Delta h$ （計算値）/ $\Delta h$ （実測値）の8回の Run の平均値と、標準偏差を Table 7 にまとめた。また Fig 4 には、無次元化した上最商  $\Delta h/d$  と、無次元化した排出速度  $w/u$  の関係を示し、これを Holland の(6)式、および Briggs の(4)式と比較した。

Table 6 および Table 7 でわかるように、ここでとりあげたどの評価式についても実験値との対応はあまり良くなく、バラッキは大きい。8回の Run の平均でみれば Briggs の(4)式の値が一番近いが、 $\sigma/\text{mean}$  は、他の評価式と同じく50%を越えている。Table 7 および Fig. 4 に示されるように、今回の実験の範囲では、古くから普及している Holland の式は、明らかに上昇高を過少に評価することになる。

## 7. ま と め

通常運転の2つの研究炉排気筒を用いて、16回の発煙実験を行ない、風下150mまでの煙の上昇高を測定した。結果をいくつかの実用評価式と比べ検討したが、今回の限られたパラメータ範囲ではあるが、次の結論が得られた。

室温程度の排気に対しては（強い安定、無風時は別として）、浮力を無視した Briggs の式（本文(3)式、(4)式）が適用できそうである。これは  $w/u$  が0.4よりもかなり小さい範囲まで適用でき、また  $\Delta h$  の値が  $3wu^{-1}d$  になる風下距離よりもかなり大きな距離範囲まで  $x^{1/3}$  に比例する上昇が続くようである。

実用的な上昇評価としては、 $\Delta h = 3.0wu^{-1}d$  とすれば、上昇を過大に評価する心配はなさそうであるが、Holland の  $\Delta h = 1.5wu^{-1}d$  は、これに排熱による上昇の項を加えてもあまりに過少に評価する結果となる。

最後に、この実験の計画と実施にあたり、指導と協力をいただいた環境放射能課（当時）の伊藤直次、今井和彦の両氏および実験を援助していただいた同課（当時）飯嶋敏哲氏、大和田忠明、笹沼義雄の各氏に感謝します。

Table 6  $\Delta h_{max}$ , 実測値と計算値 (m)

	実測	H-1	H-2	DB-1	DB-2	Bos	Brig 1	Brig 2	$x^*$
Run-1	2.0	1.8	2.1	1.0	1.0	2.5	3.6	6.7	25.5
(	2	9.5	2.2	2.8	1.2	1.3	3.2	4.4	30.7
J	3	7.5	2.0	2.5	1.1	1.2	2.9	4.1	29.4
R	4	>26.8	5.4	6.1	4.4	4.5	11.1	10.9	22.6
R	5	5.0	3.6	4.0	2.5	2.6	6.5	7.3	17.3
1	6	7.0	2.4	2.7	1.4	1.4	3.7	4.8	18.7
2	7	5.0	3.6	4.2	2.5	2.6	6.5	7.3	23.8
(	8	>9.0	3.3	3.7	2.2	2.3	5.7	6.6	22.6
	9	-	2.1	2.3	1.3	1.3	3.4	5.4	27.4
(	10	8.5	2.3	2.6	1.5	1.6	3.9	7.3	30.9
J	11	>10.9	4.1	4.8	3.4	3.6	8.4	16.1	35.6
P	12	>8.1	3.6	4.1	2.9	3.0	7.3	12.1	29.6
D	13	13.0	3.2	3.5	2.4	2.5	6.1	8.1	26.6
R	14	>19.3	6.3	7.4	6.3	6.7	14.5	22.3	33.4
(	15	-	2.8	4.2	2.1	2.2	5.2	8.4	29.6
	16	-	3.8	4.3	3.2	3.3	7.7	9.8	23.9

1) : 風下150mまでで $\propto x^{1/3}$ より小い上昇になったものは、観測最大値を、 $x^{1/3}$ 以上で上昇を続けると思われるものは、 $>\Delta h(x=150m)$ とした。

(H-1)  $1.5 w d u^{-1}$  (6)

(H-2)  $1.5 w d u^{-1} + 4.0 \times 10^{-5} Q_H (\text{cal. s}^{-1}) u^{-1}$  (7)

(DB-1)  $d (w u^{-1})^{1.4}$  (8)

(DB-2)  $d (w u^{-1})^{1.4} (1 + \Delta T \cdot T_s^{-1})$  (9)

(Bos) Bosanquet (1957), cold plume,  $w/u > 0.48$  のとき  
 $\Delta h = 3.14 d w u^{-1} [1.31 - 0.615 \{(w u^{-1})^2 + 0.75\}^{-1/2}]$  (10)

(Brig 1)  $3 w u^{-1} d$  (4)

(Brig 2)  $1.6 F^{1/3} u^{-1} x^{* 2/3} \left\{ \frac{2}{5} + \frac{16}{25} \frac{x}{x^*} + \frac{11}{5} \left( \frac{x}{x^*} \right)^2 \right\} \left( 1 + \frac{4}{5} \frac{x}{x^*} \right)^{-2}$  (11)

( $x^*$ )  $x^* = 2.16 F^{2/5} h_s^{3/5}$  (ただし MKS-unit)

Table 7  $\Delta h_{max}$ , 実測値と計算値の比 (8回のRunの平均)

	H-1	H-2	DB-1	DB-2	Bos	Brig1	Brig2
$(\Delta h_{cal} / \Delta h_{obs})$	0.46	0.54	0.29	0.30	0.76	0.93	1.62
$\sigma$	0.25	0.29	0.16	0.16	0.41	0.51	0.89
$\sigma / \text{mean} \times 100$	54	54	55	54	55	55	55

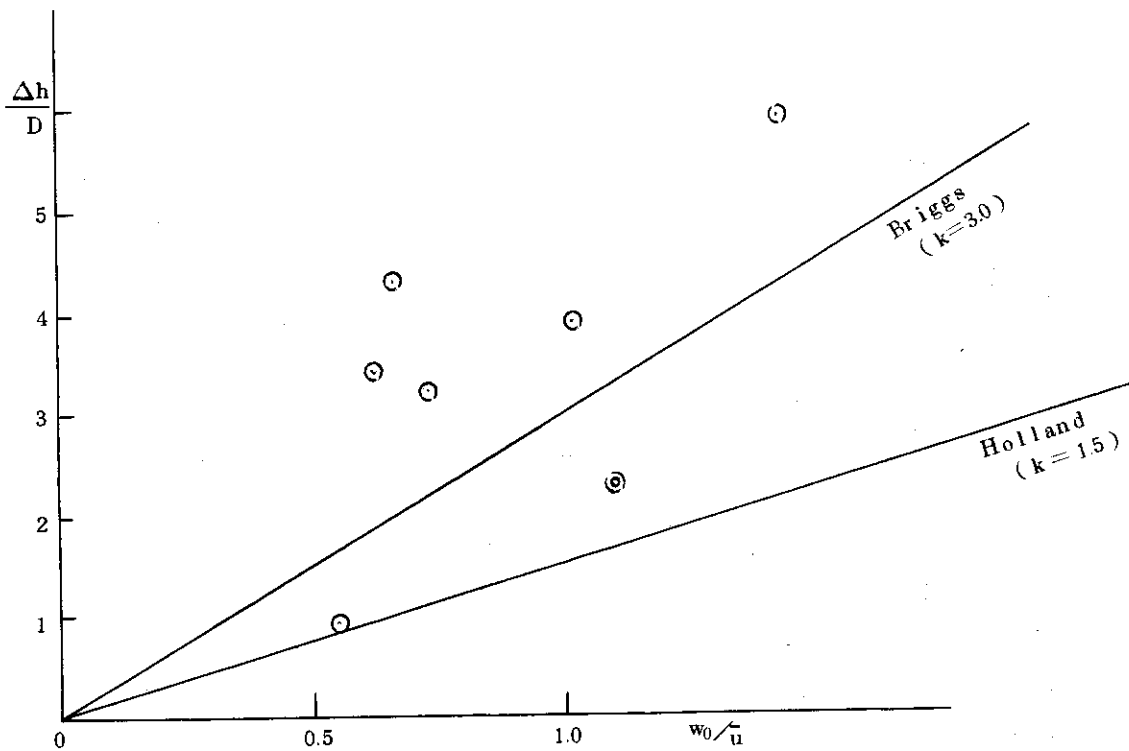


Fig. 4 Comparison of the calculated and observed final rise



(式)の記号 (単位は特記する以外はMKS系)

- $d$  : 排気筒出口直径  
 $F$  :  $= g (\Delta T / T_s) w r^2$   
 $F_m$  :  $= (T M_s / T_s M) w^2 r^2$   
 $g$  : 重力加速度  
 $\Delta h$  : 煙軸の上昇高 (一般に風下距離の関数)  
 $h_s$  : 実際の排気筒地上高  
 $M, M_s$  : 周囲大気および排気の平均分子量  
 $Q_H$  : 排気による熱放出率 ( $\text{cal. s}^{-1}$ )  
 $r$  :  $d / 2$   
 $T, T_s$  : 周囲大気および排気の絶対温度  
 $\Delta T$  :  $T_s - T$   
 $u$  : 排気筒の高さにおける平均速度  
 $w$  : 排気の排出速度

#### 文 献

- 1) Stümke, H. : VDI-Forschungsh., 27, 38-43 (1961)
- 2) Moses, H., G. H. Strom and J. E. Carson : Nucl. Safety 6(1), 1-19 (1964)
- 3) Briggs, G. : TID-25075 (1969)
- 4) Besanquet, C. H. : J. Inst. Fuel, 30 (197), 322-328 (1957)
- 5) U. S. Weather Bureau : ORO-99 (1953)
- 6) Davidson, W. F. : Trans. Conf. Ind. Wastes, 14th Annual Meeting, 38-55 (1954)

(式)の記号 (単位は特記する以外はMKS系)

- $d$  : 排気筒出口直径  
 $F$  :  $= g (\Delta T / T_s) w r^2$   
 $F_m$  :  $= (T M_s / T_s M) w^2 r^2$   
 $g$  : 重力加速度  
 $\Delta h$  : 煙軸の上昇高 (一般に風下距離の関数)  
 $h_s$  : 実際の排気筒地上高  
 $M, M_s$  : 周囲大気および排気の平均分子量  
 $Q_H$  : 排気による熱放出率 ( $\text{cal. s}^{-1}$ )  
 $r$  :  $d / 2$   
 $T, T_s$  : 周囲大気および排気の絶対温度  
 $\Delta T$  :  $T_s - T$   
 $u$  : 排気筒の高さにおける平均速度  
 $w$  : 排気の排出速度

#### 文 献

- 1) Stümke, H. : VDI-Forschungsh., 27, 38-43 (1961)
- 2) Moses, H., G. H. Strom and J. E. Carson : Nucl. Safety 6(1), 1-19 (1964)
- 3) Briggs, G. : TID-25075 (1969)
- 4) Besanquet, C. H. : J. Inst. Fuel, 30 (197), 322-328 (1957)
- 5) U. S. Weather Bureau : ORO-99 (1953)
- 6) Davidson, W. F. : Trans. Conf. Ind. Wastes, 14th Annual Meeting, 38-55 (1954)