

## 船用流動層燃焼ボイラの研究

波江 貞弘\*・長内 敏雄\*・山之内 博\*・横村 武宣\*\*

### Investigation on Fluidized Bed Combustion Boiler for Marine Applications

By

Sadahiro NAMIE, Toshio OSANAI, Hiroshi YAMANOUCHI  
Takeyoshi YOKOMURA

#### Abstract

The fluidized bed combustion is expected to have advantages of being adaptable to many kinds of fuel, of being able to make compact in a furnace and of improving the thermal efficiency of power plant by raising steam conditions. Hence, its applications to the marine steam power, as well as to the land use, have been investigated.

In the paper, the effects of a rolling motion of ships on the performance of fluidized bed combustion are investigated experimentally with a small test furnace installed on a rolling frame. Further, the characteristics of the furnace in both cases of oil and coal combustions are obtained and compared with each other.

The inclination of the furnace raises a variance of temperature distribution in the bed and reduces the boiler efficiency of furnace, where there is no essential difference between the oil and coal combustions. In the rolling motion of the furnace, on the other hand, almost the same boiler efficiency as that in the vertical furnace is obtained in both oil and coal combustions. The fact is owing to a time-averaging effect caused from a large heat capacity of the bed material.

From these results described above, the fixed inclination is considered to be a critical design condition of the marine fluidized bed furnace. While, the performance of the furnace in actual operations should be influenced only by the components of rolling motion of the ships with a comparatively long period ( more than about 10 minutes ).

#### 1. ま え が き

流動層燃焼技術は、極低質油あるいは石炭などの燃料多様化、燃焼炉本体の小型化ならびに蒸気条件の改善による蒸気動力プラント熱効率の向上などに対して利点を有すると考えられることから、陸上用<sup>1)2)</sup>のみならず船用蒸気動力への適用についても検討がなされてきた。<sup>3)-6)9)</sup> その際、船用として特に考慮すべき点として、燃焼炉の傾斜、動揺時における燃焼の安定性と効率、未燃分を含む流動媒体の散逸、安定燃焼維持に

必要な層内温度の下限界、負荷変動に対する追従性などが指摘されている。これらの事項に関して、非燃焼モデルによる傾斜、動揺実験<sup>5)</sup>や垂直炉<sup>5)6)</sup>及び傾斜炉<sup>6)</sup>による燃焼実験などが既に実施されているが、動揺が燃焼特性に及ぼす影響について報告された例はまだ見受けられない。

著者らは動揺架台上に設置された小型流動層燃焼実験炉を用い、油燃焼の場合と石炭燃焼の場合との比較を含め、上記燃焼特性に及ぼす姿勢条件、特に動揺の影響に焦点を絞って実験的な検討を行ってきた<sup>11)</sup>。本報告は非燃焼モデルによる実験<sup>7)</sup>及び、垂直炉、傾斜炉による燃焼実験<sup>8)10)</sup>の結果を含めこれら一連の研究結果を整理したものである。

\*機関性能部

\*\*日本原子力船研究開発事業団 (元機関性能部)

原稿受付：昭和59年7月2日

## 2. 流動層燃焼実験炉

### 2.1 装置の概要

図1に油燃焼の場合の装置系統を、図2に給炭装置の概略を、表1に図中に使用した記号の説明を、また、表2に装置の主要目をそれぞれを示す。写真1は傾斜時における燃焼炉の外観である。本燃焼炉は流路断面の寸法が $200 \times 400\text{mm}$ 、高さが約 $2.8\text{m}$ で、底部から予燃焼室、流動層伝熱管（ボイラ管）部、フリーボード部の順に配置され、フリーボード頂部に空気予熱管を備えた構造となっている。予燃焼室風箱の上部に設けられた空気分散板は、全流路面積に対する開口比が $1.6\%$ であり、8個の上蓋付ノズルで構成されている。空気は各々のノズルから水平3方向に均一に分散される。

定常燃焼時の燃焼供給は、分散板上 $75\text{mm}$ の位置で流動層内にノズルを水平に挿入して行った。すなわち、油燃焼の場合は流路断面長手（ $400\text{mm}$ ）の方向のほぼ全長に渡って流動層内に管を貫通させ、層内3箇所に設けた水平噴出孔から空気噴霧によって供給した。一方、石炭燃焼の場合は図2に示したように、電磁マイクロフィーダとロータリ弁を介して供給される石炭を空気流で搬送し、油燃焼の場合と同一位置で層内長手方向の中央まで貫通させた管の先端から供給した。

流動層内には、分散板上約 $250 \sim 590\text{mm}$ の範囲内に、

幅 $200\text{mm}$ 、奥行 $400\text{mm}$ の伝熱管（ボイラ管）ユニットを組み込む構造となっている。図3はその管配列を示したもので、総伝熱面積及び管配列ピッチの相違によって3種類の型式を用意した。冷却水（ボイラ水）の流入、流出口は図中Ⅰ～Ⅲの記号及び管中心の●印で示した位置に設けているが、通常は2型ユニットのⅠを入口、Ⅱを出口とする場合（以下「Ⅰ→Ⅱ」と略記する。伝熱面積 $A$ は $0.27\text{m}^2$ ）及び3型ユニットのⅠ→Ⅲ（ $A = 0.27\text{m}^2$ ）とⅠ⇌Ⅱ（ $A = 0.16\text{m}^2$ ）を使用した。なお、3型のⅠ⇌Ⅱでは伝熱管ユニットを上下逆にして組み込んでいる。また、管内、外径はすべて $17/22\text{mm}$ のものを使用した。

炉内への流動媒体の投入と取り出しは2つの開口弁を介して行い、また、流動層部の分散板上 $250\text{mm}$ の位置及びフリーボードには燃焼状態を観察するため点検窓が設けられている。燃焼ガス中に飛散する粒子の大部分はフリーボードで分離されて落下するが、分離しきれない微細粒子は集塵装置で回収される。

燃焼炉本体は動揺架台上に設置されており、燃焼中に傾斜、動揺させ得るように各配管はフレキシブル管で接続されている。動揺台の動揺方向は燃焼炉流路断面の長手（ $400\text{mm}$ ）の方向であり、その回転中心はほぼ燃料注入ノズルの位置に一致する。また、最大傾斜角は両方向に $22.5$ 度、動揺周期は3秒以上で駆動可能である。

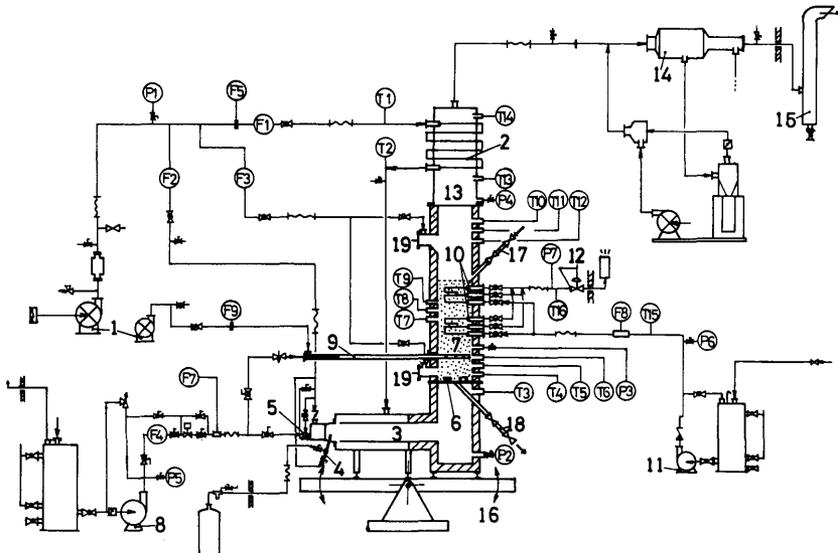


図1 装置系統図（灯油燃焼の場合）

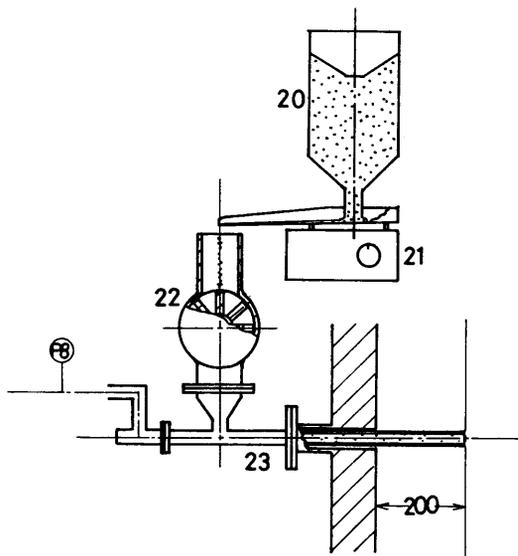


図2 給炭装置

表2 装置主要目

燃焼炉本体	
炉内寸法	断面200×400mm, 全高さ2.8m
空気分散板	開口比1.6%, 孔数8個
伝熱面	空気予熱管 28/34mm <sup>φ</sup> , 1.59m <sup>2</sup> 層内伝熱管(ボイラ管) 17/22mm <sup>φ</sup> , 0.16~0.9m <sup>2</sup>
冷却水(ボイラ水)	温水 8~10kg/cm <sup>2</sup>
動揺架台	
寸法, 耐荷重	2×2m, 2000kg
最大傾斜角	±22.5° (流路断面長手方向)
動揺周期	3秒以上~一定角度傾斜

表1 使用記号の説明

1	ルーツプロア	16	動揺架台
2	空気予熱管	17	流動媒体投入口
3	予燃焼室	18	流動媒体取出口
4	パイロット・バーナー(LPG)	19	点検窓ガラス
5	予燃焼バーナー(灯油)	20	石炭ホッパー
6	空気分散板	21	電磁マイクロフィーダ
7	流動層部	22	ロータリ弁
8	給油ポンプ	23	石炭空気搬送ノズル
9	流動層燃料注入ノズル		
10	層内伝熱管(ボイラ管)	T 1~16	熱電対
11	給水ポンプ	F 1~3, 5, 9	空気流量計
12	給水圧力調節弁	F 8	水流量計
13	フリーボード	F 4, 7	油流量計
14	集塵装置	21	石炭流量計測
15	煙突	p 1~7	圧力計

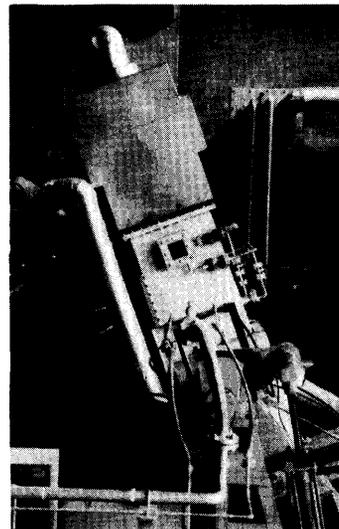


写真1 燃焼炉外観(傾斜時)

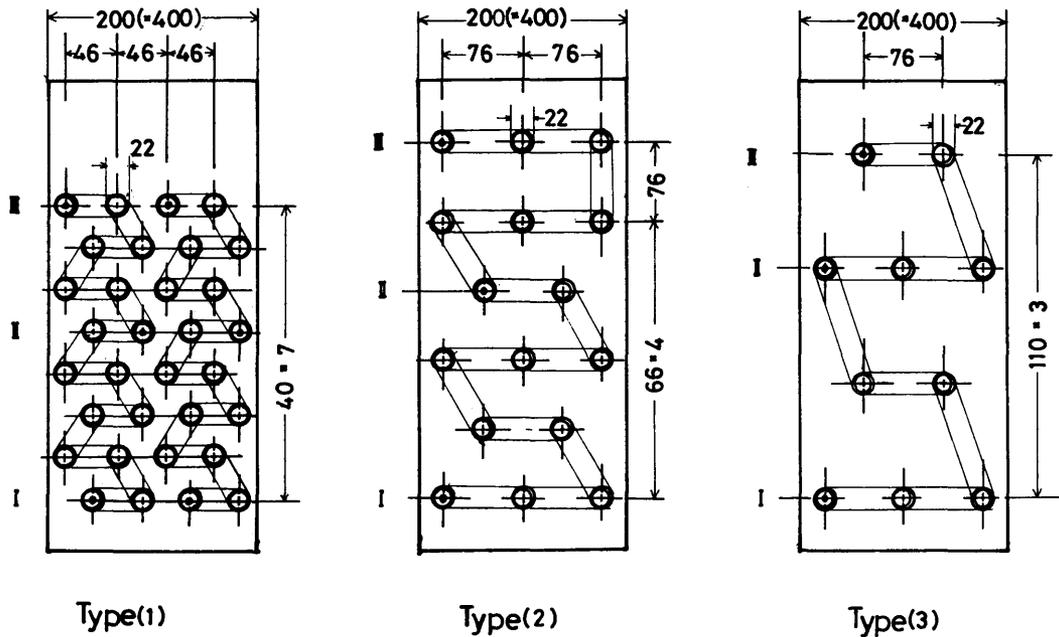


図3 層内伝熱管配列

2.2 燃料及び流動媒体

本実験で対象とした燃料は灯油ならび石炭である。灯油は市販の白灯油を使用し、石炭は低発熱量が6,100 kcal/kg (25,500 kJ/kg) の太平洋炭で、粒径を5 mm以下に調整し乾燥させたものを用いた。

一方、流動媒体としては、船用を目的とする場合珪砂でもよいと思われるが、本実験では重量基準平均径が1.2mmの石灰石を用いた。図4は上記の石炭及び流動媒体の粒径分布を示したものである。

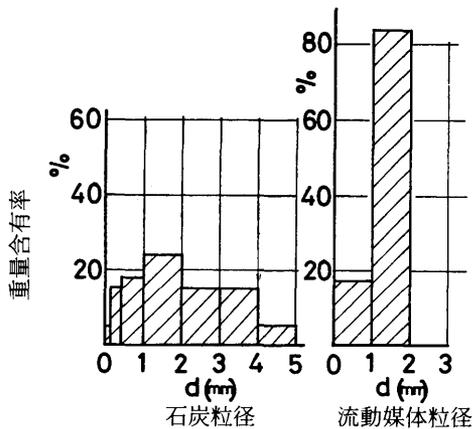


図4 粒径分布

3. 実験及び計測

3.1 実験要領

実験では、まず所定の伝熱管ユニットを燃焼炉本体に組み込み、流動媒体を投入口から必要な静止層高さまで入れる。起動の際は、ルーツプロアから送られる空気を予燃焼バーナーによって加熱し、流動層温度を上昇させる。炉内温度が灯油燃焼の場合650℃、石炭燃焼で500℃程度になった時点で前章で述べた層内注入ノズルから主燃料の供給を開始する。層内で着火し、温度が800℃前後になった状態で予燃焼バーナーを停止して、主燃料、空気及び冷却水の各流量を所定の値に調節する。定常燃焼が得られた段階で動揺架台によって垂直、一定角度の傾斜あるいは動揺など燃焼炉の姿勢条件を与え、各部の温度、層内圧損、各流量、圧力などの計測を行う。

表3に本実験における各因子の範囲を示す。層内温度は燃料流量、静止層高さあるいは伝熱面積を変化させて調節した。炉の姿勢条件は垂直燃焼状態を基準とし、一定角度傾斜では両方向傾斜各2種類、動揺の場合は動揺角2種類、周期3種類についてそれぞれ実験を行った。なお、本実験では熱収支の算定が容易なように、冷却水の流量と系圧力を相変化が生じない範囲

内で制御した。また、実験中層内圧損の測定を基準にして流動媒体を追加し、層高さが一定になるよう調節した。

表 3 実験範囲

実験因子	記号	範囲
伝熱面積	A	0.16, 0.27 (~0.9) m <sup>2</sup>
伝熱管配列ピッチ	p	図 3 中に表示
流動層静止層高さ	H <sub>s</sub>	0.16, 0.3, 0.6 m
層通過ガス流速	U	1.0~1.8 m/sec
燃焼発熱量, 総量	Q <sub>t</sub>	0.33 ~ 1.0 × 10 <sup>5</sup> kcal/h
炉床面積当	Q <sub>HS</sub> ×H <sub>s</sub>	0.41 ~ 1.25 × 10 <sup>6</sup> kcal/m <sup>2</sup> ·h
静止層体積当	Q <sub>HS</sub>	1.37 ~ 6.45 × 10 <sup>6</sup> kcal/m <sup>3</sup> ·h
姿勢条件, 動揺角	θ	±10°, ±20°
周期	τ	5, 10, 20 sec
定傾斜角	θ	0(垂直), 10°, 20°(両方向)

### 3.2 計測方法

2.1 節の図 1 において, T 1 ~ T 16 の記号は温度計測用の熱電対を示し, F 1 ~ F 3, F 5 及び F 9 は空気流量計, F 8 は冷却水流量計, F 4 及び F 7 は灯油流量計をそれぞれ示している。計器の型式は目的に応じて, 浮子型, オリフィス型, 容積型及び電磁型を適宜選んで用いている。また, 図中の p 1 ~ p 7 は圧力計を示している。一方, 石炭燃焼の場合の燃料流量は図 2 中に示した電磁マイクロフィーダによって一定時間内に定量供給される重量を秤で計量して求めた。

図 5 は燃焼炉内の温度分布ならびに層内圧損の計測位置の詳細を示したものである。温度は炉内高さ方向及び流路断面長手 (L=400mm) の方向にそれぞれ 3 点ずつの合計 9 点とフリーボード部 2 点とに C-A 型熱電対を挿入し, デジタルボルトメータと記録装置を用いて計測した。これらの計測点のうち T 4 ~ T 9 の 6 点は通常流動層内に位置し, T 10 ~ T 12 は層の直上に位置する。また, T 13 と T 14 は空気予熱部前後の燃焼ガス温度に対応している。一方, 圧力損失は空気分散板直上とフリーボード部に設けた圧力測定孔 p 3, p 4 間の差圧を変換器を介してペン書き記録計と解析装置に入力させて求めた。

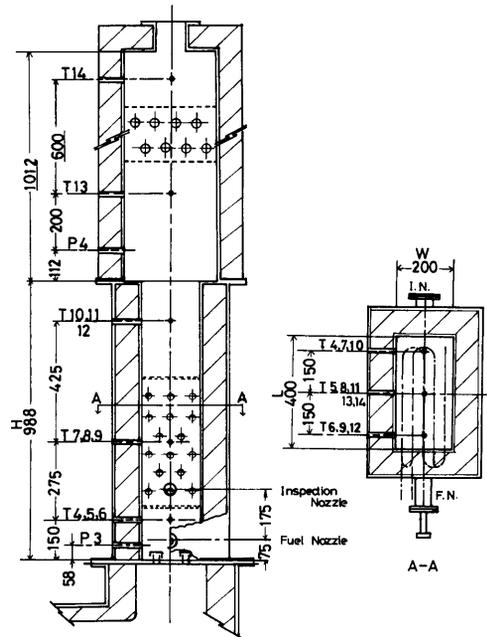


図 5 温度及び圧力計測位置

#### 4. 流動層の流体力学的特性 (非燃焼可視モデル実験の結果)

燃焼実験に先立ち、流動層の流体力学的な特性を把握するため、非燃焼可視モデル装置による流動実験を実施した。同装置は図6に概要を示すように本体は透明アクリル製で、流路断面  $L \times B$  が  $200 \times 200 \text{mm}$  の A 型と、流路断面、高さ、空気分散板ノズル開口比など

の主要寸法が燃焼炉本体と同一の B 型の 2 種類からなる。A 型は主に、流動層の特性に及ぼす層通過平均空気流速、粒子層高さ、分散板ノズル開口比及び粒子径の影響を調べる際使用し、B 型では伝熱管を模擬した管群ならびに流路断面の影響を調べた。それぞれ傾斜角設定架台上に固定し、垂直及び傾斜状態における層内圧力損失の計測ならびに流動状況の観察を行った。

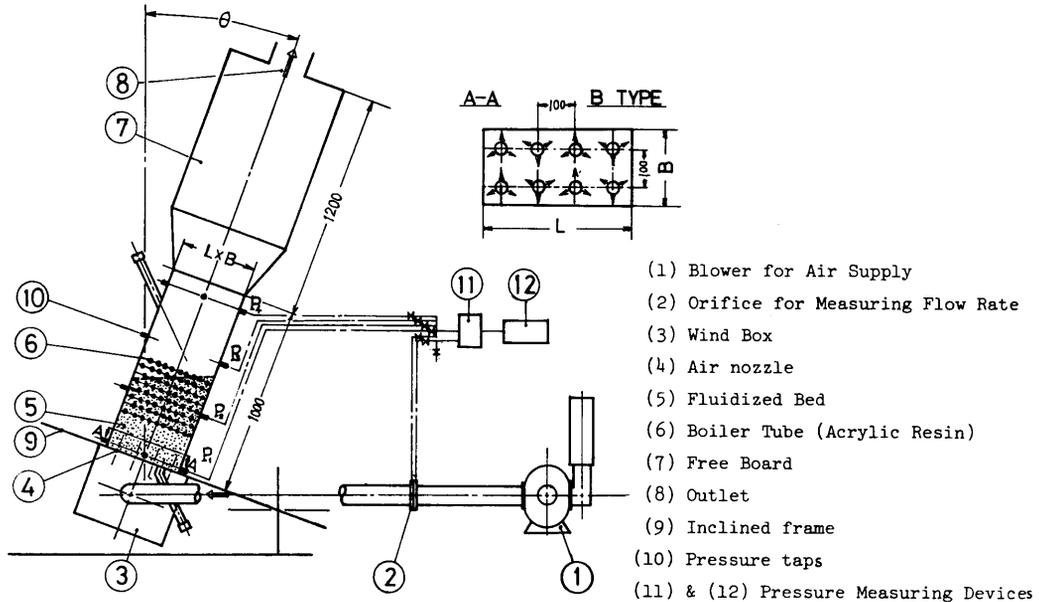


図6 非燃焼可視モデル装置

#### 4.1 垂直流動層の流動特性

##### 4.1.1 平均圧力損失

図7は流動層を空気が通過する際に生じる圧力損失の時間平均値  $\Delta P$  を層通過平均流速  $U$  (流路断面積基準) に対して示したものであり、静止状態での粒子層高さ  $H_s$  をパラメータとしている。圧力損失は空気流速の増加とともに最初急激に増大し、図中  $U_f$  と記した流速以上の領域で静止層高さ  $H_s$  によって定まる一定値となる。この流速  $U_f$  が流動下限界流速であり、 $\Delta P$  一定の領域が流動化状態に対応している。なお、流速をさらに増加させると一般には粒子が飛散する領域になるが、本実験では対象としていない。

非燃焼実験では2.2節で述べた粒径の流動媒体以外に、重量基準平均径  $d_p$  が  $1.5 \text{mm}$  及び  $5 \text{mm}$  の石灰石を使用している。図8はこの平均粒径の相違が上記の

流動化開始流速  $U_f$  に及ぼす影響を示したもので、 $U_f$  は粒径の増加とともに増加している。図中の破線は中西ら<sup>5)</sup>による測定値であり、ほぼ同じ傾向を示している。

図9は図7の流動化領域における平均圧力損失  $\Delta P$  を静止層高さ  $H_s$  に対して表示しなおしたものであり、破線はやはり中西ら<sup>5)</sup>による測定値である。 $\Delta P$  の値は粒径が大きい場合(図中、細線記号で示す。)に若干増加する傾向が見られるものの、ほぼ静止層高さ  $H_s$  に比例している。文献5)に指摘されているとおり、平均圧力損失はほぼ全粒子重量と釣り合った値になっていると考えられる。なお、図中の▼印及び▽印はB型装置において模擬伝熱管群を挿入する場合と挿入しない場合の値をそれぞれ示したものであり、管群の挿入によって  $\Delta P$  は多少増加している。

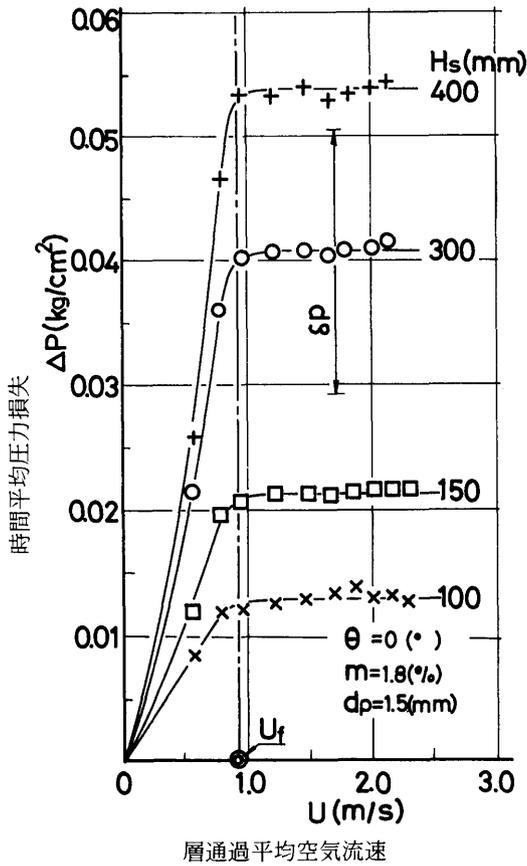


図7 層内圧力損失（時間平均値）

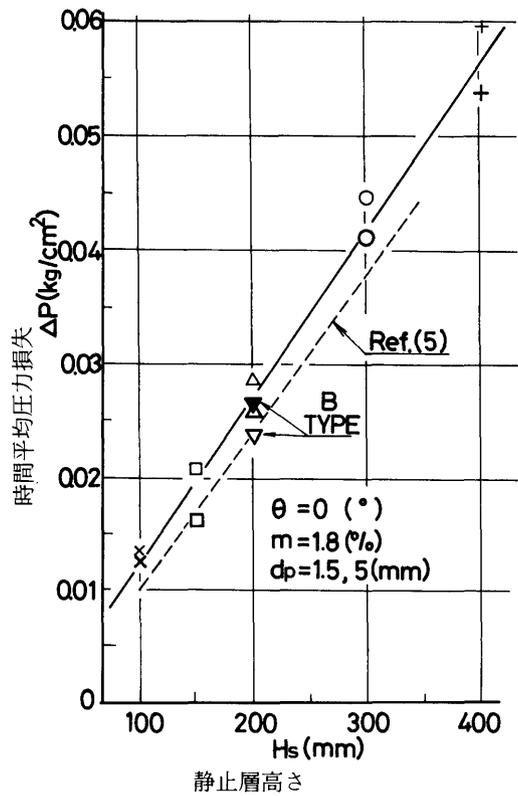


図9 流動状態における層内平均圧力損失

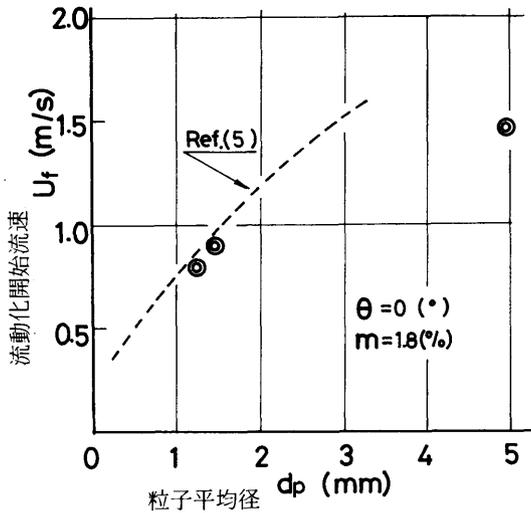


図8 流動化開始空気流速

#### 4.1.2 圧力損失の変動特性

前節の平均圧力損失とは別に、後に述べる燃焼特性あるいは流動媒体の散逸などに関連する事項に粒子層の流体力学的な安定性がある。堀ら<sup>2)</sup>は粒子層を通過する空気泡が大きい程、流動層は不安定であると考え、これを表わす評価指数として圧力損失の変動幅  $\delta P$  (図7中に例を示す。)の平均圧力損失  $\Delta P$  に対する比をさらに変動振動数  $f$  で割った値  $\{(\delta P/\Delta P)/f\}$  を用いることを提案している。

図10は静止層高さ  $H_s$  及び粒子径  $d_p$  をパラメータとし、相対空気流速  $U/U_f$  を横軸にとって  $\{(\delta P/\Delta P)/f\}$  の値を示したものである。 $\{(\delta P/\Delta P)/f\}$  値は層高さ及び粒子径が増加すると増大し、流動層は

不安定になっている。空気流速に対しては、最初流速の増加とともに不安定性が増した後にほぼ一定乃至は若干安定化する傾向が見られる。

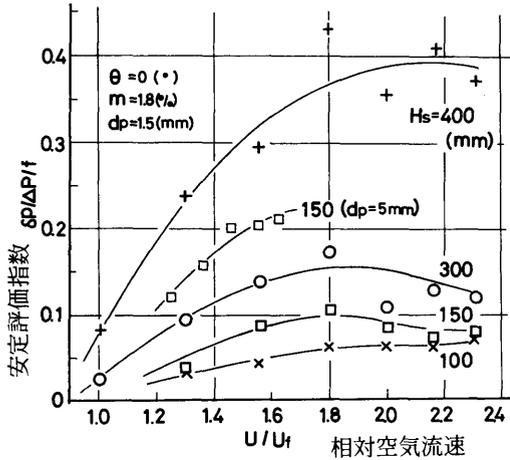


図10 安定評価指数（空気流速，粒子径，層高さの影響）

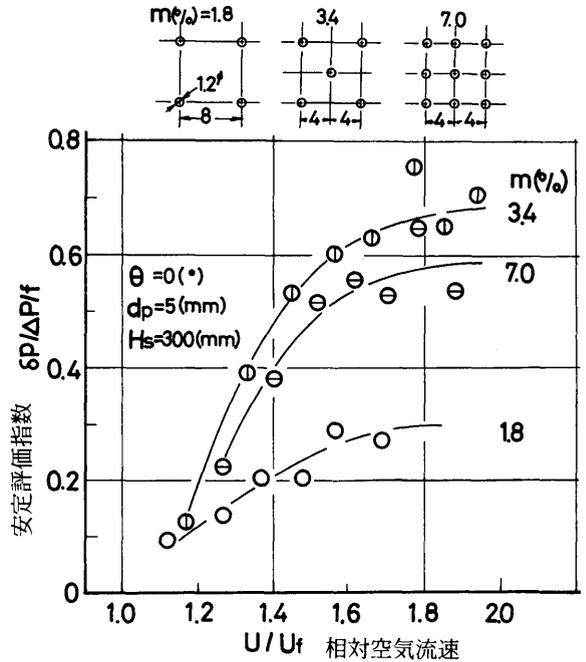


図11 安定評価指数（分散板ノズル開口比の影響）

図11は孔径が1.2mmの円形ノズルを備えた空気分散板について、図中に示すようにノズル開口位置及び開口面積比を3種類に変化させた際の $\{\delta P/\Delta P\}/f$ 値を示したものである。開口面積比 $m$ が大きくなるにつれて一般に不安定となっている。ただし、 $m$ の値が3.4%と7.0%とで傾向が逆になっているが、これは開口点密度の影響と考えられ、7.0%では開口点数が多いために安定性がよくなっているものと思われる。

図12はB型装置を用いて、管群挿入の効果を調べたものである。管群は2.1節図3の1型伝熱管ユニットを模擬してピッチ $p$ が $46 \times 40$ mmとなるようアクリル棒を配列したものであり、管軸が装置の傾斜方向と平行及び直交の2種類を用いている。図中▼印で示されるように管群を挿入した場合には、▽印の管群のない場合に比べて流動層が安定化されている。また、この傾向は管の挿入方向（傾斜方向に平行及び直交）にはほとんど影響されない。なお、図中の○印は比較のため図10のA型装置による $H_s = 300$ mmの場合の測定値を再記したものである。ノズル開口比、粒子径及び静止層高さの各条件が若干異なり、 $\{\delta P/\Delta P\}/f$ 値も多少差が見られるが定性的な傾向はほぼ一致している。

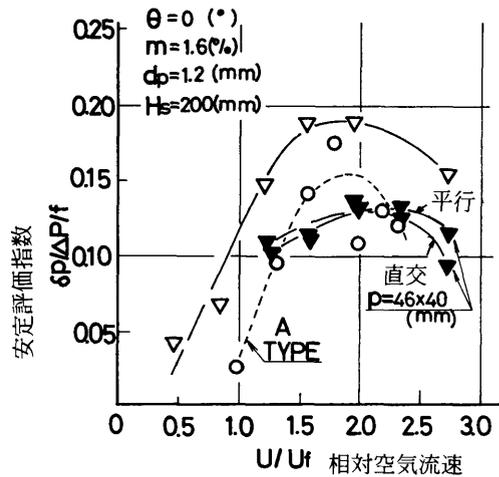


図12 安定評価指数（管群の影響）

#### 4.2 傾斜流動層の流動特性

図13はA、B両型式の装置について、傾斜角 $\theta$ を変化させた場合の平均圧力損失 $\Delta P$ を垂直状態での値 $\Delta P_h$ に対する比で表示したものである。図中にそ

それぞれ  $\Delta P_{max}$ ,  $\Delta P_{min}$ ,  $\Delta P_{mid}$  で示されるように、平均圧力損失は粒子層が厚くなる側で最大、その反対側で最小、中央部で中間の値となる。 $\Delta P_{max}$  は垂直状態より大きくなる場合もあるが、平均的には傾斜角が増加するにつれ圧力損失は減少している。図中の▼印はB型装置について管群を挿入した状態で20度傾斜させた場合を示したものであるが、▽印の管群のない場合と比較すると、圧力損失の測定位置による差(分散幅)は小さくなっている。

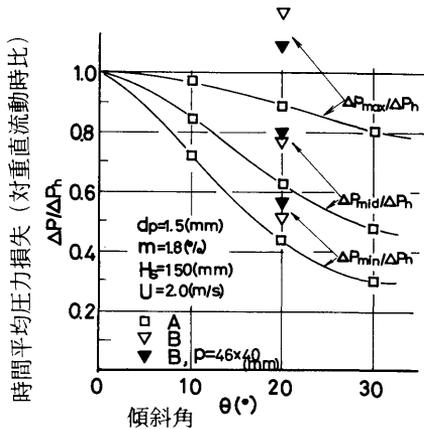


図13 傾斜流動層の平均圧力損失

図14はB型装置について傾斜角を20度とした場合の圧力損失の変動特性を示したものである。図中の破線は図12の垂直流動層に対する値を比較のため再記したものであるが  $\{(\delta P/\Delta P)/f\}$  値は傾斜によってあまり影響を受けていない。また、図中▼印で示す管群を挿入した場合はやはり流動層が安定になっている。

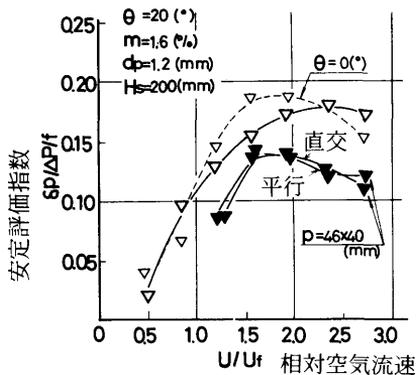


図14 傾斜流動層の安定評価指数

4.3 流動状況の観察結果

傾斜流動層では層が厚くなる側の側壁面付近に、流動が局部的に抑制される固定層が形成されることが指摘されている<sup>5)6)</sup>。この固定層は層内の均一混合性を阻害するため、側壁面から二次的に究気を供給して形成を防止する方法が提案されており<sup>5)</sup>、燃焼実験における層内温度分布の計測からもその効果が確認されている<sup>6)</sup>。



(1) 二次給気なし



(2) 二次供給時

写真2 傾斜流動層の流動状況

写真2-1)及び(2)は可視モデル装置の燃料注入ノズルに相当する位置から赤色の粉体(JIS 8種試験粉体)を注入し、傾斜流動層の流動状況を観察するとともに、側壁から二次空気を供給して、その効果を調べたものであり、図15はこの結果を模写したものである。傾斜流動層では通常図中(1)の斜線部に固定層が形成され、反対側の層の薄い部分に吹き抜けが生じてこの付近だけが循環流動する。これに対して、図中(2)のように側壁から主流動用空気の数%程度の割合で二次空気を供給すると、傾斜角 $\theta$ が20度程度以下の場合には、図中細破線で示した(1)の場合と比較して明らかなように、固定層の部分が低速ではあるが図中下方向に移動し、流動部に合流して粒子が全体的に循環する。また、層表面の形状も図に示されるように水平に近づいて吹き抜けも抑制される。

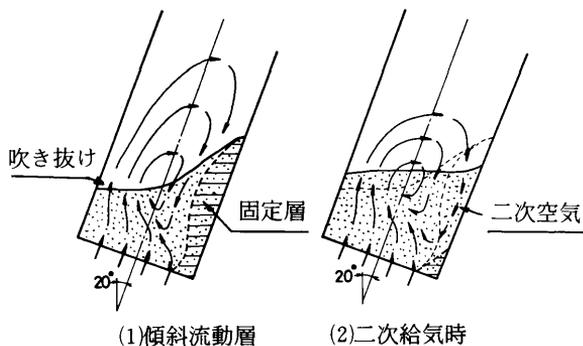


図15 傾斜流動層の流動状況

#### 4.4 流動特性のまとめ

流動層の流体力学的特性について得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 流動化開始点の空気流速は粒子径とともに増加する。また、流動領域での時間平均圧力損失は層高さに比例し、ほぼ全粒子重量と釣合った値になっている<sup>5)</sup>。
- (2) 圧力損失の変動特性については、層高さ及び粒子径とともに変動が相対的に大きくなり、流動層は不安定になる。空気流速の増加に対しては、最初変動が増加した後にはほぼ一定及至は若干安定化する。また、空気分散板の開口比が大きく、開口点密度が小さいほど不安定になると考えられる。
- (3) 模擬伝熱管群を挿入すると、管軸方向の区別なく

流動層はかなり安定化される。

- (4) 傾斜流動層の時間平均圧力損失は通常、層が厚くなる側とその反対側で値に差(分散幅)が生じるが、平均的には傾斜角の増加につれ垂直時の値から減少する。一方、変動特性については傾斜流動層も垂直流動層とほぼ同程度の安定性が得られた。管群を挿入すると上記平均圧力損失の分散幅が小さくなるとともに、圧力変動も相対的に減少し、層は安定化する。
- (5) 傾斜流動層では層が厚くなる側の側壁面付近に流動が局部的に抑制される固定層が形成され、反対側の層の薄い部分のみが循環する。この側壁から二次空気を供給するとゆるやかながら粒子は全体的に循環し、層表面も水平に近くなる。

これらの結果は、2章で述べた燃焼炉の設計ならびに次章以後の燃焼実験の基礎資料となっている。

## 5. 燃焼及び伝熱特性

### 5.1 垂直燃焼実験での温度分布

#### 5.1.1 炉内温度分布形状

図16は燃焼炉が垂直で定常な燃焼状態における炉内高さ方向の温度分布を示したものである。図中には静止層高さ及び伝熱管挿入位置をそれぞれ記号 $H_s$ と $B.T.$ で表示している。流動時の層の高さは $H_s$ のほぼ2倍程度の値であり、その概略の位置を破線で示している。

同図(1)は2.1節図3に示した2型伝熱管ユニット(I→II)を用いた灯油燃焼で、 $H_s$ が0.3m、伝熱面積 $A$ が0.27 $m^2$ 、燃焼発熱量を静止層体積で割った単位体積当りの発熱量 $Q_{Hs}$ が $2.98 \times 10^6$  kcal/ $m^3$ h ( $3.47 \times 10^3$  kW/ $m^3$ )の場合を示す。2型伝熱管は配列ピッチが76×66mmと比較的小さく、伝熱管の配置も層下方に偏っているため、層内上部の温度 $T_7 \sim T_9$ が高く、また層直上で火災が発生し温度 $T_{10} \sim T_{12}$ が上昇して温度分布の幅が広がる傾向を示している。

これに対して、図中(2-a)は管ピッチが110×76mmと若干大きい3型伝熱管ユニット(I→III)を用いた灯油燃焼の例を示したもので、 $H_s$ 、 $A$ 、 $Q_{Hs}$ の各値は(1)とほぼ同じである。この場合、層内温度 $T_4 \sim T_9$ のばらつきは少なくなりほぼ均一な温度分布を示している。これは管ピッチの増大によって粒子の混合が促進され、また伝熱管が層内様に分散配置されたことによると考えられる。

一方、図中(2-b)は同じく3型伝熱管ユニット(Ⅱ→Ⅰ)を用いた石炭燃焼の場合を示したもので、伝熱面積及び伝熱管の配置が灯油燃焼の場合と多少異

なるが、 $H_s$ 、 $Q_{Hs}$ の値は他とほぼ同一条件である。石炭燃焼の場合も(2-a)の灯油燃焼とほぼ同様な温度分布の傾向を示している。

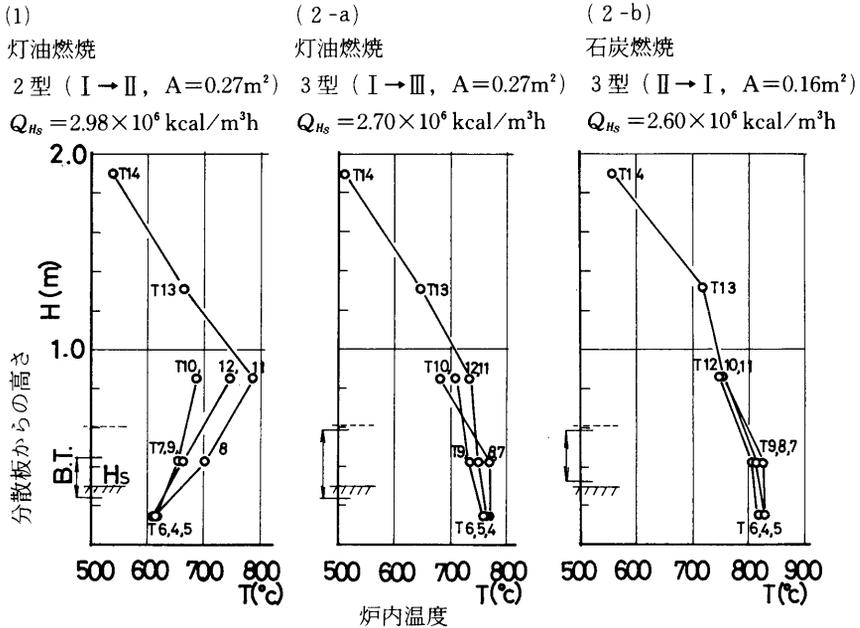


図16 炉内高さ方向の温度分布(垂直燃焼時)

5.1.2 各燃焼負荷における温度分布幅

図17-(1), (2)は上記温度分布の幅を燃焼負荷  $Q_{Hs}$  に対して示したものである。図中、層内温度 T 4 ~ T 9 の分布幅を実線分で、層上温度 T 10 ~ T 12 を破線分でそれぞれ示し、同一測定点を細線で結んで各記号を付している。

同図(1)は図16(1)と同様に2型伝熱管ユニット(Ⅰ→Ⅱ)を用いた灯油燃焼の場合を示したもので、燃焼負荷の低い領域で温度分布幅が増加している。負荷の増加につれ層内平均温度が上昇し、燃焼状態が良好となって分布幅も減少するが、さらに負荷を高めると火炎が生じて層上温度が上昇する傾向が見られる。

一方、図中(2-a, b)は管ピッチの大きい3型伝熱管ユニット(Ⅰ→Ⅱ)を用いた灯油燃焼(2-a)及び石炭燃焼(2-b)の場合をそれぞれ示したものである。燃焼負荷の増加につれ層内平均温度が上昇する傾向はほぼ同じであるが、低負荷域においても分布

幅の広がりは見られず層上温度も低く保たれており、良好な燃焼状態を維持している。さらに、灯油燃焼と石炭燃焼とで特に顕著な相違は見られない。

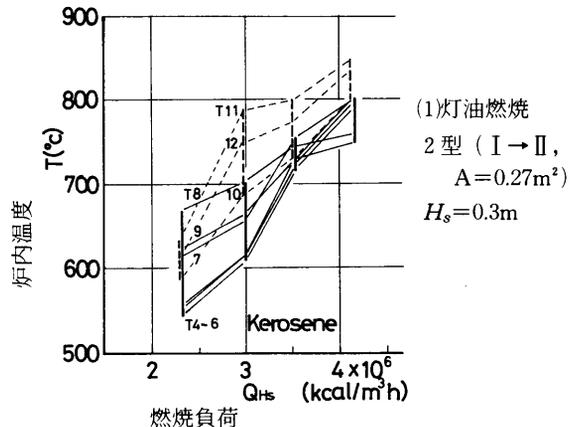
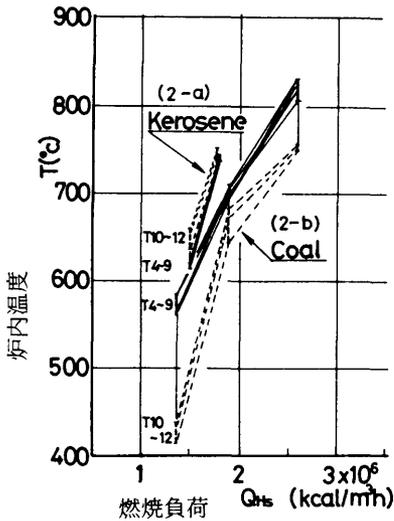


図17-(1) 層内及び層上温度分布幅(垂直燃焼時)



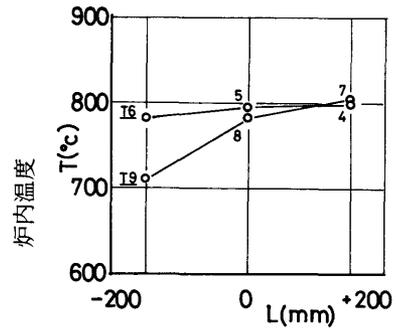
(2-a) 灯油燃烧 3型 (I → II, A=0.16m<sup>2</sup>) H<sub>s</sub>=0.6m  
 (2-b) 石炭燃烧 3型 (II → I, A=0.16m<sup>2</sup>) H<sub>s</sub>=0.3m

図17-(2) 層内及び層上温度分布幅 (垂直燃烧時)

5.2 傾斜, 動揺燃烧実験での温度分布

5.2.1 傾斜時の層内温度分布形状

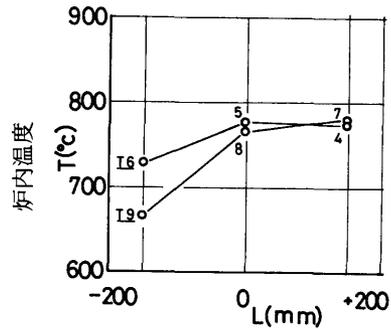
図18-(a), (b)は燃烧炉を負方向(3.2節図5で燃料注入ノズル側が低下する方向)に20度の一定角度で傾斜させた場合の層内長手(L=400mm)方向の温度分布を示したもので, (a)は灯油燃烧, (b)は石炭燃烧の場合の例である。いずれも, 傾斜によって層高さが增加する側の側壁面付近の温度T<sub>9</sub>が層内平均温度より低下している。また, 石炭燃烧の場合は温度T<sub>6</sub>も低下しており, 上記傾向が多少強く現われている。燃料性状ならびに注入ノズル構造の相違が影響していると思われるが, いずれにしても本質的な差は見られない。これらの原因については, 4.3節の図15及び図18の温度測定位置関係を示す図中に斜線で表示したように局部的な固定層が形成され<sup>5),6)</sup>, この部分への燃料の供給が不十分になるためと考えられる。



流路断面長手方向の位置

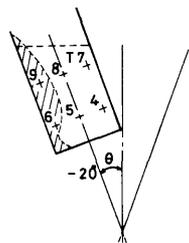
(a) 灯油燃烧  
 3型 (I → II, A=0.16m<sup>2</sup>)  
 H<sub>s</sub>=0.6m  
 Q<sub>Hs</sub> = 1.78 × 10<sup>6</sup> kcal/m<sup>2</sup>h

図18-(a) 傾斜燃烧時の層内温度分布



流路断面長手方向の位置

(b) 石炭燃烧  
 3型 (II → I, A=0.16m<sup>2</sup>)  
 H<sub>s</sub>=0.3m  
 Q<sub>Hs</sub> = 1.87 × 10<sup>6</sup> kcal/m<sup>2</sup>h



温度計測位置関係 (a)(b)共通

図18-(b) 傾斜燃烧時の層内温度分布

5.2.2 傾斜，動揺時の温度分布幅

図19-(a), (b)は垂直定常燃焼の状態から炉本体を  
負方向20度～正方向20度の範囲内の一定角度に傾斜さ

せた場合，ならびに正負両方向に振幅0～±20度で動  
揺させた場合について，図17と同様な方法で温度分布  
を表示し，垂直燃焼と比較したものである。

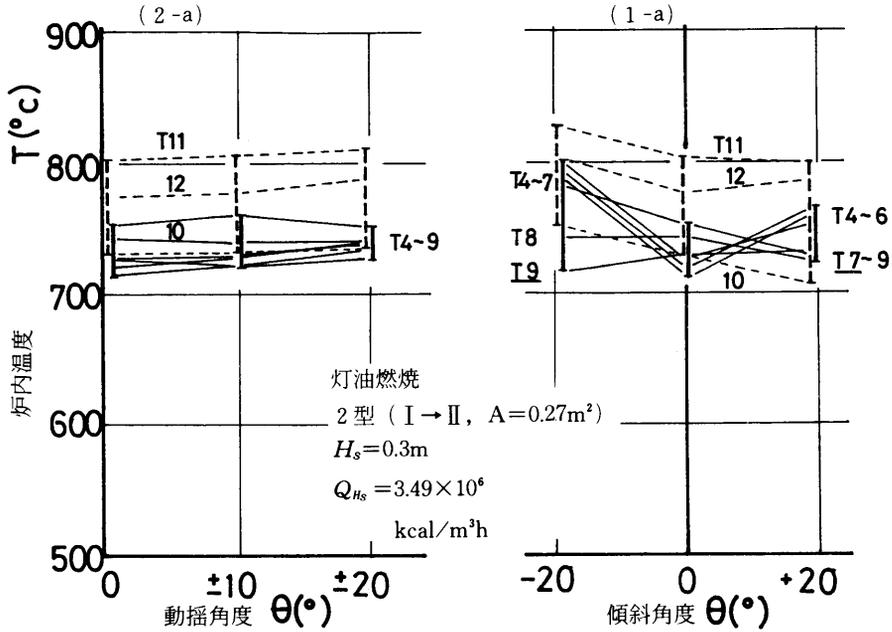


図19-(a) 傾斜，動揺燃焼時の温度分布幅

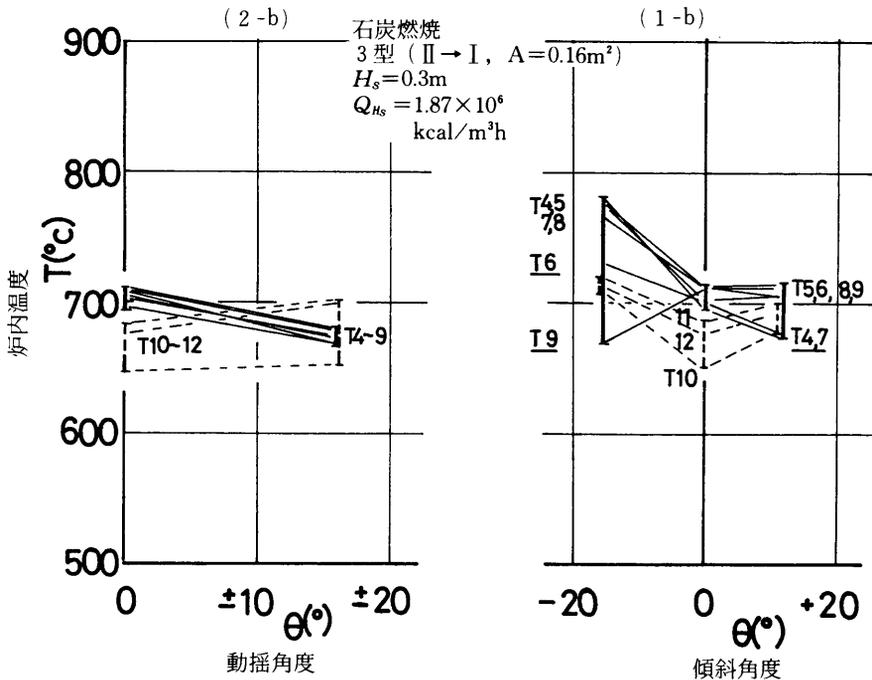


図19-(b) 傾斜，動揺燃焼時の温度分布幅

図中(1-a, b)は一定角度の傾斜燃焼の場合の例を示したもので、(1-a)の灯油燃焼では層内平均温度は上昇しているが、前節で述べたように傾斜側の側壁面付近(正方向傾斜の場合T7, 負方向傾斜のT9)の温度は上昇せず分布幅が増加している。また、層上及びフリーボード部の火炎が若干増加する傾向が観察される。(1-b)の石炭燃焼の場合も一定角度傾斜燃焼時に層内平均温度は増加しているが、T7あるいはT9は垂直燃焼状態よりむしろ低下する傾向を示しやはり分布幅が増加している。なお、上記の傾向は灯油燃焼、石炭燃焼ともに正方向傾斜の場合の方が弱く分布幅の広がりには少ない。これは3.2節の図5で示したように正方向傾斜側の側壁には点検窓が設けられており、ここから供給される窓ガラス冷却用の二次空気によって固定層の形成が阻止されるためと考えられる。この傾向は文献6)の結果とも一致するものである。

一方、図中(2-a, b)に示されるように燃焼炉を動揺させる場合には、極めて注目すべき傾向として傾斜燃焼で見られた現象は現われず、動揺角度 $0 \sim \pm 20$ 度の範囲内で垂直燃焼とほぼ同程度の分布幅の結果が得られた。この結果は(2-a)の灯油燃焼、(2-b)の石炭燃焼の両者で共通しており、また、実験中に動揺周期を5, 10及び20秒と変化させてもほとんど影響されないことを確認している。この理由は、流動媒体の熱容量が非常に大きいため流動層内の温度変化に対する時定数が数分~10分程度と長く、通常の船体動揺に相当する周期に対しては時間的に平均化されるためと考えられる。図20は流動媒体の熱容量特性を示す例として、燃料流量及び空気流量を階段状に変化させた場合の層内温度の測定結果を示したものであるが、燃焼炉を傾斜させた時点からの層内温度もこれと同程度の時定数で変化する結果を得ている。なお、動揺燃焼の場合にも最大傾斜角付近でフリーボード部に火炎が若干観察された。

なお、傾斜、動揺時の温度分布特性については図19以外の実験条件に対する結果を本報告の最後に付録としてまとめて示す。

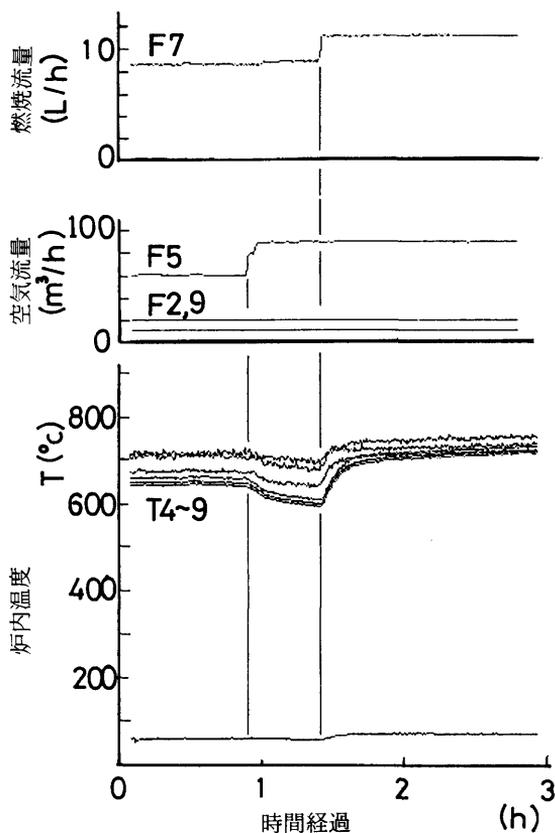


図20 層内温度変動特性

### 5.3 平均熱通過率、ボイラ効率に及ぼす影響

本実験では冷却水について伝熱管入口及び出口温度のみを計測し、また伝熱管壁温度は計測していない。したがって、平均熱通過率 $K$ 及びボイラ効率 $\eta$ を、燃焼発熱量 $Q_i$ 、冷却水吸熱量 $Q_o$ 、伝熱管の冷却部伝熱面積 $A$ ならびに層内平均温度( $T_4 \sim T_9$ の算術平均値)と冷却水平均温度との差 $\Delta T$ を用いて次式で求めた。

$$K = Q_o / (A \cdot \Delta T) \quad (1)$$

$$\eta = Q_o / Q_i \quad (2)$$

実際には炉の姿勢条件や層高さによって流動層に接触する伝熱管の有効伝熱面積が変化するので、上式による値はこの影響を含んだ平均値である。

図21及び図22は傾斜、動揺時の平均熱通過率ならびにボイラ効率をそれぞれ垂直燃焼における値を基準にとって示したものである。各測定点の実験条件は表4

にまとめて示すとおりである。垂直燃焼時の平均熱通過率の値  $K_{\theta=0}$  は条件によって150~320 kcal/m<sup>2</sup>h℃ (174~372w/m<sup>2</sup>·k) の範囲にあるが、これに対して炉を負方向に20度傾斜させた場合は20~40%程度値が減少している。一方、ボイラ効率も垂直燃焼時の値  $\eta_{\theta=0}$  を基準にすると灯油燃焼で15%程度、石炭燃焼で35%程度減少している。その際、排ガス熱及び未燃焼分などによる損失が増大しているものと思われる。これらは前節で述べた層内の固定層の形成ならびに伝熱管の有効伝熱面積の減少が原因と考えられる。また、図19の温度分布の場合と同様に  $K$ ,  $\eta$  においても正方向傾斜の際減少割合が少なくなっており、やはり側壁からの冷却空気供給による固定層形成の防止効果が作用していると考えられる。

これに対して、各図左に示す動揺の場合は平均熱通過率、ボイラ効率ともに垂直燃焼時より若干低い計測点が見られるものの、実験誤差によるばらつきを考慮すればほぼ垂直燃焼時と同程度の値が得られている。やはり層内における時間的平均化の効果が大きく作用していると考えられる。

表4 計測点の実験条件

No.	Sy.	B. Tubes Unit	A (m <sup>2</sup> )	H <sub>s</sub> (m)	Fuels	Q <sub>th</sub> (kcal/m <sup>2</sup> h)	U (m/s)
1	□	Type2I-II	0.27	0.3	Kero-sene	229 <sup>100</sup>	1.20
2	△	↓ ↓ ↓	↓	↓		298	1.48
3	○	↓ ↓ ↓	↓	↓		349 <sub>Gasol</sub>	1.62
4	◇	↓ ↓ ↓	↓	↓		415	1.49
5	★	↓ ↓ ↓	↓	0.16		645	1.81
6	□	Type3I-II	0.16	0.6	Coal	151	1.08
7	△	↓ ↓ ↓	↓	↓		178	1.40
8	×	I-II	0.27	↓		179	1.15
9	○	↓ ↓ ↓	↓	0.3		270	1.28
10	■	II-I	0.16	↓		137	1.09
11	▲	↓ ↓ ↓	↓	↓		187	0.98
12	●	↓ ↓ ↓	↓	↓		260	1.35

6. 流動媒体散逸量

燃焼炉における未燃分を含む流動媒体の散逸は炉の燃焼効率と関連して重要である。本実験では非燃焼可視モデルならびに燃焼炉の両者を用いてその特性を調べた。

図23は可視モデル実験によって層通過平均空気流速  $U$ 、側壁からの二次給気（主空気流量の2.9%程度）の有無、ならびに傾斜角  $\theta$  が散逸量に及ぼす効果を調べたものである。縦軸は静止状態で計測した粒子層体積の単位時間当りの減少量で示している。非燃焼の場合、散逸量は空気流が1.5 m/s に対して0.5~1.1×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h、2.0 m/s で1.8~2.9×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h となっており、空気流速とともに増加している。傾斜角の増加に対しては若干減少する傾向も見られるが顕著な変化はない。また、二次給気の影響については一定の傾向は得られなかった。

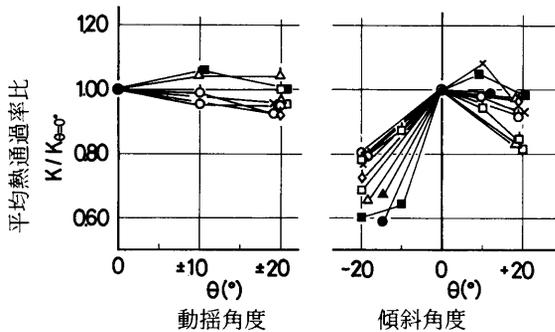


図21 平均熱通過率（対垂直燃焼時比）

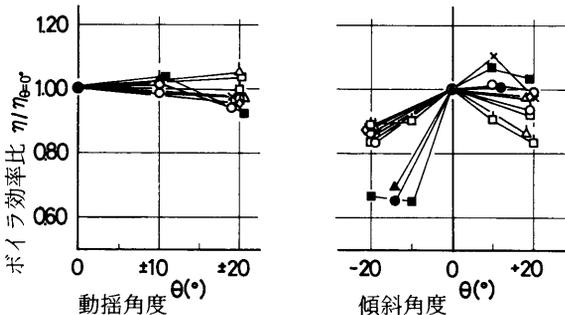


図22 ボイラ効率（対垂直燃焼時比）

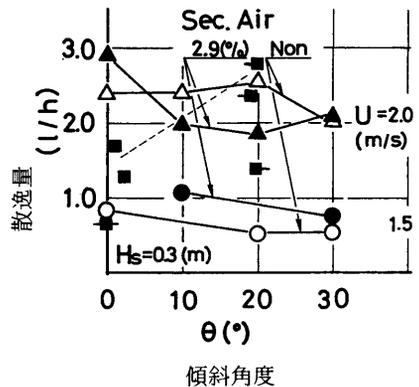


図23 流動媒体散逸量（非燃焼実験）

一方、図24は燃焼実験において流動層の圧力損失が一定になるよう追加投入した粒子の体積を実験毎の全所要時間に対する平均値として示したものである。図中の横軸は炉床面積当りの燃焼負荷  $Q_{H_s} \times H_s$  (kcal/m<sup>2</sup>h) である。

また、各測定点に付した数値は空気供給量と炉内平均温度から計算で求めた燃焼ガスの層通平均流速  $U$  (m/s) 及び静止層高さ  $H_s$  (m) を示し、 $H_s$  の数値を付していない場合はすべて0.3mである。図中に■印で示した3型伝熱管ユニットによる実験（主として垂直燃焼）に対する計測点（破線でそのばらつき範囲を示す）を見ると、燃焼ガスの平均流速がほぼ同程度の場合でも散逸量は炉床負荷に大きく依存してその増加とともに多くなっている。また、□印は管ピッチの小さい2型伝熱管に対する計測点で、散逸量は全体的に3型伝熱管の場合より少なくなっている。一方、図中の■印及び■印は3型伝熱管を用いてそれぞれ正方向及び負方向に20度傾斜の状態での燃焼させた時、■印は正負両方向に20度の動揺燃焼時における散逸量を示している。また、比較のためこれらの測定値を図23中に記入し、破線で結んで示している。計測点が少ないため確言はできないが、負方向の傾斜燃焼時には散逸量が増加する傾向が見られ、非燃焼実験とは異なる結果となった。これは、燃焼実験では層内の固定層形成による有効層体積の減少ならびに有効伝熱面積の減少が炉床負荷の増加と同様な効果を与え、傾斜の影響が顕著に現われることによると考えられる。この傾向は5.3節で述べた排ガス熱損失以外の損失の増大傾向と一致するものであり、上記の損失が未燃焼分の散逸によるものであることを示唆している。固定層形成が抑制される正方向傾斜及び動揺時には散逸量の増加が見られない。

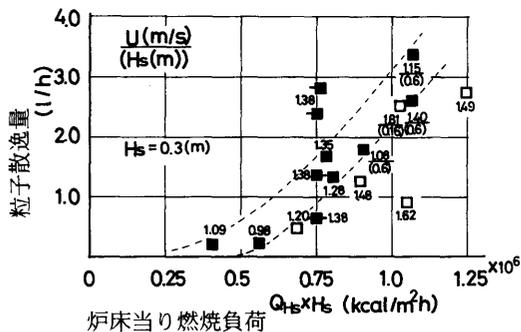


図24 流動媒体散逸量（燃焼実験）

## 7. ま と め

灯油燃焼及び石炭燃焼の小型流動層燃焼装置を用い、炉の姿勢条件が燃焼特性に及ぼす影響を中心に検討した。可視モデル装置による流動層の流体力学的特性については4.4節に記したとおりである。燃焼実験により得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 垂直燃焼では層内温度が600℃前後の低負荷域まで安定な燃焼状態が得られる。灯油及び石炭燃焼では特に顕著な相違は見られない。
  - (2) 本燃焼炉では炉を一定角度で傾斜させると層内平均温度は上昇するが、流動層が厚くなる側の壁面付近における温度は低下して温度分布幅は増加する。灯油燃焼に比べて石炭燃焼の場合にこの傾向が若干強いようであるが本質的な差は見られない。温度分布幅の増加は側壁から空気が供給される場合（本実験では点検窓側に傾斜する場合）に小さく、固定層形成の抑制作用によると考えられる。
  - (3) 平均熱通過率は20度傾斜の際に垂直燃焼時に比べて最大40%程度減少し、また、未燃焼分の散逸などによる損失が増大してボイラ効率も15～35%程度低下する。固定層形成及び有効伝熱面積の減少が原因と考えられる。また、(2)と同様に側壁からの給気による効果が観測された。
  - (4) 一方、炉を動揺させた場合、動揺角度0～±20度、周期5～20秒の範囲に対して灯油及び石炭燃焼ともに垂直燃焼時とほぼ同等の温度分布特性が得られた。また、平均熱通過率及びボイラ効率もほぼ同程度の値となる。これらは流動媒体の大きな熱容量による時間的平均化効果が強く作用しているためと考えられる。
  - (5) 流動媒体の散逸量は非燃焼実験によると層通過空気流速とともに増加する。一方、燃焼実験によると、計算で求めた燃焼ガス平均流速がほぼ同一であっても、炉床負荷の増大につれ散逸量が増加する傾向が見られる。さらに、側壁から給気しない傾斜燃焼でも同様な傾向が見られるが、これは(3)の熱損失の増加傾向と対応している。また、配列ピッチの小さい管群の場合散逸量は抑制される。
- これらの結果を総合すると次の事項が指摘できよう。すなわち、流動層燃焼に対する炉の傾斜の影響は灯油及び石炭燃焼の両者で本質的な差はないものと考えられる。傾斜の影響を防ぐ対策として側壁からの二次的な給気が有効であることは文献6)で指摘され

たとおりである。一方、動揺時には垂直燃焼とほぼ同等の特性が得られることから、船用流動層燃焼炉では定傾斜を想定した設計が最も厳しい条件になる。また、実際の運転に際しては、船体が比較的長時間（10分程度以上）一定方向に傾く場合にだけ燃焼性能に影響を及ぼすといえる。なお、流動媒体の散逸量ならびにその低減については今後さらに検討が必要と思われる。

〔謝辞〕

本実験に際して有益なご示唆ならびに燃料炭の加工などご協力いただいた三井造船株式会社、千葉研究所の方々に謝意を表します。

〔付録〕

図25(1)~(6)は図19と同様、種々の実験条件に対する傾斜、動揺時の流動層内温度分布幅の特性を示したものである。各図中に示す実験番号は5・3節の表4中の番号ならびに実験条件に対応している。

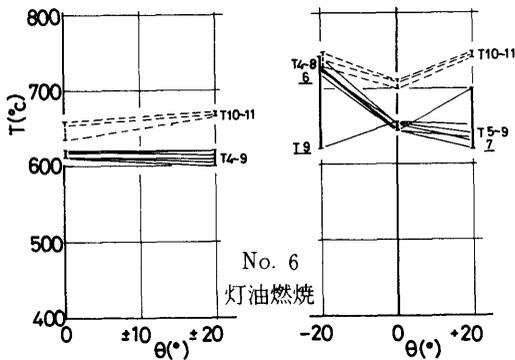


図25-1) 傾斜、動揺燃焼時の温度分布幅

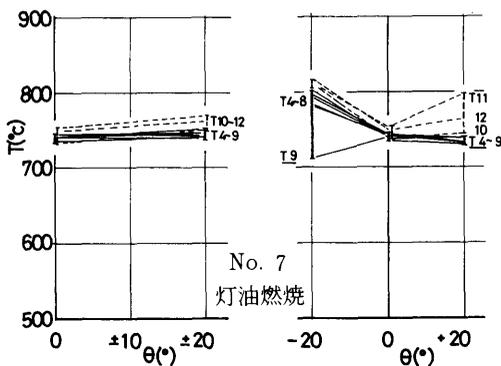


図25-2) 傾斜、動揺燃焼時の温度分布幅

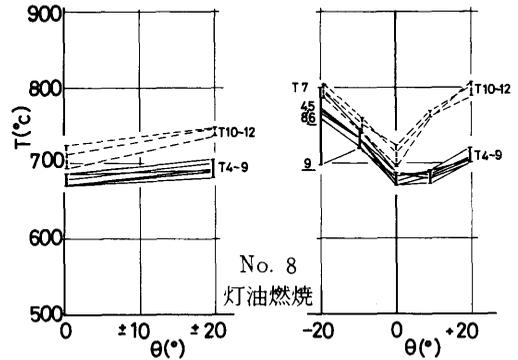


図25-3) 傾斜、動揺燃焼時の温度分布幅

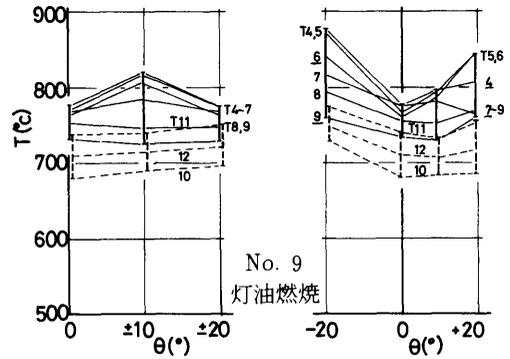


図25-4) 傾斜、動揺燃焼時の温度分布幅

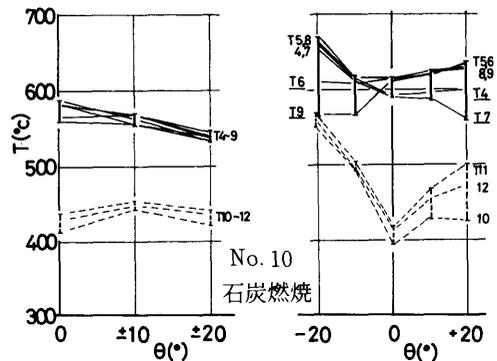


図25-5) 傾斜、動揺燃焼時の温度分布幅

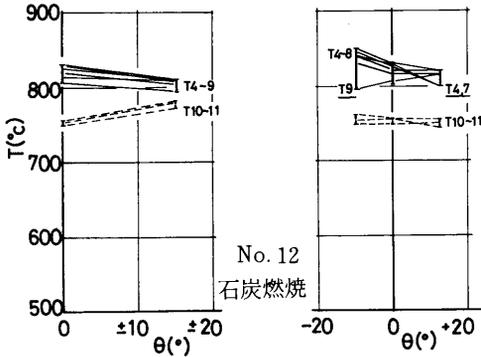


図25-6) 傾斜，動揺燃焼時の温度分布幅

### 参 考 文 献

- 1) 玉貫滋，片山弘，高見宣明：20 t/h 流動床燃焼ボイラパイロットプラント，石炭利用技術研究発表会講演集，第3回（1981-9），p 65~82
- 2) 堀喜久男，松本誠一郎，館林旬，ほか4名：流動層燃焼に関する基礎的研究（第1報），川崎技報，No. 63（1977-3），p195~201
- 3) A.F. Hodgkin; Fluidized Bed Combustion for Advanced Steam Plants, Shipbuilding & Marine Engg. Intl., (1978-5)
- 4) 上田昭：VAP タービンプラント—80年代の蒸気プラントについて，日本船用機関学会誌，第14巻，第4号（1979），p 344~350
- 5) 中西雄，中井誠一，門田強，古川哲郎，ほか3名：流動床ボイラを目差して一船用・油だきに関する基礎実験一，日本船用機関学会誌，第14巻，第9号（1979），p 808~819
- 6) 浜平澄雄，宮地征男，湯谷正司，橋本好博：船用としての流動層燃焼特性に関する実験的研究，日本船用機関学会誌，第18巻，第11号（1983），p 856~866
- 7) 横村武宣，波江貞弘，長内敏雄：流動床燃焼ボイラの研究(その1, 可視モデルにおける流動特性)，船舶技術研究所，第39回講演集（1982-5），p 73~76
- 8) 波江貞弘，長内敏雄，山之内博，横村武宣：船用流動床燃焼ボイラの研究（その2，油焚きボイラに及ぼす傾斜，動揺の影響），船舶技術研究所，第41回講演集（1983-5），p 134~138
- 9) E. Evensen, E. Østerbø: Coal-fired Fluidized Bed Combustion in Marine Applications, Norwegian Maritime Research, No. 1（1982），p 3~8
- 10) 山之内博，波江貞弘，長内敏雄，横村武宣：船用流動床燃焼ボイラの研究（その3，石炭焚きにおける傾斜動揺の影響），船舶技術研究所，第43回講演集（1984-5），p 131~135
- 11) 波江貞弘，長内敏雄，山之内博，横村武宣：船用流動層燃焼技術に関する研究，日本船用機関学会，第34回講演集（1984-5），p 13~16，同学会誌（論文），第19巻，第12号（1984），p 943~950