

UDC 533. 6.07

# 航空宇宙技術研究所資料

TM-48

極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験

平木 一・林 二識・橋本 登  
吉永 崇・山口富夫

1965年2月

航空宇宙技術研究所

既 刊 資 料

|       |  |           |   |
|-------|--|-----------|---|
| TM- 1 | 高マッハ数風洞について (I)                                | 1961年11月  | 平橋 木一, 清水 福寿  |
| TM- 2 | 航空技術研究所計数型電子計算機設備<br>プログラムライブラリー (I)           | 1962年 2 月 | 橋口 登雄, 戸川 隼人<br>三好 甫力, 高橋 利之<br>能美 良三, 佐藤 保子<br>鳥海 秀夫, 田 幸雄<br>長洲 巖登, 井上 政一<br>細川 和之, 山根 皓三<br>橋本 為治, 坂元 思無邪<br>竹内 池田 |
| TM- 4 | 18cm×20cm超音速風洞について                             | 1962年 5 月 |   |
| TM- 5 | 遷音速流の線型理論                                      | 1962年 8 月 |   |
| TM- 6 | 18cm×18cm遷音速風洞整備試験                             | 1962年 8 月 |   |
| TM- 7 | 慣性力形疲労試験                                       | 1962年 8 月 |   |
| TM- 8 | アルミ合金の前歴が疲れ寿命に<br>およぼす実験的研究                    | 1962年 9 月 |   |
| TM- 9 | 方向性次元解析と相似解に関する覚書                              | 1963年 2 月 | 甲 藤 好 郎, 小 出 勉  |
| TM-10 | DATATRON 205 用 ALGOL 58<br>使用法について             | 1963年 2 月 | 高 橋 利之  |
| TM-11 | 光弾性による高速車盤の縞模様                                 | 1963年 2 月 | 永 井 文 雄   |
| TM-12 | コーティングの断熱効果に関する実験                              | 1963年 3 月 | 竹 中 幸 彦, 小 川 鉦 一<br>林 洋 一   |
| TM-13 | 遷音速における 45° 後退角翼の予備的<br>フラッタ実験                 | 1963年 3 月 | 中 井 咲 一, 小 原 瑛<br>鳥 海 良 三, 安 藤 泰 勝<br>中 井 咲 一, 橋 爪 本 正 勝<br>高 木 俊 朗, 松 木 昭 一<br>鳥 崎 忠 夫                               |
| TM-14 | 変断面片持梁固有振動数の一計算方法<br>について                      | 1963年 3 月 |   |
| TM-16 | フラッタ試験設備測定部交換ノズルの<br>予備試験                      | 1963年 4 月 |   |
| TM-17 | VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す<br>る一考察            | 1963年 5 月 |   |
| TM-18 | ヘリコプター振動のパワースペクトル<br>解析                        | 1963年 6 月 | 小 野 幸 一   |
| TM-19 | 吹出式超音速風洞による実験データの<br>処理方式について (I)              | 1913年 7 月 | 新 井 忠 原 亘 利   |
| TM-20 | 1m×1m 吹出式超音速風洞における<br>AGARD 標準模型 B の三分力試験      | 1963年 7 月 | 高 木 廣 治, 谷 喬 忠<br>斎 藤 秀 夫, 新 井 宗 四 郎<br>内 藤 和 夫, 飯 田 宗 四 郎<br>北 谷 慶 中 井 治 夫   |
| TM-21 | 国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験<br>(第 I 報)                | 1963年 9 月 |   |
| TM-24 | 円輪と薄肉円筒の回転強度の関係                                | 1963年11月  |   |
| TM-25 | DATATRON 205 用 ALGOL 58 の<br>Procedures ライブラリー | 1964年 1 月 | 高 橋 利之  |
| TM-26 | 吹出式風洞の圧力制御 (フラッタ試験<br>設備の場合)                   | 1964年 1 月 | 橋 爪 宏, 中 井 瑛  |
| TM-28 | 一段式観測ロケットの超音速風洞試験                              | 1964年 1 月 | 谷 原 喬, 原 亘 利<br>柳 盛 三, 外 立 政 隆<br>中 井 英 一, 橋 爪 宏<br>安 藤 泰 勝, 高 木 俊 朗<br>小 橋 安 次 郎, 宮 沢 政 文                            |
| TM-29 | 遷音速フラッタ試験設備の改造および<br>整備試験                      | 1964年 2 月 |   |
| TM-30 | 二段式ロケット飛しょう体の揚力およ<br>び圧力中心推定法                  | 1964年 3 月 |   |
| TM-31 | 亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞に<br>おける試験                     | 1964年 3 月 | 河 崎 俊 夫, 竹 内 理  |
| TM-32 | 遷音速風洞の防音                                       | 1964年 4 月 | 牛 田 健 二, 高 橋 宏<br>榎 並 敬 之, 山 本 稀 義  |
| TM-33 | 非定常境界層の遷移の研究に使用され<br>た定温度型熱線風速計について            | 1964年 4 月 |   |
| TM-34 | 極超音速風洞ノズルの境界層補正につ<br>いて                        | 1964年 5 月 | 長 洲 秀 夫   |
| TM-37 | 気体の不完全性を考慮した極超音速風<br>洞ノズルの設計計算法                | 1964年 6 月 | 毛 利 浩   |
| TM-38 | AGARD-A 標準模型の超音速三分力<br>試験                      | 1964年 6 月 | 高 木 廣 治, 斎 藤 秀 夫<br>石 原 久 藏   |
| TM-39 | 相似極超音速流におかれた半球面上の<br>境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の<br>結合影響  | 1964年 7 月 | 石 井 孝 雄   |
| TM-40 | 国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験<br>(I)                    | 1964年 8 月 | 竹 内 和 之, 川 島 矩 郎  |
| TM-41 | 抵抗線歪ゲージのゲージ率測定                                 | 1964年10月  | 田 畑 浄 治, 大 坪 孔 治<br>滝 沢 実 次   |
| TM-42 | 実在着氷条件の測定について                                  | 1964年10月  | 古 関 昌 次, 田 寺 木 一<br>泉 日出 夫  |
| TM-44 | 高負荷燃焼器 (アニュラ模型) の実験<br>結果                      | 1964年12月  | 大 塚 貞 吉, 鈴 木 邦 男<br>松 本 宏, 石 井 浅 五 郎<br>広 木 強, 山 中 国 雍<br>竹 内 和 之, 藤 枝 俊 一<br>幸 尾 治 朗, 岡 遠 一                          |
| TM-46 | 翼洞結合金具の疲労特性                                    | 1964年12月  |   |
| TM-47 | ローター後流中のヘリコプター胴体の<br>抵抗について                    | 1965年 1 月 |   |

注：欠番は配布先を限定したもの

# 極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験\*

平木 一\*\*・林 二識\*\*\*・橋本 登\*\*  
吉永 崇\*\*・山口富夫\*\*\*\*

## 1. ま え が き

極超音速風洞では、ノズルにおいて気流が断熱的に膨張して加速するために、測定部では空気温度が著しく低下し、空気が液化するおそれがあるので、あらかじめノズルに入る空気のよどみ温度を上げておかねばならない<sup>1)</sup>。空気を加熱するには種々の方法があるが、間けつ式の極超音速風洞では、しばしば蓄熱式の熱交換器が使用される。当所に現在建設中の極超音速風洞では、測定部気流のマッハ数は5ないし11を目標としているので、集合筒の空気のよどみ温度は1,000°C程度に加熱しなくてはならない<sup>2)</sup>。この程度の温度になると、燃焼式の熱交換器や金属蓄熱式熱交換器は使用できないので、この風洞では蓄熱材料として球状アルミナのペブルを使用し、これを円筒状の加熱器に充填し、高温燃焼ガスで予熱したものに空気を送り、空気を加熱する計画である。このような規模の風洞設備は、わが国では最初のもので、その設計に際しては、種々の難問題が予想される。とくに加熱器には高温のもとで高圧が作用し、また、ペブルおよび流体の過渡温度特性、ペブルおよび断熱材の耐久力、断熱材の熱絶縁効果、さらに、大流量のもとでのペブルの浮き上り特性についても詳細が不明である等、性能的にも構造的にも多くの問題点があるので、縮尺模型により予備実験を行ない、これらの諸点を実験的に検討して設計の資料をうることにした。また、ペブルと流体間の熱伝達係数については、従来から種々の実験式が用いられているので<sup>3),4),5)</sup>、実験結果をこれらと比較した。さらに、ペブル加熱器の加熱特性、放熱特性については、Dabora<sup>6)</sup>、林<sup>7)</sup>等の解析があり、圧力損失とペブルの浮き上りについては、Bloom<sup>8)</sup>、Randall<sup>9)</sup>等の研究があるので、実験結果をこれらと比較検討した。

## 2. 模 型

模型加熱器の大きさと試験圧力は、使用できる空気源設備、経費等を考慮して、大きさは直径で

\* 昭和39年9月14日受付

\*\* 空気力学第一部

\*\*\* NASA Ames Research Center (航空宇宙技術研究所空気力学第一部)

\*\*\*\* 三菱重工業㈱神戸研究所

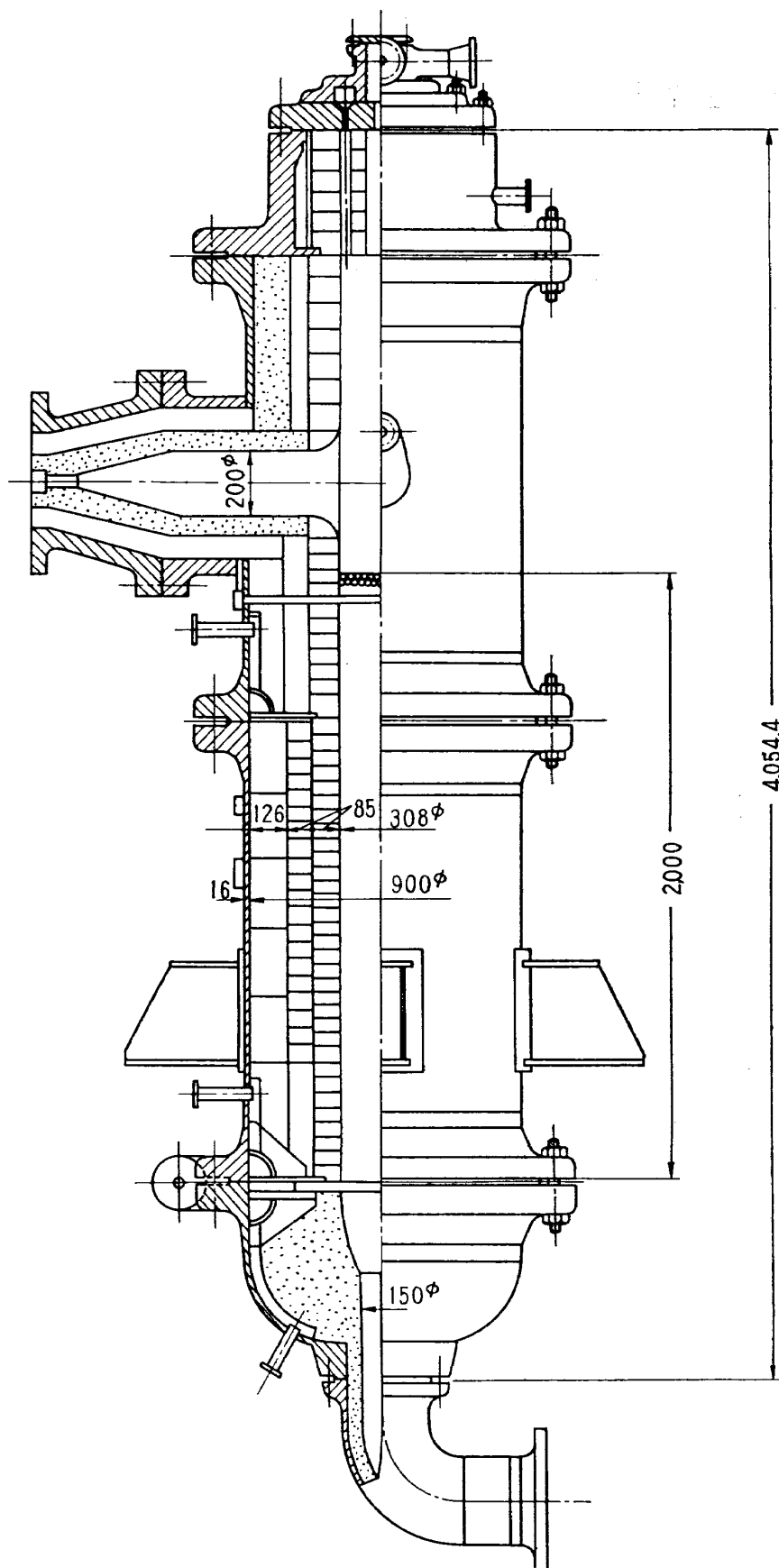


図 1 模型加熱器の構造

実物加熱器の約 1/5 程度，試験圧力は最高  $30\text{ kg/cm}^2\text{G}$  とした。すなわち，模型の諸元を実物と比較して示すとつぎのようになる。

|          | (模 型)   | (実 物)  |
|----------|---|--|
| ペブル充填部直径 | 308 mm  | 1,600 mm*  |
| ペブル充填部高さ | 2,000 mm  | 2,050 mm*  |
| 充填ペブル重量  | 約 320 kg  | 約 8,000 kg   |
| 断熱材の厚さ   | 296 mm  | 343 mm*  |
| 加熱筒設計圧力  | $30\text{ kg/cm}^2\text{G}$   | $133\text{ kg/cm}^2\text{G}$   |
| 耐圧試験圧力   | $45\text{ kg/cm}^2\text{G}$   | $200\text{ kg/cm}^2\text{G}$   |
| 最高加熱温度   | $1,200^\circ\text{C}$   | $1,200^\circ\text{C}$  |
| 加熱用ガス    | プロパン燃焼ガス  | プロパン燃焼ガス   |
| 計画空気流量   | $0.92\text{ kg/s}$  | $23\text{ kg/s}$   |
| 持続時間     | 150 s   | 50~150 s   |
| ペブル      | 球状アルミナ<br>$\left\{ \begin{array}{l} 3/8\text{ インチ} \\ 1/2\text{ インチ} \\ 3/8\text{ インチ}+3/4\text{ インチ} \\ (1.5\text{ m}) \quad (0.5\text{ m}) \end{array} \right.$ | 球状アルミナ<br>$\left\{ \begin{array}{l} 3/8\text{ インチ}+1\text{ インチ} \\ (1.65\text{ m}) \quad (0.4\text{ m}) \end{array} \right.$ |

\* 計画の当初においてはペブル充填部直径 1,400 mm，高さ 3,700 mm，断熱材厚さ 443 mm としたが，本実験の結果を取り入れて上記のとおり変更した。

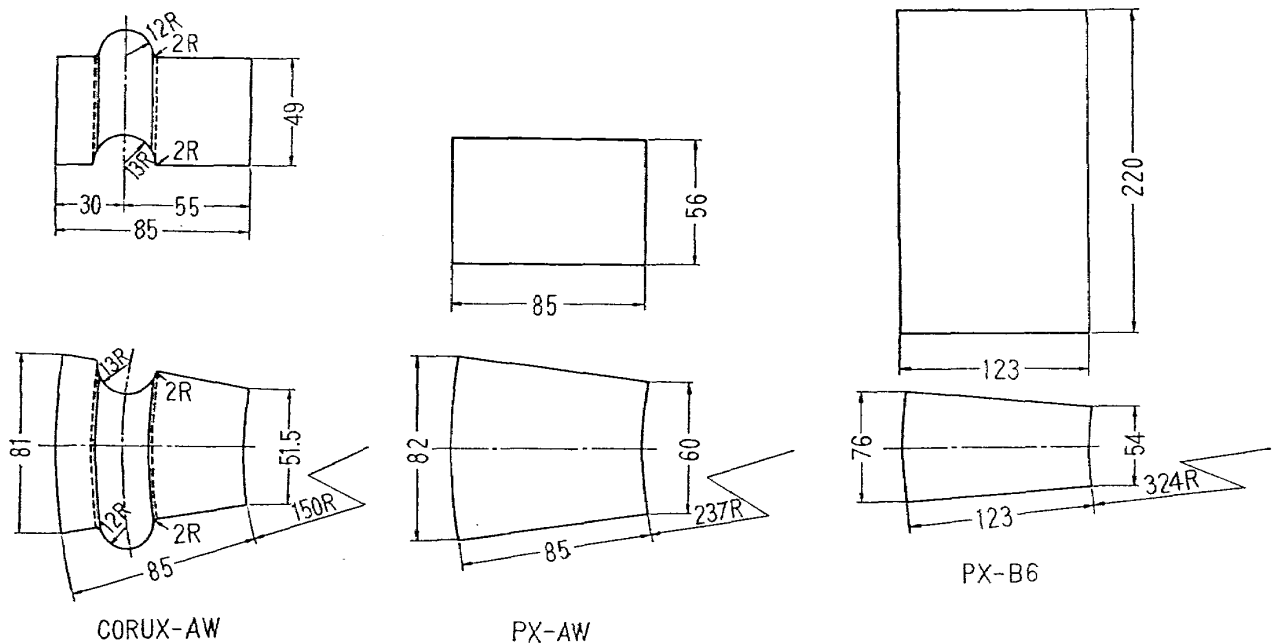


図 2 各層レンガの例

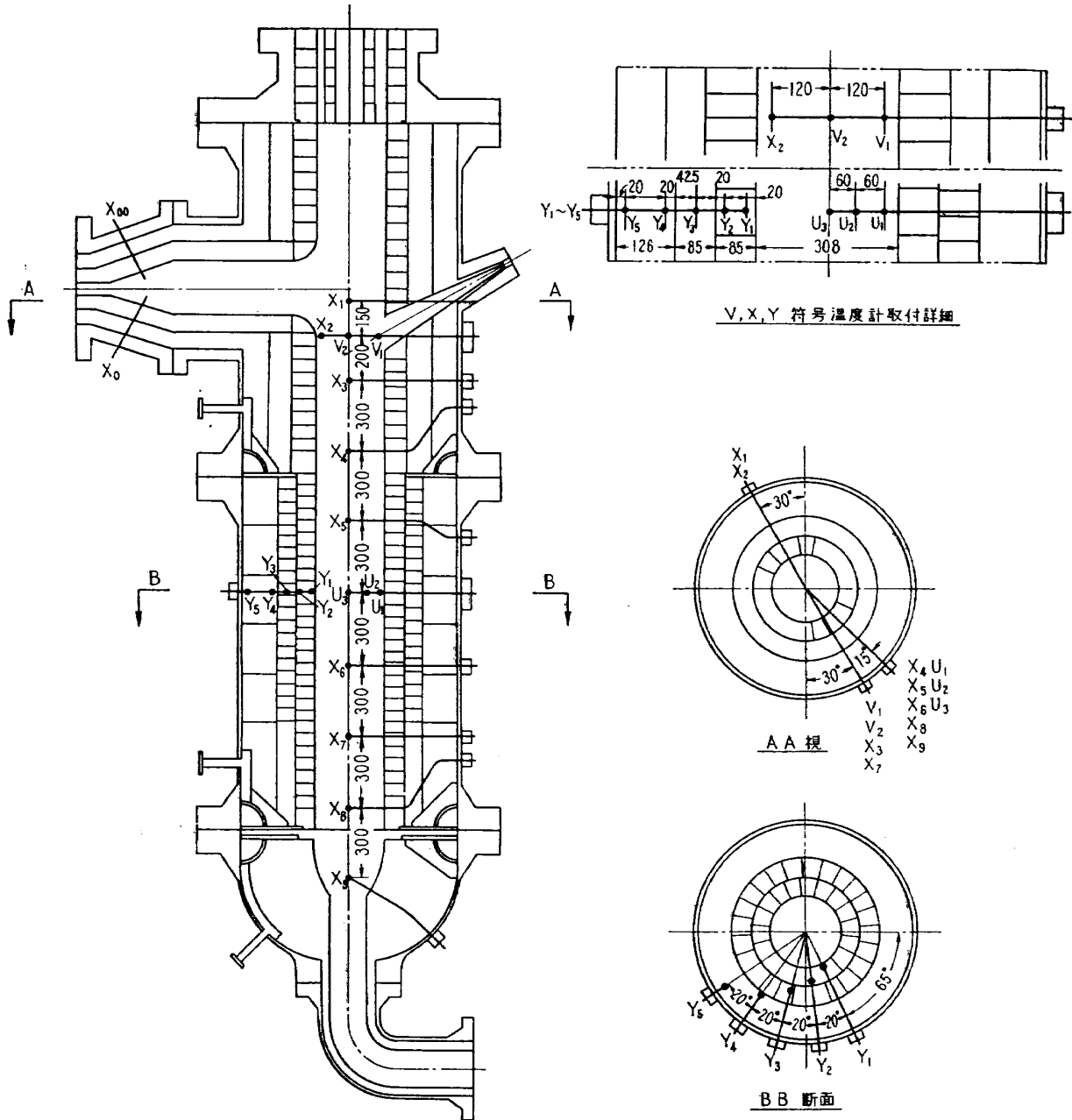


図 3 熱電対取付位置

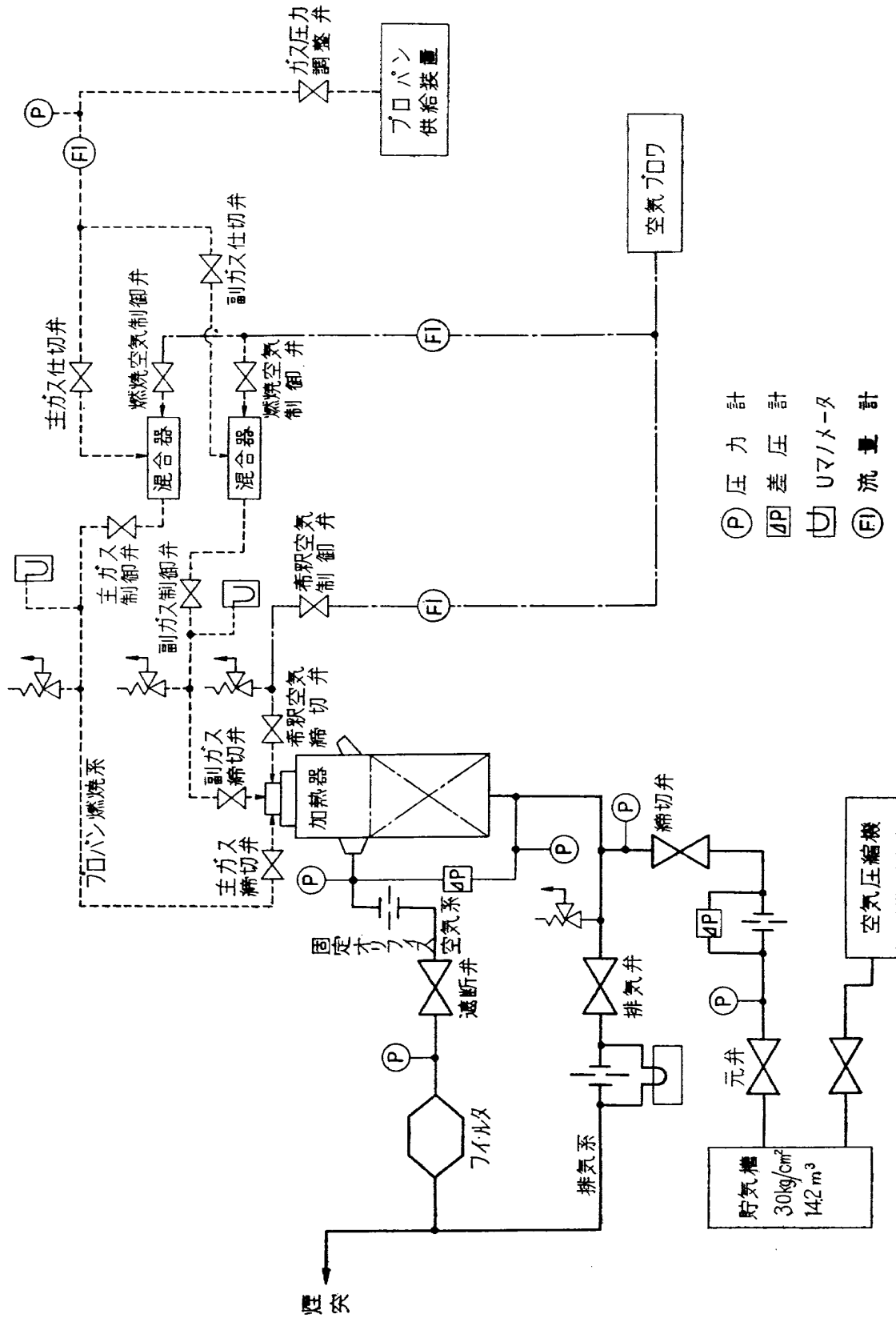


図 4 実験装置の系統

表 1 供 試 ペ ブ ル

| 実験区分 | 製造者 × 呼び径 × 充填高さ                                |
|------|---|
| 1    | ALCOA × 3/8インチ × 2m                             |
| 2    | ALCOA × 1/2インチ × 2m                             |
| 3    | Norton × 3/8インチ × 1.5m + Norton × 3/4インチ × 0.5m |
| 4    | Remmey × 3/8インチ × 1.5m + Norton × 3/4インチ × 0.5m |
| 5    | ALCOA × 3/8インチ × 2m                             |

模型加熱器は図1に示すように、ポイラー用鋼板製の容器中に、断熱材として約300mmの厚さに3層のレンガとその外側にアスベストの断熱板を置いた構造で、上部および下部には断熱材としてキャストブルを用いた。断熱材には大阪窯業耐火煉瓦(株)製レンガCORUX-AW, PX-AW およびPX-B6; ならびにキャストブルC35Sを用いたが、内側の一部に、旭硝子製レンガ コルハートホワイト-R9を用い、耐久力の比較を行なった。図2は各層レンガの形状の例である。実験に用いたペブルは、いずれも球状アルミナで、直径3/8インチ、1/2インチおよび3/4インチ; ALC OA 社、Norton 社および Remmey 社のものである。実験は表1に示すような状態について行なった。なお、模型には、外板、レンガ、ペブルおよび空気の温度を測定するための熱電対、ペブルの上面を観察するためののぞき窓をつけた。図3は熱電対取付位置を示したものである。

### 3. 実 験 装 置

実験装置の系統は、図4に示すように、模型加熱器のペブルに蓄熱するためのプロパン燃焼系と、燃焼ガスを煙突に導く排気系および蓄熱したペブルに空気を送りペブルの放熱状況を調べるための空気系よりなる。蓄熱時には、空気系は締切弁と遮断弁で切り離され、放熱時には、プロパン燃焼系は2個のガス締切弁と希釈空気締切弁により切り離され、排気系は排気弁により切り離される。

プロパン燃焼系は、プロパン燃焼器と、プロパン容器からガス圧力調整弁、ガス仕切弁、混合器ガス制御弁、ガス締切弁を経て燃焼器に至る配管と、空気ブロワから燃焼空気制御弁を経て混合器に至る空気配管と希釈空気制御弁および希釈空気締切弁を経て燃焼器に至る空気配管よりなる。燃焼器は、燃焼用空気をあらかじめプロパンガスに混合し燃焼させる形式の高速度ガスバーナで、パイロットバーナを有し、主バーナをとりまく6個の孔より希釈空気を導入して燃焼ガスの温度を600°Cないし1,200°Cに調節する。図5は燃焼器の構造を示したもので、燃焼器のガス燃焼量は最大 $17 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ である。空気ブロワは5.5kWターボブロワで、2,000mmH<sub>2</sub>Oの風圧で14.5m<sup>3</sup>/minの空気を送ることができる。

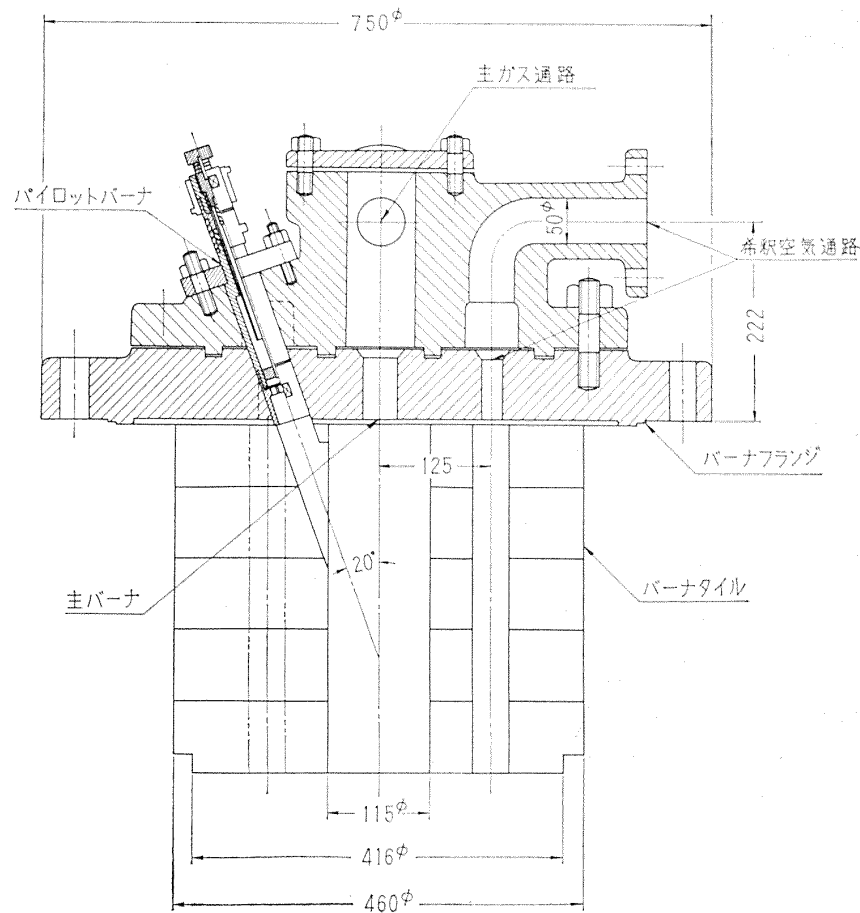


図 5 燃 焼 器 の 構 造

排気系は、加熱器下部配管に接続する排気弁から煙突に至る排気ガス配管で、直管部にオリフィスを置いて、排気ガスの流量の測定ができるようになっている。

空気系は、圧力 30 kg/cm<sup>2</sup>G、容積 14.2 m<sup>3</sup> の貯気槽から元弁および締切弁を経て模型加熱器に至る高圧空気配管と、模型加熱器から固定オリフィスおよび遮断弁を経て煙突に至る空気配管よりなり、遮断弁下流に、ダストの発生状況を調べるためのフィルタを置く。固定オリフィスは実物の風洞のノズルスロートに相当し、同一圧力で空気流量を一定に保つもので、水で冷却され、その内径は 16.9 mm, 20.0 mm, 22.9 mm, 26.8 mm の 4 種を用いた。これ

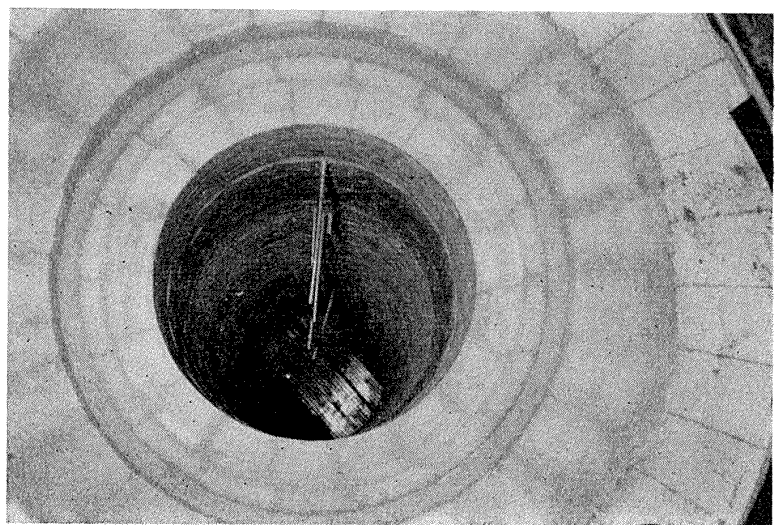


図 6 加熱器内部熱電対取付状況



図 7 断熱材内部熱電対取付状況

は、内圧  $24\text{ kg/cm}^2$  の場合、加熱器の空気流量  $0.5\text{ kg/s}$ ,  $0.7\text{ kg/s}$ ,  $0.92\text{ kg/s}$ ,  $1.25\text{ kg/s}$  にほぼ相当するものである。加熱器内の空気圧力の調節、すなわち空気流量の調節は締切弁で手動で行なった。

空気系の圧力はブルドン管式圧力計および抵抗線ひずみ計式圧力変換器と記録計で、空気系と排気系の流量はオリフィスと差圧計で、プロパンガス、燃焼空気、希釈空気の流量はロータメータで、各部の温度と空気温度は熱電対と自動平衡型電子管式記録計で測定した。熱電対は直径  $1.6\text{ mm}$  ( $X_1, Y_1 \sim Y_5$ ) および  $6.4\text{ mm}$  ( $X_2 \sim X_9, U, V$ ) の管に収めたクロメル・アルメル熱電対(図3の  $X_1$  のみは白金・白金ロジウム熱電対)で、図6に模型加熱器の内部に熱電対を取り付けたところを、図7に断熱材の内部に熱電対を取り付けたところを示す。また、 $X_{00}$  は最初  $3.2\text{ mm}$  のもの

を使用した。後に  $1.6\text{ mm}$  の熱電対に交換した。ペブル充填層およびレンガの温度測定用熱電対の導管はペブルおよびレンガの熱膨脹によりたわむ恐れがあったので、レンガにあける孔を楕円形にして、力の掛かるのを防いだ。この場合、高温ガスが浸入して外板に当たることが懸念されたが、実験の結果、このようなことはないことが明らかになった。また、外板の温度は12か所にはり付けた熱電対と電子管式記録計で測定した。

#### 4. 実験の経過

実験の目的は、一つはペブル加熱器の蓄熱放熱特性、圧力損失、ペブルの浮き上り断熱材の熱絶縁効果等を調べることであるが、いま一つの目的は各社製のペブルの耐熱衝撃特性の比較、レンガ、キャストブル等断熱材の耐久力等の確認を行なって、実物風胴の計画の資料とすることである。しかし、あとの目的は、前の目的の実験の過程で、ペブル、断熱材を検査することである程度達成できるので、付表のようなスケジュールで1963年に実験を行なった。7月以前の実験では、固定オリフィスは遮断弁の下流にあって、放熱の際はあらかじめ遮断弁を開いておいて、締切弁をあとから開いて加熱器内の圧力を所定の値に調節したが、この場合は、過渡的に大流量の空気がペブル層を通るので、ペブルの浮き上りを生じやすい。9月以後の実験は、遮断弁を閉めたまま、締切弁をわずかに開いて加熱器内の空気圧力を所定の値に予圧してから遮断弁を開き、さらに締切弁で圧力一定になるように調節する方式に改めた。この場合、出口管が赤熱するのを防ぐため、固定オリフィ

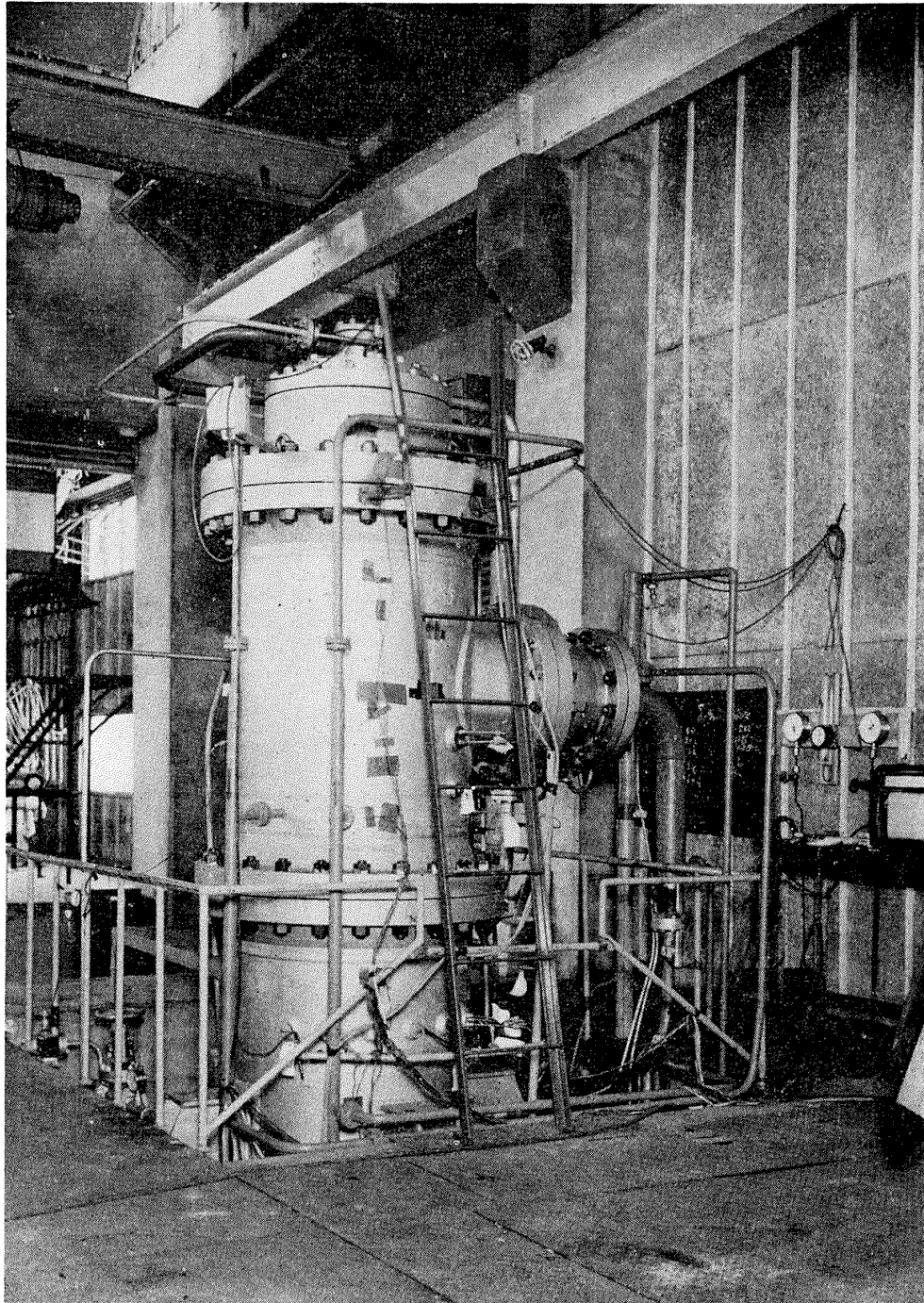


図 8a 模型加熱器外観（改造前）

スを遮断弁の上流に移し，その下流の管を太くした。図 8a に改造前，図 8b に改造後の模型加熱器の外観を示す。図 9 は模型加熱器の下部にペブルが充填されたところである。供試ペブルは 5 種で，その外観を図 10 に示す。

## 5. 実験結果

### 5.1. 燃焼系の測定結果

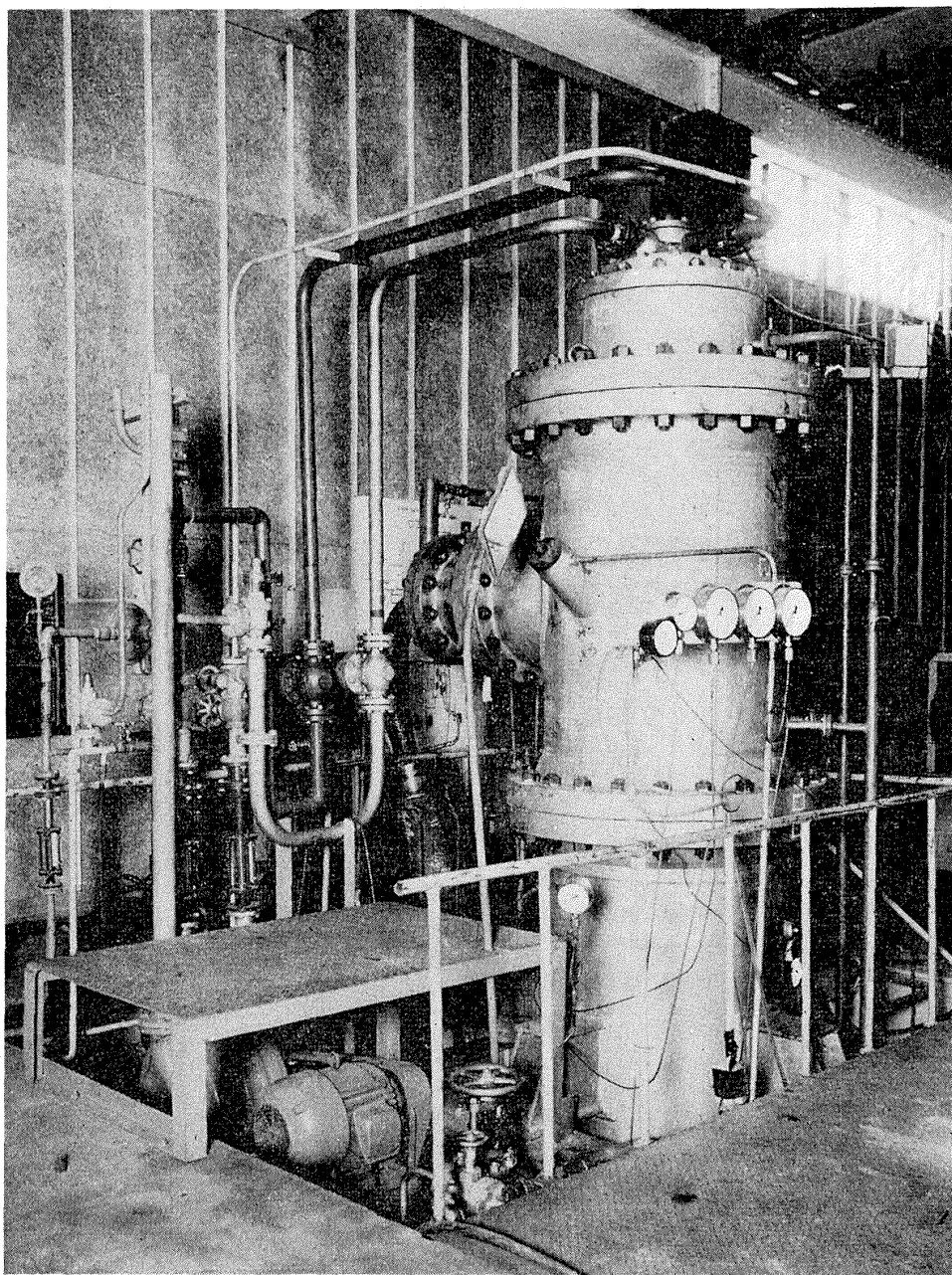


図 8b 模型加熱器外観(改造後)

加熱器中のペブルは，プロパンガスを燃焼させた燃焼ガスによって加熱されるが，プロパンを理論空気量で完全燃焼させた燃焼ガスの温度は約  $1,900^{\circ}\text{C}$  であるから，これに希釈用空気を加え，所定加熱温度 ( $600^{\circ}\text{C}$  ないし  $1,200^{\circ}\text{C}$ ) にしなければならない。燃焼試験は，燃焼ガス流量  $0.05\text{ kg/s}$  ないし  $0.1\text{ kg/s}$ ，燃焼ガス温度  $600^{\circ}\text{C}$  ないし  $1,200^{\circ}\text{C}$  で行なったが，図11に，燃焼ガス温度に対する，空気流量  $W_{\text{air}}\text{ kg/s}$  とプロパンガス流量  $W_{\text{C}_3\text{H}_8}\text{ kg/s}$  の比を示す。結果によれば， $800^{\circ}\text{C}$  以上では，実験値は計算値(図に実線で示す)と大体一致するが，低い温度では著しい相違があり， $600^{\circ}\text{C}$  では実験値は計算値の1.5倍程度になる。これは， $600^{\circ}\text{C}$  付近ではプロパンガス流量が小さ

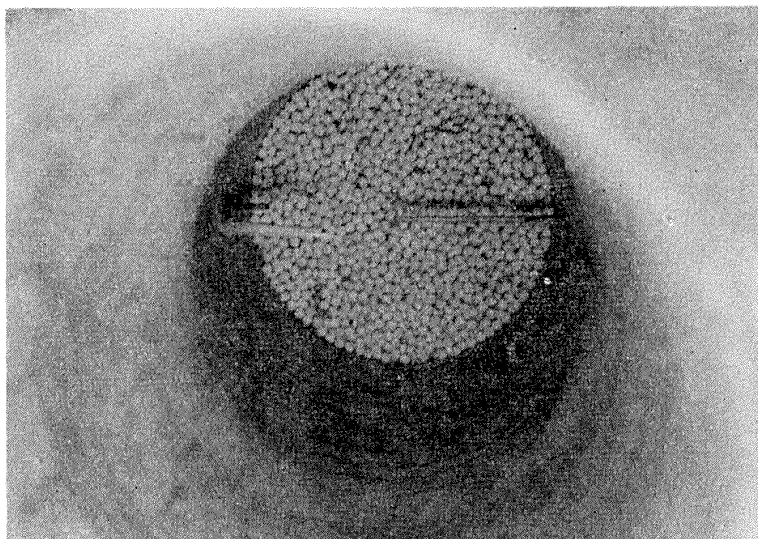


図 9 加熱器内に充填されたペブル

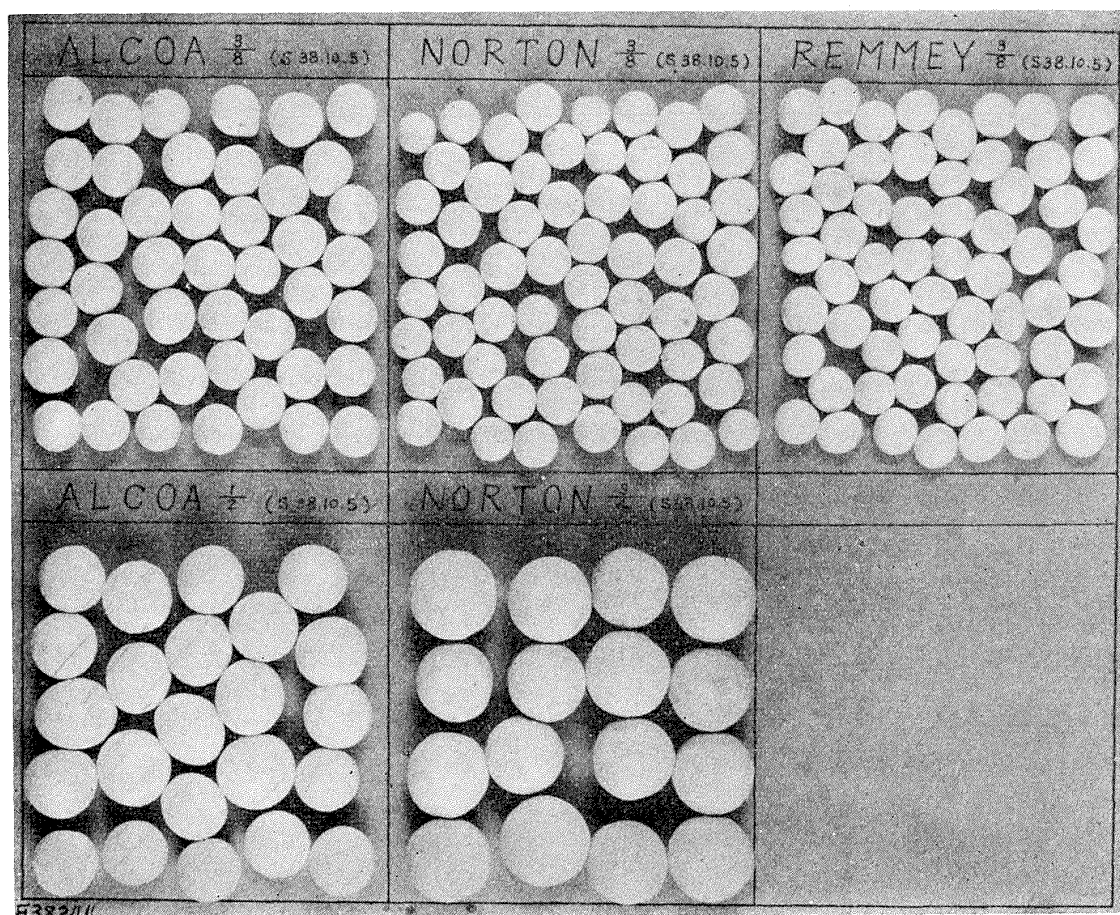


図 10 供試ペブル外観

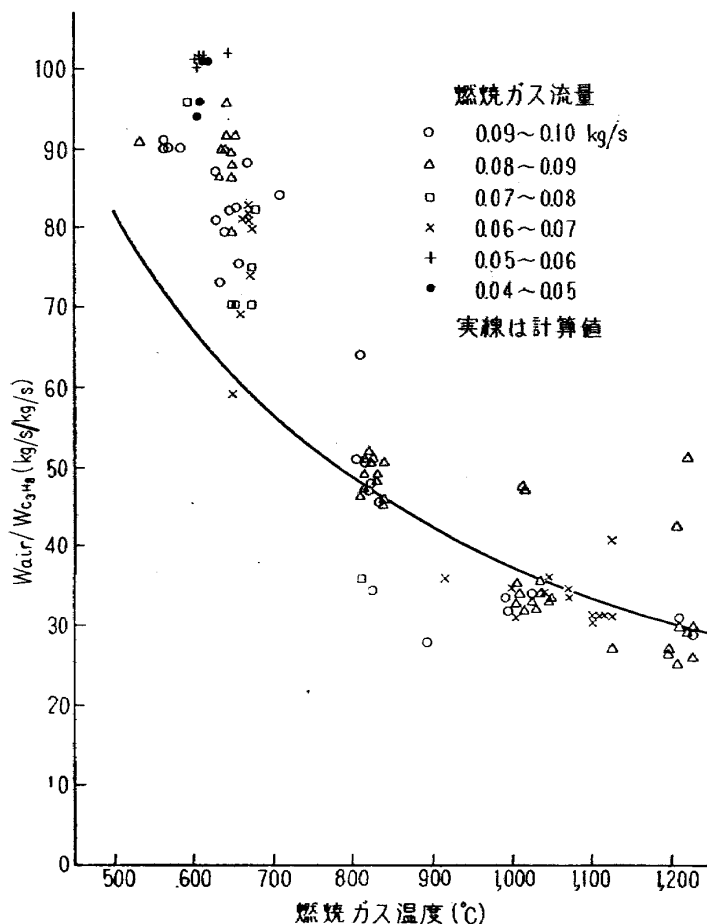


図 11 燃焼ガス温度に対する空気とプロパンの流量の比率

く、流量の計測精度が低下したことにも一因があると思われるが、燃焼器の構造上、希釈空気は周囲から混合するため、半径方向に燃焼ガスの温度勾配を生じたにもかかわらず温度の検出を中心軸上で行なったためと考えられる。燃焼ガス温度の測定点は  $X_1$  で、その持続状況の一例を図12に示す。

## 5.2. ペブルの加熱特性

1/2 インチペブルについての加熱特性の例を、燃焼ガス温度 605°C ないし 650°C の場合および 1,045°C ないし 1,070°C の場合について図13および図14に示す。Dabora<sup>6)</sup> によれば、最初ペブルが一様温度で、流体の入口温度が一定のとき、周辺からの熱放散を考慮し、側熱体の熱容量および空気とペブルの熱容量比の影響を十分小さいとして省略した場合には、ペブルの過渡温度特性は

$$\delta = e^{-\alpha \xi} \int_0^{\eta} e^{-(\xi+\eta)} I_0(2\sqrt{\xi\eta}) d\eta$$

で表わされる。ただし

$$\delta = (t - t_s) / (T_i - t_s)$$

$$\xi = shx / Gc_p \quad \text{無次元距離}$$

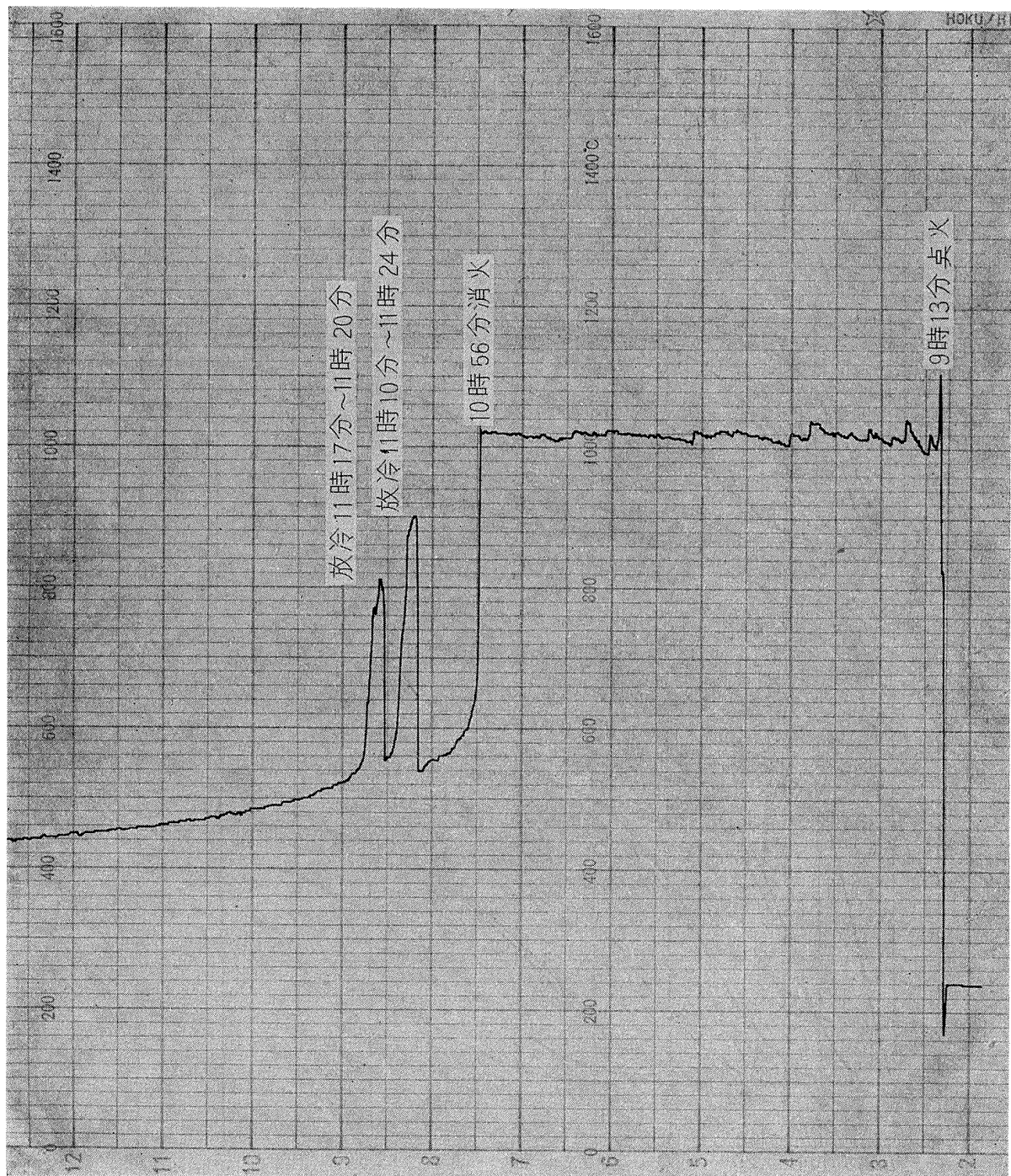


図 12 燃 焼 ガ ス 温 度 実 測 例

$$\eta = sh \tau / c \quad \text{無次元時間}$$

$$\alpha = s_0 U_0 / sh \quad \text{無次元熱伝達比}$$

$$t \quad \text{ペブル温度} \quad ^\circ\text{C}$$

$$t_s \quad \text{周辺温度} \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_i \quad \text{流体の入口温度} \quad ^\circ\text{C}$$

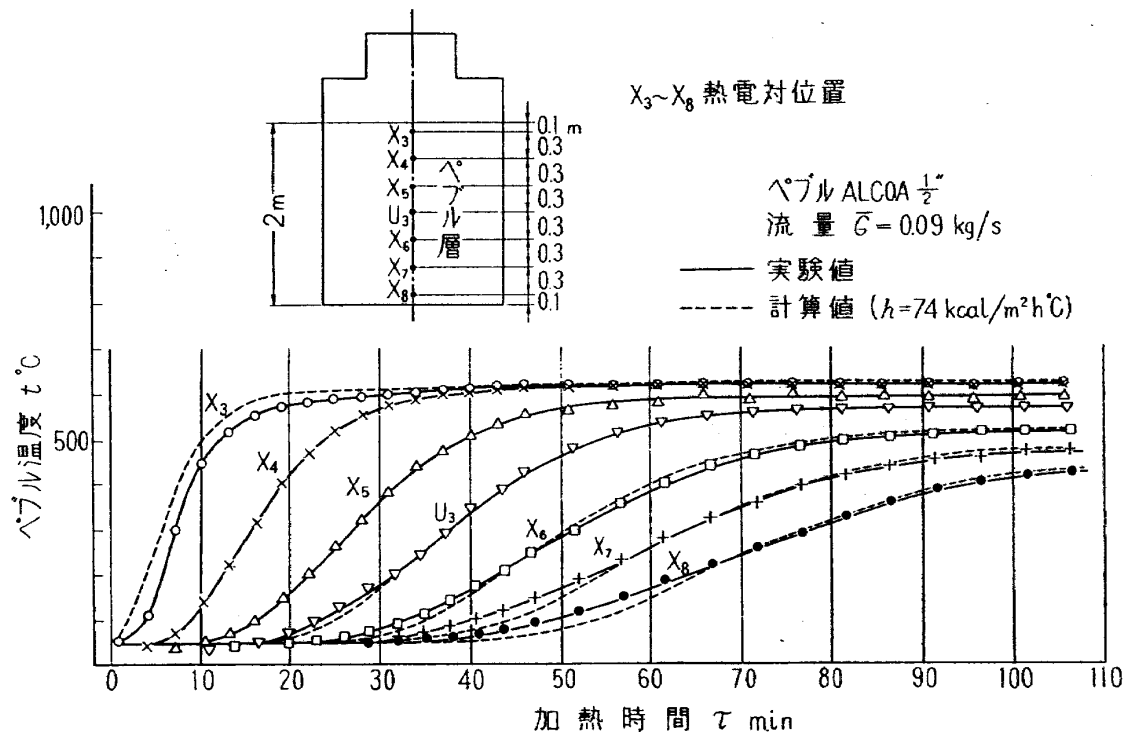


図 13 ペブルの加熱過渡温度分布 (その1)

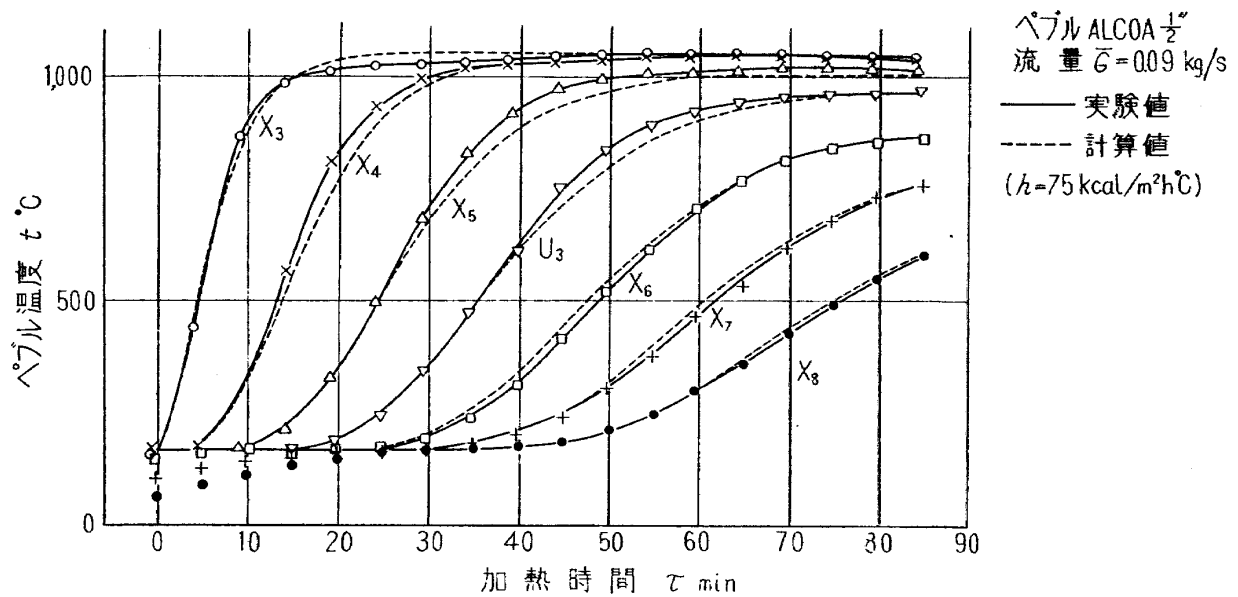


図 14 ペブルの加熱過渡温度分布 (その2)

|       |                  |  |
|-------|------------------|--|
| $s$   | 単位体積当りのペブル熱伝達表面積 | $\text{m}^2/\text{m}^3$                          |
| $s_0$ | 単位体積当りの加熱器熱損失表面積 | $\text{m}^2/\text{m}^3$                          |
| $h$   | 流体とペブルの間の熱伝達係数   | $\text{kcal}/\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C}$ |
| $U_0$ | 周辺熱通過率(注)        | $\text{kcal}/\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C}$ |

|        |                       |                        |
|--------|-----------------------|------------------------|
| $x$    | 加熱器の軸に沿い流れの向きの距離      | m                      |
| $\tau$ | 時間                    | s                      |
| $G$    | 単位面積当りの流量             | kg/m <sup>2</sup> s    |
| $c_p$  | 流体の定圧比熱               | kcal/kg°C              |
| $c$    | 単位体積当りのペブルの熱容量        | kcal/m <sup>3</sup> °C |
| $I_0$  | 0 次の第 1 種変形 Bessel 関数 |                        |

である。また、

|                |                   |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|
| $\bar{S} = sS$ | 単位長さ当りのペブルの熱伝達表面積 | m <sup>2</sup> /m |
| $S$            | 加熱器断面積            | m <sup>2</sup>    |
| $\bar{G} = GS$ | 流量                | kg/s              |
| $\bar{W}$      | 単位長さ当りのペブルの重さ     | kg/m              |
| $\bar{c}$      | ペブルの比熱            | kcal/kg°C         |

とすると

$$\xi = \frac{shx}{Gc_p} = \frac{h\bar{S}}{\bar{G}c_p}x$$

$$\eta = \frac{sh\tau}{c} = \frac{h\bar{S}}{\bar{W}\bar{c}}\tau$$

となる。これらの値を試算して、計算値と実験値との適合性を調べてみると、図13および図14の場合については、それぞれ  $\xi=15.8x$ ,  $\eta=0.00717\tau$  および  $\xi=16.0x$ ,  $\eta=0.00729\tau$  に対して両者はよく一致することがわかる。これから、 $\bar{S}=18.1\text{m}$ ,  $\bar{G}=0.09\text{kg/s}$ ,  $c_p=0.26\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$  を用いて、流体とペブルの間の熱伝達係数  $h$  として  $74\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  および  $75\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  を得る。この  $h$  を用いて  $\bar{c}=0.28\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$  として  $\bar{W}$  を逆算すると、みかけの単位長さ当りのペブルの重さはいずれの場合も  $184\text{kg/m}$  となる。これは 1/2 インチペブルの実際の単位長さ当りのペブルの重さ  $165\text{kg/m}$  に比べ約 12% 大きい。これは、一部分は、加熱時の燃焼ガス流量のバラツキ、物性定数のとり方の誤差等にもよるが、大部分は、耐火レンガ、ペブル支持板等の側熱体の熱容量の影響と考えられる。参考として、表 2 に、供試ペブルを用いた場合の、ペブル単体と加熱器の諸元を 3/8 インチおよび 1/2 インチペブルについて示す。

(注) ペブルベッドからの周辺熱通過率  $U_0$  は、ほとんど断熱レンガ層の熱伝導率  $k_i$  によって定まり、流体と断熱レンガ壁との熱伝達係数  $h_w$ 、外壁と外気との熱伝達係数  $h_0$  の値にはあまり影響されない。ペブル加熱時については、 $h_w=80\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ,  $h_0=20\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  とし  $k_i$  の値として付表 3 の値を用いると  $U_0=3.6\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  となる。図13の定常温度分布から  $\alpha$  を逆算すると  $\alpha=0.0081$  となり、 $s_0=13\text{m}^3/\text{m}^3$ ,  $s=243\text{m}^3/\text{m}^3$ ,  $h=75\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  より  $U_0=11.4\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  をうる。このように  $U_0$  が大きく異なった値を示すのは、ペブル層内の半径方向の温度分布が仮定のように一様でないからであろう。

表 2 ペブルと模型加熱器の諸元

| 項 目   | 記 号             | 単 位                                | 呼 び 径                  |                       |
|-------|-----------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
|       |                 |                                    | 3/8 インチ                | 1/2 インチ               |
| ペブル単体 | 平均直径            | $d_p$                              | $11.4 \times 10^{-3}$  | $15.1 \times 10^{-3}$ |
|       | 比重              | $\gamma_p$                         | 3690                   | 3630                  |
|       | 平均体積            | $v_p = \frac{\pi d_p^3}{6}$        | $0.775 \times 10^{-6}$ | $1.80 \times 10^{-6}$ |
|       | 平均重量            | $w_p$                              | $2.86 \times 10^{-3}$  | $6.54 \times 10^{-3}$ |
| 模型加熱器 | 充填部直径           | $D$                                | 0.308                  | 0.308                 |
|       | 断面面積            | $S$                                | 0.0744                 | 0.0744                |
|       | ペブル充填高さ         | $l$                                | 2.0                    | 2.0                   |
|       | ペブル空隙率          | $\varepsilon$                      | 0.42                   | 0.39 (0.41)           |
|       | 単位長さ当りのペブル重量    | $\bar{W}$                          | 159                    | 165 (159)             |
|       | 単位体積当りの熱伝達表面積   | $s = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p}$ | 305                    | 242 (234)             |
|       | 単位体積当りの加熱器熱損失面積 | $s_0 = \frac{4}{D}$                | 13.0                   | 13.0                  |

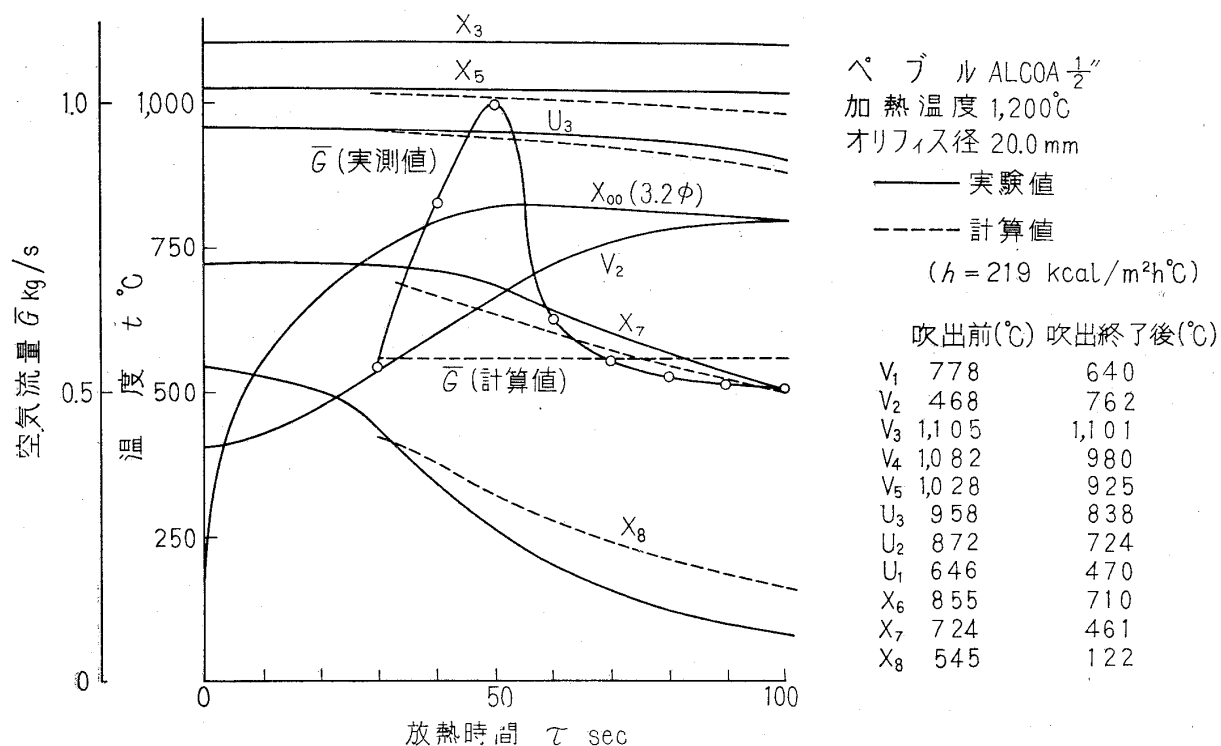


図 15 ペブルの放熱過渡温度分布 (その1)

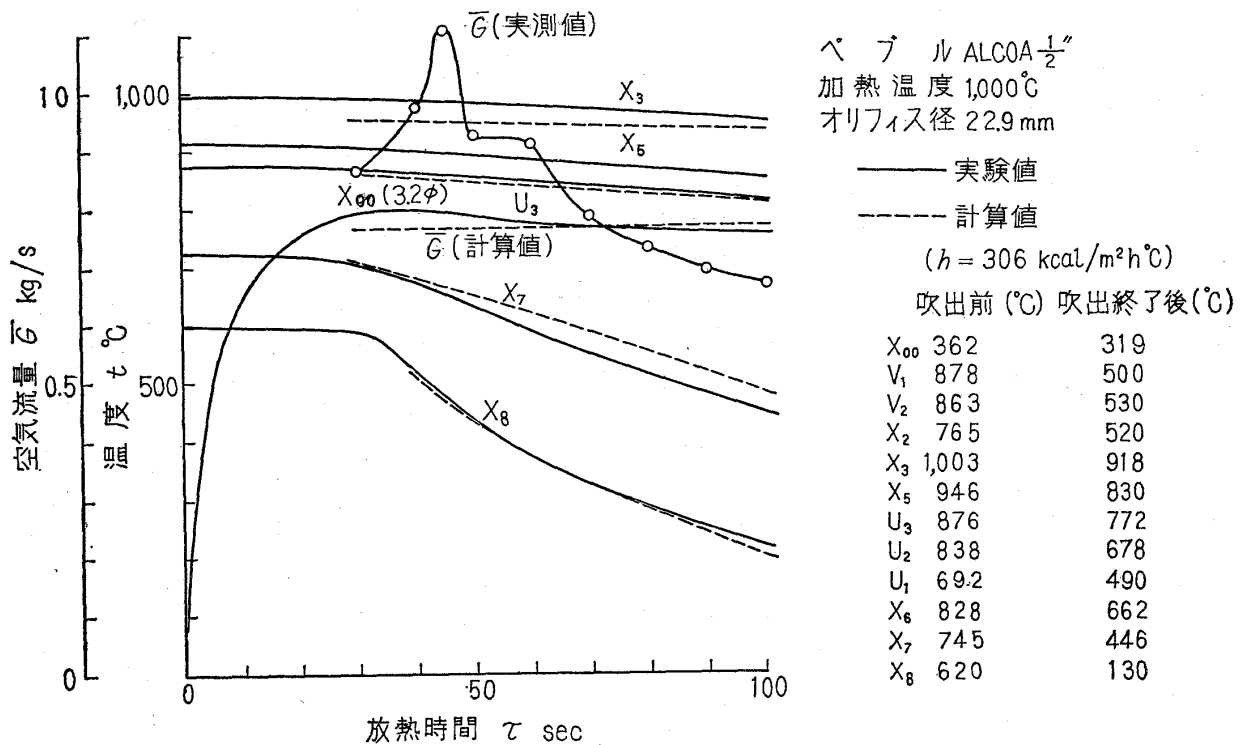


図 16 ペブルの放熱過渡温度分布 (その2)

## 5.3. ペブルの放熱特性

1/2 インチペブルについての放熱特性の測定結果の例を図15ないし図17に示す。ペブルの加熱温度は、それぞれ 1,120°C, 1,000°C, 830°C であるが、加熱終了時には、ペブルは軸方向の温度分布をもっている。林<sup>8)</sup> は最初のペブルの温度分布

$$f(\xi) = \frac{t_0 - t_s}{T_h - t_s}$$

が

$$f = A - Be^{-C\xi}$$

である場合について解析を行なっているので、この初期温度分布をもつペブルの放熱特性を検討する。ここに

$t_0$  初めのペブル温度 °C

$t_s$  周辺温度 °C

$T_h$  加熱流体の入口温度 °C

また、 $A, B, C$  は無次元の定数である。図15, 図16, 図17 の場合は、測定値より近似的にそれぞれ

$$f = 1 - 0.73e^{-1.61x} \quad (\text{図15})$$

$$f = 1 - 0.46e^{-1.18x} \quad (\text{図16})$$

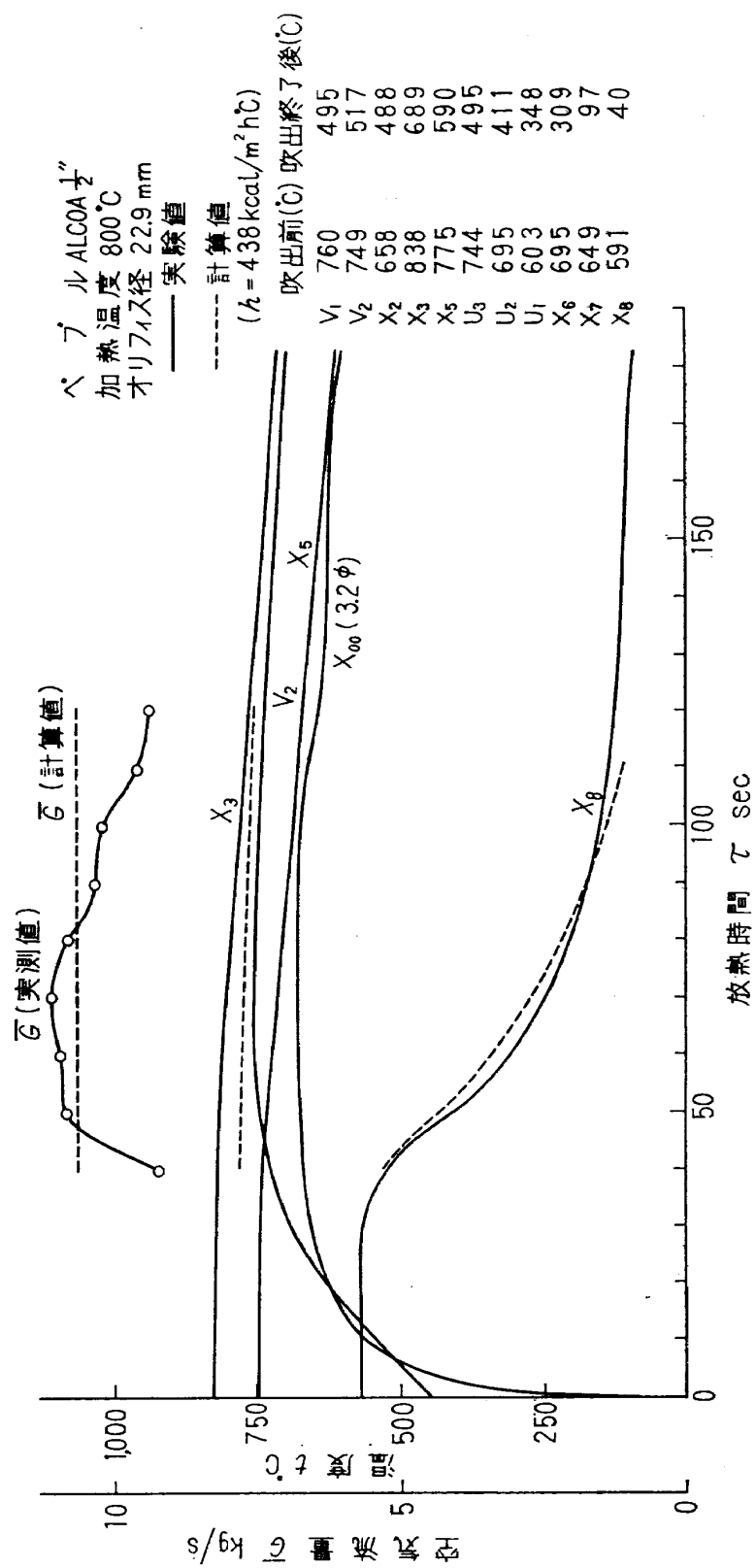


図 17 ベブルの放熱過渡温度分布 (その3)

$$f = 1 - 0.40e^{-0.98x} \quad (\text{図17})$$

で表わされる。この初期温度から放熱した場合のペブルの過渡温度特性は

$$\begin{aligned} \delta = & Ae^{-\tau\eta} - Be^{-(\beta\xi + \gamma_1\eta)} + Ke^{-\beta\xi} \int_0^\eta e^{-\eta} I_0(2\sqrt{\xi\eta}) d\eta \\ & - A(1-\gamma)e^{-(\beta\xi + \gamma\eta)} \int_0^\xi e^{(\gamma-1)\eta} I_0(2\sqrt{\xi\eta}) d\eta \\ & + B(1-\gamma_1)e^{-(\beta\xi + \gamma_1\eta)} \int_0^\eta e^{(\gamma_1-1)\eta} I_0(2\sqrt{\xi\eta}) d\eta \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} K &= \frac{T_i - t_s}{T_h - t_s}, & \beta &= \alpha + 1 \\ \gamma &= \frac{\alpha}{\beta}, & \gamma_1 &= \frac{\alpha - C}{\beta - C} \end{aligned}$$

である。これから、加熱過程と同様に、実験値に合うように  $\xi/x$  および  $\eta/\tau$  を定め、これから熱伝達係数を求める。ただし、この場合には、流量の調節を手動で行なったため、流量は相当変動しているので、加熱過程で求めた見かけの単位長さ当りのペブルの重さ  $184 \text{ kg/m}$  を用い、熱伝達係数  $h$  および空気流量を推算する。図15、図16、図17の場合については、それぞれ

$$\xi = 7.0x, \quad \eta = 0.020\tau \quad (\text{図15})$$

$$\xi = 7.0x, \quad \eta = 0.028\tau \quad (\text{図16})$$

$$\xi = 7.0x, \quad \eta = 0.040\tau \quad (\text{図17})$$

とすればよい。 $\bar{W}=184 \text{ kg/m}$ ,  $\bar{c}=0.28 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ ,  $\bar{S}=18.1 \text{ m}$  を用いて、熱伝達係数  $h$  として、それぞれ

$$219, \quad 306, \quad 438 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

をうる。これから、空気流量  $\bar{G}$  を逆算すると、それぞれ

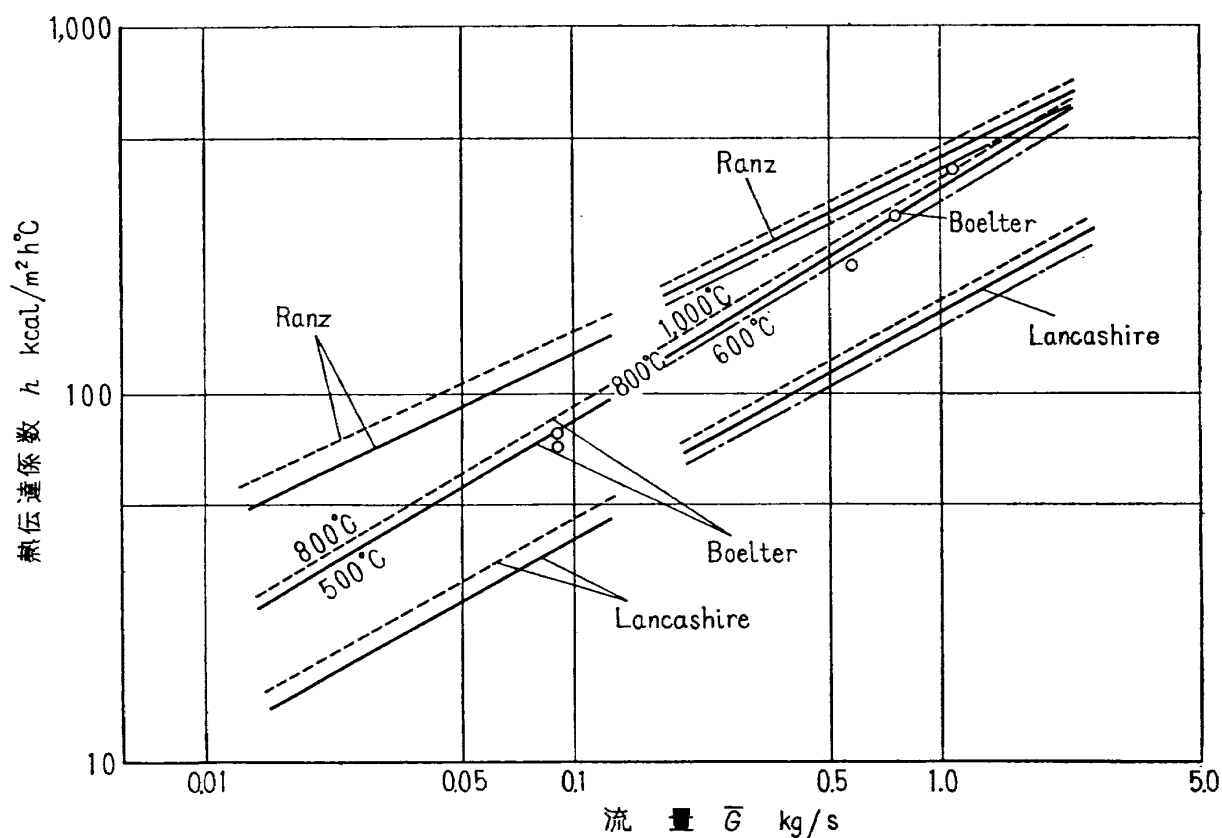
$$0.55, \quad 0.78, \quad 1.10 \text{ kg/s}$$

となる。このようにして求めた空気流量を実測値と比較すると、ほぼ平均流量に近い値となるので、このような計算はおおむね妥当であると考えられる。

図15、図16、図17において、流出空気温度の測定結果は、立上りがゆるやかであるが、これは熱電対の検出遅れによるものと思われる。また、ペブルの加熱温度（加熱器軸上）より、流出空気温度がかなり低い。これは、半径方向のペブル温度分布が一様でないことによると思われる。加熱器内のペブルの熱伝達係数を5.2に得た結果と共に、流量に対してプロットしたのが図18である。ペブルの熱伝達係数の関係式としては

Ranz の式<sup>5)</sup>

$$Nu = 2.0 + 1.8 Pr^{1/3} Re^{1/2} (10 < Pr^{2/3} Re < 10,000)$$



| (燃 焼 ガ ス) |            |                       |                       |
|-----------|------------|-----------------------|-----------------------|
| $t$       | °C         | 500                   | 800                   |
| $k_f$     | kcal/m²h°C | 0.0483                | 0.061                 |
| $c_p$     | kcal/kg°C  | 0.260                 | 0.276                 |
| $\mu$     | kg/ms      | $3.58 \times 10^{-5}$ | $4.36 \times 10^{-5}$ |
| $Pr$      |            | 0.70                  | 0.71                  |

| (空 気) |            |                       |                       |                       |
|-------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $t$   | °C         | 600                   | 900                   | 1,000                 |
| $k_f$ | kcal/m²h°C | 0.0527                | 0.061                 | 0.069                 |
| $c_p$ | kcal/kg°C  | 0.267                 | 0.276                 | 0.285                 |
| $\mu$ | kg/ms      | $3.86 \times 10^{-5}$ | $4.36 \times 10^{-5}$ | $4.83 \times 10^{-5}$ |
| $Pr$  |            | 0.70                  | 0.71                  | 0.72                  |

図 18 ベブルの熱伝達係数

Boelter の式<sup>3)</sup>

$$Nu = 0.33 Re^{0.6} \quad (Re : 20 \sim 150,000)$$

Lancashire 等の式<sup>4)</sup>

$$Nu = 0.40 Pr^{1/3} Re^{0.563}$$

がある。これらも同図に示す。Boelter の式から求めた熱伝達係数は実験値ときわめてよい一致を示している。ここに

$$Nu = \frac{h d_p}{k_f} \quad \text{ヌセルト数}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_f} \quad \text{プラントル数}$$

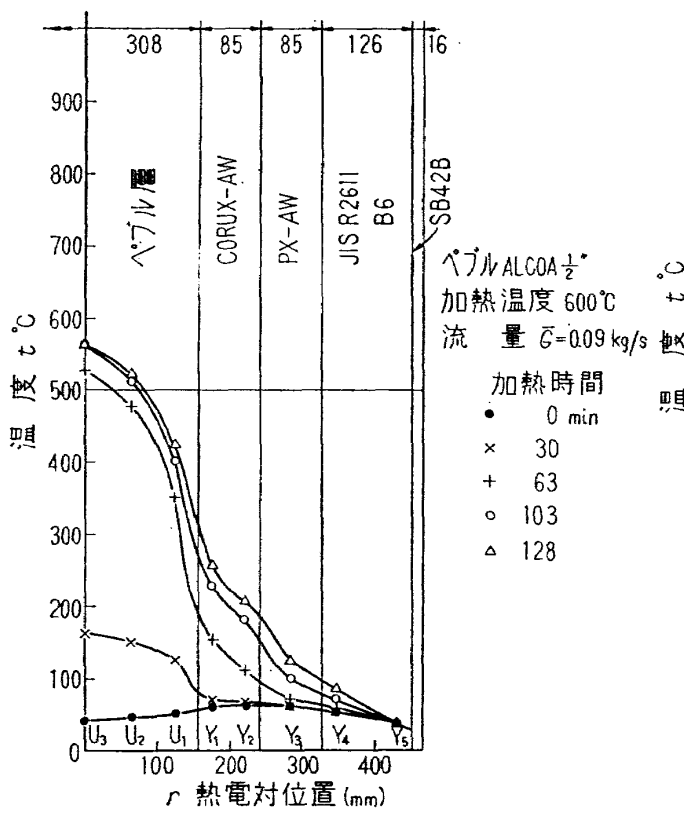


図 19 ペブルおよび断熱材の半径方向温度分布 (その 1)

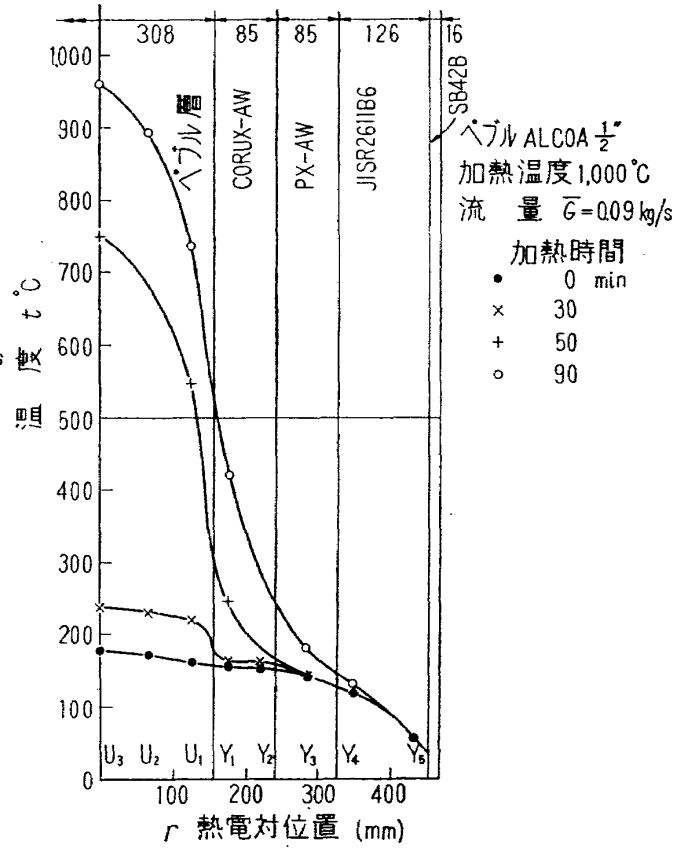


図 20 ペブルおよび断熱材の半径方向温度分布 (その 2)

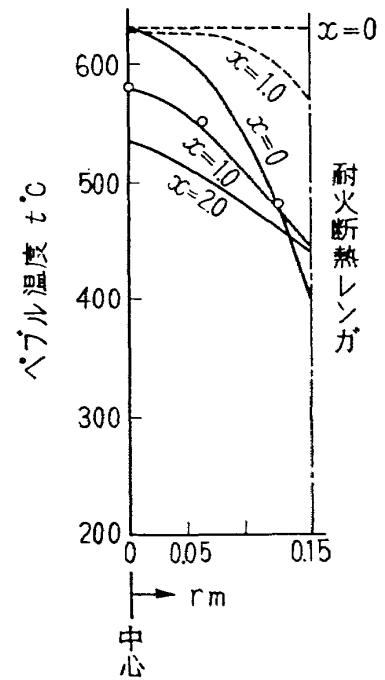
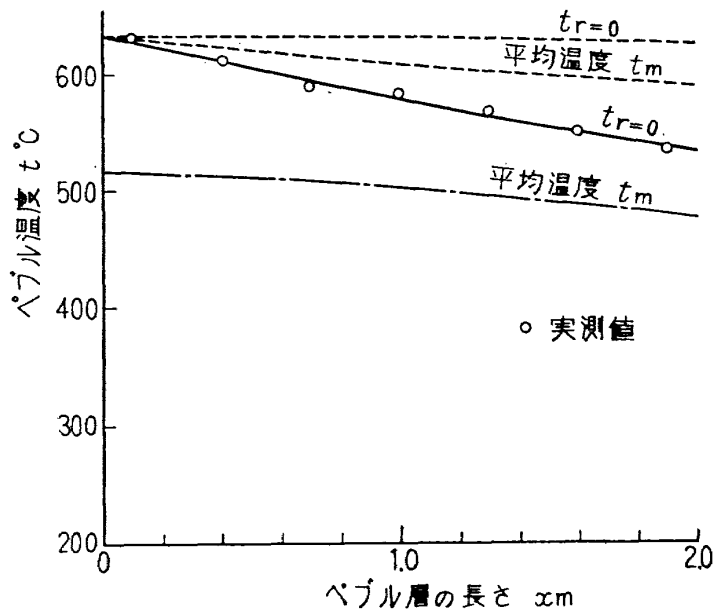


図 21 ペブル層内での温度分布

|                          |           |                         |
|--------------------------|-----------|-------------------------|
| $Re = \frac{G d_p}{\mu}$ | レイノルズ数    |                         |
| $d_p$                    | ペブルの直径    | m                       |
| $k_f$                    | 流体の熱伝導率   | kcal/ms°C               |
| $\mu$                    | 流体の粘性率    | kg/ms                   |
| $h$                      | 熱伝達係数     | kcal/m <sup>2</sup> s°C |
| $G$                      | 単位面積当りの流量 | kg/m <sup>2</sup> s     |

である。

#### 5.4. ペブルおよび断熱材の定常温度分布

ペブル上端から1mの水平面内で測定した、ペブルおよび断熱材の半径方向の温度分布の例を図19および図20に示す。測定結果によれば、半径方向に予期以上のペブル温度の不均一を生じたが、これは加熱器外周からの熱損失によるほかに、バーナの構造に起因する不均一によるものと考えられる。定常状態になったと考えられる加熱中心線上の軸方向温度勾配の測定結果の例を図21に示す。流入ガス温度が一様な場合、すなわち  $f(r)=T_i$  とし、ペブルの有効熱伝導率  $k_p$  を 1.6kcal/h°C と仮定し<sup>\*</sup>、ペブルの軸方向の分布と、ペブル表面および  $x=1m$  の断面における温度分布を求めると図21の破線のようになる。この場合、断熱材の熱伝導率は付表3の値を用いた。このときのペブルの各断面での平均温度は  $t_m$  のようになる。実測した温度勾配はこれに比較しかなり大きい。いま、流入ガス温度を

$$f(r) = 400 + 230 \left\{ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right\}$$

として、 $x=1.0m$  における温度分布を求めてみると、図21に実線で示すようになり、実験値とよく一致する。この場合に各断面の平均温度  $t_{mi}$  を求めて、ペブル層長さ方向の温度勾配を求めてみると図21中に鎖線で示したようになり、その傾きは  $f(r)=T_i$  としたときの断面平均温度の勾配と大体同じになる。

#### 5.5. ペブルの圧力損失とペブルの浮き上り

加熱器内のペブルを流体が通過する際の差圧の測定結果の例を図22～図24に示す。

ペブルの圧力損失については Carman<sup>9)</sup> の実験式があるが、これはつぎのように表わされる：

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dx} &= 2.4 \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{1.1} \left( \frac{\gamma_f V d_p}{6\mu} \right)^{-0.1} \left( \frac{\gamma_f V^2}{g d_p} \right) \\ &= 2.4 \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{1.1} \frac{1}{\varepsilon^2} \left( \frac{G d_p}{6\mu\varepsilon} \right)^{-0.1} \left( \frac{G^2}{g d_p \gamma_f} \right) \end{aligned}$$

この式は  $0.1 < \frac{G d_p}{\mu} < 10,000$  および  $D/d_p > 30$  でなりたつ。ただし

(注) 軸方向温度分布より逆算した値

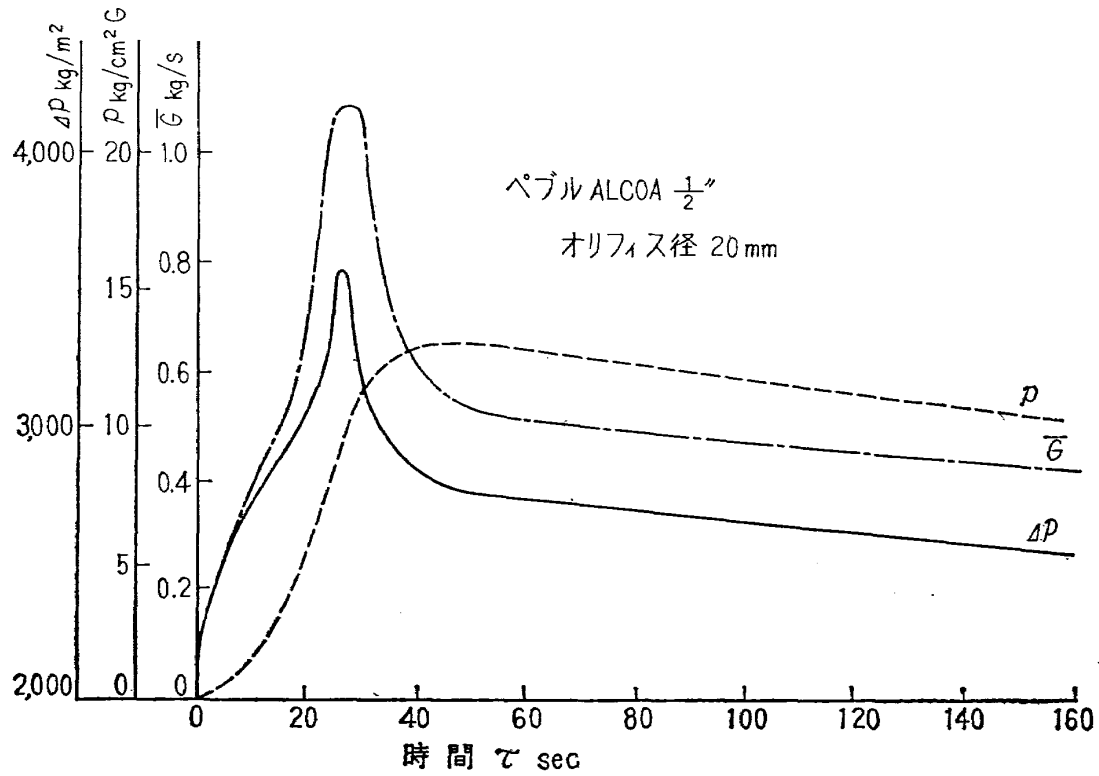


図 22 ペブル加熱器を通過する流量と差圧 (その 1)

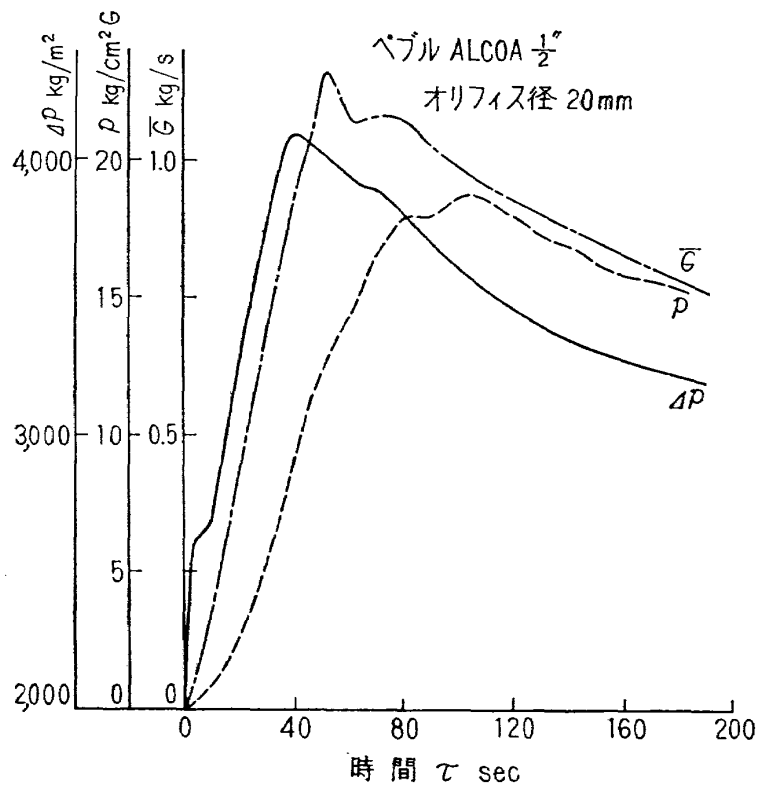


図 23 ペブル加熱器を通過する流量と差圧 (その 2)

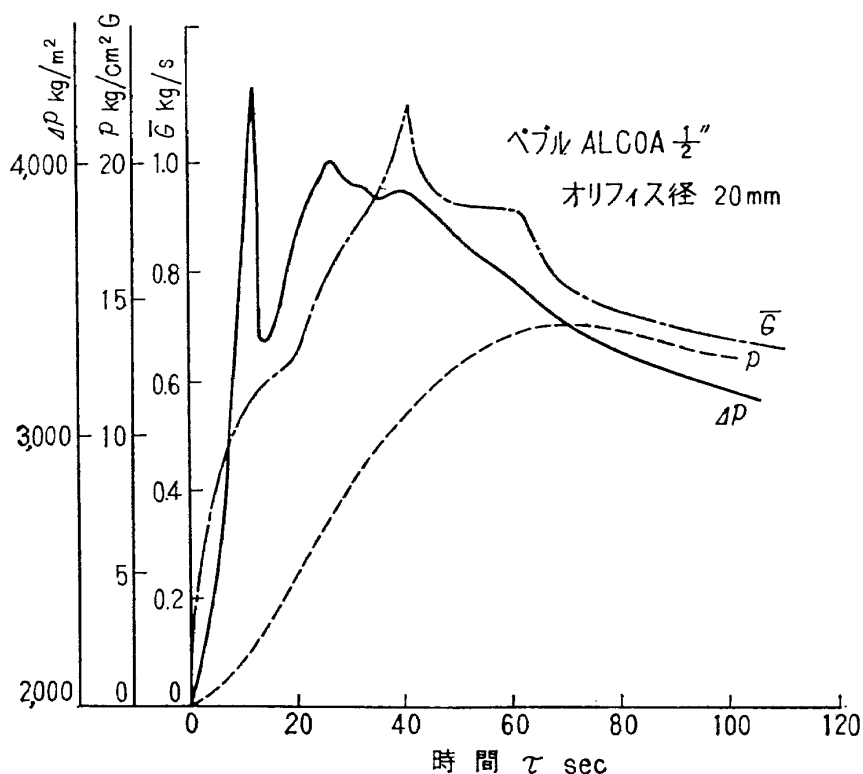


図 24 ペブル加熱器を通過する流量と差圧 (その3)

$\gamma_f$  流体の比重量  $\text{kg/m}^3$

$V = \frac{G}{\epsilon \gamma_f}$  空隙率を考慮した流速  $\text{m/s}$

$g$  重力の加速度 = 9.8  $\text{m/s}^2$

$D$  加熱器ペブル充填部の直径  $\text{m}$

この関係を、3/8インチおよび1/2インチペブルについて示したのが図25、図26で、図22～図24と比較すると、この式による計算値は実験値とほぼ一致する。図27は、実験値と Carman の式による計算値との比を示したものである。なお、Randall<sup>8)</sup> の実験値は計算値より 0～20% 高い。

流量が大きくなると、加熱器内のペブルは部分的に浮き上りはじめ、さらに流量が増すと、全体的に浮き上がる。壁の付近での空隙率の差を無視すると、ペブルの浮き上り限界は、

$$-\frac{dp}{dx} = \gamma_p(1-\epsilon)$$

で与えられる<sup>3)</sup>。ただし  $\gamma_p$  はペブルの比重量 [ $\text{kg/m}^3$ ] である。実験を行なった各ペブルに対するこの限界値を実測した比重量  $\gamma_p$  と空隙率  $\epsilon$  から計算した結果を表に示す。図26中に、浮き上らなかった場合を丸印○で、浮き上った場合を矢印↑で示す。結果によれば、浮き上り限界は大体上記の判定より10%減とすればよい。図28、図29は安定している場合と浮き上りはじめた場合の、放熱中のペブルの上面の写真である。

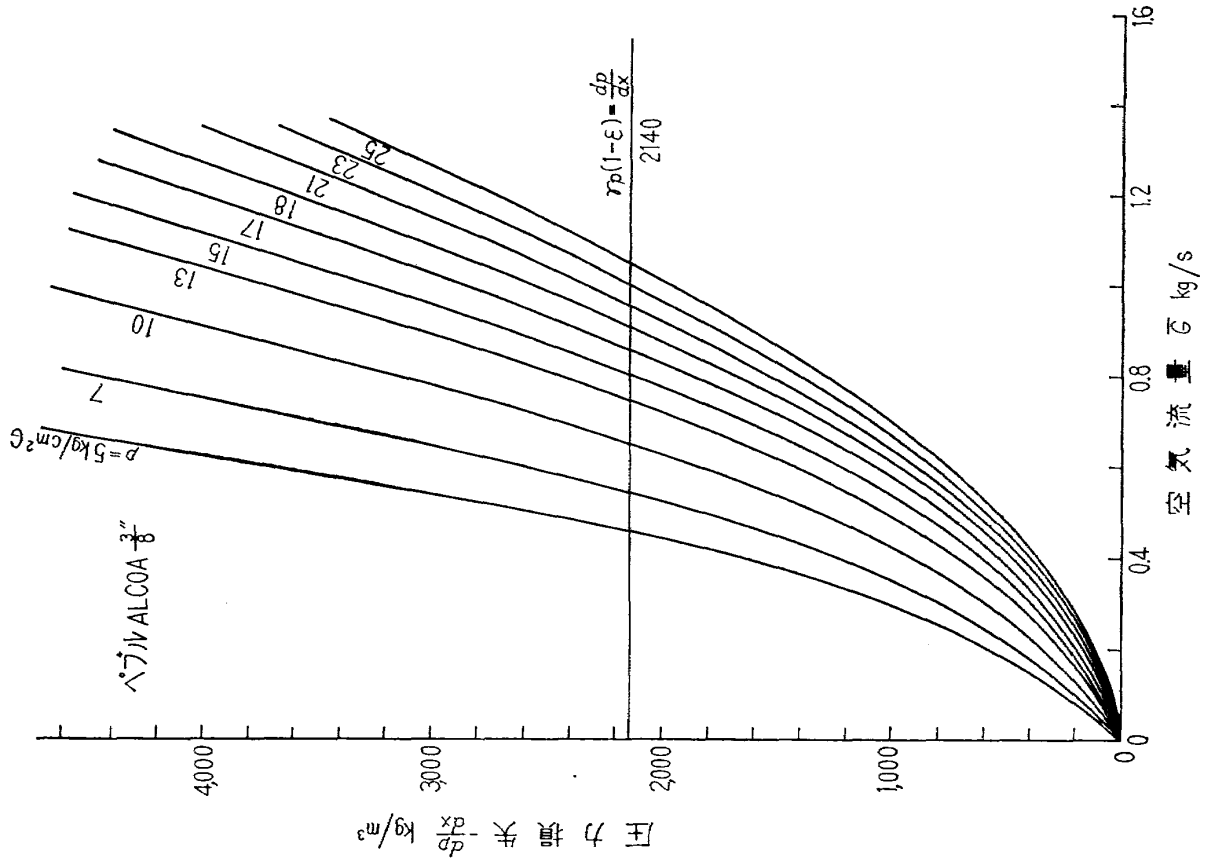


図 25 3/8インチペブルの流量と圧力損失

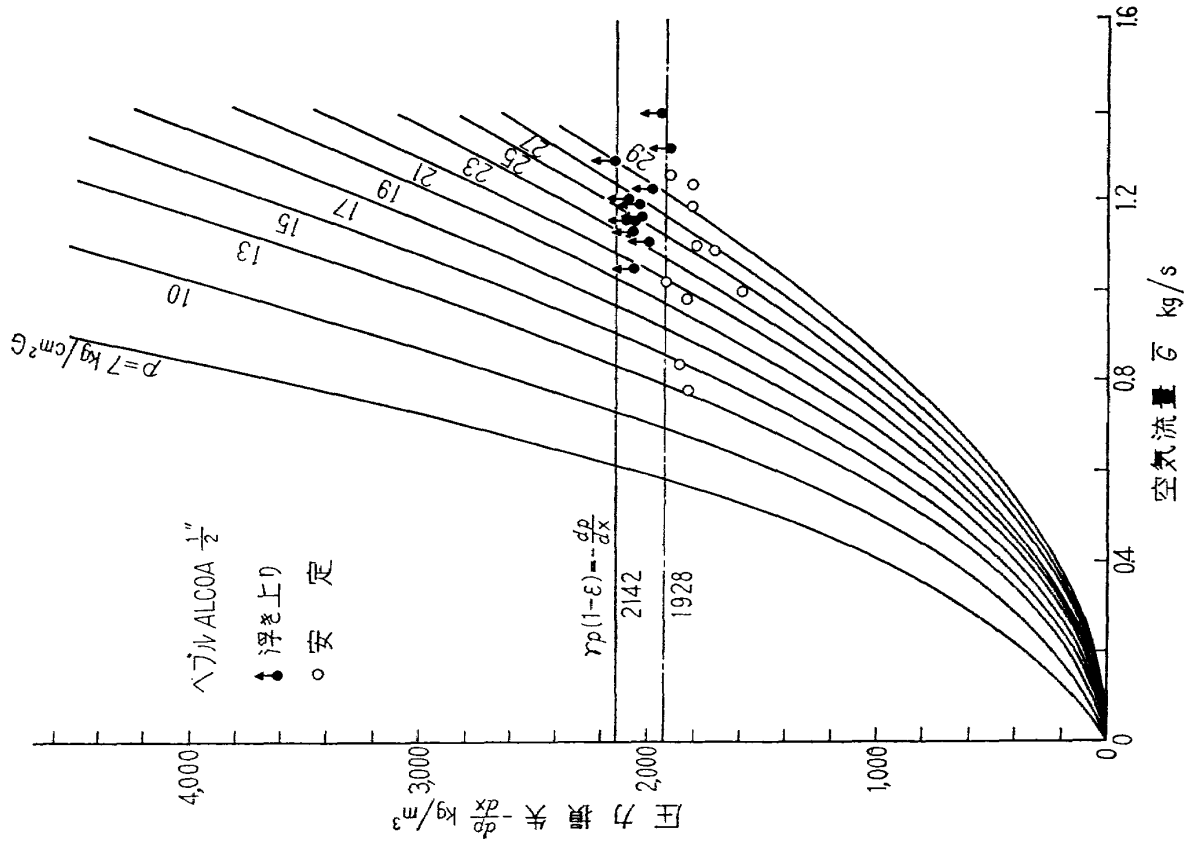


図 26 1/2インチペブルの流量と圧力損失

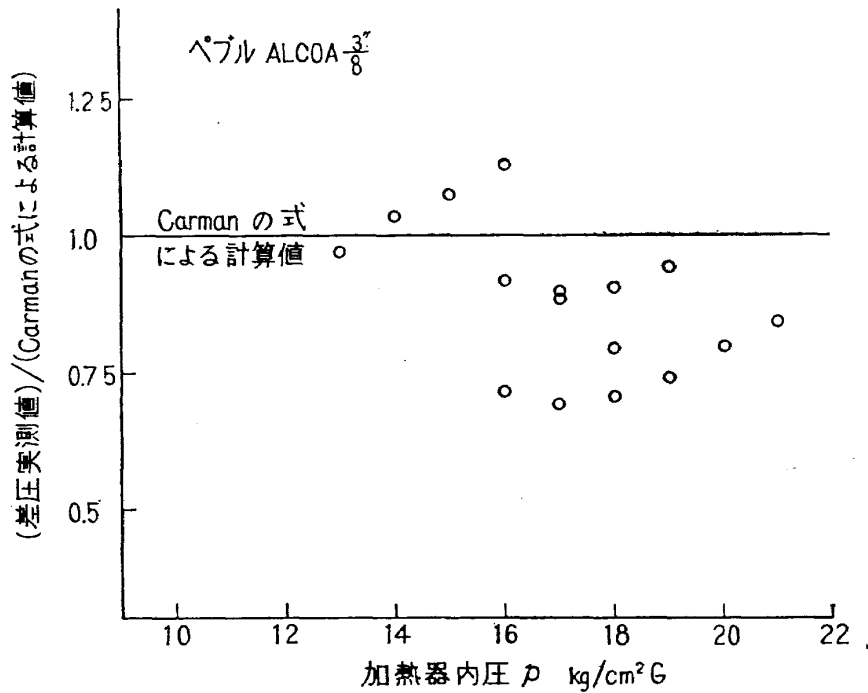


図 27 圧力損失の Carman の式による計算値と実験値との比較

表 3 各ペブルに対する浮き上り限界の計算値

| ペブルの種類                                   | ALCOA<br>3/8" ペブル     | ALCOA<br>1/2" ペブル     | Norton<br>3/8" ペブル    | Norton<br>3/4" ペブル    | Remmey<br>3/8" ペブル   |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| $d_p$ m                                  | $11.4 \times 10^{-3}$ | $15.1 \times 10^{-3}$ | $10.2 \times 10^{-3}$ | $18.6 \times 10^{-3}$ | $9.6 \times 10^{-3}$ |
| $\epsilon$                               | 0.42                  | 0.41                  | 0.43                  | 0.44                  | 0.47                 |
| $\gamma_p$ kg/m <sup>3</sup>             | 3,690                 | 3,630                 | 3,350                 | 3,200                 | 3,200                |
| $\gamma_p(1-\epsilon)$ kg/m <sup>3</sup> | 2,140                 | 2,142                 | 1,910                 | 1,792                 | 1,697                |

Carman の式からわかるように、ペブルの直径  $d_p$  が大きくなると、同じ流量に対しては圧力損失は小さくなる。したがって大きいペブルを使用すれば、浮き上りに対しては有利であるが、一方、熱交換については小さいペブルの方が有利であるので、加熱器の下部には小さいペブルを、上部には大きいペブルを充填することがある。この場合

$$-\frac{dp}{dx} = K \left( \frac{1-\epsilon}{d_p} \right)^{1.1} \frac{1}{\epsilon^3}$$

と書けるので、差圧  $4p$  [kg/m<sup>2</sup>] は

$$4p K \left[ \left( \frac{1-\epsilon_1}{d_{p1}} \right)^{1.1} \frac{l_1}{\epsilon_1^3} + \left( \frac{1-\epsilon_2}{d_{p2}} \right)^{1.1} \frac{l_2}{\epsilon_2^3} \right]$$

となる。ここで、添字 1 および 2 は下層および上層のペブルに対する値を示し、 $d_p$  はペブルの平均直径、 $l$  は層の長さ [m]、 $\epsilon$  は空隙率とする。浮き上り限界は

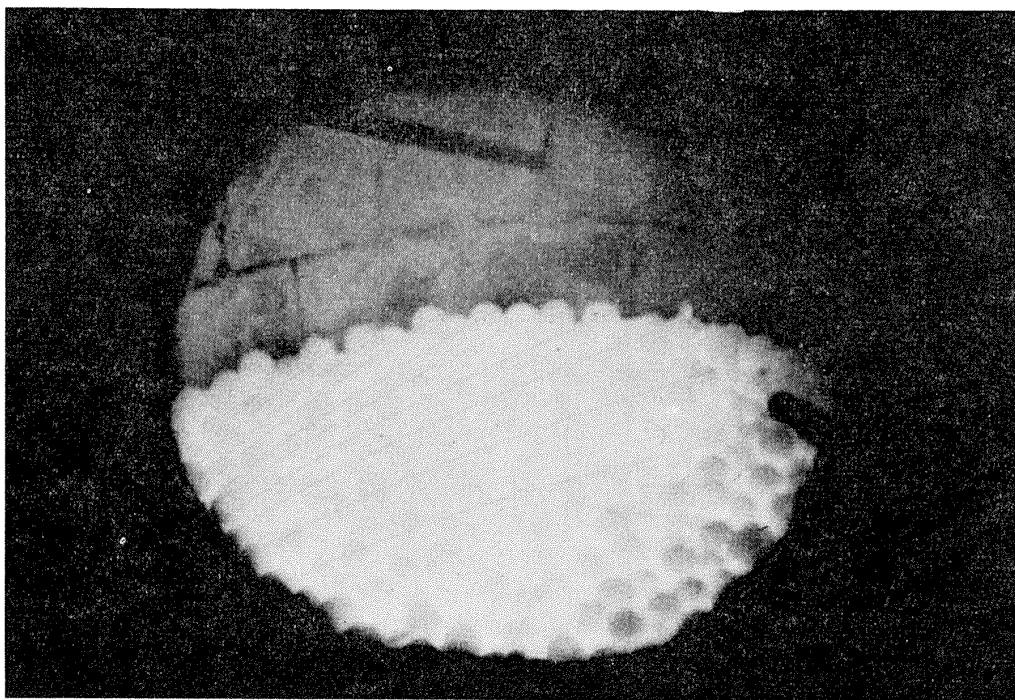


図 28 放熱時のペブル上面（安定した状態）

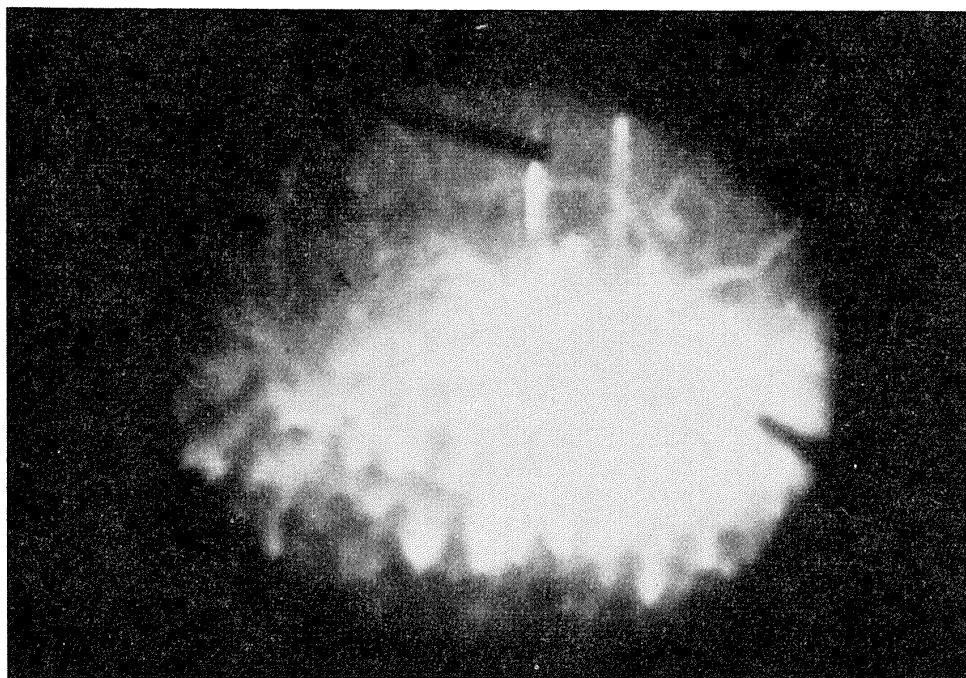


図 29 放熱時のペブル上面（一部が浮き上がった状態）

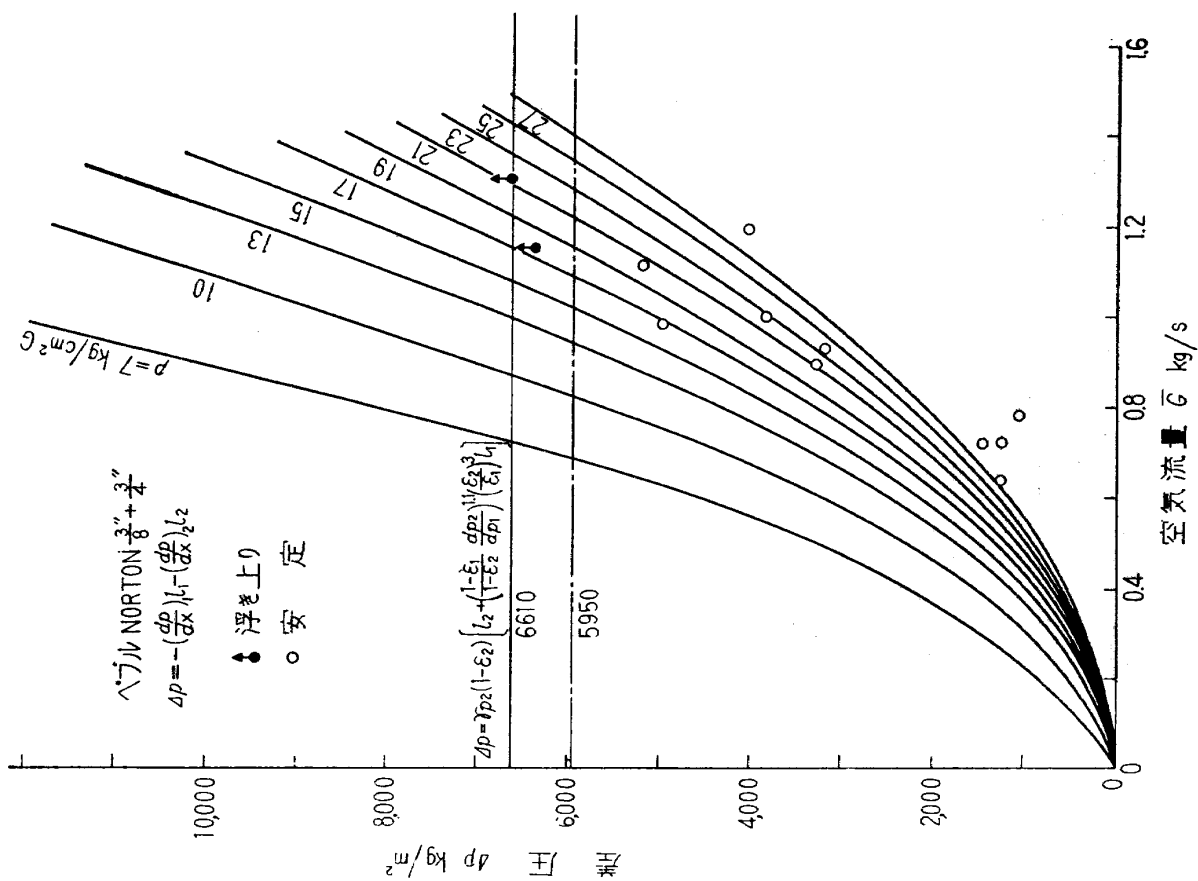


図 30 3/8 インチパイプ 1.5m + 3/4 インチパイプ 0.5m を充填した場合の流量と差圧 (その 1)

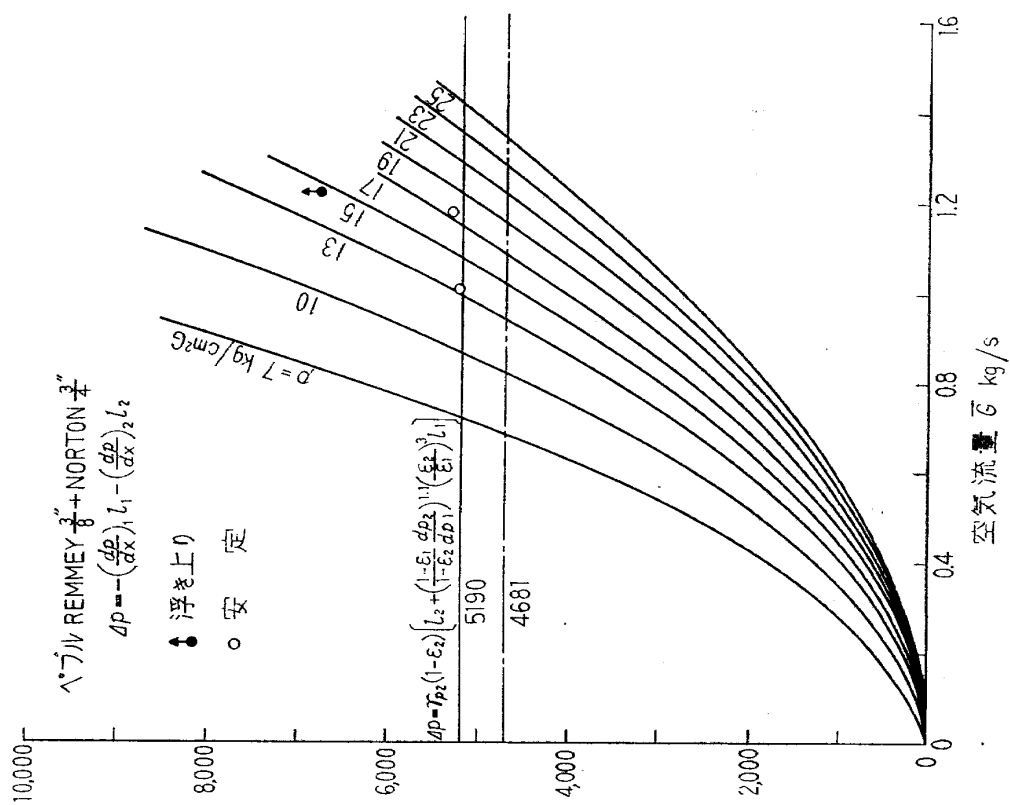


図 31 3/8 インチパイプ 1.5m + 3/4 インチパイプ 0.5m を充填した場合の流量と差圧 (その 2)

$$-\frac{dp}{dx} = \gamma_{p2}(1-\varepsilon_2) = K \left( \frac{1-\varepsilon_2}{d_{p2}} \right)^{1.1} \frac{1}{\varepsilon_2^3}$$

で与えられる。ここで $\gamma_p$ はペブルの比重量 [kg/m<sup>3</sup>] である。この2式より  $K$  を消去すれば、浮き上り限界を与える式

$$dp = \gamma_{p2}(1-\varepsilon_2) \left[ l_2 + \left( \frac{1-\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2} \cdot \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \right)^{1.1} \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^3 l_1 \right]$$

が求められる。図30、図31に2種の3/8インチペブル 1.5m の上に3/4インチペブル 0.5m を充填した場合の差圧と浮き上り限界を示す。結果によれば、浮き上り限界はこの場合にも上記判定式より10%減とすればよい。ペブルを2層にした場合は、上式の  $l_1$  の係数を1より大にできるので浮き上りに対しては1層の場合よりかなり有利である。

## 6. む す び

この実験によって、極超音速風洞加熱器の設計に対する多くの資料を得たが、おもな点はつぎのとおりである。

- (1) ペブルと流体の間の熱伝達係数は Boelter の式

$$Nu = 0.33 Re^{0.6}$$

で計算した値とよく一致する。

- (2) ペブル層を通過する際の圧力損失は Carman の実験式によって計算した値とだいたい一致する。

- (3) ペブルの浮き上り限界は、だいたい

$$dp = \gamma_{p2}(1-\varepsilon_2) \left[ l_2 + \left( \frac{1-\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2} \cdot \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \right)^{1.1} \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^3 l_1 \right]$$

で示されると考えてよい。ペブルを2層に充填して、上部に大きいペブルを置けば ( $d_{p2} > d_{p1}$ )、浮き上りに対してはかなり有利である。

- (4) 実験結果によれば、放熱時の空気温度はペブルの加熱温度よりかなり低い、これは主としてペブル層の断面温度分布が一様でないためと考えられる。

- (5) 燃焼条件は燃焼ガス温度 800°C 以上ではだいたい予期のとおりであったが、燃焼ガス温度 600°C 付近では、予期した値とかなりの差を示した。これは主として希釈混合の不均一によるものと考えられる。

- (6) 断熱材の厚さはこの程度でだいたい良好な結果が得られ、外板温度は長時間加熱しても 200°C 以下と期待してよい。

- (7) ペブルの加熱放熱を約 100 回繰り返したが、ペブルの破損は数%程度であった。

- (8) 耐火レンガの耐熱性はだいたい良好であったが、キャストブルには表面がはく離してきたも

のがあった。

おわりに、実験装置の設計製作ならびに実験の実施に協力された、三菱重工業<sup>㈱</sup>の方々に厚くお礼を申し上げる。とくに、神戸造船所設計部の富田技師、神戸研究所の福栄技師には終始お世話になった。また、耐火レンガ等はとくにこの実験のため、大阪窯業耐火煉瓦(株)、旭硝子(株)で用意していただいた。図表の作製は空気力学第一部の桜場宏一君と後藤和君をわずらわした。

## 文 献

- 1) Nagamatsu, H. T.; Hypersonic Experimental Facilities, High Speed Problems of Aircraft and Experimental Method, Princeton University Press (1960) p. 539.
- 2) 平木一；極超音速風洞，日本航空学会誌，11巻 117号（昭和38）pp.298-304；また 平木一，長洲秀夫，林二識；極超音速風洞について，航技研技術資料N-2（昭和38）
- 3) Bloom, M. H.; A High Temperature-Pressure Air Heater (Suitable for Intermittent Hypersonic Wind Tunnel Operation), WADC TN 55-695 (1956) ; also ASME Paper No. 59-A-233 (1959)
- 4) Lancashire, R. B., Lezberg, E. A., Morris, J. F. ; Experimental Results of a Heat-Transfer Study from a Full-Scale Pebble-Bed Heater, NASA TN D-265 (1960)
- 5) 化学工学協会；化学工学便覧，新版，（昭和33）p. 171. <sup>㈱</sup>丸善
- 6) Dabora, E. K.; Regenerative Heat Exchangers with Heat Loss Consideration, ASME Paper No. 58-SA-29 (1958)
- 7) 林 二識；粒加熱器の熱特性，航技研報告 TR-52（昭和38）
- 8) Randall, D. E.; Experimental Determination of the Pressure Drop through a Pebble Bed, Sandia Corporation Res. Rept. SC-4354 (TR), (1959)
- 9) Perry, J. H. (Editor) ; Chemical Engineers' Handbook (3rd. Edition), McGraw-Hill (1950) p.364

付 表 1

## 1. ALCOA 3/8" ペブル

| 試 験<br>月 日 | 加熱流量<br>kg/s | 加熱温度<br>℃    | オリフィス径<br>mm | 概 要             |                                     |
|------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------------------------------------|
|            |              |              |              | 温度 ℃<br>0 2 4 6 | (圧力 kg/cm <sup>2</sup> G)<br>加熱時間 h |
| 6.13       | 0.1          | 1,000        | 16.9         |                 |                                     |
| 6.14       | 0.1          | 1,200        | 16.9         |                 |                                     |
| 6.15       | 0.07         | 1,000        | 20.0         |                 |                                     |
| 6.17       |              |              |              | パイロット着火装置故障     |                                     |
| 6.19       | 0.1          | 600, 1,000   | 20.0         |                 | (燃焼試験のみ)                            |
| 6.20       | 0.07         | 600, 1,000   | 20.0         |                 | (燃焼試験のみ)                            |
| 6.21       | 0.05         | 600          | 20.0         |                 | (ブローにて冷却)                           |
| 6.22       | 0.1          | 600          | 20.0         |                 | (長時間燃焼)                             |
| 6.24       | 0.1          | 1,200        | 20.0         |                 |                                     |
| 6.25       | 0.1          | 1,000, 1,200 | 20.0         |                 |                                     |
| 6.26       | 0.1          | 1,000        | 20.0         |                 |                                     |
| 6.27       | 0.1          | 1,000, 1,200 | 16.7         |                 |                                     |
| 6.28       | 0.1          | 800          | 16.9         |                 |                                     |

## 2. ALCOA 1/2" ペブル

| 試験<br>月 日 | 加熱流量<br>kg/s | 加熱温度<br>°C          | オリフィス径<br>mm | 概要 (圧力 kg/cm <sup>2</sup> G)<br>温度 °C 加熱時間 h |  |
|-----------|--------------|---------------------|--------------|--|--|
|           |              |                     |              | 0 2 4 6                                      |  |
| 7.9       | 0.1          |                     | 16.9         | 主ガス用混合器故障のため<br>パイロットのみ                      |  |
| 7.10      | 0.1          | 600, 1,000          | 16.9         |  |  |
| 7.11      | 0.05<br>0.1  | 1,000<br>800, 1,000 | 16.9         |  |  |
| 7.13      | 0.1          | 1,000               | 20.0         |  |  |
| 7.16      | 0.1          | 1,200               | 20.0         |  |  |
| 7.17      | 0.07         | 1,000, 1,200        | 20.0         |  |  |
| 7.18      | 0.1          | 1,000               | 20.0         |  |  |
| 7.19      | 0.1          | 800                 | 20.0         |  |  |
| 7.20      | 0.1          | 800, 1,000          | 22.9         |  |  |
| 7.22      | 0.1          | 800, 1,000          | 22.9         |  |  |
| 7.23      | 0.07<br>0.1  | 800                 | 22.9         |  |  |
| 7.24      | 0.1          | 1,000               |              |  |  |

## 3. Norton 3/4" + 3/8" ペブル

| 試験<br>月 日 | 加熱流量<br>kg/s | 加熱温度<br>°C     | オリフィス径<br>mm | 概要 (圧力 kg/cm <sup>2</sup> G) |        |
|-----------|--------------|----------------|--------------|------------------------------|--------|
|           |              |                |              | 温度 °C                        | 加熱時間 h |
| 9.9       | 0.1          | 600<br>1,000   | 16.9         |                              |        |
| 9.10      | 0.1          | 1,000<br>1,200 | 16.9         |                              |        |
| 9.11      | 0.1          | 1,000          | 22.9         |                              |        |
| 9.12      | 0.1          | 1,000<br>1,200 | 22.9         |                              |        |
| 9.13      | 0.1          | 1,000<br>1,200 | 26.8         |                              |        |
| 9.14      | 0.1          | 1,000          | 26.8         |                              |        |

## 4. Norton 3/4" + Remmey 3/8" ペブル

| 試験<br>月 日 | 加熱流量<br>kg/s | 加熱温度<br>°C     | オリフィス径<br>mm | 概要 (圧力 kg/cm <sup>2</sup> G) |        |
|-----------|--------------|----------------|--------------|------------------------------|--------|
|           |              |                |              | 温度 °C                        | 加熱時間 h |
| 10.4      | 0.1          | 1,000<br>1,200 | 200          |                              |        |
| 10.5      | 0.1          | 1,000          | 200          |                              |        |
| 10.7      | 0.1          | 1,100          |              |                              | 自然冷却   |

## 5. ALCOA 3/8" ペブル

| 試 験<br>月 日 | 加熱流量<br>kg/s | 加熱温度<br>°C            | オリフィス径<br>mm | 概 要            |                           |
|------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------|---------------------------|
|            |              |                       |              | 温度 °C          | (圧力 kg/cm <sup>2</sup> G) |
|            |              |                       |              | 0 2 4 6 加熱時間 h |                           |
| 9.23       | 0.1          | 1,000<br>1,200        | 16.9         |                |                           |
| 9.24       | 0.1          | 1,000<br>1,200        | 16.9         |                |                           |
| 9.25       | 0.1          | 1,000                 | 22.9         |                |                           |
| 9.26       | 0.1          | 800<br>1,000<br>1,200 | 22.9         |                |                           |
| 9.27       | 0.1          | 1,000<br>1,200        | 26.8         |                |                           |
| 9.28       | 0.1          | 600                   |              | プロウによる冷却 600   |                           |

付表2 断熱材の化学分析結果

| 化 学 成 分                        | CORUX-AW | PX-AW | PX-B6 | C-35S | コルハート<br>ホワイト-R9 |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 98.56    | 96.81 | 38.26 | 73.51 | 88.35            |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.00     | 1.26  | 57.55 | 18.29 | 7.68             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.18     | 0.30  | 0.83  | 1.30  | 1.36             |
| CaO                            | trace    | trace | 0.31  | 5.37  | 0.27             |
| MgO                            | 0.02     | trace | 0.42  | —     | 0.10             |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.20     | 0.70  | 2.05  | —     | —                |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.10     | 0.91  | 0.50  | —     | 2.18             |
| Ig loss                        | —        | —     | —     | 0.53  | —                |

付表3 断熱材の物理的性質

|                              | CORUX-AW        | PX-AW | PX-B6 | C-35S |
|------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|
| 耐 火 度 SK                     | 42              | 42    | 33    | 35    |
| 真 比 重                        | 3.93            | 3.84  | 2.62  | —     |
| 容 積 比 重                      | 3.23            | 1.57  | 0.88  | —     |
| 気 孔 率 %                      | 17.8            | 59.1  | 66.4  | —     |
| 荷重軟化温度 °C                    | 1,840           | 1,410 | —     | —     |
| 熱間膨脹率 10 <sup>-5</sup> /°C   | 1,200°C<br>0.93 | 0.56  | 0.42  | —     |
| 熱伝導率 kcal/m <sup>2</sup> h°C | 1,000°C<br>2.12 | 0.68  | 0.35  | —     |
| 熱成収縮率 % 1,200°C×3h           | —               | —     | —     | 0.16  |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p>NAL TM-48</p> <p>航空宇宙技術研究所</p> <p>極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験</p> <p>1965年2月 35ページ</p> | <p>極超音速風洞に用いられるペブル加熱器について、模型による予備実験を行ない、ペブルの過渡温度特性、流体がペブル層を通過する際の圧力損失等を測定し、熱伝達係数を求めた。結果によれば、Boelterの与えた式は実験とかなりよい一致を示す。また、ペブルの浮き上りについても実験を行ない、資料を得た。</p> | <p>I. 平 木 一 識 登 崇 夫<br/>林 本 二 橋 吉 山 口 富 夫<br/>NAL TM-48<br/>533. 6. 07</p> |
| <p>NAL TM-48</p> <p>航空宇宙技術研究所</p> <p>極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験</p> <p>1965年2月 35ページ</p> | <p>極超音速風洞に用いられるペブル加熱器について、模型による予備実験を行ない、ペブルの過渡温度特性、流体がペブル層を通過する際の圧力損失等を測定し、熱伝達係数を求めた。結果によれば、Boelterの与えた式は実験とかなりよい一致を示す。また、ペブルの浮き上りについても実験を行ない、資料を得た。</p> | <p>I. 平 木 一 識 登 崇 夫<br/>林 本 二 橋 吉 山 口 富 夫<br/>NAL TM-48<br/>533. 6. 07</p> |
| <p>NAL TM-48</p> <p>航空宇宙技術研究所</p> <p>極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験</p> <p>1965年2月 35ページ</p> | <p>極超音速風洞に用いられるペブル加熱器について、模型による予備実験を行ない、ペブルの過渡温度特性、流体がペブル層を通過する際の圧力損失等を測定し、熱伝達係数を求めた。結果によれば、Boelterの与えた式は実験とかなりよい一致を示す。また、ペブルの浮き上りについても実験を行ない、資料を得た。</p> | <p>I. 平 木 一 識 登 崇 夫<br/>林 本 二 橋 吉 山 口 富 夫<br/>NAL TM-48<br/>533. 6. 07</p> |
| <p>NAL TM-48</p> <p>航空宇宙技術研究所</p> <p>極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験</p> <p>1965年2月 35ページ</p> | <p>極超音速風洞に用いられるペブル加熱器について、模型による予備実験を行ない、ペブルの過渡温度特性、流体がペブル層を通過する際の圧力損失等を測定し、熱伝達係数を求めた。結果によれば、Boelterの与えた式は実験とかなりよい一致を示す。また、ペブルの浮き上りについても実験を行ない、資料を得た。</p> | <p>I. 平 木 一 識 登 崇 夫<br/>林 本 二 橋 吉 山 口 富 夫<br/>NAL TM-48<br/>533. 6. 07</p> |

---

## 航空宇宙技術研究所資料48号

昭和40年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野(0422)(4)9171(代表)

印刷所 奥村印刷株式会社  
東京都千代田区西神田1~10

---