

# 蒸気ドラム内の蒸気の乾き度について

## 関係無次元数の検討

吉原 計一\*

### Experiments on Steam Dryness in a Boiler Steam Drum Examination of Non-dimensional Parameters

Keiichi Yoshihara\*

There are many physical factors which influence steam dryness in a boiler steam drum. It is very difficult to investigate the individual relations between each factor and the steam dryness. The final purpose of the study is to get the expression of the steam dryness by using non-dimensional parameters. The changing values of the parameters influence some phenomena which affect the steam dryness in a great deal. In this paper the author attempted to make and find the non-dimensional parameters by a trial and error. As a result, the author found three parameters most effective to express steam dryness. The first and second are the parameter on entraining water droplets and on their gravity separation against drag force in steam and the third parameter is the Froude Number. An approximate expression was obtained using these three parameters by regression analysis. The relative error given from this expression was under 0.1 percent.

## 1 緒 言

ボイラの蒸気室における蒸気の乾き度については、蒸発量すなわち蒸発面蒸気速度、ボイドによる水位の上昇、気液の上昇流れによる水面の盛り上がり、波立ち及び蒸気圧力による物性値の変化、並びにボイラ水の性状などが影響すると言われている。<sup>1),2)</sup>

また、蒸気ドラムから取り出される蒸気の乾き度については気水分離器の性能も影響する。<sup>3)</sup>

しかし、それらの事項や現象に関係する物理量は多く、その影響を個々に明かにすることは極めて困難である。

そこで本報では、蒸気の乾き度に影響を与える現象に関係すると考えられる無次元数を以って、乾き度を表現することを提案する。また、そのための無次元数を策定することを試みる。

その結果、幾つかの有効と思われる無次元数を求めることが出来た。

---

水産大学校研究業績 第1550号, 1996年6月20日受付.

Contribution from National Fisheries University, No. 1550. Received Jun. 20, 1996.

\* 水産大学校機関学科学科蒸気原動機講座 (Laboratory of Marine Steam Engineering, Department of Marine Engineering, National Fisheries University).

2 記号

- $C_D$  : 抗力係数
- $c_{p1}$  : 飽和水の比熱 J/(kg·K)
- $d$  : 直径 m
- $d_1$  : 可搬限界粒径 m
- $d_{so}$  : 伝熱面離脱気泡直径 m
- $D_{ST}$  : 指示水位サンプリング高さ m
- $d_{wo}$  : 気流中液滴代表径 m
- $f_d$  : ボイド率
- $F_r$  : フルード数
- $g$  : 重力加速度  $m/s^2$
- $H_o$  : 水面計指示水位 m
- $h_{rr}$  : 推定有効高さ m
- $H_{ST}$  : サンプリング高さ m
- $h_x$  : 湿り飽和蒸気のエンタルピ J/kg
- $h'$  : 飽和水のエンタルピ J/kg
- $h''$  : 乾き飽和蒸気のエンタルピ J/kg
- $Ja^*$  : 修正ヤコブ数
- $L$  : 蒸発熱 J/kg
- $Re$  : レイノルズ数

- $r_{mw}$  : 気液流による水位の盛り上り m
- $s_{rd}$  : ボイドによる水位の上昇 m
- $T_s$  : 飽和温度 K
- $U_s$  : 蒸気速度 m/s
- $U_{sso}$  : 蒸発面蒸気速度 m/s
- $U_{swo}$  : 水中気泡上昇速度 m/s
- $U_w$  : 液滴速度 m/s
- $We$  : ウェーバ数
- $X$  : 乾き度 %
- $X_r$  : 近似式による乾き度 %
- $Z$  : オーネノルゲ数
- $\mu_l$  : 飽和水の粘性係数 Pa·s
- $\mu_v$  : 乾き飽和蒸気の粘性係数 Pa·s
- $\pi_1$  : 無次元数 (液滴搬出関連)
- $\pi_2$  : 無次元数 (密度比)
- $\pi_3$  : 無次元数 (密度差比)
- $\pi_{rd}$  : 無次元数 (ボイド率関連)
- $\pi_{nd}$  : 無次元数 (気流中の液滴分離関連)
- $\rho_l$  : 飽和水の密度  $kg/m^3$
- $\rho_v$  : 乾き飽和蒸気の密度  $kg/m^3$
- $\sigma$  : 表面張力 N/m

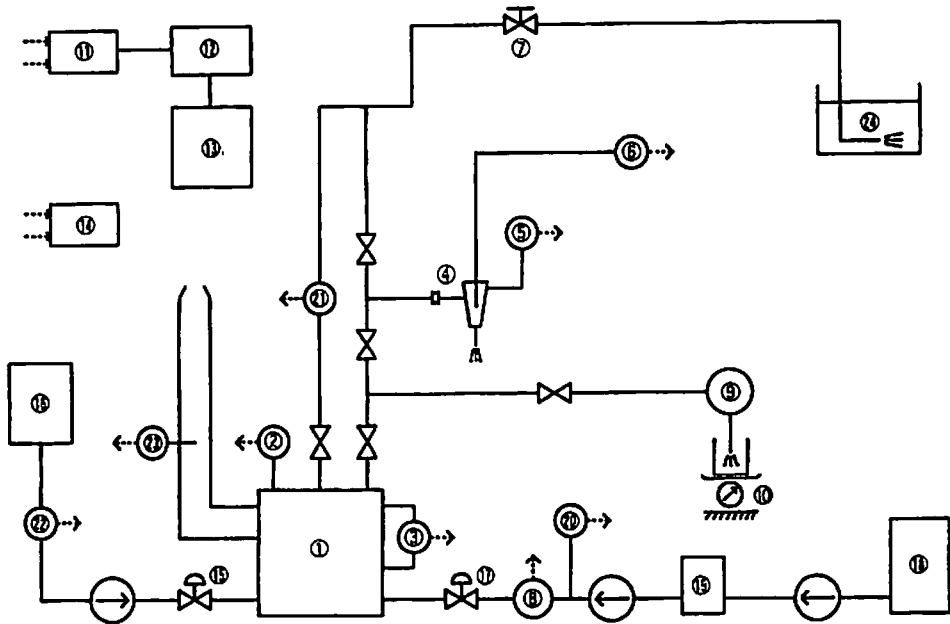


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

- |                                      |  |                               |
|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| ① Boiler                             | ⑩ Air ejector                          | ⑰ Feed water regulating valve |
| ② Steam pressure gauge of boiler     | ⑪ Weighing balance for condensed water | ⑱ Feed water storage tank     |
| ③ Water level gauge of boiler        | ⑫ Process input output                 | ⑲ Feed water surge tank       |
| ④ Throttling calorimeter             | ⑬ Central processing unit              | ⑳ Thermometer for feed water  |
| ⑤ Pressure gauge for throttled steam | ⑭ Magnetic disk                        | ㉑ Flow meter for steam        |
| ⑥ Thermometer for throttled steam    | ⑮ Self-balancing recorder              | ㉒ Flow meter for fuel oil     |
| ⑦ Exhaust steam regulating valve     | ⑯ Fuel oil regulating valve            | ㉓ Oxygen analyzer             |
| ⑧ Flow meter for feed water          | ⑰ Fuel oil tank                        | ㉔ Silencer                    |

### 3 実験装置

実験装置の概略系統図を Fig. 1 に、蒸気ドラムの内部構造を Fig. 2 示す。本実験に用いた供試ボイラ並びに主な計測装置の仕様は次の通りで、前報<sup>4)</sup>と同じである。

#### 3.1 供試ボイラ

型式 2 胴 D 型水缶ボイラ NHA-1500 型  
 蒸発量 1450kgf/h  
 蒸気圧力 常用 1.177MPa 最大 1.569MPa  
 蒸気温度 飽和温度  
 伝熱面積 22.6m<sup>2</sup>  
 蒸気ドラム 内径 580mm 長さ 2050mm

#### 3.2 蒸気取り出し管

内径 18.0mm 外径 24.2mm  
 5 段継ぎ足し式 全長 266.3~474.1mm

#### 3.3 絞り乾き度計

絞りノズル方式 ノズル喉直径 2.7mm

### 4 実験方法

実験は、ボイラ蒸気圧力の目標値を 1.278 MPa に設定し、補助蒸気管に乾き度計測用蒸気取り出し管を取り付け、開口位置を常用水面上 82.9, 106.4, 128.6, 152.1, 174.9mm の 5 段階に変え、蒸発量の目標値を 350, 650, 1000, 1300kgf/h と変化させて行った。

乾き度は、絞り熱量計の蒸気圧力、温度及びボイラ蒸気圧力から、各保有熱量を求め、式 (1) によって算出した。この式及び以後の計算式における蒸気の状態量並びに物性値の計算は、実用国際状態式 (1967)、国際補間式 (1975) による。

$$X = \frac{h_x - h'}{h'' - h'} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

実験中の装置の状態維持、蒸気の取出し法、計測要領及び計算処理などは、前報<sup>4)</sup>と同じである。

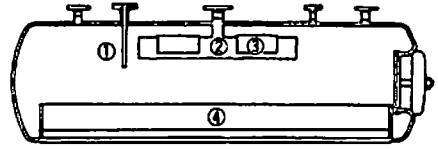


Fig. 2 Steam drum internals

- ① Sampling tube
- ② Dry pipe
- ③ Demister
- ④ Anti-priming plate

### 5 実験結果及び考察

#### 5.1 蒸発面蒸気速度及び蒸気取り出し高さ

Fig. 3 は蒸発面蒸気速度 ( $U_{sso}$ ) に対する、Fig. 4 は水面計水位から蒸気取り出し口までの高さ ( $D_{st}$ ) に対する乾き度 ( $X$ ) の変化を示すものである。蒸発面蒸気速度は、実際の蒸発水面と思われる位置の水面面積で蒸発蒸気量を除したもので、垂直方向への平均蒸気上昇速度を表す。

全体として、Fig. 3 では  $U_{sso}$  の大きい程、Fig. 4 では  $D_{st}$  の低い程、乾き度は低くなるが、Fig. 4 に見られる様に、取り出し口までの高さの影響が余り見られないものもある。

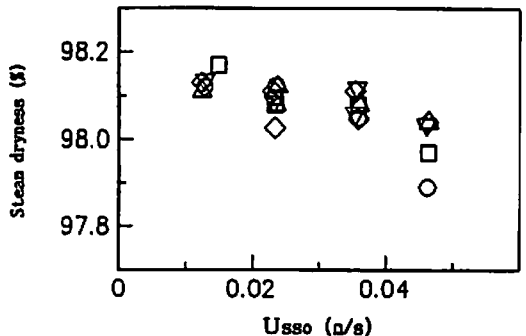


Fig. 3 Interrelation of steam dryness for Usso

- : Height of sampling port 82.9mm
- : Height of sampling port 106.4mm
- △ : Height of sampling port 128.6mm
- ◇ : Height of sampling port 152.1mm
- ▽ : Height of sampling port 174.9mm

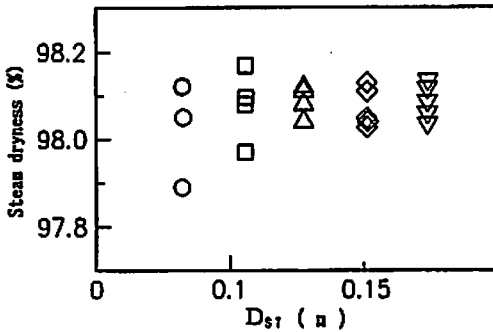


Fig. 4 Interrelation of steam dryness for  $D_{st}$   
The mark is the same as those shown in Fig. 3

これは Fig. 4 に示す  $D_{st}$  の高さが、水面計指示水位からの見掛け上の高さで実状とは異なるため、ボイラ内の実水位は、後述のように、蒸発量に応じてこれより上昇し、盛上っているからである。盛上りの影響は、後述の推定有効高さ ( $h_{pr}$ ) と乾き度との関係を表す Fig. 5 には現れており、 $h_{pr}$  の小さい範囲で、左下がりの傾向が見られ、Fig. 4 ではよく解らなかった乾き度に対する高さの効果が表れていることによって解る。

5.2 現象関連事項、無次元数及び関係式

蒸気の乾き度に影響を与える事項としては、次のようなものが考えられる。

- a) 実際の蒸発水面の位置、すなわちボイドによる水位の上昇及び気液上昇流れによる水位の盛上り、波立ちによる水面の位置
- b) 蒸発水面における液滴の発生状況 (粒径分布、飛出し速度)
- c) a) の高さの効果である蒸気室空間における気液分離
- d) 今回は検討の対象としないが、併水の性状

これらに関係する物理量には  $c_{p1}$ ,  $d_{so}$ ,  $d_{wo}$ ,  $g$ ,  $h_{pr}$ ,  $L$ ,  $T_s$ ,  $U_{swo}$ ,  $U_{swo}$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_v$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_v$ ,  $\sigma$  があるが、この度の実験は蒸発面蒸気速度とサンプリング高さを変えたものであるから、 $U_{swo}$ ,  $U_{swo}$  以外の物理量個々の影響を特定することは難しい。また、物理量間には相互に関連があるものもあるので、これらの組合せからなる無次元数をもって、a), b), c) の事項を表現することを目標に、

以下のものを策定することを試みた。

- 1) 蒸発水面から蒸気取出し口間の気液分離に関する無次元数 ( $\pi_{hd}$ )  
これは上記の a), c) に関係するものである。
- 2) 蒸発水面からの液滴飛出などに関する無次元数 ( $\pi_1$ )  
これは上記の b) 関連の一部と考える。
- 3) 物性値その他に関する幾つかの無次元数 ( $Fr$ ,  $Re$ ,  $We$ ,  $Ja^*$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{10}$ )
- 4) 関係式

蒸発及び気液分離に関係すると思われる物理量は上記の14個で、その基本単位はkg, m, s, K, Jの5種類である。 Buckingham の  $\pi$  定理により、現象を表現するには無次元数が9個あれば良い。

これらを策定するための関係式としては、ボイラドラム水面下のボイド率を見積る後藤らの提唱式<sup>1)</sup>(2)、蒸気室に浮遊する液滴の運動方程式<sup>2)</sup>(3)、可搬限界粒径を求める式<sup>3)</sup>(4)、伝熱面離脱時の気泡径を与える Cole-Rohsenow の式<sup>4)</sup>(5) など現象に関係するものを用いる。

これらの式を次に示す。

$$f_d = 1 - \exp \left[ -1.85 \left( \frac{U_{swo}^2}{\sqrt{\frac{K\sigma}{\rho_1 - \rho_v}}} \right)^{0.23} \right] \times \left\{ \frac{\mu_1}{\sigma} \sqrt{\left( \frac{g\sigma}{\rho_1 - \rho_v} \right)^{0.5}} \right\}^{0.2} \left( \frac{\mu_v}{\mu_1} \right)^{0.1} \times \left( \frac{\rho_v}{\rho_1 - \rho_v} \right)^{0.12} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_1 \frac{dU_w}{dt} = \frac{C_D}{2} \rho_v (U_s - U_w)^2 \frac{\pi}{4} d^2 + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_v g - \frac{\pi}{6} d^3 \rho_1 g \dots \dots \dots (3)$$

ただし、  $C_D = \frac{24}{Re}$

$$d_{wo} = \sqrt{\frac{18 \mu_v U_{swo}}{g (\rho_1 - \rho_v)}} \dots \dots \dots (4)$$

$$d_{so} \propto \left( \frac{\sigma}{g (\rho_1 - \rho_v)} \right)^{0.5} (Ja^*)^{0.4} \dots \dots (5)$$

ただし、  $Ja^* = \rho_1 c_{p1} T_s / \rho_v L$

5.3 推定有効高さ及び代表長さ等について

上記の式を参考に物理量の組合せによって、無次元数を定めるが、その際用いる代表長さ等の物理量については、以下に述べる考え方に基づいて、その数値を求めた。

1) 推定有効高さ ( $h_{pr}$ )

ボイラ内の推定実水面から蒸気取り出し管 (サンプリング管) までの高さである。

ボイラ内の実水位は水面計指示水位 ( $H_0$ ) よりもボイドによる水位の上昇分 ( $s_{ia}$ ) と気液流れによる水位の盛上がり分 ( $r_{mw}$ ) 高くなっているため、水面計指示水位からサンプリング管までの高さを  $D_{ST}$  とすると、 $h_{pr}$  は次式で与えられる。

$$h_{pr} = D_{ST} - s_{ia} - r_{mw} \dots\dots\dots (6)$$

2) ボイドによる水位の上昇 ( $s_{ia}$ )

前報<sup>4)</sup>と同様、次式(7)及び後藤らの提唱した式<sup>2)</sup>(2)によって求める。

$$s_{ia} = H_0 \left\{ \frac{1}{1 - f_d (1 - \rho_v / \rho_l)} - 1 \right\} \dots\dots (7)$$

3) 気液流れによる水位の盛上がり ( $r_{mw}$ )

幾つかの式が提唱されており、実用あるいはそれに近いボイラでの実験結果も示されているが、それらの式では流動水量を与える必要があり、本実験では循環水量が算定出来ないため使えない。本報では、気液流れによる水位の盛上がりの大部分を液体中の物体 (気泡) による造波と考え、盛上りをフルード数の関数として、見積って用いた。その際の代表長さについては4)に述べる。

Fig. 5 に示すように、ボイドによる水位の上昇 ( $s_{ia}$ ) とフルード数の関数として見積った気液流れによる水位の盛上がり ( $r_{mw}$ ) から求めた推定有効高さ ( $h_{pr}$ ) と乾き度の間には、かなりの規則性が見られることから、この算定方式による推定水面の位置はボイラ内の実水面の位置を近似的に良く表していると思われる。

4) 代表長さ

蒸気の乾き度に関する流れの代表長さとしては、対象となる流体塊の平均寸法を代表値とすることが望ましいが、本実験の場合、それらを適切に確定する方法が見当たらないので、算定可能で、代表長さとの関連があると考

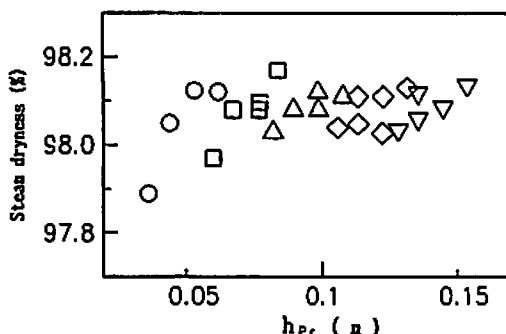


Fig. 5 Interrelation of steam dryness for  $h_{pr}$ . The mark is the same as those shown in Fig. 3

えられるものを用いた。

すなわち、蒸気中の浮遊液滴は蒸発状態によって粒径分布が定まり、数 micron から 1mm 位のものまで存在するとされているが、代表長さとしては式 (4) より求めた可搬限界粒径<sup>4)</sup>を用いた。

また、水中の気泡代表長さの算定には、縦向き壁面から離脱する気泡について、浮力、軸方向推力、表面張力の釣合から求める Levy の方法<sup>4)</sup>などがあるが、前述のように蒸発管内の循環水量を求めることが出来ないため、蒸気の飽和温度と物性値から伝熱面離脱時の平均気泡直径を求める Cole-Rohsenow の式<sup>5)</sup>(5)を用いた。

5) 流速

蒸発水面より上の蒸気の流速については、蒸発面蒸気速度 ( $U_{so}$ ) を用いる。これは前述のように、蒸発水面と思われる位置の水面面積で蒸発蒸気量を除したもので、垂直方向への平均蒸気上昇速度を表す。

水面下の気泡の流速については、水中気泡上昇速度 ( $U_{sw}$ ) として、上記の蒸発水面面積にボイド率を掛けたもので、蒸発蒸気量を除したものをを用いる。

5.4 策定無次元数

上記の物理量その他などを用い、組合せを想定して、指数法によって無次元数の候補を求め、試行錯誤によりその中から乾き度への影響が適正と思われるものを選び、相関図、物理的意義を考慮して、次の9個の無次元数を策定並びに選定した。その中には、Re 数等、流れと伝熱に関係する既定の無次元数も含まれている。

1)  $\pi_{hd}$ : 気流中の液滴分離に関する無次元数

推定有効高さ及び重力並びに抗力が液滴分離に及ぼす影響を表し、式(8)で求める。

$$\pi_{hd} = h_{pr} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{U_{sso} \mu_v}} \quad \dots\dots (8)$$

上昇蒸気気流中における液滴の運動方程式(3)を構成する物理量と実効高さ(推定有効高さ  $h_{pr}$ )との組合せによるもので、重力分離の効果を表し、数値が大きくなれば、乾き度が増大する。

式の分子側は高さと分離力の基になる重力加速度及び密度差で構成され、式(3)の右辺第2項浮力及び第3項重力の影響を示し、分母は抗力の基になる粘性と蒸気の流速で構成され、式(3)の右辺第1項の影響を表す。

Fig. 6にこの  $\pi_{hd}$  と乾き度の関係を示す。全体として左下がりの傾向がはっきり表れ、高さの効果が主体と見られる  $h_{pr}$  の Fig. 5の場合よりも更に乾き度との関連が強いことが伺える。これは  $\pi_{hd}$  が、高さの効果に加えて蒸気流速の影響を考慮した無次元数だからである。

後述するように、この  $\pi_{hd}$  が乾き度を決定する最も重要な無次元数である。

2)  $\pi_1$ : 液滴搬出に関する無次元数

蒸気流れによる気泡及び水表面のせん断による液滴の生成、搬出に関係する無次元数で、式(9)で求める。

$$\pi_1 = \frac{\mu_v U_{sso}}{\sigma} \quad \dots\dots (9)$$

分子項は  $\pi_{hd}$  の分母と同じく抗力関連で、分母は表面張力で、搬出に対する抵抗を表すものと考えられる。今回の結果では、 $\pi_{hd}$  に次いで乾き度に影響を及ぼしている。

Fig. 7に乾き度との関係を示す。本実験では物性値変化が殆どないので蒸気流速の変化と同じ傾向を示している。このことは以下の Fr, We など、皆同じである。

3) Fr: フルード数

$$Fr = \frac{U_{swo}}{\sqrt{g d_{so}}} \quad \dots\dots (10)$$

気液流れによる水位の盛上がりに関する無次元数で、

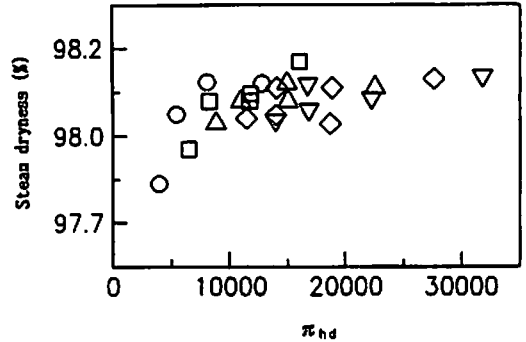


Fig. 6 Interrelation of steam dryness for  $\pi_{hd}$   
The mark is the same as those shown in Fig.3

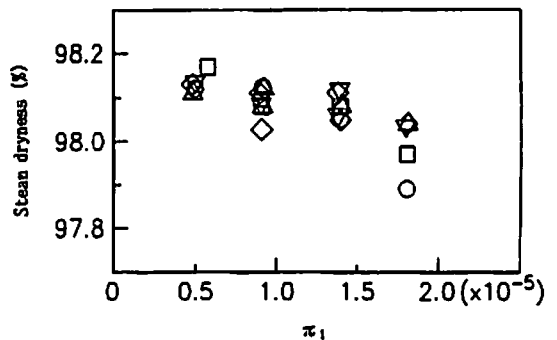


Fig. 7 Interrelation of steam dryness for  $\pi_1$   
The mark is the same as those shown in Fig.3

有効高さの推定に用いて、有効であることが解かったが、回帰分析の結果では、乾き度そのものにも、かなりの影響を与えている。次の Re 数, We 数に比べて Fig. 8に見られるように、流速が速いところでの変化が大きいのことが影響していると考えられる。

4) Re, We: レイノルズ数, ウェーバ数

$$Re = \frac{\rho_v U_{sso} d_{wo}}{\mu_v} \quad \dots\dots (11)$$

$$We = U_{sso} \sqrt{\frac{\rho_l d_{wo}}{\sigma}} \quad \dots\dots (12)$$

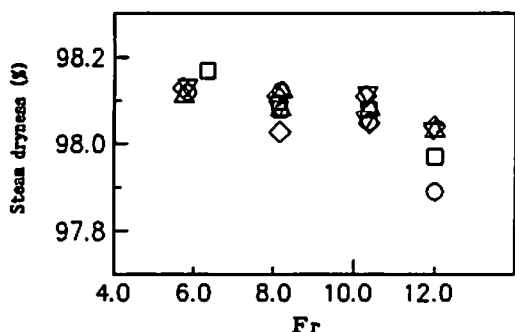


Fig. 8 Interrelation of steam dryness for Fr  
The mark is the same as those shown in Fig.3

液滴飛散に関係すると思われるオーネゾルゲ数 ( $Z = \sqrt{We}/Re$ )はこの2つの無次元数で構成されるので、これらを採用したが、この度の検討ではその影響は余り見られなかった。

Fig. 9に、乾き度との関係を示す。Fr数の場合に比べて、Re数の数値の大きい方で変化が緩やかになり、その影響が弱いことが伺える。この理由はよく解らない。

図に示していないが、We数も同じ傾向を示した。

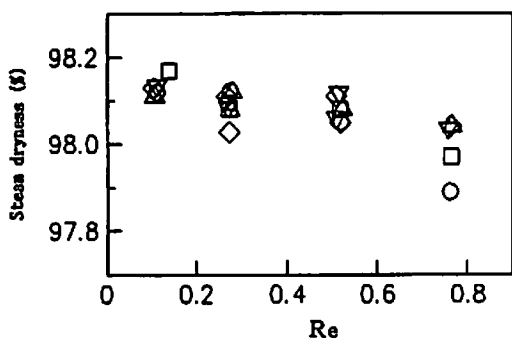


Fig. 9 Interrelation of steam dryness for Re  
The mark is the same as those shown in Fig.3

5) その他の無次元数

$$\pi_2 = \rho_v / \rho_1 \text{ (密度比)}$$

$$\pi_3 = \rho_v / (\rho_1 - \rho_v) \text{ (密度差比)}$$

$$\pi_{1d} = \mu_1 \sqrt{g d_{s0}} / \sigma \text{ (ボイド率関連)}$$

$$Ja^* = \rho_1 c_{r1} Ts / (\rho_v L) \text{ (修正ヤコブ数)}$$

などの無次元数を策定したが、本実験では、蒸気圧力

一定としたため、物性値は殆ど変化がなく、これらの無次元数の特性は解らなかった。

5.5 近似式

近似式は求めた無次元数の積の形で表すこととして、構成は各無次元数の数値が一桁付近の値となるように乗除を行って揃えた。また、数値の増大が乾き度の向上に効果のあるものは分子側に、逆のものは分母に配置した。

$x_1$ はボイラの特性と蒸発量で定まる最大値で、乾き度はこの値に収れんすると考えられ、今回は98.4とした。

乾き度に大きく影響を及ぼす因子の選定は、9個の無次元数のべき乗式の指数を回帰分析によって求め、乾き度に対する影響の小さいものを構成から外す方法で絞りこんで行った。

その結果今回の場合、乾き度は、3個の無次元数で整理でき、式(13)で表される近似式で求めることが出来る。

$$Xr = x_1 \{ 1 - \exp(-fex) \}$$

$$= 98.4 \{ 1 - \exp(-fex) \} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$fex = 0.8987 \left( \frac{\pi_{hd}}{10^4} \right)^{0.008377} \left( \frac{10}{10^5 \pi_1} \right)^{-6.8} \left( \frac{10}{Fr} \right)^{12.39}$$

Fig. 10はこの式の指数を構成する3個の無次元数の関数fexと乾き度の関係を示すもので、強い相関が見られ、3つの無次元数が乾き度に大きく関係していることが解る。

また、この近似式による計算値Xrと真値Xの相対誤差((X-Xr)/X)は0.001以下であった。

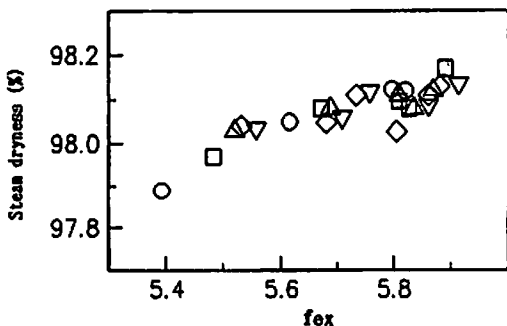


Fig.10 Interrelation of steam dryness for fex  
The mark is the same as those shown in Fig. 3

## 6 結 言

蒸気の乾き度を、関係する現象に関する無次元数で表現することを提案した。

気流中の液滴分離に関する無次元数  $\alpha_{nd}$  を策定し、その有効性を明かにした。

気液流れによる盛り上がり高さは、フルード数の関数として与えられると考えられる。

今回の場合、乾き度を3個の無次元数による近似式(13)で表すことが出来る。この式から得られる値の相対誤差は、0.1%以下であった。

## 文 献

- 1) 後藤寿徳・佐々木正美・中西俊一・門田 強・神崎泰洋：日本船舶機関学会誌，7，S15-S25 (1972)。
- 2) 友田 勇・老岡潔一：日本船舶機関学会誌，2，S63-S71 (1967)。
- 3) 石谷清幹・中西重康・杉田英昭・長沢啓行：日本船舶機関学会誌，12，387-394 (1977)。
- 4) 吉原計一：水産大研報，38(2・3)，149-157(1990)。
- 5) Cole, R., Rohsenow: W. M., CEP. Symp. Seri., 65-92 (1969), 211.
- 6) LEVY, S., Prediction of two-phase pressure drop and density distribution from mixing length theory. Trans. ASME., Ser. C, 85 (1963), 137-152.