

蒸気ドラム内の蒸気の乾き度について

蒸発面蒸気速度および水面からの高さの影響

吉原 計一

Experiments on Steam Purity in Boiler Steam Drum

Influences of Evaporating Steam Velocity and Vertical Distance
from Water Surface to Sampling Port

Keiichi Yoshihara

The moisture droplets entrained by steam from a boiler steam drum bring some trouble or damage to instruments and machines which are driven by steam. To avoid them, it is necessary to raise steam purity. To find the definite effects of evaporating steam velocity and vertical distance between water surface and a sampling port on steam purity, experiments were carried out on four different stages of steam velocity and on seven different stages of vertical distance respectively. Results are shown as follows. Steam velocity and vertical distance, relating to each other, have some influences on steam purity. Increase of vertical distance makes gravity separation effective and the effect becomes remarkable as steam velocity increases. With increase of steam velocity, the swelling caused by void becomes higher, surface waves become violent and lift force to the moisture droplets increases and mean diameter of the entrained droplets becomes large. As a result, at a low zone of the vertical distance steam purity decreases because many large droplets arrive, but at an adequate high zone of it gravity separation is accomplished effectively because the droplets become heavy, and it has a good effect on steam purification. However, if vertical distance increases too much and passing area for the steam decreases, steam velocity is increased and accordingly lift force to the droplets is increased. Consequently the effect of gravity separation on small droplets will be minimized.

1 緒 言

ボイラの蒸気ドラムで発生した蒸気は、その中に微細な水滴を含んでいる。この水滴は、その蒸気を用いる機

械および装置に、水滴自体あるいは水滴に含まれる不純物によって種々の悪影響¹⁾を及ぼす。この障害を減らすためには、この水滴の含有割合を少なくすること、すなわち、乾き飽和蒸気の含有重量割合（乾き度）を高める

ことが必要である。

蒸気の乾き度に影響を与える要因として、蒸気ドラム内の蒸気については、蒸気圧力、水面の高さ、蒸発量（蒸発面蒸気速度）および排水の性状等が考えられ、さらに蒸気ドラムから取り出される蒸気については、気水分離器の性能が考えられる。

これらの要因に関して、気水分離器に関する研究²⁾は多く、また、水面の盛り上がりについての研究^{3,4)}も幾つか見られるが、実際のボイラを用いた実験は少なく、特に蒸気室内の各高さにおける乾き度を研究した例は、著者の知る範囲では見当たらない。

本実験においては、実用のボイラを用い、蒸発面蒸気速度を4段階に変え、また、蒸気取り出し管の位置の高さを7段階に変えて実験を行い、それらが乾き度に及ぼす影響を明らかにした。以下にその結果を報告する。

2 記号

| | |
|------------|-------------------------|
| C_D | : 抗力係数 |
| d | : 直径 m |
| d_t | : 可搬限界粒径 m |
| f_a | : ボイド率 |
| g | : 重力加速度 m/s^2 |
| H_0 | : 水面計水位 m |
| H_{SV} | : 蒸気取り出し管入口高さ mm |
| h_1 | : ボイドによる盛り上がり高さ m |
| h_r | : 湿り飽和蒸気のエンタルピ kJ/kg |
| h' | : 飽和水のエンタルピ kJ/kg |
| h'' | : 乾き飽和蒸気のエンタルピ kJ/kg |
| Re | : レイノルズ数 |
| U_S | : 蒸気速度 m/s |
| U_{SO} | : 蒸発面蒸気速度 m/s |
| U_W | : 液滴速度 m/s |
| x | : 乾き度 % |
| γ_S | : 乾き飽和蒸気の比重量 kgf/m^3 |
| γ_W | : 飽和水の比重量 kgf/m^3 |
| μ_S | : 乾き飽和蒸気の粘性係数 kgf/m^2 |
| μ_W | : 飽和水の粘性係数 kgf/m^2 |
| ν_S | : 乾き飽和蒸気の動粘度 m^2/s |
| ρ_S | : 乾き飽和蒸気の密度 kg/m^3 |
| ρ_W | : 飽和水の密度 kg/m^3 |
| σ | : 表面張力 kgf/m |

3 実験装置

実験装置の概略系統を Fig. 1 に、ボイラの構成を Fig. 2 に、蒸気ドラムの内部構造を Fig. 3 に示す。本実験に用いた供試ボイラならびに計測・記録装置等の主な仕様は次の通りである。

3.1 供試ボイラ

| | |
|-------|---|
| 型式 | 2 胴 D 型水管ボイラ NHA-1500 型 |
| 蒸発量 | 1450 kg/h |
| 蒸気圧力 | 常用 1.177 MPa, 最大 1.569 MPa |
| 蒸気温度 | 飽和温度 |
| 伝熱面積 | 22.6 m ² |
| 蒸気ドラム | 内径 580 mm 長さ 約 2050 mm 板厚 14 mm, 19 mm |

気水分離器

| | |
|-------------|------------------------------------|
| ドライパイプ | 855 mm × 114 φ mm |
| ワイヤメッシュデミスタ | 220 mm × 72 mm × 50.5 mm 4 個 |
| 開口面積 | 190 × 43 mm ² × 4 |
| 取り付け高さ | 上端 常用水面上 196.6 mm 下端 " 155.1 mm |

不加熱降水管は設けられておらずバンク管の一部が降水管の働きをする。また、水面の波立ち抑制は蒸発管出口に設けられた抑え板によって行われる。

3.2 蒸気取り出し管

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

3.3 絞り乾き度計

| | |
|---------|---------------|
| 絞りノズル方式 | ノズル喉直径 2.7 mm |
|---------|---------------|

3.4 データ収集システム

| | |
|-------------------------|------------------|
| Central Processing Unit | OKITAC-4300b |
| Process Input Output | データ収集周期 32 ch/s |
| Magnetic Disk | 記憶容量 2.5 M words |

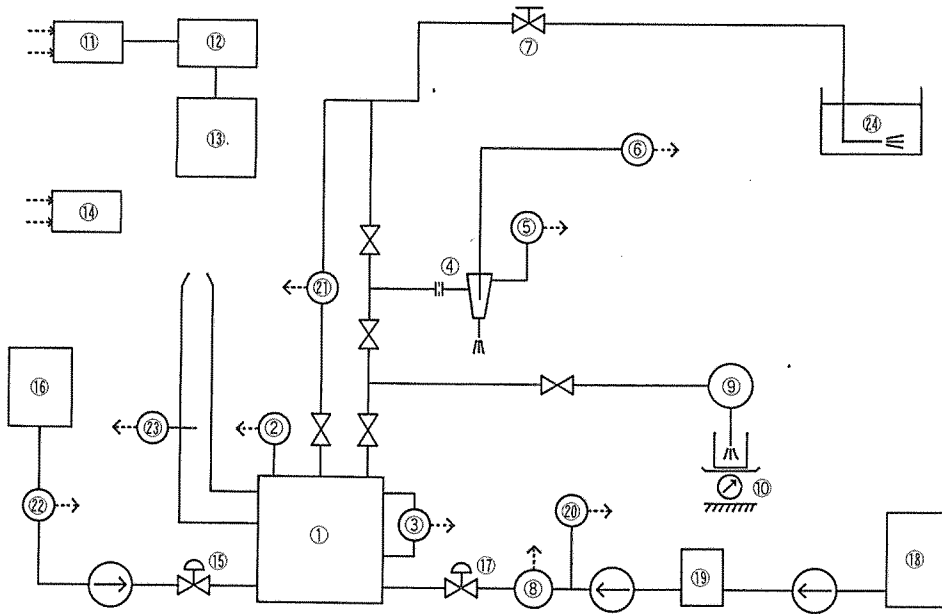


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | | |
|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| ① Boiler | ⑨ Air ejector | ⑰ Feed water regulating valve |
| ② Steam pressure gauge of boiler | ⑩ Weighing balance for condensed water | ⑱ Feed water storage tank |
| ③ Water level gauge of boiler | ⑪ Process input output | ⑲ Feed water surge tank |
| ④ Throttling calorimeter | ⑫ Central processing unit | ⑳ Thermometer for feed water |
| ⑤ Pressure gauge for throttled steam | ⑬ Magnetic disk | ㉑ Flow meter for steam |
| ⑥ Thermometer for throttled steam | ⑭ Self-balancing recorder | ㉒ Flow meter for fuel oil |
| ⑦ Exhaust steam regulating valve | ⑮ Fuel oil regulating valve | ㉓ Oxygen analyzer |
| ⑧ Flow meter for feed water | ⑯ Fuel oil tank | ㉔ Silencer |

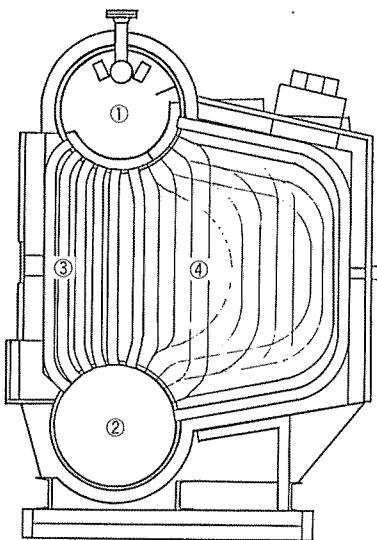


Fig. 2. Construction of boiler.

- | |
|---------------------------------|
| ① Steam drum |
| ② Water drum |
| ③ Down comer or generating tube |
| ④ Generating tube |

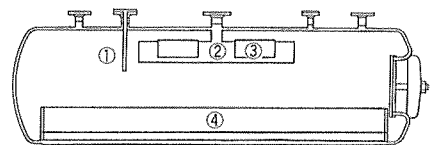


Fig. 3. Steam drum internals.

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

4 実験方法

実験は、ボイラの蒸気圧力を目標1.278MPa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7段階に変えて行った。それぞれの実験において、蒸発量の目標値を350, 650, 1000, 1300kg/hと変化させた。開口位置は常用水面上82.9, 128.6, 152.1, 174.9, 198.4, 244.4, 290.7mmの7段階である。

乾き度はボイラの蒸気室から取り出した湿り飽和蒸気を絞り、蒸気圧力、温度を計測してその保有熱量から(1)式によって求めた。その際、弁、配管からの放熱等大気状態の影響を若干受けるので、これら運転条件の違いを補正する際の基準とするため、各実験の蒸発量1000kg/hにおいて、主蒸気管側蒸気の乾き度も計測した。

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

また、絞り乾き度計に供給する蒸気の温度低下を極力少なくするために補助蒸気系から空気抽出器に毎時約46kgの蒸気を供給した。

ボイラの蒸気圧力および水位の制御は自動燃焼制御装置および給水制御装置によって行なわせ、蒸発量の調節は大気放出弁の開度を手動調節して行った。

各実験は、蒸発量を350kg/hから1300kg/hまで順次増加させ、続いて1300kg/hから350kg/hまで減少させる順序で行った。

計測は、蒸発量を変化させた後、絞り蒸気温度、同圧力、ボイラ蒸気圧力、同水位、給水流量、燃料流量等の主要な状態量がほぼ安定したことを打点記録計で確認して、開始した。蒸発量の計測は、給水流量と蒸発量が平衡した状態（計測中ボイラ水位が一定とみなせる状態）の給水流量で行った。

主要なデータの記録は、電子計算機システムにより、1秒毎のデータを300~400秒間採取し、その平均値を磁気ディスクのファイルに格納する方法で行った。

実験を通じて、缶水の性状を出来る限り一定に保つため各実験中ブローと薬注を行った。

5 実験結果

一連の実験中の大気状態は、気温18.2~26.3℃、湿度41.0~75.2%、気圧759.9~771.0mm Hgであった。

ボイラの蒸気圧力は、取り出し位置244.4mmで目標蒸発量350kg/hの場合(1.302MPa)を除き、1.283~

1.288MPaで殆ど一定とみなせる状態であった。また、水面計指示水位も常用水面+0.4~1.3mmの範囲にあり、ほぼ一定とみなせる状態であった。

これより、取り出し位置が一定である主蒸気管蒸気の乾き度は、蒸発量が同じであれば、各実験を通じてほぼ等しいはずである。このことから、各実験において基準用としての目標蒸発量1000kg/hの場合の主蒸気の乾き度を求め、その平均値に対して、各実験の同じ目標蒸発量の場合の乾き度が等しくなる温度を求めた。この温度と各基準状態の絞り蒸気温度との差をその実験の修正温度差として、各実験別に絞り蒸気温度を修正し、これより乾き度を求めた。

一連の実験における修正温度差は-1.0~+1.1℃の範囲内にあり、これによる乾き度の修正値は±0.11%の範囲内に入る。

計算に用いた蒸気の状態量は、実用国際状態式(1967)を用いて求めた。

乾き度に対する蒸発量の影響を述べるに当たっては、一般に多く用いられる蒸発水面における垂直方向への上昇蒸気速度(蒸発面蒸気速度と呼び U_{so} で表す)を用いて表す。

求めた乾き度と、各 U_{so} グループ毎の取り出し位置の高さととの関係をFig. 4~Fig. 7に、また、各取り出し位置毎の U_{so} との関係をFig. 8~Fig. 14に示す。

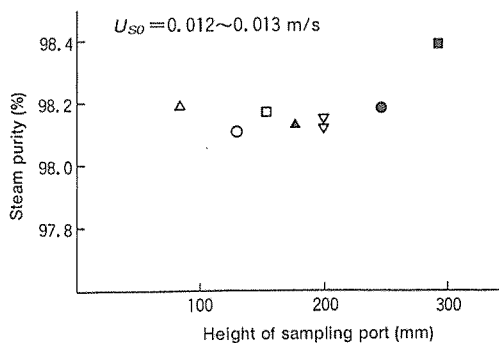


Fig. 4. Interrelation of steam purity for vertical distance.

- △ : Height of sampling port 82.9mm
- : Height of sampling port 128.6mm
- : Height of sampling port 152.1mm
- ▲ : Height of sampling port 174.9mm
- ▽ : Height of sampling port 198.4mm
- : Height of sampling port 244.4mm
- : Height of sampling port 290.7mm

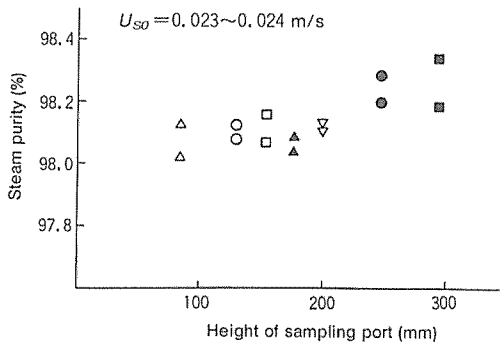


Fig. 5. Interrelation of steam purity for vertical distance.

- △ : Height of sampling port 82.9mm
- : Height of sampling port 128.6mm
- : Height of sampling port 152.1mm
- ▲ : Height of sampling port 174.9mm
- ▽ : Height of sampling port 198.4mm
- : Height of sampling port 244.4mm
- : Height of sampling port 290.7mm

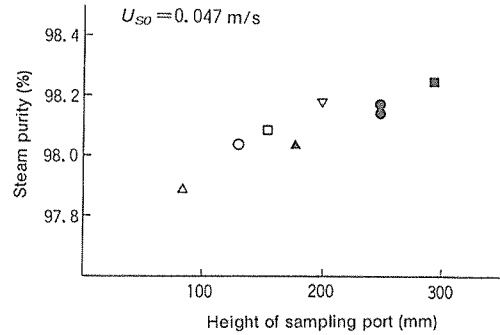


Fig. 7. Interrelation of steam purity for vertical distance.

- △ : Height of sampling port 82.9mm
- : Height of sampling port 128.6mm
- : Height of sampling port 152.1mm
- ▲ : Height of sampling port 174.9mm
- ▽ : Height of sampling port 198.4mm
- : Height of sampling port 244.4mm
- : Height of sampling port 290.7mm

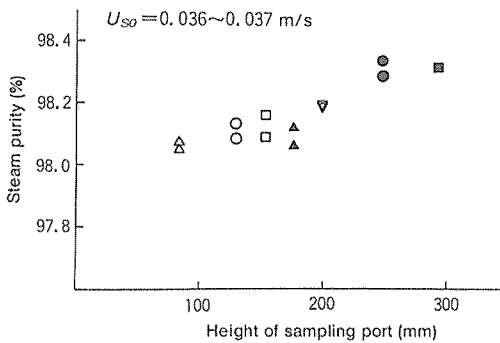


Fig. 6. Interrelation of steam purity for vertical distance.

- △ : Height of sampling port 82.9mm
- : Height of sampling port 128.6mm
- : Height of sampling port 152.1mm
- ▲ : Height of sampling port 174.9mm
- ▽ : Height of sampling port 198.4mm
- : Height of sampling port 244.4mm
- : Height of sampling port 290.7mm

これらの図から高さに関しては次のことがわかる。

a) Fig. 4~Fig. 7 に示されるように、いずれの U_{SO} グループの場合でも、高さ244.4mm以上になると乾き度は増加している。

b) Fig. 4.5 に示されるように、 $U_{SO} \leq 0.024$ m/s の蒸気速度の小さいところでは、高さ198.4mmまでは高さによる乾き度の差異は余り見られない。

c) しかし、Fig. 6.7 に示されるように、 $U_{SO} \geq 0.036$ m/s では、高さの低いところから高いところまで乾き度は順次増加している。

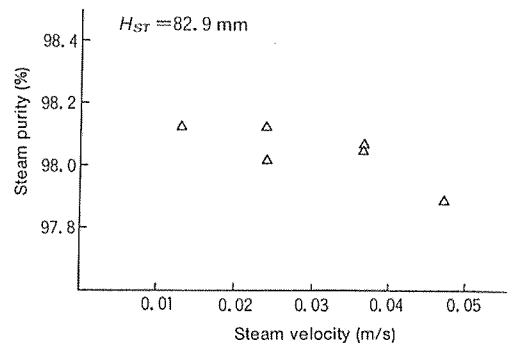


Fig. 8. Interrelation of steam purity for steam velocity.

- △ : Height of sampling port 82.9mm

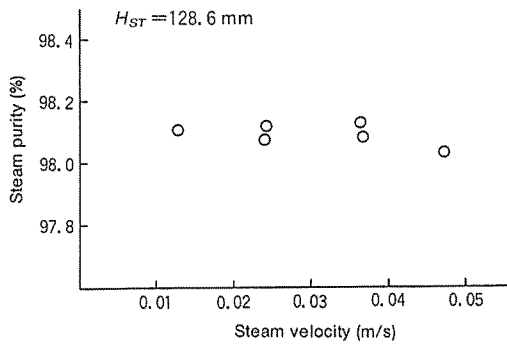


Fig. 9. Interrelation of steam purity for steam velocity.

○ : Height of sampling port 128.6mm

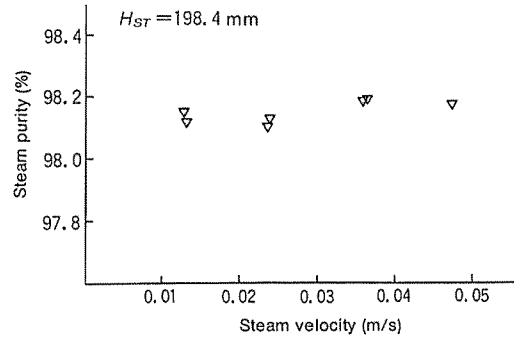


Fig. 12. Interrelation of steam purity for steam velocity.

▽ : Height of sampling port 198.4mm

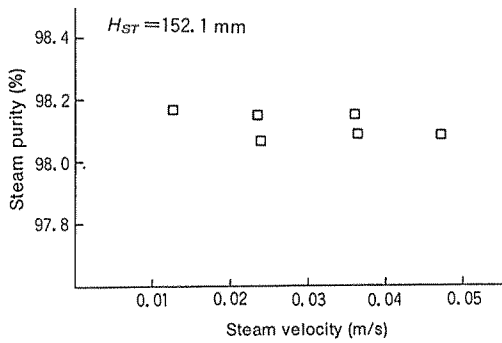


Fig. 10. Interrelation of steam purity for steam velocity.

□ : Height of sampling port 152.1mm

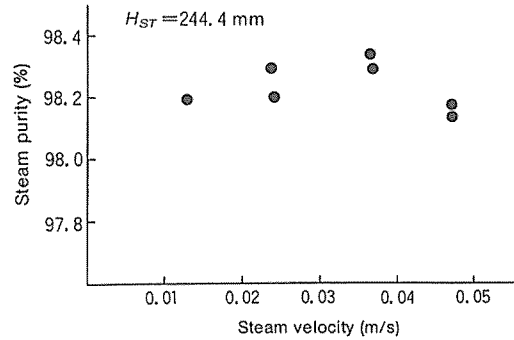


Fig. 13. Interrelation of steam purity for steam velocity.

● : Height of sampling port 244.4mm

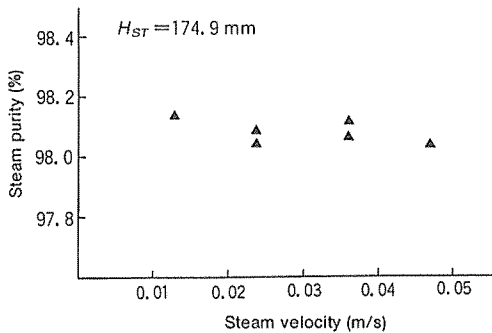


Fig. 11. Interrelation of steam purity for steam velocity.

▲ : Height of sampling port 174.9mm

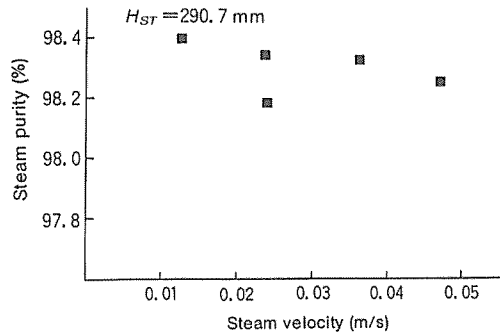


Fig. 14. Interrelation of steam purity for steam velocity.

■ : Height of sampling port 290.7mm

また、蒸発面蒸気速度に関しては次のことがわかる。
 d) 高さ198.4, 244.4mm以外では、ある U_{S0} までは乾き度は殆ど変化しないが、それを越えると U_{S0} の増大に伴って乾き度は減少している。

e) その低下が始まる U_{S0} は、高さによって順次大きくなり、高さ82.9mmでは、0.026 m/s、高さ128.6~174.9mmでは、0.037 m/s、高さ290.7mmでは、0.04 m/s 付近である。

f) また、Fig. 8.9 に示されるように、高さの低いもの程 U_{S0} の増大に対する乾き度の減少の割合が大きい。

6 考 察

蒸発水面からの高さと同蒸発面蒸気速度は、互いに関連して乾き度に影響を与えるが、一応分けて考察する。

6.1 高さの影響について

蒸発蒸気によって蒸気室に同伴された液滴の分離は重力によって行われる。

蒸気室で蒸気中に浮かんだ液滴が球形を保って移動すると仮定して、液滴の垂直方向の運動について考えると、液滴に働く力は、 $U_s > U_w$ の場合、上昇蒸気流による揚力と蒸気による浮力並びに重力の合成となり、(2)式で表すことが出来る。式中、 C_D は抗力係数で、本実験範囲内のように $Re < 1$ ではストークスの流れとなり、(3)式で表される。

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

$$C_D = \frac{24}{Re} = \frac{24 \nu_s}{(U_s - U_w) d} \dots\dots\dots(3)$$

(2)式の右辺において、第1項(揚力)および第2項(浮力)の合計が第3項(重力)より大きい場合は液滴は上昇するが、これが小さくなると $dU_w/dt < 0$ となり、加速が止まり、やがて液滴が分離されることになる。このため、

ア) 高さが高くなれば重力分離の効果が現れて乾き度は増大する。5. a) および 5. c) で乾き度が増加しているのはこの高さの効果による。

また、運転中のボイラにおいて、実際の蒸発水面は、ボイドの影響、ドラム軸方向への水の流れおよび沸騰による波立ちによって盛り上がる。 U_{S0} とボイド率の関係を表す式は幾つか提唱されているが、本実験では、ボイ

ドによる水位の上昇について、(4)式および後藤らの提唱した(5式⁴⁾)によって見積る。

$$h_1 = H_0 \left\{ \frac{1}{1 - f_d \left(1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w}\right)} - 1 \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$$f_d = 1 - \exp \left[-1.85 \left(\frac{U_{S0}^2}{g \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma_w - \gamma_s}}} \right)^{0.23} \right. \\ \left. \times \left(\frac{\mu_w}{\sigma} \sqrt{g \left(\frac{\sigma}{\gamma_w - \gamma_s} \right)^{0.5}} \right)^{0.2} \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.1} \right. \\ \left. \times \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w - \gamma_s} \right)^{0.13} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 15 は、(4)および(5)式に実験状態における物性値を代入して求めた蒸発面蒸気速度 U_{S0} に対するボイドによる盛り上がり高さの図である。

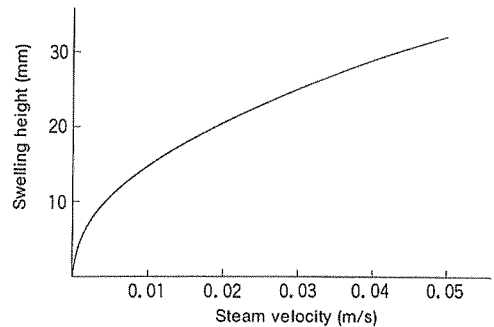


Fig. 15. Swelling height caused by void.

水の流れによる盛り上がりについては、友田らの実験による式³⁾等がある。しかし、水の流れおよび沸騰による波立ちによる盛り上がりは、各々のボイラの構造によって異なり、簡単には求まらず、本実験の供試ボイラについては適切な見積り方式が見当たらないが、高さに関しては、 U_{S0} の増大に伴い高くなると考えられる。すなわち、 U_{S0} の増大に対する水面の盛り上がりについては、波立ちによる盛り上がりを定量出来ないが、 U_{S0} が増えれば波立ちが激しくなり、液滴の離脱する水面を盛り上げると考えられ、ボイドによる盛り上がりから判断して本実験範囲内では、およそ U_{S0} に比例すると考える。

これらボイドおよび波立ちによる盛り上がりによって、実験範囲内では、

イ) 実水面は水面計指示水面より少なくとも 16.5 ~ 31.3mm 以上盛り上がり、これによって高さの効果を減少させる。これが、5. f) の高さの低いものほど乾き度

の減少の割合が大きい原因の一つと考えられる。

6.2 蒸発面蒸気速度の影響について

蒸気中の液滴に働く力は前述のように(2)および(3)式で表される。ここで、自らの飛び出し速度が0で、水面上に存在する液滴のうち揚力によって押し上げ可能な液滴の粒径は、(2)式に(3)式を代入し、 $dU_w/dt = 0$ 、 $U_w = 0$ 、 $U_s = U_{s0}$ とにおいて、式を整理して得られる(6)式の d_f より小さくしなければならない。すなわち、 d_f はその場合の同伴可能な液滴径の極めて近い近似値となるから、これを可搬限界粒径とみなす。これに実験状態における物性値を代入し、蒸発面蒸気速度との関係で表したものがFig. 16である。

$$d_f = \sqrt{\frac{18 \nu_s \frac{\rho_s}{\rho_w} U_{s0}}{g \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}\right)}} \dots\dots\dots(6)$$

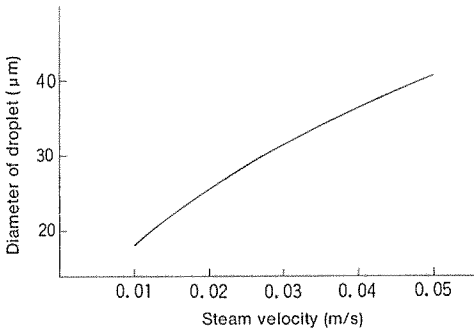


Fig. 16. Diameter of moisture droplet which may be entrained by steam.

この図から明らかなように、
 ウ) U_{s0} が大きくなれば可搬限界粒径は大きくなる。これより、蒸気によって同伴される液滴の粒径分布は直径が大きくなる方にずれ、その平均直径は大きくなると考えられる。
 エ) また、 U_{s0} が増加すると、平均直径の増加に加えて、水面の波立ちが大きくなり、飛び出し液滴量も増加するので、乾き度は減少する傾向にあるが、高さに応じて同伴液滴割合の増加の影響が異なって現れる。高さの低いところでは乾き度の減少が大きく、高さ152.1~198.4mmでは乾き度の減少は小さい。これが、5. e) の減少の始まりが高さによって変化する理由、5. f) の高さの低

いものほど乾き度の減少の割合が大きいもう一つの理由と考えられる。

オ) 逆に、 U_{s0} の小さいところでは、同伴液滴の平均粒径は小さく、波立ちも少なく、高さの効果はあまり現れない。5. b) および5. d) において乾き度の変化が少ない理由はこのことによる。

他方、(2)および(3)式から液滴に作用する揚力は直径の2乗と動粘度に比例する、また、浮力と重力による力は直径の3乗に比例するので、

カ) 平均粒径が大きくなれば重力の影響が大きくなり、ある高さ以上では重力分離の効果が大きく現れてかなりの液滴が落下し、乾き度の減少を抑制する傾向にある。5. c) の高さに応じて乾き度が増加している理由はこれによる。

前述のように高さが高くなると、重力分離の効果は大きくなるが、高さが高くなることによって、ドラム型ボイラでは蒸気通過面積が減少し、蒸気速度が速くなり、揚力が大きくなるので、小粒径のものについては、高さによる分離効果が小さくなる。このため、気水分離器を設ける場合には、高さとともに通過面積を考慮して、最適な高さに設置する必要がある。

7 結 論

蒸発面蒸気速度と蒸気取り出し位置の高さが、蒸気ドラム内の蒸気の乾き度に及ぼす影響を明かにするために、4段階の蒸気速度と7段階の高さについて実験を行い、次の結論を得た。

1. 蒸発面蒸気速度と蒸気取り出し位置の高さは、互いに関連して乾き度に影響を及ぼす。揚力を考慮すると、蒸気速度の増大に伴って、同伴液滴の平均粒径は増大する。
2. 蒸発面蒸気速度が増大すると、高さによる重力分離の効果は顕著に現れる。すなわち、
 - a) 蒸気速度が増大すると、殆どの位置で、乾き度は減少する。その割合は高さによって異なり、低いところほど減少の割合が大きい。
 - b) 蒸気速度が小さく (0.024 m/s 以下)、高さが200mm位までの範囲では、乾き度に対する高さの効果はあまり見られない。
 - c) 蒸気速度の増大に伴って、乾き度の減少が顕著になる蒸気速度は、高さの低いものほど小さい。

3. 蒸発面蒸気速度の増大に伴う水面の盛り上がりは、高さを減少させ、また、本実験範囲内では、蒸気速度にほぼ比例すると考えられる。この盛り上がりによる重力分離効果の減少の度合は、高さの低いところほど大きい。

文 献

- 1) 大盛俊男：日本船用機関学会誌, **17**, 564-570 (1982).
- 2) 石谷清幹・中西重康・杉田英昭・長沢啓行：日本船用機関学会誌, **12**, 387-394 (1977).
- 3) 友田 勇・老固潔一：日本船用機関学会誌, **2**, S 63-S 71 (1967).
- 4) 後藤寿穂・佐々木正美・中西敏一・門田 強・神崎泰洋：日本船用機関学会誌, **7**, S 15-S 25 (1972).