

【論文】

ネジ付きフィン伝熱面による飽和プール核沸騰熱伝達促進

中山 昭男*・安東 旭**

Promotion of Saturated Pool Nucleate Boiling Heat Transfer
by Screwed Fin at the Heat Transfer Surface

Akio NAKAYAMA and Akira ANDO

九州産業大学工学部機械工学科, 813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1

Screwed fin was mounted on the heat transfer surface, to promote saturated pool nucleate boiling heat transfer. The knowledge and findings obtained through this experiment are the following: (1) In larger number of screwed fins (1pce., 2pcs., 4pcs.), the more heat transfer is promoted, at a screwed fin heat transfer surface with a diameter of 30mm and a screw diameter of $d=8\text{mm}$. (2) The influence of the height of screwed fin on the promotion of heat transfer is not so conspicuous. (3) In one same heat flux, at the lower the pressure the more conspicuously the promotion of heat transfer is indicated. (4) In the scope of this experiment, we newly obtained non-dimensional formula of saturated pool nucleate boiling heat transfer by screwed fin heat transfer surface.

Key Words : nucleate boiling heat transfer promotion, screwed fin, dimensionless correlation

1. 緒言

核沸騰熱伝達促進を得ようとする試みは、熱エネルギーの有効利用に関連して非常に重要な課題であり、現在までにいろいろな方法が試みられている。そして、現在までの伝熱促進法は大別して、アクティブ型（外部動力を要するもの）とパッシブ型（外部動力を要しないもの）に分類される。パッシブ型の一例として、フィン付き伝熱面 (Takeyama et al., 1971), 焼結金属伝熱面 (Ito et al., 1980), サーモエクスセル伝熱面 (Nakayama et al., 1980), 溝付き管伝熱面 (Hamano and Chujo, 1984) などがある。上記の伝熱面は、良い伝熱性能を示すが、加工が複雑また製品コストに問題を有すると考える。

そこで、前報 (Nakayama and Toshimitu, 2003) では加工も簡単で、まだ行われていないネジ付きフィン伝熱面を作製し、ネジ部とネジを取り付けた箇所伝熱面の隙間より気泡核を供給し、核沸騰熱伝達促進を図り、実験範囲内で無次元整理式を得た。

本報は、前報に続き、新たにネジ付きフィン高さ $h=0, 40\text{mm}$ を追加し、また前報では、供試液として蒸留水のみであったが、本報では蒸留水とエチルアルコールの2種類を用いて実験を行った。そして、本実験の範囲内で本伝熱促進法による核沸騰熱伝

達の無次元整理式を新たに得ることを目的とする。

2. 実験装置および方法

Fig.1 は実験装置の概略図を示す。Fig.1 中の伝熱面は

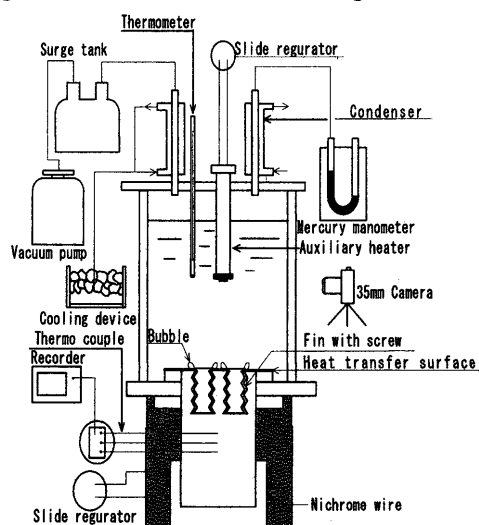


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 九州産業大学

** 工学研究科機械工学専攻

1000 番のエメリー紙で十分磨き, 脱気した蒸留水 (液位 150mm) またはエチルアルコール (液位 150mm) をガラス板およびベークライト板で出来た四角容器に入れ, 容器内を真空ポンプによって減圧し, 伝熱面圧力 $P=13.3 \text{ kPa}$ に調節する. 次に, 伝熱棒をヒータで加熱し, 定常状態にする. 上述のことを平面伝熱面およびネジ付きフィン伝熱面で行う. その際の伝熱面温度および熱流束は伝熱棒の首部に埋め込んだ三対の Cu-Co 熱電対の熱起電力より得られる温度勾配と伝熱棒の熱伝導率より得る. 実験は伝熱棒の温度分布が定常状態になったのち, 35mm カメラを用いて蒸気泡様相を撮影する. また, 同様のことを伝熱面圧力 $P=33.3, 101.3 \text{ kPa}$ 下で行う. Fig.2 は伝熱面直径 30mm に M8 のネジ付きフィンの取り付け位置および諸寸法を示す. なお, 伝熱棒への M8 ネジ付きフィンの埋め込み長さは, いずれの場合とも 12mm である.

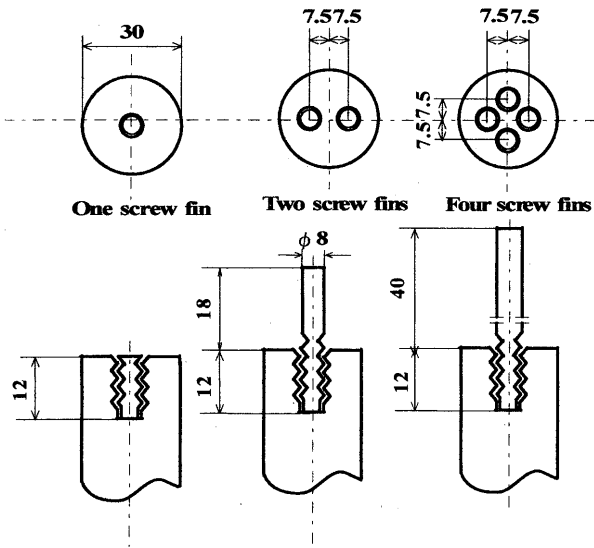


Fig.2 Arrangement of screw fin

3. 実験結果および考察

Fig.3(a),(b),(c),(d) は一例として, ネジ付きフィン高さ $h=0 \text{ mm}$ で, $P=13.3 \text{ kPa}$ におけるネジ付きフィンの有無およびネジ付きフィン数 1, 2, 4 本の場合の伝熱面上における核沸騰蒸気泡様相を示す. Fig.3(a)より, 平面伝熱面では間欠的な単気泡の核沸騰様相を呈するに対し, ネジ付きフィン伝熱面 Fig.3(b),(c),(d)では, ネジ部とネジを取り付けた箇所の伝熱面の隙間が気泡核を供給し, 発泡点数と発生頻度の増加を伴う核沸騰様相を呈することについて再確認した. また, ネジ付きフィン本数の増加(1 本(Fig.3(b)),2 本(Fig.3(c)))と共に過熱度(15.1K から 12.8K)が減少し, 小温度差熱源でほぼ等しい熱流束 q を生じている. エチルアルコールの場合, 平面

伝熱面で $\Delta T=28.3\text{K}$ のとき, ほぼ等しい q で図中に示すネジ付きフィン数 2 本 (Fig.3(d)) のとき $\Delta T=23.2\text{K}$ となっている.

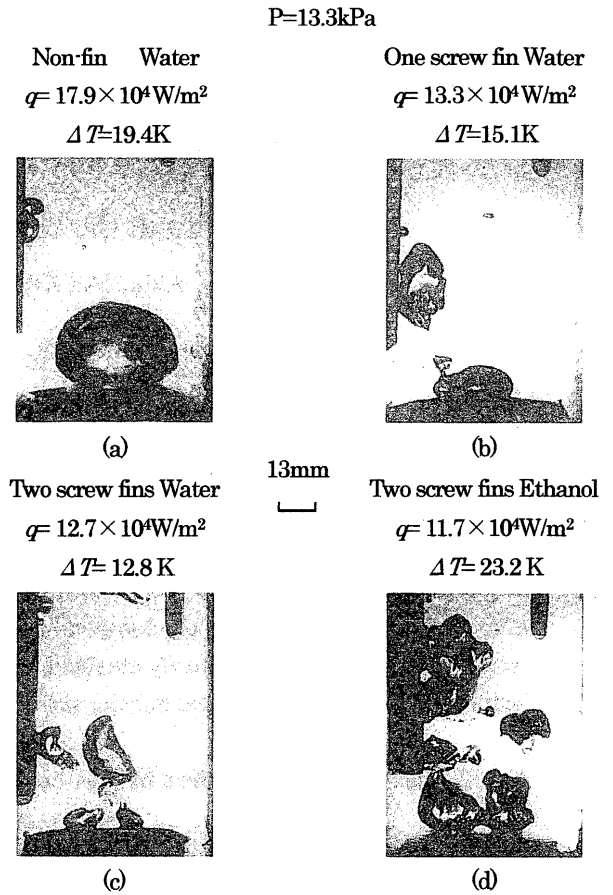


Fig.3 Boiling behavior on heating surface of fin with screw

Fig.4 (a), (b), (c) は供試液としてエチルアルコールを使用し, $P=13.3, 33.3, 101.3 \text{ kPa}$ の場合, ネジ付きフィン数 ($h=0\text{mm}$) を変化させた場合の熱伝達係数促進比 α/α_0 の値を示す. ここで, α_0 は平面伝熱面の熱伝達係数, α はネジ付きフィン伝熱面の熱伝達係数を示す. Fig.4(a),(b),(c) より, 同一の q では, P の減少と共に α/α_0 の値は大きい.

次に, ネジ付きフィン伝熱面の飽和プール核沸騰熱伝達に関する無次元整理式を次元解析より求める. $h>0$ の場合, 本次元解析では Eq.1 に示す 13 個の物理量を用いる.

それらは, 過熱度 ΔT , 熱流束 q , 液体の蒸発潜熱 L , 液体の熱伝導率 λ_b , 液体の粘性係数 μ , 液体の密度 ρ_l , 蒸気の密度 ρ_v , 液体の表面張力 σ , フィン直径 d , 伝熱面直径 D , 固体の熱伝導率 λ_s , 定圧比熱 C_p , フィン高さ h である. 得られた無次元整理式は Eq.(2) である.

$$F(\Delta T, q, L, \lambda_b, \mu, \rho_l, \rho_v, \sigma, d, D, \lambda_s, C_p, h) = 0 \quad (1)$$

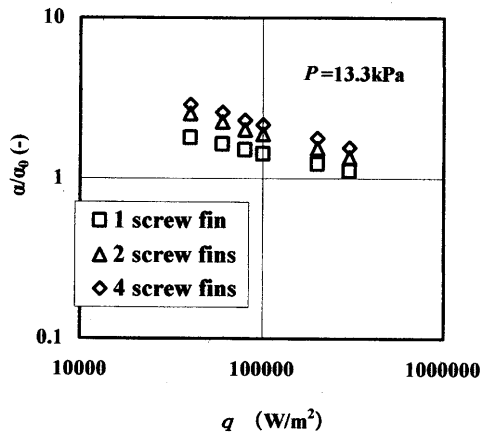
$$\frac{qnd}{\lambda_s \Delta T} = 765 \left[\frac{qnd}{\mu L} \right]^{0.150} \left[\frac{qnd}{\sigma^2} \right]^{0.149} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{0.051} \left[\frac{nd}{D} \right]^{0.481} \left[\frac{nd}{h} \right]^{0.477} \left[\frac{\lambda_f}{\lambda_s} \right]^{-0.177} \left[\frac{C_p \mu}{\lambda_f} \right]^{0.166} \quad (2)$$

Eq.2 の左辺はヌッセルト数、右辺第1項はレイノルズ数の効果、第2項は主として表面張力の影響、第3項は蒸気密度と液体密度の比、第4項はネジ本数 n を考慮したネジ付きフィン直径と伝熱面直径との比、第5項はネジ本数 n を考慮したフィン直径とフィン高さの比、第6項は液体の熱伝導率と固体の熱伝導率の比、第7項はプラントル数の影響を示している。 $h=0\text{mm}$ の場合、本次元解析では Eq.3 に示す12個の物理量を用いる。

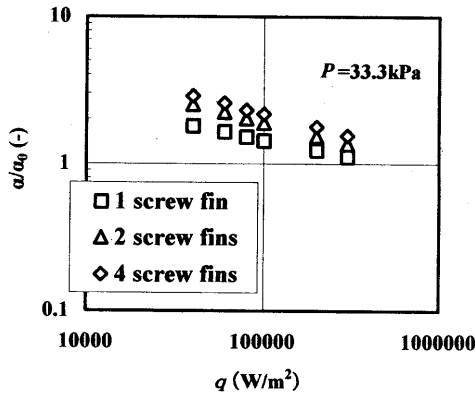
$$F(\Delta T, q, L, \lambda_s, \mu, \rho_v, \rho_l, \sigma, d, D, \lambda_f, C_p) = 0 \quad (3)$$

Eq.(3) を次元解析し、物理的意味を考慮すると Eq.4 を得る。

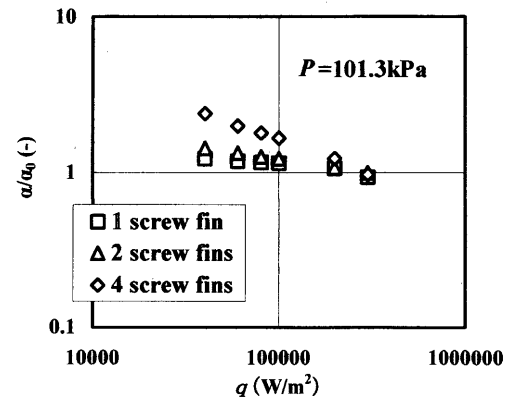
$$\frac{qnd}{\lambda_s \Delta T} = 765 \left[\frac{qnd}{\mu L} \right]^{0.150} \left[\frac{qnd}{\sigma^2} \right]^{0.149} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{0.051} \left[\frac{nd}{D} \right]^{0.481} \left[\frac{nd}{h} \right]^{0.477} \left[\frac{C_p \mu}{\lambda_f} \right]^{0.166} \quad (4)$$



(a)

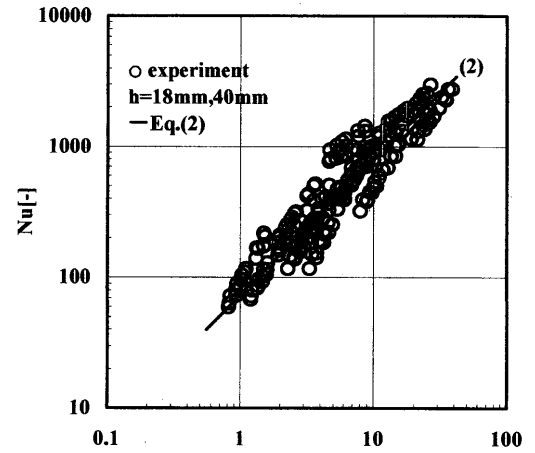


(b)



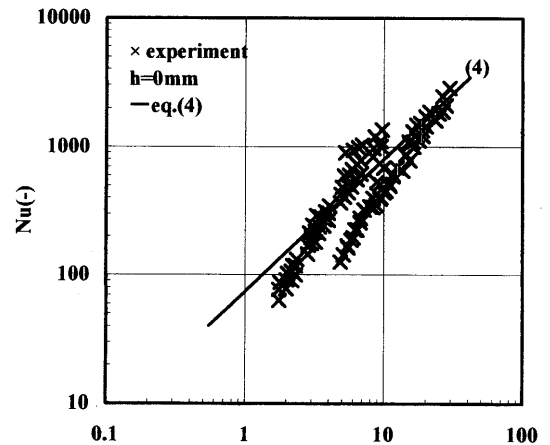
(c)

Fig.4 Relationship between α/α_0 and q



$$\left(\frac{qnd}{\mu L} \right)^{0.150} \left(\frac{qnd}{\sigma^2} \right)^{0.149} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.051} \left(\frac{nd}{D} \right)^{0.481} \left(\frac{nd}{h} \right)^{0.477} \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_s} \right)^{-0.177} \left(\frac{C_p \mu}{\lambda_f} \right)^{0.166}$$

Fig.5 Dimensionless arrangement



$$\left(\frac{qnd}{\mu L} \right)^{0.150} \left(\frac{qnd}{\sigma^2} \right)^{0.149} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.051} \left(\frac{nd}{D} \right)^{0.481} \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_s} \right)^{-0.177} \left(\frac{C_p \mu}{\lambda_f} \right)^{0.166}$$

Fig.6 Dimensionless arrangement

Fig.5 は Eq.2 と本実験結果を示す。Fig.6 は Eq.4 と本実験結果を示す。なお, Fig.5 は $h > 0$, Fig.6 は $h=0$ の場合を示す。Figs.5, 6 より, ネジ付きフィン高さ h の伝熱促進に及ぼす影響は顕著でないと見えよう。また, Eqs.2, 4 はネジ付きフィン伝熱面の核沸騰熱伝達を比較的良好に表示していると言えよう。Eqs.2, 4 で代表寸法を nd としたのは, 焼結金属伝熱面の核沸騰熱伝達に関する無次元整理式(Ito et al.,1980) で, 代表寸法を焼結金属厚さとしていることを参考にしてある。

4. 結言

平面伝熱面およびネジ付きフィン直径 $d=8\text{mm}$ の伝熱面による飽和プール核沸騰熱伝達促進に関する実験的研究を行った結果, 本実験の範囲内で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 伝熱面直径 30mm, ネジ直径 $d=8\text{mm}$ のネジ付きフィン伝熱面ではネジ付きフィン数 (1本, 2本, 4本) の多いほど伝熱促進は大きい。
- (2) ネジ付きフィン高さ h の伝熱促進に及ぼす影響は顕著でない。
- (3) 同一の熱流束では圧力が低い程, 顕著な伝熱促進を示す。
- (4) 本実験の範囲内で, ネジ付きフィン伝熱面による飽和プール核沸騰熱伝達の無次元整理式を新たに得た。

Nomenclature

c_p	= specific heat under constant pressure	[J/(kg · K)]
D	= diameter of the heating surface	[m]
d	= diameter of the fin with screw	[m]
h	= fin height	[m]
L	= latent heat of vaporization	[J/kg]
Nu	= Nusselt number	[-]
n	= number of the fin with the screw	[-]

P	= pressure on the heating surface	[kPa]
q	= heat flux	[W/m ²]
T_w	= heating surface temperature	[K]
T_s	= saturated temperature	[K]
α	= nucleate boiling heat transfer coefficient of the heating surface of the fin with the screw	[W/(m ² · K)]
α_0	= nucleate boiling heat transfer coefficient of the heating surface without the fin with screw	[W/(m ² · K)]
ΔT	= wall superheat (= $T_w - T_s$)	[K]
λ_l	= thermal conductivity of liquid	[W/(m · K)]
λ_s	= thermal conductivity of solid	[W/(m · K)]
μ	= liquid viscosity	[Pa · S]
ρ_l	= liquid density	[kg/m ³]
ρ_v	= vapor density	[kg/m ³]
σ	= surface tension of liquid	[N/m]

Literature cited

- Hamano, Y. and Y.Chujo ; "Nucleate Boiling Heat Transfer from the Grooved Surface," *Anan Natl. Coll. of Technology Research Bulletin*, **20**, 55-58 (1984)
- Ito T., K. Nishikawa, K. Tanaka and T. Yasumoto ; "Evaluation of the High-Performance Boiling Heat Transfer Plane," *17 th National Heat Transfer Symposium of Japan*, pp. 241-243, Kanazawa, Japan (1980)
- Nakayama, A. and Y. Toshimitu ; "Heat Transfer in Saturated Pool Nucleate Boiling by Screwed Fins at the Heating Surface," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **28**, 118-120 (2003)
- Nakayama, W., D. Daikoku, H. Kuwahara and T. Nakajima ; "Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surface," *ASME Journal of Heat Transfer*, **102**, 445-450 (1980)
- Takeyama, H., M. Ouchi and Y. Shoji ; "Rapid Transition in Boiling Heat Transfer Characteristics of the Extension Heating Surface," *Trans.JSME.*, **37**, 750-756 (1971)