

平板上の非ニュートン流体の乱流流れおよび熱伝達

渡 辺 信 治・小 竹 進

Turbulent Flow and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids on a Flat Plate

By

Shinji WATANABE and Susumu KOTAKE

Abstract: Flow and heat transfer characteristics of non-Newtonian fluids (0 to 0.3 wt.% CMC-solutions in water) past a flat plate were experimentally studied to obtain fundamental information about the behavior of non-Newtonian fluids in motion, especially in turbulent flow, and their heat transfer. Velocity and temperature distributions of the fluid past a plate were measured. As the main velocity of the fluid is increased, the velocity and the heat transfer characteristics approach those of Newtonian fluid. The feature of momentum and heat transfer of CMC non-Newtonian fluid becomes the same as that of Newtonian fluid at the main velocity larger than the value at which the shape factor of velocity boundary layer is nearly equal to that of the fully turbulent Newtonian flow. These characteristics of flow and heat transfer can not be accounted for by the Reynolds number based on the power-law model.

概 要

平板上を乱流状態あるいはそれに近い状態で流れる水および擬塑性をしめす CMC (カルボキシメチルセルローズ) 水溶液の速度分布および平板加熱時の温度分布を測定して、このような非ニュートン流体の流動および熱伝達特性について調べた。その結果、CMC 水溶液においても、十分に流速が大きくなると平板境界層内の速度分布・平板表面の熱伝達特性などはニュートン流体の乱流状態のものに近づき、乱流構造は両者で同様なものであることなどを明らかにした。また、このような乱流状態では、流動特性に“べき乗則”を用いたレイノルズ数はレイノルズ数としての意味をなさないことをしめた。

1. ま え が き

高分子化学の進歩によって、応力とひずみあるいはひずみ速度の関係がフックあるいはニュートンの関係にしたがわない非線形な関係をもつ物質あるいは粘性と弾性が同時にその変形に寄与する物質が多方面の工業的分野で応用され、こうした物質の流動およびその熱伝達の問題を取り扱かなければならない必要が急激に増加してきている。

このような問題の発端は、化学工業的な分野においてであるから、当然円管内の問題が比

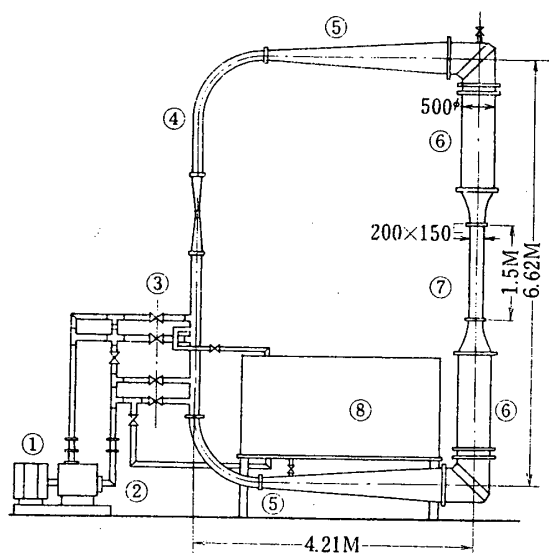
較的多くとりあげられ、特に粘性のみの非ニュートン流体の円管内の流れおよび熱伝達の問題については、数多くの解析的および実験的研究がなされてきている。これに反して、このような流体の物体まわりの流動およびその熱伝達の問題は、現象が複雑なことから実験的研究が簡単でないことなどの理由により、根本的かつ重要な問題であるにもかかわらずあまり研究されていない。非ニュートン流体の平板上の流れおよび熱伝達に関しては、流動特性に“べき乗則”を仮定した層流境界層近似計算[1]~[4]、円管内の速度分布からの類推により平均流速分布を仮定した乱流境界層計算[5]~[6]があるが、実験的研究としては著者らのもの[8]が唯一のものである。

本研究は、後者の実験的研究よりさらに広範囲な流速における、加熱平板上を流れる非ニュートン流体、特に擬塑性流体(CMC水溶液)の速度分布および温度分布を測定し、その流動特性、熱伝達特性について調べたものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。実験装置は電動機①により駆動される渦巻ポンプ②、流量調整部③、循環流路④、デフューザ部⑤、整流部⑥、測定部⑦および貯液そう⑧よりなっている。測定部は熱伝達実験において浮力の影響を考慮できるように地面に対して垂直に位置している。貯液そうより装置内に充填された流体は、渦巻ポンプによって装置内を循環し、その流量および流れ方向は流量調整部のバイパス弁によって調整される。ポンプによる流れの振動、みだれおよび管路曲りによる流れの振動、みだれおよび管路曲りによる流れの非一様性は整流部の整流格子により除去され、ポンプおよびモータの直接の機械的振動は2か所の防振継手により軽減される。また、流れの方向は、浮力の影響を調べられるように、流量調整部により上下逆方向に循環可能になっている。



- | | |
|----------|---------|
| ① 電動機 | ② 渦巻ポンプ |
| ③ 流量調整部 | ④ 循環流路 |
| ⑤ デフューザ部 | ⑥ 整流部 |
| ⑦ 測定部 | ⑧ 貯液そう |

図1 実験装置概要

の防振継手により軽減される。また、流れの方向は、浮力の影響を調べられるように、流量調整部により上下逆方向に循環可能になっている。

測定部を図2に示す。測定部は、流路断面が150×200mmの長方形断面をもつ長さ1500mmの垂直流路で、向いあった2枚の可換板により流路断面積を変化し、流路方向の平均流速が一定になるように調整される。加熱平板Aはこの流路断面積調整板Cの中心に設置され、その前後には速度分布測定用全圧ピトー管E、静圧孔F、主流温度測定用熱電対Dなどが取り付けられている。測定部片面はアクリル板が用いられており、これは速度分布測定用ピトー管の位置を正確に知るためと加熱平板の取りはずしのためである。なお、測定部壁には

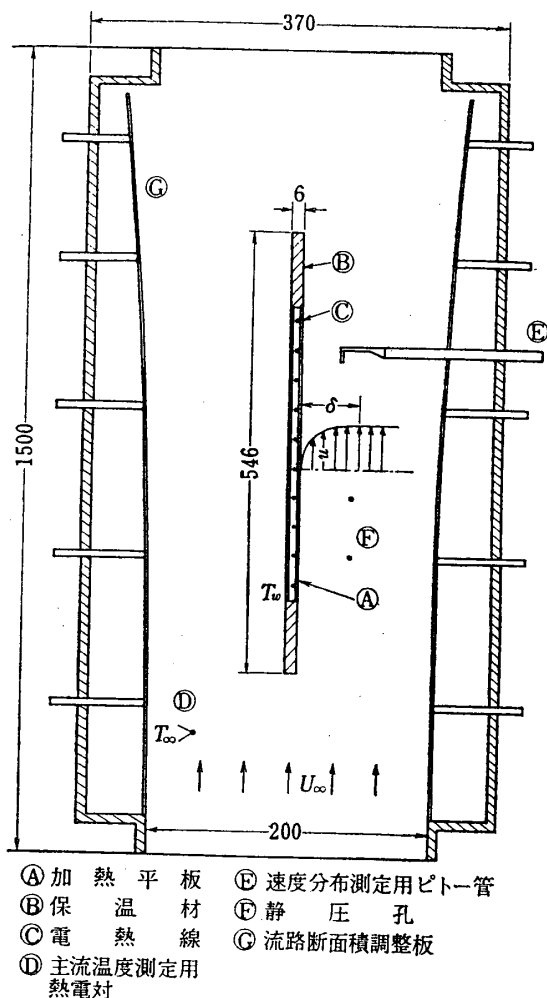


図2 測定部

静圧測定孔が主流方向に設けられてある。

図3に加熱平板の構造を示す。加熱平板の表面は厚さ1.5 mm、長さ360 mm、幅120 mmのステンレス鋼(SUS 27)板で#400紙やすりで表面仕上げしたものである。これらの平板は雲母を介して電熱線をサンドイッチにして全体の厚さを6 mmにしてある。一方、平板の前後には長さ85 mmの断熱板(マイカレックス)を取り付け、平板から流れに沿った熱伝導をシャ断してある。全長546 mmのこの加熱平板は外径5 mm、内径3.5 mmのステンレス管4本で側面を支持され、測定部に取り付けられている。このステンレス管は加熱平板内の電熱線および熱電対の取り出し口に利用されている。加熱平板の表面温度の測定には直径0.1 mmの銅-コンスタン熱電対を用いた。これらは、板幅中心線上にはんだ付され、平板表面上に流れ方向に直角に掘られた幅2 mm、長さ25 mmのみぞに耐熱接着剤で固定されている。熱電対埋込か所は板の先端より193 mm、233 mm、313 mm および 353 mm の4か所である。

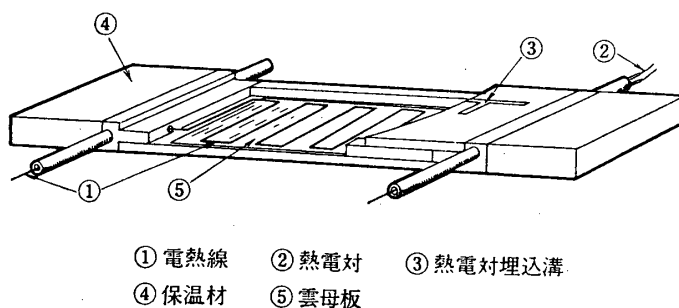


図3 加熱平板構造

2.2 実験方法

実験に用いた流体は水および CMC (カルボキシメチルセルローズ) 水溶液 (0.045%~0.345%重量) である。CMC と水との割合をきめ、これを貯液そう⑧と流量調整部③および渦巻ポンプ②の流路を循環させ CMC 水溶液の中には多量の空気を含んでいるので、この空気を取り除くため回流水路内に水溶液を満たし、約10時間ほど循環させると渦巻ポンプお

よび流路の摩擦によって流体温度が上昇し水溶液内の空気は空気抜き弁より自然に取り除かれる。このようにして十分に空気抜きができたあと、流体を渦巻ポンプより所定速度で循環させ、測定部で速度分布および温度分布を測定する。

測定部内の流れ方向の主流速度は、厚さ 1.5 mm のステンレス製の流路断面積調整板により流路断面積を流れ方向に変化させることにより、測定部の入口から出口までの変化が 0.8% 以内に調整された。また、加熱平板の両側の速度分布も正確に対称になるように調整された。

速度分布は、先端が 0.8 mm × 2.5 mm の長方形断面をもつ全圧ピトー管による全圧と、その断面における測定部壁面での静圧を用いて算出した。これらの圧力の測定には、逆U字管マノメータを用い、上部にシクロヘキサン（比量 0.78）下部に水を入れて圧力差が拡大できる微圧測定装置を用い、濃度の濃い CMC 水溶液などでは応答がおそいためこの測定には十分な時間をかけた。全圧ピトー管は、平板の先端から 193 mm, 233 mm, 313 mm および 393 mm の 4 か所で平板に垂直方向に移動させた。なお、実験した主流速度は実験装置の許応能力から約 40~190 cm/s の範囲であった。

平板の加熱は商用交流を用い、流体への熱流束 q は加熱平板内の電熱線に与えた電力を加熱平板の表面積（マイカレックス部分を除く）で除して求めた。実験した熱流束 q は (0~

2.435×10^5) kcal/hm² の範囲である。

2.3 使用流体の特性

使用した流体は水および CMC(カルボキシメチルセルローズ) 水溶液であり、これらのせん断応力 τ (g/cm²) とずり変形速度 d (1/sec) の関係すなわち流動特性を毛細管法で求めた結果を図 4 に示す。これらの関係は便宜上いわゆる“べき乗則”で表わされるが、ここでもそれにならって、せん断応力 τ はずり変形速度 d の n 乗に比例し、その比例定数を K とするとき ($\tau = K \cdot d^n$)、使用した流体の n および K の値と濃度との関係を表 1 にしめす。

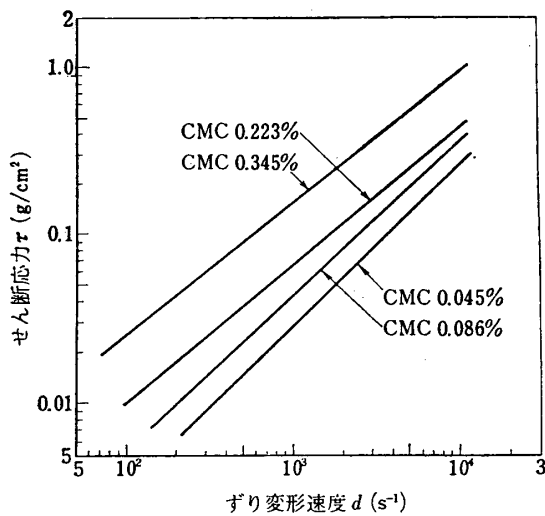


図 4 流動特性

表 1 べき乗則流動特性

CMC wt %	n	$K: \text{gcm}^{-2}\text{s}^n$			層流境界層の厚さ		
		30°C	40°C	50°C	δ_a/δ_u	δ_m/δ_u	δ_a/δ_m
0.000	1.000	$\times 10^{-5}$ 0.816	$\times 10^{-5}$ 0.666	$\times 10^{-5}$ 0.560	0.312	0.119	2.610
0.045	0.960	6.200	4.750	3.555	0.304	0.114	2.680
0.086	0.925	12.150	9.700	8.250	0.296	0.108	2.750
0.223	0.828	29.400	22.400	18.200	0.274	0.093	2.940
0.345	0.790	91.200	73.600	68.800	0.265	0.088	3.020

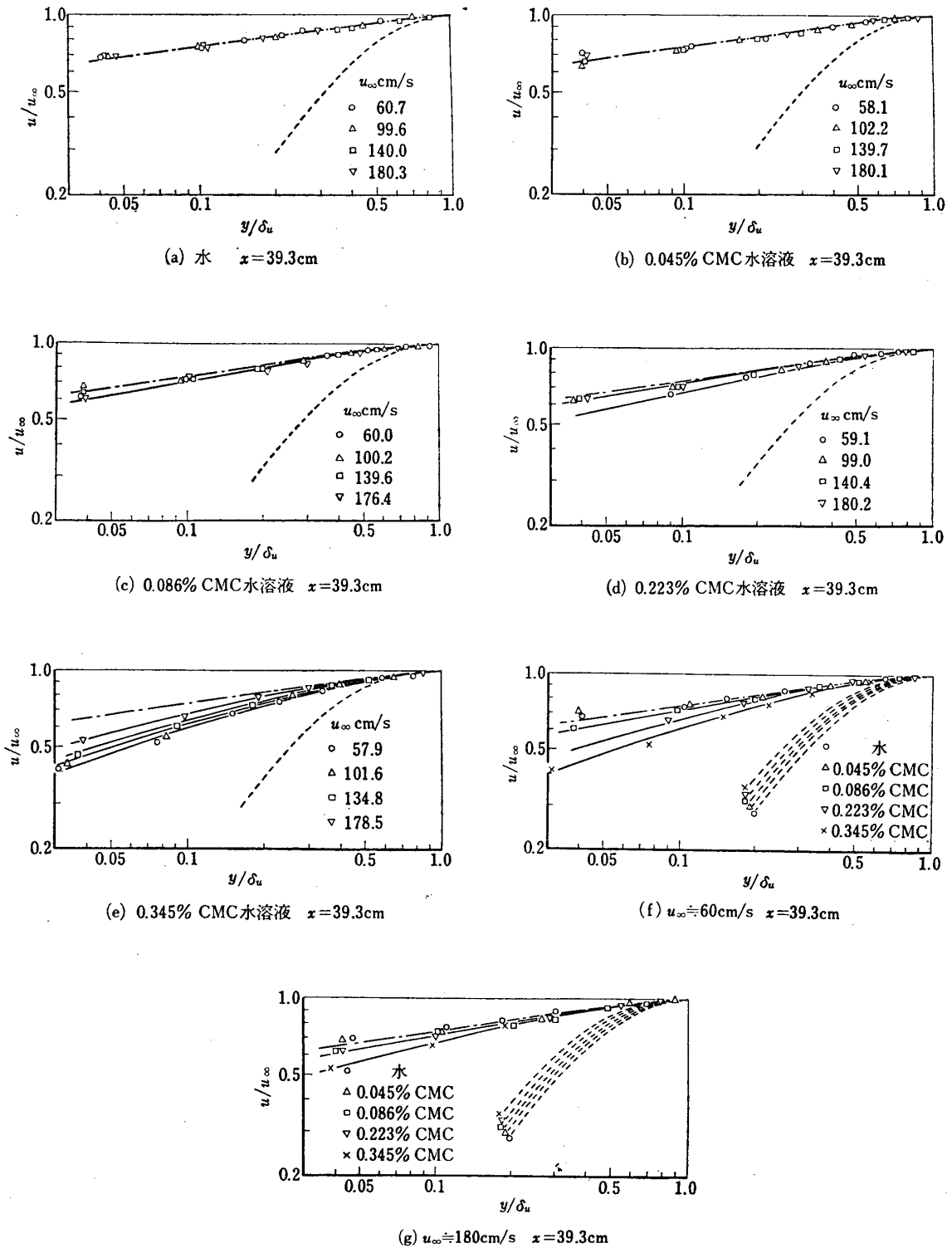


図5 速度分布

CMC 水溶液の熱伝導率, 密度を測定したが実験範囲内では水の場合とほぼ同じであった。加熱時のこれらの物性値は加熱平板表面温度 T_w と主流温度 T_∞ の算術平均温度に対するものを使用した。

3. 実験結果

3.1 速度分布

水および CMC 水溶液の平板に垂直方向の速度分布の例を図5に示す。縦軸は平板に平行な速度 u と主流 (平板から十分離れた所で速度が一様になったところでの) 速度 u_∞ との比を表わし, 横軸は平板からの垂直距離 y の境界層厚さ $\delta(u=0.997u_\infty)$ に対する比を表わす。点線は参考までに, 表1の流動特性を用いて層流境界層近似[2]により数値計算した層流速度分布をしめす。一点鎖線は, ニュートン流体の乱流状態ではほぼ成り立つといわれている $1/7$ 乗則の関係をしめす。これらの図によると CMC 水溶液の速度分布は, 主流速度が (60~180) cm/s および濃度が (0.045~0.223) % の範囲では顕著な差がなく, 水の乱流状態の速度分布 ($1/7$ 乗則分布) に近い分布をしめす。濃度が大きく (0.345%) 流速が小さい場合は, 水の乱流状態の速度分布からはずれ層流分布に近づくが, 流速をあげるにしたがいやはり同様な水の乱流状態での速度分布に近づいていくことがわかる。これらのことから, 水および CMC 水溶液の流動特性が異なることより一概に断定することはできないにしても, 100 cm/s 付近の主流速度ではこれらの CMC 水溶液の流れも乱流状態に近い流れになるものと推測される。また, この乱流状態と推測される状態になる主流速度は CMC 水溶液の濃度が小さいほどより低い値をとることがわかる。

図6(a), (b) および (c) は速度境界層厚さ δ_u , 排除厚さ δ_a , および運動量厚さ δ_m を主流速度 u_∞ についてしめたものであり, (d) は運動量厚さ δ_m と排除厚さ δ_a との比, いわゆる形状係数 (δ_a/δ_m) をしめす。いずれの値も, 同一流速に対しては, CMC 濃度が大きいほど大きな値をとる。同一濃度に対しては, 速度が大きいほど小さい値をとるが, 流速が大きくなるにしたがい, その変化は少なくなり, ある一定値に収束する。

円管内の非ニュートン流体の流動においては, 慣性力と粘性力の比, レイノルズ数 Re , とし, せん断応力 τ とずり変形速度 d の関係に便宜上 “べき乗則” 関係を仮定し, 長さの次元に管径 (D) を用いたレイノルズ数 $R_n(=\rho u_\infty^2/K(u_\infty/D)^n)$ が用いられ, 管摩擦係数, 管壁熱伝達率などはこのレイノルズ数 R_n で満足できる程度に整理されることがしめされている。流れが層流状態から乱流状態への遷移もニュートン流体の場合と同じくこのレイノルズ数 $R_n \approx 2000 \sim 4000$ 付近で起こるといわれ, CMC 水溶液では濃度が増すにしたがいこの遷移点のレイノルズ数 R_n はいくぶん大きくなるともいわれている[7]。平板上の流れの場合にも, 長さの次元として平板前縁からの距離をとって, このようなレイノルズ数 $R_n(=\rho u_\infty^2/K(u_\infty/x)^n)$ を用い, これに対する排除厚さ (δ_a), 運動量厚さ (δ_m) および形状係数 (δ_a/δ_m) の関係をしめすと図7のようになる。形状係数 (δ_a/δ_m) の値は層流状態では約 2.6~3.0 の範囲にあり (表1参照), 乱流状態ではニュートン流体の場合約 1.3 である。また, 各境界層厚さは層流状態の流れでは $\delta_{a,m}/C_{a,m}(n) \cdot R_n^{-1/(1+n)}$ ($C(n)$: n の値によってきまる定数) の関係をもち, $\delta/x - R_n$ の関係は n の値によって異なる直線となる。形状係数 δ_a/δ_m

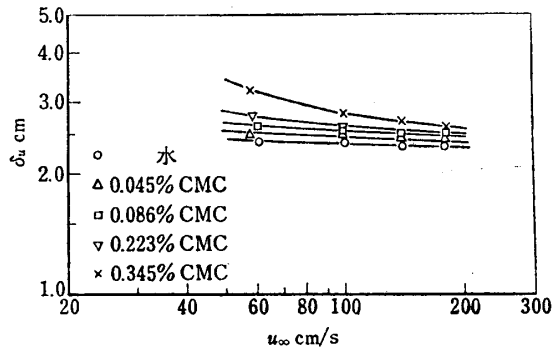


図6 (a) 速度境界層厚さ
(CMC 水溶液, $x=39.3$ cm)

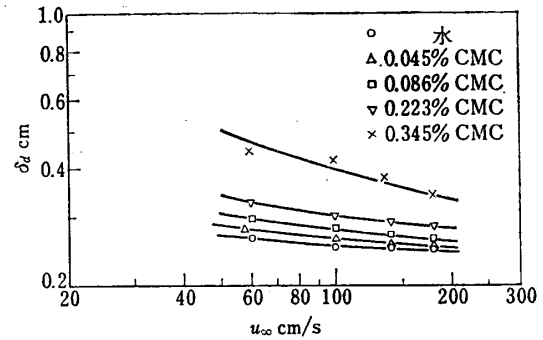


図6 (b) 境界層排除厚さ
(CMC 水溶液, $x=39.3$ cm)

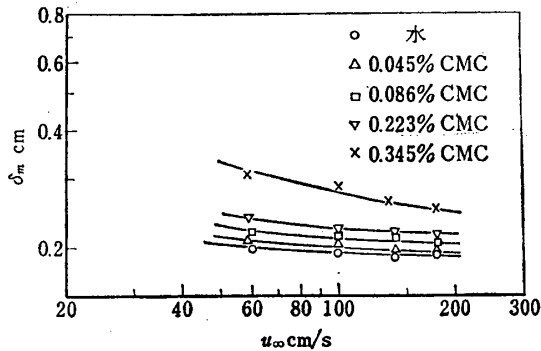


図6 (c) 境界層運動量厚さ
(CMC 水溶液, $x=39.3$ cm)

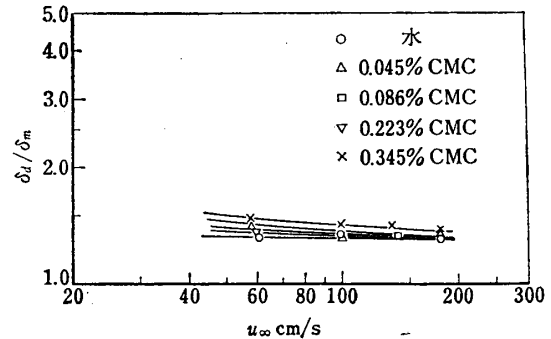
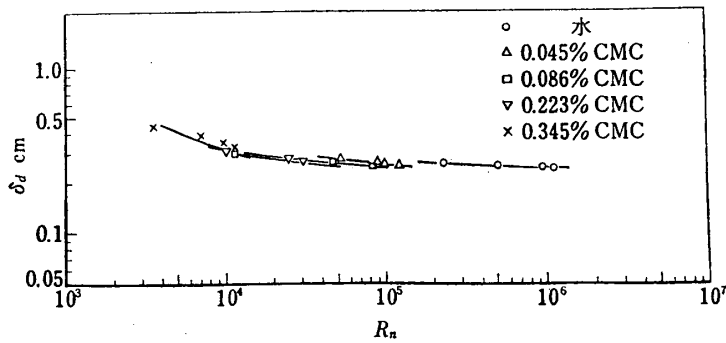
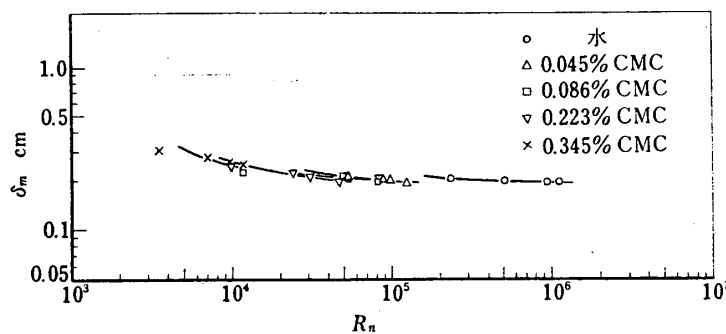
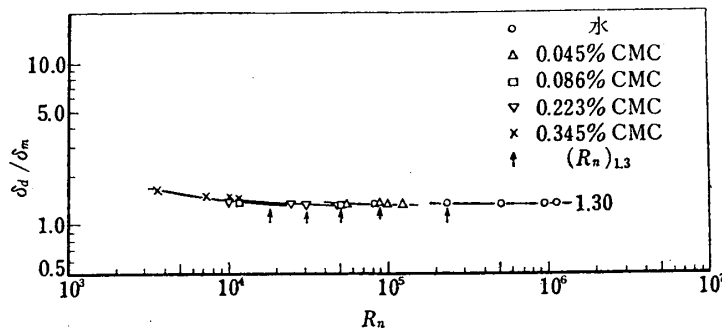


図6 (d) 形状係数
(CMC 水溶液, $x=39.3$ cm)

$\delta_m = C_d(n)/C_m(n)$ となり, n による定数となる. 図7(a), (b) をみると, $\delta - R_n$ の関係は R_n の値が大きくなるにつれ CMC 濃度 (n) に関係しなくなり, また, R_n の効きも弱くなる. 図7(c) においても, δ_d/δ_m の値は R_n が大きくなるにつれ CMC 濃度に関係なく $n=1$ の場合の値 1.3 に近づくことがわかる. この近づき方は CMC 濃度が濃い程より小さな主流速度 R_n でこの値に近づく. すなわち, R_n のより小さな値で十分な乱流状態になることを意味する. この傾向は既報の実験結果 [8] と同じである.

このような事実および後述する熱伝達特性などから, 各 CMC 濃度における乱流構造は概略同じのものであると推定することができ, R_n はレイノルズ数としての本来の意味をもたなくなることがわかる. 非ニュートン流体においてもニュートン流体と同様に, 非常に平板表面に近いところを除いた境界層内の速度分布は, そこに働く表面でのせん断応力 τ_w によってきまり, いわゆる速度欠陥法則がなりたつとすると, $(u_\infty - u)/\sqrt{\tau_w/\rho}$ (ρ : 密度) は y/δ_u の関数として一義的にきまる. 各 CMC 濃度におけるこの関係は乱流状態では同一のものになる (図5) とすると, その点では $\tau_w/\rho u_\infty^2$ の値は等しくなり, したがって, δ_d/δ_m の値も等しくなる. すなわち, 水の場合の乱流状態での δ_d/δ_m の値を 1.3 とすると, $\delta_d/\delta_m = 1.3$ となるレイノルズ数 ($\rho u_\infty^2/\tau_w$) は各 CMC 濃度において等しいはずであり, また, この値以上のレイノルズ数 (主流速度) では δ_d/δ_m は当然のことながら δ_d および δ_m の値は CMC

図7 (a) δ_d と R_n ($x=39.3$ cm)図7 (b) δ_m と R_n ($x=39.3$ cm)図7 (c) δ_d/δ_m と R_n ($x=39.3$ cm)

濃度によらないはずである。図8は $\delta_d/\delta_m=1.3$ となる主流速度 $(R_n)_{1.3}$ を流速の基準にとった境界層厚さをしめす。 $\delta-R_n$ の関係は $R_n \geq (R_n)_{1.3}$ では各流体ともに同一になり、乱流状態では CMC 濃度に関係なく同様な乱流構造をもつことがわかる。こうした傾向は前報の場合と全く同じである。

つぎに、平板を加熱した場合の速度分布の例を図9にしめす、これらの図をみると、速度分布は、加熱の程度を大きくするにしたがってより乱流状態のものに近づくが(図9(c))、乱流状態になると加熱の程度にはよらない分布をしめす(図9(a), (b))ことがわかる。

なお、温度分布は、その分布する厚さが速度のそれに比して一けた小さく、精度の良い測定は困難であった。しかし、以上の結果およびつぎの熱伝達特性などを考え合わせると、

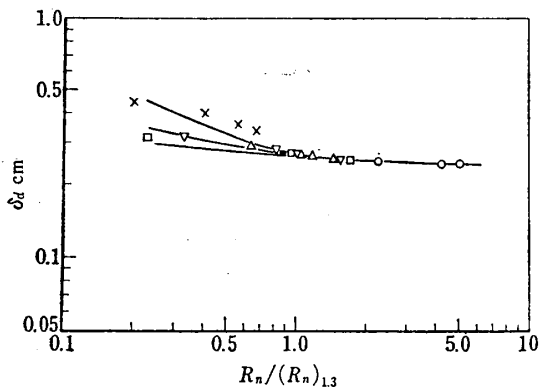


図8 (a) 境界層排除厚さ
(CMC水溶液, $x=39.3$ cm)

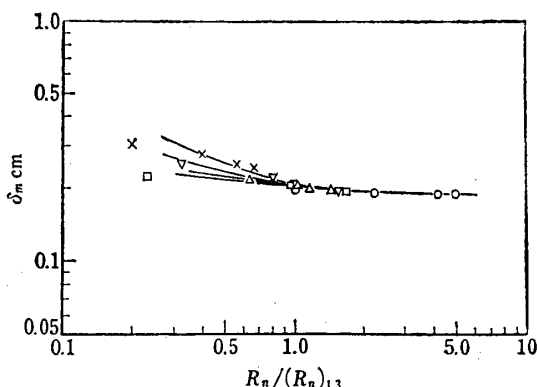


図8 (b) 境界層運動厚さ
(CMC水溶液, $x=39.3$ cm)

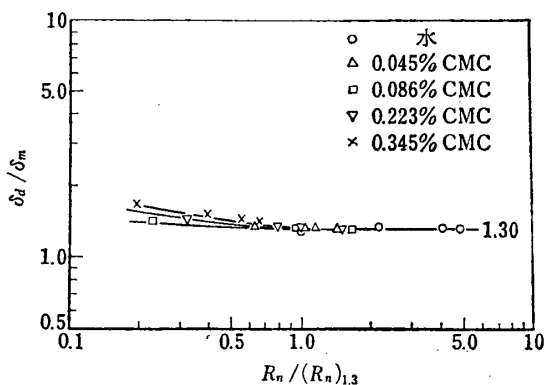
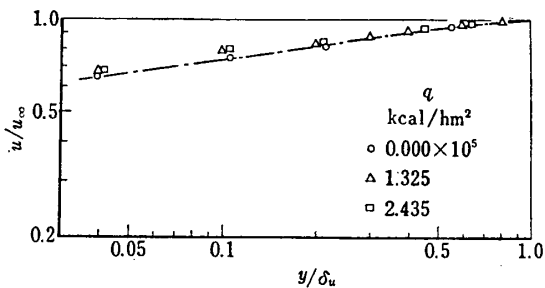
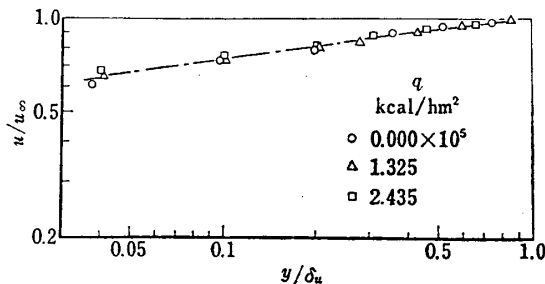


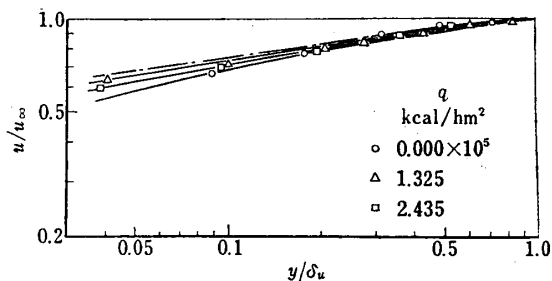
図8 (c) 形状係数 (CMC水溶液, $x=39.3$ cm)



(a) 0.045% CMC水溶液 $u_{\infty}=60$ cm/s $x=39.3$ cm



(b) 0.086% CMC水溶液 $u_{\infty}=60$ cm/s $x=39.3$ cm



(c) 0.223% CMC水溶液 $u_{\infty}=60$ cm/s $x=39.3$ cm

図9 加熱時の速度分布

CMC 濃度による温度分布の様子は、速度分布の場合程顕著でないにしてもほぼ同様な傾向をもち、乱流状態では CMC 濃度によらない温度分布をしめすものと思われる [8].

3.2 熱伝達特性

熱伝達率 h は、平板から流体への単位時間、単位面積あたりの熱流束 q を平板の表面温度 T_w と主流温度 T_∞ の差で除して求め、その無次元数であるヌセルト数 N_u は、長さの次元に加熱開始点からの距離 x_0 を用いて $N_u = hx_0/\lambda$ (λ : 流体の温度 $(T_w + T_\infty)/2$ での熱伝導率) と定義する. このヌセルト数 N_u とレイノルズ数 R_n を用いて整理すると図 10 のように、ニュートン流体においてはヌセルト数 N_u はレイノルズ数 R_e とプラントル数 Pr に関係することがわかっており、 $N_u Pr^{-0.33}$ が R_e のみの関数であるような関係をもつ. 動

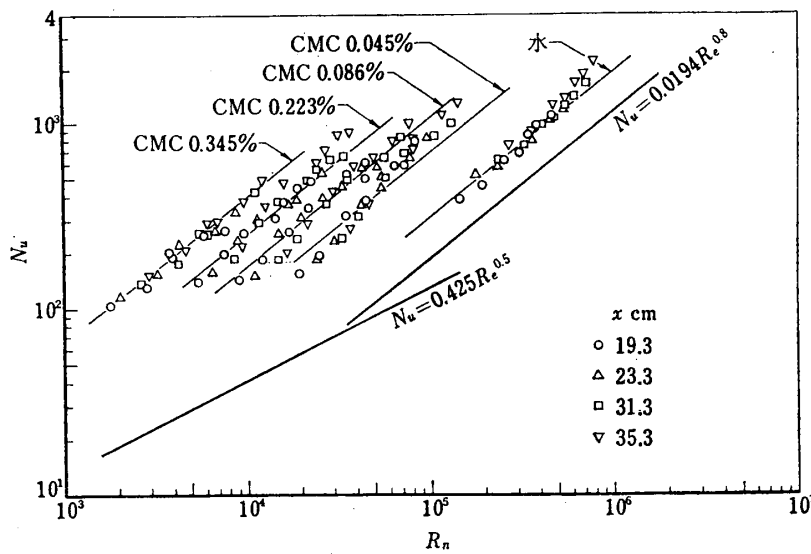


図 10 (a) 熱伝達特性 ($q=1.325 \times 10^5$ Kcal/hm²)

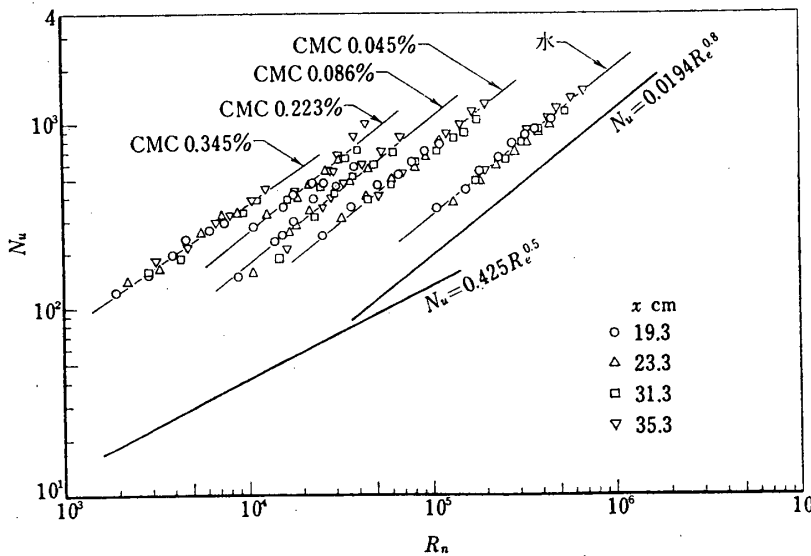


図 10 (b) 熱伝達特性 ($q=2.435 \times 10^5$ Kcal/hm²)

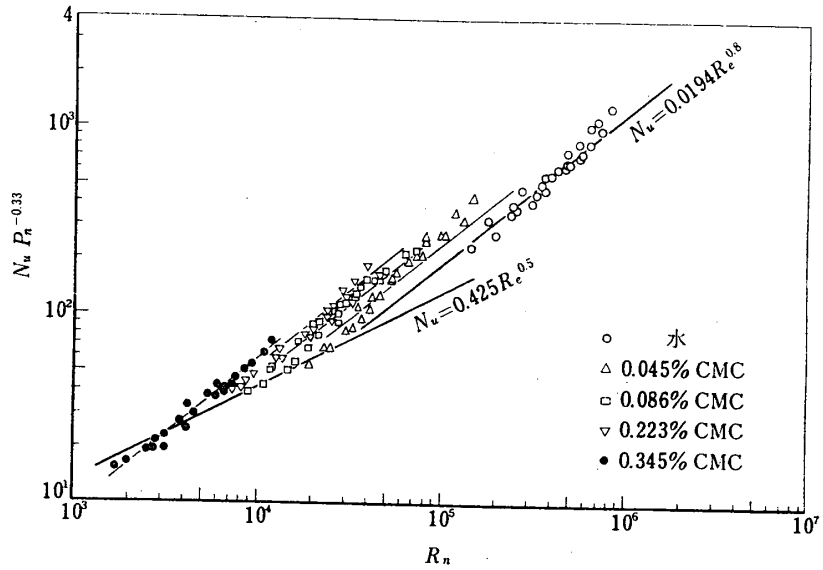


図 11 (a) 熱伝達特性 ($q=1.325 \times 10^5$ Kcal/hm²)

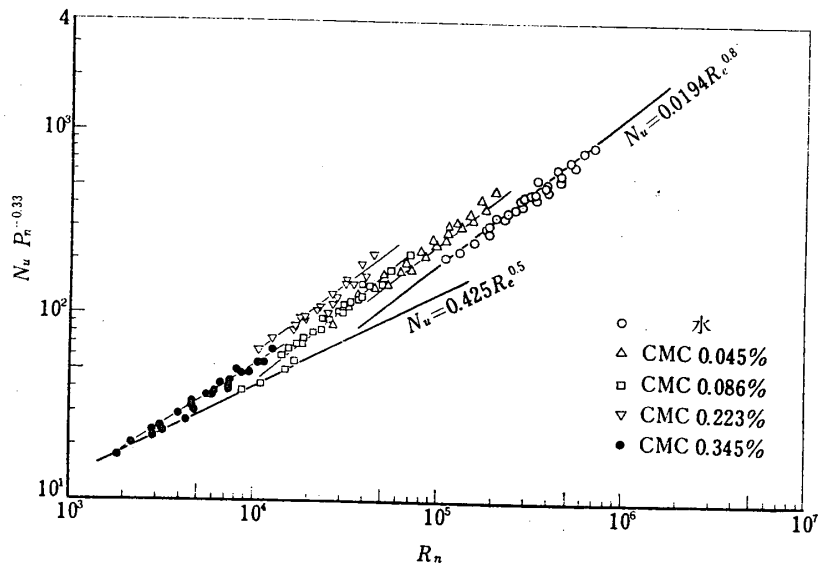


図 11 (b) 熱伝達特性 ($q=2.435 \times 10^5$ Kcal/hm²)

粘性係数 ν_n を“べき乗則”を用いて $\nu_n = K/\rho \cdot (u_\infty/x)^{n-1}$ と定義し、 $P_n = \nu_n/\alpha$ (α : 流体の温度伝ば率) とし、このプラントル数 P_n を用い、縦軸に $Nu P_n^{-0.33}$ 、横軸にレイノルズ数 R_n をとって整理すると図 11 のようになる。図 10, 11 中の実線はニュートン流体の実験式である。

これらの図をみると、熱伝達特性が $Nu \sim R_n P_n^{-0.33}$ の関係で表わされるとみることはむずかしい。特に、乱流状態ではむずかしい。この乱流状態の熱伝達特性になる R_n の値は、CMC 濃度が大きいほどより小さい。この傾向は前述の境界層厚さの場合と同様である。熱伝達特性においても、 $\delta_d/\delta_m = 1.3$ の点を各 CMC 濃度で一致させ、ヌセルト数 Nu と主流速

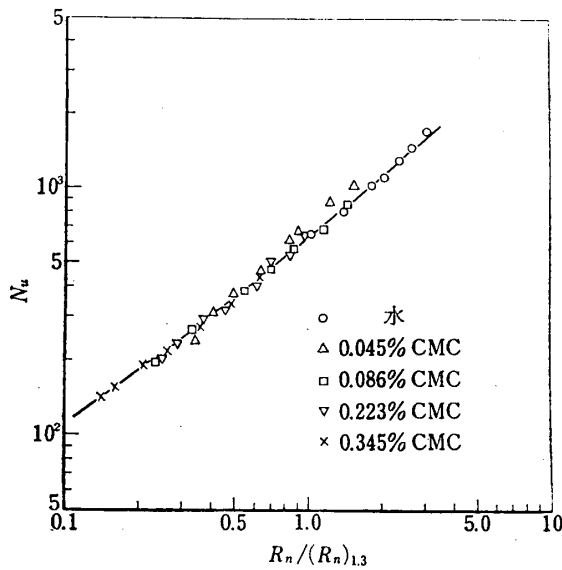


図 12 (a) 熱伝達特性 Nu
 $(q=1.325 \times 10^5 \text{ Kcal/hm}^2)$

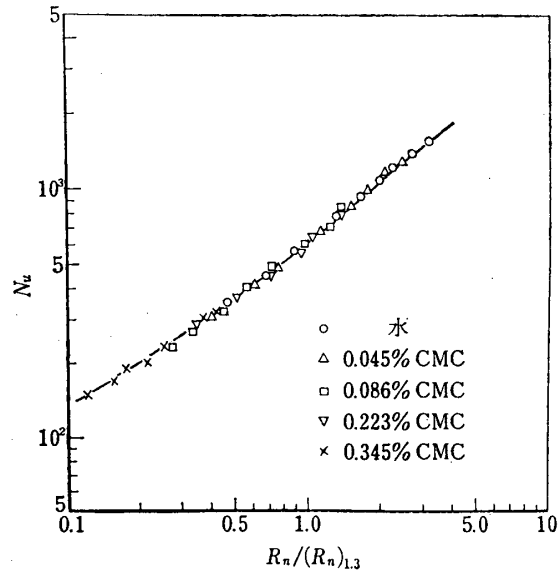


図 12 (b) 熱伝達特性 Nu
 $(q=2.435 \times 10^5 \text{ Kcal/hm}^2)$

度 $R_n/(R_n)_{1.3}$ の関係をしめすと図 12 のようになる。この図においても、主流速度が $(R_n)_{1.3}$ を越すと各 CMC 濃度の流れで熱伝達機構は同様なものになることがわかる。すなわち、乱流状態の熱伝達特性は CMC 濃度によらない。

4. 結 論

非ニュートン流体の乱流状態での流れおよび熱伝達の基本的な特性を明らかにするために、比較的早い流速で平板上を流れる水および CMC (カルボキシメチルセルローズ) 水溶液の速度分布および平板を加熱した場合の平板表面温度分布を測定し、それらの特性を検討した。その結果、つぎのことが明らかになった。

(1) 主流速度を増していくと、平板境界層内の速度分布は CMC 濃度に関係なく水の乱流状態のものに近づく。この傾向は CMC 濃度が大きいものほど、より小さな主流速度で起こる。

(2) CMC 水溶液においても、十分に流速が大きくなると、その形状係数は水の乱流状態の値 (1.3) に近づく。この値になった以後の主流速度では、速度分布および熱伝達ともに CMC 濃度によらず同じものになる。

(3) CMC 水溶液の流動特性に“べき乗則”を用いたレイノルズ数はこのような特性を説明することができず、乱流状態ではレイノルズ数としての意味をもたない。

1971 年 5 月 31 日 原動機部

参 考 文 献

- [1] W. R. Schowalter: A. I. Ch. E. Jour., Vol. 6 (1960), p. 24.

- [2] A. Acrivos. ほか 2 名 : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 6 (1960), p. 312.
- [3] J. N. Kapur and R. C. Srivatava : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 10 (1964), p. 775.
- [4] M. J. Shah. ほか 2 名 : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 8 (1962), p. 542.
- [5] A. H. P. Skelland : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 12 (1966). p. 69.
- [6] A. T. McDonald and H. Brandt : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 12 (1966), p. 637.
- [7] D. W. Dodge and A. B. Metzner : A. I. Ch. E. Jour., Vol. 5 (1959), p. 189.
- [8] 渡辺・小竹 : 日本機械学会論文集, 35 巻 279 号 (昭 44—11), p. 2266.