

非定常熱気流の熱伝達実験装置

八 田 桂 三・小 竹 進・青 木 功

Heat-Transfer Equipment of Unsteady Velocity and Temperature Flows

By

Keizo HATTA, Susumu KOTAKE and Isao AOKI

Abstract: To study the heat transfer problems of unsteady flows encountered in internal combustion engines of aeroplanes or automobiles, an equipment of wind tunnel was developed to supply air-flows with unsteady velocity and temperature. The capacity of the present equipment with 100 mm×60 mm testsection are

mean velocity: 0~60 m/s,

velocity frequency: 0~10 Hz,

mean temperature: 20~80°C,

temperature frequency: 0~2 Hz.

概 要

航空機用エンジンなどで問題になる非定常熱気流中の物体の熱伝達特性を調べその熱的な強度の問題を検討できるような、流速および温度が非定常ないし振動的に変化する熱空気流が得られる非定常熱流速風洞装置を開発した。この装置で得られる実験条件は、空気流速は 0~60 m/s, 流速振動周期 0~10 Hz, 気流温度 0~80°C, 温度振動周期 0~2 Hz である。

1. ま え が き

航空機用エンジンの始動、停止あるいは加速・減速時においてはエンジン空気流は急激な流速および温度変化を伴う。このような条件下におけるエンジン各部の熱的な強度を検討するためには流速・温度が非定常に変化する気流中での物体の熱伝達特性が最も重要な問題である。

さきに、主流速度が正弦的に変化する脈動流風洞を完成し [1], 平板, 円柱等の物体の振動気流中での熱伝達特性について調べたが, 今回はさらにこの装置を発展させて, 主流温度が振動的に変化できるようにした。

非常に緩慢な振動気流では現象が準静的に行なわれていると考えることができるし, また, 非常に早い振動気流でも熱伝達現象などはそれに追従した変化をすることができなくな

り一種の平均値的なもので考えることができる。振動気流の運動量伝達、熱伝達現象で最も重要なところはこれらの中間の振動周期のところである。

一方、非常に早い周期ないし時定数の非定常気流を作ることその方法・原理から検討してたやすいことではない。特に、主流温度を変化させることは、空気の加熱の方法、その制御の問題、一様性の問題など多くの困難がある。ここでは、このようなことを考慮して、電氣的に加熱制御する方法を用い、数 Hz の温度振動が可能な加熱空気流を得られることを目的にした。なお、流速については前回報告 [1] したような約 10 Hz までの振動空気流が得られる。

2. 非定常熱風洞実験装置

2.1 実験装置

前回は報告した非定常流速風洞実験装置は、空気ため槽に二個の流れ喉部を設け、その喉部の断面積を同時に互いに逆方向に増減させる方法を用いて、空気の流速を非定常ないし振動的に変化させることができる(図 1)。さらに、この空気流の温度を非定常ないし振動的に変化させるためには、温度制御が容易であること、得られる温度および流速分布が一様であること、流速振動には影響を与えないことなどの点からその方法を検討しなければならない。

空気の加熱の方法としては、燃焼熱を利用する方法・電気加熱による方法・輻射熱を利用する方法などが考えられる。燃焼熱を利用すると非常に高温の気流を簡単に作ることができるが、はっきりした非定常性を得ることや一様な温度・流速分布の気流を得ることが困難である。輻射熱を利用するときは、輻射熱の制御は容易にできるから熱源としての非定常性は割合に簡単に得られる。また、一様に気流を加熱する面でも有利である。しかし、空気の輻射による熱吸収率は低く低温度差の振動しか得られないのが欠点である。電気加熱はこれら二方法の中間で、加熱制御も比較的容易であり、一様な温度分布をもつ気流を作ることとも困難でなく、また、温度振幅も適当に大きな値にすることができる。しかし電気抵抗体を電気加熱してその熱を空気に伝達して空気の温度を変化させるという方法では、電気抵抗体は空気流に対して流れの抵抗体としても働き、その大きさ、配置などは流れの面からも検討しなければならない。

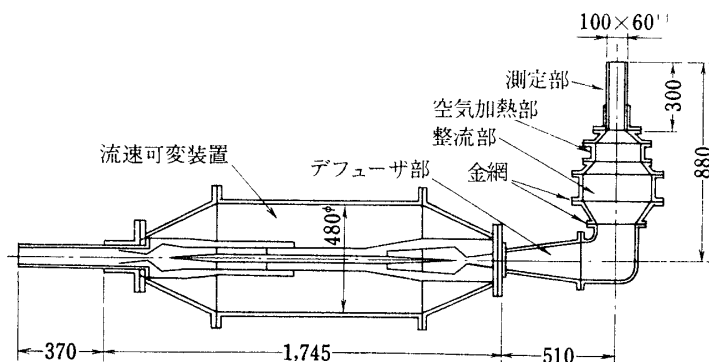


図 1

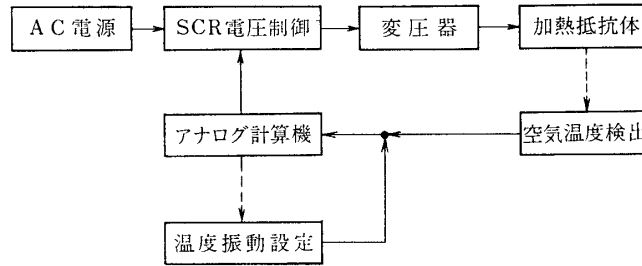


図 2 温度非定常気流風洞の回路図

ここで用いた方法はつぎのようなものである。図 1 は非定常流速風洞の概要であるが、この整流部と測定部の間に空気加熱部を設け、電気抵抗体をこの部分に流れに直角方向に並べ空気を加熱する。この加熱量の変化は、この抵抗体に加わる電圧をサイリスタ制御により加減して行ない、サイリスタ入口信号はアナログ計算機の出力により制御される。アナログ計算機は所要の空気温度になるように入口と出口の関係予測修正プログラムによって計算してサイリスタを制御する。この方法の概念図を図 2 にしめす。

使用電源は AC 100 V, 200 A であり、電圧制御用サイリスタは容量が 20 kVA で入口信号電圧 0~10 V, 出力電圧は 0~100 V であり周波数特性は 0~10 Hz である。電圧制御回路図および入口信号 - 出口電圧の関係を図 3 および図 4 にしめす。この入口信号電圧を得

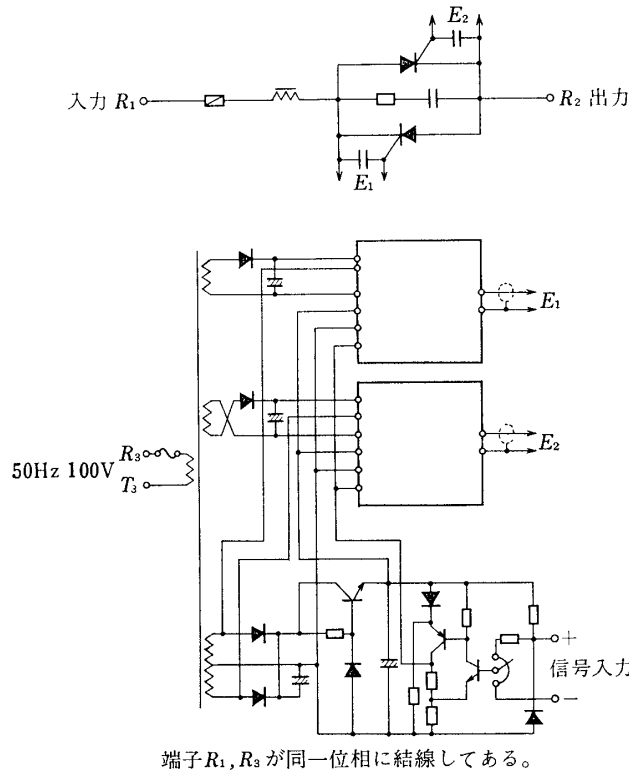


図 3 ヒータ用 SCR 制御回路図

すためのアナログ計算機は日立 ALS 220 (日立製作所) を用い, 演算要素は積分器 3, 掛算器 2, 増幅器 24, ポテンションメータ 2, 関数発生器 1 である. これらの諸要素は, 加熱回路, 加熱ヒータ, 空気流の熱容量時定数を考慮して組合され演算回路を構成する.

空気加熱は電気抵抗ヒータによる. 加熱部の概要を図 5 にしめす. これは電気抵抗ヒータ, ヒータ支持部, ヒータ取付部からなる, ヒータ (図 6) は電気絶縁耐熱管材質の上に 0.29 mm 径のニクロム線を巻きつけたものである.

この電気絶縁耐熱管は内径 2 mm 外径 3 mm 長さ 100 mm のムライト磁器管を 2 本, 直径 2 mm 長さ 214 mm の真鍮棒を中にそう入して接ぎ合わせたものである. このニクロム線ヒータは測定部での温度分布が一樣になるように巻きつけられなければならない, このためつぎの 4 種類のヒータを作った. 一つは約 0.6 mm のピッチで一様に巻きつけたもの (A), ニクロム線に絶縁ニスを塗ってほとんど間隔がゼロになるように一様に巻いたもの (B), 両端を約 1.0 cm を絶縁ニスを塗って間隔をゼロにし, ほかは約 0.6 mm ピッチで巻いたもの (C), 両端約 2.0 cm を絶縁ニスを塗って間隔

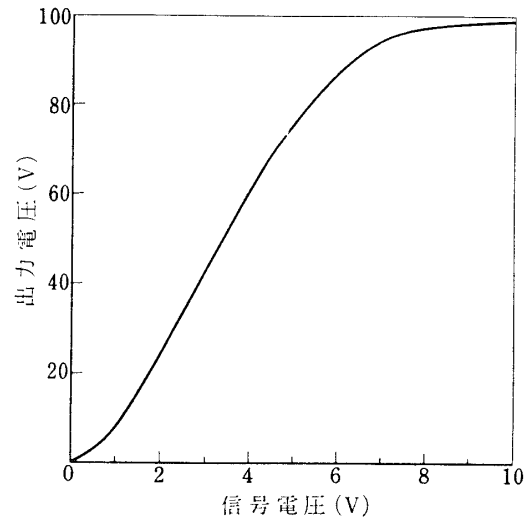


図 4 SCR 出力特性

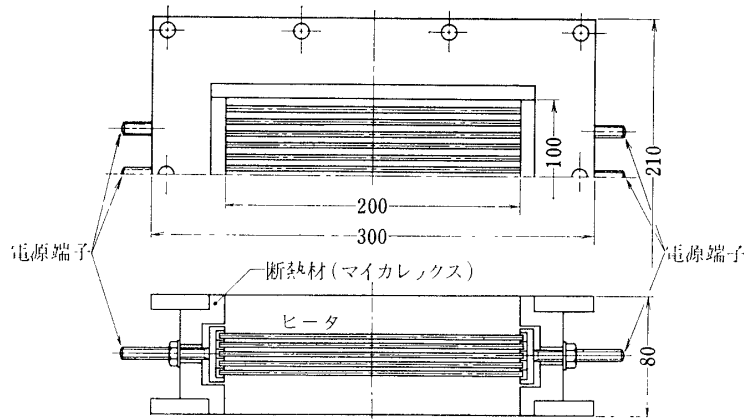


図 5 空気加熱部

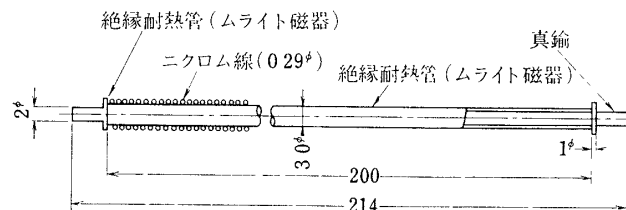


図 6 ヒータ図

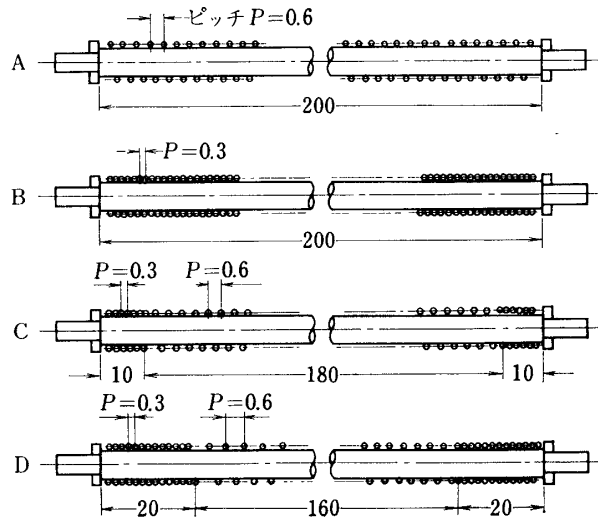


図 7 ヒータの種類

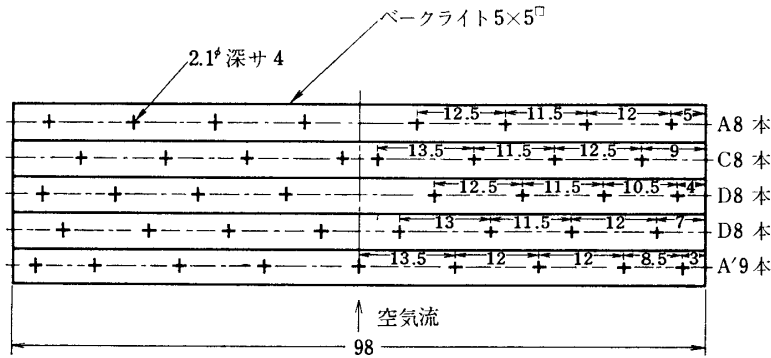


図 8 ヒータ支持部およびヒータ配列

をゼロにその間を約 0.6 mm ピッチで巻きつけたもの (D) である (図 7)。これらのヒータは両端をヒータ支持部で固定され流れに対して千鳥型に配列されている (図 8)。ヒータ支持部はベークライトでできており、断面が $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 、長さ 98 mm を 5 段にしたものであり、ヒータは各段の穴に固定される。測定部での温度分布の均一性を得るために多数回の実験を繰返したあと結局ヒータの配列は、上段より順に A 8 本、C 8 本、D 8 本、D 8 本、A' 9 本であるが最下段の A' は両端に B を 1 本ずつ入っている。これらのヒータの両端の電源端子は一括して外部端子に接続されている。さらに測定部温度分布の均一性は空気加熱部のあとに厚さ 0.2 mm の銅板の網を入れてと改良された。

3. 非定常熱流速風洞の特性

つぎに、上述の非定常熱流速風洞の特性について述べる。図 9 は測定部断面の x 軸方向 (ヒータの長さ方向) の温度分布であり、図 10 は y 軸 (横方向) の温度分布である。ヒータの巻線軸は x 方向にとってあり、 $x = \pm 50\text{ mm}$ の壁近くは全体として密に巻いてヒータ支

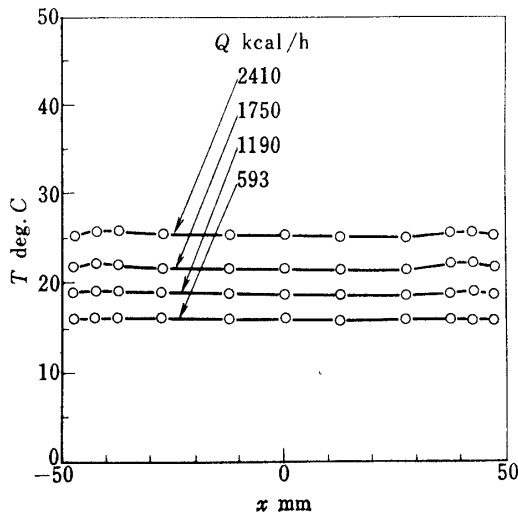


図 9 測定部温度分布
($V_{\infty}=20$ m/s, $T_{\infty}=12.8$ deg. C)

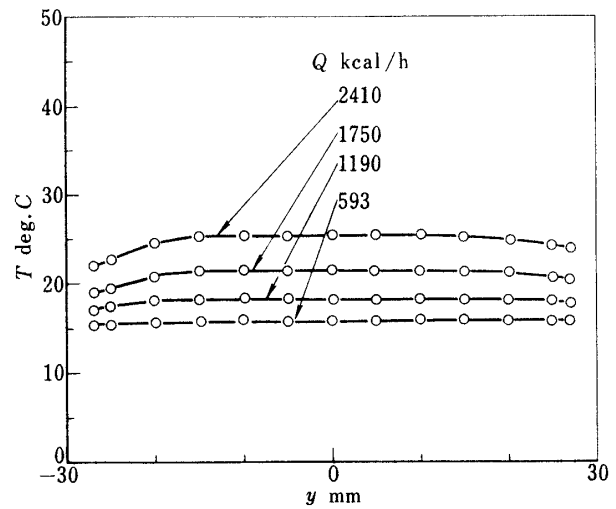


図 10 測定部温度分布
($V_0=20$ m/s, $T_{\infty}=12.8$ deg. C)

持部, ヒータ電源線などへの熱伝導損失による温度低下を補償してある. しかしこの補償はすべての条件に対して完全にすることはむずかしく, 加熱量が小さいところで温度一樣になるようにすると加熱量の大きいところでは壁近くでは過剰補償になり, 温度が高くなる (図 9). y 方向にはヒータが並べてあるだけで, 熱源は不連続に分布することになるが, 図 8 にしめすように, ヒータ前面からみると一応全断面にわたってヒータが分布するように並べてある. この場合も, 壁付近のヒータの巻線のピッチを変化することにより壁への伝導損失による温度低下を補償して一樣な温度分布になるように工夫してある. しかし, 加熱量の大小により, その補償のきき方が異なり, 図 10 のような温度分布になる. また, これらの熱伝導損失は主流速によっても異なり (図 11), すべての条件 (加熱量, 流速) に対して, 全断

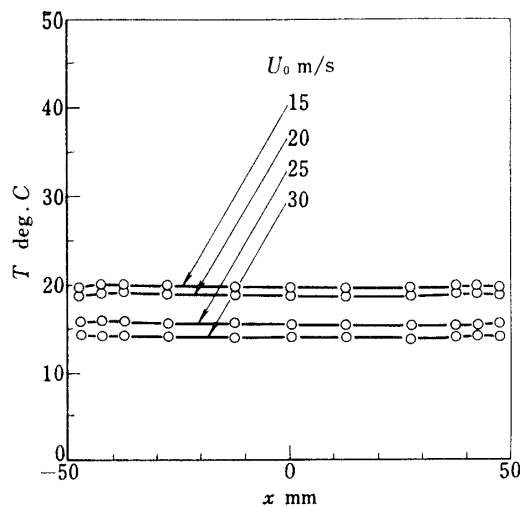


図 11 測定部温度分布
($Q=1190$ kcal/h, $T_{\infty}=12.8$ deg. C)

面一様な温度分布を得ることは困難である。ここでは、比較的頻度の多い実験条件 ($Q=593$ kcal/h, $U_0=20$ m/s) に対して、一様な温度分布が得られるようなヒータ条件を捜した。これらの結果から、 $Q=2500$ kcal/h, $U_0=30$ m/s ぐらいまでの範囲で、約 70% 断面について一様な温度分布が得られた。つぎに、前述の温度制御回路を働かせて主流温度を正弦的に

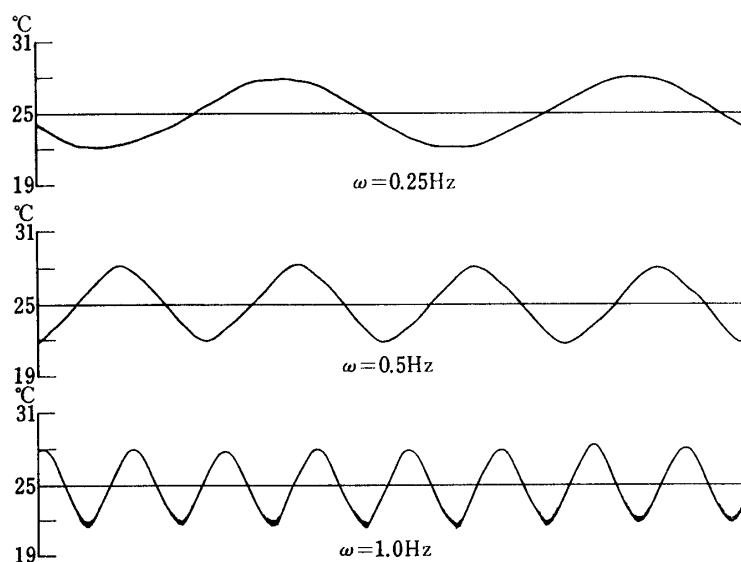


図 12-1 主流温度振動振幅図 ($V_0=20$ m/s, $\Delta T=3.0$ deg. B)

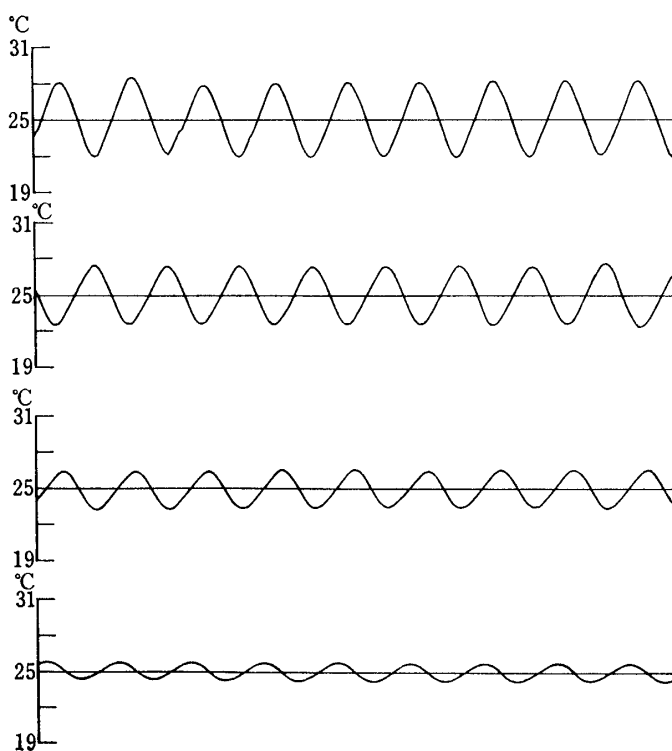


図 12-2 主流温度振動振幅図 ($V_0=20$ m/s, $\omega=1.0$ Hz)

変化させた場合についてその特性を図 12, 13 にしめす. この場合は, 簡単にアナログ計算回路で正弦波電圧を発生させて, SCR 回路を制御し, ヒータ電圧を正弦的に変化させているにすぎず, 主流温度を検出して計算機回路へのフィードバックは行なっていない, また, この温度測定は $18\ \mu\text{m}$ 径の銅, コンスタント熱電対を用いて行なった, 図 12-1, 12-2 は温度変化の振動数 $\omega(\text{Hz})$, および, 振幅 ΔT ($^{\circ}\text{C}=(T_{\text{max}}-T_{\text{min}})/2$) を変化させた場合の例である. これらの例から単なる正弦波入口による SCR 回路の制御でも同じ正弦波に近い温度変動が得られることがわかる. 図 13 はそのときの温度分布の一例であり, この変動図においても同じ 70~80% 断面にわたり一様な温度分布を得られていることがわかる.

このようにして得られた実験結果を整理すると, 本装置より得られる流速変動, 温度変動

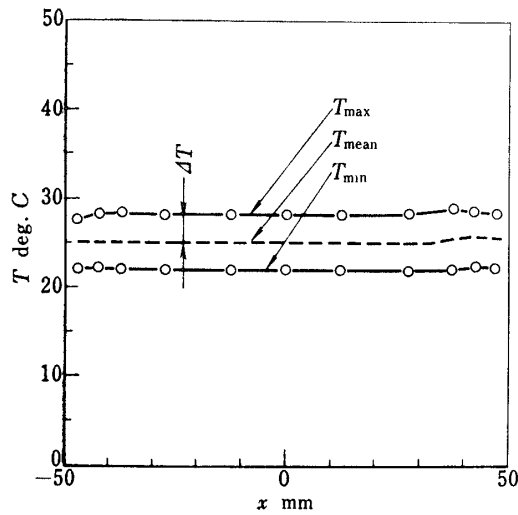


図 13 測定部正弦変動温度分布
($V_0=20\ \text{m/s}$, $Q=1190\ \text{kcal/h}$, $\omega=0.25\ \text{Hz}$, $\Delta T=3\ \text{deg. C}$)

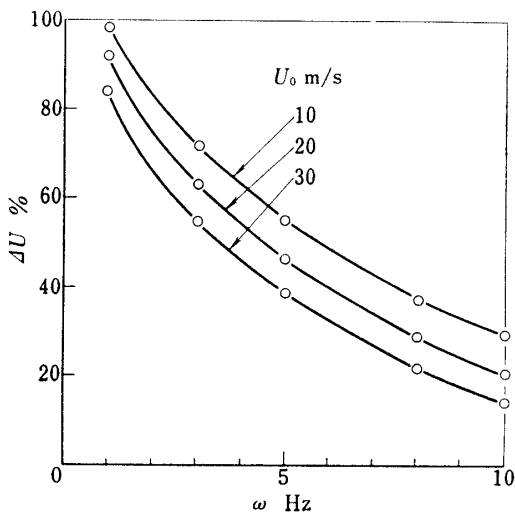


図 14 非定常熱流速風洞の速度振動特性

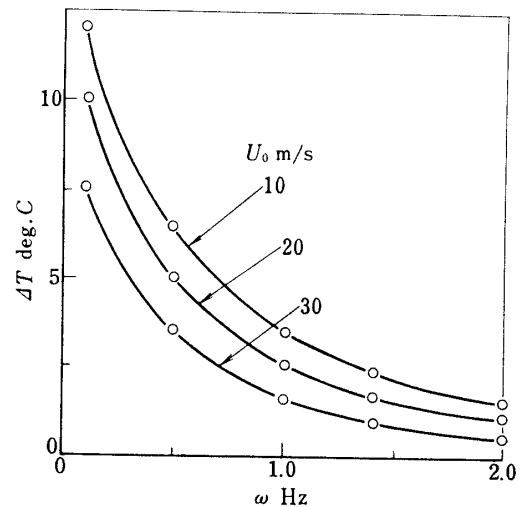


図 15 非定常熱流速風洞の温度振動特性

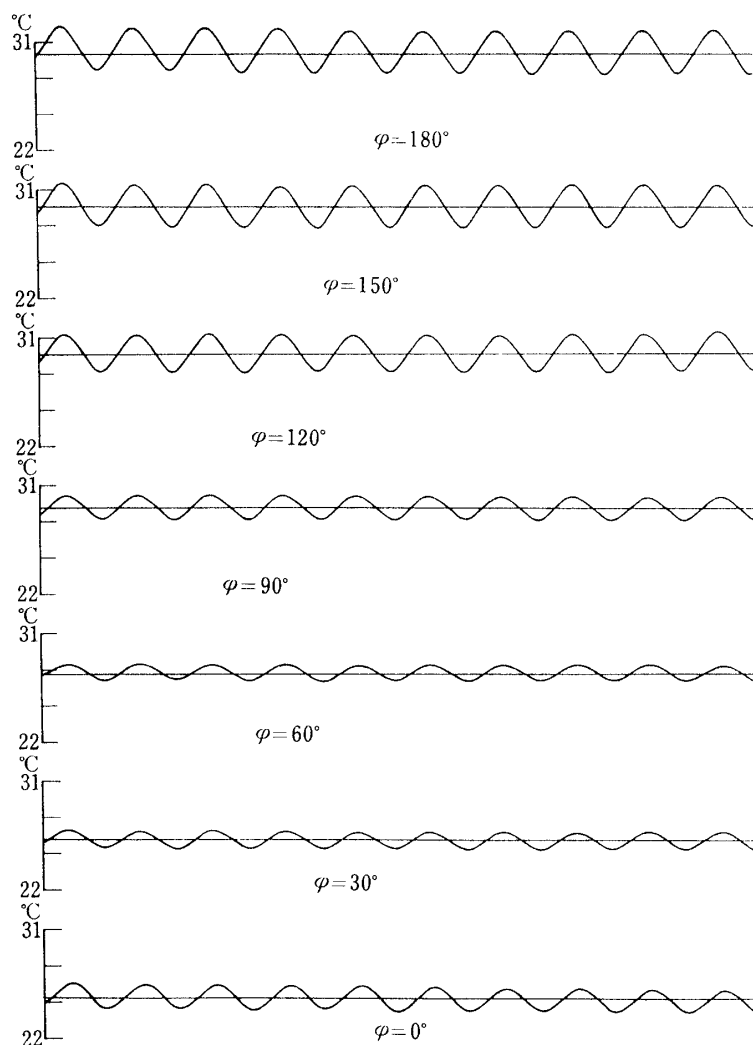


図 18 円柱表面温度 ($V_0=20$ m/s, $\Delta T=3.71$, $\omega=0.25$ Hz)

タを見ながら調整する，次に円柱の加熱を行なうが，円柱の電気抵抗が小さいため低電圧大電流を必要とする．この低電圧大電流はスライドレギュレータを直列に 2 個用いて得られ，円柱の加熱量は電力計および電圧，電流の測定によって所要の加熱量にする（円柱の加熱量の算出はこのときの使用電力量を用いた）．一定時間置いたあとに円柱の補助ヒータの電源を入れ，円柱の水平方向の温度分布が一様になるように補助ヒータの加熱量の調整を行なう．円柱の水平方向の温度分布が一様になったあと，空気加熱ヒータをアナログ計算機ポテンションメータによって適当な温度の正弦的振幅振動熱空気流を作る．測定部温度が十分に安定したあと，円柱を回転することによって円柱表面温度を測った．図 18 は主流速度 $U_0=20$ m/s, 主流温度振幅 $\Delta T=3.71$ deg. C, 振動数 $\omega=0.25$ Hz, 円柱加熱量 $q=1.89$ kcal/h のときの，円柱表面温度である（ $\varphi=0$ は前方よどみ点， $\varphi=180$ は後方よどみ点を表わす）．図 19-1, 2, 3 はこのときの平均温度，図 20-1, 2, 3, 4 は振幅分布である．図 21 は主流温度に対する位相差である．位相差は振動数とともに減小（遅れ）する傾向にあるが， $\omega=1.0$ Hz

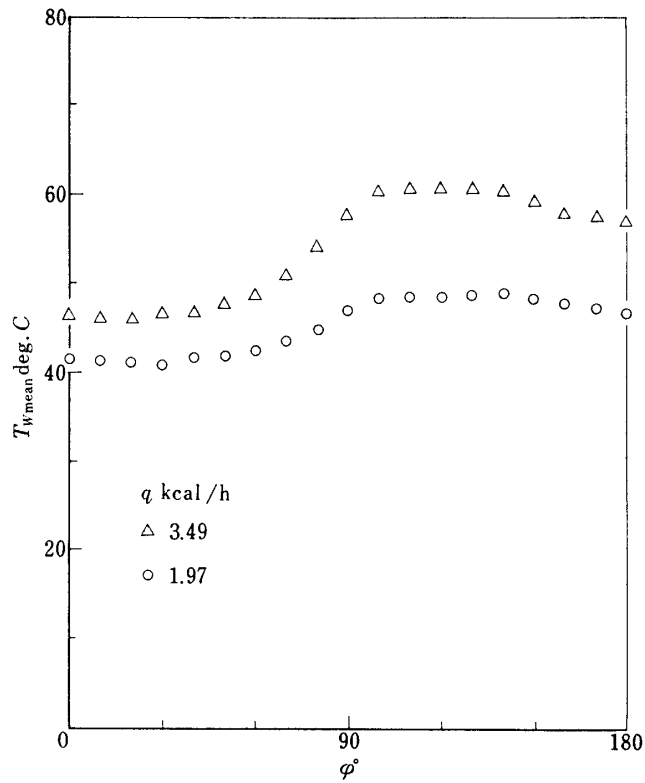


図 19-1 円柱表面の平均温度分布 (円柱加熱の影響)
 ($V_0=20\text{m/s}$, $T_\infty \text{ mean}=31.75 \text{ deg. C}$, $\Delta T_\infty=3.7 \text{ deg. C}$, $\omega=0.25 \text{ Hz}$)

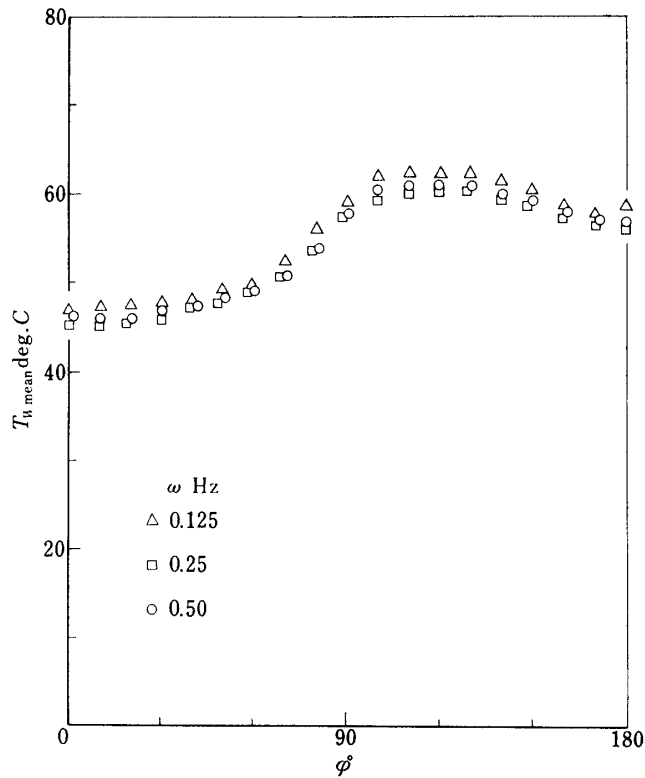


図 19-2 円柱表面の平均温度分布 (主流温度の振動数の影響)
 ($V_0=20 \text{ m/s}$, $q=3.61 \text{ kcal/h}$, $T_\infty \text{ mean}=31.7 \text{ deg. C}$, $\Delta T_\infty=1.93 \text{ deg. C}$)

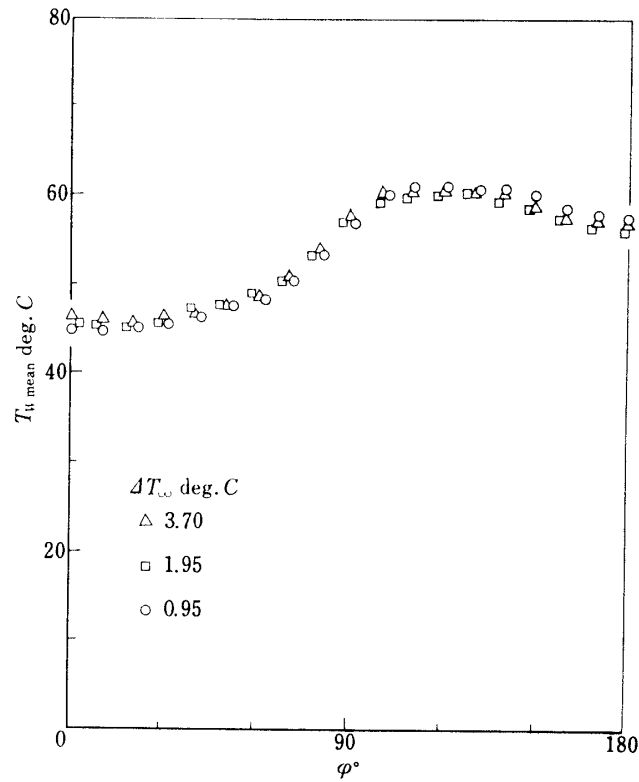


図 19-3 円柱表面の平均温度分布 (主流温度の振幅の影響)
 ($V_0=20$ ms, $q=3.51$ kcal/h, T_{∞} mean=31.6 deg. C, $\omega=0.25$ Hz)

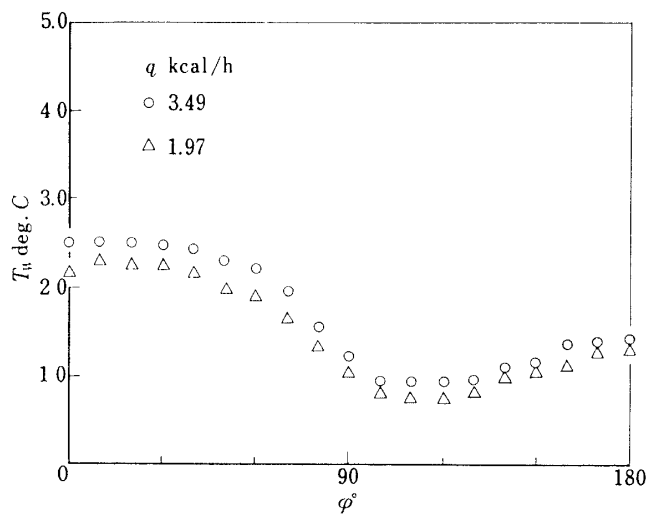


図 20-1 円柱表面温度の振幅分布 (円柱加熱量の影響)
 ($V_0=20$ m/s, T_{∞} mean=31.75 deg. C, $\Delta T_{\infty}=3.7$ deg. C, $\omega=0.25$ Hz)

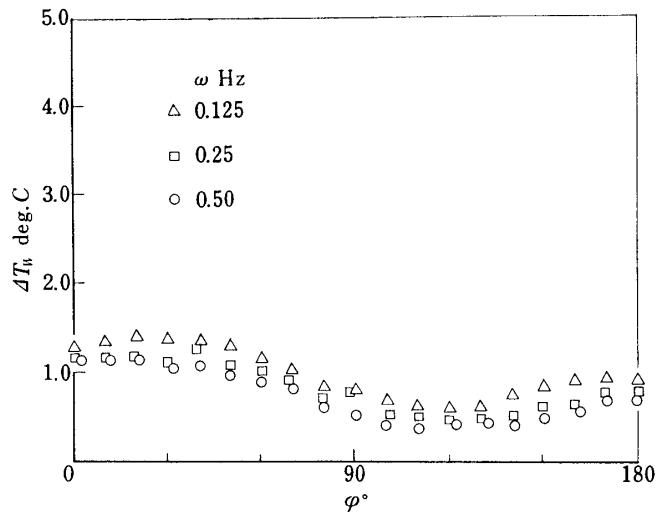


図 20-2 円柱表面温度の振幅分布 (振動数の影響)
 ($V_0=20$ m/s, $q=3.61$ kcal/h, T_∞ mean=31.7 deg. C, $\Delta T_\infty=1.93$ deg. C)

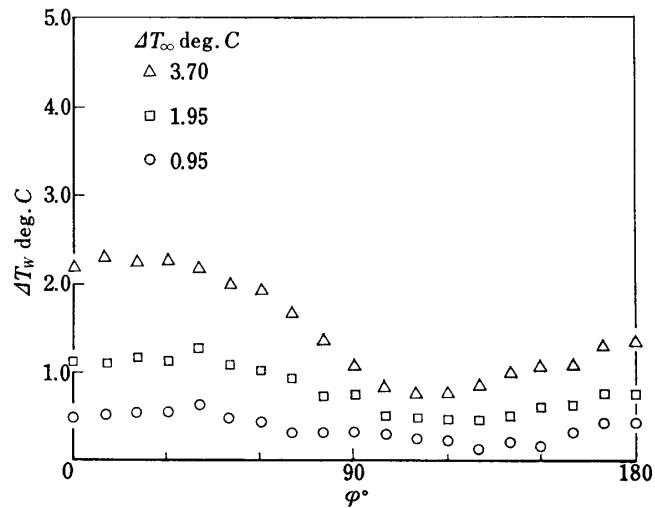


図 20-3 円柱表面温度の振幅分布 (主流温度の振幅の影響)
 ($V_0=20$ m/s, $q=3.51$ kcal/h, T_∞ mean=31.6 deg. C, $\omega=0.25$ Hz)

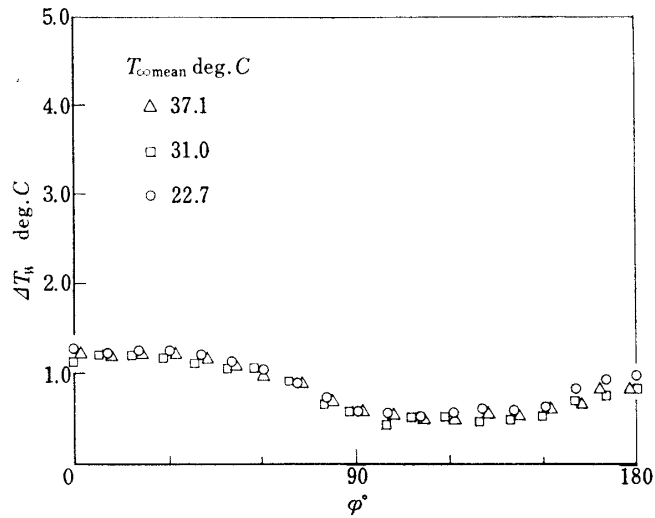


図 20-4 円柱表面温度の振幅分布 (主流温度の平均温度の影響)
 ($V_0=20$ m/s, $q=3.55$ kcal/h, $\omega=0.25$ Hz, $\Delta T_\infty=1.93$ deg.C)

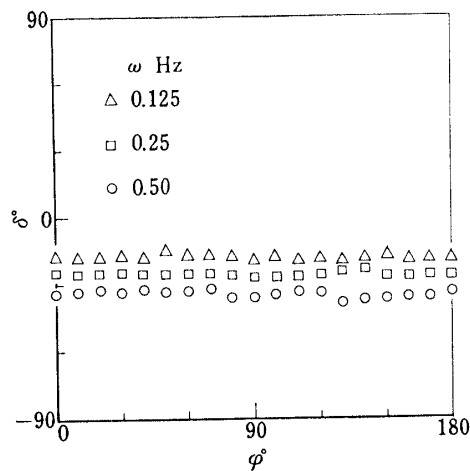


図 21 主流温度に対する円柱表面温度の位相差
 ($V_0=20$ m/s, $q=3.61$ kcal/h, $T_\infty=31.7$ deg.C, $\Delta T_\infty=1.93$ deg.C)

付近までではせいぜい 30° 遅れぐらいである。振幅は多くの場合 $\phi=90\sim 120^\circ$ 付近で最小になり、したがってこの付近で熱伝達率の変動 ($\propto 1/(T_w - T_\infty)$) がもっとも大きいことになる。また前方よどみ点付近では温度振幅および熱伝達率の変動が最小になる。

1973年5月7日 原動機部