

No. 21

強安定成層流中の内部重力波の制御

蔦田 秀治*, 大庭 勝久*

Control of Internal Gravity Wave in a Stably-Stratified Flow

Hideharu MAKITA, Katsuhisa OOBA

Dept. of Mech. Eng. Toyohashi University

Structure of internal gravity wave was experimentally studied in a strongly stably-stratified mixing layer with stepwise temperature distribution realized in a wind tunnel with a thermal stratification generator in its settling chamber. Velocity and temperature fluctuations developed in the mixing layer were measured by a hotwire thermo-anemometer. Spectral components of these fluctuations satisfied the requirement for three-wave resonant interaction and the phase difference between the vertical component of the velocity fluctuation and the temperature fluctuation approached $-\pi/2$ in the downstream region. These facts show that internal gravity waves are spontaneously generated in the mixing layer. We also attempted to control the transition process of the internal gravity wave by giving a small thermal disturbance by installing a heated wire of $10\mu\text{m}$ in diameter just behind the thermal stratification generator. The energy density levels of the spectral components increased downstream more rapidly in the mixing layer, which confirms the possibility of controlling the transition process of the internal gravity wave by the present method.

Keywords : stratified flow, internal gravity wave, thermo-anemometer, thermal disturbance

1. 緒 言

大気や海洋など自然界に存在する流れ場の多くは、気温や塩分濃度などの影響を受け、鉛直方向に密度分布を伴う密度成層流を形成する。密度成層流中では、密度差による浮力が流体運動や熱・運動量輸送に大きな影響を与える。鉛直上方に密度の小さくなる安定成層流の内でも、特に大きな密度を有する強安定成層流中では、浮力の作用により内部重力波と呼ばれる自励振動が発生する⁽¹⁾。この重力波が発達し崩壊すると、静的に安定な成層流中に乱流が発生する。これは、自然界では晴天乱流⁽²⁾や深海乱流として良く知られている現象であり、このような局所的に発生する乱流は、大気中では航空機の安全運行上支障をきたしたり、電波障害を引き起こす原因となる。また、海洋中でも大振幅をもつ内部波がソナーによる探査や海中油井のような海中構造物などに影響を与える⁽³⁾。この様に内部重力波は自然界では一般的に存在する現象であるにもかかわらず、その発達や崩

壊の機構は必ずしも十分には解明されていない。

実験室内で内部重力波を実現し、その本質的な特徴を抽出するためには、密度勾配を伴った流れ場の構造をできる限り単純化し、その中に波動を発生させ、その遷移過程を観察する必要がある。そのためには大きな温度勾配、すなわち高い安定度を有し、初期乱れが小さく、さらに良好な二次元性を有する強安定成層流を風洞内に実現することが必要である。本研究室では、これらの条件を満たす温度成層風洞を開発し、その中に内部重力波を自然発生させることに成功している^(4,5)。

本研究は、内部重力波の発生から、その崩壊により乱流に遷移するまでの全発達・崩壊過程を風洞内で観察することを最終的な目的としている。しかし、内部重力波が発生し、乱流へ遷移するまでには長いスケールが必要となる。一方、風洞の測定胴内における計測範囲には限界があり、内部重力波の全遷移過程を観測するためには、励起により波動の発達過程を促進させるなど、何らかの制御を施す必要がある。前述したように内部重力波は浮力を駆動力としている。そこで、測定胴上流で成層流中に波動の“種”となる微小な正弦波状の温度擾乱を与え、

*豊橋技術科学大学

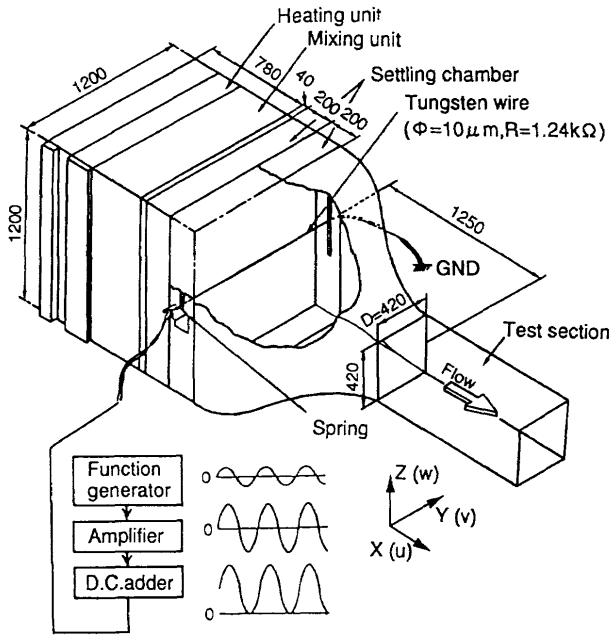


図1 温度成層形成装置 (unit : mm)

その下流での波動の発生・発達過程を制御することも試みており、ここではそれらの結果を合わせて報告する。

2. 実験装置

温度成層風洞は、全長約13mの吹き出し型で、測定胴は全長6.2m、一辺 $D=420\text{mm}$ の正方形断面を有している。温度成層形成装置(図1)は、初期乱れの低減化や大きな温度勾配を得るために縮流胴の上流に設置されている。本装置より下流の各胴の上部壁面をヒータで加熱するとともに断熱材で覆うことにより、温度場の特性の向上を計っている。なお、室内気温を一定に保つために、加熱気流は排気ダクトにより室外へ強制的に排気されている。

座標系は、主流、鉛直方向をそれぞれ X, Z とし、座標原点は測定胴入口断面中央とした。計測には、自作の $X-I$ プローブと二線式温度流速計^(6,7)を用いた。これは、冷線・熱線間の空間的位置の違いにより生じる温度信号と速度信号間の時間遅れを補償するための遅延回路、冷線・支持部の熱慣性に起因した温度計の周波数応答の低下を補償するための位相補償回路、および温度変動の影響を受ける速度信号の温度補償回路を備えており、周波数特性は $DC-5\text{kHz}$ 、 S/N 比は 60dB 以上である。

3. 実験結果および考察

3-1. 内部重力波の自然発生

図2は平均温度差、 $\Delta\theta$ 、および平均速度差、 ΔU 、の流れ方向変化を示したものである。縦軸は測定胴入口 $X/D=0$ における混合層厚さ、 $d=25.5\text{mm}$ を用いた無次元高さである。実験条件は非加熱部の主流流速

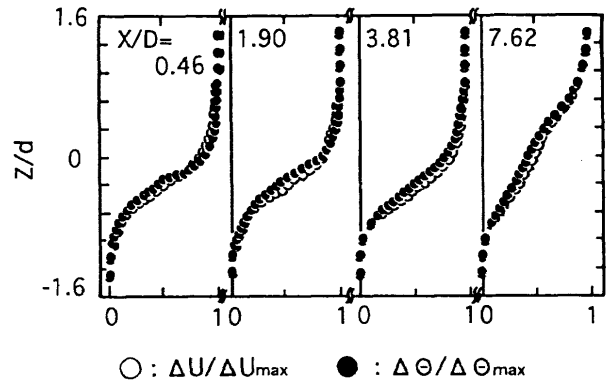


図2 平均速度差・平均温度差の流れ方向変化

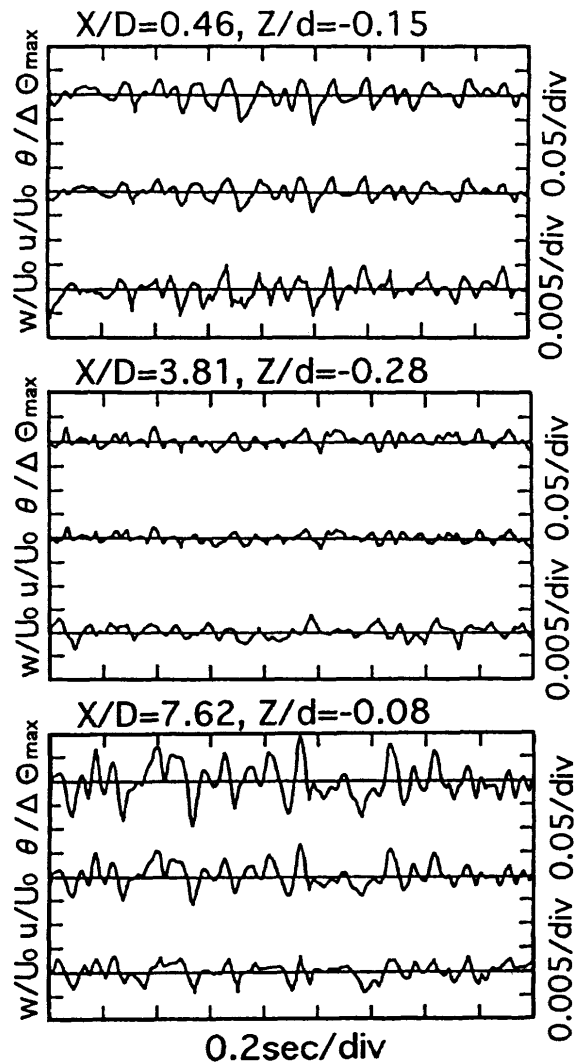


図3 瞬間波形の流れ方向変化

$U_0=3.0\text{m/sec}$ 、最大温度差 $\Delta\theta_{\text{max}}=26.7\text{K}$ であり、加熱による体積膨張のため、速度場もほぼ同様のステップ状分布を示している。混合層は下流に行くに従って拡がり、それに伴い平均勾配は下流方向に単調に減少する。

図3は平均温度勾配、 $d\theta/dZ$ 、が最大となる位置で計測した温度変動、 θ 、と速度変動の主流・鉛直方向成

分, u , w , の瞬間波形の流れ方向変化である。ここで w は他の二つの信号のレベルの1/10程度であり, 浮力による抑制効果を強く受けている。図2に示したように, 平均場の勾配が次第に緩やかになることに対応して, 各変動の振幅は下流に向かって一旦は減少する ($X/D=3.81$)。しかし, 最下流 ($X/D=7.62$) では, 平均場の勾配はさらに小さくなるにもかかわらず, 各変動の振幅は逆に増加している。ここには示さないが, 温度・速度乱れの強度も下流方向に一旦減少した後, 最下流で再び増加に転じている。一般に, 安定成層流中の変動成分は, 浮力により減少すると考えられる⁽¹⁾が, 最下流での結果はそれに反している。なお, 各変動の振幅は混合層内でのみ増加している。

図4は, 本温度成層形成装置により形成された強安定成層流の可視化を行った一例である。ここでは山模型⁽⁶⁾などの励起源は挿入していないにもかかわらず, $X/D=5.5\sim 6.5$ 付近の混合層内に緩やかな波動の発生を示す流脈線の揺らぎが認められる。なお, これより上流域 ($X/D=0\sim 5.5$) では流脈線は層状を成しており, 本図に示されるような波動運動と思われる揺らぎは認められない。このような安定成層流中における波動の発生原因として, 次のようなものが考えられる。すなわち,

(1) 密度差による安定化の作用よりも, 速度差による不安定化が強いために生じる, Kelvin-Helmholtz型(以下, K-H型と呼ぶ)の不安定波。

(2) 密度差による安定化の作用が強いために生じる内部重力波。

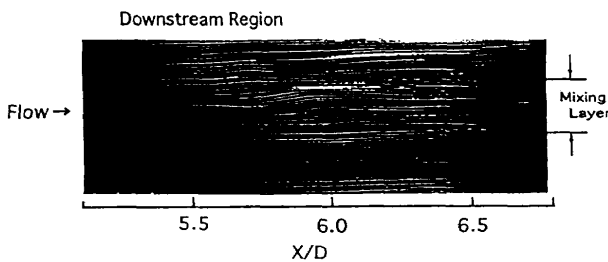


図4 混合層の可視化写真

成層流の安定度を規定するパラメータの一つに局所リチャードソン数, $Ri = g\beta (d\theta/dZ)/(dU/dZ)^2$ (g : 重力加速度, β : 体積膨張率)がある。(1)に関してK-H型の不安定波が発生するための条件は, $Ri < 0.25$ となる弱安定成層流である⁽⁹⁾。しかし, 本成層流中では, 最上流における温度勾配と速度勾配の最大値から得られる Ri の値は, 乱れの静的安定限界値, $Ric = 0.25$ ⁽¹⁰⁾を大きく上回る $Ri = 0.72$ に達しており上記の条件を満足しない。すなわち, 混合層内に発生した波動はK-H型の不安定波とは考えにくく, 浮力を駆動力として発達した内部重力波である可能性が高い。

図5に各変動成分のスペクトルと w , θ 間の位相差を示す。図中に点線で示す $X/D=3.81$ におけるスペクトル分布は, 全体的なエネルギーレベルが低く, また卓越したピークも存在していない。しかし, 実線で示す最下流における分布には, 低周波のエネルギーレベルの増加が顕著に認められ, さらに複数のピークが存在する。ここで, WinantとBrowand⁽¹¹⁾により示されたK-H不安定により発生する渦の周波数を本実験条件下で求めると約21.0Hzとなる。これに対してThorpe⁽¹²⁾は, 成層流

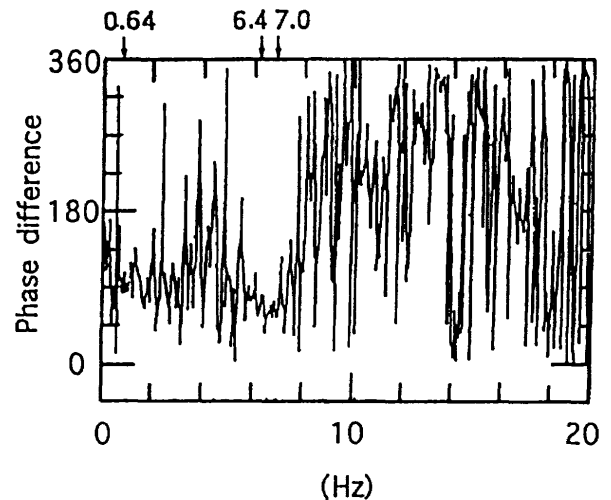


図5(b) w , θ 間の位相差 ($X/D=7.62$, $Z/d=-0.08$)

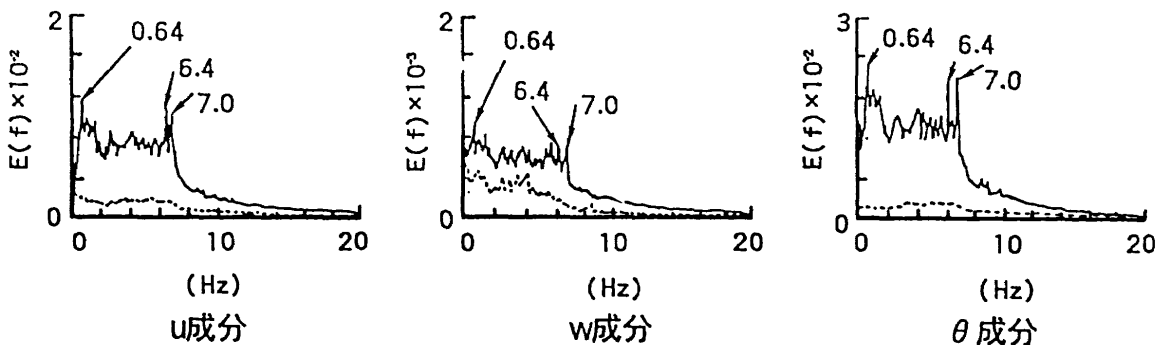


図5(a) エネルギースペクトル (----: $X/D=3.81$, - : $X/D=7.62$)

中で内部重力波が発達する場合、三波共鳴条件、 $f_1 \pm f_2 = f_3$ を満たすような周波数成分の変動が卓越して発達することを示した。最下流で認められる複数のピークの周波数は、それぞれ0.64Hz, 6.4Hz, 7.0Hzであり、これらは三波共鳴条件をほぼ満たしている。また、温度勾配から得られるBrunt-Vaisala周波数⁽¹⁾（内部重力波の上限周波数、以後B-V周波数と呼ぶ）は約7.0Hzとなり、上述の3つの周波数はこの条件を満たすと共に、B-V周波数以下の周波数域のエネルギーレベルが著しく増加しているのが見られる。次に $w\theta$ 間の位相差について調べてみると、三波共鳴条件を満たしている周波数成分の位相差は、Stewart⁽¹³⁾やMcBeanら⁽¹⁴⁾が指摘した様にほぼ90°となっている。以上に述べた結果から、本温度成層風洞内の混合層内で発達した3つの卓越した周波数成分を有する波動は、内部重力波であることが確認される。

次に、内部重力波が存在するような強安定成層流中における熱輸送について考察を加える。図6に鉛直方向熱流束 $\overline{w\theta}$ の流れ方向変化を示す。 $\overline{w\theta}$ は、最上流では混合層中央付近で最大値をとり、その下流 $X/D=3.81$ で若干減少した後、最下流では二つ山の分布形状へと変化している。波動が存在しない $X/D=3.81$ までの熱輸送は、平均温度勾配の大きさに対応する勾配拡散型熱輸送によるものと考えられる。しかし、内部重力波が発達している最下流域における熱流束の分布形状は、上流域におけるものとは異なり、混合層中央付近で熱流束が減少している。そこでは温度勾配よりも内部重力波による影響が大きく現れているものと考えられる。これは内部重

力波が発達すると、鉛直方向の速度変動と温度変動間の位相差が90°に近づくため、その内積として表される熱流束が減少していることを示している。これは現象論的には、内部重力波の波面を越えるような流体塊の輸送が抑止される結果、鉛直方向熱流束が制限されることを意味している。-そのように、内部重力波が存在する場合の強安定成層流中における熱輸送の機構は一般的な勾配拡散型のものとは大きく異なっていることがわかる。

3-2. 内部重力波の発達過程の制御

本研究の課題は内部重力波の発生から、その崩壊により乱流が発生するまでの全遷移過程の機構の解明である。しかし、前述したように、内部重力波は大きなスケールをもつ変動であるため、波動の発達を促進し、現象の発達を早めることは、風洞中の限られた計測範囲で全遷移過程を観測するための一つの手法を提供するものとなる。ここでは、成層流中に微小な温度擾乱を与え、内部重力波の発達過程の制御を試みた結果について述べる。

制御方法は、励起用金属細線（タングステン線、直径10 μ m）を低周波の正弦波で、平均場に直接的な影響を与えない程度の電力（0.5W）で加熱することにより、内部重力波の種となる温度擾乱を成層流中に与えるという手法を用いた。金属細線は、温度成層装置と縮流胴間の整流胴内に、そこでの温度勾配が最大となる高さに水平に取り付けられる。この時、金属細線の熱的時定数（約5 msec）は十分に小さく、細線の温度変動は印加電圧に追従している。温度擾乱の周波数は、非励起時に自然発生した内部重力波を構成する周波数のうちの1つ、1.6Hz（3-1節の流れ場とは異なる）である。

本実験における流れ場の平均特性は前節におけるものとはほぼ同じであり、温度擾乱を与えても最上流の平均特性に変化がないことを確認している。また、最上流における局所リチャードソン数は、混合層内全域にわたって0.25を上回る強安定成層流となっている。

図7に最上流における局所勾配が最大となる高さで得られた各計測断面における鉛直方向速度変動、 W 、を周波数解析した結果を示す。このときのB-V周波数は、励起時においてそれぞれ6.2Hz, 6.4Hzである。下流に行くに従い、B-V周波数以下の低周波域のエネルギーレベルが顕著に増加し、さらに、 $X/D=7$ では1.0Hz, 1.6Hz, 2.6Hzのピークが認められる。これらの周波数は、前述した三波共鳴条件を満足することから、本流れ場中にも先程と同様に内部重力波が発達していることが分かる。ここには示さないが、励起時の最上流における温度変動スペクトル中には、温度擾乱の周波数（内部重力波の構成周波数のうちの1つ）に対応する1.6Hzのピークが存在している。しかし、図7に示した鉛直方向速度

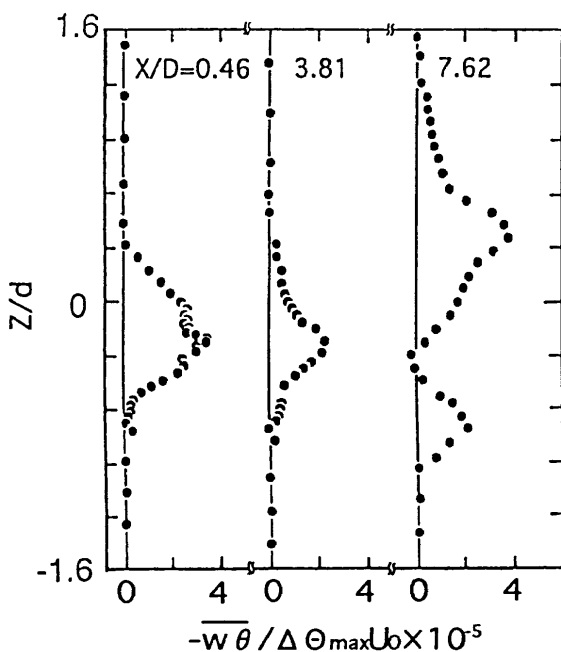


図6 鉛直方向熱流束の流れ方向変化

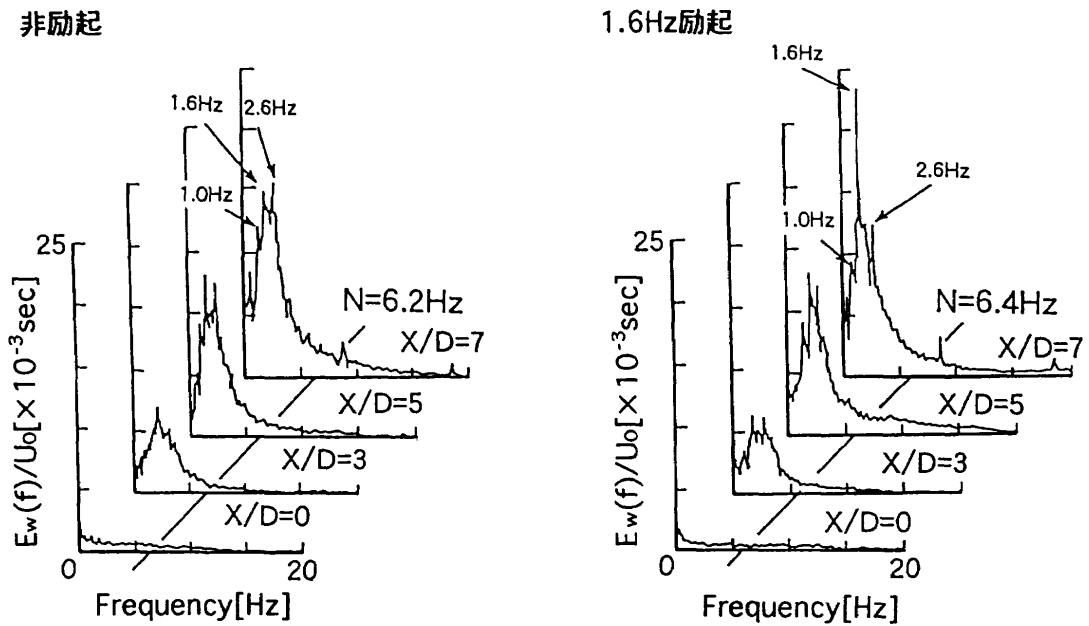


図7 鉛直方向速度変動スペクトルの流れ方向変化

変動スペクトル中には、そのようなピークは存在しない。従って、縮流胴上流にて与えた擾乱の影響は、最上流では温度場の方のみ現れている。また、擾乱に対応する周波数成分のエネルギーレベルは、下流領域 ($X/D=7$) では非励起時と比較して明らかに大きく発達している。これは、流れ場に与えた擾乱により、内部重力波の振幅が増加したことを示している。さらに、励起周波数成分1.6Hz以外の周波数成分のエネルギーレベルも若干増加している。これらの結果は、励起周波数から非線形干渉によって他の周波数成分へとエネルギーが輸送されたことを示している。励起を行った場合、 $B-V$ 周波数を上回る高周波の乱雑成分のエネルギーレベルもわずかではあるが高くなり、内部重力波の崩壊が早められている可能性を示していると考えられる。すなわち、微小な温度擾乱を用いて波動の種を与えることにより、内部重力波の発達の過程が早められ、より早い段階で崩壊に達する。これらの結果は、本手法が内部重力波の発達過程を制御するための有効な手段となり得ることを示している。

今後は、流れ場に与えた擾乱と内部重力波の各周波数間の相互干渉を明らかにするほか、成層流中における擾乱の安定曲線を実験的に求める。また三波共鳴条件を満たす周波数成分を合成した温度擾乱を与えるなど、励起条件をさらに変化させて内部重力波の発達過程をさらに精密に制御する。さらに、内部重力波が崩壊するときに生じると推測される逆勾配熱拡散現象等を定量的に捕らえて行きたいと考えている。

4. 結 論

- (1) 温度成層風洞内に3つの卓越した変動成分を有する内部重力波を自然発生させることに成功した。
- (2) 内部重力波の構成周波数の内の一つを持つ微小な温度擾乱を成層流中に与えることにより、内部重力波の発達過程の制御を行うことが出来る。

参考文献

- 1) Turner, J. S., Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press (1973).
- 2) Yih-ho, P., Goldburg, A., Clear Air Turbulence and Its Detection, Plenum press, N. Y. (1969).
- 3) 薩摩順吉: 科学, vol.56 (1986), 332.
- 4) 蒔田, 森, 新見: 日本機械学会論文集B編, 57-534 (1991), 404.
- 5) Makita, H., Mori, S., & Yahagi, A., Proc. 4th IMA Conf. on Stratified Flow, (1992), 38.
- 6) 蒔田, 森, 沢田: 日本機械学会論文集B編, 58-545 (1992), 90.
- 7) 蒔田, 沢田, 森: 日本機械学会論文集B編, 58-554 (1992), 3100.
- 8) Hazel, P. J., J. Fluid Mech., vol.30 (1967), 775.
- 9) Thorpe, S. A., J. Fluid Mech., vol.61(1973), 731.
- 10) Hazel, P. J., J. Fluid Mech., vol.51 (1972), 39.
- 11) Winant, C. D., Browand, F. K., J. Fluid Mech.,

- vol.63 (1974), 237.
- 12) Thorpe, S. A., J. Fluid Mech., vol.24 (1966), 737.
- 13) Stewart, R. W., Radio Science, vol.4 (1969), 1269.
- 14) McBean, G. A., Miyake, M., Quart. J. R. Met. Soc., vol.98 (1972), 383.