

Collapse of Internal Gravity Waves and Occurrence of Counter-Gradient Heat Flux

○大庭勝久 (沼津高専), 蒔田秀治 (豊技大), 神林裕 (豊技大), 岩田晃一 (日揮㈱)

Katsuhisa OHBA*, Hideharu MAKITA**, Hiroshi KANBAYASHI ** and Kouichi IWATA ***

*Dept. of Electronics and Control Eng., Numazu Collage of Tech., Numazu, Shizuoka 410-8501, Japan

**Dept. of Mech. Eng., Toyohashi University of Tech., Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 440-8580, Japan

***JGC CORPORATION, Minato Mirai, Nishi-ku, Yokohama 220-6001, Japan

This study aims to clarify the relation between the occurrence of counter-gradient heat flux and the spatial structure of internal gravity waves in a strongly stably-stratified mixing layer. Multi-point simultaneous measurement of the spatial structure of the waves was conducted by using a multi-channel high precision thermo-anemometer. Fundamental frequency components of the internal gravity waves of 1.2, 1.8, 3.0Hz were spontaneously generated in the mixing layer. Energy density level of temperature fluctuation increased remarkably below the Brunt-Väisälä frequency, as the internal gravity waves developed. At the same time, the spatial correlation among the temperature fluctuations became stronger, which shows the growth of vertical structure of the waves. The counter-gradient heat flux occurred through the break down of the wave front of the internal gravity waves by the nonlinear interaction between the fundamental frequencies and their higher harmonics.

1. はじめに

大気や海洋等の自然界や熱機器等の工業装置内の流れの多くは鉛直方向に温度分布を伴う成層流であり、そこでは温度勾配に起因する浮力と速度場のせん断が干渉し、乱流生成や熱運動量の輸送現象を複雑にしている^{1,2)}。

本研究室では、これまでに風洞内に形成した強安定成層流中に内部重力波を発達させ^{3~5)}、その崩壊過程において逆勾配熱拡散の発生を観察した⁶⁾。しかし、従来の単一センサーによる計測からは、波動の伝播角度や伝播速度を求めることは困難であり、その結果、波動の空間構造と逆勾配熱拡散との関連に関する詳細は十分には分かっていない。そこで、本研究では、遷移過程における内部重力波の空間構造を捉えることを目的とし、鉛直方向に7組のセンサーを配置した熊手型プローブを用いて、内部重力波の遷移過程とそれに伴う輸送現象を追跡した。

2. 実験装置及び実験条件

本実験では、全長 8.0m、一辺 $D=0.42\text{m}$ の正方形断面で断熱性の良好な測定胴を有する温度成層風洞を使用した。本風洞では、初期乱れの低減化と大きな温度勾配を得るために、60層のコイルヒーターから成る温度成層形成装置^{3,4)}を縮流胴上流に設置している (Fig.1)。

計測には、多チャンネル化した二線式温度流速計 (周波数帯域 $\text{DC} \sim 5\text{kHz}$ 、 S/N 比 60dB 以上)^{7,8)}と、多チャンネルプローブを用いた。この熊手型プローブは、従来の I-X 型プローブ (ch.4) を中央に、その上下に 6mm 間隔で各 3 組の I-I 型プローブ (上方から ch.1-3, 5-7) を配置しており、

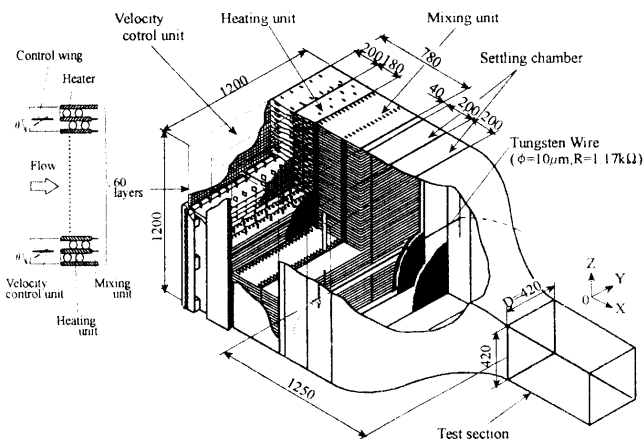


Fig.1 Thermal Stratification Generator.

これにより 36mm の鉛直スケールまで検出することが可能である。座標原点は測定胴最上流における混合層中心とし、流れ方向・鉛直方向をそれぞれ X、Z とした。

実験では非加熱部の主流流速 $U_0=3.0\text{m/s}$ 、最上流における最大温度差 $\Delta \Theta_{\max}=26.8\text{K}$ 、混合層厚さ $d_0=22.0\text{mm}$ のステップ状安定成層流を形成した。混合層の中心付近で、局所温度勾配は最大値 $d\Theta/dZ=1200\text{K/m}$ に達している。成層流の安定度を判別する局所リチャードソン数は、全計測断面の混合層内で強安定成層流となる条件 $\text{Ri}>0.25^9)$ を満たしており、平均温度勾配をエネルギー源として内部重力波が自励的に発達する流れ場が形成されていた。

3. 実験結果及び考察

Fig.2 は、熊手型プローブの中央に配置した I-X プローブにより計測された平均温度差と局所温度勾配の流れ方向変化を示す。縦軸は、 $X/D=0$ における混合層厚さ d_0 による無次元化高さ、横軸は温度差と速度差 (それぞれの最大値により無次元化) である。初期に形成された滑らかに急峻なステップ状の安定混合層は、熱拡散により $X/D=5$ まで緩やかに拡大し、それに伴い局所温度勾配のピーク値は減少していく。しかし、下流域 $X/D=9$ では混合層の拡大は顕著であり、 $Z/d_0=1.0$ 付近では勾配が緩やかになる領域も存在し、下流域での熱輸送現象が勾配拡散型以外の要因を伴っていることを示唆している。

Fig.3 に、各断面における局所温度勾配が最大となる位置で得られた温度変動スペクトルを示す。 $X/D=0$ では、内部重力波の上限周波数を規定する Brunt-Väisälä 周波数 ($B-V$ 周波数) は $N_B=6.3\text{Hz}$ である。 $X/D=5$ では、 $B-V$ 周

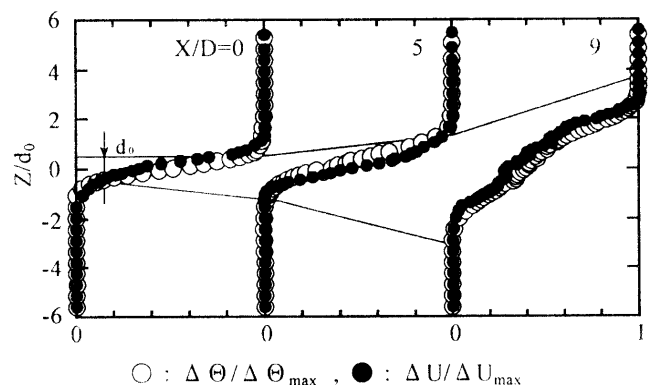


Fig.2 Vertical distributions of mean temperature and velocity.

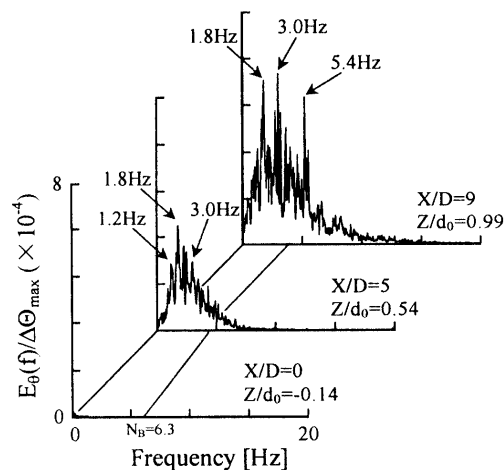


Fig.3 Energy spectra of temperature fluctuation.

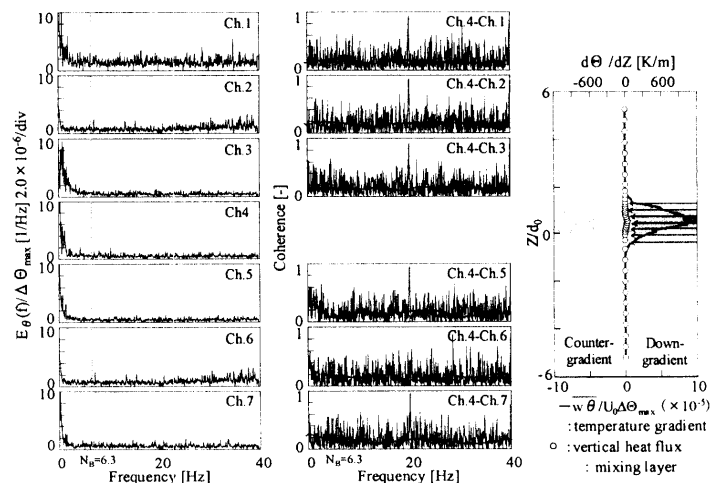
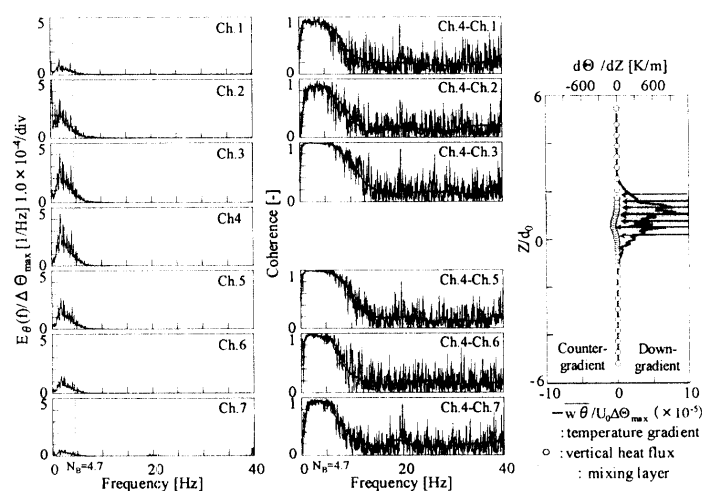
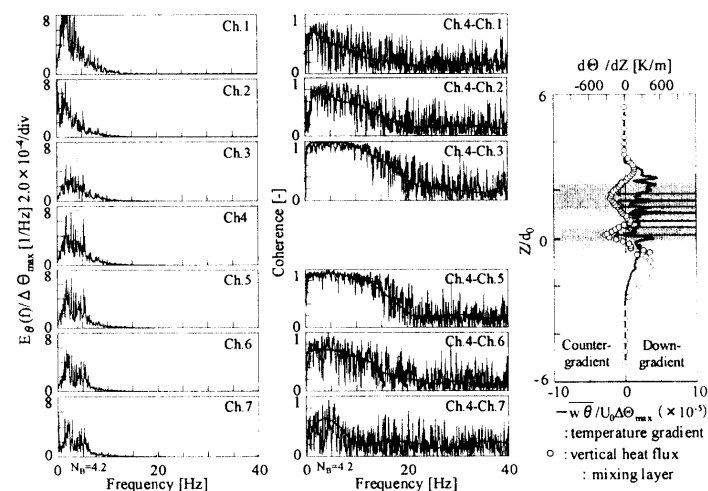
波数以下の低周波域のエネルギーレベルが顕著に増加し、さらに三波共鳴条件¹⁰⁾を満たす1.2, 1.8, 3.0Hzの周波数成分が確認されることから、内部重力波が十分に発達していると判断される。また、 $X/D=9$ では N_B 以上の高周波域のエネルギーが増加し、さらに波動の高調波成分のエネルギーレベルも増加していることから、ここでは非線形干渉が活発になり波動の乱雑化が進行している。

次に、空間計測により得られた結果を示す。Fig.4(a), (b), (c)に、鉛直方向に配置した7本の冷線から得られた温度変動スペクトル、中央の冷線に対する各ch間のコヒーレンス、鉛直方向熱流束と局所温度勾配を合わせて示す。なお、図中の矢印は各センサーの計測高さを示すが、ch.4のセンサーの位置で局所温度勾配が最大値となる。最上流 $X/D=0$ における各スペクトルは全てエネルギーレベルが低く、また、各プローブにより検出された温度信号間のコヒーレンスも低レベルであり、そこではプローブの線間距離(6mm)よりも大きな構造的な有する鉛直運動は発達していないことを示している。それに対し、三波共鳴条件を満たしていた $X/D=5$ では、ch.2~5のスペクトルにおいて、 N_B 以下のエネルギーレベルが増加している。このとき、ch.4に対する各chのコヒーレンスはほぼ1となり、ここでは、鉛直方向に強い相関を持つ運動として内部重力波が発達していることを示している。このときの鉛直スケールは20mm程度であり、混合層の厚さ(約40mm)の半分程度である。内部重力波の崩壊過程である $X/D=9$ では、各chの温度スペクトルは全て高いエネルギーレベルを有しているものの、中央と、上端及び下端間とのコヒーレンスは急激に減少している。これは、熊手型プローブの両端のセンサーが内部重力波の波頭を捉えている可能性がある。一方、熱流束に示されるように、この位置では逆勾配熱拡散が最大値となっている。以上の結果は、内部重力波の崩壊過程において、非線形干渉により波頭で生じた局所的な崩壊が逆勾配熱拡散の発生に寄与することを示している。

4. まとめ

本研究では、多チャンネル温度流速計を用いて内部重力波の空間計測を行い、内部重力波の崩壊が逆勾配熱拡散の発生に寄与することが示された。今後は、内部重力波の空間構造の詳細を明らかにし、それと乱流生成や輸送現象との関連を明らかにしていく予定である。

謝辞 本研究は、基盤研究(C)(2)No.15560138による成果であり、記して謝意を表する。

Fig.4 (a) The results of spatial measurement at $X/D=0$, $Z/d_0=-0.14$ Fig.4 (b) The results of spatial measurement at $X/D=5$, $Z/d_0=0.54$.Fig.4 (c) The results of spatial measurement at $X/D=9$, $Z/d_0=0.99$.

引用文献

- 1) J.S.Turner: *Buoyancy Effects in Fluids* (Cambridge Univ. Press 1973).
- 2) J.Lighthill: *Waves in Fluids* (Cambridge Univ. Press 1978).
- 3) 蒔田・森・新見: 機論 B57-534(1991)404.
- 4) H.Makita, S.Mori & A.Yahagi: *Proc. 4th IMA Conf on Stratified Flow* (1991)81.
- 5) 蒔田・大庭: 機論 B65-639(1999)3675.
- 6) 蒔田・大庭: 機論 B68-674(2002)2764.
- 7) 蒔田・森・澤田: 機論 B58-545(1992)90.
- 8) 蒔田・澤田・森: 機論 B58-554(1992)3100.
- 9) P.J.Hazel: *J.Fluid Mech.*30(1967)775.
- 10) S.A.Thorpe: *J. Fluid Mech.*24(1966)737.