

## 強安定混合層中に発達した内部重力波の空間計測

大庭 勝久（沼津高専），蒔田 秀治，関下 信正（豊技大）

## Spatial Measurement of Internal Gravity Wave in a Strongly Stably-Stratification

K. Ooba\*, H. Makita\*\* and N. Sekishita\*\*

\*Dept. of Digital Eng., Numazu College of Tech,

\*\*Dept. of Mech. Eng., Toyohashi University of Tech.

## ABSTRACT

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 temperature and velocity field was conducted by a rake of 7 cold- and hot-wires. The aspect of streamwise change in temperature spectrum showed that the internal gravity waves with fundamental frequencies of 1.2, 1.8, 3.0Hz developed in the mixing layer and suddenly collapsed in the downstream region. As the amplitude of the waves increased downstream, coherence became larger among the temperature signals given by the cold-wire rake. When the internal gravity waves broke down at their wave front, counter-gradient heat flux occurred through the nonlinear interaction among the fundamental frequencies and their higher harmonics.

Key Words : Strongly Stably-Stratification, Internal Gravity Wave, Counter-Gradient Heat Flux.

## 1. 緒言

鉛直方向に負の大きな密度勾配を持つ強安定成層流中には内部重力波<sup>(1)</sup>・逆勾配熱拡散<sup>(2)</sup>・上流伴流<sup>(3)</sup>等の興味深い現象が発生する。特に、密度差に起因して発生する浮力は流体運動に多大な影響を及ぼすが、その効果が卓越したとき、どのような影響があるのかは十分に明らかにされていない。

我々は、これまでに内部重力波の崩壊過程において逆勾配熱拡散が生じる様子を風洞で観察した<sup>(4,5)</sup>が、単一センサーによる一点計測の結果からは、波動の伝播速度の算出や波動の伝播角度に沿った解析を行うことは困難であった。特に、内部重力波の崩壊時における局所的な空間構造と逆勾配熱拡散の発生との因果関係を明らかにするためには、多チャンネルプローブによる空間計測が必要となる。本報では、鉛直方向に7組の冷線と熱線を組み合わせた熊手型プローブを用いて行った空間計測により得られた初期的な結果を報告する。

## 2. 実験装置及び計測方法

本研究に使用した温度成層風洞は全長約16m、測定洞は全長8m、断面は一辺が0.42mの正方形断面である。温度成層形成装置は、大きな温度勾配を実現し、同時に初期乱れを低減するために、縮流洞の上流側に設置した<sup>(6,7)</sup>。

温度・速度変動の同時計測には、本研究室で開発した冷・熱二線式温度流速計<sup>(8,9)</sup>を使用した。この計測器には、熱線の温度補償回路、冷線の周波数補償回路、デジタル遅延回路が内蔵しており、精密な温度・速度の分離同時計測を可能にしている。また、今回製作した熊手型プローブは、通常のI-X型プローブを中央に、その上下に6mm間隔でH型プローブを3組ずつ配置しており、各センサ

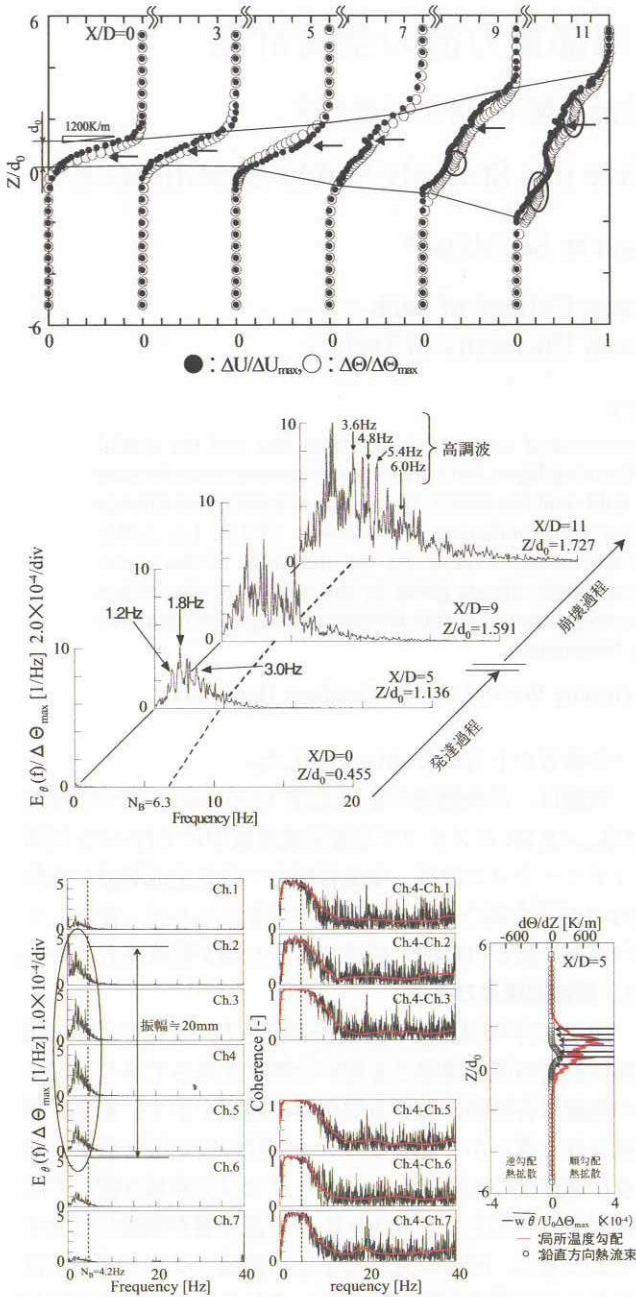
一の番号を上方からch1~7とした。

実験は、非加熱部の主流流速  $U_0=3.0\text{m/s}$ 、最大温度差  $\Delta\Theta_{\max}=26.8\text{K}$  のステップ状安定成層流中にて行った。局所リチャードソン数は、全混合層内で強安定成層流の条件  $Ri>0.25^{(10)}$  を満たし、平均温度勾配をエネルギー源として内部重力波が自動的に発達する流れ場が形成されている。

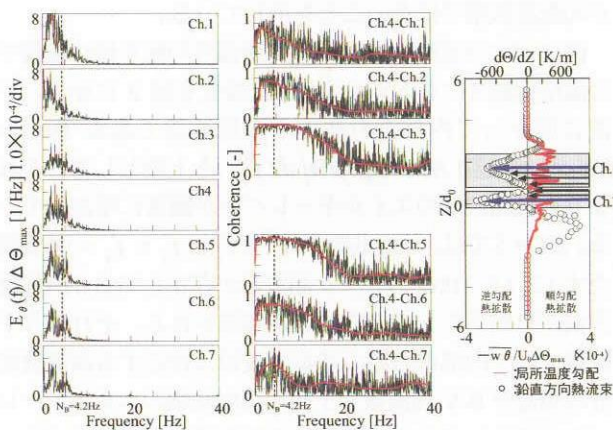
## 3. 実験結果及び考察

図1に平均温度差・速度差の流れ方向変化を示す。縦軸は初期の混合層厚さを用いた無次元高さであり、図中の実線は各断面における混合層の範囲を示す。初期に形成された滑らかで急峻なステップ状の安定混合層は、熱及び運動量の拡散により  $X/D=5$  までは分布域が緩やかに拡大する。しかし、 $X/D=9,11$  では混合層が急激に拡大するとともに、図中に丸印で示した領域では、わずかではあるものの温度勾配が負となっており、安定成層流の崩壊が始まっている。このことは、下流域における熱輸送が勾配拡散型ではないことを示している。

図1中に矢印で示した最大局所温度勾配を持つ位置での温度変動スペクトルの流れ方向変化を図2に示す。下流に向かって内部重力波の上限周波数である Brunt-Väisälä 周波数 ( $N_B = (g\beta d\Theta/dZ)^{1/2}$ ) を上限として、それよりも低周波域のエネルギーレベルが顕著に増加している。 $X/D=5$  では、三波共鳴条件<sup>(11)</sup> ( $f_1 \pm f_2 \pm f_3 = 0$ ) を満たす1.2, 1.8, 3.0Hzのピーク周波数が存在しており内部重力波が自然発生していることが確認される。それより下流域では、内部重力波の基本周波数に対応する高調波成分の発達やB-V周波数を上回る高周波域のエネルギーレベルが増加しており、非線形干渉を通じて波動のエネルギーが乱雑成分へと輸送され波動の崩壊が進行している



コヒーレンス(X/D=5, Z/d<sub>0</sub>=1.136)



ことを示している。

次に、内部重力波の発達・崩壊している強安定混合層内で行った空間計測の結果を示す。図3に、空間計測により得られた温度変動スペクトルとch.4を基準とした各chの温度変動成分間とのコヒーレンスを示す。X/D=5では、三波共鳴条件を満たす周波数成分が観察され、内部重力波の発達が確認された(図2)。本結果でも、ch.2からch.5のスペクトルではB-V周波数以下のエネルギーレベルの増加が顕著であり、そのとき、コヒーレンスの値も1に近いことから、強安定混合層中に発達した内部重力波は、鉛直方向に強い相関を持つことが分かる。このとき、波動の振幅は少なくとも20mm程度はあるものと判断できる。この断面での混合層厚さは約40mmであるが、混合層の外縁では波動の駆動力を生み出す局所温度勾配が減少することが考慮すると、波動は発達可能な範囲のほぼ全域に広がっているものと推測される。

図4に、波動の崩壊過程の初期段階であったX/D=9の結果を示す。全chで高周波域のエネルギーレベルが増加しており、波動間の非線形干渉により内部重力波の崩壊が進行していることが分かる。このとき、コヒーレンスは、中央のch.4とその両端のch.3とch.5の間では10Hz程度まで1に近い高い相関があることを示している。従って、ここでは10mm程度の鉛直スケールで波動としての構造的な残っているものと考えられる。一方、ch.1とch.7のスペクトルのエネルギーレベルは高いものの、相関が低下していることから、多チャンネルプローブの上端と下端のセンサーが、非線形干渉により変形した波頭の近傍を捉えていると考えられる。この位置は、逆勾配熱拡散のピーク位置とも対応している。このことは、崩壊過程において波頭付近で生じた局所的な崩壊により波動が乱雑化していく過程で逆勾配熱拡散が発達することを示唆している。

#### 4. 結言

内部重力波の空間構造と熱輸送現象との関連を調べるために、複数のセンサーを配置した熊手型プローブを製作し空間計測を行った。その結果、内部重力波の崩壊により、安定成層流中における浮力の安定化作用に逆らって速度変動の乱雑成分が生成される過程で逆勾配熱拡散が発達することを明らかにした。

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。

#### 参考文献

- 1) J.S.Turner, *Buoyancy Effects in Fluids* (Cambridge Univ. Press 1973).
- 2) Long R.R., *J. Fluid Mech.*, **42**(1970).
- 3) Hanazaki H., *Phys. Fluids*, **A1**(1989)1976.
- 4) 蒔田・大庭, 機論(B編), **68**-674(2002)2764.
- 5) H.Makita, K.Ooba & N.Sekishita, *Advances in Turbulence IX*, (2002)605.
- 6) 蒔田・森・新見, 機論(B編), **57**-534(1991)404.
- 7) H.Makita, S.Mori & A.Yahagi, *Proc. 4th IMA Conf. on Stratified Flow* (1991)81.
- 8) 蒔田・森・澤田, 機論(B編), **58**-545(1992)90.
- 9) 蒔田・澤田・森, 機論(B編), **58**-554(1992)3100.
- 10) P.J.Hazel, *J. Fluid Mech.*, **30**(1967)775.
- 11) S.A.Thorpe, *J. Fluid Mech.*, **24**(1966)737.