

風波の発生・発達に及ぼす温度成層の効果についての研究 (2)

加藤 始*・長山英樹**・信岡尚道***・森 正和****

1. 緒 言

これまでに波浪の推算に取り入れられていない外的要因として、気温と水温の温度差がある。この影響に関する現地観測結果については、Roll (1952)やKahm and Calkoen (1992)などの研究があり、大気が不安定な場合、波高が10~20%大きくなることが示されている。また、理論的な数値計算でもこの効果について研究されているが、実験的研究はこれまでにほとんどない。加藤ら(1996)は小型風洞水路を用いた実験的研究により、波高は不安定成層の方が安定成層より大きくなる傾向を示した。本研究では、測定回数を増やして系統的な詳しい測定を行い、吹送距離や風速の違いによる温度成層の効果の変化や、本研究(温度成層時)と既往の研究(中立成層時)との風波の発達過程の違いについて検討する。

2. 実験の方法

実験に使用した小型風洞水槽は、図-1に示すように吹送距離約9m、幅0.3m、高さ0.8m、水深0.45mである。波の測定は断面平均風速を4ケース($U_a=4.1, 5.6, 6.8, 8.5$ m/s)、測定点を4点($F=0.75, 2.5, 5.5, 8.5$ m)で行った。温度成層は水中に氷や湯を入れて風温 T_a と水温 T_w の差を作り、風場を安定、不安定、中立成層に設定した。各成層での鉛直温度分布の例を図-2に示す。

風温 T_a の測定には熱伝対温度計を使用し、風速分布の測定にはピトー管($\phi=3$ mm)と高精度差圧計を、ま

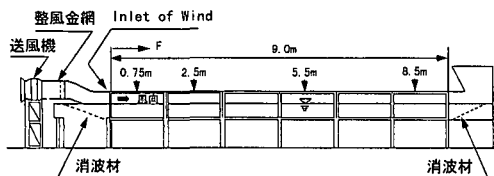


図-1 風洞水槽の概略図

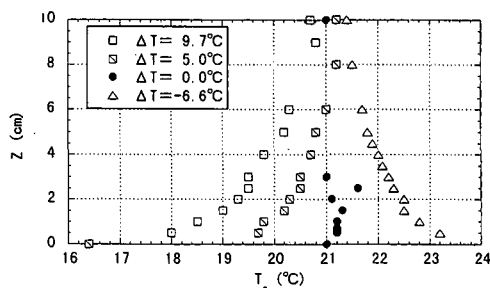


図-2 風温分布 ($F=2.5$ m, $U_a=4.1$ m/s)

た、風速変動の測定にはホットワイヤー風速計(Xプロブ)を用いた。水面変動の測定には、容量式波高計を用いて1ケースにつき繰り返し4回の測定を行った。そして、それらの結果から波高 H や周波数スペクトルを求め、4回の平均値を解析に用いた。なお、波高の測定の際には水質に十分に注意を払い、各ケースごとに表層水をオーバーフローさせた。

3. 波高と摩擦速度の測定結果

本研究では、加藤ら(1996)よりも測定ケースを増やし、温度成層の効果が波高にどのような違いを及ぼすのかを系統的に調べた。その結果を図-3に示す。この図は、一番左の列が風速が最も小さく、右に行くほど大きくなっている。また、一番上の行が吹送距離が短い点で、下に行くほど吹送距離が大きくなっている。そして、一つ一つの図の横軸は気温と水温の差 ΔT を、縦軸は中立の時の波高 H_{neu} を基準とした波高の比を示している。

図-3を見ると、風速が小さく吹送距離が小さい時には、波高は不安定成層で大きく安定成層で小さくなるという傾向が最もはっきりとみられる。そして、風速及び吹送距離が大きくなると共に、この傾向は弱くなり、風速が大きく吹送距離が大きなケースでは、波高の違いはほとんどない。

このような波高の結果から、温度成層の影響は温度差 ΔT だけではなく、風速や吹送距離にも関係することが分かる。そこで、大気の安定度の効果を示す指標として、温度差と風速をパラメータとして式(1)で表されるバ

* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科

** 工修 東洋建設(株)

*** 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

**** 学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科

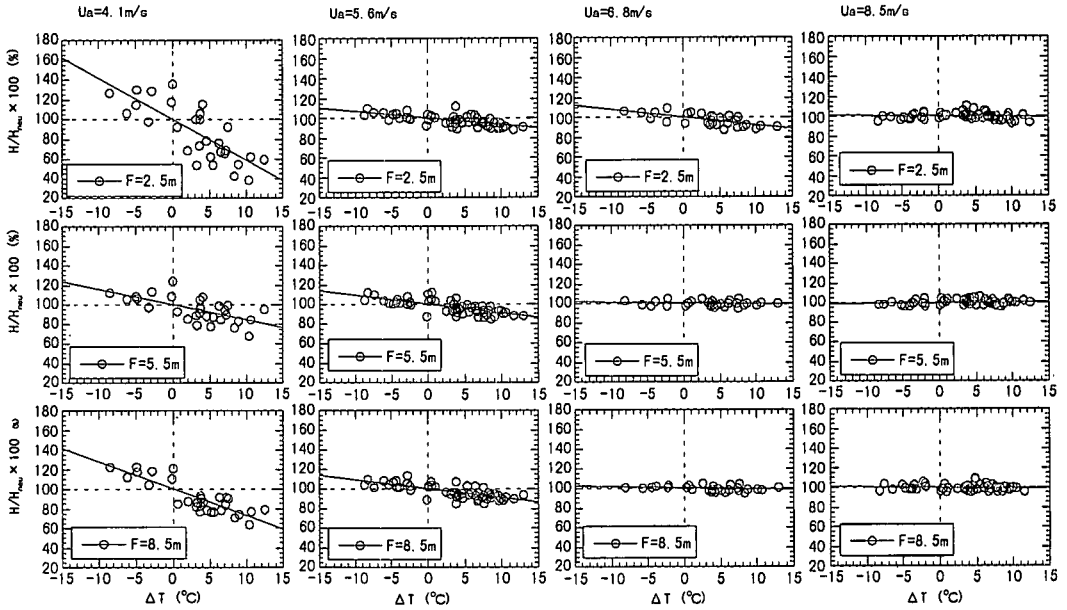


図-3 波高の測定結果 (中立時の波高との比率)

ルクリチャードソン数 R_b の有効性を調べてみる。

$$R_b = \frac{g z}{T} \cdot \frac{\Delta T}{U^2} \dots\dots\dots (1)$$

図-4 は本研究結果を、横軸にはバルクリチャードソン数を、縦軸には中立の時の波高を基準にした比の形で示したものである。これを見ると、バルクリチャードソン数は波高に及ぼす大気の安定度の効果がある程度表せる指標の一つであると考えられる。

風速が大きい時、温度成層の波高への影響は小さかった。このときの風の摩擦速度を確認するため、波高に差が出た風速の小さいケースと、波高に差が出なかった風速の大きいケースについて、各温度成層での風速の乱れ u', w' を測定し、レイノルズ応力と摩擦速度の関係

$$u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}} \dots\dots\dots (2)$$

を用いて u_* を求めた。図-5 は風速の小さい 4.1 m/s を、図-6 は風速の大きい 8.5 m/s の場合を示している。

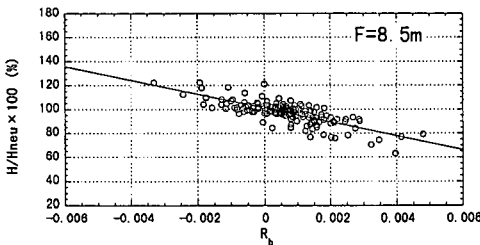


図-4 バルクリチャードソン数と波高の関係

風速の小さい時 (図-5) でははっきりと、風速の大きい時 (図-6) には多少のばらつきがあるものの、摩擦速度は不安定成層で大きく安定成層で小さくなる傾向がある。このことから、風速の大小に関係なく、不安定成層の方が水面への運動量は大きくなっていることが分かった。

摩擦速度と波高の関係を見ると、風速の小さい時にはその大小関係は一致していた。しかし、風速が大きいときは、摩擦速度は温度成層の違いにより変化するにもかかわらず、波高にはその差が現れていない。この理由については今回は検討していない。

4. 波のスペクトルへの温度成層の影響

温度成層の違いによって波高に違いが生じる場合のあったことがわかった。そこで、その違いを周波数スペクトルから検討する。さらに、このように温度成層によって

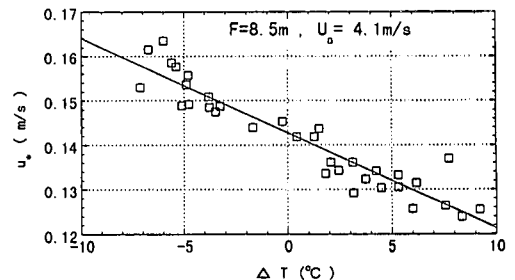
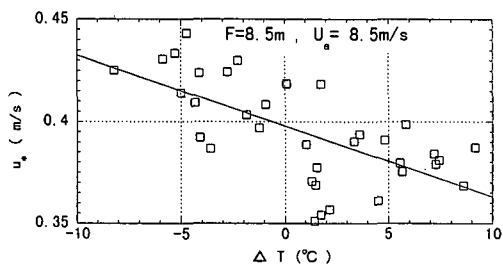


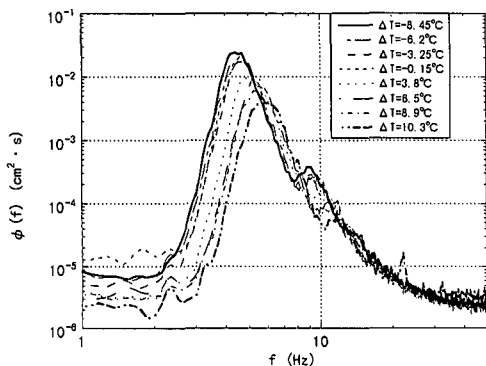
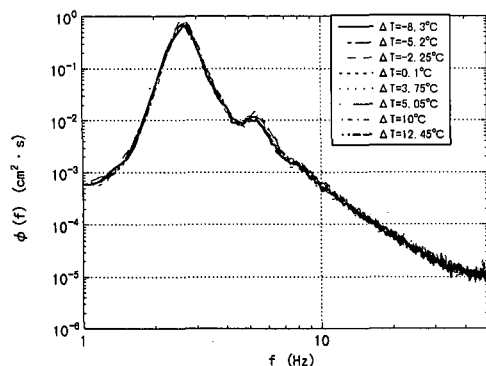
図-5 温度差と摩擦速度の関係 ($F=8.5$ m, $U_a=4.1$ m/s)

図-6 温度差と摩擦速度の関係 ($F=8.5\text{ m}$, $U_a=8.5\text{ m/s}$)

違いが現れた風波について、既往の研究での中立成層下で測定された風波と比較し、温度成層下での風波の発達過程について検討する。また、異なる温度成層下で測定されたスペクトルを、JONSWAP スペクトルへ近似し、パラメータ α と γ の温度成層による違いについての検討も行った。

4.1 周波数スペクトルの検討

図-7 には波高に明瞭な違いが現れた $F=8.5\text{ m}$ で $U_a=4.1\text{ m/s}$ の波のスペクトルを、図-8 には波高にほとんど違いがみられなかった $F=8.5\text{ m}$ で $U_a=8.5\text{ m/s}$ のときのスペクトルを示す。図-7 では、不安定成層の方

図-7 周波数スペクトル ($F=8.5\text{ m}$, $U_a=4.1\text{ m/s}$)図-8 周波数スペクトル ($F=8.5\text{ m}$, $U_a=8.5\text{ m/s}$)

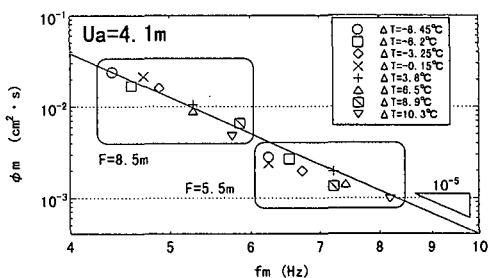
が安定成層よりも、ピーク周波数が低周波側にあり、さらにピークエネルギーが大きくなっている。これは一般に知られているスペクトルの発達過程と同様であり、不安定成層の方が発達が進んでいることを示している。一方、図-8 では、スペクトルにほとんど違いが見られない。今回の実験では図-7 に見られるような温度成層によるスペクトルの発達の違いは風速の増加とともに弱くなり、ついには図-8 の様に違いがほとんどなくなる。スペクトルの高周波数成分に注目すると、風速や吹送距離の大小に関係なく、温度成層による違いはほとんど見られない。

Toba (1973) は風波の発達過程において、スペクトルのピークの値 ϕ_m は、はじめは $\phi_m \sim f_m^{-4}$ に沿って変化し、十分に発達すると $\phi_m \sim f_m^{-5}$ に沿って変化することを示している。本研究で波高に違いが現れた $U_a=4.1\text{ m/s}$ の時のスペクトルのピークを取り出し、ピーク周波数 f_m と ϕ_m の関係を示したものが図-9 である。この図を見ると、温度成層の違いによるスペクトルの発達の違いはほぼ $\phi_m \sim f_m^{-5}$ に沿って現れている。このことから、風速が小さいときの温度成層の違いによる風波の違いは、従来の中立成層時の発達過程上でのものであり、不安定成層の方が安定成層よりも発達した風波になっていることが分かる。

また、風波の周波数スペクトルは、吹送距離による発達と風速による発達とは、若干異なることが知られている。本研究でのスペクトルの各温度成層での発達の違いは、吹送距離の違いによる発達の違いによく似ていた。そこで次式を用いてスペクトル ϕ をピーク周波数 f_m と全エネルギー E で正規化した。

$$\phi f_m / E = \phi(f/f_m) \quad (3)$$

波高に違いの現れた図-7 のスペクトルを正規化した結果を図-10 に示す。これを見ると、温度成層による違いがほとんどなく、ほぼ相似形が成り立つことが分かる。つまり、温度成層によるスペクトルの違いは、中立成層時のスペクトルの発達過程に従っており、不安定成層の方がより発達した風波であることがこの結果からも確認

図-9 f_m と ϕ_m の関係

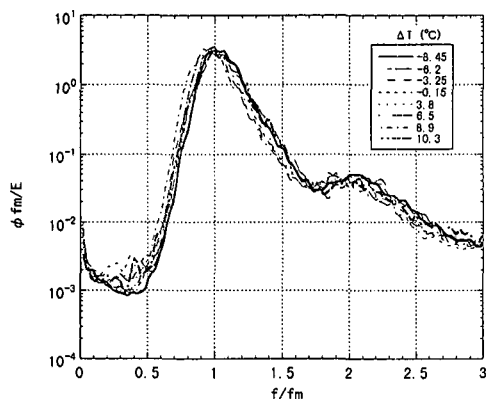


図-10 正規化したスペクトル ($F=8.5$ m, $U_a=4.1$ m/s)

できる。

4.2 既往の研究結果との比較

異なる温度成層下での摩擦速度と風波の関係を経往の研究結果と比較するため、吹送距離 F 、ピーク周波数 f_m 、エネルギー E を摩擦速度 u_* で無次元化したときの関係を図-11, 12 に示す。このとき用いた摩擦速度は、図-5, 6 に示すように、温度成層によって違いが現れている。

図-11, 12 を見ると、異なる温度成層下にあり、波高やピーク周波数に違いがあっても、摩擦速度で無次元化すると、既往の中立成層下で測定された関係とよく一致している。そして、図-12 に示すように、無次元ピーク周波数と無次元エネルギーの関係は Toba の $3/2$ 乗則によく従っており、異なる温度成層下における風波でも局所平衡を保って発達していることが分かった。

4.3 JONSWAP スペクトルへの近似

温度成層下で測定されたスペクトルから JONSWAP パラメータ α と γ を求め、温度成層の α と γ への影響を調べた。温度差と α, γ の関係を図-13 に示す。

図-13(I) に示す α は、波高ほどではないものの、波高に違いが現れたケースでは、不安定成層で大きく安定

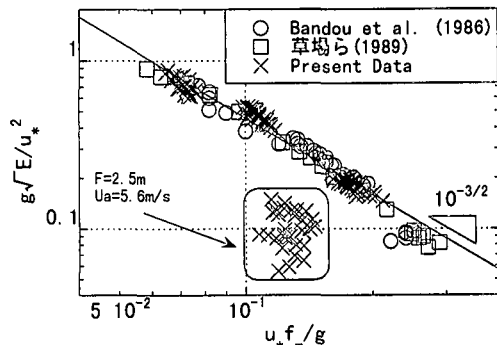


図-12 無次元ピーク周波数と無次元エネルギー

性層で小さくなる傾向が見られた。しかし、図-13(II) に示す γ には温度成層の違いによる系統的な傾向は見られなかった。

また、この α や γ と摩擦速度で無次元化した無次元吹送距離との関係を図-14, 15 に示す。これらを見ると、 α の結果を示している図-14 では、従来の関係とよく一致している。一方、 γ について Bandou ら (1986) は実験室での結果と海洋波の結果とは傾向の違いが生じることを示している。図-15 に示した本研究の結果は、実験室で測定された Bandou ら (1986) の結果とはよく一致するが、Hasselmann ら (1973) や Mitsuyasu ら (1980) により現地で測定された海洋波の結果とは Bandou らと同様に異なる傾向を示している。

最後に、本論文で温度成層を表すパラメータとして使

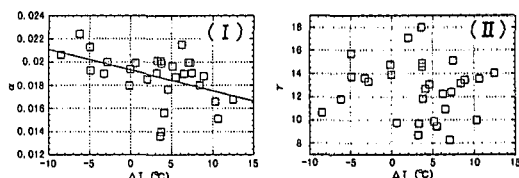


図-13 温度差と JONSWAP パラメータの関係

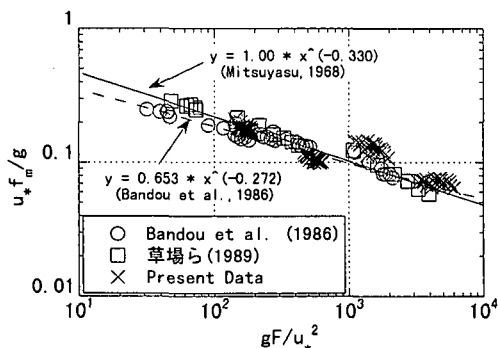


図-11 無次元吹送距離と無次元ピーク周波数

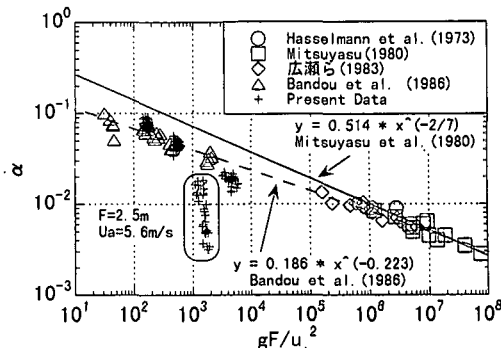


図-14 無次元吹送距離と α の関係

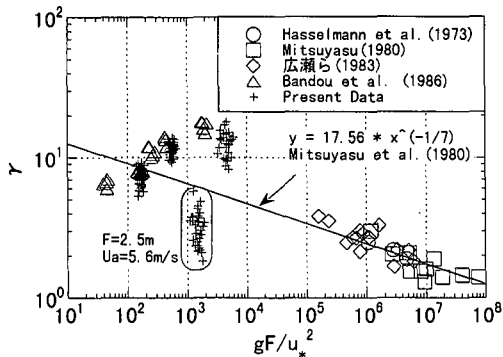
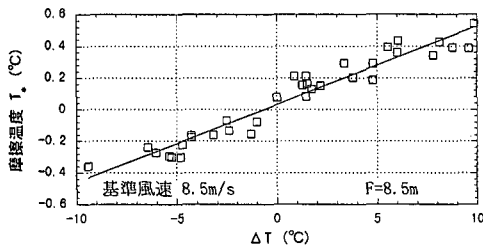
図-15 無次元吹送距離と γ の関係

図-16 温度差と摩擦温度の関係

用した風と水との温度差 ΔT と、水面付近の鉛直温度勾配との関係について述べる。

大気不安定度が中立でない場合、水面上の風速分布、風温分布はモニン・オブコフの相似則により、式(4)～(6)と表せる。

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} + \Psi(\zeta) \right\} \quad (4)$$

$$T_s - T(z) = -\frac{T_*}{\kappa} \left\{ \ln \frac{z}{z_\tau} + \Psi_H(\zeta) \right\} \quad (5)$$

$$L = \frac{u_*^2 T_1}{\kappa g T_*} \quad (6)$$

ここで $\zeta = z/L$ であり、 L は安定度スケール、 z_0, z_τ は水面と気温の粗度である。また、 $\Psi(\zeta), \Psi_H(\zeta)$ は温度成層の効果を表す項であり、 T_s は水温、 T_1 は水面上 10 cm の風温である。図-16 は温度成層下での摩擦温度 T_* の測定結果を風と水との温度差 ΔT に対してプロットしたものである。この T_* は摩擦速度 u_* と同時に測定した風温の鉛直分布に式(5)を適用して求めたものである。図-16 は水面上の温度勾配を表す T_* と本論文で使ってい

る ΔT とがほぼ比例関係にあることを示しており、このことから ΔT が温度成層を表すパラメータとして有効であることがわかる。

5. 結 論

小型風洞水路を用いて、風の温度成層が風波の発生・発達に及ぼす影響を、波高と波のスペクトルの面から調べた。本研究の主要な結果は以下の通りである。

(1) 波高は不安定成層で大きく安定成層で小さくなるが、その傾向は、風速が大きくなるにつれ、また吹送距離が大きくなるにつれて弱くなることが分かった。

(2) 温度成層下であっても、風速や吹送距離の増加による風波の発達は、従来の中立成層時の過程とほぼ同様に局所平衡を保ちながら行われていることが分かった。

(3) 温度成層により摩擦速度 u_* は異なるが、この u_* で無次元化すると、異なる温度成層下の風波でも中立時の吹送距離則がほぼ成り立つことが分かった。

参 考 文 献

- 加藤 始・長山英樹・信岡尚道 (1996): 風波の発生・発達に及ぼす逆流と温度成層の効果についての研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 251-255.
- 草場忠夫・増田 章・光易恒他 (1989): 局所平衡仮説に基づく水面粗度と抵抗法則～海洋における広域データの計測法に関する開発研究～(第 4 報), 九州大学応用力学研究所所報, 第 67 号, pp. 49-67.
- 広瀬宗一・立花祐二・菅原一晃 (1983): 日本沿岸の波浪スペクトル形について, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, pp. 83-124.
- Bandou, T., H. Mitsuyasu, and T. Kusaba (1986): An experimental study on wind waves and low frequency oscillations of water surface, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. 32, pp. 13-32.
- Hasselmann, K. et al. (1973): Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deut. Hydrogr. Z., No. 12, 95 p.
- Kahma, K. K. and C. J. Calkoen (1992): Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, J. Phys. Oceanogr., Vol. 22, pp. 1389-1405.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1974): The high frequency spectrum of wind-generated waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 30, pp. 185-198.
- Mitsuyasu, H. et al. (1980): Observation of the power spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, pp. 286-296.
- Toba, Y. (1973): Local balance in the air-sea boundary processes III, On the spectrum of wind waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 29, pp. 209-220.