

強風時における吹送流および水温の鉛直構造に関する研究

北村康司* ・ 仲座栄三** ・ Shak RAHAMAN***
中川勝広**** ・ 津嘉山正光*****

台風時の強風下における吹送流および水温の鉛直分布特性が現地観測により調べられている。観測は沖合約80 m の水深で行われている。その結果、風速増大に伴う吹送流の発達が生ずるにつれ、水温の層化も水深方向に進むことが示されている。さらに、表層付近における風速と吹送流との相関は強く、表層付近の吹送流の大きさは風速値の約3%程度であり、遅延時間は約7時間程度であることが示されている。吹送流の大きさおよび遅延時間は下層ほど小さくかつ遅れており、風速と吹送流との関係を近似する関数形は線形から二次曲線に変化することなどが示されている。

1. はじめに

海面上を吹く風によって引き起こされる吹送流の大きさは、一般に海上風の3%程度の大きさとなることが知られている。例えば、海上保安庁では、漂流者や漂流物等の漂流箇所推定に対し、吹送流を風向の右15度、大きさは海上風速の約2%と経験的に推定しているようである。

鹿熊・森永(2000)は、沖合の耐久性漁礁を利用して得られた海表面下約4 m 位置における日平均流れと日平均海上風速とを比較した結果、両者に強い相関が認められる場合、吹送流の大きさは風速値の3%程度になるとする結果を示している。

馬場ら(2000)は、鹿島灘に面する水深10 m の浅海域において ADCP (超音波流速計) を用いた観測により吹送流の鉛直分布、吹送流の時間応答特性、風速と吹送流の相関などについて検討している。その結果、風速が10 m/s を越える強風下においては、吹送流が沿岸流の大部分を占めることや、風と吹送流とに3~4時間の時間遅れが見られることなどを指摘している。

台風などの強風時には、吹送流は時間の経過と共にかなりの水深にまで達することが予想されるが、大水深環境下での吹送流の鉛直分布に関する観測例は少ない。

他方、台風など強風時には、海水温が低下することなどが良く知られている。海面水温(SST)の変動は、衛星画像で確認することができる。しかしながら、海水温の鉛直変動に関しては、直接的な測定に頼らざるを得ない。

仲座ら(1999)は、沿岸波浪計から得られる海水温デ

ータを用い、台風時接近・通過に伴う沿岸海水温の変動について調べている。灘岡ら(1999)も沖縄県石垣島の東海岸において、台風時の海水温変動を測定し、台風に伴う沿岸の流れが引き起こす沿岸湧昇による海水温の変動を報告している。しかしながら、これらの観測例はいずれも浅海域で行われており、吹送流と海水温の鉛直分布特性を十分に説明するにはいたっていない。

本研究は、台風時の強風下における吹送流の鉛直構造を明らかにし、加えて水温変動の鉛直構造についても明らかにすることを主目的としている。

2. 観測装置および観測方法

図-1に観測位置を示す。観測は沖縄本島中部の残波岬沖合で行われた。観測期間は、2001年8月2日から10月25日までの約3ヶ月間であった。流れおよび温度の観測には超音波式流速計4台と、水温・塩分・クロロフィルa測定器を主測定項目とする機器(STCD)2台、さらに小型海水温計(Tidbit)が90個用いられた。図中、○印は流速の定点観測位置を示す。また、△印は小型水温計による海水温の観測位置を示す。

図-2に、流速および水温の定点観測方法の概要を示す。図示のとおり、流速の定点観測には、切り離し装置

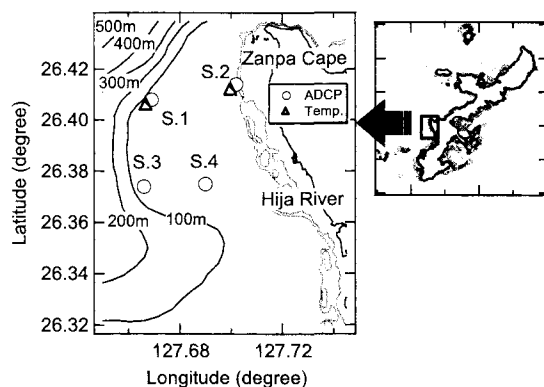


図-1 流速および水温の観測位置

* 正会員 博(工) (独法)情報通信研究機構 専攻研究員
** 正会員 工博 琉球大学助教授工学部環境建設工学科
*** 工修 琉球大学大学院理工学研究科生産エネルギー工学専攻
**** 正会員 博(工) (独法)情報通信研究機構 主任研究員
***** 正会員 工博 琉球大学教授工学部環境建設工学科

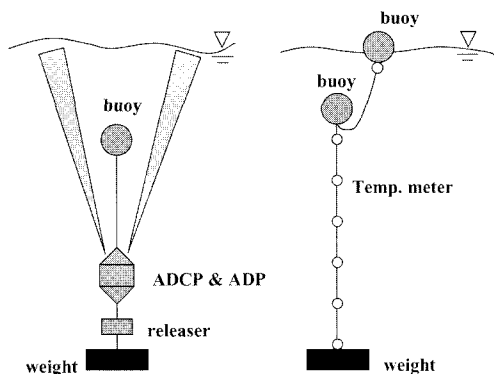


図-2 流速および水温の定点観測方法の概要

を經由して海底にアンカーで固定した超音波流速計をブイで立ち上げるといった方法が用いられた。超音波流速計(ADCP)は、周波数600 kHz(S.2及びS.4)および300 kHz(S.1及びS.3)が用いられた。超音波流速計による流速の測定は10分間隔の1分間測定とし、S.2及びS.4は層厚1 m、S.1及びS.3は層厚2 mにわたる流速の平均値を層の中間点における測定値とした。水温の観測には図に示すように小型水温計をブイの係留ロープに約10 m間隔で設置し、3分間隔でサンプリングを行った。

本論では、主に水深80 mのS.1における観測データの解析結果が示される。この海域における一般的な流れおよび観測方法のさらなる詳細については、北村ら(2004)を参照して頂きたい。

3. 結果および考察

強風時における風と流れおよび海水温との関係を明らかにする目的から、2001年9月10日～15日にかけて沖縄本島に來襲した台風16号に伴う強風時における流れおよび水温のデータを解析対象とした。

図-3に台風16号の経路を示す。台風16号は図示のとおり極めて複雑な経路を取り、沖縄本島に長時間の暴風雨をもたらした。台風は9月11日から12日にかけて発達しながら沖縄本島に近づき、中心気圧は955 hPaにまで達した。

図-4に、那覇に位置する沖縄気象台で得られた解析対象期間中の風向・風速および全天日射量、気温の経時変化を示す。期間中、風向は南よりではほぼ一定方向を示している。風速は台風の接近と勢力の増大に伴い9月11日12:00頃から急激に増し、風速15 m以上の強風が9月13日12時頃まで続いている。全天日射量は台風の接近に伴い減少している。その結果、夜間と日中の気温差が殆どなく気温は26°C前後ではほぼ一定を示している。

図-5に、小型水温計より得られた水温の鉛直分布と、

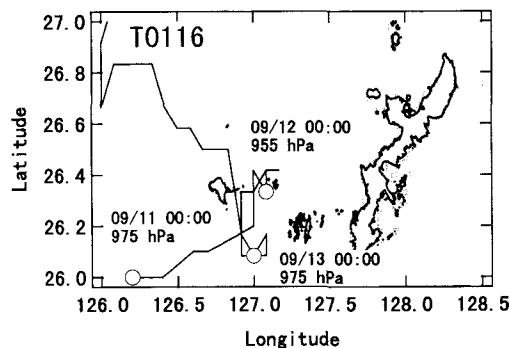


図-3 2001年台風16号の経路

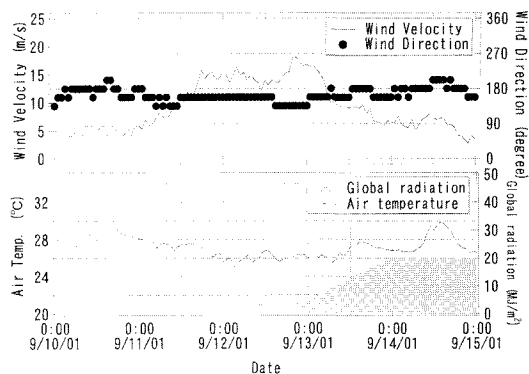


図-4 台風16号来襲時の気象概況

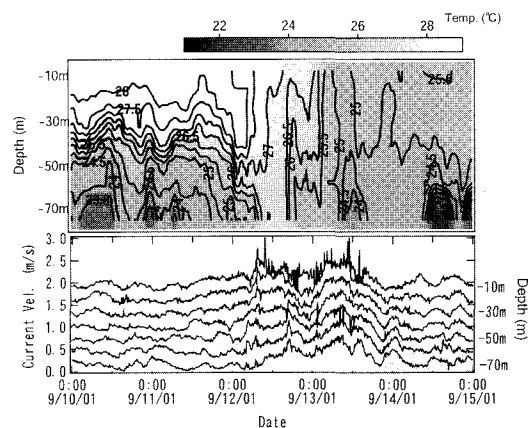


図-5 台風16号来襲時における水温および流速の鉛直分布の経時変化

ADCPより得られた南北成分流速と東西成分流速の合成流速の変化を示す。さらに、図-6に海底付近の合成流速と水温の経時変化を示す。水温の経時変化は、表層下10 mから80 mまでに10 m間隔で得られたものである。図では、水表面下10 mおよび水深80 m位置における水温の経時変化を太線で強調してある。

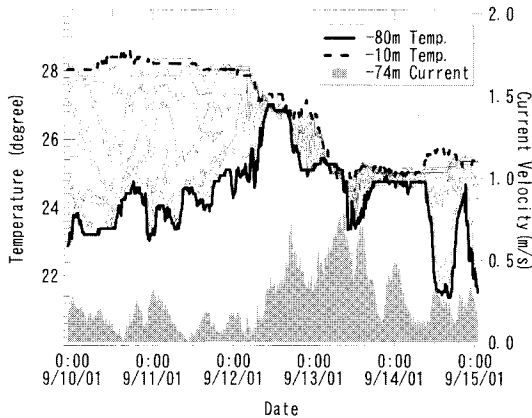


図-6 表層から海底付近までを10m間隔で測定した水温の経時変化と海底面付近の流速の経時変化

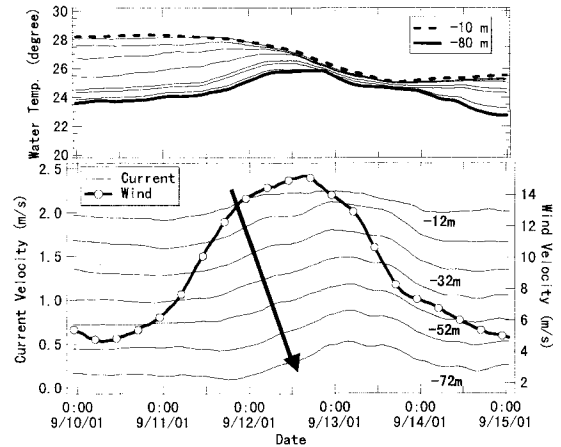


図-7 25時間移動平均操作を施した水温、流速および風速の経時変化

台風の接近に伴い、合成流速は風速増大の影響を表層から海底付近まで受けている。図の上部に示す水温の鉛直分布は、9月10日から12日にかけては成層状態にあり、水深約50m位置に躍層が存在することを示している。この成層状態は、台風の最接近時の強風下で急激に破壊され、海水温は表層から海底までほぼ一様な水温となっている。台風通過後には、直ちに海底面付近に低水温の進入が認められ、海底面付近で強い温度躍層の再形成が生じている。

ここに示す流速や水温変動の生データには、潮流成分等の日変動周期や、その他様々な短周期成分が含まれているため、風速と流速との関係や水温との対応関係が判断しづらい。そこで、以下においては、風速や流速および水温に25時間の移動平均操作（日平均操作）を施し、潮汐の影響をできるだけ取り除いたものを解析の対象とし検討を行った。

図-7に、表層から海底付近までを10m間隔で測定した水温の日平均値と、日平均流速の鉛直分布および日平均風速の経時変化を示す。図中、矢印は流速の時間的変動波形が、表層から下層に向けて伝播する様子に対応し、目視的に判断された同位相の伝播特性曲線を表す。

図に示すように、日平均流は風速の増大と共に流速を増し、その傾向は伝播特性曲線に沿う形で下層に伝達している。海水温が全水深にわたり一様化するのとは、風速による流速増大の影響が海底面に達した時点に一致している。

風速と流速との関係を明らかにするため、風速と流速の相関係数が最大値となるように風速に対する流速の遅延時間を各水深で算出し、風速の影響の水深方向伝播特性について検討した。図-8に、算出された遅延時間と相関係数の鉛直分布を示す。相関係数に着目すると、台

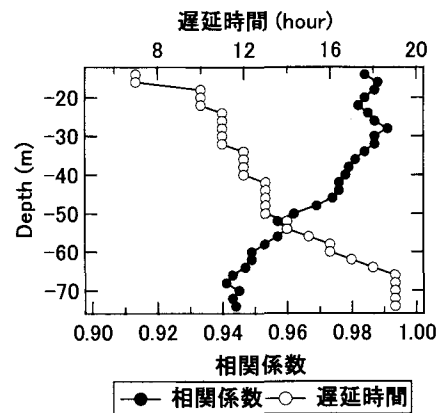


図-8 遅延時間と相関係数の水深分布

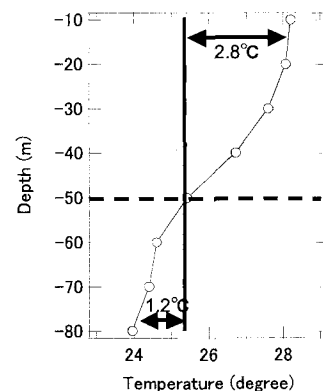


図-9 25時間移動平均操作を施した成層時の水温の鉛直分布

風の強風時における風速と流速との関係は全水深にわたって相関係数が0.94以上と高く、風速が流速におよぼす影響は、水深80mの海底付近にまで達している。

次に、流速の風速に対する遅延時間に着目すると、表層付近の遅延時間は7時間程度である。水深が深くなるに従い遅延時間は増し、海底付近で遅延時間は19時間程度となっている。遅延時間の鉛直変化は、水深50 mまではおよそ10 m毎に1時間の遅延時間となっているのに対して、50 m以深では影響の伝達速度が遅れている。図-9に、成層時の水温の鉛直分布を示す。図中破線はおおまかに見た躍層位置を示す。50 m以深で遅延時間が延びるのは、躍層を壊し、温度分布を一様化するのにエネルギーの消費量が増えることを示しているものと考えられる。

先に求めた遅延時間を考慮した上で、風速と流速の関係を最小自乗法により求めた。水深14 m (表層)、44 m (中層) および74 m (海底付近) における風速と流速の関係を図-10に示す。図示の通り、風速 U_w と流速 U_c の関係は、関数形 $U_c = aU_w^b$ で近似できる。

図-11に近似曲線の係数 a および b の鉛直分布を示す。図-10および11に示すように、表層付近において、風速と流速との関係は一次関数的であり、吹送流は風速の約3%程度となることを示している。しかし、水深が深くなるにつれ、風速と流速との関係は2次関数的となっている。

温度躍層が発達する水深50 m付近で、係数 a および b の水深方向変化は他の層と比較し著しく異なる。現時点では、如何なる現象が躍層付近で生じているのかは十分に把握していないが、今後詳細な解析を行い明らかにしていく予定である。

4. おわりに

本研究では、強風時における吹送流の鉛直構造および水温の構造について検討した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 吹送流は、表層において、風速値の約3%程度の大きさであり、遅延時間は7時間程度であった、
- (2) 水深80 mの海底付近では、風速と流れとの関係は2次関数的であり、遅延時間は19時間に達した。
- (3) 表層に風速の影響が表れてから海底にその影響が到達するまでの時間は12時間程度であり、水温変動もこれに対応している。
- (4) 吹送流の大きさは水深が深くなるに従い2次関数的になり、強風時に発達する吹送流は、風速の増大に伴い急激に強くなる。
- (5) 流速と水温の相関は非常に高く、風の影響が流れとして海底に達する時点で、成層状態であった水温が完全に破壊され全水深にわたり同水温となる。

今後は、沖縄偏波降雨レーダやパイスティックレーダおよびウィンドプロファイラを用いて広域の風速場を明

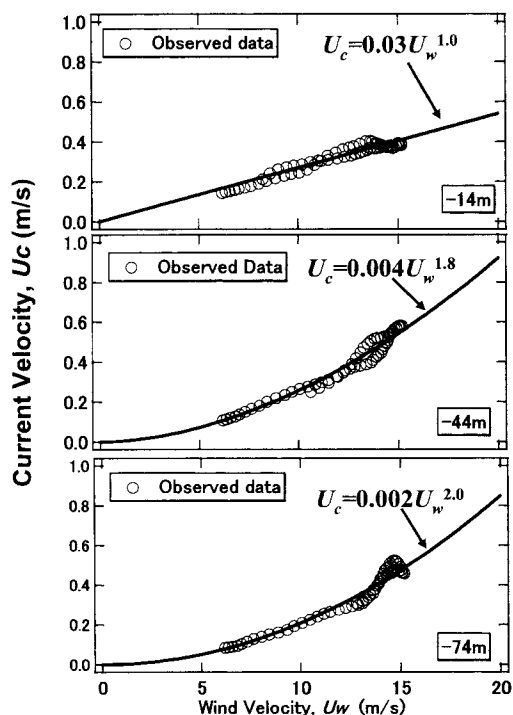


図-10 風速と流速の関係

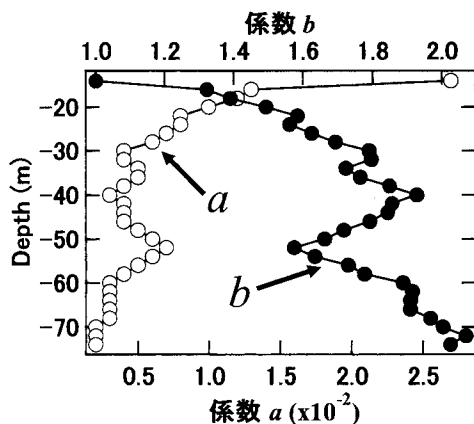


図-11 係数 a および b の水深分布

らかにすると共に、数値計算やブイデータから沖縄本島周辺海域における吹送流について明らかにしていく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、琉球大学の水工学研究室のメンバーに協力を得た。また、観測に際しては沖縄県読谷漁協および嘉手納漁協、さらに真生丸船長の古謝次徳氏に多大なご協力を頂いた。ここに記し感謝の意を表します。最後に、本研究の一部は、文部省科学研究費

(地域連携研究費(1):仲座栄三, 課題番号:11792023)
の援助を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(1993):沿岸海洋の物理学, 東海大学出版会, pp. 655.
鹿熊信一郎・森永健司(2000):沖縄島南東バヤオ漁場の残差流,
平成10年度沖縄県水産試験場事業報告書, pp. 61-63.
北村康司・仲座栄三・津嘉山正光・玉城幸治・シャックラハマン
(2004):沖縄本島残波海域における潮流および内部波に関する
研究, 土木学会論文集, No. 768/II-68, 131-146.
北村康司・仲座栄三・津嘉山正光・玉城幸治・S.M.B. Rahaman
(2004):陸棚斜面が潮流におよぼす影響に関する研究, 海洋
開発シンポジウム論文集, 第20巻, pp. 641-645
仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・砂川恵輝・北村康司・川上和
宏(1999):定点観測データから捉えたサンゴ白化の一因とし
ての海水温の変化について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.
1236-1240.
灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男(1999):
サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討, 海
岸工学論文集, 第46巻, pp. 1181-1185.
馬場康之・今本博健・山下隆男・加藤茂(2000):浅海域における
風域場と吹送流場の時間応答特性について, 海岸工学論文集,
第45巻, pp. 446-450.
-