

現地における吹送流の乱れ計測 Field Measurements of Turbulence in the Wind-induced Current

東京工業大学工学部 石川忠晴 T.Ishikawa
○東京工業大学工学部 田中昌宏 M.Tanaka

The characteristics of turbulence in the wind-induced current are investigated through analyzing data taken at the Lake Kasumigaura. After wind set-up, turbulence intensity increase near free surface by influences of wind wave and adverse current. At the stage the diurnal mixed layer deepening occurs, the turbulence intensity increase in the whole mixed layer. Estimation of Production and Buoyancy terms in the TK Eq. revealed that the excess turbulence energy is generated by the interaction between drift current and thermocline.

Keywords : wind-induced current, diurnal mixed layer, turbulence intensity, thermocline

1. はじめに

著者ら^{1), 2), 3)}は1987年夏霞ヶ浦において現地観測をおこない、吹送流及び日成層の特性を調べ、現地の吹送流は、①日成層（最大温度差 3°C 程度）と強く相互干渉していること、②大きな波（風洞水槽の風波より1オーダー大きい）の作用によって流速分布が一様化することを明らかにした。このことは現地の吹送流の乱流構造が日成層や大きな波の影響を強く受けていることを示唆している。

そこで本研究では、1988年夏のレーザ流速計による乱れ計測を含めた現地観測データから、現地での吹送流の乱流特性について検討した。

表1 観測期間

Series	年月日	備考
A	1987/7/29-8/5	7/29-30の24時間連続観測含長時間データ
B	1987/8/24-28	8/26-28の48時間連続観測含
C	1988/7/18-21	連続観測
D	1988/7/26-8/9	連続観測、長時間データ LDV測定(7/29-8/1)

2. 現地観測の概要

観測地点は霞ヶ浦湖心観測所であり、観測期間及び測定項目はそれぞれ表1、2に示す通りである。測定方法の詳細は前報^{1), 2)}で述べているのでここでは省略する。観測は、流速、水温の鉛直分布測定のための定時観測と乱れ量測定のための長時間観測を行った。定時観測は風や成層の状態によって変えているが、通常、鉛直15点、一点のデータ記録時間30秒の測定を1時間間隔で行った。吹送流の乱れ量の検討には1点30秒のデータでは不十分であるため、定時観測の間に1点3～7分の観測を行った（長時間観測）。ただし、流速測定には表2に示す様に2成分と1成分の2台の電磁流速計（EMC）を組み合わせて使用していること及びEMCの応答性の問題から乱れ量が正確に測定できるか不明であった。そこで、Series Dでは灘岡ら⁴⁾が開発した現地用レーザ流速計（以下LDVと呼ぶ）を使用した観測も行い、EMCのチェックも行った。ただし、LDVの測定はトラバース装置の制約から、水面下2mまでの鉛直4点のみの測定である。

表2 測定項目及び装置

測定項目	測定装置
流速2成分（水平・鉛直）	電磁流速計（EMC） （計測技研・VM-201E）
流速1成分（水平）	電磁流速計（EMC） （計測技研・VM-401E）
水温	サーミスタ （芝浦電子TLV-300）
水位変動	容量式波高計 （計測技研・CH403）
流速2成分（水平・鉛直）	現地用レーザ流速計（LDV） （ファイバ型）（カマックス）

3. 定常状態での乱れ特性

これまで現地での吹送流の乱れ計測はほとんど行われていないため、まず、実験室の風洞水槽における研究結果と対応しながら検討する。風洞水槽においては短時間の内に水面のセットアップが完了し、水面での風のせん断力と圧力勾配が釣り合った状態となっている。そこで、現地でも風洞水槽と同じ様な定常状態となっている時間帯のデータについてまず検討する。図1は

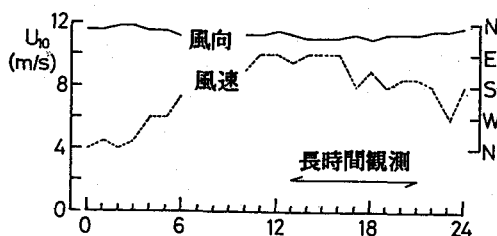


図1 (a) Series D7/29の風向・風速

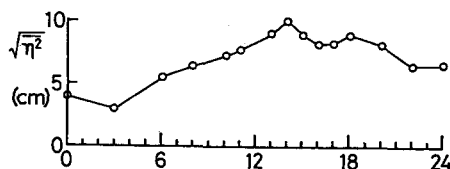


図1 (b) Series D7/29の水位振幅

Series Dの7/29の風向・風速 (U_{10} ; 水面から10mの高さの風速) 及び水位変動 η の時間変化を示している。日中風速8~10m/sのNNE-NEの風が吹いており、水位変動もほぼ一定である。図2は定時観測から得られた18:00の風方向の水平流速 U の鉛直分布である。流れは全層一様で風に対して逆流している。霞ヶ浦は断面形が緩い盆状となっているため(平均水深3.9m、湖心5.8m)、セットアップが生じている場合、水深の大きい湖心域では逆流となる⁵⁾。したがって7/29は、風及び流れの状況から判断して、定常状態にあったと言える。同様な状況がSeries Dの7/26, 27, 30, 8/4及びSeries Aの8/5に観測されたので、まずこれらのデータについて検討する。

風波が存在する場合の吹送流においては、流速変動に水面波による波動成分と乱れ成分が混在しているため、乱れの特性を検討するに当たっては流速変動から波動成分を分離する必要がある。通常実験室においては数値フィルター⁶⁾やスペクトル⁷⁾を用いて波動成分を分離している。本研究ではスペクトル (FFT) を用いて波動成分を分離した。図3はLDVによって得られた(a)水平流速 u 、(b)

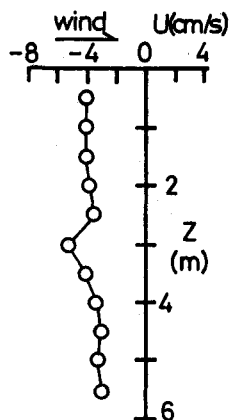
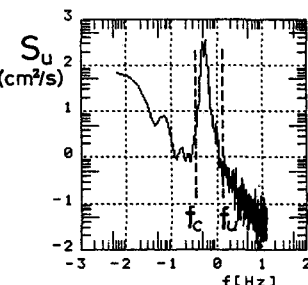
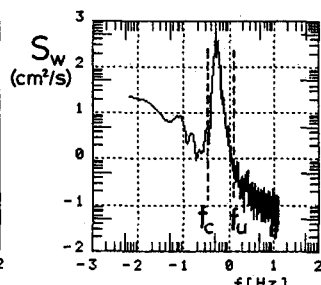


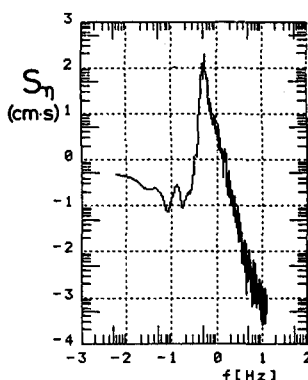
図2 流速鉛直分布 (Series D7/29/18:00)



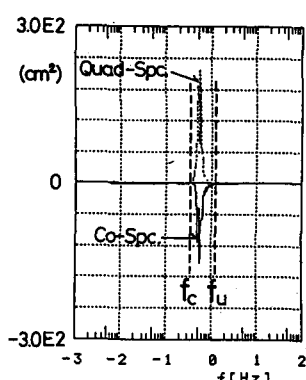
(a) 水平流速 u のスペクトル



(b) 鉛直流速 w のスペクトル



(c) 水位変動 η のスペクトル



(d) η と w のクロススペクトル

図3 スペクトル解析結果の一例 (Series D7/31/14:00)

(b)鉛直流速 w 及び(c)水位変動 η のスペクトルの一例である。 u 、 w のスペクトルを見ると、0.5Hz付近に水面波の軌道流速によるピークがみられ、さらに低周波側に乱れ成分による大きなエネルギーが存在し、両者は比較的明瞭に分かれている。波動成分の範囲は図3(d)に示す η と w のクロススペクトルでは、より明瞭となっている。そこで、図3中に点線で示した周波数 f_c より低周波成分を乱れ成分、 f_c と f_u の間の領域を波動

成分と定義する。ここで、 f_u より高周波の乱れ成分は極めて小さいため無視している。これより、乱れ成分 w' 、波動成分 $\tilde{w}$ の2乗平均は次式から算出される(f_d :下限周波数(データ長で決まる))。

$$\overline{w'^2} = \int_{f_d}^{f_c} S_w df \quad \text{--- (1)}$$

$$\overline{\tilde{w}^2} = \int_{f_c}^{f_u} S_w df$$

図4はSeries D7/29のLDV及びEMCデータから上式を用いて算出した鉛直流速の波動成分の鉛直分布である(σ_p :スペクトルのピーク角周波数、 λ_p : σ_p に対応する波の波長)。図中の実線は微小振幅波理論から得られる理論値であり、観測値とほぼ一致している。これより上記の波動成分の分離法が妥当であると考えられる。

図5は上記の方法で算出された乱れ強度(EMC及びLDV)を水面での摩擦速度 U^* で深さ z を水深 H で無次元化して示している。図中の実線はYoshikawa et.al.⁶⁾の実験($U^*=1.26\text{cm/s}$)の平均的な値である。まず、EMCとLDVの値を比較すると、それぞれバラツキが大きいものの、鉛直成分に関しては両者の値はほぼ一致している。水平成分はLDVの方がEMCより若干小さめの値を示している。これは、LDVの設置方法の問題から方向の精度が十分でなく、風の方とずれていたためと考えられる。したがって、EMCは数Hz以下の変動であれば乱れ量の測定も可能であると言える。次に観測値とYoshikawa et.al.の値と比較すると、乱れ強度は水平、鉛直流速共に水面近くで現地データの方がYoshikawa et.al.の値より大きく、特に鉛直流速の差が顕著である。鶴谷⁸⁾は逆流中を進む波(規則波)の場の乱れ特性を調べ、波が重畳すると流れのみの場合より乱れ強度がかなり大きくなること、逆流中に発達する風波は砕波が激しくなり、乱れ強度が増大することを示した^{9), 10)}。先に述べたように現地では逆流が生じており、また実験室より1オーダー大きな波が存在している。したがって、現地の吹送流の乱れ強度が水面近くで実験室の値に比べ大き

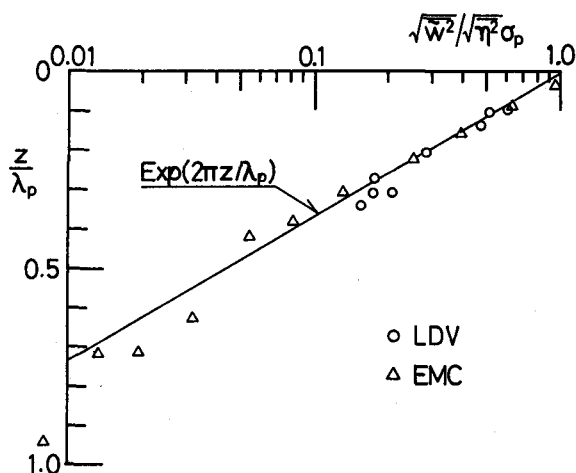


図4 鉛直流速の波動成分の鉛直分布

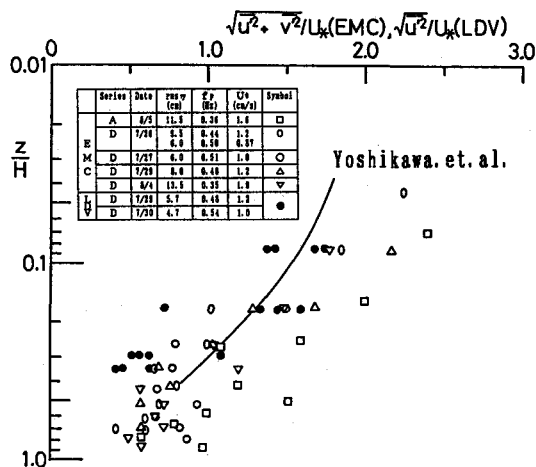


図5 (a) 水平流速の乱れ強度の鉛直分布

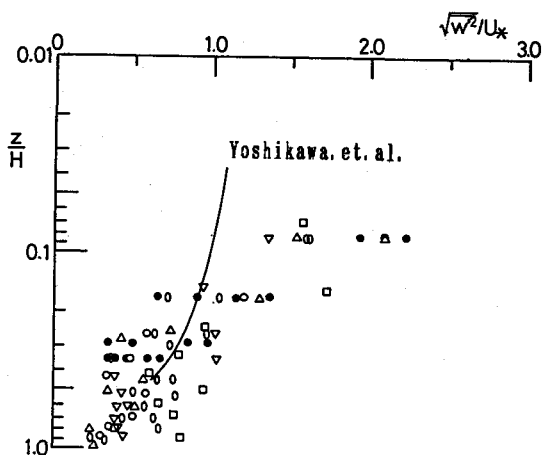


図5 (b) 鉛直流速の乱れ強度の鉛直分布

めの値を示した理由は、大きな波や逆流といった現地特有の状況によるものと推測される。このことは現地の吹送流の流速分布の一様化の原因を考える上で重要な特性と考えられる。

4. 躍層が存在する場合の吹送流の乱れ特性

図6は温度躍層が存在する場合の水平流速の乱れ強度（波動成分は3. 示した方法で分離している。）を U^* で、深さ z を躍層中心深さ h_l で無次元化して示している。図中の点線は観測値の各層の平均値であり、実線は3. で得られた躍層がない場合の平均的な値を示している。観測結果は躍層付近でピークを持つ特徴があり、また躍層がない場合に比べ、乱れ強度の値が上層全体に大きくなっている。これらの特徴は鶴谷ら⁶⁾の逆流をなくした二層流の実験結果と一致している。

このような乱れ強度の特性は日成層の連行現象を考える上で極めて重要であるため、次にこの特性について検討する。水平方向に現象が一様で、セットアップによる圧力勾配の影響が無視しうる時間帯では（日成層の混合はほとんどこの様な時間帯で起こる¹⁾）、運動方程式及び乱れエネルギーの輸送方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial(-\overline{U'W'})}{\partial z} \quad \text{--- (2)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\overline{U'W'} \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{g}{\rho_l} \overline{\rho'W'} + D - \epsilon \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 U ；風方向の水平流速、 u' ； U の乱れ成分、 w' ；鉛直流速の乱れ成分、 ρ ；水の密度、 ρ' ； ρ の乱れ成分、 k ；乱れエネルギー、 D ； k の拡散項、 ϵ ；逸散項である。（2）式を用いて、（3）式を鉛直方向に水面から躍層底面まで積分すると次のようになる（図7参照）。

$$\int_0^h \left(\frac{\partial k}{\partial t} - D + \epsilon \right) dz = \underbrace{U_*^2 \Delta U - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h U^2 dz}_{KP} + \underbrace{\frac{g}{\rho_l} \left(h \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \rho' dz - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \rho' z dz \right)}_{PE} \quad \text{--- (4)}$$

上記した乱れ強度の特性を調べるため、（4）式の乱れエネルギーの生産項（KP）とポテンシャルエネルギーの変化率項（PE）の値を観測値から算出した。なお、（4）式は躍層が形成されてから水面のセットアップによる圧力勾配が無視できる時間帯のみ有効である。

解析対象として、躍層が形成され、LDV及びEMCの長時間データが得られているSeries D 7/31を選んだ。図8は14:00-19:00の(a)風速、(b)水温鉛直分布、(c)風方向に斜影した流速鉛直分布、(d)深さ2 mに固定したLDVの乱れ強度、レイノルズ応力である。図9は図8(b),(c)に示したデータから（4）式のKPとPEの値を算出した結果である。なお、19:00以後は流速の変化に圧力勾配の影響が生じていたため、ここで検討は19:00までとした。水温は15:00まで水面から2.5m付近まで直線的に減少し、それより下層ではほぼ一定となっており、流速分布も同様な分布形となっている。15:00-16:00に風速が2m/sから3m/sに増加してお

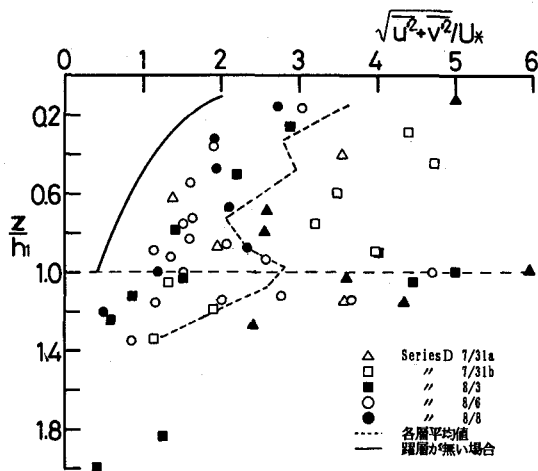


図6 躍層が存在する場合の乱れ強度の鉛直分布

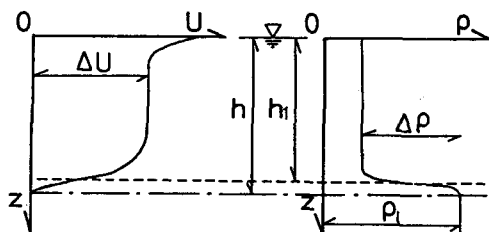
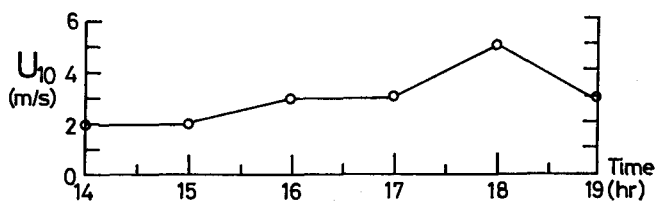


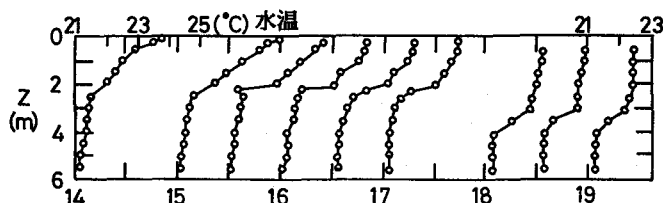
図7 流速、温度分布の概念図

り、それに伴って15:30には2m付近に温度差 2°C 程度の躍層が形成されている。その後躍層より上層は徐々に混合し、温度分布は一様化している。18:00には風が瞬間的に 5 m/s と強まったため躍層は3.5m付近まで下降している。レイノルズ応力の変化を見ると、14:20では上層が十分混合していないため水面の風応力の1割程度の値であるが、躍層形成直後の16:10では4割程度、17:10には8割程度に増加しており躍層直上まで応力が十分伝わっていることがわかる。乱れ強度は、LDVのデータは17:10までであるが、図7に示したEMCによる7/29a (17:20-17:50)、b (19:20-20:15) の乱れ強度の変化を合わせてみると、躍層形成後から増加していることがわかる。図9を見ると、KPの変化は15:45から16:15にかけて増加しており、その値はPEの3から8倍となっている。その後16:45以後はKPとPEはほぼ同じ値となっており、両者が釣り合った状態となっている。18:15には風速の増加によってKPが増大し、そのエネルギーがPEに変換されたため躍層が下降している。

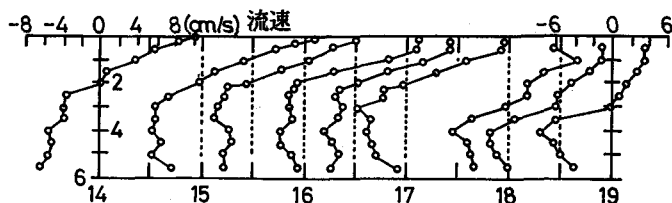
以上から、図7で見られた上層の乱れ強度の特性は躍層と流速場の相互干渉によって次のように説明できる。すなわち、流速分布は躍層の存在によって運動量の混合が抑制されるため、躍層付近の流速勾配が大きくなる。風によって上層が十分加速され流速が変化しなくなると、風応力が躍層付近まで十分伝達されるため、流速勾配の大きな躍層付近では乱れの生産が大きくなる(KPの増大)。躍層がない場合には、乱れの生産は水面近くの薄い層のみであり躍層が存在する場合には、表層から



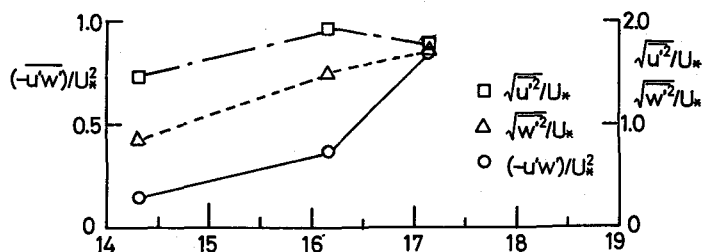
(a) 風速 (風向; ESE-SE)



(b) 水温鉛直分布



(c) 流速鉛直分布 (風方向)



(d) 乱れ強度、レイノルズ応力 ($z=2\text{ m}$, LDV)

図8 Series D 7/31/14:00-19:00の諸量の変化

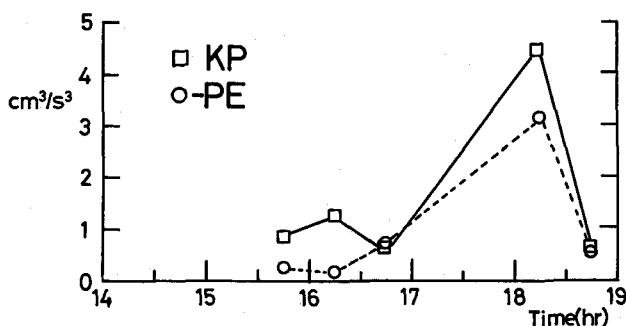


図9 KPとPEの時間変化

の乱れの拡散の他に、上記した機構で生産される乱れが加わる。したがって、躍層がない場合に比べ乱れ強度が増加する。またこの乱れエネルギーはポテンシャルエネルギーの増加すなわち連行によって消費される。

5. おわりに

霞ヶ浦における1987及び1988年夏の現地観測データを用いて現地の吹送流の乱れ特性を検討した結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 定常状態（水面のセットアップが完了した状態）での乱れ強度は、実験室の吹送流の特性とほぼ一致するが、実験室より1オーダー大きな風波や逆流といった現地特有の現象によって水面近くで増加する。
- 2) 躍層が存在する場合の乱れ強度は躍層近くでピークを持ち、また、躍層がない場合に比べ増大する。
- 3) 乱れエネルギーの生産項とポテンシャルエネルギーの変化率項の変化特性から、2)の特性は吹送流と温度躍層の相互干渉によって説明できた。

謝 辞

観測を実施するにあたり、建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所に種々のご配慮を頂いた。また、LDV使用に当たり、灘岡和夫氏（東工大・助教授）及び（株）カノマックスの協力を得た。記して、謝意を表する。尚、本研究は昭和63年度文部省科学研究費（奨励(A)、代表・田中昌宏）の援助を受けた。

参考文献

- 1) 石川忠晴・田中昌宏・小関昌信：日々の日射によって形成される弱い温度躍層と吹送流の相互干渉、第32回水理講演会論文集、pp.323-328、1988。
- 2) 石川忠晴・田中昌宏・小関昌信：湖面に働く風応力の現地観測、第32回水理講演会論文集、pp.305-310、1988。
- 3) 植松 仁・石川忠晴・田中昌宏：波動場における吹送流の流速分布特性、第43回年次講演会概要集、Ⅱ、pp.392-393、1988。
- 4) 灘岡和夫・八木 宏・増田幹雄・上野成三・村本龍夫：フィールド用LDVの開発による現地碎波帯流速場計測の試み、第35回海岸講演会論文集、pp.49-53、1988。
- 5) 村岡浩爾・福島武彦：霞ヶ浦（西浦）の湖流、国立公害研究所研究報告、第19号、1981。
- 6) Yoshikawa, I. et. al: Turbulent Structure in Water under Laboratory Wind Waves, J. Oceanogr. Soc Japan, Vol. 44, pp. 143-156, 1988。
- 7) 鶴谷広一・中野 晋・一戸秀久：吹送流の混合と乱れ特性、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 655-659、1984。
- 8) 鶴谷広一：海域における乱れと物質輸送に与える風の効果に関する研究、博士論文、東工大、1987。
- 9) 鶴谷広一・寺川博也・加藤 始：風の作用下での流れの乱れに関する研究、第29回海岸講演会論文集、pp. 173-177、1982。
- 10) 鶴谷広一・中野 晋・柳嶋慎一：逆流中の風波の発達特性に関する研究、第32回海岸講演会論文集、pp. 214-218。