

躍層界面における塩分拡散におよぼす風の影響

Effect of Wind on Salinity Mixing across Interface of Stratified Flow

北海道大学工学部 正員 ○大谷 守 正

北海道大学工学部 正員 八 鍬 功

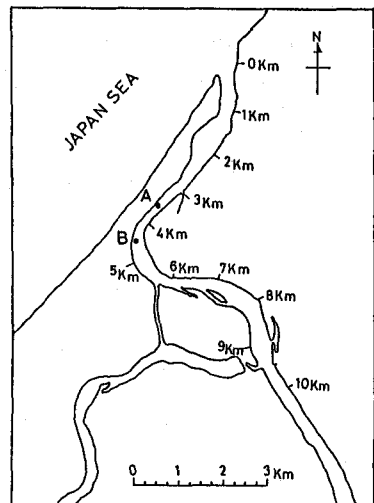
1 はじめに

成層密度流の界面に関する問題として、貯水池からの選択取水、深い湖に形成される水温躍層の場にみられる密度成層効果による流動や混合、河口流出流、塩水楔等があげられる。特に塩水楔に関してはその形状や長さ、さらに淡塩二層間に発生する内部波の安定、不安定、界面からの塩水連行等の問題が追求されており、理論的、実験的研究が多い。しかしほとんどは室内実験であり、実河川における成層密度流の界面現象に関する観測例は少ない。これまでに風の影響による成層密度流の界面に関する研究例として和田、片野等¹⁾²⁾は風波による水温成層の安定性の問題として海域に風波が作用した場合の水温成層の挙動を室内実験によって統計的に説明している。また風応力が湾内の流速および水温成層分布におよぼす影響を論じ、風が湾口から湾奥へ向かって吹送したときの海面上昇量や水温躍層面の低下量等が計算されている。河口湖の問題として岸、加藤等³⁾は吹送流によって生ずる淡塩水密度流の混合現象を室内実験によって考察している。さらに自然湖を対象としたものとして村岡、平田等⁴⁾により風外力に対する密度場の応答特性、並びに風停止にともなう内部静振における内部波の特性等が報告されている。これらはいずれも風外力による躍層界面の現象を取り扱ったものであるが、実河川での観測例は少ない。筆者らは通常二層流が形成されている石狩川において風の影響による淡水層、塩水層の塩分の変化、界面の変動を長期にわたり観測し、また短期間には二層境界面近傍に塩分計を設置して風の強い日を観測日に選び風の影響による界面近傍の塩分変化を観測した。

これらの観測記録から風の影響による塩水層から淡水層への塩分拡散について興味ある結果を得たので報告する。

2 観測方法

風の影響による塩分層から淡水層への塩分拡散現象を観測するため、図一1に示す石狩川の河口から4.4 km地点(A)に昭和58年5月16日より北西の風が強くなる12月13日まで約8ヶ月間左岸川岸から15 m沖合で水深11 mのところ川表面下0.5 mと川底上1 mの2点に塩分センサー(温度補正機構を持った東亜電波製、図にECMと略記)と水温センサーを設置し上層淡水層と下層塩水層の塩分、水温変化の長期変動を自記記録した。また界面変動を観測するため前報⁵⁾で述べた界面計を設置した。風の観測にあたっては同地点の川岸に交流発電式の風向風速計を設置して上記の期間、自記記録した。これらのセンサーの設置方法を図二に示す。以上は長期にわたる観測であるがこれとは別に風の強い日を選び短期間(1日~2日)の観測を実施した。これは図一1に示す河口から3.5 km地点(B)の棧橋において図三に示すように二層界面近傍に塩分計及び流速計(盛岡計器製電磁流速計、EMVと略記)を固定し塩分変動、流速変動を測定した。測定した位置は左岸から14 mの距離で全水深9 mであり、船上から行うよりはるかに安定した測定が可



図一 石狩川河口付近

能である。同地点の風の観測には光電式風向風速計を用いた。

なお塩水楔全域にわたる風による塩水の拡散状況を調べるため航行中の船から連続的に表面水を採水して塩素量を測定した。

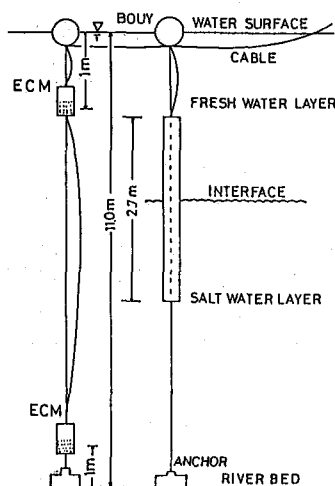


図-2 センサー配置図 B地点

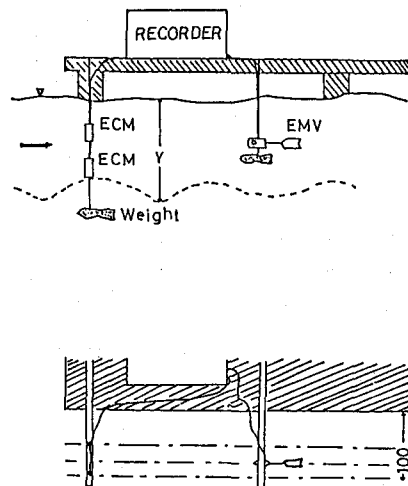


図-3 センサー配置図 A地点

3 観測結果

塩水楔の河口から先端までの長さは通常その川の淡水流量に支配される。石狩川の場合は流量約 $600\text{m}^3/\text{s}$ 以上では河口内に塩水楔は存在せず、渇水期には河口から15km以上も塩水楔が遡上する。石狩川の塩水楔は通常弱混合型で淡水と塩水の混合は両層の界面の内部波と密接な関係を持っている。内部波の発達する原因としては、潮汐、風の吹送、低気圧の通過、あるいは船の航行やその他機械的攪乱等があげられる。今内部波が風が水面に吹きつける剪断力によって発達し波高が増大し、境界面の上下の流速相対値が増すと同時に波頂が崩れて塩水が淡水中に混入し拡散する結果、淡水層内の塩分含有量が増大する場合を例にとる。

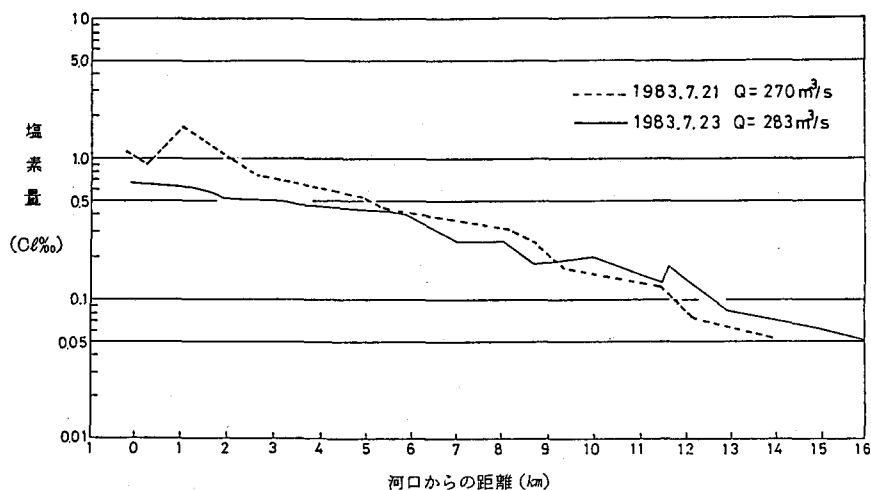


図-4 表面水塩素量分布図

図-4は昭和58年7月21日、23日の表面水塩素量分布を示す図であり、図-5は7月の21日から23日までの上下層塩分の変化、河川水位、潮位、風向風速を対比して示したものである。河川水位は河口から4.4 km上流の地点で塩分計設置点における観測値、潮位は石狩新港の観測値で北海道開発局の観測によるものである。

21日、23日の両日の流量の差はほとんどなく21日は流量 270 m^3/s 、23日は流量 283 m^3/s であり潮差、水位の変動も30 cm程度であり同じような流況である。しかし21日から22日の正午近くまで発達した低気圧が渡島半島の西海上にあり、これに伴う前線が石狩港近くを通過したため西北西から北西の風が吹き、観測記録は平均5.2 m/s 程度の風速を示していた。23日はこの低気圧が去り平均風速は1 m/s 程度に落ちた。このような条件の下で表面水塩素量を比較したのが図-4である。図から明らかに河口より9 km下流では23日に比べ21日の方が塩素量が増大している。しかし9 km上流では逆の現象がみられるが、これはこの地点より上流側は急激に水深が浅くなるとともに河床の凹凸が著しいため塩水の拡散が大きく表面水採水時の僅かな航路のいずれが塩素量濃度に大きく影響を及ぼしたものと思われる。また上下層塩分の変動も同様に21日から22日14時頃まで上層の塩分の増加がみられ、風が弱まるにつれて塩分減少が認められる。しかし下層塩分の顕著な変化はみられない。最大風速は21日1時の8.1 m/s であった。

次に風速10 m/s 以上の強風が吹いた場合の例について述べる、図-6は観測期間中の8月16日から18日の上下層塩分、風向風速、潮位、河川水位を示すが、図中の17日の12時前後の上層塩分の増加がみられるがこれを17日前後の天気概況と対比してみる。16日の朝までは石狩湾は勢力の強い大平洋高気圧の圏内にあり晴れ間も多かったが、大型台風5号の北上に伴い風が強まってきた。17日は台風5号が本州を北上しており南よりの強い風は17日の正午近くまで続いた。18日は台風5号は三陸沖にぬけたが北海道東部を中心に大雨となった。

このような気象条件の下では風速の増大が淡塩二層の界面に生ずる内部波や渦動を促進する結果表層の塩分増加をもたらしている。この観測中は表層塩分は最大3.66%まで増大していた。また台風の接近時は強風とともに降雨をもたらすのが普通である。この観測中も断続して降雨があり流量もそれに応じて変化した。図-7は3日間の流量の変化に応じて流量をパラメータにして風速と表層塩分との関係を示したものである。16日の平均流量は180 m^3/s 、17日は213 m^3/s 、18日は324 m^3/s であった。風速が10 m/s を越える時間帯は流量が190

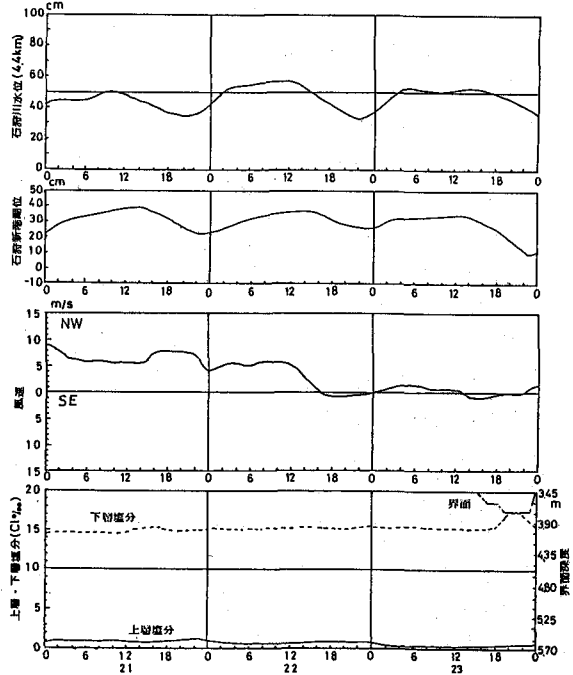


図-5 石狩川(昭和59年7月21~23日)の観測例

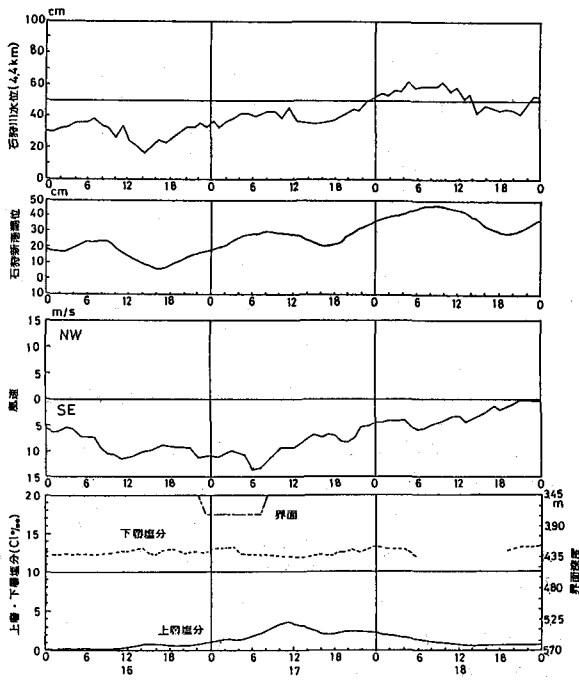


図-6 石狩川(昭和59年8月16~18日)の観測例

～220 m/s であり、風速 6 m 以上の風によって表層塩分の増加がはっきりと認められる。流量が 250 m/s を越える時にはすでに風が弱まり十分なデータの集積はないが、表層塩分濃度はすでに増加していた。これは流量の増大とともに界面における二層間の剪断力が増大し、下層塩水が上層淡水中に拡散されたものと思われる。

次に淡塩水境界面に風がどのような機構で影響を及ぼすか、水面付近に風速計、界面近傍に塩分計を設置して得られたデータのスペ

クトル解析を行った。測定器の配置は図-3 のとおりで、測定は15分間、塩素量濃度、風速の二点同時測定を行いデータレコーダに記録した。これを A-D 変換器により 0.25 秒間隔でサンプリングを行った。データ数は 512 個でこれを FFT 法でフーリエ変換し同時測定された二点での変量のスペクトルを求めた。周波数成分波は特に 10 Hz. 以下に注目する為に 10. Hz をカットオフ周波数とした。

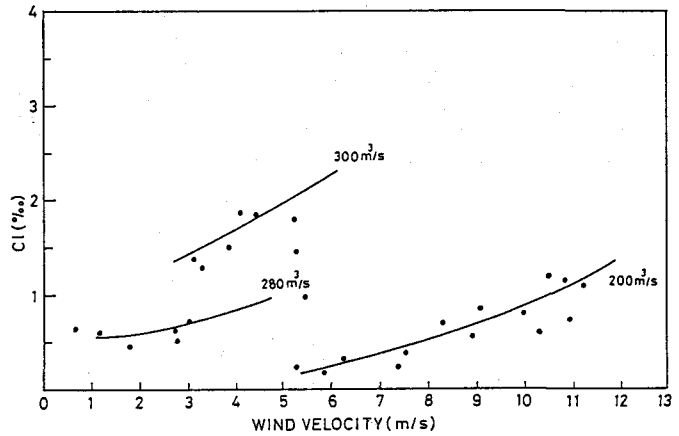


図-7 流量をパラメータとした塩素量と風速の関係

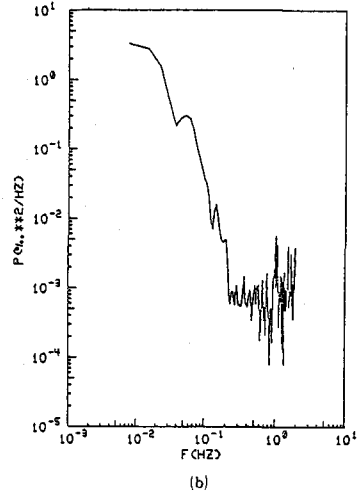
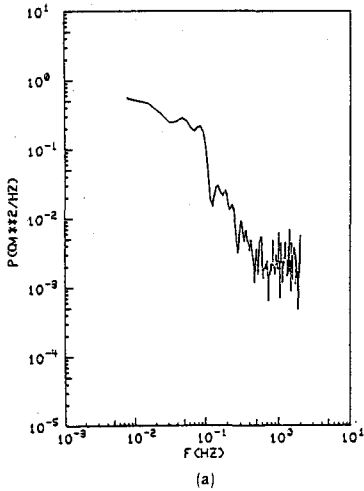


図-8 風速変動 (a) 及び塩分変動 (b) のスペクトル

図-8 は10月22日22時の測定で風が弱い時の例で平均風速0.2m/s 程度で界面位置は水深5.5m、塩分計の位置を4.5mに設置したときのものである。流速は0.1m/s程度である。風速のスペクトル図は0.8～2Hzの間にいくつかのピークを持つが、塩分のスペクトル図は1Hzのところに最大のピークを示している。

図-9 は強風時の例で風速が12m/s 前後の場合は風のスペクトル図は風の微弱な場合に比べてパワーは落ちずはっきりしたピークは持たない。しかし塩分のスペクトル図からも分かるように塩分変動は風が微弱な場合と同様に明らかに1Hzの周波数成分波が卓越している。この観測は11月2日に行ったものでこの時の塩分計の水深は4.6mであり、塩分鉛直分布は図-10の (b) で前日の11月1日の塩分鉛直分布に比べて界面の勾配は階段状になっており界面は不安定な状態を示している。

図-11は流量が増大して界面の位置が水深7.25 mまで低下し風の影響が及ばないと思われる例であるが、

この時は風が平均2.5m/sで吹送していたが強風時と同様風のスペクトル図は明瞭なピークは持たず周波数成分波の分布も同様な傾向がみられる。しかし塩分の場合は0.5 Hzから振幅が一定となる傾向がみられるが、あきらかに1Hz付近のところにピークが認められた。

図-8、9、10に示したスペクトル図は短期観測における風の影響による界面の乱れ構造を調べるためにとられたものであるが、一般に吹送流と風成波浪が主流の乱構造に大きく影響していると云われており、今回の観測時はすべて河水の流れと同方向に風が吹いており風が強く風波の激しく起ると思われる時でも波長50cm～1m、波高が5～10cm程度であった。この時は流速が増大し表面流速は33cm/sであり風が弱まり風波が少ない時は波長5～10cm、波高1～2cm程度であり流速も減少して表面流速は8cm程度となる。

以上の条件の下での観測であるが、塩分変動のスペクトルは風速10数m程度以下では風の強弱にあまり関係せず界面近傍では1Hz付近の周波数成分波が卓越し風の強弱によってその振幅のみを変化させる傾向が見出せる。これらの観測結果を他の実験例と比較すると椿、小松等は室内実験において高周波の内部はスペクトルは流速変動スペクトルに強く依存し、 $-13/3$ 乗則が成立する事実をあげている。また、田城、吉田等は天塩川河口における観測より、界面直上での流速変動を測定し風力3程度

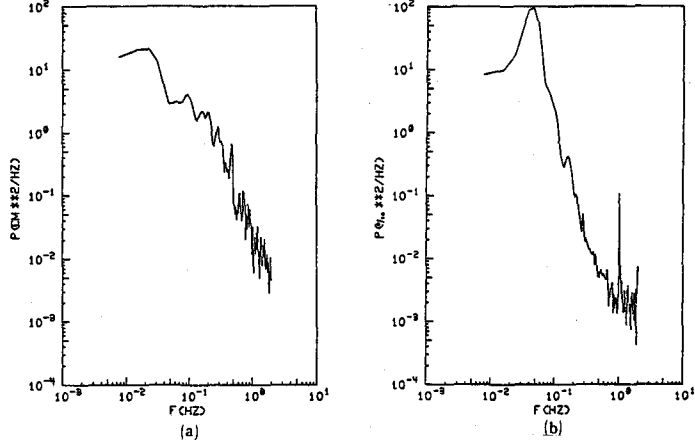


図-9 風速変動(a)及び塩分変動(b)のスペクトル

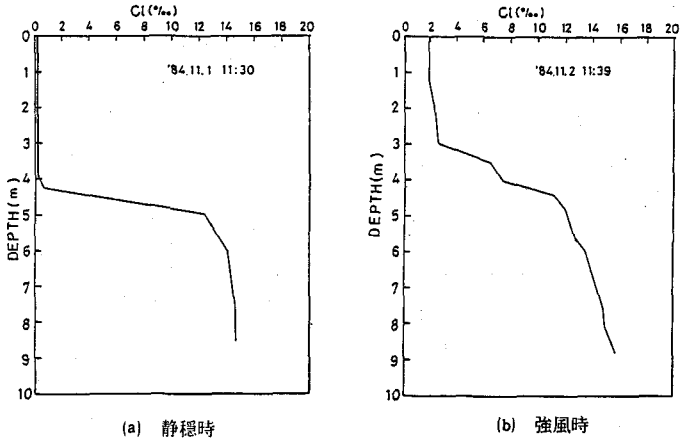


図-10 塩分鉛直分布図

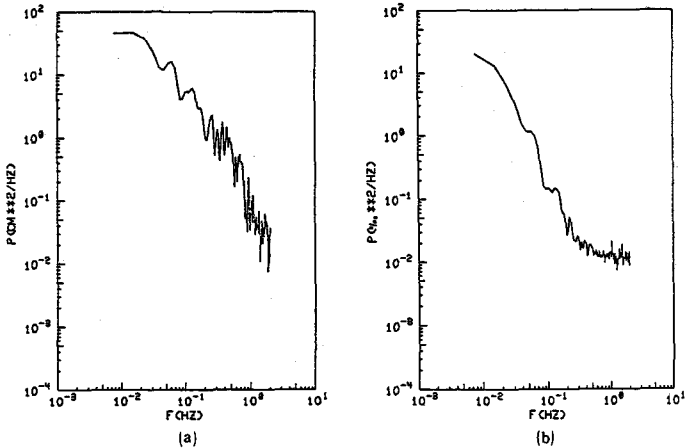


図-11 風速変動(a)及び塩分変動(b)のスペクトル

の風の時風波による $0.2 \sim 0.3 \text{ Hz}$ のスペクトルピークが界面にまで及んでいることを確認しており、今後はさらに流速変動を含む内部機構の詳細な説明をしてゆく必要がある。

4 結 語

以上、風の吹送によって生ずる流れと乱れによって発生する二層界面における塩水層から淡水層に拡散する塩分について野外観測を行った。その結果を要約すると次のようになる。

1) 風の吹送は表層塩分の増加をもたらし、河口より 4.4 km 地点では流量 300 ml/s 程度に減少すると表層塩分に風の影響が認められる。

2) 表層塩分のピークは風速最大の時刻より 6 時間程度おくれを生じて観測された。流量が減少するとこのおくれは短縮される傾向がある。

3) 平均風速 10 m/s 程度以下では風の強弱によらず界面近傍の塩分変動のスペクトルは 1 Hz 付近に卓越周波数成分波を持つ。風が強くなるとピークは鋭くなり振幅は増大する。

謝 辞

本研究の遂行にあたり貴重な資料を提供していただいた北海道開発局の関係各位ならびに観測や資料整理に協力された本学大学院生、中野 渉、山下浩幸、照井 隆、学部学生矢島宗隆、の諸君に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 和田 明, 片野尚明; 風波の作用下における水温成層の挙動に関する一実験, 第18回海岸工学講演会論文集, PP.287 — 292, 1966.
- 2) 和田 明; 水温躍層面口および風の影響, 電研報告 No. 65084, 1964.
- 3) 岸 力, 加藤正進; 二層流の風による混合に関する研究, 第14回海岸工学講演会講演集, pp.240 — 245, 1967.
- 4) 村岡浩爾, 平田建平; 中禅寺湖の内部波, 第27回水理講演会論文集, pp.179 — 184, 1963.
- 5) 大谷守正, 西條淳夫, 八畹 功; 2 層流界面計の試作と非定常界面変動の観測, 第28回水理講演会論文集, pp.99 — 104, 1984.
- 6) 椿東一郎, 小松利光, 下田五郎; 2 層界面における内部波と乱れに関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.311 — 319, 1981.
- 7) 田城徴雄, 吉田静男, 満沢巨彦; 河口二層流における乱流構造の観測, 第28回水理講演会論文集, pp.87 — 92, 1984.