

2層流界面計の試作と非定常界面変動の観測

Design of a Step-type Interface Meter and Its Application to Field

Observation of Interfacial Unsteady Motion in a Stratified Flow

北海道大学工学部 正員 大谷 守正
三洋電機 西條 淳夫
北海道大学工学部 正員 八 鍬 功

1. はじめに

河口2層流における塩淡水の界面変動や界面を通しての塩水の拡散現象についての研究は多いが観測例としては実験条件を制御する室内実験が多く、野外における実測は少い。従来観測に用いられた界面計として平行線式あるいは自動追尾式等があるが、平行線式は実験室等ではよいが実河川では線の長さが数mにもなり、また界面の状況によって密度勾配が大きく変化するので実用的な精度をうるのが困難である。また自動追尾式は精度よく連続的に界面の位置を測定できるが、長期間測定のためにはプローブを昇降させる装置等大規模な装置が必要である。このような観点から筆者らは簡便で長期間使用しうるステップ式界面計を試作した。試作したステップ式界面計は可動部がなく、すべて電氣的に計測しており長期間安定に作動する。

1982年9月、10月の2ヶ月にわたりこれを石狩川河口部に設置して塩水楔の界面変動を自記記録し、充分実河川で使用しうることをたしかめた。観測にあたっては同時に表層淡水部と底層塩水部の塩分変化をも記録して、河川流量が増大した場合や風の影響による非定常な塩水楔の界面変動と淡水層への塩水の拡散について興味ある結果を得た。以下に試作した界面計の構造と、観測の結果について述べる。

2. ステップ式界面計

ステップ式界面計は写真-1に示すように一定間隔に電極を埋め込んだ測定ポールを塩水楔が遡上している河川中に固定し、電極が淡水または塩水に浸った際につくられる電氣的 on, off 作用を利用して、界面変動を測定するものである。測定ポールとしては、加工の容易さ、絶縁性等を考慮して径5cm、長さ2.7mの塩化ビニールパイプを用いた。電極としては通電により消耗が少ないことや加工の容易さ等を考慮して間隔2.5cmに設

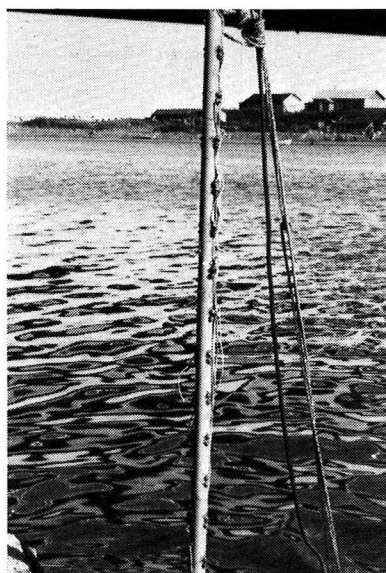


写真-1 ステップ式界面計

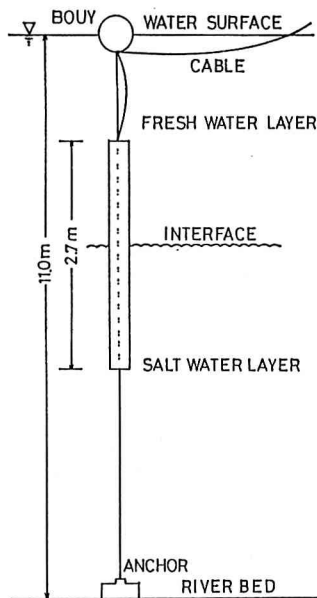


図-1 ステップ式界面計設置図

置したステンレスボルトを用い16対の電極を15cm間隔で測定ポールに埋め込んだ。各電極は16芯キャブタイヤケーブルで川岸の界面計測部と結ばれている。測定ポールは図-1に示すように、塩淡水境界が測定ポールの中央部になるようにアンカーとブイを用いて川底に鉛直に固定し、界面の変動を陸上で自記記録する。

図-2に試作したステップ式界面計のブロックダイアグラムを示す。界面計はタイミングジェネレータ、

定電圧回路（基準電圧発生）、電極、コンパレータ、D/A 変換器から構成されている。電極部（測定ポール）を除いては CMOS を用い、低消費電力、かつ小型で野外測器としての簡便性を有している。動作原理は 2 KHz のクロックパルスにより、タイミングジェネレータを作動させ、図 3 に示すタイミングチャートのパルス間隔により、16 対の電極と同数の定電圧回路とコンパレータより成る判別回路を順次切替え界面の位置を検知してゆく。定電圧回路はタイミングジ

ェネレータの信号を受けて、入力信号 V^+/V^- と OUTPUT ENABLE が 1 になった時に正の基準電圧を発生して電極間の電気伝導度を測定する。また入力信号 V^+/V^- が 0、OUTPUT ENABLE が 1 の状態の時は基準電圧と絶対値が同じで、符号が逆の電圧を発生して測定時と同じ時間、電極に電圧を加え電気分極による電極の腐食を防ぐように作られている。

コンパレータは界面の変動をいったん論理情報の変動という形に置換するもので、正の基準電圧が発生した時に電極間で測定した電気伝導度とあらかじめ界面として定めておいた電気伝導度の大小を比較して、on, off の 2 値に変換して、次の D フリップフロップの D 端子に入力する。D フリップフロップは図 2 に示すように D 入力と CK 入力端子があり、D 入力端子に加えられた情報は CK 端子にクロックパルス信号を入力することにより、on, off いずれかの値を記憶する。

出力は界面以下の電極で D フリップフロップが on の状態で記憶されているものの総和を取り出し D/A 変換器に入れ電圧に変えて記録計に入力し界面の位置を記録する。

この界面計は相互の干渉を防ぐため電極を順次走査してゆくものであり、各電極での電気伝導度の測定に要する時間は 10 msec に定めてあり 16 対すべての電極を測定するのに要する時間は 160 msec となる。また電極の劣化を防ぐための逆電圧を加える時間も同様に 160 msec となり一測定に要する時間は 320 msec となるが、観測する界面の変動がそれ程早くないことを考慮すれば事実上同時測定とみることができる。観測にあたっては電気伝導度 $24,000 \mu\text{v}/\text{cm}$ のところを界面とするようにしきい値を設定した。この値は 15°C で $Cl 10.2\%$ に相当する。

記録計としては打点式を用いたため打点間隔を考慮して図 - 3 に示すように No.16 の判別回路に約 30 秒の休止時間を設定した。すなわち 16 対の電極の測定が終了すると約 30 秒の休止時間があり、測定間隔を 30 秒として通電による電極の劣化を防いだ。

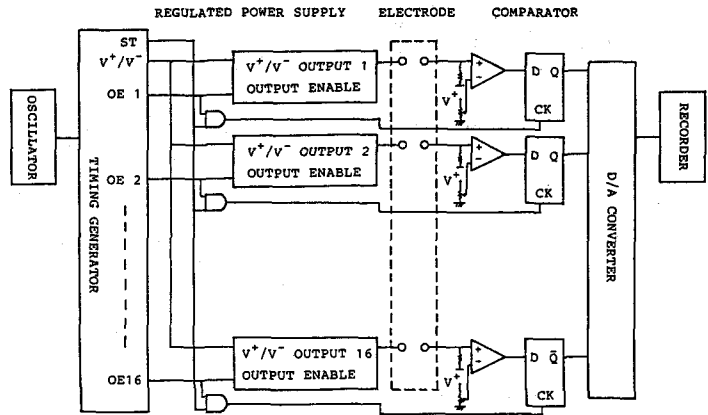


図-2 ステップ式界面計ブロックダイアグラム

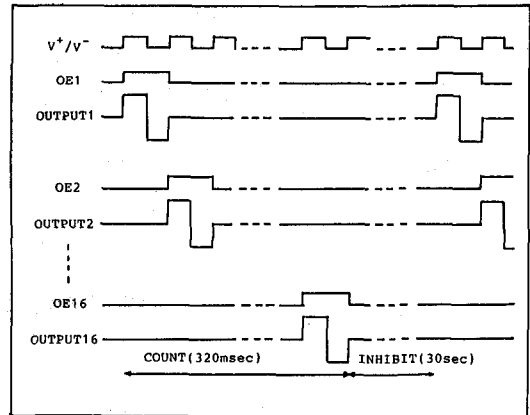


図-3 界面計タイミングチャート

この界面計の特長としては

- (1) 測定ポールの設置が容易であり任意の地点で長期間観測ができる。
 - (2) 計測部が小型軽量、低消費電力であり野外観測に適している。
 - (3) 界面変動が量子化波形に変換し得ることからキャリブレーション不要であり機器の保守、点検に時間を要しない。
- 等があげられる。

3. 石狩川河口における観測例

試作したステップ式界面計を用いて界面変動の観測を行なったのは図-4に示した石狩川の河口から4.4km上流の地点で、同地点付近は河道が大きくカーブを描き北東方向に向きを変えているため流心は左岸寄りである。昭和57年9月17日左岸川岸から15m沖合で水深11mのところに界面計を固定し、河川流量の変動が激しくて塩水楔の移動が多いとみられる10月末迄1ヶ月半にわたって界面変動を自記記録した。また同測点の川表面下1mと川底上1mの2点に塩分、水温センサーを設置して、上層淡水層と下層塩水層の塩分、水温変化をも同時に記録した。石狩川の塩水楔は通常弱混合型の場合が多く、渇水時には河口から15km以上も塩水楔が遡上する。

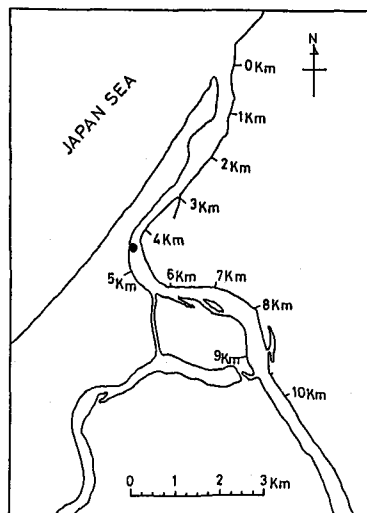


図-4 石狩川河口付近

図-5は界面計による界面変動の記録例で、縦軸は投入時の水面からの深度である。図から界面は潮汐の影響を受けて振動しながら、河川流量の変化等によりさらに大きく変動していることがわかる。図中界面が切れている部分は、流量の増加によって塩水楔が後退し、観測地点における淡水層の厚さが深度5.45m以上になったことを示している。

図-6, 8, 9は10月の観測結果の中から、とくに強風時を含む数日間の界面変動と、上下層塩分の変化とを河川水位、潮位、風向、風速と対比して示したものである。河川水位は河口から26.5km上流の地点および界面計設置地点における観測値、潮位、風向、風速は小樽港の観測値で何れも北海道開発局の観測による。上記水位観測点は感潮域内にあるが、塩水楔が26.5kmまで遡上することは殆んどないのでこの地点の水位からH-Q曲線によって当時の流量がもとめられる。水位と流量の対比は次表のとおりである。

水位(m)	流量(m^3/s)
0.5	475
1.0	652
1.5	857
2.0	1090

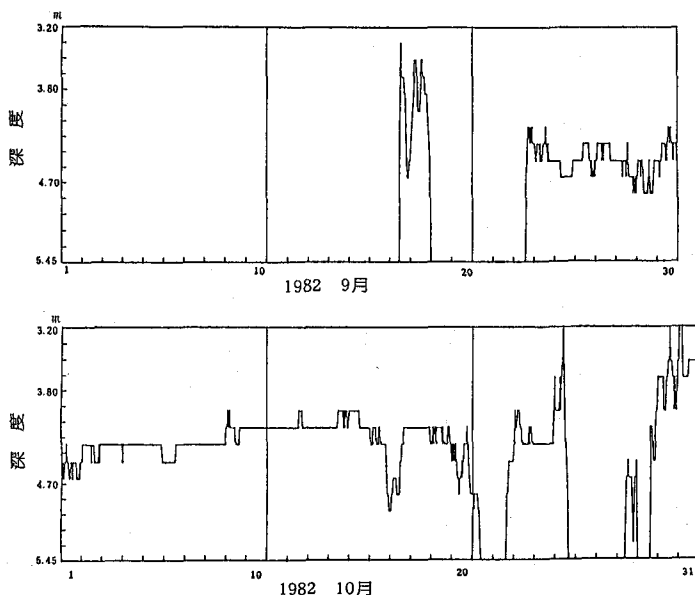
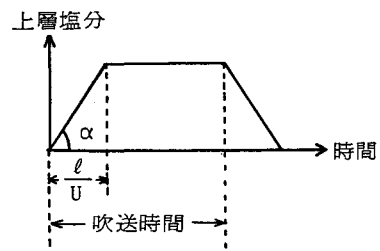


図-5 石狩川(河口から4.4km上流)における記録例

風向、風速は4時間毎の記録で、観測点である小樽港は石狩川河口から約33km西に位置しているため界面計設置点の値とは異なるものとおもわれるが、傾向は同じものとして使用する。河口付近の海岸線は北東—南西の方向であるから、海→陸方向（SW—NW—NE）の風を+側に、陸→海方向（NE—SE—SW）の風を-側に示した。

図-6によれば10月15日18時頃から16日24時まで最大7.5m/sの北西風が吹き、その間界面が徐々に低下するとともに、上層塩分が1.4Cl‰から4.5Cl‰に増大している（下層塩分は一定）。界面の低下には風の影響もあるとおもわれるが、当時は河川流量も15日：440m³/sから16日：530m³/sまで増加して塩水楔は後退の傾向にあり、両者の影響を見分けることは困難である。上層塩分の増加は風の剪断力によって界面を通しての塩分拡散が促進されたものとおもわれる。

塩水楔の先端から観測点までの距離を l 、淡水層厚さを H 、上層の平均流速を U とし、風の影響による下層水の運行速度 U_e が時間的にも場所的にも一定で上層内の塩分混合が完全に行なわれるものとすれば、風が吹きはじめてから l/U 時間の間は観測点における上層塩分が直線的に増加し、その勾配 α は、 $\alpha \propto U_e C_o / H$ （ C_o ：下層塩分）となるが、その後の塩分は風の吹送時間中一定となる。風が止めば塩分濃度が小さい河水が順次流下するので観測点の塩分は増加時の逆勾配で直線的に減少する。従って風の影響による上層塩分の変化は基本的には下図のような台形となるが、観測の結果も同じ傾向を示している。



風の影響による上層塩分変化のモデル

図-7は観測点から400m上流の地点における塩分鉛直分布で、測定時は図-6中に矢印で示したとおりそれぞれ（1）風の影響下、（2）流量の増加による界面不安定時、（3）界面安定時に相当する、（1）と（3）では界面深度は同じであるが、上層塩分は（1）の方が大きい。

図-8は10月19—21日の記録であるが、19日18時頃から20日18時まで最大14.3m/s（E）の風が陸→海の方に吹き、その間界面が40cm程低下し上層塩

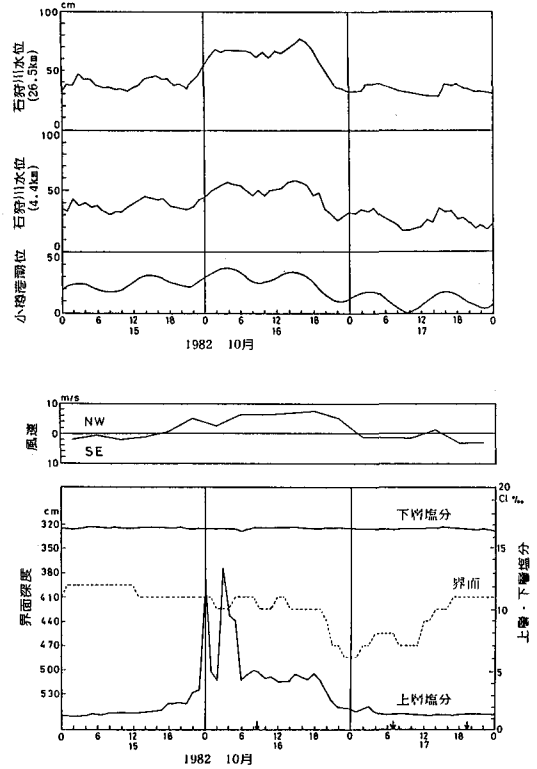


図-6 石狩川（昭和57年10月15—17日）における観測結果

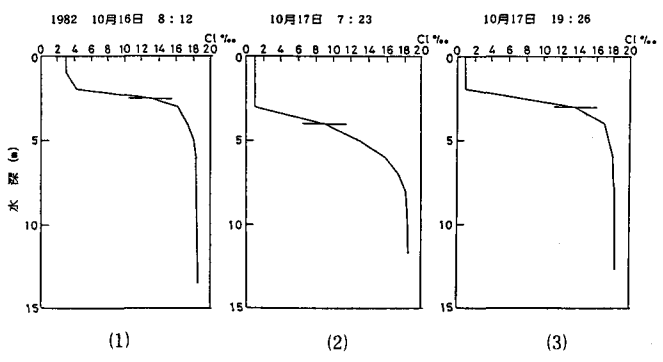


図-7 石狩川における塩分鉛直分布

分が吹送前の1.5Cl%から最大10.6%まで増大している。10月20日午前までは流量が一定(406 m³/s)で上層塩分増加に対する流量変化の影響は無いとみられるので、この上層塩分の増加は明らかに風による影響である。その後20日午後には流量が、570 m³/sに増加し、界面は急激に低下している。

10月25日午前には低気圧の通過により降雨とともに強い西風(最大風速16.2 m/s:10時)が数時間続き、その間表層塩分が一時的に最高15.2Cl%まで上昇するとともに、界面も1.05m上昇している。しかしその後は降雨による流量増加によって界面は急激に低下し、下層塩分も低下して翌26日には流量730 m³/s(12時)となり、下層塩分は最低値6.4Cl%となる。このような現象は風による剪断力によって一時的に強い攪乱が誘起され界面破壊が行なわれるためとおもわれる。

以上の3例は塩水楔の界面変動および界面を通しての塩水拡散におよぼす風の影響を示すものである。自然湖水や貯水池の水温躍層の低下におよぼす風の影響については室内実験や現地観測による研究がなされているが本観測によって河口2層流においても強風時にはその影響により下層水の上層への連行が激しく行なわれることがわかった。連行速度は成層の安定度をあらわすリチャードソン数と風の剪断応力による摩擦速度の関数であることが知られているが、^{3), 4)}

観測の結果から風の影響前と影響下におけるリチャードソン数 Ri と摩擦速度 U_* を計算すると表-1 のようになる。表にはまた計算に使用した諸量の値をも示してあるが、影響前の値としては(1)、(2)では風が吹きはじめる前12時間、16時間の平均値、(3)では2時間の平均値を、また影響下の値としては風の吹送時間中の平均値を用いた。表から風の吹送中はどれもリチャードソン数が減少し、とくに平均風速11.2 m/sの(3)では成層が極めて不安定な状態となっていたことがわかる。

4. 結 語

以上述べたことを要約すれば次のようになる。

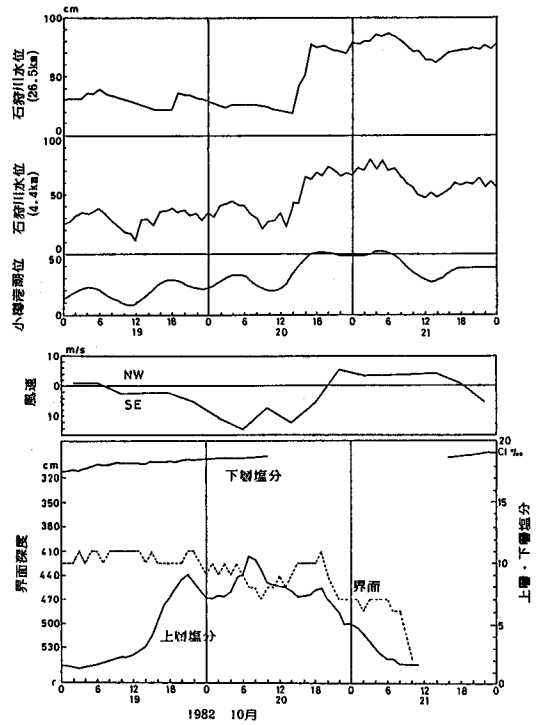


図-8 石狩川(昭和57年10月19~21日)における観測結果

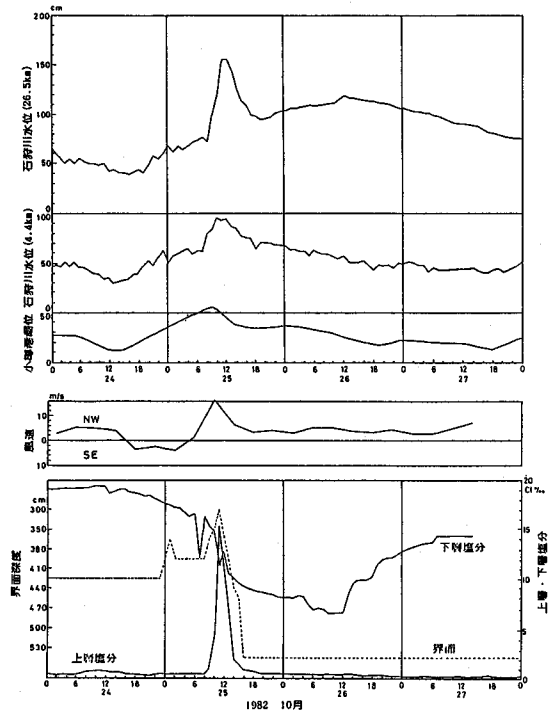


図-9 石狩川(昭和57年10月24~27日)における観測結果

(1) ステップ式界面計を試作し、石狩川河口で1ヶ月半にわたり塩水楔の界面変動を記録した結果、充分長期間実地観測に使用しうることが確かめられた。

(2) 界面変動と同時に上層、下層の塩分変化を連続記録した結果から河口2層流においても強風時には、風の影響により界面が低下し上層塩分が増大することがわかった。この現象は風が河口から吹く場合も上流から吹く場合も同様である。

(3) とくに最大風速が16.2m/sとなった10月25日には風の剪断力による攪乱によって界面が破壊され、塩分鉛直分布が一時的に直線分布に近くなっているのがみとめられた。

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、遠藤 浩、岡村敬二、山下浩幸、の諸君に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 西條淳夫：石狩川河口部における塩水拡散の解析，北海道大学工学研究科修士論文，1983
- 2) 西條淳夫，八 畝 功，大谷守正：塩水楔の界面変動におよぼす風の影響，海洋学会講演会要旨集，1983年，pp. 288～289
- 3) 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，1971，pp. 287～292
- 4) O. M. Phillips：The Dynamics of Upper Ocean, Cambridge Univ. Press, 1977, pp. 295～308

表ー1 風による影響前，影響下におけるリチャードソン数，摩擦速度，その他の諸量

	(1) 10月15 ～16日	(2) 10月19 ～20日	(3) 10月24 ～25日
風による影響前			
流量(m ³ /s)	440	406	471
界面深度(m)	4.0	4.1	4.0
平均流速(m/s)	0.34	0.31	0.37
上層塩分(C1‰)	1.4	1.5	0.4
下層塩分(C1‰)	16.7	18.0	16.0
上層水温(℃)	11.8	9.4	9.1
下層水温(℃)	16.0	15.2	14.9
リチャードソン数 Ri	7.0	9.0	7.1
平均風速(m/s)(小樽港)	1.4	1.6	3.9
摩擦速度 u _* (cm/s)	0.13	0.16	0.38
風による影響下			
流量(m ³ /s)	532	406	525
界面速度(m)	4.2	4.4	3.8
平均流速(m/s)	0.40	0.29	0.44
上層塩分(C1‰)	5.5	7.8	8.8
下層塩分(C1‰)	16.6	18.5	11.9
上層水温(℃)	11.5	11.5	10.2
下層水温(℃)	16.0	15.0	14.8
リチャードソン数 Ri	4.2	7.1	1.0
平均風速(m/s)(小樽港)	5.8	7.8	11.2
摩擦速度 u _* (cm/s)	0.57	1.4	2.0

$$Ri = \frac{\varepsilon g H}{U^2} \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

H：界面深度 ρ₁：上層密度
U：平均流速 ρ₂：下層密度

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \tau = 0.8 \times 10 \rho_a W_{10} \quad W_{10} < 6.6 \text{ m/s}$$

$$\tau = 2.6 \times 10 \rho_a W_{10} \quad W_{10} > 6.6 \text{ m/s}$$

τ：風による剪断応力 (g/cm・s²)
ρ_a：空気密度 (g/cm³)
ρ：表面水の密度 (g/cm³)
W₁₀：水面上10mの風速(cm/s)(小樽港のデータ使用)