

「拓海」の挙動とライザー管の歪応答

海洋開発研究領域 *大川 豊、田村兼吉、矢後清和
前田克弥、伊藤和彰、高井隆三
新富恭子

株式会社 大内海洋コンサルタント 大内 一之

1. はじめに

海洋肥沃化装置「拓海」は 2004 年 5 月に相模湾中央部に設置され、水深 200m の深層水と表層水を混合して水深 20m の有光層に密度流として吐出し、周辺海域の漁場造成を目標とした実海域実験を行っている。その実験の一環として、「拓海」自身の動揺及び風速、波高、潮流の計測を行っている。

「拓海」は水深 1,000m 程度の海域に一点係留で係留されているため、相当広い範囲で動き回っているが、その動きや船首方位は GPS で捉えられている。これまでに得られた計測値から「拓海」の挙動、波浪場の推定結果、ライザー管の歪みと波浪場および動揺との相関などについて報告する。また、風力エネルギー利用の観点から見た海上風の特性について述べる。

2. 計測装置と計測方法

「拓海」には DGPS、超音波式風向風速計(X-Y 2 軸)、空中発射型超音波式波高計(3 台)、超音波式潮流計(ADCP)、ファイバーオプティカルジャイロ(FOG)、3 軸サーボ式加速度計が搭載されている。これらの計測装置の配置を図 1 に示す。この他、深層水取水管のほぼ中央の円周上に 8 枚の歪ゲージが張っており、曲げ歪みを計測できるようになっている(図 10、11 参照)。なお、ADCP は通常の計測で使われるように鉛直方向のプロファイルを計測するのではなく、水平方向に超音波を発射して拓海の取り付け点から水平に 10m、30m、50m 離れた点の流向・流速を計測している。設置箇所は水面下約 3m の位置である。

これらの計測データは毎時 45 分から 15 分までの 30 分間、100Hz のサンプリングタイムで収録を行っている。収録されたデータはハードディスク

に保存され、ほぼ 1 か月置きに行われる「拓海」の定期点検時に回収し、解析を行っている。

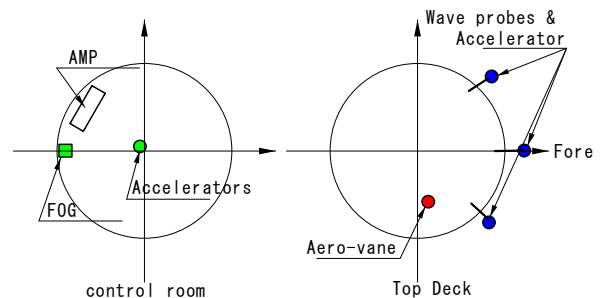


図 1 計測装置の配置

3. 「拓海」の移動範囲と方向

DGPS の計測値からは拓海の緯度・経度と船首方位が得られる。位置を知るのに緯度・経度では扱いにくいので、国土地理院の算式¹⁾によって IX 系の平面直角座標(世界測地系)に変換した。ただし、IX 系の原点はかなり離れており、数値が大きくなりすぎるので、試算した数ケースの平均を仮の原点として表示する。

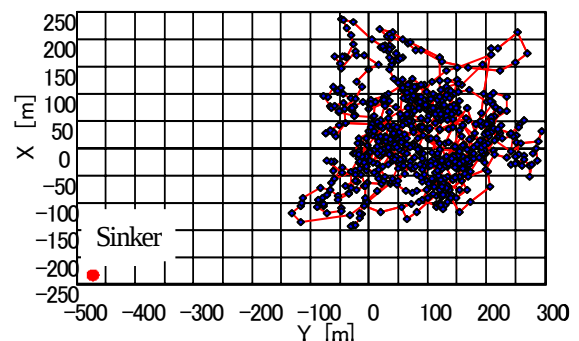


図 2 1 ヶ月の拓海の移動状況とシンカー点

1 例として、図 2 に 2004 年 4 月の拓海の移動

状況を、計測時間 30 分の平均位置として直角座標上に示す。1 点だけ左下にあるのはシンカー設置位置である。この例では東西-150m～+300m、南北-150m～+250m の範囲を動いている。その他の 2003 年 8 月 20 日～9 月 18 日、2004 年 3 月 25 日～31 日、5 月 1 日～27 日を含めると、東西-250m～+300m、南北±250m 程度の範囲となる。仮原点はシンカー設置位置から東に 475m、北に 233m(64° の方向)離れている。拓海はシンカーを中心に動いているわけではなく、仮原点付近の点を中心に動いているようである。

拓海の係留はシンカーから下部チェーンが 1,050m、その上に 680m のワイヤーロープが繋がっており、更に上部チェーン 20m で浮体底部の係留点に繋がっている。シンカーから仮原点までは 529m である。この付近の徘徊中心までチェーンは海底を這い、それからほぼ垂直に立ち上がっているものとしても、まだかなりの余分なチェーンがあるので、徘徊中心はあまり移動していないものと推測される。

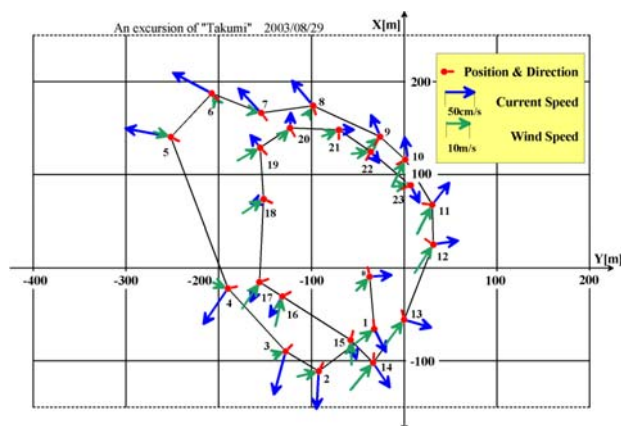


図 3 「拓海」の 1 日の移動の例

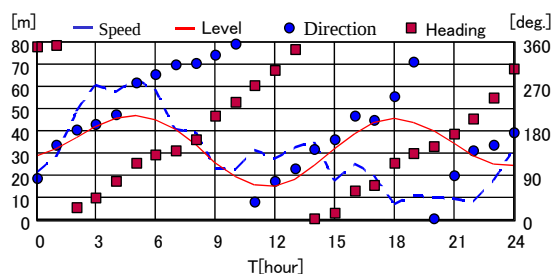


図 4 船首方向と流向・流速および潮位(岡田)

1 日毎の動きを追ってみると、いろいろなパターンがあるが、時として直径 250m 位の円を描いて

右回りに 2 回転弱移動することがある。2003 年 8 月 29 日の例を図 3 に示す。拓海的位置を示す丸印には船首方向(head)、潮流の強さと方向および風の強さと方向が標されている。徘徊中心と思われる付近を除いて、head と潮流の方向は反対方向である。即ち、潮流で流されるのを係留が支えている状態である。また、移動する方向はほとんど右回りである。この日の潮汐(大島・岡田)、拓海で測られた流向・流速および船首方向を図 4 に示す。M2 分潮が大きく出ており、流向変化も増大(右回り)しながら 2 回転弱変化している。

もちろんこのように潮汐ときれいに同調したような場合ばかりでなく、流向があまり変わらず、狭い範囲で停滞状態になっている場合や、直線状に動くこともある。いずれにせよ、拓海の挙動は流向の変化に大きく支配されている様である。

一方、風の力は拓海の移動にはあまり寄与していない。

4. 波浪場の特性

波高データは別途計測されている 6 自由度の運動を使って相対波高から絶対波高への変換を行っている。ここでは、拓海が遭遇している海象について検討を行う。

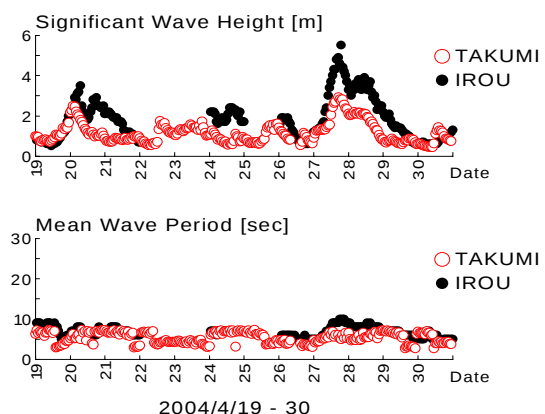


図 5 「拓海」と石廊崎の波の比較

図 5 は計測したスペクトル(絶対波高)から得られた有義波高及び平均波周期と石廊崎において計測されている²⁾波高及び周期とを比較した結果である。対象とした期間は 2004 年 4 月 19 日から 30 日までであり、この期間は日本海側の低気圧の発達に伴う、風雨ともに厳しい時期が含まれている。本結果より、傾向は良く一致しているが、波

高に関しては計測した結果がやや小さく、海域的な問題であるか、計測上の問題であるかはさらにデータの検証を行っていく予定である。

「拓海」設置海域は相模湾沖であることから、うねりと風浪が混在した海象と考えられる。そこで、計測したスペクトルからうねりと風浪の成分に分けて特性を検討する。うねりと風浪の混在した波浪場においてはうねりの方向波スペクトルを $S^S(\omega, \chi)$ 、風浪を $S^W(\omega, \chi)$ とすると設置海域での方向波スペクトル $S(\omega, \chi)$ は

$$S(\omega, \chi) = S^S(\omega, \chi) + S^W(\omega, \chi) \quad (1)$$

と表すことができる。すなわち、計測されたスペクトルが図 6 左図のようなものであるとすると、このスペクトルを図 6 右図のように、 ω_1 をピーク周波数とするスペクトル及び ω_2 をピーク周波数とするスペクトルに分けられると仮定する。

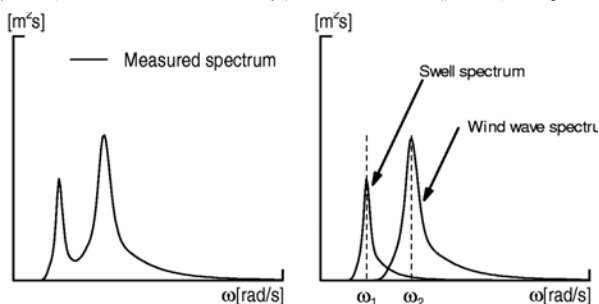


図 6 スペクトラムの分離

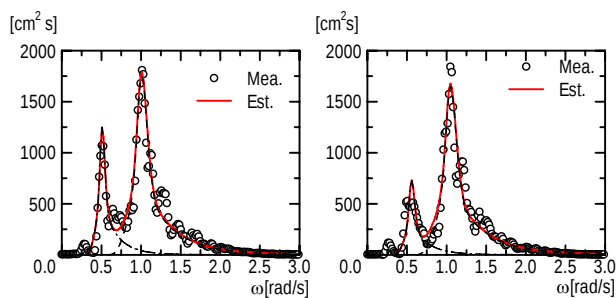


図 7 スペクトラム推定値と実測値との比較

この考え方の元に計測したスペクトルからうねり及び風浪のスペクトルの推定を試みた。なお、うねり及び風浪スペクトルは JONSWAP 型スペクトルで表現できるものと仮定した。本推定結果の一例を図 7 に示す。図中○印は計測したスペクトルであり、線は推定したスペクトルである。これらの結果より、スペクトルをなんらかの形状と仮定した推定法は十分に本海象の推定が可能である

と考えられる。

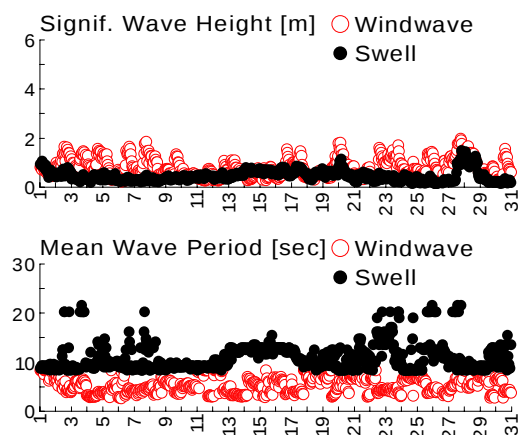


図 8 うねりと風浪の有義値および平均周期

図 8 は前述の推定法を用いて推定したうねり及び風浪のスペクトルから得られた有義波高及び平均波周期の結果を示している。横軸は日付であり、解析に用いた期間は 2004 年 4 月 1 日から 30 日までの 1 か月である。また、ここではスペクトルピークのうち長周期側のものをうねり、短周期側を風浪と表現している。

本結果より、波高に関してはうねりに起因するものよりも風浪による波高が卓越している結果となった。4 月 27-28 日にかけては日本海側の低気圧（約 988mb）の影響を受けて、うねりの波高が大きくなっていることがわかる。一方、周期に関しては、長周期側が平均すると 14 秒程度であり、短周期側が 7 秒程度である。

なお、(1)式には波の主方向を未知数として入れた解析も可能である。図 9 はそうして求めたうねりと風浪の方向分布を示している。

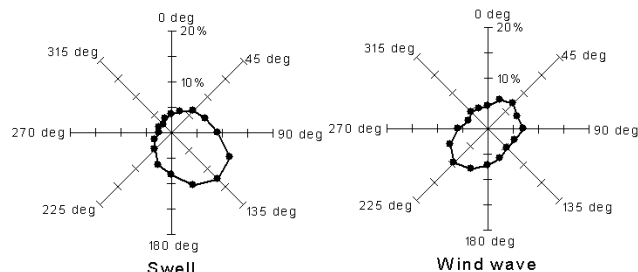


図 9 うねりと風浪の方向分布

5. ライザー管の歪みの特性



図 10 歪みゲージ設置位置

深層水汲み上げ用のライザー管は長さ 175m、内径 1m の鋼製長大管である。このライザー管の上端部より 80m の位置に図 11 に示すように 8 個の歪みゲージが取り付けられている。そのうちの 1 個 (No. 7) は断線など何らかの不具合により、計測当初から信号を出力していない。なお、歪みゲージ設置位置は、海技研の深海水槽における模型ライザーの強制動揺試験結果に基づき、概ね振動の腹に相当する部分として決めたものである。

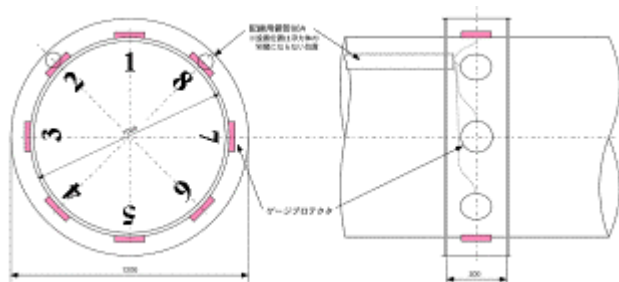


図 11 歪みゲージの取付概要

ここでの歪みの応答は、関連すると思われる波浪、潮流、浮体の横揺れ、縦揺れ等の有義値での相関を見ることで考察する。

まず、図 12 に合成有義波高と横揺れ、縦揺れの相関を示す。また、図 13 に合成波高と歪みの相関を示す。波浪と揺れにはかなり強い相関が見られるが、波浪と歪みではそれよりやや弱い。

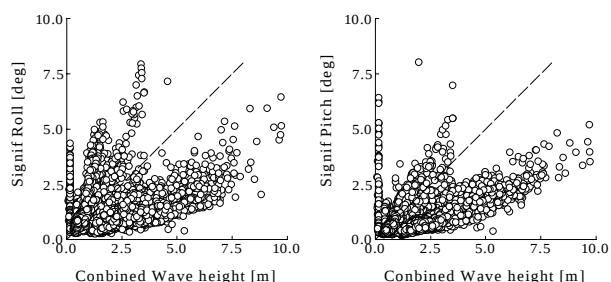


図 12 合成波高と横揺れ及び縦揺れの相関

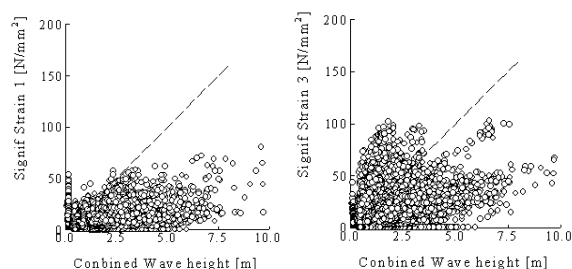


図 13 合成波高と歪みの相関

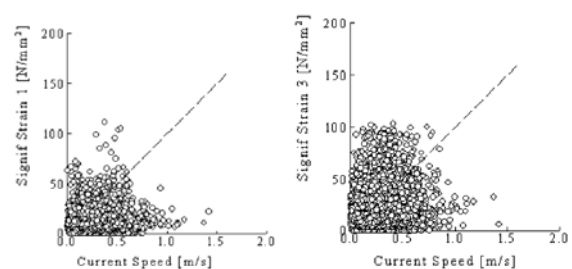
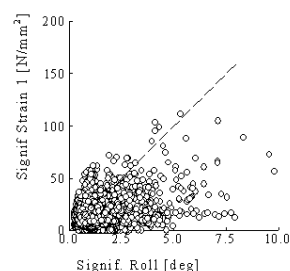


図 14 潮流と歪みの相関

次に、図 14 に潮流と歪みとの相関を示すが、これはほとんど相関が無いと言って良い。これは計測している潮流は表層のものであることに留意する必要がある。

最後に roll と歪みの相関および pitch と歪みの相関を図 15、図 16 に示す。Roll と歪 1 はそれほどでもないが、歪 3 とはかなり相関が強い。Pitch に対しては歪 3 と歪 1 で傾向は異なるが、roll と歪 3 程の強い相関はない。



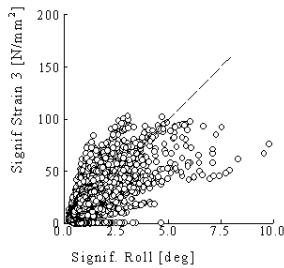


図 15 roll と歪みの相関

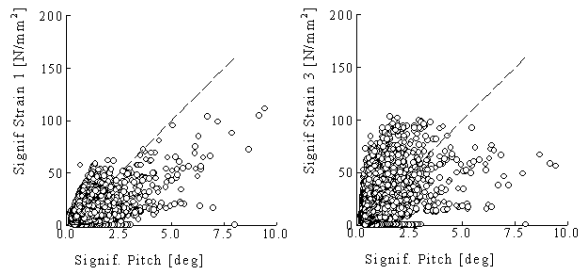


図 16 pitch と歪みの相関

歪 1 と歪 3 を例に示してきたのはそれぞれ船首側とそれと 90° の横方向に当たり、roll、pitch と何らかの相関が予想されるからである。

以上をまとめると、

- ・ライザー歪みは潮流との相関は弱く、浮体動揺との相関は強い。波浪との相関はやや見られる。
- ・浮体動揺は波浪との相関が強く、ライザー歪みとの相関も同様に強い。

これらの相関関係からは波浪による浮体動揺のライザー挙動への寄与が大きい事を伺わせているが、今後はスペクトル解析や数値シミュレーションによってこの関連性を明らかにすべきであろう。

6. 洋上風の特性

風速の 1 次データ処理としては、1 計測の全時間 30 分平均と気象庁と同じ正時前 10 分間の平均を算出している。風向は GPS の方位で修正してい

る。まずこれらが妥当なものかどうかを確認するために、神奈川県水産総合研究所が城ヶ島沖浮魚礁ブイで計測している風データ³⁾及び三浦、辻堂のアメダスの風データと比較した。風速及び風向についての 1 例を図 17 に示す。これら地点の位置関係を図 18 に示す。浮魚礁ブイは城ヶ島より約 8 km 沖であり、「拓海」とは 10km ほど離れているが、風向・風速とも非常によく似た傾向を示している。風向の方位補正も妥当であると思われる。陸上の三浦、辻堂のデータとは変動の傾向と方位はほぼ似たような結果であるが、風速は海上の拓海、浮魚礁ブイが平均で約 2 倍である。このことは洋上の風の強さを如実に物語っている。

「拓海」と浮魚礁ブイの風速の相関係数は 0.91 で非常に相関が強く、三浦、辻堂ともそれぞれ 0.70、0.67 とやや相関がある。

次に、海上風の変動性を調べるために、乱れ度とガストファクターを求めた。乱れ度の定義は定時計測 10 分間の標準偏差を平均値で割ったものである。2003 年 6 月から 2004 年 9 月までの全ての有効計測データの乱れ度を図 19 に示す。陸上で



図 18 相模湾周辺の風観測地点

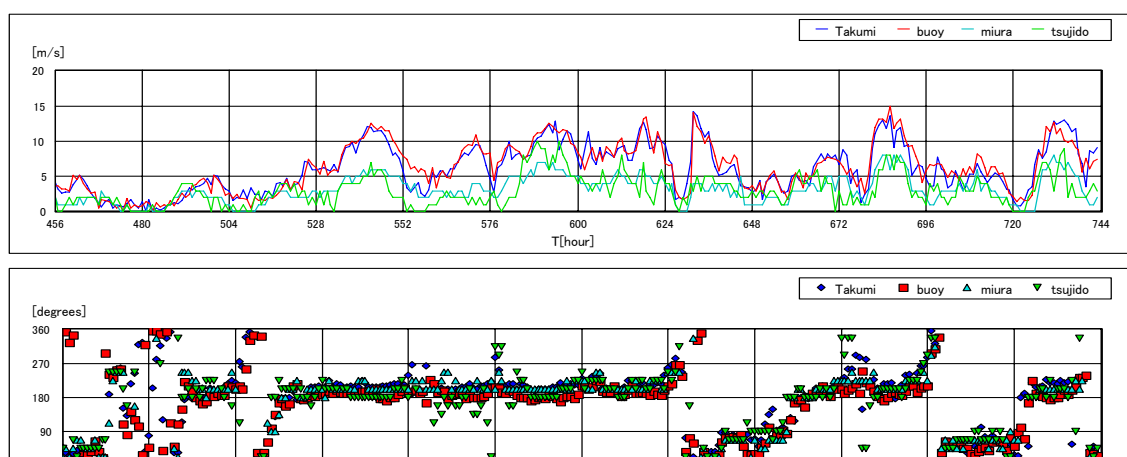


図 17 洋上風と陸上風の比較

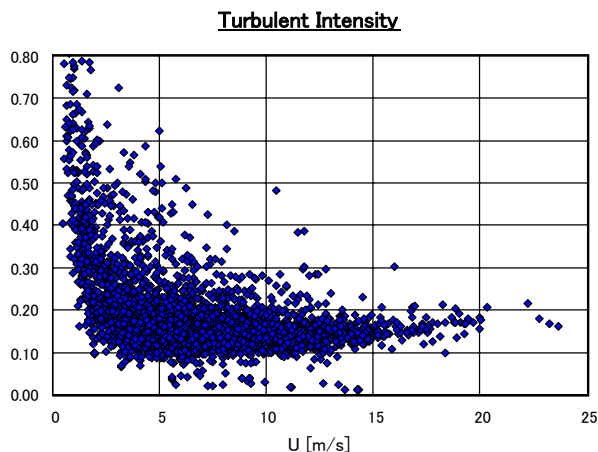


図 19 乱れ度

ガストファクターは気象庁の定義では“1日のうちの最大の瞬間風速/毎時の平均値のうち1日の最大のもの”ということである。この定義だと、異なる計測単位の算出値を比べる場合も出てきて設計などに使うには違和感が残る。

ここでは、1計測単位内(30分)での最大瞬間風速と平均値の比として求めることにする。図 20 にその結果を示す。性質としては乱れ度とよく似ており、微風で大きく強風になると小さくなる。工学的に用いる突風率としては、強風時は 1.4～1.6 程度で良さそうである。

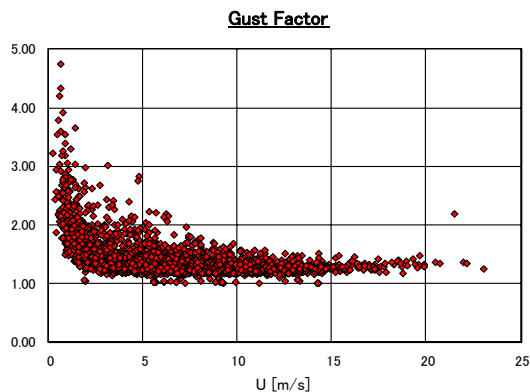


図 20 ガストファクター

次に毎時 10 分間の平均風速の出現頻度分布を調べる。図 21 にその結果を示す。Rayleigh 分布でも比較的良く表せるが、Weibull 分布の方が更に良い近似を与えている。この場合、係数を最小自乗法で求めた結果は、 $k=1.90$, $c=7.90$ であった。

最後に、風向別頻度分布を図 22 に示す。年間

を通した計測ではないので偏っている可能性もあるが、N～NNE、S～SSW に卓越方向がある細長い分布になっている。

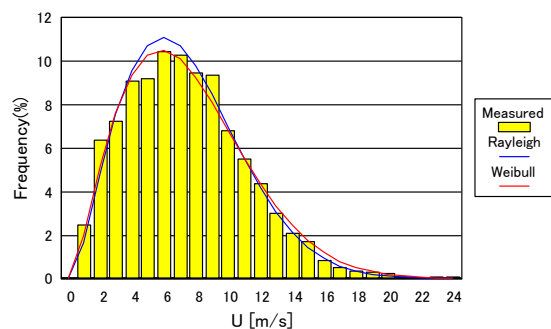


図 21 風速の出現頻度分布

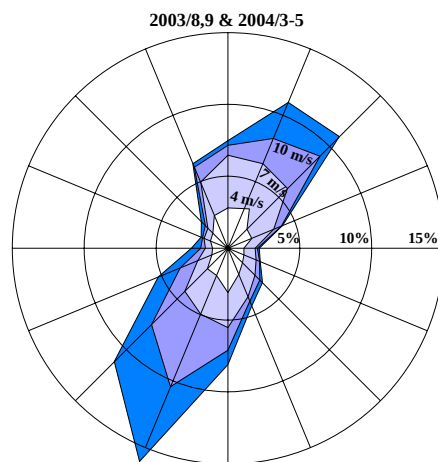


図 22 「拓海」の風向別頻度分布

以上が拓海で得られた海上風の特徴であるが、1年間の連続した計測が出来ていないので、今後とも出来る限り計測を続けたいと思っている。また、衛星データとの比較なども行っていきたい。

7. おわりに

「拓海」の計測で得られた浮体の挙動、波浪場、歪みの応答および風についての成果を述べた。幸い実験は更に3年間続けられることになり、本計測も継続して行われることになった。

本計測は(社)マリノフォーラム21及び本プロジェクト関係各社の協力のもとに行われている。関係者の皆様に深くお礼申し上げる。

参考 URL

- 1) <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/algorithm/>
- 2) <http://www.data.kishou.go.jp/marine/wave/obsdata/today/uswobs.html>
- 3) <http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/Kaikyo/week/Buoy.asp>