

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### 冬季モンスーンが日本周辺の海上突風率と乱流強度に与える影響 (Effects of Winter Monsoon on Gust Factor and Turbulence Intensity Over Oceans around Japan Islands)

氏 名 西田 智哉

#### 【序論】

近年、洋上風力発電などの再生可能エネルギーへの在来エネルギーからの転換や、大型商船の帆船化など、海上風を利用する技術開発への期待が大きくなっている。気象情報は、資源量評価や海上構造物の選定、安全性の検証などにおいて重要な役割を果たす。言い換えれば、気象情報が無ければ、海上構造物の設計は成立しない。本研究は、海上構造物の設計条件として必要な要素の中で、突風率（最大瞬間風速と平均風速の比）や乱流強度（風速の標準偏差と平均風速の比）に着目した。突風率は、瞬間的な突風によって構造物が倒壊しないための座屈・降伏強度に関わる指標であり、乱流強度は、風の乱れに伴う構造物の疲労強度に関わる指標である。これらは、ある平均時間中の瞬間最大値や標準偏差から見積もられる指標であり、観測データから評価するしかない。本研究は、「平塚塔」（平塚沖総合実験タワー、沿岸約 1 km、高度約 20 m）、「実船観測風速」（アジア-豪州航路、高度約 35 m、株式会社 MTI 提供）、「ナウファス」GPS 波浪計に搭載した風速計（岩手県中部沖と宮城県北部沖の 2 か所、高度 6.93 m、国交省港湾局提供）、北西太平洋（JKEO サイト、東経 146.5 度、北緯 38.1 度）に係留した「K-Triton ブイ」（2009 年 8 月 29 日～2010 年 4 月 19 日、高度 1.8 m、JAMSTEC 提供）の 4 種類の海上観測データを解析する。観測データと大気モデルから突風率と乱流強度の統計解析・気象学的解析を行い、それらの特性を明らかにすることを目的とする。日本周辺の海上風は季節変動が卓越するため、突風率と乱流強度の季節変動、特に冬季モンスーンがこれらの変数に与える変化に着目した。また、大気モデル計算結果から、三陸沿岸の風速と乱流強度 MAP の作成を行う。

#### 【突風率/乱流強度の統計解析】

最初に、突風率と乱流強度に関する統計的解析を行い、特徴を把握した。突風率と乱流強度は、サンプリング間隔  $t$ 、平均時間  $T$ 、高度  $z$  に依存する (Beljaars (1987)<sup>[1]</sup>, Brown and Swail (1991)<sup>[2]</sup>)。また、Wieringa (1973)<sup>[3]</sup>は、平均時間  $T$  の風速分布が正規分布になるとして、突風率が  $t, T, z, z_0$  (海面粗度) の関数で表わせることを示した。本研究では、平均時間  $T$  (=10 分) の風速分布が正規分布になると仮定すると、突風率が乱流強度と等価 ( $t, T$  を固定した場合) であることを示し、平塚塔 (高度 20 m) や実船観測風速 (高度約 35 m) で確認した。しかしながら、低風速 (平塚塔では 5 m/s 以下) 時は  $u=0$  m/s の下側境界の影響が顕著

になり、風速分布は正規分布より Weibull 分布で近似される。すると、突風率と乱流強度は、Weibull 分布の形状パラメータのみに依存する。すなわち、Weibull 分布の形状パラメータが小さくなるほど、突風率と乱流強度は上昇する。低風速域では、風速の低下と共に Weibull 分布の形状パラメータが小さくなるため、突風率と乱流強度は、風速の低下と共に増加する関係を示した。一方、風速がおおよそ 10 m/s を超えると、Weibull 分布の形状パラメータはほぼ一定、すなわち正規分布に近い風速分布になり、突風率と乱流強度の風速依存性は小さくなった。従って、本研究ではこれ以降、低風速域が突風率と乱流強度に与える影響を除去するため、風速 10 m/s 以上を解析した。

突風率の確率密度関数は、Gumbel 分布に従う (Bradbury and Deaves (1994)<sup>[4]</sup>)。Bradbury and Deaves (1994)は、陸上観測から対流性イベント発生時に起こる強い突風が Gumbel 分布で期待される確率より高い頻度で起こることを示したが、外洋の JKEO サイトのブイ観測データ (K-Triton ブイ, 2009 年 8 月 29 日 ~ 2010 年 4 月 19 日) においても同様の傾向が確認された。この観測で強い突風 (風速 10m/s 以上, 突風率 1.5 以上) が確認されたときの海面気圧偏差場は、西高東低の冬型の気圧配置を示した。同様に、冬季モンスーン (冬型の気圧配置) による寒気の吹き出しが確認された時に、K-Triton ブイで強い突風が多く観測された。そこで、冬季モンスーンに着目し、K-Triton ブイ観測データを季節 (秋と冬) と風向 (北西 (270-360 度) とその他 (0-270 度)) に分類したところ、冬季北西風の突風率が他の季節や風向に比べて上昇することがわかった (Fig.1)。すなわち、冬季モンスーンという季節変動する現象が、東北太平洋沖合の突風率を上昇させることが分かった。

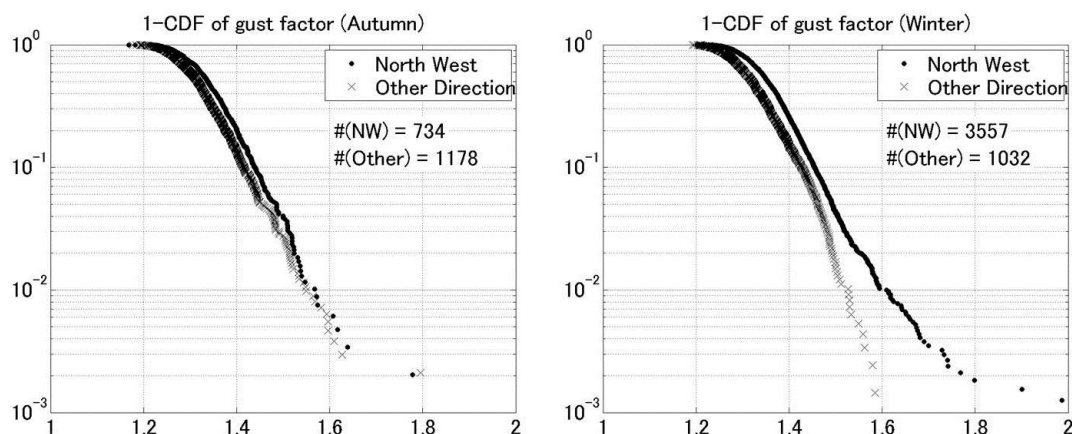


Fig.1 Probability of occurrence of gust factor; left: autumn (SON), right: winter (DJF), dots: Northwest, x: the other direction

#### 【突風率/乱流強度の気象学的解析】

冬季モンスーンが如何にして北西太平洋上の突風率を上昇させたかを、JKEO サイトの観測データと大気モデル (気象庁非静力学モデル: JMA-NHM) を用いて考察を行った。大気モデル (水平解像度 5 km, 時間ステップ: 24 秒) は、平均時間 (T: 10 分) における最大瞬間風速 (t: 3 秒程度) を直接計算することが出来ないため突風率を評価することが出来ないが、単位質量当たりの乱流エネルギー (TKE/m: Turbulent Kinetic Energy per mass, 以下、「乱流エネルギー」) から乱流強度を見積もることは出来る。ただし、乱流エネルギーは境界条件で与えられず、大気モデル内で独自に計算される変数である。JKEO サイト (外洋) とナウファス (沿岸) の観測と比較して、大気モデルで計算した風速と標準偏差の精度が高いことを確認した。Hein and Brown (1988)<sup>[5]</sup>は、冬季モンスーンに伴う寒気の吹き出しが起こるとき、相対的に暖かい海面水温によって境界層が急速に発達することを示した。Hasse (1984)<sup>[6]</sup>は、海面の温度差と風速の積で表現

される顕熱フラックスが乱流活発化のトリガーとなることを示した。本研究においても、先行研究と同様の解析によって、寒気の吹き出しが起こった時に境界層が発達し、顕熱フラックスが上昇することを確認した。

次に、乱流エネルギー収支 (Stull (1988)<sup>[7]</sup>) から、シアー生成に対する浮力生成の効果の増大 (負のリチャードソン数の増大) が、冬季東北太平洋沖で乱流が活発化する原因であると推測した。JKEO サイト (風速 10 m/s 以上) の観測データから、リチャードソン数と突風率の間には負の相関があることが分かった (Fig.2 左図)。すなわち、温度差拡大に伴う浮力生成が相対的に重要になるときに、突風率が上昇することを示している。そこで、大気モデルの初期時刻における温度差を 0 に設定した実験を行い、海面水温と気温の温度差が乱流エネルギーに与える効果を検証した。冬季モンスーンが卓越するときに海面における浮力生成の効果を弱めると、乱流エネルギーや乱流強度が減少した。

最後に、大気モデルを用いて秋季 (2009 年 9 月 10 月)、冬季 (2010 年 1 月 2 月) のハインドキャスト計算 (境界条件: MSM 解析値) を行い、乱流エネルギーおよび乱流強度を計算した。ここで、同じバルクスキームで計算された、大気モデル (高度 20 m) と K-Triton ブイ観測 (高度 1.8 m) の顕熱・潜熱フラックスおよび運動量フラックスは、非常に良い一致を示した。大気モデルの乱流強度 (高度 20 m) は、海面付近 (20 m) のリチャードソン数と負の相関を示した (Fig.2 右図)。これは、観測による突風率とリチャードソン数との負の相関と整合する結果であった。特に、赤外面像により寒気の吹き出しが確認された期間は、リチャードソン数の負の値 (浮力フラックスの効果) が大きくなり、乱流強度が上昇する。従って、東北太平洋沖合で冬季北西モンスーンが卓越する時に突風率が上昇したのは、シアー生成に対する浮力生成の効果が増加して、境界層内の乱流が活発になり、上空の大きな運動量が下層へ運ばれたためである (Jones and Toba (2001)<sup>[8]</sup>) と考えられる。

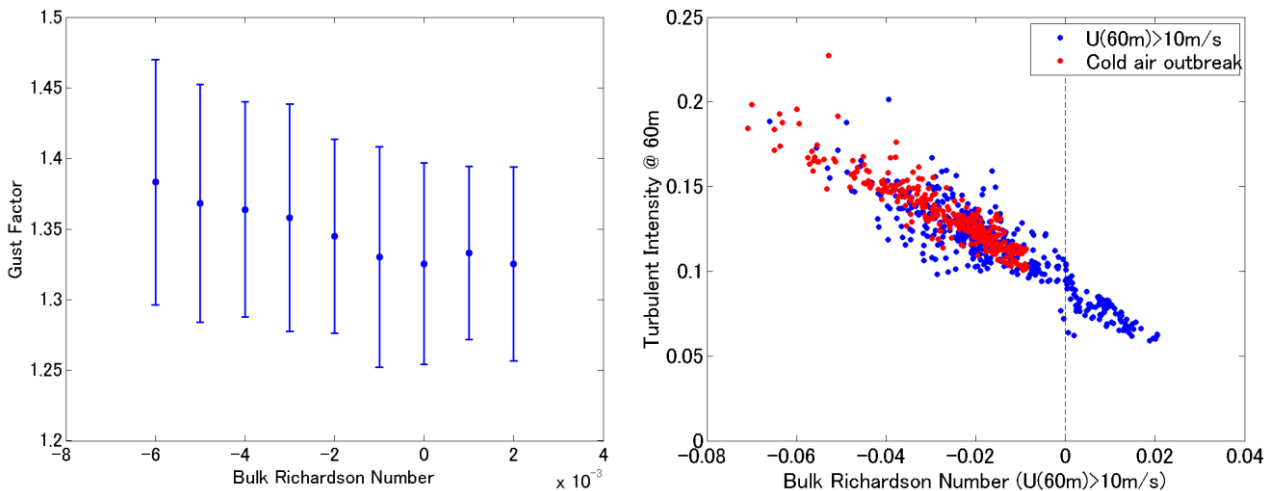


Fig.2 Variations of gust factor (left) and turbulence intensity (right) with respect to bulk Richardson number. Left: JKEO observation, right: JMA-NHM output. Dots and bars of left figure indicate mean and STD. Red dots of right figure indicate the case of cold air outbreak.

### 【風況・乱流強度 MAP の作成】

前節で、大気モデルで計算した風速と標準偏差が観測と良い一致を示したことを示した。従って、洋上風力発電などへの応用として、風況 MAP と乱流強度 MAP を作成した。大気モデル設定の変更点は、水平解像度が 2 km, 時間積分間隔が 10 秒, 計算期間が 2012 年 1 年間, 計算領域が三陸沿岸である。高度 60 m における年平均風速 MAP と IEC 61400-3 (洋上風車向けの規格)<sup>[9]</sup> で定められている風速 15 m/s に対する乱流強度期待値を、Fig.3 に示す。年平均風速 7 m/s の等風速線 (Fig.3 左図) は、三陸北部の方が沿岸に近いが、乱流強度は 0.13 程度 (Fig.3 右図) とやや高いことが分かる。一方、岩手県中部は北部に比べると 7 m/s

となる距離は沿岸から遠くなるが、乱流強度は 0.1 程度と小さくなるという特徴の違いが確認出来た。

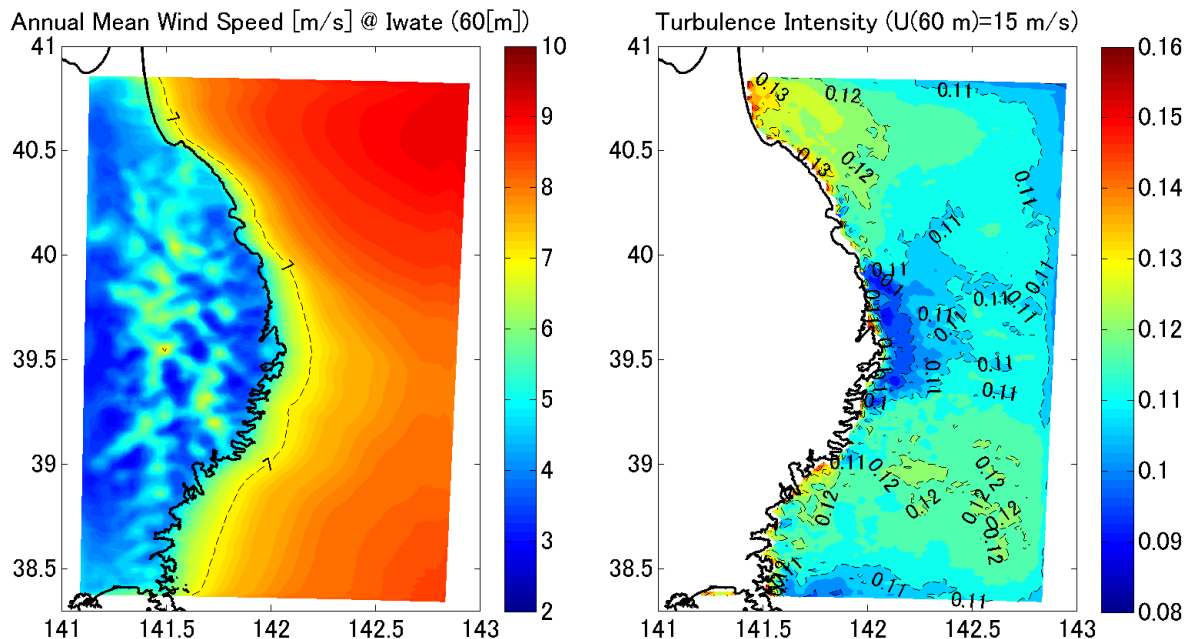


Fig.3 Left: wind speed map at 60 m, right: turbulence intensity map of around 15 m/s at 60 m.

#### 【結論】

本研究は、東北太平洋沖合において冬季モンスーンが卓越するときに、突風率が有意な上昇を示すという関係を観測データから明らかにした。更に、なぜ冬季モンスーンが海上突風率を上昇させたのかを、観測データと大気モデルから調べ、乱流エネルギー収支における浮力生成項の相対的效果の増加と結びつけた。実際に、海面水温の on/off 実験から海面水温と海上気温の温度差が、乱流活発化に大きく寄与していることを示した。そして、浮力生成項の相対的效果を表すリチャードソン数は、観測突風率と大気モデルから計算した乱流強度と負の相関を示し、浮力生成の效果の増加が突風率と乱流強度の増加をもたらすということを明らかにした。

また、外洋と沿岸の観測データを用いて、大気モデルの計算結果が高い精度を持つことを示したので、洋上風力発電などへの応用として、風況 MAP および、これまで提供されていない乱流強度 MAP (IEC61400-3 規格) を作成した。既存の風況 MAP (NEDO 風況 MAP) では、三陸沿岸で大きな風速のバイアス (2 m/s) が報告されている<sup>[10]</sup>が、本研究で作成した風況 MAP は、沿岸域でも高い精度 (バイアス 0.5 m/s 以下) を示した。

#### 【参考文献】

- [1] Beljaars, A. C. M., 1987: *J. Atmos. Oc. Techn.* **4**, 613–626.
- [2] Brown, R. D., and V. R. Swail, 1991: *Ocean Engng.*, **18**, 363-394.
- [3] Wieringa, J., 1973: *Boundary-Layer Meteor.*, **3**, 424-441.
- [4] Bradbury, W. M. S., D. M. Deaves, et. al., 1994: *Meteorol. Appl.*, **1**, 365-378
- [5] Hein, P. and Brown, R.A., 1988: *Boundary Layer Meteorol.* **45**, 177–199.
- [6] Hasse, L., 1984: *Meteorologische Fortbildung*, **13(2/3)**, 38-41
- [7] Stull, R. B., 1988: Kluwer Academic Publishers.
- [8] Jones I. S. F, and Y. Toba, 2001: Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press
- [9] IEC 61400-3, 2009: International Standards, Ed.1.
- [10] 日本気象協会 編, 2003: 離島用風力発電システム等技術開発「局所的風況予測モデルの開発」