

日本沿岸の風速長期変動特性とその将来予測

LONG-TERM VARIABILITY AND FUTURE PROJECTION OF WIND SPEED ALONG JAPANESE COAST

鈴木靖¹・道広有理²・叶木律子³・吉村豊⁴

Yasushi SUZUKI, Yuri MICHIIHIRO, Ritsuko KANOHI and Yutaka YOSHIMURA

¹正会員 博(理) 京都大学特定教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)²正会員 修(理) 京都大学特定助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)³修(理) 一般財団法人日本気象協会 予報事業部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)⁴電源開発株式会社 環境エネルギー事業部風力事業室 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

In order to investigate the impact of the variability of wind speed on the wind turbine project, long-term wind speed analysis was performed. Observational surface wind data and the upper sounding data by Japan meteorological Agency were used for the purpose of the trend analysis of the wind speed, and the EOF analysis of the space-time variability pattern. The results showed the increase of wind speed during the last 20 years in the north of Hokkaido and the south of Kyushu, on the other hand the decrease of wind speed in the Tohoku and Chugoku area. The first EOF component of wind speed increase pattern corresponds to the negative AOI (Antarctic Oscillation Index), which means the winter wind speed becomes high due to the cold air outbreak from the north pole to the mid-latitude.

Future wind speed projection was also performed by using CMIP3 multi climate model data of IPCC AR4. In order to help the access to the climate model data, we developed the climate change information database, which was designed to use easily. The future wind speed will increase in Hokkaido, while decrease in other regions.

Key Words : *Long-term variability, wind speed, future projection, climate model, CMIP3, climate change information database*

1. はじめに

経産省や環境省の洋上風力発電プロジェクト研究が実施され、今後、日本沿岸の洋上風力発電事業が推進されることが期待されている。風力発電事業は過去の風観測値を元に採算性を評価するが、事業が十年以上にわたるものとなるため、その間の風速の長期変動が重要である。過去の風の観測値は気象官署などにおいて数十年以上の蓄積があり、その長期変動を調べる事が可能である。

風力発電に及ぼす風速の変動について、風車高さの風速観測値と大気大循環の指標の関係をKlink (2007)¹⁾が調べている。Klink (2007)¹⁾は米国ミネソタ州の高度70mの観測タワー11か所の風速について、9年間の長期変動を調べ、月平均風速が気圧の南北傾度の変化に対応して22~47%変動すること、また、その変動は北極振動(AO: Arctic Oscillation)と言われるジェット気流の強弱と関連する北半球の気圧変動パターンとの相関が高いことを示した。

我が国における気象要素の長期変動を調べたものは、地球温暖化に関連する気温や、災害に結びつく降水量や豪雨の出現に関するものがほとんどであり、

風速に関する報告は少ない。風が外力となって発達する波浪の経年変化特性は比較的よく調べられている。磯崎・鈴木(1999)²⁾は1994年までの約20年間で波高が増加傾向にあり、冬季の波高は気温と逆相関で、日本海沿岸ではシベリア高気圧の強弱と高波浪の出現特性が関連することを示している。宇都宮ら(1997)³⁾は港湾局ナウファスと気象庁沿岸波浪計の波浪の経年変化を調べ、月平均有義波高は太平洋側で約0.6cm/年の増加、日本海側で約0.1cm/年の減少傾向があることを示した。間瀬ら(2009)⁴⁾は日本海沿岸の港湾局ナウファスの波高観測資料と気象変動指数の関係を調べ、冬型気圧配置の高波は全地点で波高が増加傾向にあること、波高変動と気象指数との関係では北極振動指数との相関が高いことを示している。風速の長期変動特性を調べることは、波浪の経年変化特性を把握するためにも、その基本となる外力の変動特性として重要である。

一方、地球温暖化により将来の気象・海象特性が現在気候から変化し、港湾施設や風力発電施設へ様々な影響を及ぼすことが考えられる。施設の適応策を検討するためには、外力としての風速の将来予測を調べる事が必要となる。IPCC AR4の温暖化

評価報告書では、複数の全球大気・海洋結合モデル GCM(Global Climate Model)の計算結果であるCMIP3 (Climate Model Intercomparison Project Phase 3)マルチ気候モデルを基にした将来影響評価が行われた。GCMの計算結果は、複数の温室効果ガス排出シナリオにもとづき気候予測計算が行われた結果であり、風速を含む気温などの様々な気象要素の21世紀末までの予測結果が公開されている。

本研究では風力発電事業への影響を主に調べるために、気象官署と高層風の風速観測値を解析するとともに、IPCC AR4の温暖化レポートで利用されたCMIP3マルチ気候モデルから作成された気候変動情報データベースを用いて、日本沿岸の風速長期変動の過去の特性とその将来変化傾向を検討することを目的とする。

2. 解析データと解析手法

(1) 風速データ

気象官署の風速観測は、明治時代から1961年まで4杯型のロビンソン風速計が用いられ、その後、4杯型から3杯型へ変更され、さらに1975年1月から風車型風向風速計に切り替えられた。風速計の変更による観測値への影響について、光田(1970)⁵⁾は風杯型と風車型の風速測定値の比較を行い、起動風速の違いによる弱風測定値の違いや、それぞれの時定数が異なることにより、風速変動成分の測定値の違いを明らかにした。おおむね風速10m/s以上の強風の測定値は、4杯型>3杯型>風車型の順に小さくなり、その差は3杯型に対して約±10%程度であることを示した。本研究では、気象官署の各観測点の測器の変遷を調べ、さらに観測所の移設などの影響を調べ、継続性を調査した。その結果、図-1に示すように連続データとし扱うことができる1986年以降の全国83地点の気象官署データ(3時間毎)を解析対象とした。解析に際し、風速の相対的な変化傾向を調べることを目的としていることから、設置高度による高度補正は行っていない。

また、気象庁の高層気象観測点における風速データも解析に用いた。気象官署の地上観測点は周辺の都市化や土地利用の変化の影響を受けるため、局地的な影響を受けている可能性があるが、高層風の解析ではその影響を取り除くことができ、風速の長期的な自然変動特性を調べることが可能である。高層観測は1日2回行われ、高度1000hPa、900hPaなどの指定気圧面の高度と風速が観測されている。

冬季平均風速の変動と大気大循環との関連を調べるため、12月、1月、2月の各月平均風速の全期間平均に対する偏差を求め、トレンド解析と主成分分析に用いた。

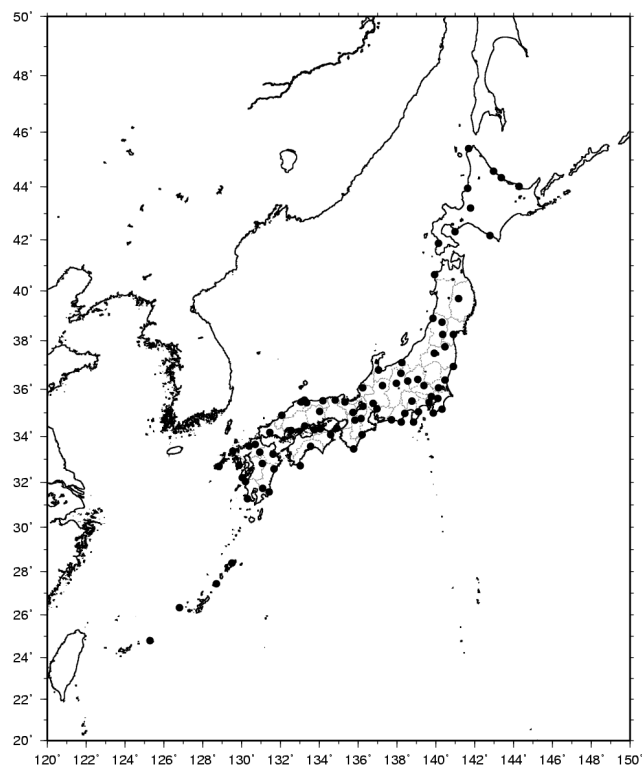


図-1 1986年以降のデータ継続性を確認した気象官署の風速観測点(全国83地点)

表-1 解析に用いた大気大循環指数

現象	指数名称	略称
北極振動	北極振動指数	AOI
太平洋十年規模振動	太平洋十年規模振動指数	PDO
エルニーニョ・南方振動	北太平洋指数	NPI
	南方振動指数	SOI
	エルニーニョ監視海域海面水温偏差	NINO WEST
		NINO 4
		NINO 3
		NINO 1+2
気温	全国気温偏差	—

(2) 大気大循環指数

日本の気象現象の変動を説明するために、様々な大気大循環指数が提案され、長期予報や異常気象現象の説明に用いられている。ここでは、表-1に示す大気大循環指数を入手し、風速変動との関連を調査した。

a) 北極振動 (AO: Arctic Oscillation)

北半球の月平均海面気圧の平年値からの偏差を主成分分析し、第1主成分の変動パターンとして得られるもので、北極と北半球中緯度の気圧の間に生じる振動である。北極振動指数AOIが正のときは、北極の気圧が低く、中緯度の気圧が高くなり、日本は暖冬になると言われている。指数が負のときは日本は寒冬となり季節風が強くなる。

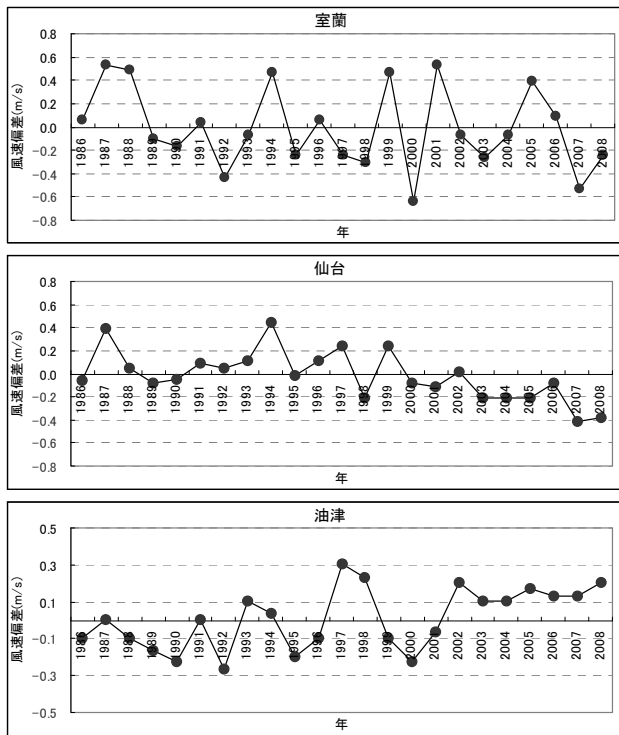


図-2 1986～2008年の冬季平均風速偏差のトレンド(上：北海道室蘭，中：宮城県仙台，下：宮崎県油津)

b) 太平洋十年規模振動(PDO: Pacific Decadal Oscillation)

太平洋上で約 20 年周期で変動する海面水温と気圧の変動パターンであり，冬季のアリューシャン低気圧の強さと連動している．海面水温の解析から得られた振動指数 PDOI が正のときはアリューシャン低気圧の気圧が低下し，偏西風が強化される．指数が負の時はその逆となる．また，海面気圧の解析から得られた振動指数 NPI は PDOI とは逆相関の関係にあり，NPI が負の時にアリューシャン低気圧の気圧低下と偏西風強化を表す．

c) エルニーニョ・南方振動(ENSO: El Nino Southern Oscillation)

赤道太平洋の東部とインドネシアの間の振動現象で，海洋現象のエルニーニョと，大気現象の南方振動の両者が密接に関連した大気海洋現象を表している．南方振動指数 SOI はオーストラリアのダーウィンとタヒチの地上気圧差として定義され，エルニーニョ監視海域海面水温偏差は赤道太平洋上の異なる海域の海面水温の平年からの偏差である．エルニーニョ発生時の日本の冬は，東日本から西日本および奄美・沖縄にかけて平均気温が高く，暖冬となる傾向がある．

(3) 主成分分析

北極振動の気圧パターンの解析や，風速偏差の変動パターンを解析する際に，主成分分析手法を用いた．以下にその概要を記す．

時空間データ $P(i,j)$ を考える．ここに i は時系列， j は格子点を表すものとする．データ $P(i,j)$ の分散・

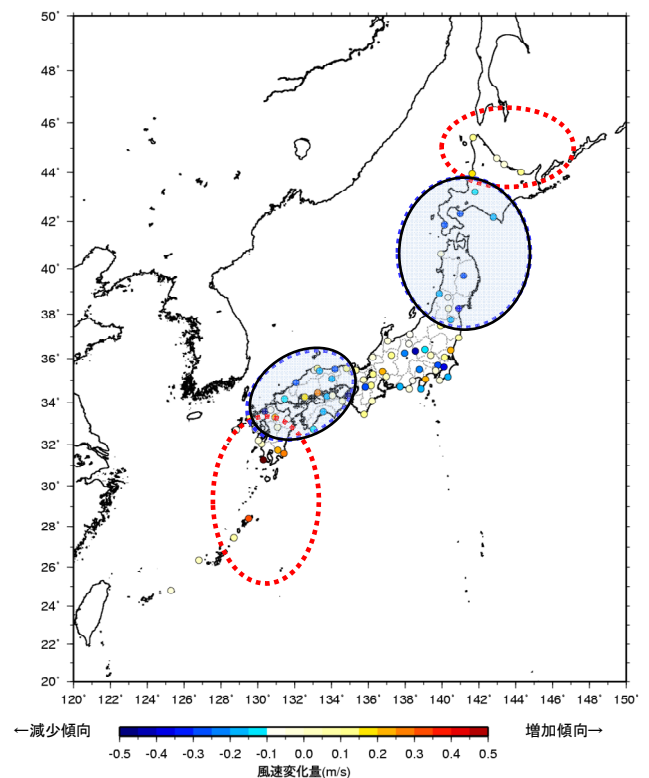


図-3 冬季平均風速偏差のトレンド(赤破線エリアは増加傾向，青網掛けエリアは減少傾向を表す)

表-2 高度80m, 300m, 1000mの高層風の冬季平均風速のトレンド(20年間の変化量に換算，単位m/s)

地点名	80m	300m	1000m
稚内	0.37	0.63	0.44
札幌	0.88	0.41	0.51
根室	1.15	1.00	0.48
秋田	0.31	0.22	0.39
仙台	-0.31	-0.17	0.33
輪島	-0.42	-0.34	-0.11
館野	0.09	0.39	0.19
米子	-0.27	-0.15	0.25
潮岬	0.27	0.39	0.57
福岡	-0.47	-0.50	-0.15
鹿児島	-0.15	-0.14	-0.06
那覇	-0.08	-0.07	0.55

共分散行列を作成し，その行列に対する固有値と固有ベクトルを求める．各固有ベクトルの寄与率を計算し，寄与率の最も大きいものを第1主成分として取り出し，以下，第2，第3主成分を求める．主成分のスコアとは，各主成分パターンと時空間変動パターンとの相関を示し，スコアが大きいほどその主成分の変動がより多く現れていることを示している．

北極振動は海面気圧偏差の格子点値(客観解析値等)の時系列データに対して第1主成分のパターンをとりだしたものである．その主成分のスコアを北極振動指数 AOI として求めている．

3. 過去の風速長期変動

(1) トレンド解析

1986年から2008年までの約20年間の冬季平均風速の平年値に対する偏差の時系列を図-2に示す。北海道室蘭では若干の風速減少傾向が見られ、宮城県仙台ではより顕著な風速減少傾向を示している。それに対して、宮崎県油津では風速が増加傾向を示している。風速のトレンドは地域的に異なっており、図-3に示すように、冬季平均風速偏差の変動は北海道北部と九州南部で風速の増加傾向が見られ、東北地方と中国・四国地方では減少傾向が見られる。減少傾向は最大で20年間に約0.5m/sである。

高層風の観測データを用いたトレンド解析結果を表-2に示す。指定気圧面の高度と風速から、代表的な風車のハブ高さ80mと上空の300m、および1000mの高さの風速を内挿し、冬季平均風速の20年間のトレンドを求めたものである。仙台、輪島、米子、および九州から沖縄にかけて風速は減少する傾向にある。東北、中国地方の日本海側は気象官署のトレンド解析でも風速が減少傾向にあり、高層風の解析と一致しているが、九州は気象官署の解析では風速が増加傾向にあり、結果が異なっている。北海道では高層風の観測でも風速の増加傾向が見られ、気象官署の解析結果と一致している。

(2) 大気大循環指数との相関解析

冬季平均風速の変動パターンに主成分分析を行い、その第1主成分と大気大循環指数との相関解析を行った。

図-4には冬季平均風速変動の第1主成分の変動パターンを示す。第1主成分の地域的パターンは、北海道・東北・山陰の日本海側および関東・東海の太平洋沿岸で風速変動が正となるパターンである。北海道・東北から山陰の日本海側の冬季平均風速は同時に大きくなることを表している。

表-3には、この冬季平均風速変動の第1主成分スコアと大気大循環指数との相関係数を示す。相関が最も高いのは北極振動指数AOIとの負の相関で、次に気温偏差との負の相関が続いている。太平洋十年規模振動指数PDOIとエルニーニョ・南方振動指数(SOI, NINO)は相関係数が0.3以下と相関が弱くなっている。北太平洋指数NPIとはほとんど無相関となっている。冬季平均風速の強弱は北極振動との関連が高いことがわかった。

間瀬ら(2009)⁴⁾は日本海冬季波浪と AOI の負の相関が高く NPI との相関が弱いことを指摘しており、本研究で示された冬季平均風速の変動と AOI との間の負の相関は、間瀬ら(2009)⁴⁾の解析と整合した結果となっている。波浪の長期変動特性はその外力である風速の長期変動特性に依存することが示されたと言える。

表-3 冬季平均風速変動の第1主成分スコアと大気大循環指数の相関(1986年~2006年)

指数名称	略称	相関係数
北極振動指数	AOI	-0.583
太平洋十年規模振動指数	PDOI	0.249
北太平洋指数	NPI	-0.086
南方振動指数	SOI	0.230
エルニーニョ監視海域海面水温偏差	NINO WEST	0.048
	NINO 4	-0.072
	NINO 3	-0.214
	NINO 1+2	-0.250
全国気温偏差	—	-0.494

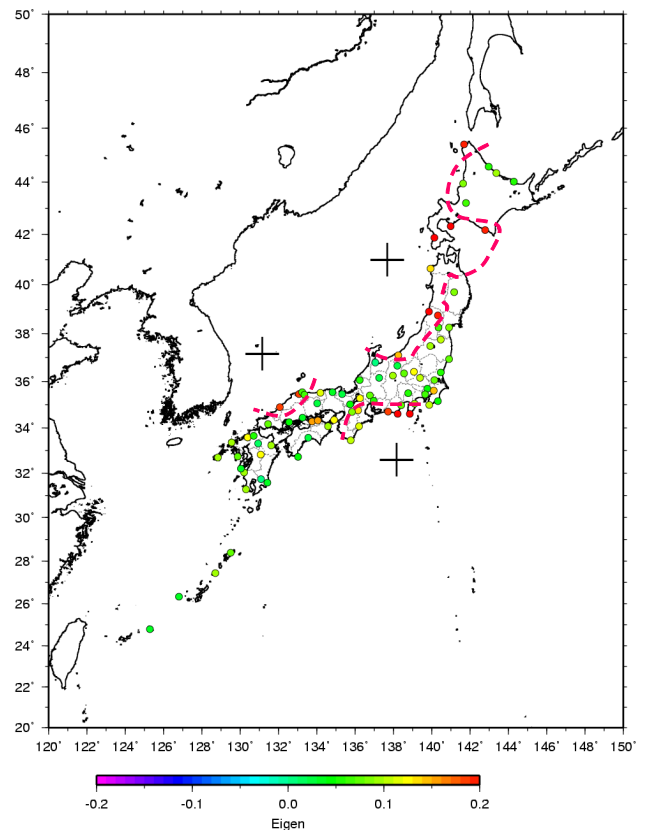


図-4 冬季平均風速変動の第1主成分の変動パターン(正の変動パターンが大きいエリアを+で示す)

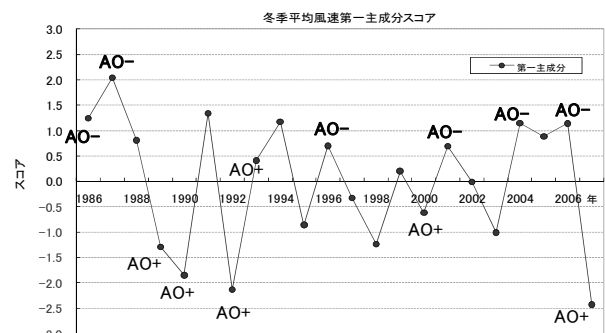


図-5 冬季平均風速変動の第1主成分スコアと北極振動指数AOIの関係

第1主成分の変動パターンのスコアを図-5に示す。スコアは第1主成分の寄与率であり、スコアが正の

ときは図-4と同様な風速変動が見られることを示している。スコアは1986-1987年, 1991年, 2004-2006年などにかけて正のピークがあり, 日本海側の地域で冬季平均風速が大きくなっていることを示す。一方, 1989-1990年, 1992年, 2007年にはスコアが負となり, 日本海側の風速が小さくなっていることを示している。

これらのピークは北極振動指数 AOI との関連が認められる。図-5には北極振動指数 AOI の正負を示しているが, 風速変動の第 1 主成分のスコアは AOI と負の相関があることが分かる。AOI が負の時は寒気が日本に南下しやすく, 寒冬となって季節風が強くなっていることと対応するものと考えられる。

4. 将来の風速変動予測

(1) 気候変動情報データベース

気候変動予測はGCM(Global Climate Model)と称される全球気候予測モデルの結果を解析したものであり, 例えばCMIP3(Coupled Model Intercomparison Project phase 3)マルチ気候モデルの計算結果はWebサイトで公開されている。研究目的であれば誰でも利用できる環境にあるが, 専門的な知識を必要とし, 他分野で温暖化の適応策を調べようとする場合には, 利用しにくい環境にある。そこで, GCMの計算結果を翻訳した気候変動情報データベースを開発し, 専門家以外でも利用しやすいデータを整備した(公開アドレス<http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/database/>)。

気候変動情報データベースは複数の気候モデルの現在気候および将来気候の計算結果と, 気象再解析値と観測値のデータベースである。CMIP3マルチ気候モデルは各国の気候変動研究機関の25モデルの全球大気海洋結合モデルの計算結果である。格子間隔は最も細かなもので1.125度(約125km)であり, 粗いものでは4度(約444km)である。利便性を考慮して, 我が国の地図情報として標準的に用いられている日本国内の地域一次メッシュ(約80km四方)単位で整理した。

現在気候については再解析値とアメダスについても一次メッシュ単位で集計され, GCMの現在気候再現性を検証するため, 相関係数, RMSEなどの統計量が算出されている。

将来気候シナリオは, A1B, A2, B1の3つのシナリオの計算結果を整理した。シナリオ毎, モデル毎に降水量・気温・気圧・風速・比湿などの地上気象要素の月平均値と, 月別の将来気候気象要素変化値(変化率, 変化量)が算出されている。その結果は図-6に示すように気候変動情報データベースのWeb画面として確認できるほか, 数値として表示することが可能である。データベースからは, 表-4に示すような気象要素毎の将来変化量が得られる。

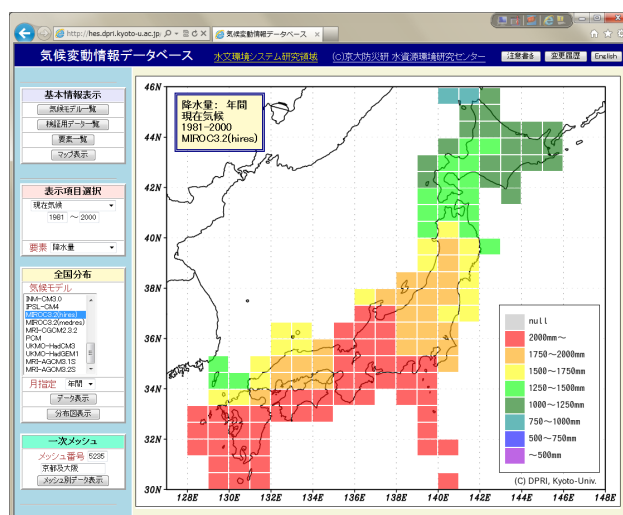


図-6 気候変動情報データベースのWeb表示画面例

表-4 日本全体の将来変化量の例 (A1Bシナリオ)

要素	各モデルの変化量 (将来ー現在)		
	平均	最大	最小
降水量(mm)	+138	+297	-47
地上気温(℃)	+ 3.2	+ 4.9	+ 2.0
地上風速(m/s)	- 0.0	+ 0.1	- 0.1
海面気圧(hPa)	+ 0	+ 1	- 1

(2) 風速の将来予測

風速の将来予測は表-4に示される気候変動情報データベースの地上風速について, CMIP3の風速の月平均値が出力されている19モデルを抽出してアンサンブル平均を求めた。モデルの解像度が粗いことを考慮して, 日本を4つの地域(北海道, 東北・新潟, 関東～中国・四国, 九州)に分けて計算した。図-7には2000年を基準とする風速偏差の2100年までの将来予測を, 5年間移動平均した結果を示す。図示のように風速偏差は北海道のみ増加傾向を示し, 他の地域は減少傾向を示している。その増減量は表-5に示すように, 100年間でも0.5m/s以下であり, モデル間の±1m/s以上のばらつきに比べると一桁小さい変動であり, 信頼性は十分ではない。

表-5 風速の将来予測平均トレンド (100年間の増減)

地域	風速増加量 m/s
北海道	0.25
東北・新潟	-0.05
関東～中国	-0.29
九州	-0.42

5. おわりに

気象官署の風速観測値から長期変動特性を調べ,

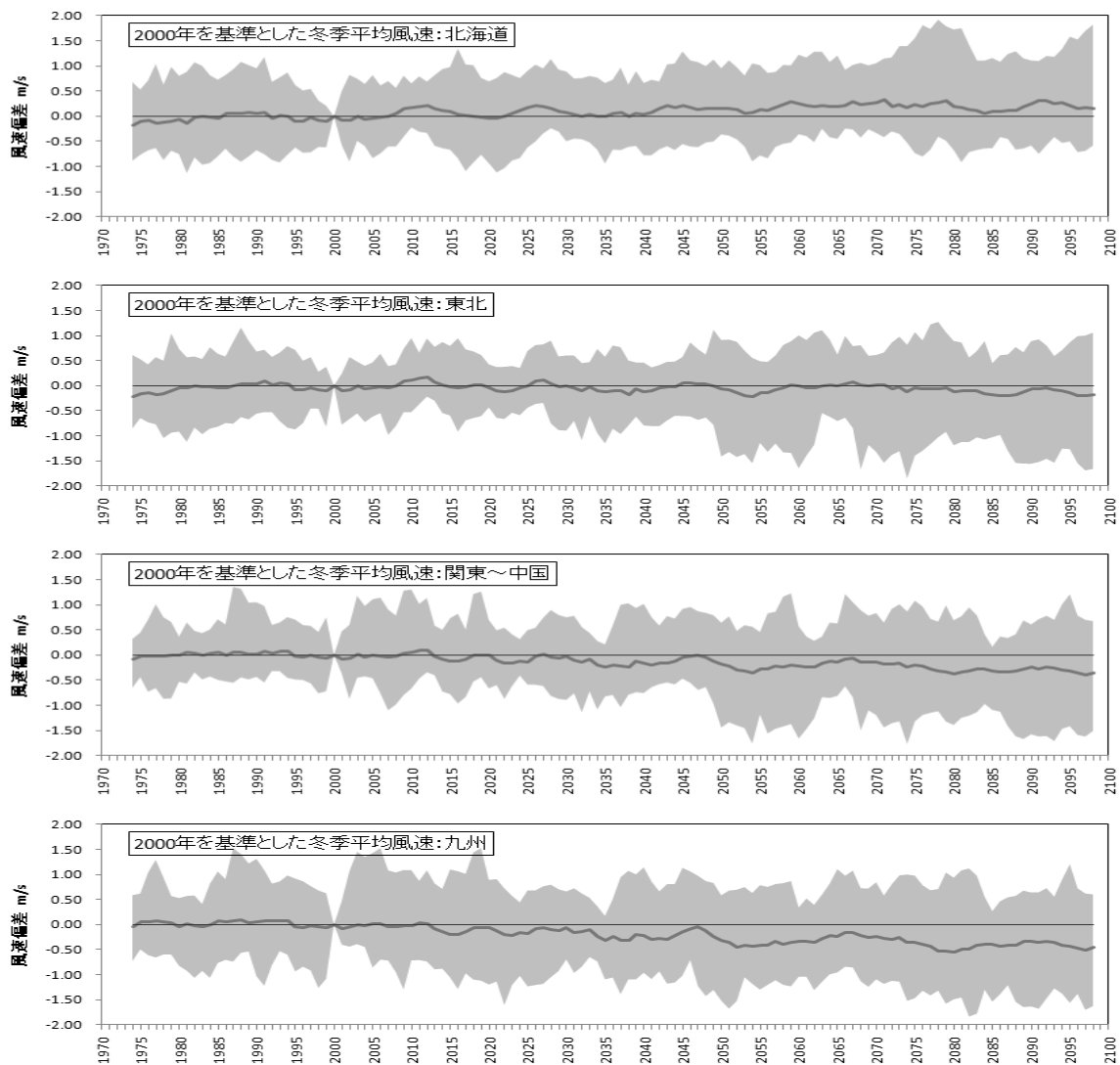


図-7 A1BシナリオによるCMIP3気候変動情報による風速偏差の将来予測（上から、北海道、東北・新潟、関東～中国・四国、九州）。実線は全モデルのアンサンブル平均、網掛け範囲はCMIP3全モデルの最大と最小の範囲。2000年を基準とする風速偏差の5年移動平均を表す。

冬季平均風速が北海道北部と九州南部で増加しているが、他地域では減少傾向にあること、その傾向は高層風データとも概ね一致していることが明らかになった。また、風速変動の第1主成分のスコアは北極振動指数 AOI と負の相関が高く、極域の寒気の中緯度への吹き出しが冬季風速増加をもたらすものと理解される。

温暖化予測情報を専門知識がなくても利用できるための気候変動情報データベースを開発し、その結果を利用して複数の気候モデルから日本沿岸の風速将来予測を求めた。その結果、北海道では若干の風速増加、他地域では風速減少が示されたが、モデル間のばらつきの方が一桁大きく、将来予測情報としての精度は十分とは言えない、より解像度の高いモデル解析結果を利用することが今後の課題と言える。

謝辞：筑波大学の田中博教授から北極振動指数の提

供と研究への助言を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Klink, K.: Atmospheric circulation effects on wind speed variability at turbine height, *J. Applied Meteorology and Climatology*, Vol.46, pp.445-456, 2007.
- 2) 磯崎一郎・鈴木靖：波浪の解析と予報，東海大学出版会，274p., 1999.
- 3) 宇都宮好博・岡田弘三・鈴木靖：波候の変動特性に関する研究，*海岸工学論文集*，第44巻，pp.1246-1250, 1997.
- 4) 間瀬肇・田中遼・森信人・安田誠宏：日本海沿岸における波浪の経年変化特性に関する研究，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. B2-65, No.1, pp.1251-1255, 2009.
- 5) 光田寧：種々の風速計の比較について，*京都大学防災研究所年報*，Vol.13A, pp.441-448, 1970.