

2009 年度 修 士 論 文

非定常変動風力が建物応答に与える影響について
Influence of Non-stationary Wind Force on Building Response

市 原 義 孝
ICHIAHRA, Yoshitaka

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

1. 序論	
1.1 問題提起	P. 5
1.2 風荷重が建物に与える影響と建物の高層化	P. 5
1.3 建物の高層化に対する対応と設計ニーズ	P. 6
1.4 定常風モデルによる評価と問題点	P. 7
1.5 非定常風に対する近年の動向	P. 8
1.6 本論文の目的と構成	P. 9
2. 東京大学柏キャンパスにおける風速実観測データ概要	
2.1 観測機概要	P. 11
2.2 観測機毎の年間観測データ特性	P. 11
2.2.1 風向特性	P. 12
2.2.2 風速特性	P. 18
2.3 柏キャンパスで過去観測された台風データについて	P. 23
2.3.1 過去観測された台風データ進路図	P. 23
2.3.2 各台風データ風特性概要	P. 25
2.4 まとめ	P. 40
3. 非定常風評価への新たな風モデル導入と風特性評価及び性能検証	P. 41
3.1 非定常風評価への新たな風モデル導入について	P. 42
3.2 定常風モデルと線形近似風モデルによる風特性評価とその比較	P. 42
3.2.1 線形近似風モデル導入について	P. 42
3.2.2 最小二乗法線形近似による平均値推定と風特性評価方法	P. 43
3.2.3 台風データへの線形近似風モデル検証と定常風モデルとの比較	P. 45
3.3 定常風モデルと EMD 非定常風モデルによる風特性評価とその比較	P. 45
3.3.1 EMD 非定常風モデル導入について	P. 65
3.3.2 Empirical Mode Decomposition (EMD)手法: Sifting Process 概要	P. 65
3.3.2.1 はじめに	P. 65
3.3.2.2 Intrinsic Mode Function (IMF)	P. 65
3.3.2.3 The Empirical Mode Decomposition Method: The Sifting Process	P. 67
3.3.3 EMD 非定常風モデル最適パラメーター検証とその比較	P. 70
3.3.3.1 はじめに	P. 70
3.3.3.2 EMD 手法による非定常風モデルと風特性評価について	P. 71
3.3.3.3 EMD 手法導入への最適パラメーターの決定	P. 73
3.3.4 台風データへの EMD 非定常風モデル検証と定常風モデルとの比較	P. 133
3.4 まとめ	P. 153

4. 非定常変動風速の一般化と変動模擬風速の作成	
4.1 非定常変動風速の一般化について	P. 154
4.2 非定常変動風速の分類	P. 155
4.3 線形近似風モデルによる評価時間内スペクトル特性	P. 155
4.4 非定常変動模擬風速の作成	P. 156
4.4.1 非定常変動模擬風速作成条件	P. 172
4.4.2 非定常変動模擬風速シミュレーション手法	P. 173
4.4.3 非定常変動模擬風速シミュレーション	P. 175
4.5 まとめ	P. 176
5. 非定常変動風力による応答解析と建物応答評価	
5.1 想定建物概要と解析モデルの作成	P. 179
5.2 定常模擬風速による時刻歴応答解析と周波数応答解析との整合性について	P. 180
5.2.1 定常模擬風速算出方法	P. 180
5.2.2 周波数応答解析手法	P. 183
5.2.3 時刻歴応答解析手法	P. 185
5.2.4 検証結果	P. 187
5.3 非定常変動模擬風速による建物応答解析	P. 188
5.3.1 スペクトル応答解析	P. 189
5.4 まとめ	P. 191
6. 総括・今後の展望	P. 192
参考文献	P. 198
梗概	P. 202
謝辞	P. 207

第 1 章

序論

1. 序論

1.1 問題提起

風荷重が建物応答に影響を及ぼす可能性が危惧される建物に対して、(式 1.1.1) に示すような一定平均風速と平均が 0 の定常確率過程に基づいた風速変動成分による定常風モデルを用いた風洞実験や応答解析が、構造設計分野に広く一般的なものとして受け入れられている。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad \text{式 1.1.1}$$

\bar{U} : 10 分間一定平均風速

$u(t)$: 定常確率過程による風速乱れ成分

この理論的背景には、自然風の時間的にも空間的にも一様な安定した平均的性質を備えたエルゴート性の存在と、定常確率過程による数学的理論展開が容易であること、あるいは実際の多くの動的荷重がおおむね定常確率過程に従っている場合が多いということなどが挙げられる。この時、動的応答の最大値評価には定常確率過程の理論から導かれたピークファクターを用いる事が建築物荷重指針・同解説（2004）に示されている。しかし、厳密に自然風を評価するならば、自然風は定常な過程の集まりではなく、時間的にも空間的にも一様な安定した平均的性質を持っているとは言えないため、風荷重による建物応答が懸念される建物に対して（式 1.1.1）に基づいたモデル化が実現象とどの程度整合性をもって評価されているかは耐風工学的興味と言える。

1.2 風荷重が建物に与える影響と建物の高層化

一方、暴風雨や台風、ダウンバースト、竜巻等、風速乱れ成分が明らかに定常確率過程で説明が出来ない現象も自然界に存在し、これら現象が建物構造に与える影響は時に建築物に対して深刻な爪痕を残す。（写真 1.1.1 参照）



写真 1.1.1 強風による被害事例

一般に、構造物の軽量化と高層化が進むと、構造物の動的応答評価において重要なパラメーターである 1 次固有周期が長くなり、構造物の減衰が低下する。そのため、1Hz 以上の高周波数領域に大きなパワーを持つ地震に対する応答はあまり大きくならないものの、地震に比べ相対的に低い周波数領域にパワーを持つ動的風力による荷重効果は大きくなる傾向にある。静的水平荷重に関しても、高層化によって風荷重による転倒モーメントが地震荷重より大きくなる可能性を否定できない。このような予想は、近年世界中で建てられた多くの超高層建物に取り入れられ、横浜ランドマークタワーや台北 101、ブルジュ・ハリファ（ブルジュ・ドバイ）といった構造物の設計においても現実化されている。（写真 1.1.2 参照）特に、我が国においては、1993 年に竣工した横浜ランドマークタワーが、高さ 296m と風荷重の影響が地震力を上回る日本で初めての超高層ビルとなった。その建物固有周期は、風による応答の低減を目的に、水平荷重に対する剛性を上げた設計が行われてはいるが、およそ 6 秒程度と他の高層建築に比べると一段と高い。また、日本と同じく地震・台風多発地帯

に建てられた台北 101 に関しても、他の 400m クラスの超高層ビルと比べ高い水平剛性を確保しているにも関わらず、その固有周期は 6.8 秒とかなり長い。2010 年現在、世界で最も高い超高層ビル（828m：尖塔高）、ブルジュ・ハリファに至っては、その固有周期が 10 秒から 11 秒程度と群を抜いて長くなる。これらビルの超高層化に伴う固有周期の長周期化は、従来考慮されてこなかった比較的長周期の風速帯による応答解析の重要性を示唆しているだけではなく、非定常風に対する構造安全性の問題提起にも成り得る。



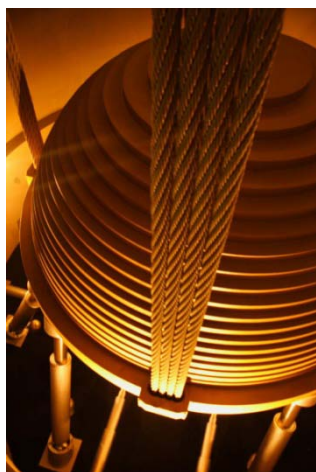
写真 1.1.2 世界の超高層ビル

左から (a) 台北 101 (508m) (b) ブルジュ・ハリファ (828m) (c) 横浜ランドマークタワー (296m)

1.3 建物の高層化に対する対応と設計ニーズ

我が国における構造設計は、通常、地震荷重の方が風荷重よりも卓越するため、耐震設計が主な設計課題となる。さらに、地震力は建物の質量に比例した慣性力であるので、耐震設計を施した高層建築を設計する際には、軽く、そして変形力に富んだ柔らかい構造が求められる。しかし、建物の高層化が進むと、建物固有周期は長くなり、地震力が相対的に小さくなるのに対して受風面積の増加から風荷重は大きくなるため、その影響が無視できなくなる。しかし構造物の高層化は、一般事務及び商業用建物のみならず、30 階以上の共同住宅でも行われており、風によって励起されたガスト応答は超高層のみならず高層建物の建物居住者に対して著しい不快感を及ぼす可能性がある。その為、風荷重による建物の塑性化が問題とならないような建物に対しても何らかの風対策が求められる。概して、このような影響が危惧される建物に対しては、建物設計段階での空気力学的な断面検討や建物配置（写真 1.1.2 参照）、アクティブ型制振装置や TMD 等のパッシブ型制振装置、または互いの長所を組み合わせせたセミアクティブ型制振装置といった種々の振動制御手法が用いられる。（写真 1.1.3 参照）しかし、強い暴風雨が吹き荒れる際には、平均風速自体が時々刻々と変化をするため、ある一定の風速に固定されたアクティブ制御手法では経済的で効果的な制振効果を発揮することは難しい。そのため、風荷重による事前の応答予測が必要なアクティブ型制振装置やセミアクティブ型制振装置による振動制御は、時々刻々と変化する平均成分を適切な自然風モデルとして精度良くシミュレーションを行えるかが重要となる。また、近年に入ると超高層ビルや中低層ビルに対して、構造物の損傷制御あるいは応答低減を目的とした履歴減衰型、または粘性減衰型の制振部材の実用化と普及が進んでいる。これら履歴型制振部材や粘性減衰型部材による制振装置は、地震に対して早期に部材を降伏させる事で外乱エネルギーを効率よく吸収し、地震

時の応答や主要構造体の損傷を小さくする事を目的としている。しかし現状のような、応答予測値と実測値の間にばらつきがある程度存在する場合、比較的高さが低い超高層ビルでも、風荷重によって制振装置が降伏する可能性がある。一般に、制振装置は地震に対して、できるだけ小さな荷重で降伏させるほど制振効果が高いため、風荷重に対して適切な評価が可能となれば、制振構造としてより合理的な設計が可能となる。このため、これまであまり風荷重による応答予測値のばらつきが問題とならなかった中低層建物に至るまで、より適切な風速のモデル化を行った風荷重に対する制振部材の動的荷重の評価の必要性が生じてきている。また、近年の免震建物の普及に伴い、風荷重により免震層が塑性化しやすい超高層免震建物の設計も増えており、構造設計分野における種々の設計ニーズに応じたより正確な動的風力の評価と建物応答予測が必要となっている。



左図：台北 101 に取り付けられた TMD 右図：横浜ランドマークタワーに取り付けられた制振装置

写真 1.1.3 超高層建物に導入されている制振装置

1.4 定常風モデルによる評価と問題点

一般に、応答予測値に用いられる風速は大別すると 2 種類に分ける事が可能である。1 つは、(式 1.1.1) で定義されたある一定の設計用再現期間内で風速が最大となる風向下での 10 分間一定最大平均風速と、建築物荷重指針・同解説（以下荷重指針）による変動風速のパワースペクトル密度をもとに、三角級数モデルによる模擬風速波形をシミュレーションする方法である。（詳細については第 4, 5 章に記載する。）もう 1 つは、風洞実験によって得られた風速の時系列データを直接利用する方法である。この時荷重指針では最大風速を期待値として表し、設計においてはレベル 1「稀な暴風による風荷重」（再現期間 50 年）、レベル 2「極めて稀な風荷重」（再現期間 500 年）として各々のレベルに対して建物の使用性と安全性を確認するように求めている。（図 1.1.1）しかし近年になり、各地に風速・建物応答観測所が建てられ、その中の一部では、台風、もしくはハリケーンの通過時間帯の記録が観測されるようになると、応答シミュレーション値と実測値との間にばらつきの存在が指摘されるようになってきた。これは、従来の定常風モデルでは、乱流中に発生する瞬間的な変動や比較的長い周期での風速の変動を十分にモデル化出来ていない事、応答予測の際に風向の非定常性が考慮されていない、または考慮できない事に起因するものと考えられる。同様に、エッフェル型境界層風洞実験に代表される建物応答シミュレーションも、定常風モデルに従ったメッシュ、スパイヤー、ソウ、ラフネスブロックといった瞬間的・継続的な上昇風速や下降風速の作成が困難な乱流発生手法を用いているため、応答実験値と実測値との間にばらつきを生み出す原因ともなっている。このため、台風・ハリケーン等の継続時間内に明らかに長い、または短い非定常性を確認できるケースでは、定常風モデルによる大まかな数値予測は出来たとして

も、非定常風が引き起こす非定常応答までの応答予測は困難である事が予想される。これら構造安全性に関わる不確実性は、地震多発地域にある我が国の厳しい耐震基準によってすでに要求性能は満たされているものと認識されがちではあるが、すでに上述したように、近年の目覚ましい解析技術の発展と新たな構造部材の開発による多様な構造物の設計に対応したより正確な動的風力の評価が必要となっている事を忘れてはならない。

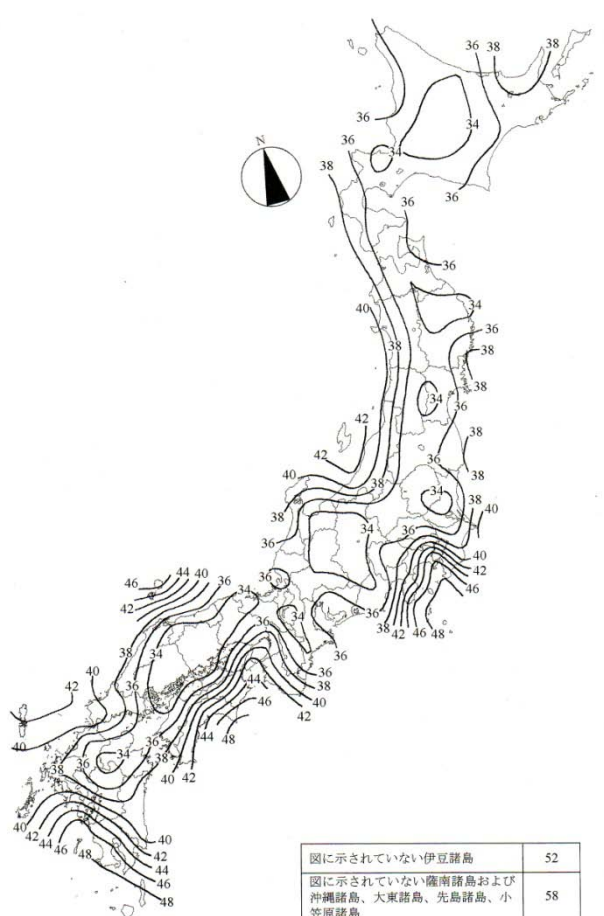


図 1.1.1 再現期間 500 年の風速（地表面粗度区分Ⅱ）

1.5 非定常風速に対する近年の動向

従来の定常確率過程に従った解析手法は、通常観測されるような変動の少ない季節風を評価する際には、非常に有効な手法である。しかし、暴風雨や台風、ダウンバースト、竜巻等、通常自然界で発生しにくい、明らかに現象が定常状態として仮定が出来ない場合には、その有効性を確保することは難しいと考えられる。それゆえ、観測データ内に明らかに非定常性を有するようなデータを扱った構造評価を行う際は、新たな風速評価時間の導入や解析ツールが必要となってくる。

この問題に対応するため、非定常性を有するデータに対応した解析手法として様々なツールが開発されている。例えば、地震問題に適用されているようなパラメトリック時刻歴モデルや、近年の周波数領域解析の発展に伴ったウェーブレット解析、そして経験的モード分解（EMD）とヒルベルト変換との組み合わせといった信号処理への新たな洞察が挙げられる。（Curly and Kareem, 1999; Huang et al, 1998; Kareem and Kijewski 2002）このような非定常風に対する研究の流れの中で、Adhikari 等は、建物応答実測値にウェーブレット解析をかける事で、建物固有周波数に近い周波数を持った風のガスト分布は建物応答の非定常性を引き起こす一つの原因

であることを示している。また、Huang 等による EMD 解析は、信号上部と下部の包絡線をスプライン関数によってフィッティングし、上部と下部の包絡線の平均から信号同士を引く事で時間変化に対応した平均成分を与え、非定常現象モデル化と解析のための時間・周波数特性に基づいた新たな手法を導入している。この EMD 解析の性質に着目し、Xu & Chen 及び Kareem 等は、EMD 解析による構造物上で得られたハリケーン実測データを用いた時々刻々と変化する非定常風特性評価を行い、その優位性を示している。また、Jun, Hui, Xu 等は EMD による非定常風特性評価について一年間の観測データを用いた解析を引き続き行い、台風データのみならず一般の季節風についても、その評価における EMD 手法の実用性を示した。

しかし、これら非定常風に関する研究は、従来の定常風モデルに対する風特性評価の適用限界を示し、かつ、EMD 手法による非定常風モデルの有用性を示す事にとどまっており、EMD 手法によって得られた風速変動成分が建物周波数応答に与える影響については言及されていない。

1.6 本論文の目的と構成

非定常風に関する研究は、定常確率過程による近似モデルの簡便さと有用性、地震に対する構造安全性確保という観点から、今まで危機迫った問題として捉えられる事は少なかった。しかし、近年の建物の高層化に対する固有周期の長周期化や台風データによる応答予測値と実測値とのばらつき、新たな構造技術の発展等、風荷重と建物を取り巻く環境が変わる中で、従来の定常確率過程に従った応答予測では困難なケースが見受けられるようになってきた。そこで本研究は、自然現象の一部である風速の非定常性に着目をした柏キャンパスデータに基づく特定サイト風モデルの検証と提案、周波数領域におけるスペクトル応答解析を行う。本研究から得られる成果によって、柏キャンパスを通過、もしくは接近した台風データの特性と柏キャンパス周辺を対象とした一般化非定常模擬風速を得る事が可能である。また、時々刻々と変化する平均成分に対して従来の手法から拡張された周波数領域でのスペクトル応答解析についても新たな提案が成されている。

本研究では、非定常に変化をする自然風データに対して柏キャンパス周辺に対する一般化非定常模擬風速を提案する。そのため第2章では、柏キャンパスで記録された観測データについて概要が説明されている。また、柏キャンパスで観測された8年間（一部9年間）の風速データの中から、台風データを抽出する事で非定常な風速の特性を検証している。第3では、第2章で得られた非定常風データに対して適切な風モデルを提案する。提案される風モデル2種類、風速の平均成分が時々刻々と線形的に変化する事を前提とした線形近似風モデル及び、風速の平均成分はランダムに変化を繰り返しその変化が無視できないものとする非定常変動モデル、である。両モデルの具体的な定義は、第3章を参照されたい。第4章では、第3章の成果を基に柏キャンパスにおける非定常風速の一般化を試みる。風速の一般化に際し、それぞれの非定常風の変動の特性がまとめられ、スペクトル特性についてもより細かな時間帯で分析を行う。最終的に提案された非定常模擬風速に対して第5章では、周波数領域におけるスペクトル応答解析を行う。これまでの一定平均風速に対する定常風モデルによって確立されたスペクトル応答解析手法に対して、本章では平均風速成分の時々刻々の変化を考慮した手法へと理論を拡張する。最後に、以上得られた知見に対して総括を第6章にて行う。

第2章

東京大学柏キャンパスにおける風速実観測データ概要

2. 東京大学柏キャンパスにおける風速実観測データ概要

2.1 観測機概要

第2章では、本研究で用いた風速実観測データの概要について述べる。柏キャンパスにおける風速計は計6ヶ所、(図2.1.1)のように設置されており、それぞれを、P1, P2, P3_10m, P3_20m, P4_1, P4_2と呼ぶ。観測地点高さは、P1が高さ10m、P2が10m、P3が10mと20m、P4が43mである。また、キャンパス周辺に高層建物は存在しない。P4に関しては、建物の剥離流の影響が考えられる為、風向毎に北側(P4_1)と南側(P4_2)のデータをアンサンブルする事で一つのデータとしてみなす。詳細については、次節に記載する。



図 2.1.1 東京大学実風速観測地点 棟名称：i 環境棟 ii 生命棟 iii 基盤棟 iv 物性棟 v 総合棟

2.2 観測機毎の年間観測データ特性

本節では、柏キャンパスで観測された風向・風速データを概説する。観測期間は、2008年3月17日～2009年3月17日、10分間データを基に検証を行う。また、P4に関しては、北側と南側のデータを一つに統一した上で解析を行う。データ統一のルールは、P4_1及びP4_2が図2.1.2に示す青色の範囲で風向を捉えた時、P4_1のデータを採用する。また、P4_2が青色の風向を示さない場合でも、P4_1がP4_2の風速を上回る時はP4_1のデータを採用する。逆に、P4_1がP4_2の風速を上回り、風向が赤色示している、かつ、P4_2が青色の範囲を示している場合でも、P4_1のデータを採用する。赤色の範囲に関しては、P4_2を軸にその逆である。

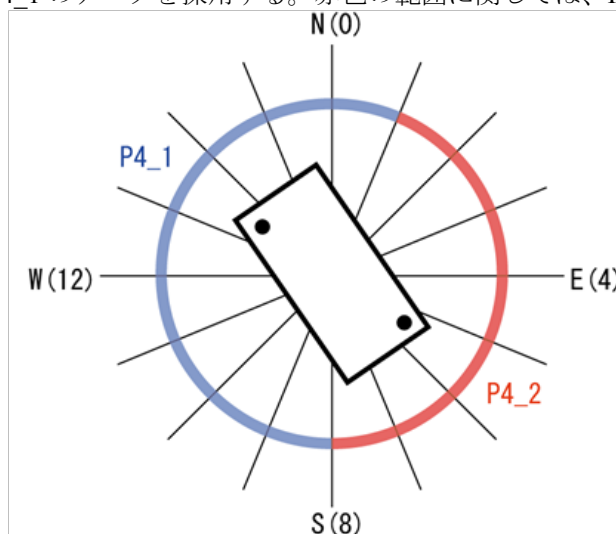


図 2.2.1 P4 データ統合ルール

2.2.1 風向特性

2008年3月17日～2009年3月17日に観測されたデータを2ヶ月毎整理し、P1からP4の風向特性を検証する。また、年間データでの検証は、2ヶ月毎のデータ検証後に行う。なお、図中赤で示された5m/s以上の風速に関してはスケールを5倍に変えている。

・ 観測地点：P1 正門横

青線：全風速データ 赤線：5m/s以上の風速データ（スケール5倍）

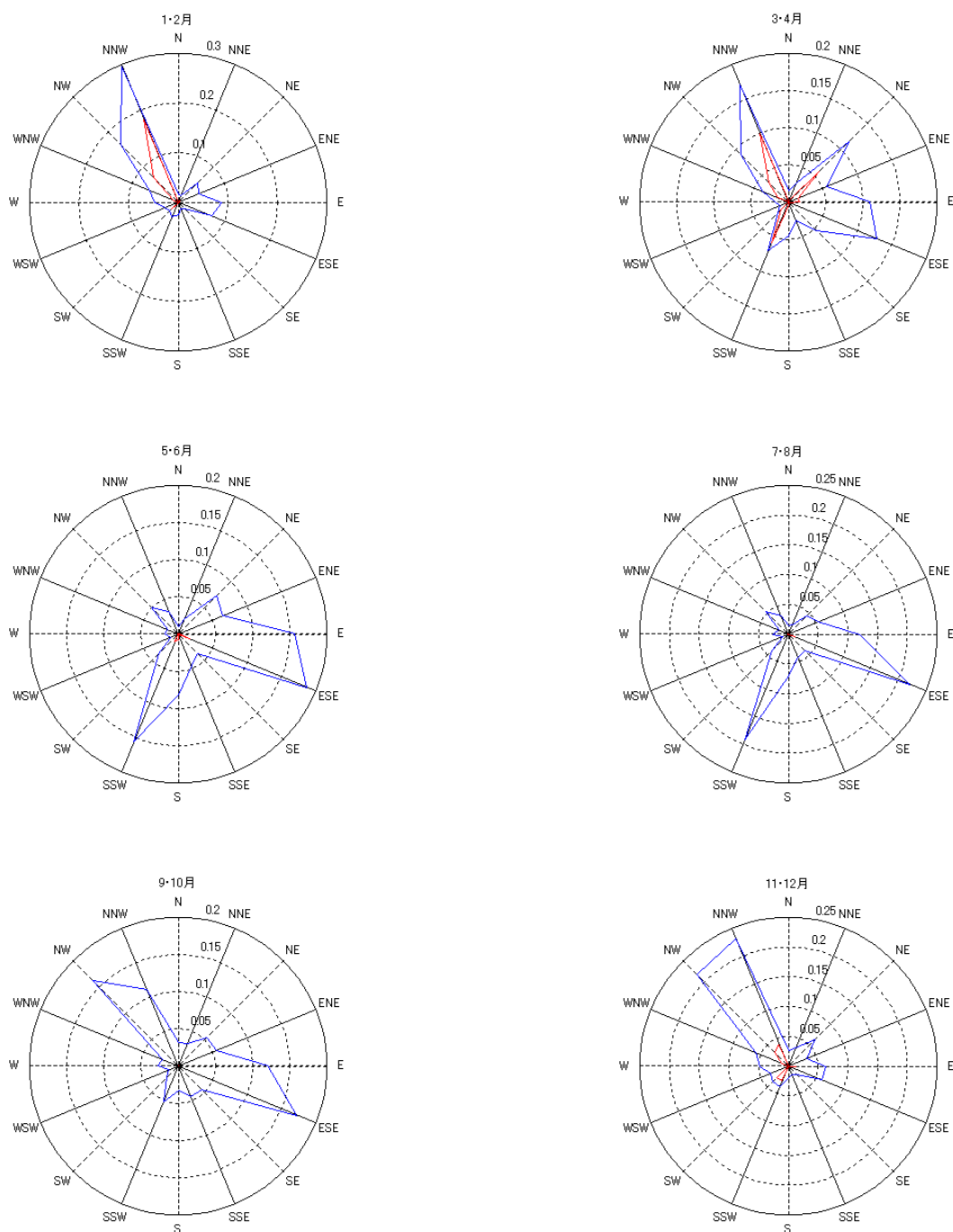


図 2.2.2 P1 2ヶ月毎の風配図 観測期間：2008年3月17日～2009年3月17日

・ 観測地点：P2 どんぐり保育園横

青線：全風速データ 赤線：5m/s 以上の風速データ（スケール5倍）

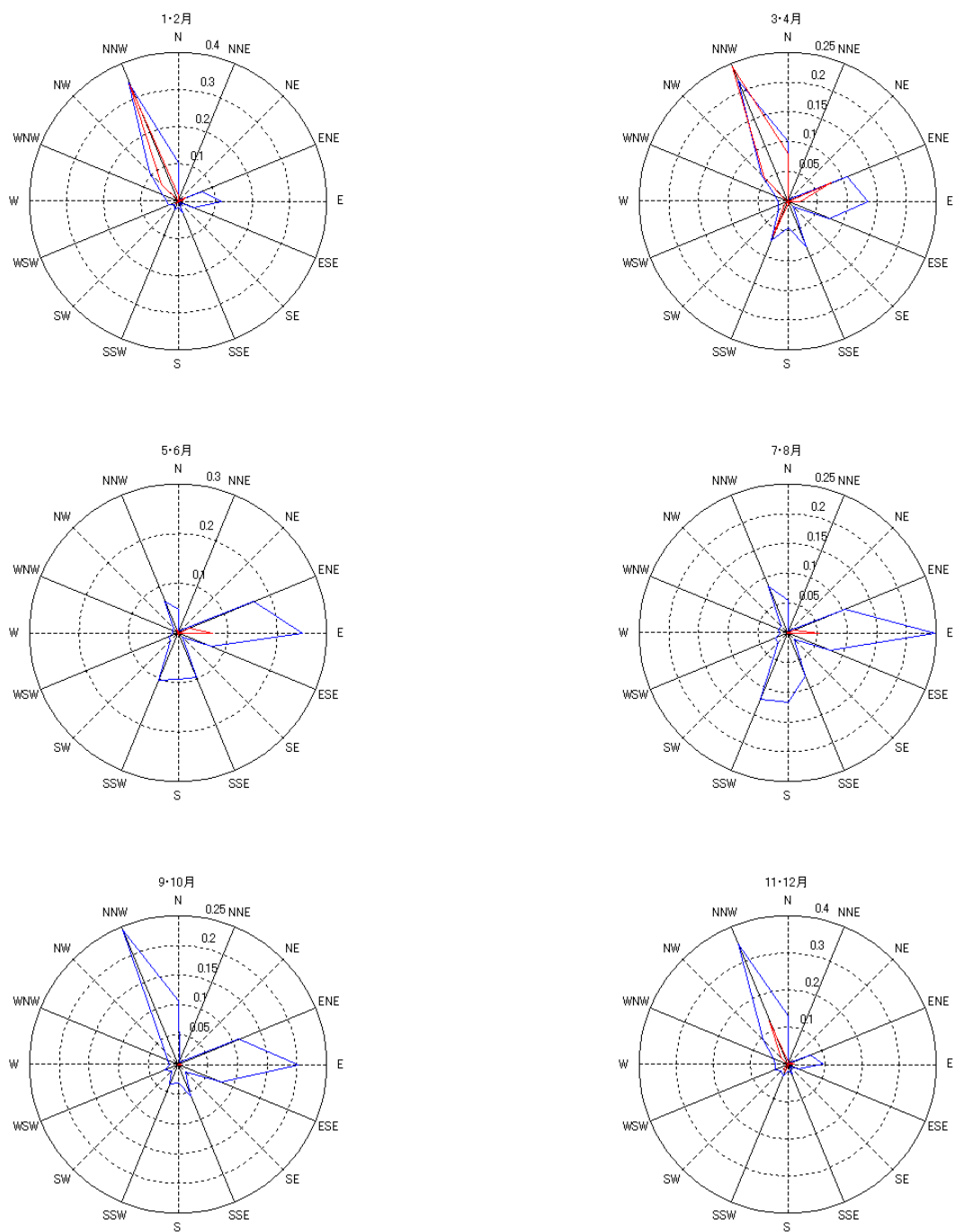


図 2.2.3 P2 月毎の風配図 観測期間：2008年3月17日～2009年3月17日

・ 観測地点：P3_10m 基盤棟裏 テニスコート横

青線：全風速データ 赤線：5m/s以上の風速データ（スケール5倍）

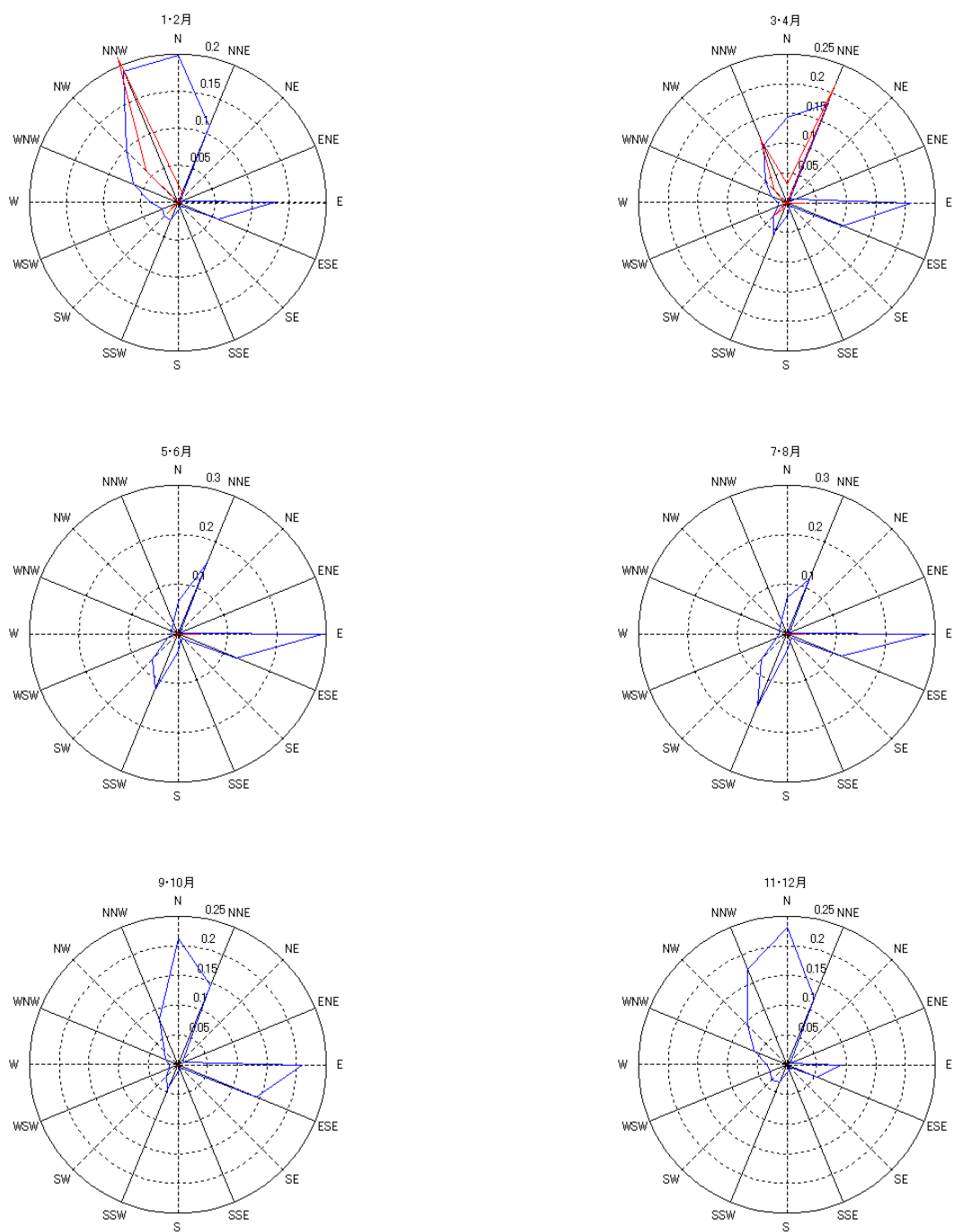


図 2.2.4 P3_10m 月毎の風配図 観測期間：2008年3月17日～2009年3月17日

・ 観測地点：P3_20m 基盤棟裏 テニスコート横

青線：全風速データ 赤線：5m/s以上の風速データ（スケール5倍）

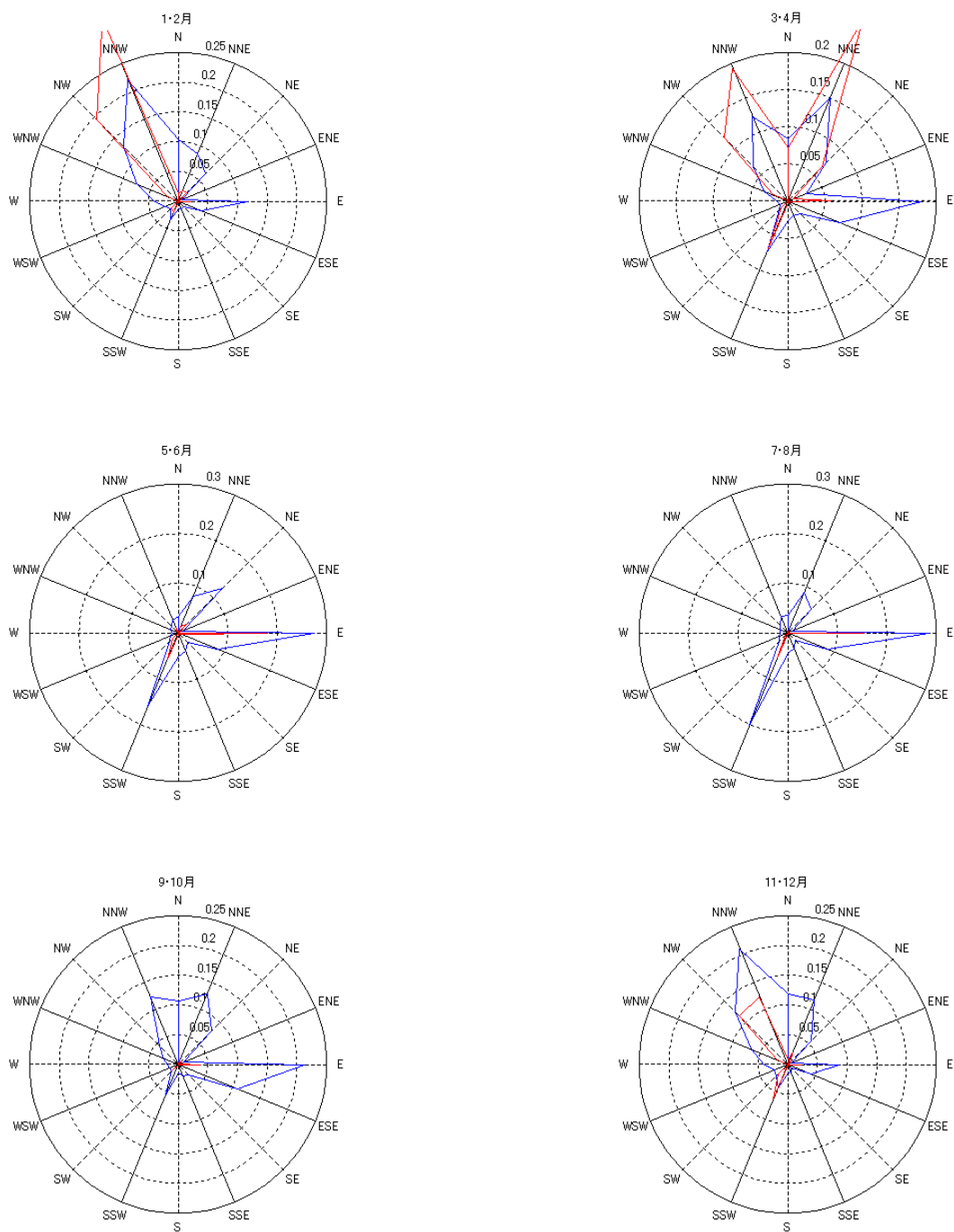


図 2.2.5 P3_20m 月毎の風配図 観測期間：2008年3月17日～2009年3月17日

・ 観測地点：P4 生命棟屋上

青線：全風速データ 赤線：5m/s 以上の風速データ

注：P4 に関しては 5m/s 以上の風速データのスケールはそのままである。

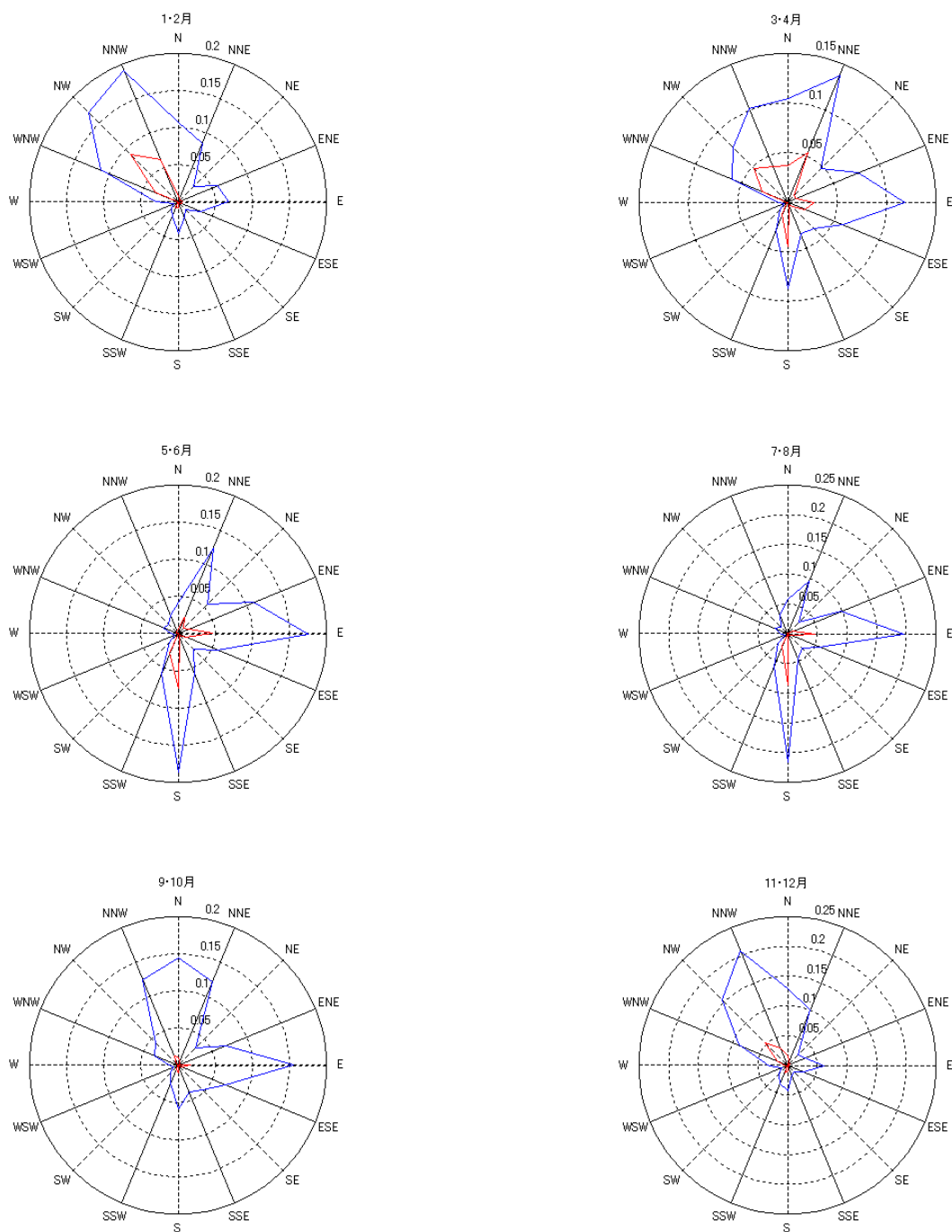


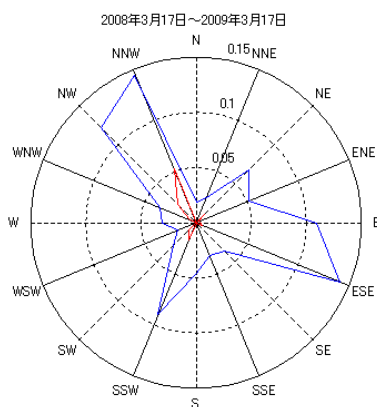
図 2.2.6 P4 月毎の風配図 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

- 観測地点：P1 正門横 P2 どんぐり保育園横 P3_10m P3_20m 基盤棟裏 テニスコート横 P4 生命棟屋上

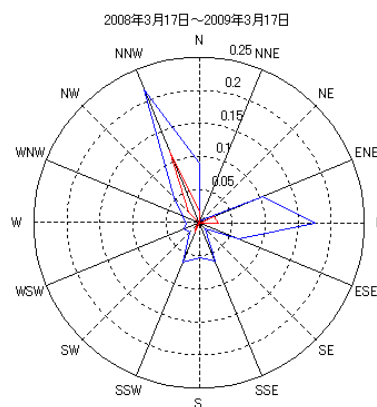
青線：全風速データ 赤線：5m/s 以上の風速（スケール5倍）

注：P4 に関しては 5m/s 以上の風速データのスケールはそのままである。

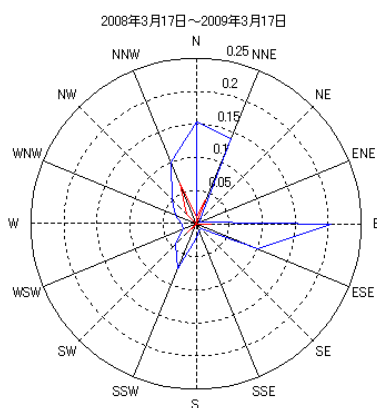
P1 正門横 年間データ



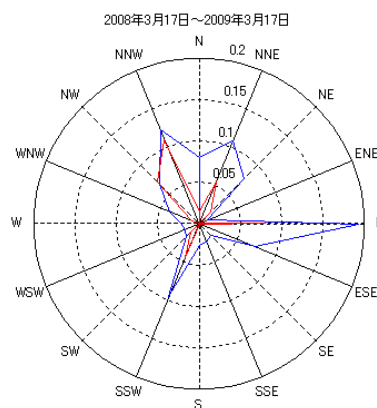
P2 どんぐり保育園横 年間データ



P3_10m 基盤棟裏 テニスコート横 P4 年間データ



P3_20m 基盤棟裏 テニスコート横 P4 年間データ



P4 生命棟屋上 年間データ

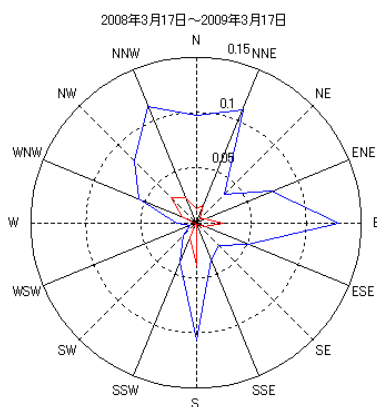


図 2.2.7 P1, P2, P3, P4 年間の風配図 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

2.2.2 風速特性（風速超過確率）

2008年3月17日～2009年3月17日に観測されたデータを基に、P1からP4の風速特性を検証する。検証手法は、月・年毎に整理された10分間平均風速超過確率を用いた。また、年間データによる平均風速超過確率については、月毎の検証の後に行うものとする。以下に解析結果を示す。

観測地点：P1 正門横

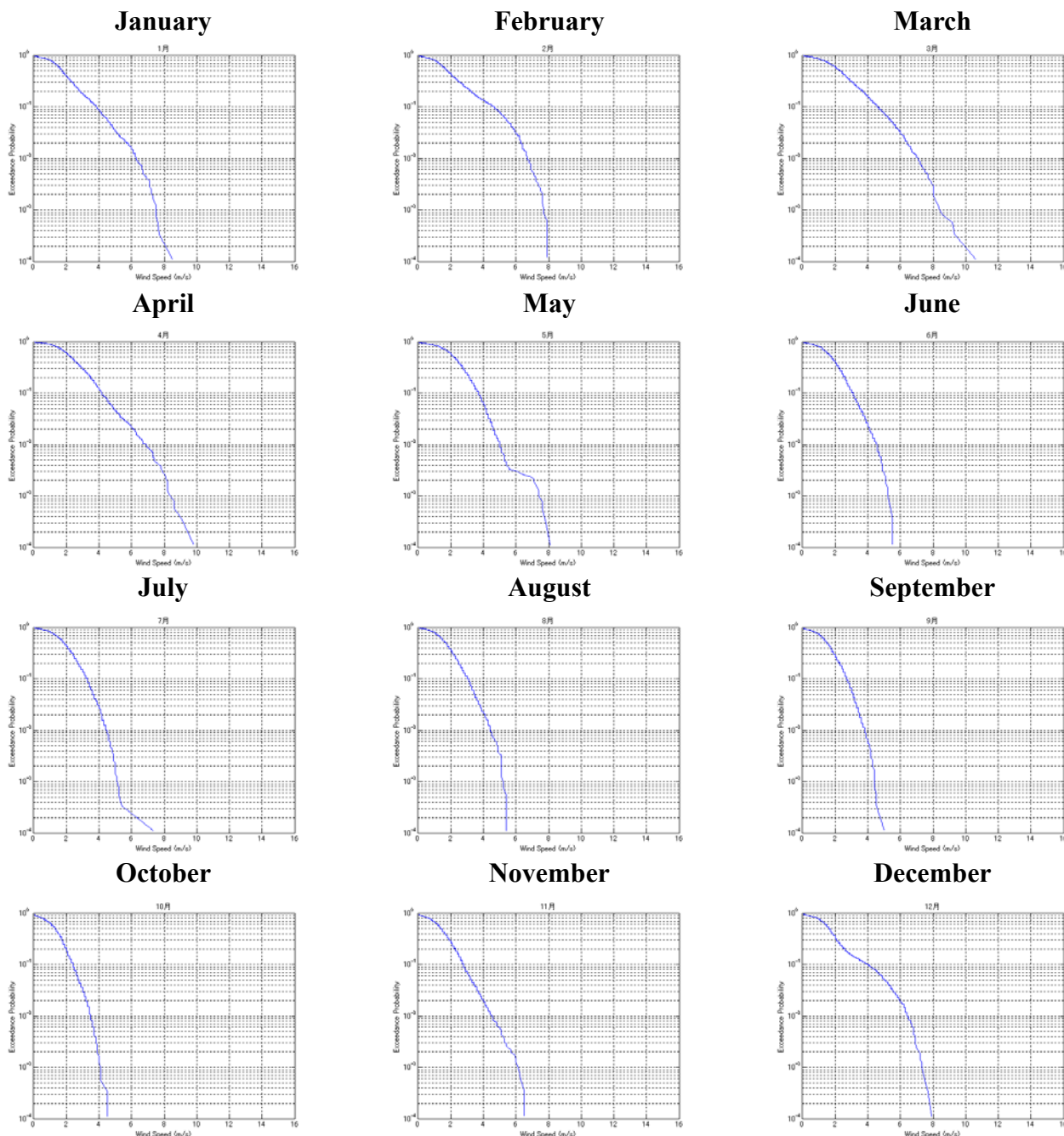


図 2.2.8 P1 月毎の平均風速超過確率 観測期間：2008年3月17日～2009年3月17日

観測地点：P2 どんぐり保育園横

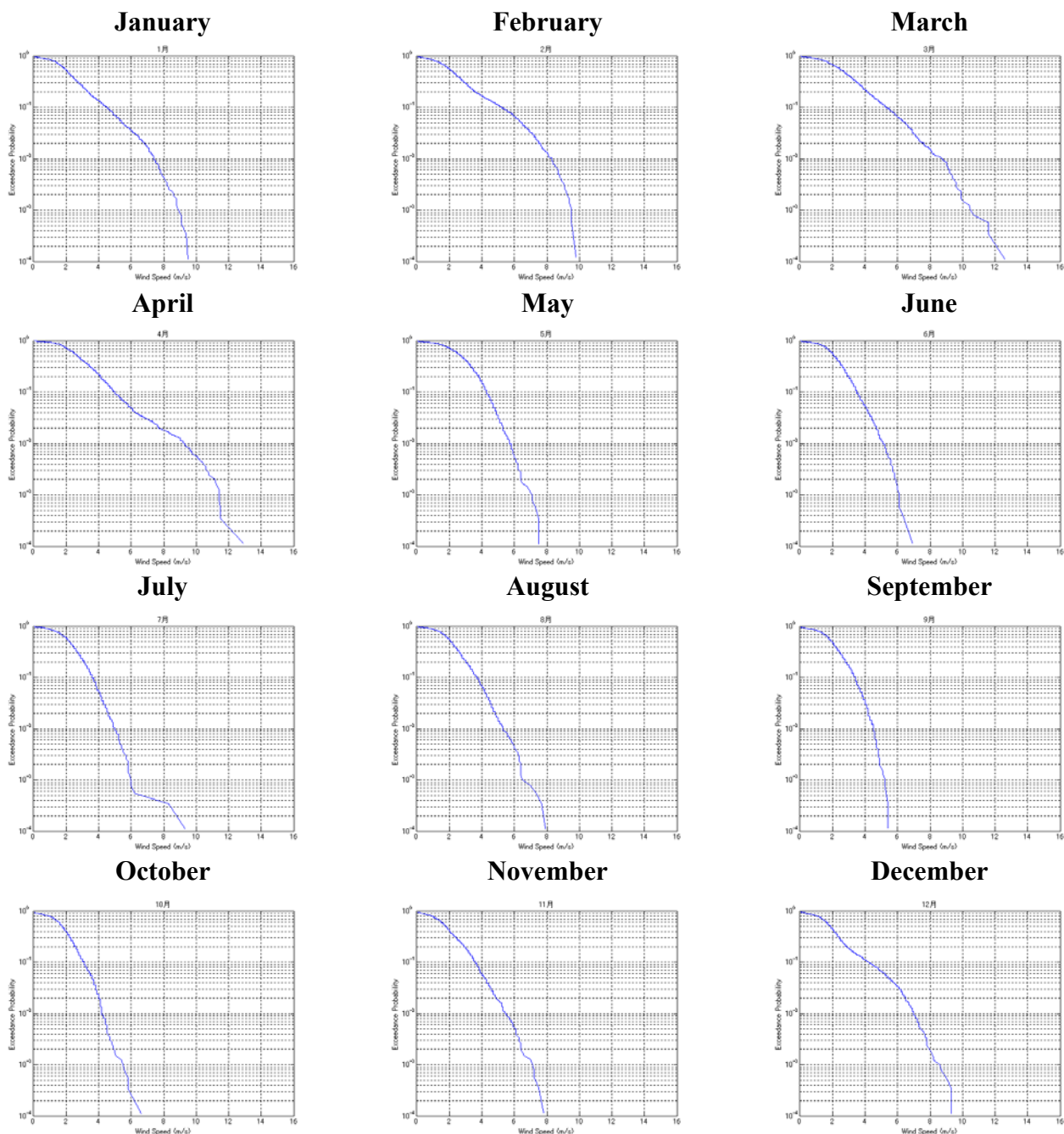


図 2.2.9 P2 月毎の平均風速超過確率 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

観測地点：P3_10m 20m 基盤棟裏 テニスコート横

青線：P3_10m 赤線：P3_20m

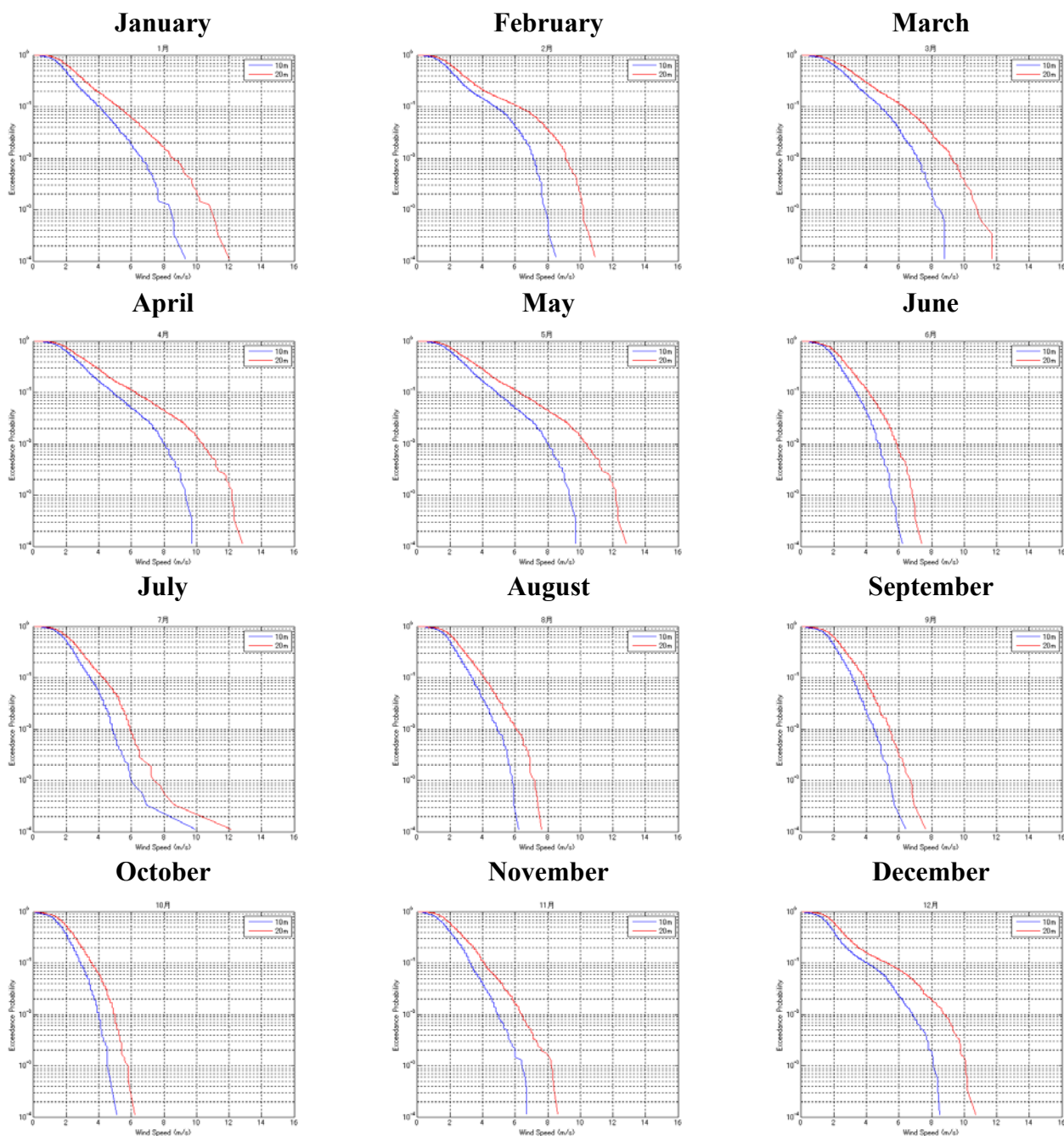


図 2.2.10 P3_10 20m 月毎の平均風速超過確率 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

観測地点：P4 生命棟屋上

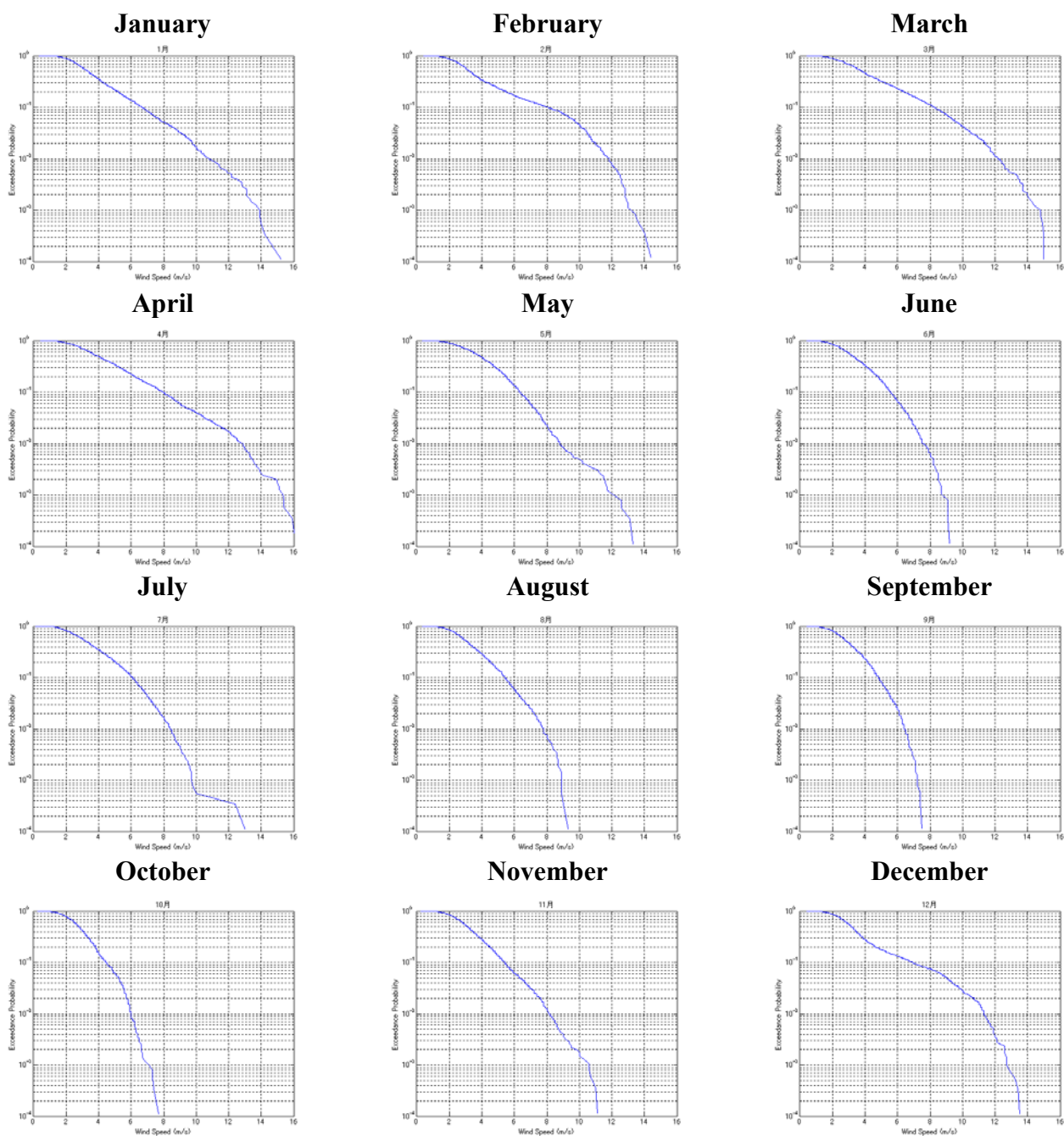


図 2.2.11 P4 月毎の平均風速超過確率 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

- 観測地点：P1 正門横 P2 どんぐり保育園横 P3_10m P3_20m 基盤棟裏 テニスコート横 P4 生命棟屋上

注：P3 に関しては青線：P3_10m 赤線：P3_20m

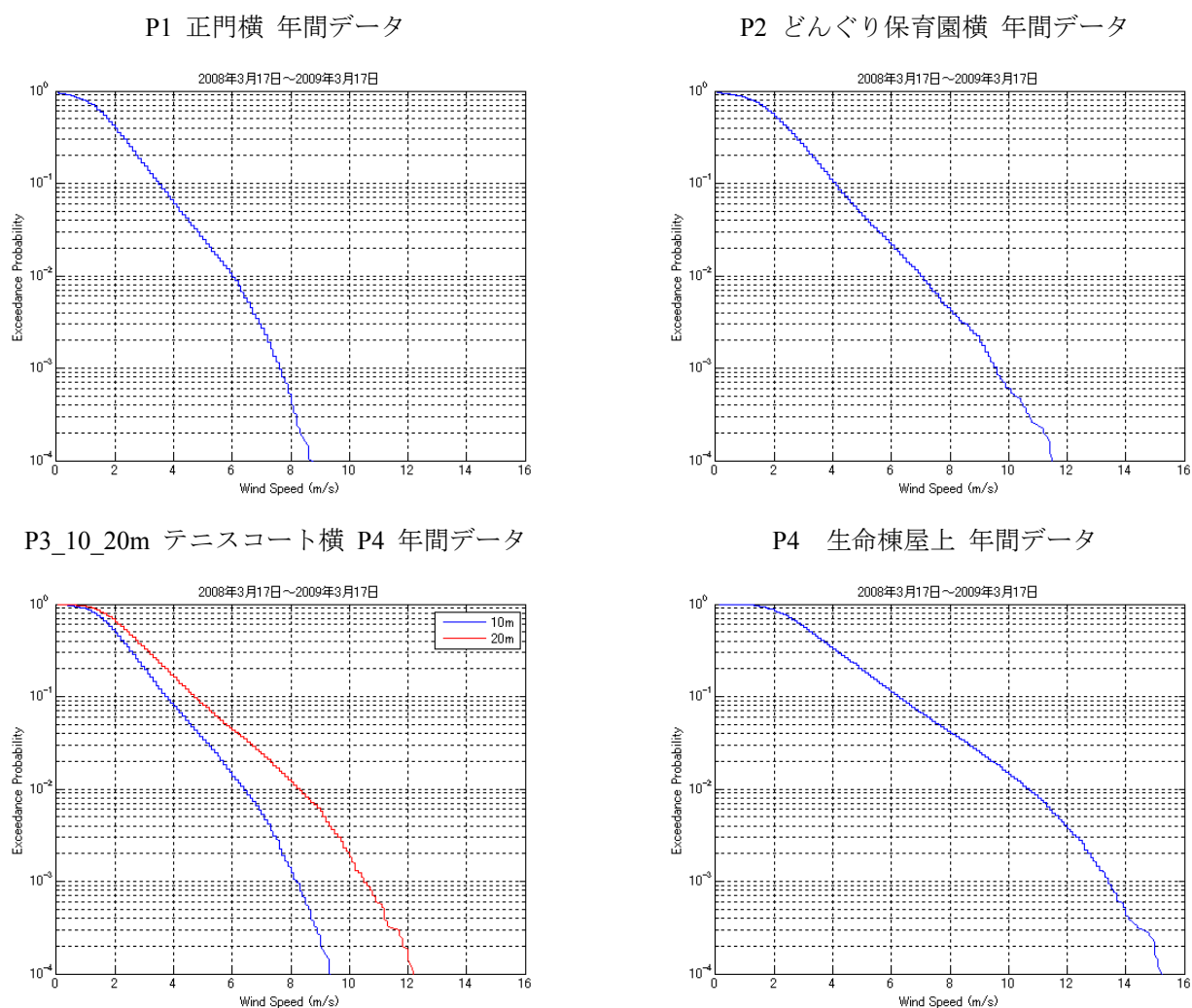


図 2.2.12 P1, P2, P3, P4 年間の平均風速超過確率 観測期間：2008 年 3 月 17 日～2009 年 3 月 17 日

2.3 柏キャンパスで過去に観測された台風データについて

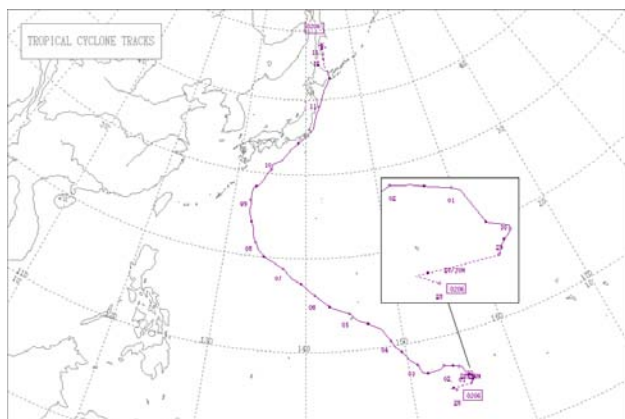
本節では、過去柏キャンパスで記録された台風データ内に含まれる非定常風について、その存在を把握すると共に、次章からの解析に適したデータを検出する事を目的にデータの整理と検証を行う。なお、本研究ではP1からP4で成る観測機のうち、2秒間毎にデータアウトプットが可能なP3,P4データを使用した。柏キャンパスにおけるデータ観測開始期間は2001年からである。ただし、生命棟屋上に設置されたP4に関しては、2002年から観測が開始されている。また、2秒データは10分間平均風速が5m/sを超えた時に観測を開始し、5m/sを下回った時に観測を終了する。一部データの欠損に伴い、全ての台風データについて網羅する事は出来なかったが、過去柏キャンパスを通過、もしくは大きな影響を及ぼしたと思われる以下7つの台風データについて風速・風向データ・乱れの強さを検証する。なお、比較のため、春一番観測時のデータについても記載する。

2.3.1 過去観測された台風データ進路図

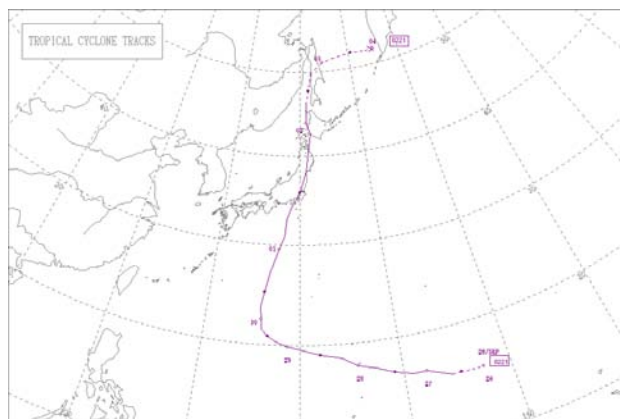
2001年から2009年の間で観測された台風データ進路図を示す。また、本研究で用いたデータは以下に計7つである

- ・ 2002. 7. 10－11 台風6号（0206号）
- ・ 2002. 10. 1－2 台風21号（0221号）
- ・ 2003. 8. 9－10 台風10号（0310号）
- ・ 2004. 6. 19－22 台風6号（0406号）
- ・ 2004. 9. 29－30 台風21号（0421号）
- ・ 2004. 10. 9 台風22号（台風0422号）
- ・ 2009. 10. 8 台風18号（0918号）

2002. 7. 10－11 台風6号（0206号）



2002. 10. 1－2 台風21号（0221号）



2003. 8. 9－10 台風10号（0310号）

2004. 6. 19－22 台風6号（0406号）

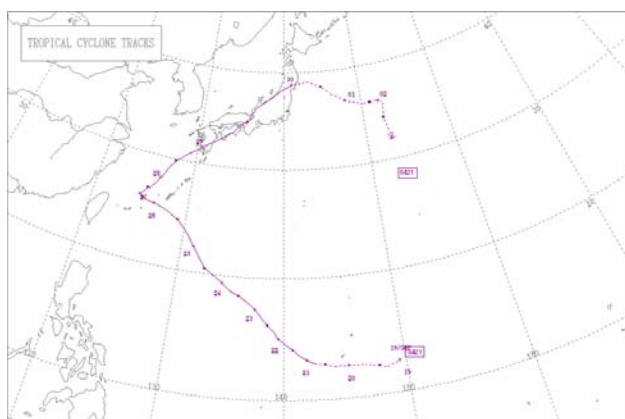
図 2.3.1 柏キャンパス台風観測データ 台風進路図（i） *気象庁ホームページより



2004. 9. 29 - 30 台風 21 号 (0421 号)



2004. 10. 9 台風 22 号 (台風 0422 号)



2009. 10. 8 台風 18 号 (0918 号)

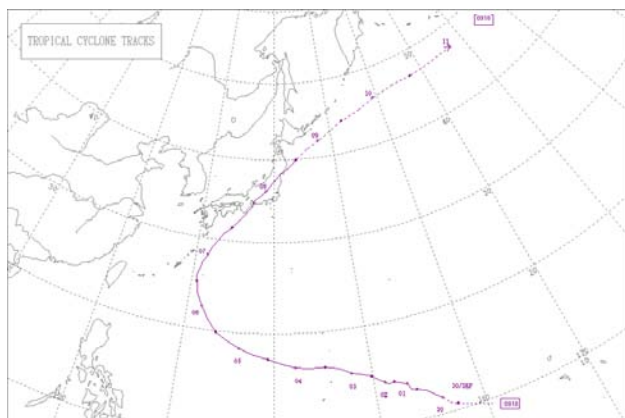
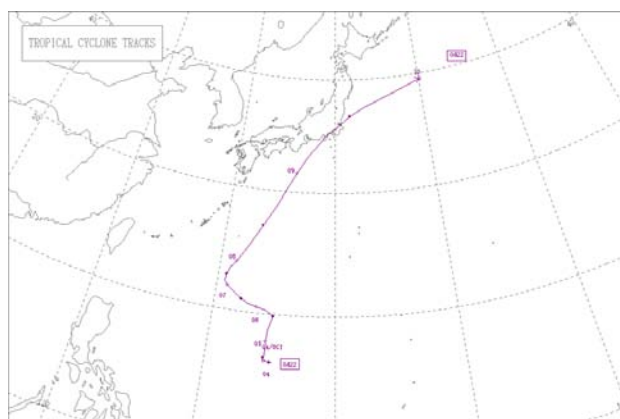


図 2.3.2 柏キャンパス過去台風観測データ 台風進路図 (ii) *気象庁ホームページより

参考データ : 2008. 2. 23 季節風 (東京地方春一番観測日)

2.3.2 各台風データ風特性概要

・ 2002. 7. 10 - 11 台風6号 (0206号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

2秒データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、11日 1:50 - 3:50, 11日 1:40 - 4:20 である。観測データは以下に、

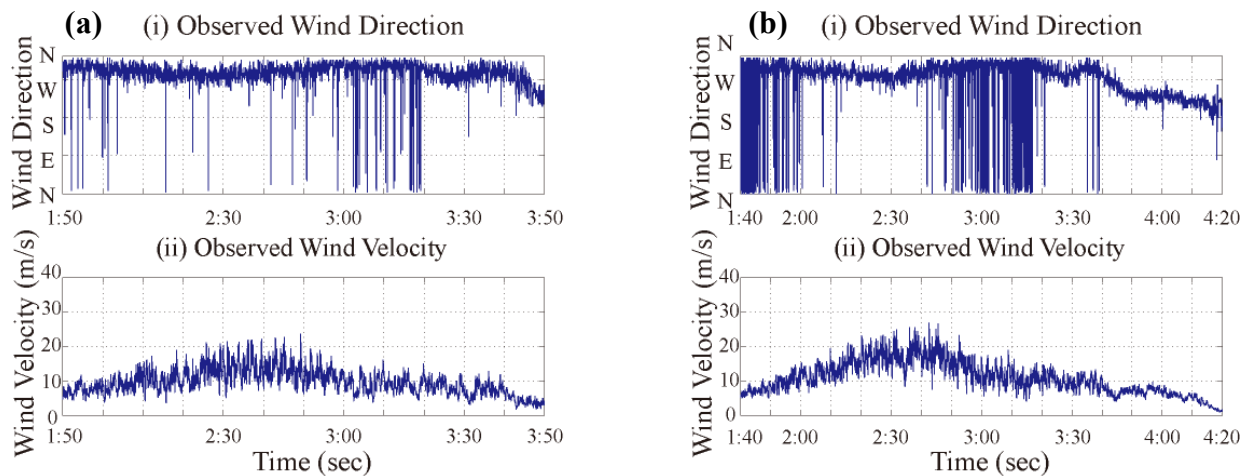


図 2.3.3 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

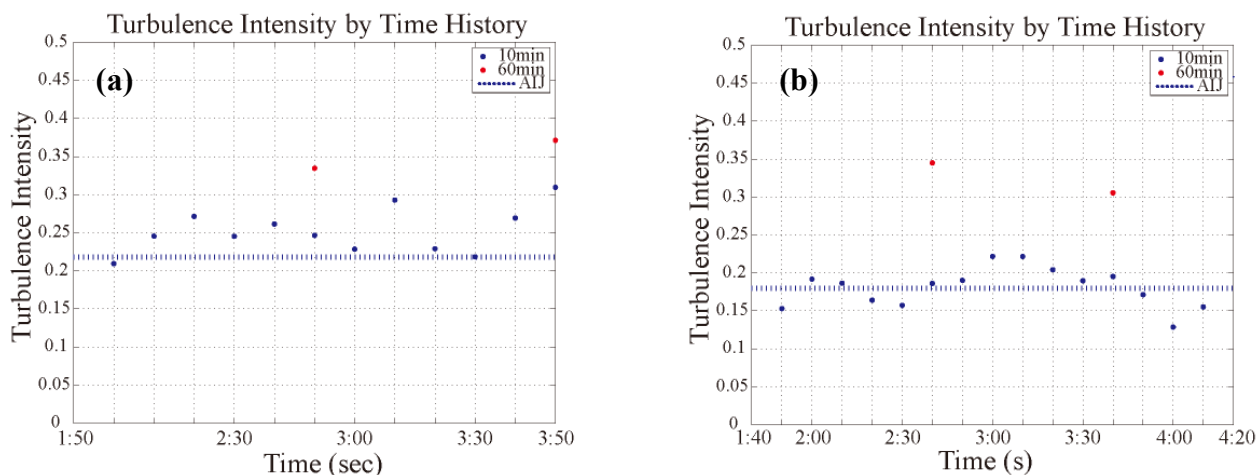


図 2.3.4 時刻歴乱れ強さ (a) P3_20m (b) P4_43m

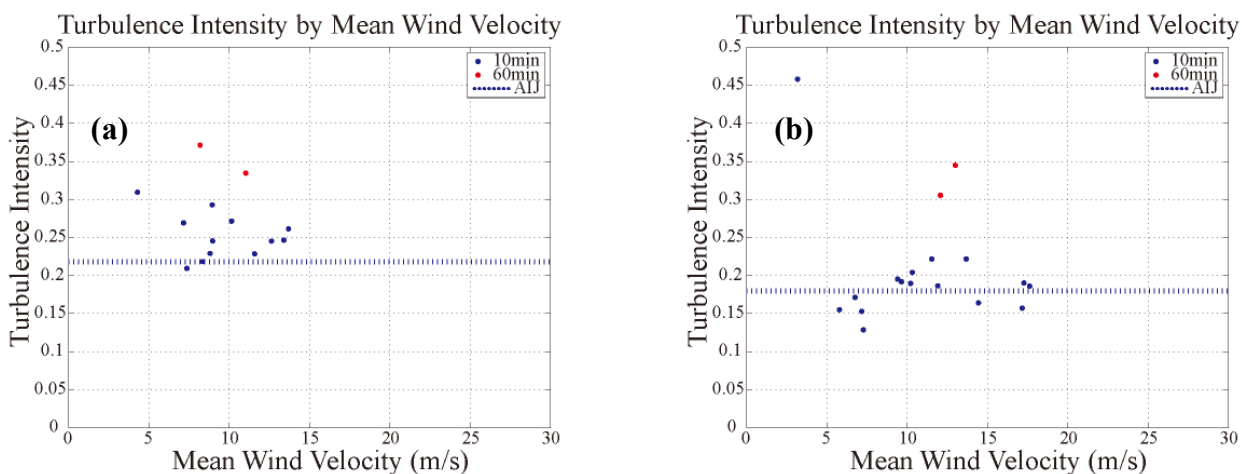
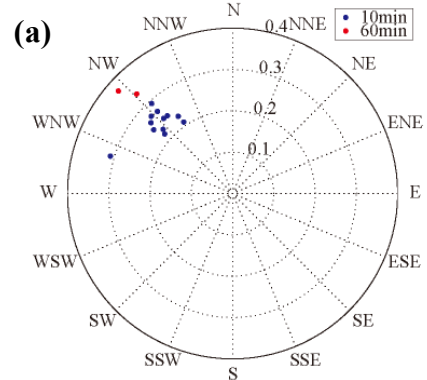


図 2.3.5 平均風速別乱れ強さ (a) P3_20m (b) P4_43m

Turbulence Intensity by Wind Direction



Turbulence Intensity by Wind Direction

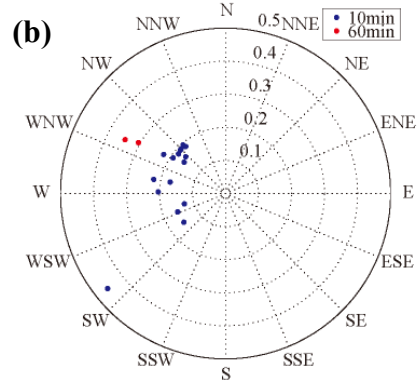


図 2.3.6 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2002. 10. 1 - 2 台風 21 号 (0221 号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

2 秒データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、1 日 21:10 - 2 日 3:00, 1 日 21:20 - 2 日 0:40 である。観測データは以下に、

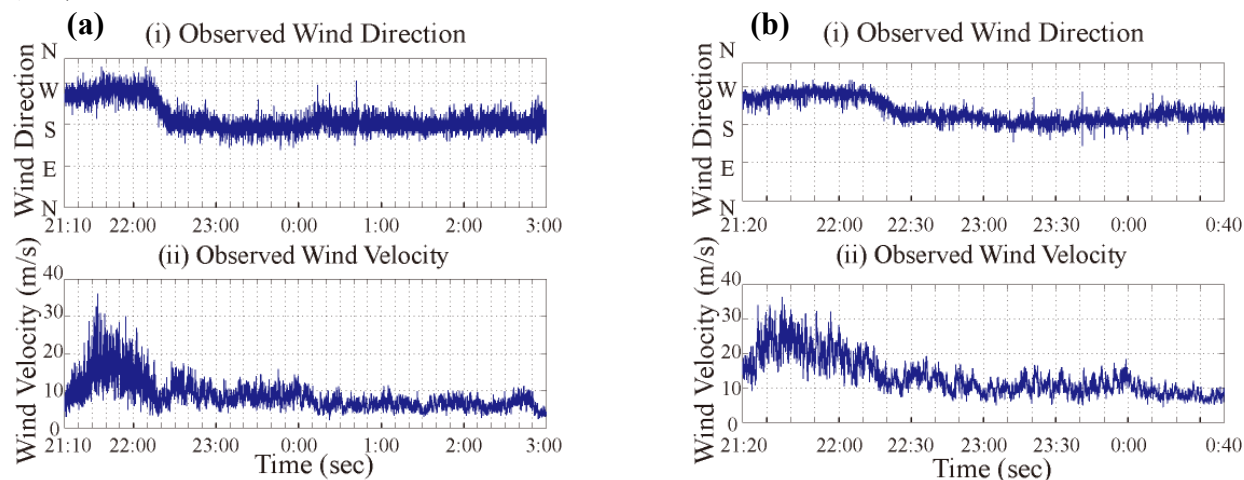


図 2.3.7 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

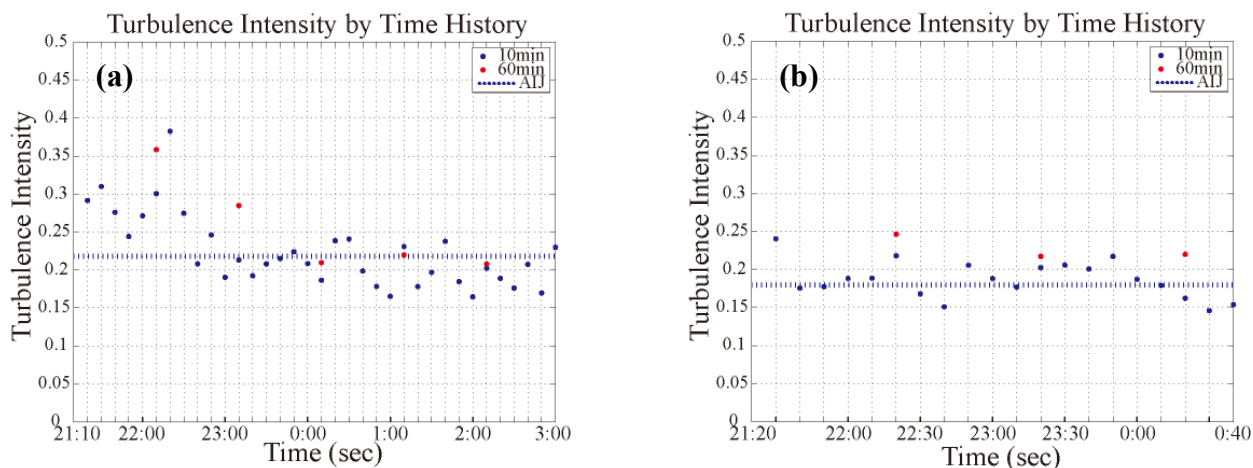


図 2.3.8 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

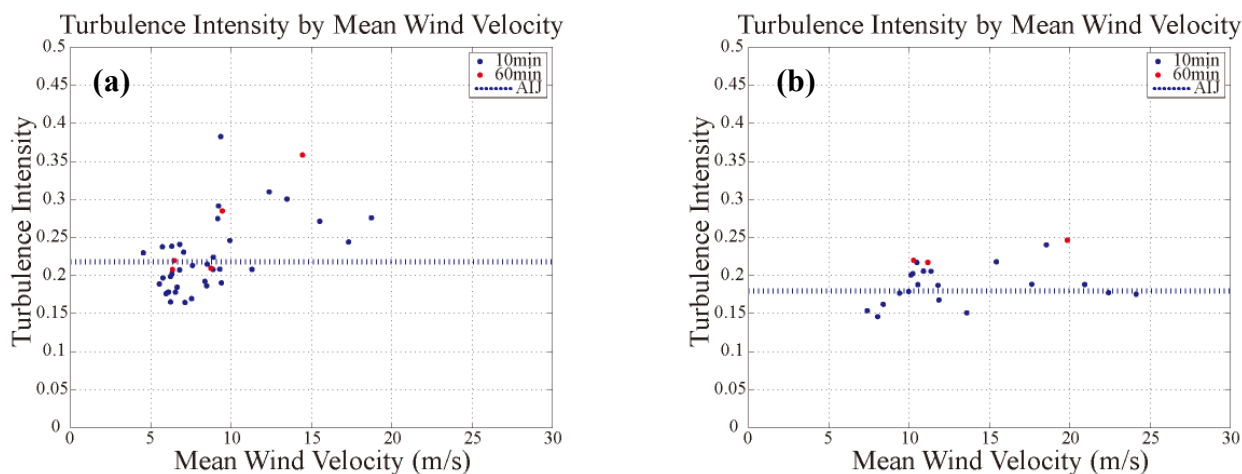
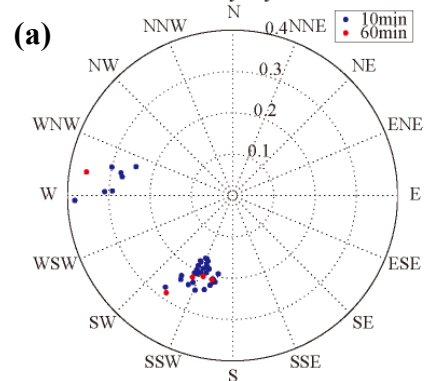


図 2.3.9 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

Turbulence Intensity by Wind Direction



Turbulence Intensity by Wind Direction

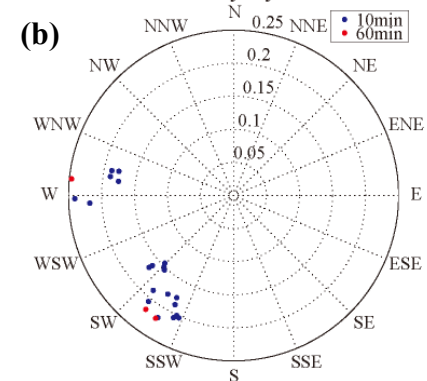


図 2.3.10 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2003. 8. 9 - 10 台風10号 (0310号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、9日 7:10 - 22:00, 9日 4:20 - 10日 0:20 である。観測データは以下に、

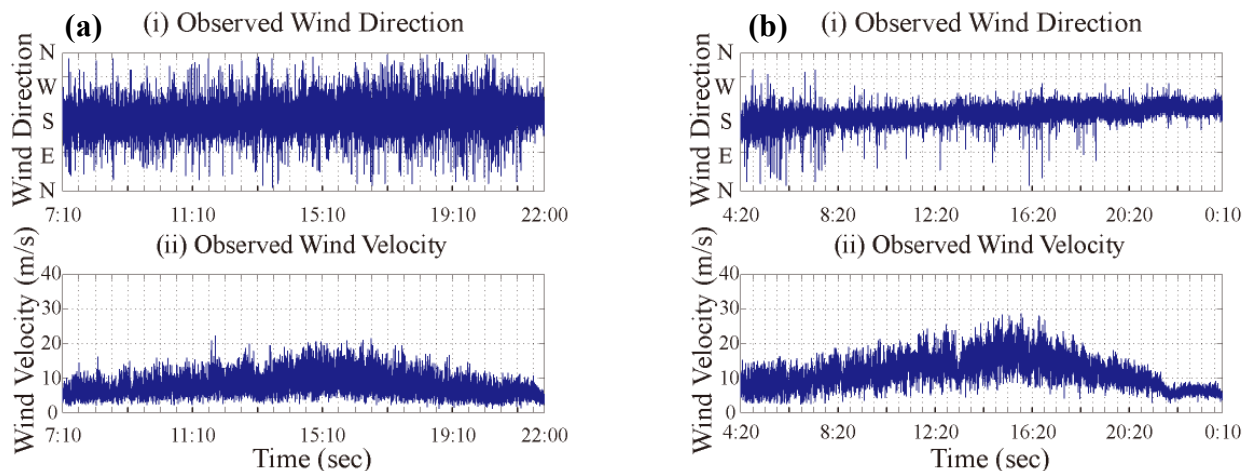


図 2.3.11 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

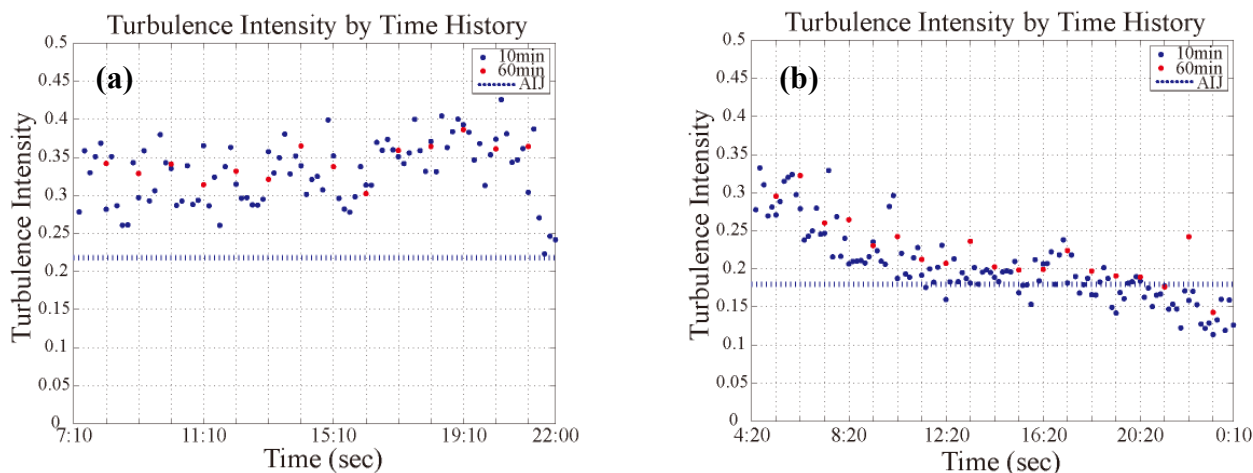


図 2.3.12 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

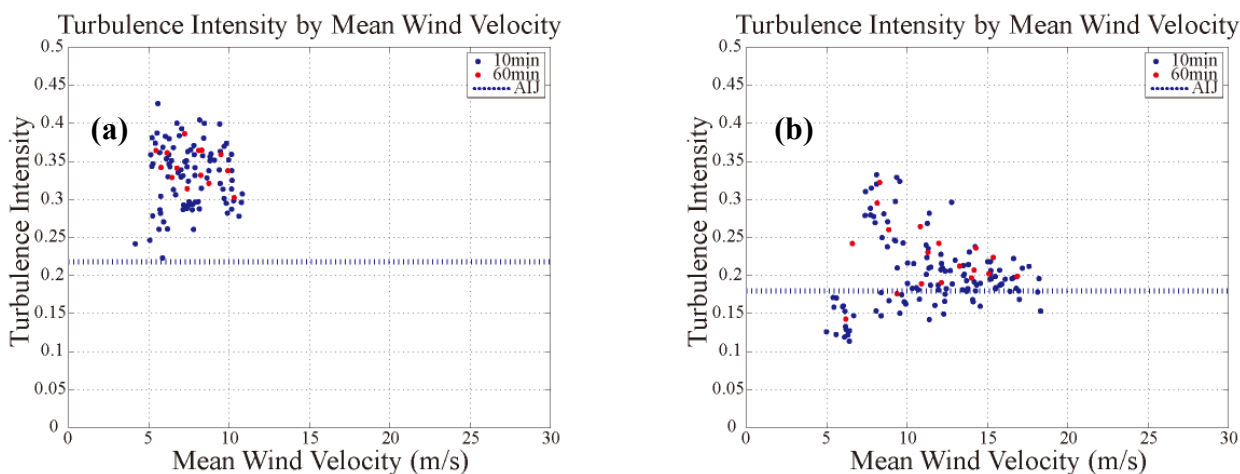


図 2.3.13 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

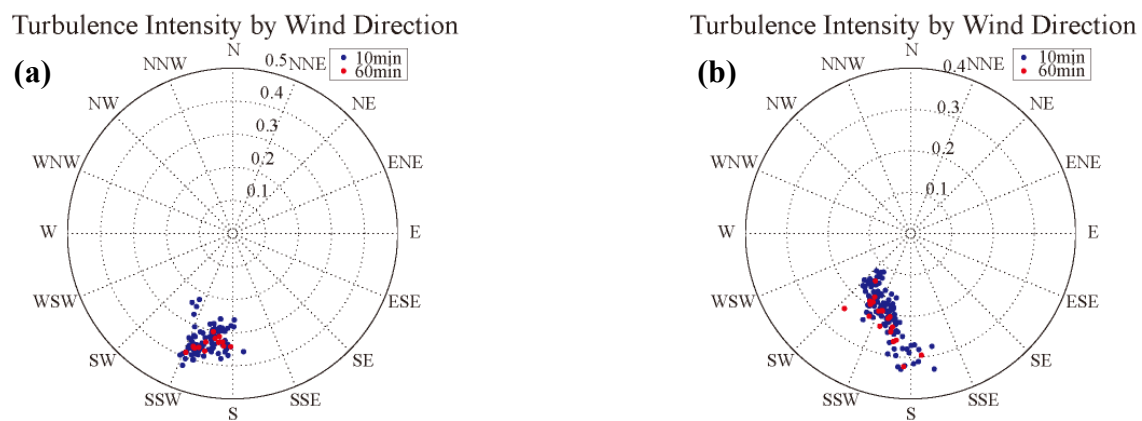


図 2.3.14 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2004. 6. 19 - 22 台風6号 (0406号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、19 日 7:00 - 20:20, 19 日 8:10 - 22 日 17:00 である。観測データは以下に、

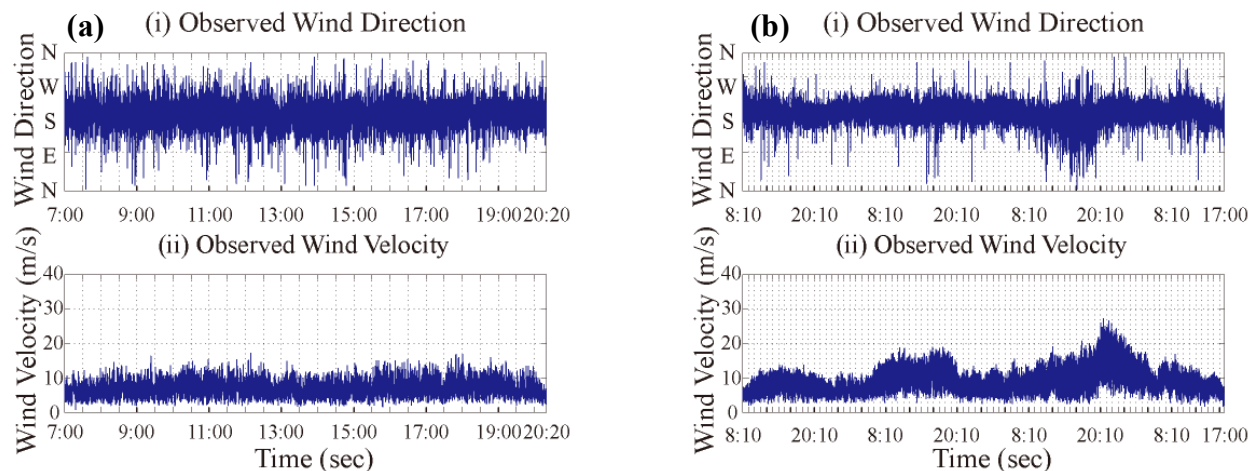


図 2.3.15 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にとまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

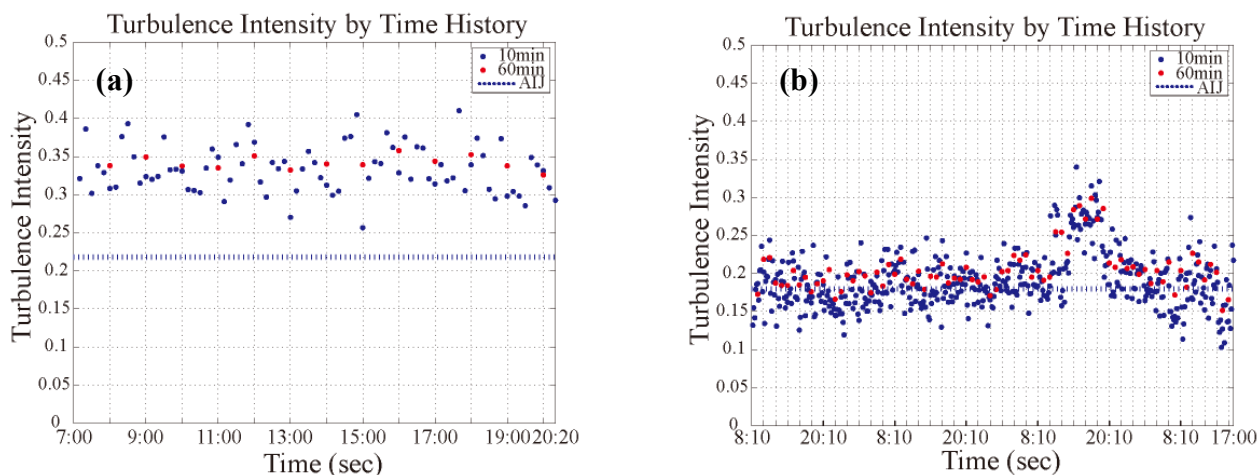


図 2.3.16 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

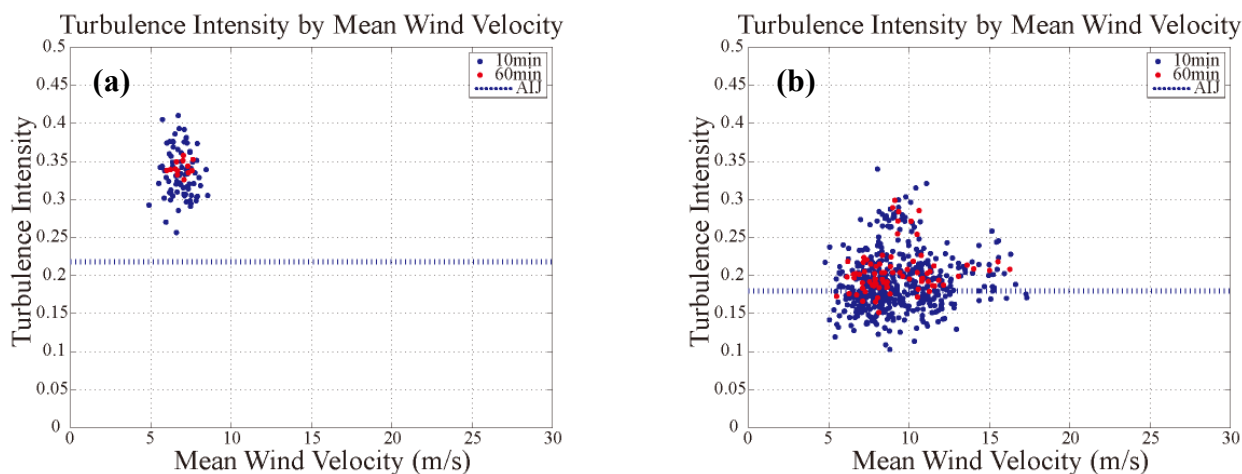
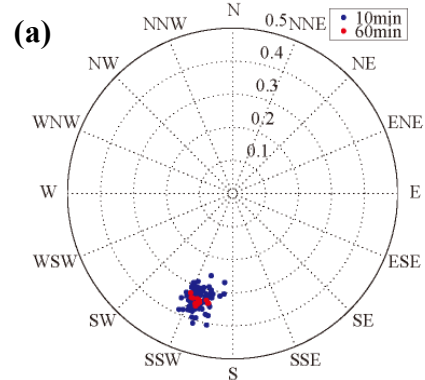


図 2.3.17 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

Turbulence Intensity by Wind Direction



Turbulence Intensity by Wind Direction

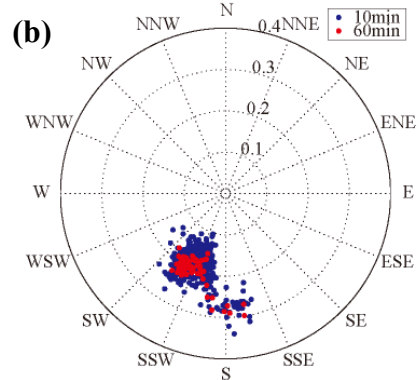


図 2.3.18 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2004. 9. 29 - 30 台風 21 号 (0421 号) P3 20m P4 風向 風速 乱れ強さ観測データ

2 秒データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、29 日 10:40 - 17:00, 29 日 3:30 - 19:10 である。観測データは以下に、

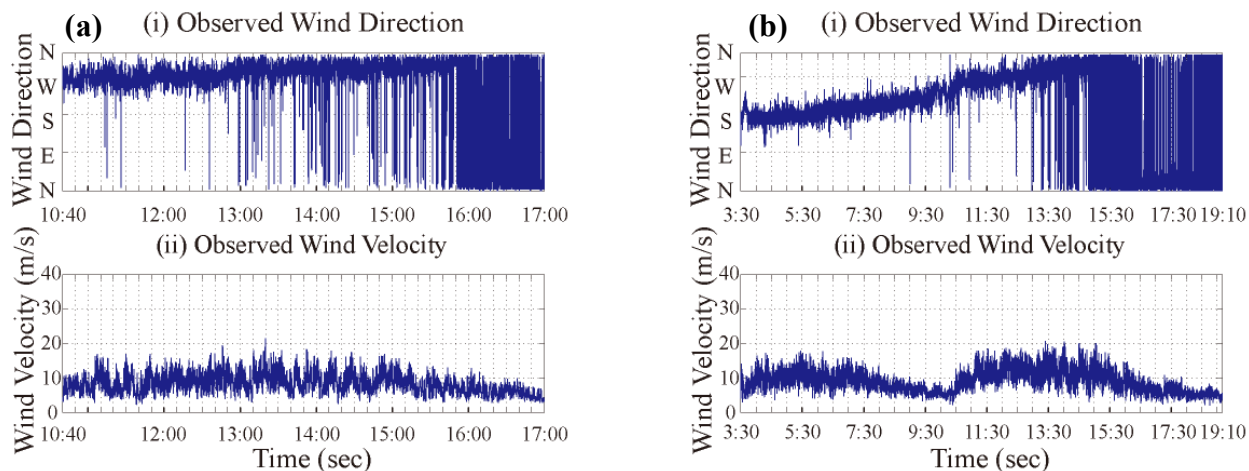


図 2.3.19 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にとまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

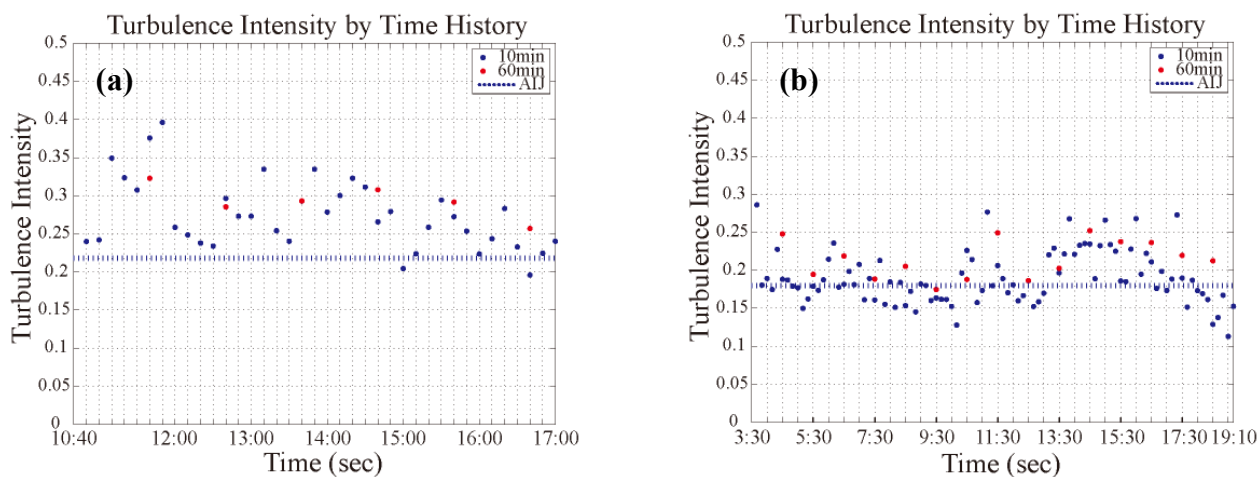


図 2.3.20 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

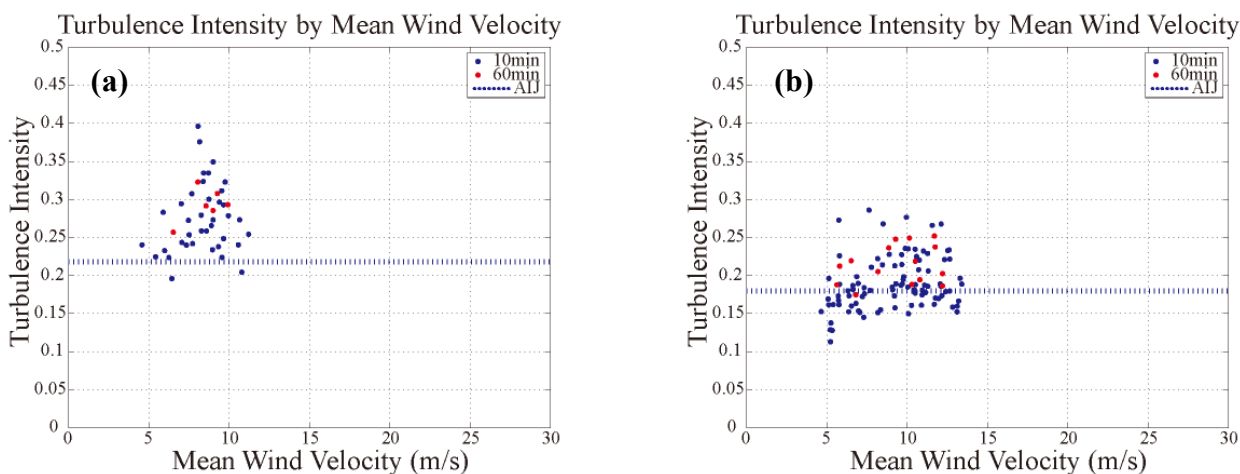


図 2.3.21 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

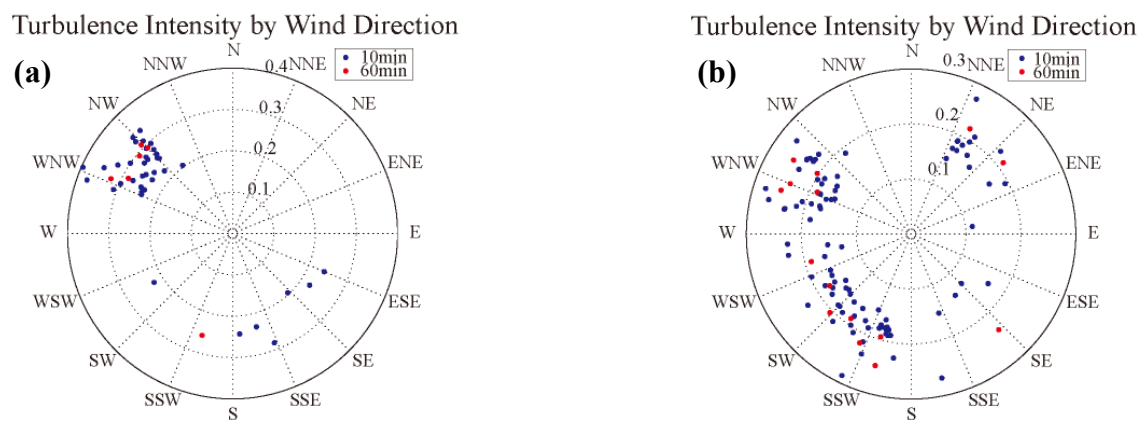


図 2.3.22 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2004. 10.9 台風 22 号 (0422 号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

2 秒データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、9 日 14:20 – 20:30, 9 日 13:50 – 20:40 である。観測データは以下に、

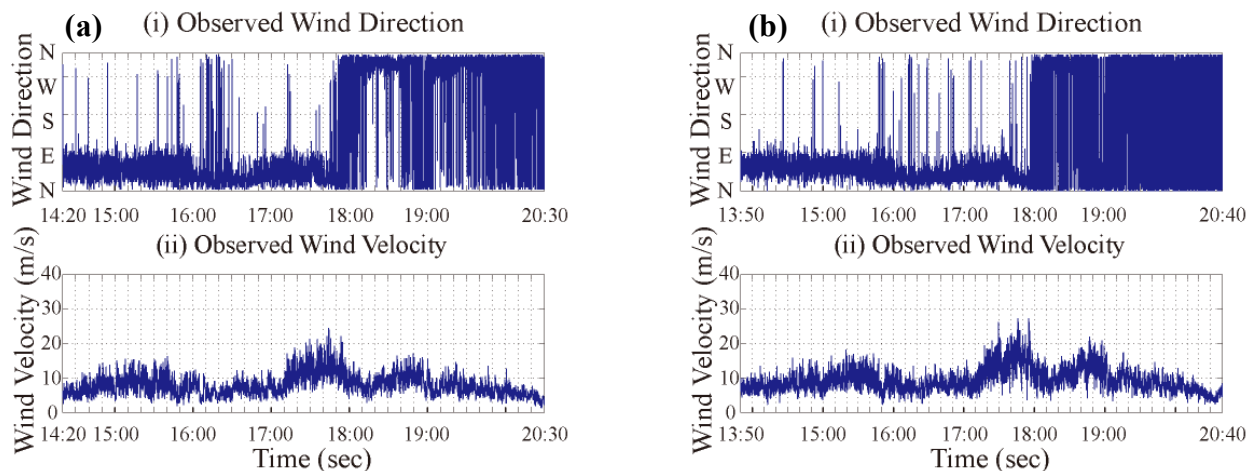


図 2.3.23 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

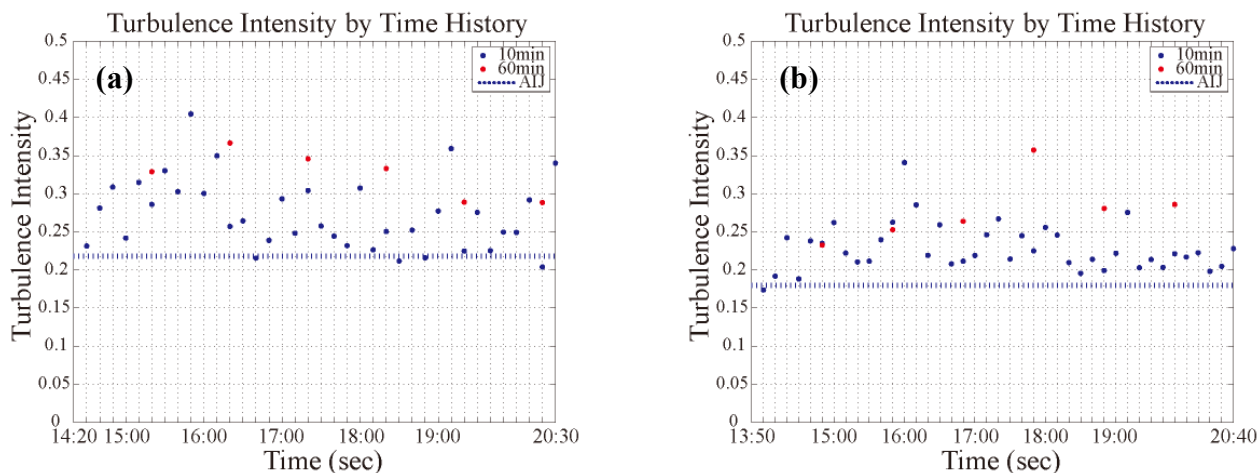


図 2.3.24 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

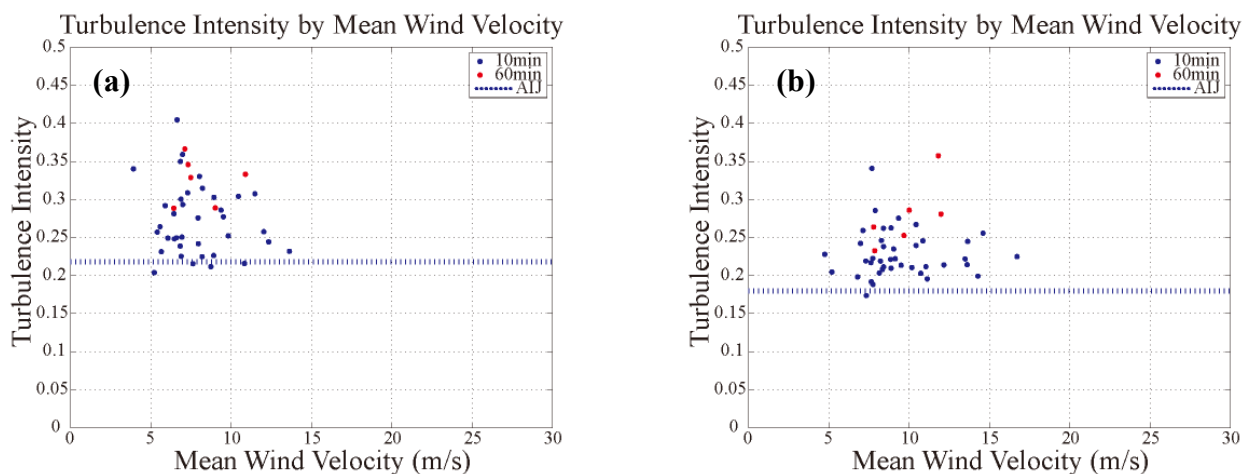
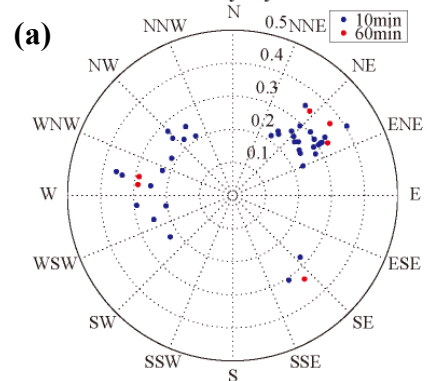


図 2.3.25 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

Turbulence Intensity by Wind Direction



Turbulence Intensity by Wind Direction

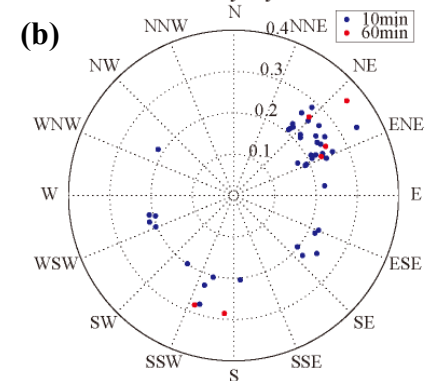


図 2.3.26 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2009. 10. 8 台風 18 号 (0918 号) P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ観測データ

2 秒データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、8 日 8:10 – 15:00, 8 日 7:30 – 1:20 である。観測データは以下に、

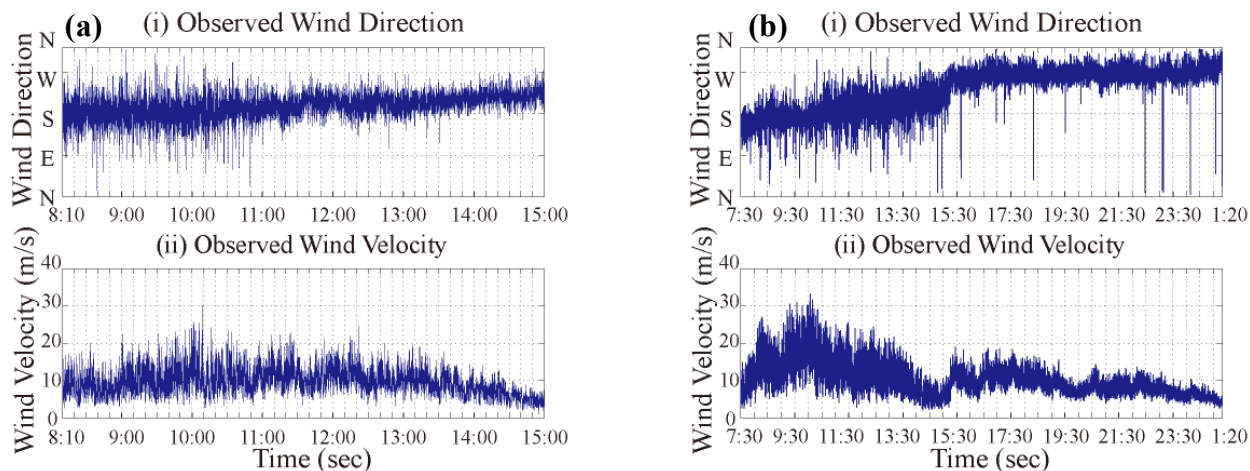


図 2.3.27 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にとまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

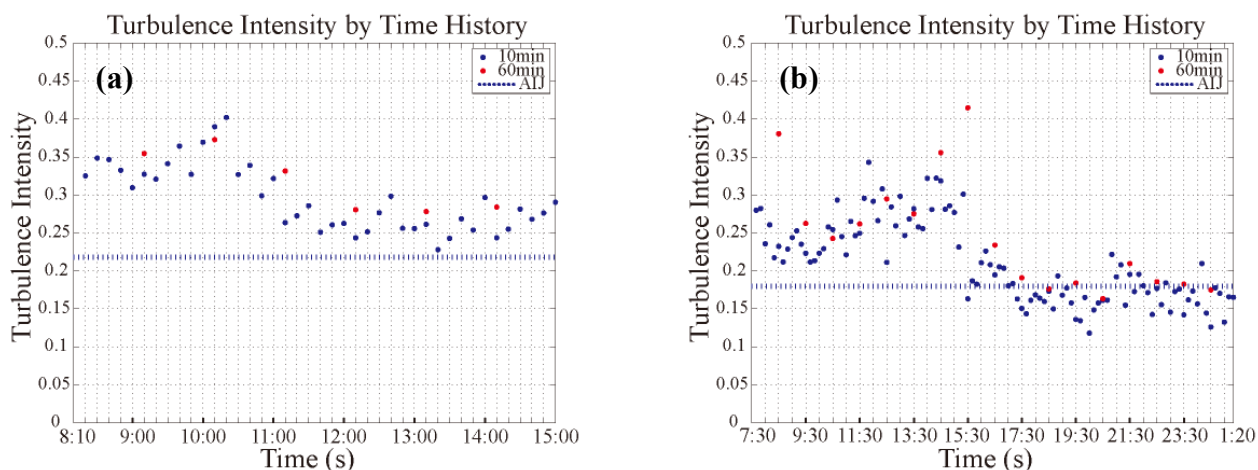


図 2.3.28 時刻歴乱れ強さ (a) P3_20m (b) P4_43m

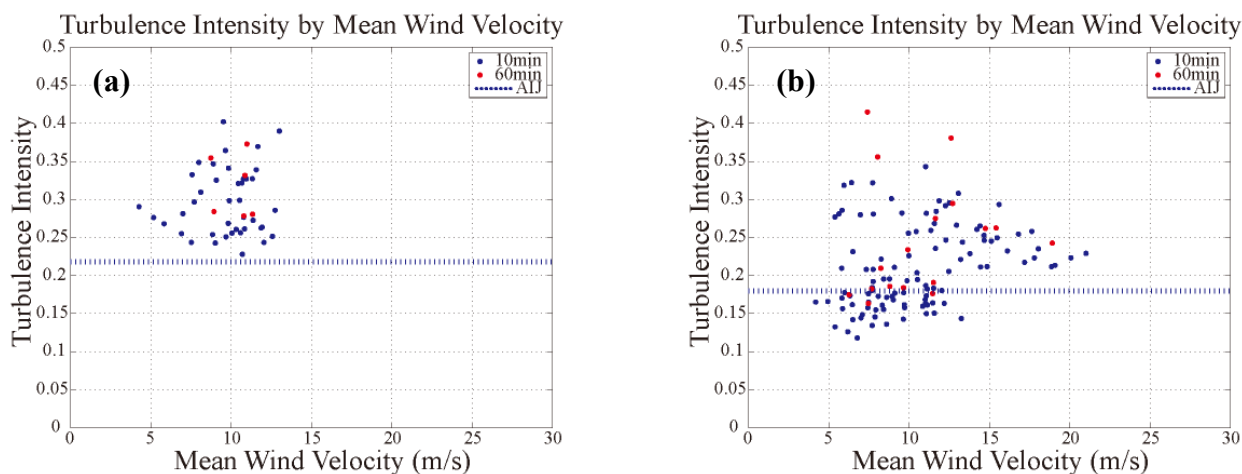


図 2.3.29 平均風速別乱れ強さ (a) P3_20m (b) P4_43m

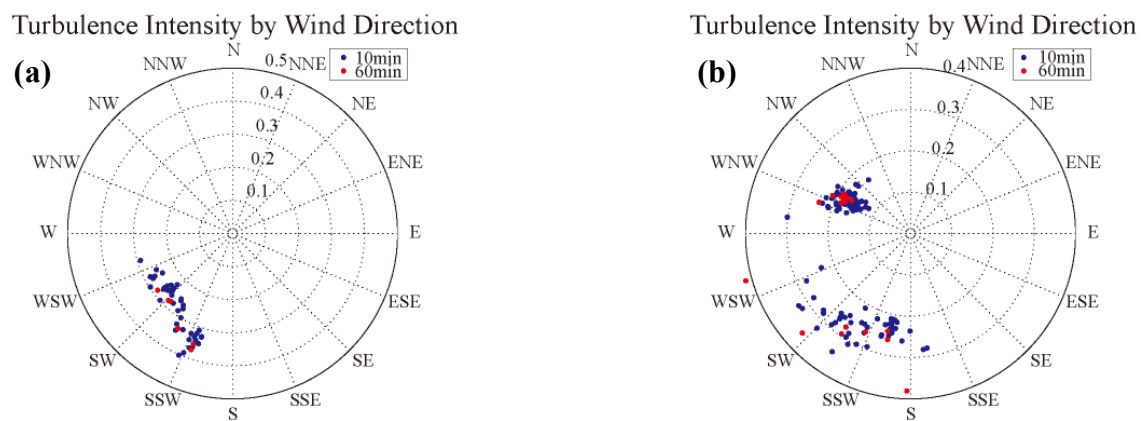


図 2.3.30 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

・ 2008. 2. 23 季節風（東京地方春一番観測日） P3 20m P4 43m 風向 風速 乱れ強さ

データ観測時間は、P3, P4 それぞれ、23 日 13:50 – 22:10, 23 日 13:50 – 22:20 である。観測データは以下に、

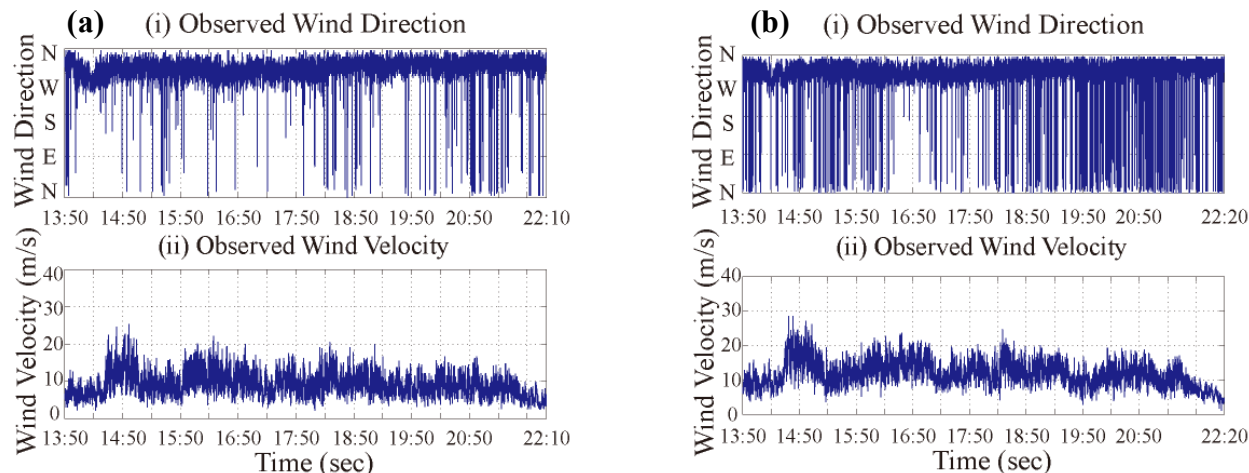


図 2.3.31 台風観測データ (a) P3_20m (b) P4_43m

となる。風速乱れ強さは、時刻歴、平均風速、風向別にとまとめたものを以下に示す。また参考値として、図中に青線で荷重指針による理論値を併記した。

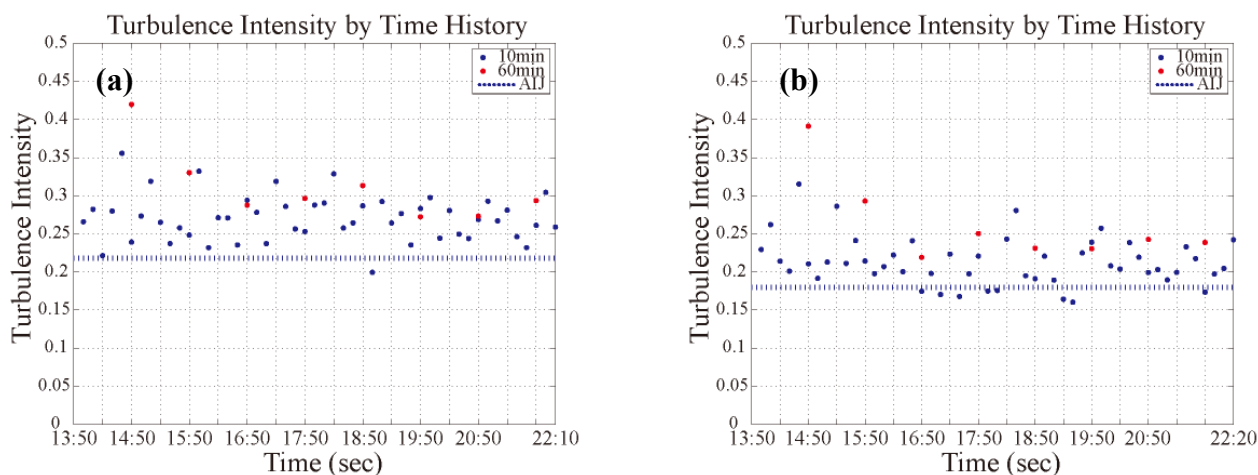


図 2.3.32 時刻歴乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

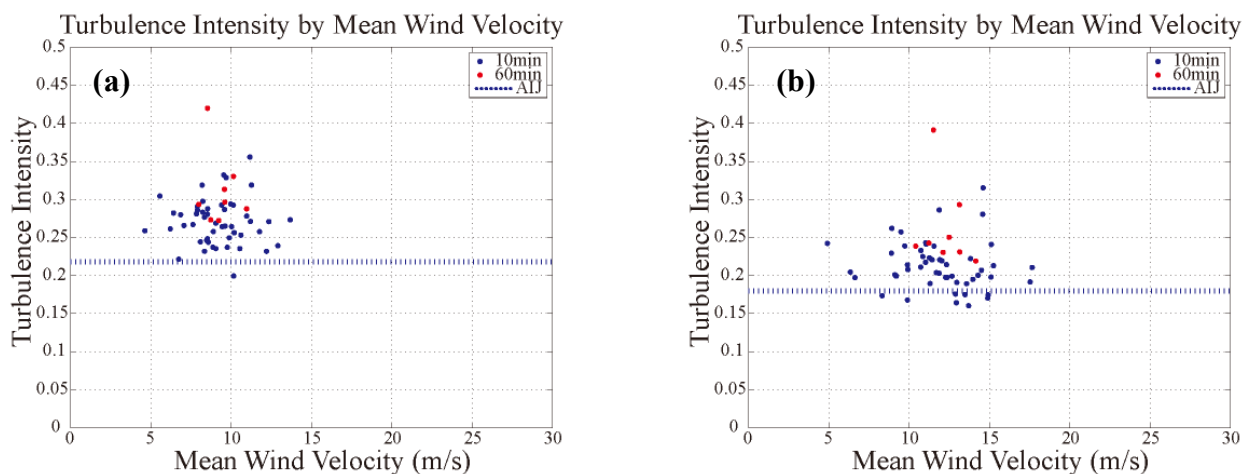


図 2.3.33 平均風速別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

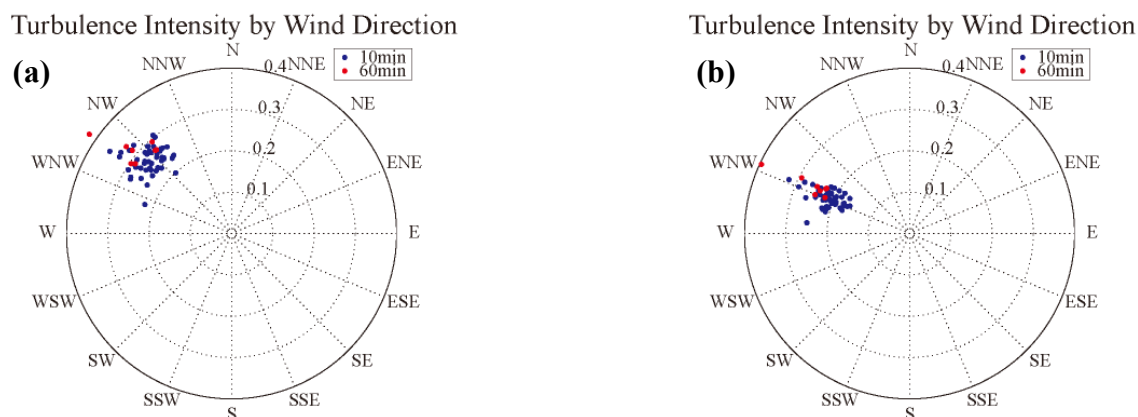


図 2.3.34 平均風向別乱れ強さ (a) P3 20m (b) P4_43m

2.4 まとめ

柏キャンパス風観測データについてまとめる。

・ 風向特性について

P1 から P4 における風向特性は発生頻度に若干の違いはあるものの概ね同様である。卓越風向についても、季節毎に異なる傾向が伺える。

・ 風速特性について

月毎、観測地点により風速超過確率は異なるが、どの観測機でも、3 月、4 月に平均風速発生確率が高くなる事が確認できる。ただし、本解析期間中に台風は一度も関東地方を上陸する事がなかったため、8 月、9 月、10 月の超過確率は他の年に比べ低いものと思われる。また、周辺の建物の影響を受けにくく、観測機設置個所の高い P4 で最も大きい風速超過確率を観測する事が可能である。

・ 非定常風データ特性について

過去柏キャンパスにて記録された台風データを用い以下の知見を得た。

- ①風向は常に安定した状態を保つ訳ではなく、瞬間的に変化する場合、なだらかに変化する場合がある。なお、風向変化中の乱れ強さは安定時に比べやや高めになる傾向がある。
- ②風速は比較的短い時間（10 分間程度）でも瞬間的には 20m/s を超えた変動をする。また、そのような場合、従来の 10 分間一定平均風速から変動成分を求める手法では、平均風速が高いために理論値に収束しやすいに関わらず、乱れ強さが荷重指針理論値より高くなる。（例：0221 号 P3, 0422 号 P4, 0918 号 P4）しかし、他のケースについては、平均風速が高くなるにつれて定常確率過程による理論値に収束していく様子が伺える。また、10 分程度の比較的短い風速変動とは別に、1 時間を超える大きく長い風速変動も観測データから確認できる。このような場合、風速乱れ強さは荷重指針理論値に比べ高くなる傾向にあった。（例：0406 号 P4, 0918 号 P4）

以上のことから、柏キャンパスで観測される風向・風速データの概要を検証し、本研究の主目的である台風による非定常性の存在についても観測データから確認が出来た。次章では、本章で得られた台風データの中から、風速の強い非定常性、特に 10 分程度と比較的短い時間帯で非定常性が確認できる 0221 号データ及び、長時間に渡って非定常な変動が続く 0918 号データを用いた検証を行う。

第3章

非定常風評価への新たな風モデル導入と風特性評価及び性能検証

3 非定常風評価への新たな風モデル導入と風評価及び性能検証

本章では、第2章で得られた非定常風データについて、従来行われてきた定常風モデルとは異なった風速モデルの提案を行う。この背景には、10分間という評価時間の中でも風速の平均成分は時々刻々と変化しており、必ずしも一定平均風速をとる事が妥当であるとは限らない、事が挙げられる。このことは結果として、風速データから平均成分を引く事で得られる風速変動成分によるスペクトル推定精度に繋がる問題となり、引いては周波数領域での最大変位応答予測に影響を与えることが考えられる。よってここでは、新たな風速モデル、①平均風速線形近似モデル、②EMD手法による非定常変動モデル、の2種類を提案しモデルの検証を行う。以下に、各モデルの詳細と検証結果を記述する。

3.1 非定常風評価への新たな風モデル導入について

耐風設計分野における風速のモデル化は、(式 1.1.1) で示す一定平均風速と変動成分で構成される。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad \text{式 1.1.1}$$

\bar{U} : 10分間一定平均風速

$u(t)$: 定常確率過程による風速乱れ成分

この背景には、10分間という評価時間内では急激な風速の変動は起きにくく、一定平均風速とその変動成分を評価する事で概ね風特性評価は可能であると考えられている事、また、(式 1.1.1) に基づく理論展開が容易である事などが挙げられる。しかし、第1章で述べられたように、自然風が持つエルゴード性に裏付けされた(式 1.1.1) 式は、台風やダウンバースト、竜巻といった発生頻度が少なくとも、建物に大きな影響を及ぼす可能性がある現象に対して風特性評価が危険側の評価になる可能性を否定できない。また逆に、現象によっては(式 1.1.1) による評価が過度に安全側に出ている可能性もある。この事は、第2章での台風データの検証においても風速の非定常性として一部のデータで確認でき、実際、設計で問題とされるような500年再現期間値でも、同様の懸念が存在しているものと考えられる。このため、本章では従来の一定平均風速による風速平均成分評価とは異なる、時々刻々と変化する平均風速評価を用いた風速モデルを提案する。具体的には、次節で、風速データに最小二乗法線形近似を適用した線形近似風モデルの提案と検証を行い、第3節にてEMD手法による非定常変動モデルの提案と検証を行う。

3.2 定常風モデルと線形近似風モデルによる風特性評価とその比較

3.2.1 線形近似風モデル導入について

非定常風を適切にモデル化するため、本節では解析対象区間平均値推定に最小二乗法による近似直線を描いた。これは、

- ① 対象区間内における風速平均値の変動は緩やかであり、線形で十分な近似が可能と考えられる。
- ② ①に基づき、従来の一定平均による風特性の評価に比べ、乱れの小さい評価ができる。(風速乱れ成分の標準偏差が小さく評価できる。)

事に基づく。この時、議論の対象とする評価時間は、日本における評価時間10分間と英国における評価時間60分間とする。

検証の手始めとして、次節で最小二乗法による平均成分算出方法と種々の風特性評価手法について再定義を行う。その後台風0221号・0918号データについて本モデルと従来のモデルとの比較を行い、線形近似風モデ

ルの有用性について検証する。

3.2.2 最小二乗法線形近似による平均値推定と風特性評価方法

・ 線形近似風モデル

本項では、最小二乗法による平均値の線形近似を用いた風速変動成分の再評価を行い、線形近似風モデルとしてモデル化する。この時、線形近似風モデル $U(t)$ で用いられる風速ランダム成分 $u'(t)$ は以下のように表わされる。

$$U(t) = \bar{U}(t) + u'(t)$$

$$u'(t) = U(t) - \bar{U}(t) \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3.2.1}$$

式中 $\bar{U}(t)$ は時間変化に依存し、以下のように定義される。

まず初めに、ある観測データ、時間 t 、風速 u を

$$(t, u) = (t_1, u_1), (t_2, u_2), \dots, (t_n, u_n) \quad \text{式 3.2.2}$$

として与えた時、最小二乗法による平均成分は以下のように表される。

$$\bar{U}(t) = at + b \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n$$

$$a = \frac{n \sum_{k=1}^n t_k u_k - \sum_{k=1}^n t_k \sum_{k=1}^n u_k}{n \sum_{k=1}^n t_k^2 - (\sum_{k=1}^n t_k)^2} \quad b = \frac{\sum_{k=1}^n t_k^2 \sum_{k=1}^n u_k^2 - \sum_{k=1}^n t_k u_k \sum_{k=1}^n t_k}{n \sum_{k=1}^n t_k^2 - (\sum_{k=1}^n t_k)^2} \quad \text{式 3.2.3}$$

(図 3.2.1) に (式 3.2.1) 式 3.2.3) より得られる平均成分と観測データの関係を示す。

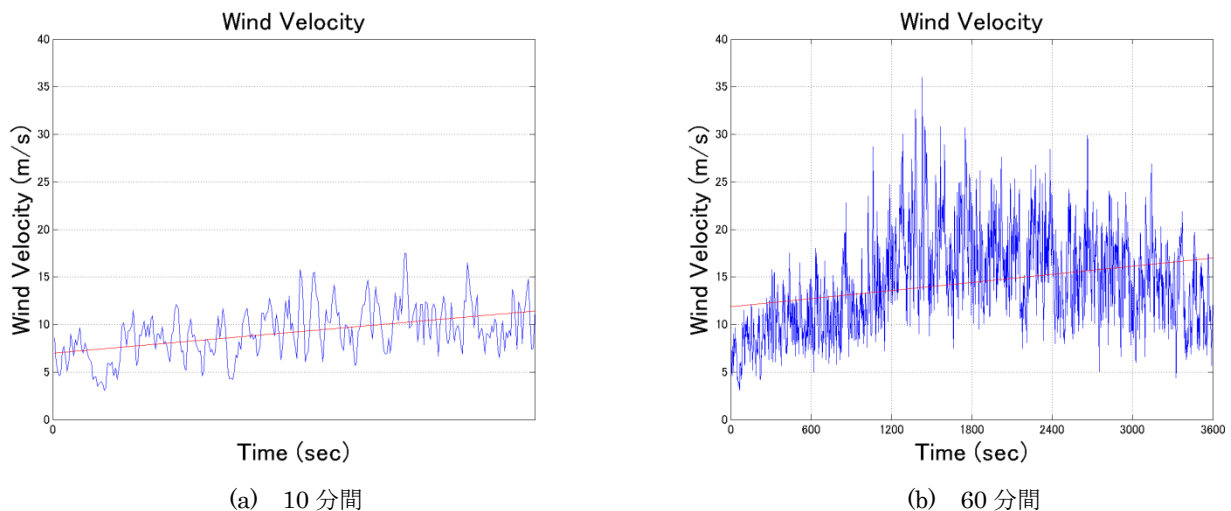


図 3.2.1 最小二乗法線形近似による平均成分と観測データの関係

・ 平均風速・分散・乱れ強さ

(式 3.2.1) に基づき、平均成分による一定平均風速を以下のように定義する。

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \int_0^{t_n} \bar{U}(t) dt \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3.2.4}$$

分散は、

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{n} \int_0^{t_n} (U(t) - \bar{U}(t))^2 dt \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3.2.5}$$

となり、風速乱れ強さは

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad \text{式 3.2.6}$$

となる。

・ 確率密度関数

(式 3.2.1) による風速モデル化に伴い、正規確率密度関数についても再定義を行う。以下に示すと、

$$p(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_u}} e^{-\frac{u'^2}{2\sigma_u^2}} \quad \text{式 3.2.7}$$

となる。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについても、(式 3.2.1) に基づいた再定義を行う。以下に示すと、

$$\frac{f_k S_{u'}(f_k)}{\sigma_{u'}^2} = \frac{4 \frac{L_z}{U_{t_n}} f_k}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{L_z}{U_{t_n}} f_k \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad \text{式 3.2.8}$$

この時、N をデータ数、dt を時間間隔とおくと、

$$L_z = 460 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.5} \quad f_k = \frac{k}{N \cdot dt} \quad k = k_1, k_2, \dots, \frac{N}{2} \quad \text{式 3.2.9}$$

と表せる。

・ ガストファクター

ガストについても同様に再定義を行う。以下に示すと、

$$G = \max \left(\frac{U(t)}{\bar{U}(t)} \right) \quad t = 1, 2, \dots, 3600 \quad \text{式 3.2.10}$$

となる。

3.2.3 台風データへの線形近似風モデル検証と定常風モデルとの比較

- ・ P3 20m 地点 台風 0221 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P3 20m 地点における台風 0221 号観測風速・風向データを示す。

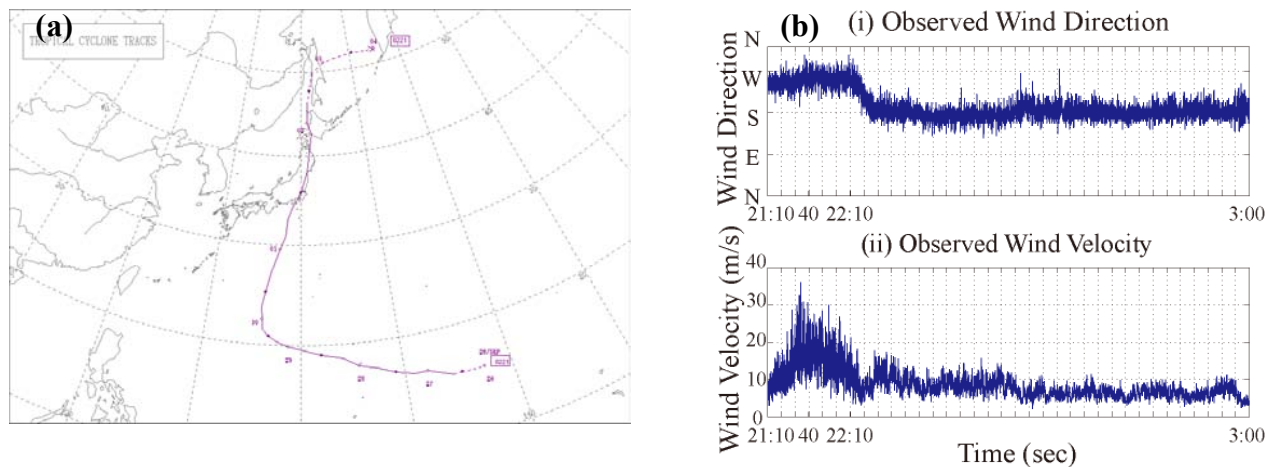


図 3.2.2 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P3 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

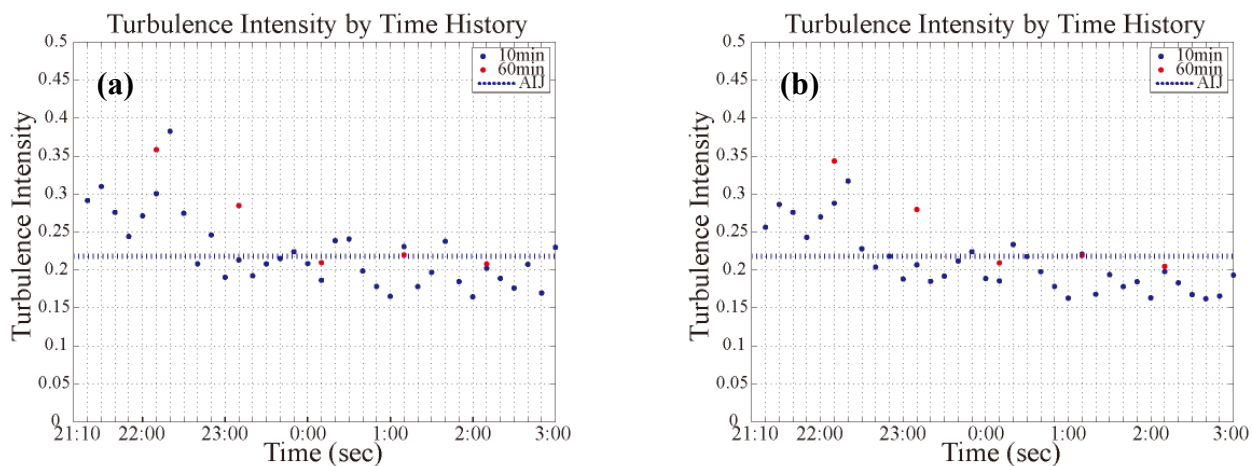


図 3.2.3 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

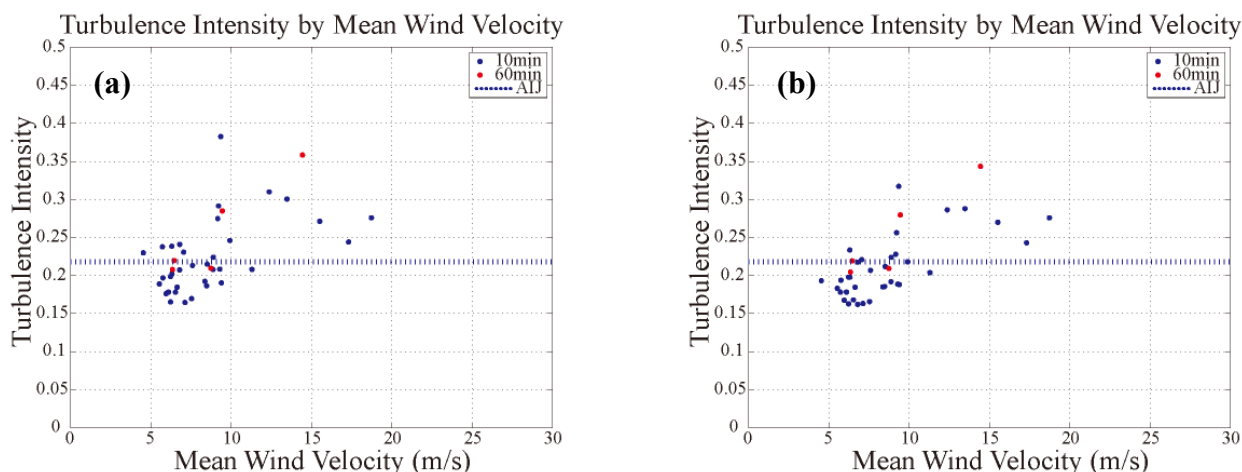


図 3.2.4 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.383

10 分間乱れ強さ最小値：0.165

60 分間乱れ強さ最大値：0.356

60 分間乱れ強さ最小値：0.206

最小二乗法による線形近似風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.317

10 分間乱れ強さ最小値：0.162

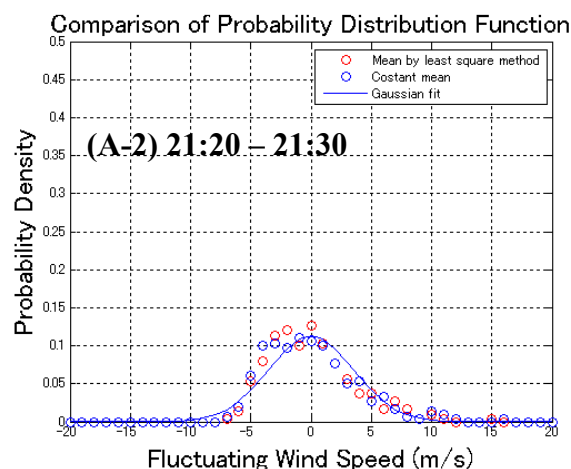
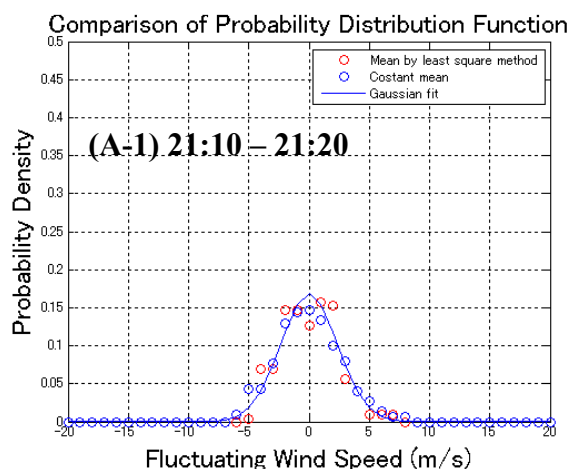
60 分間乱れ強さ最大値：0.344

60 分間乱れ強さ最小値：0.205

表 3.2.1 定常風速モデル・最小二乗法線形近似間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、最小二乗法による線形近似モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



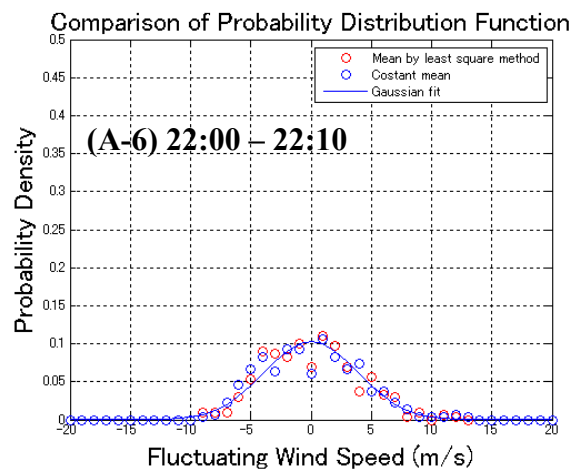
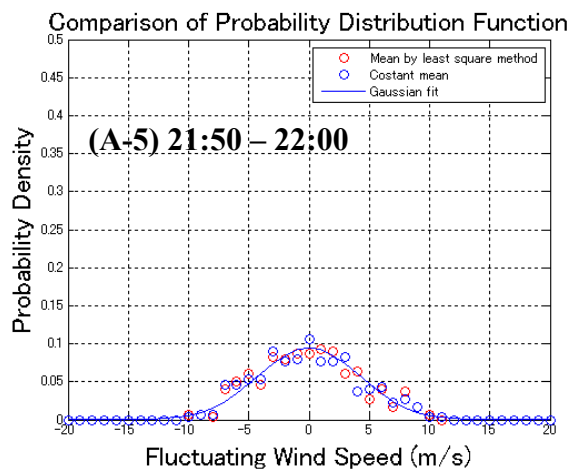
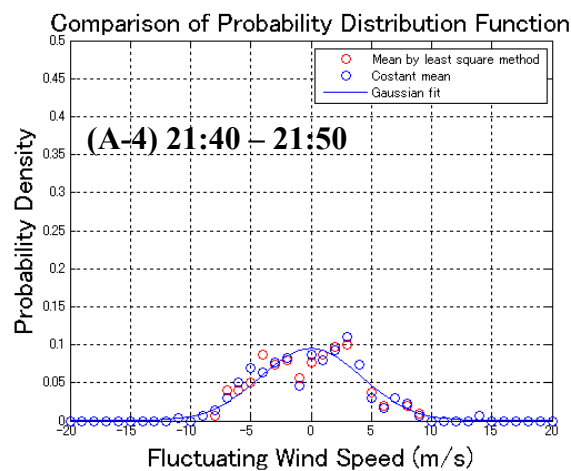
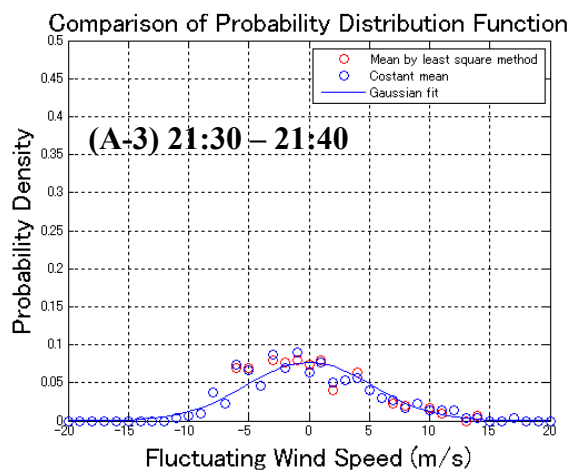


図 3.2.5 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間確率密度関数

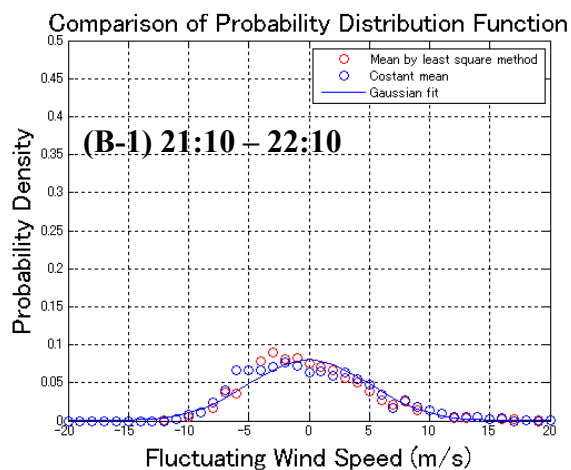


図 3.2.6 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

線形近似風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

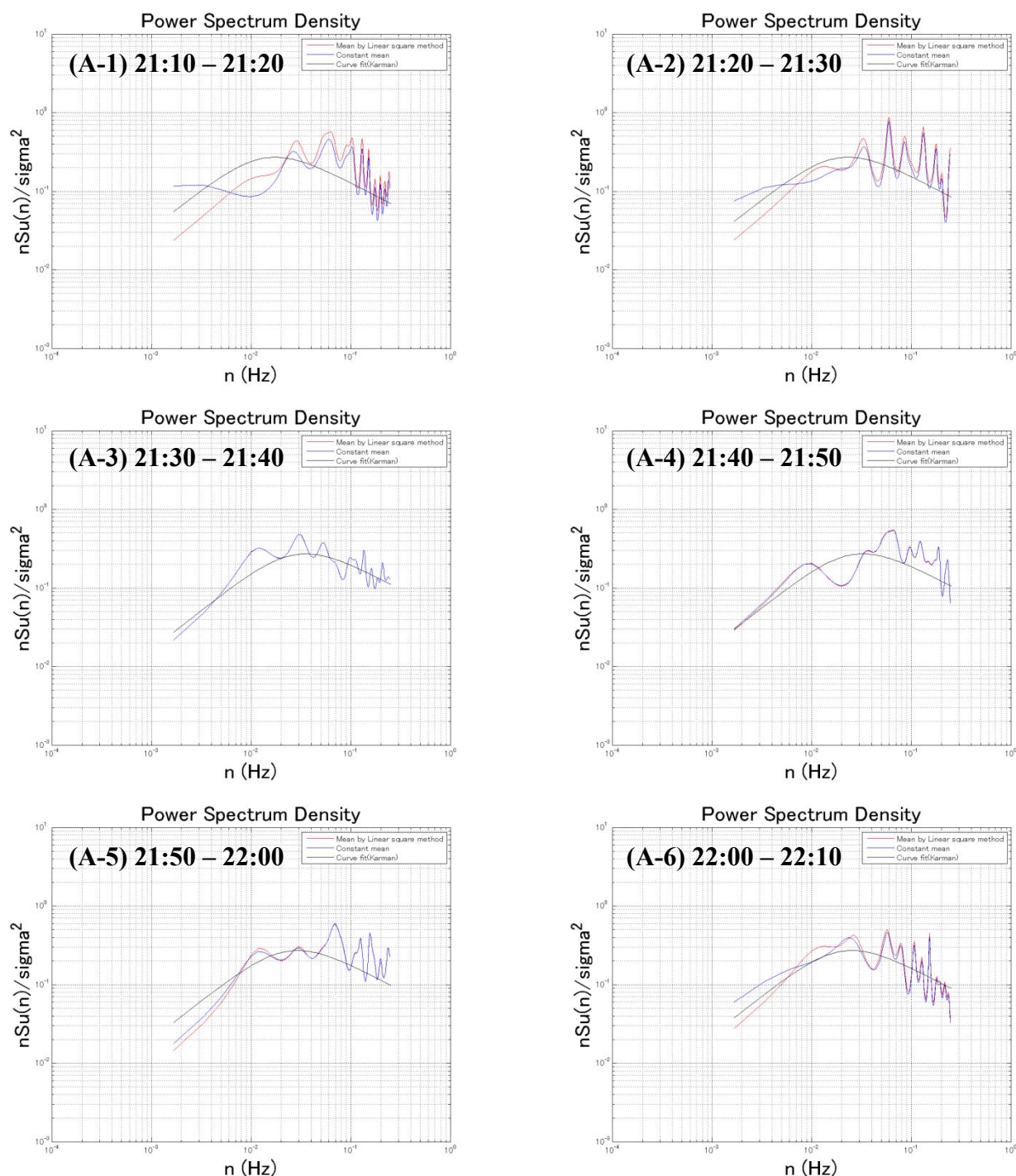


図 3.2.7 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

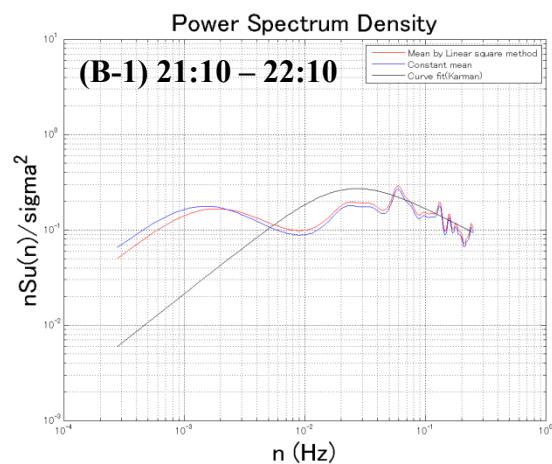


図 3.2.8 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P4 43m 地点 台風 0221 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P4 43m 地点における台風 0221 号観測風速・風向データを示す。

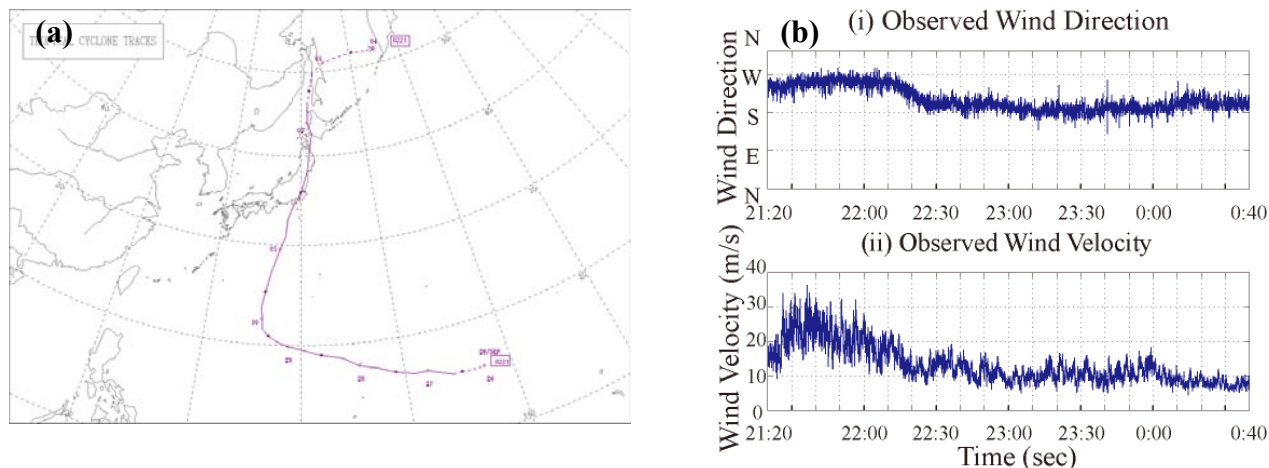


図 3.2.9 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P4 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

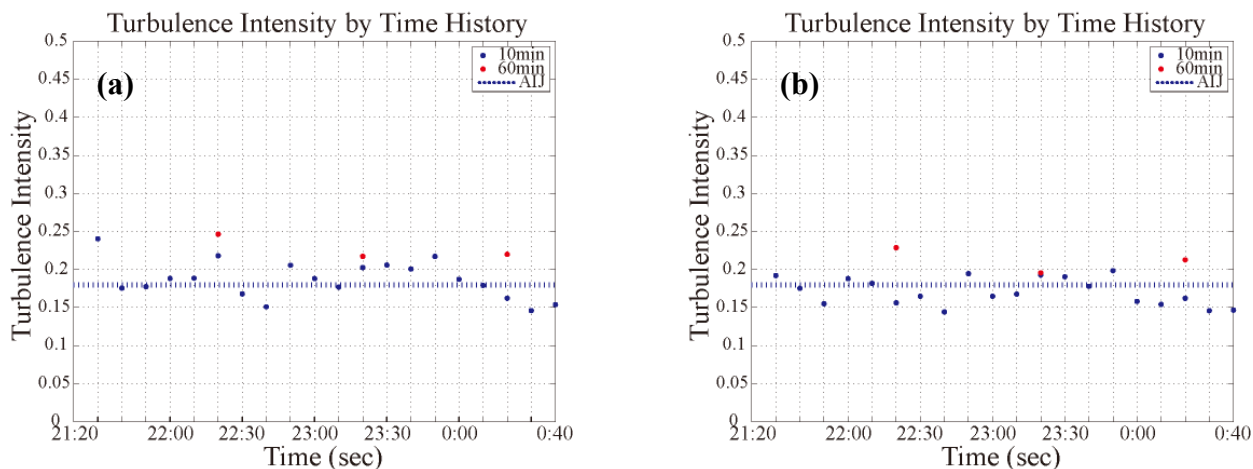


図 3.2.10 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

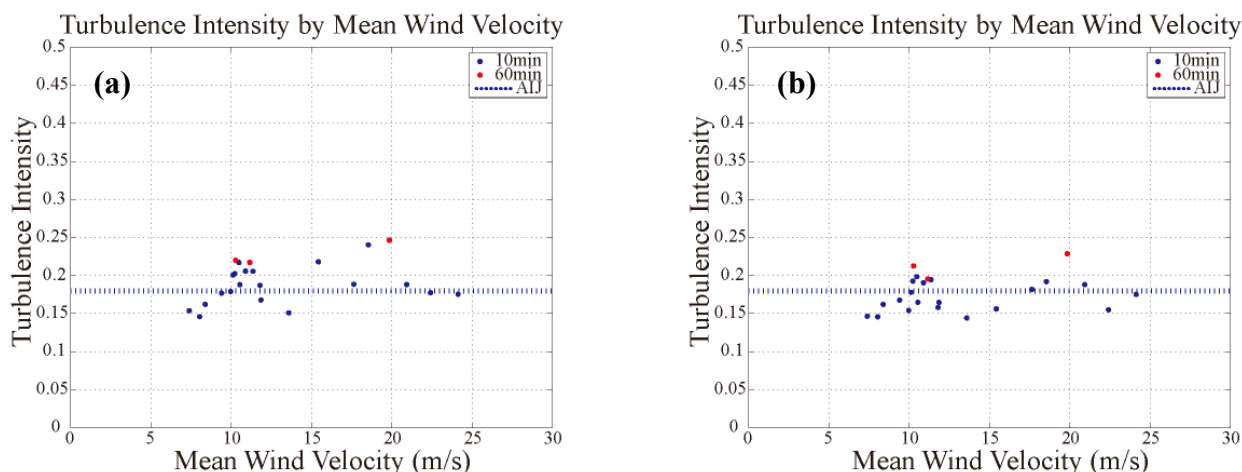


図 3.2.11 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.240

10 分間乱れ強さ最小値：0.146

60 分間乱れ強さ最大値：0.246

60 分間乱れ強さ最小値：0.217

最小二乗法による線形近似風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.198

10 分間乱れ強さ最小値：0.144

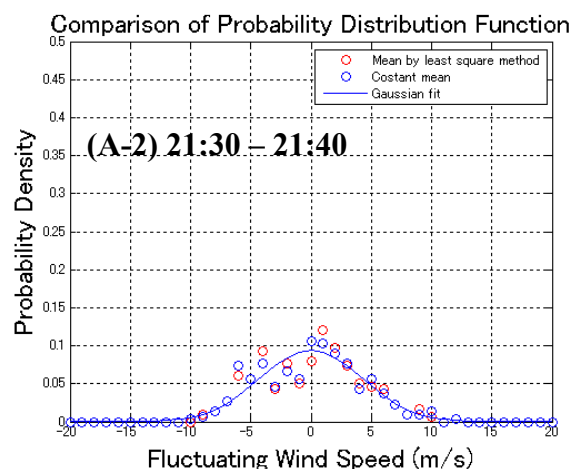
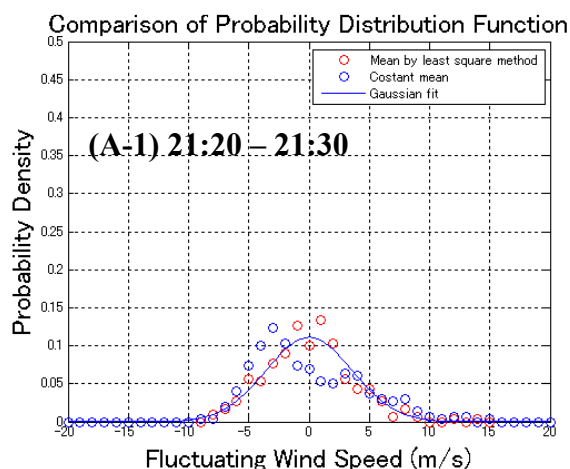
60 分間乱れ強さ最大値：0.229

60 分間乱れ強さ最小値：0.196

表 3.2.2 定常風速モデル・最小二乗法線形近似間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、最小二乗法による線形近似モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



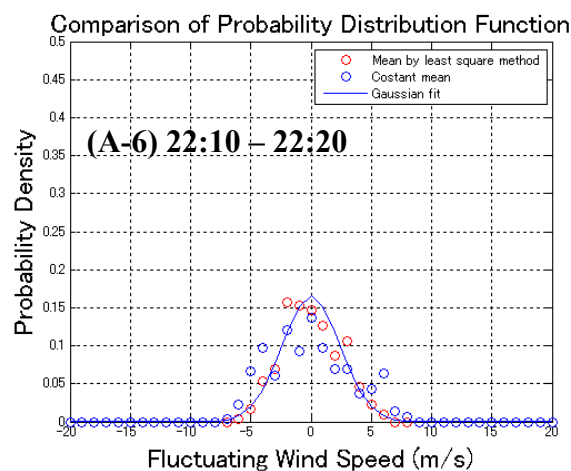
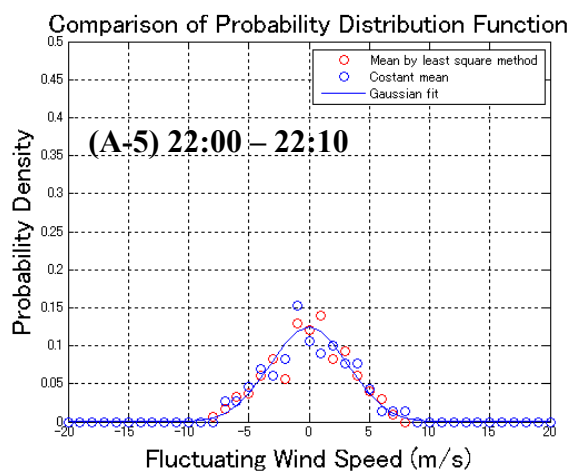
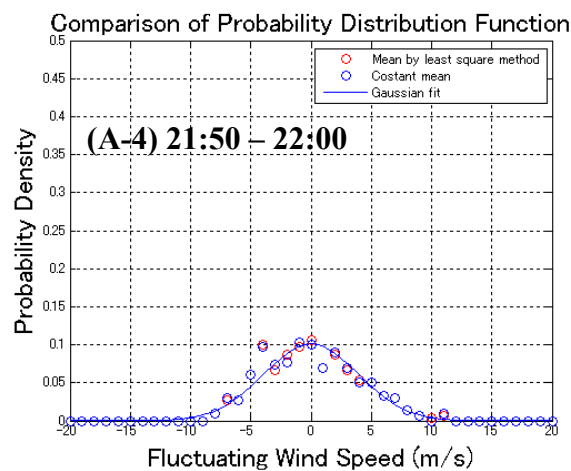
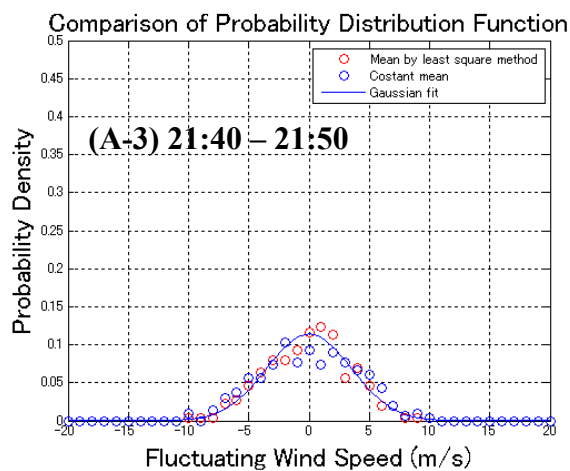


図 3. 2. 12 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間確率密度関数

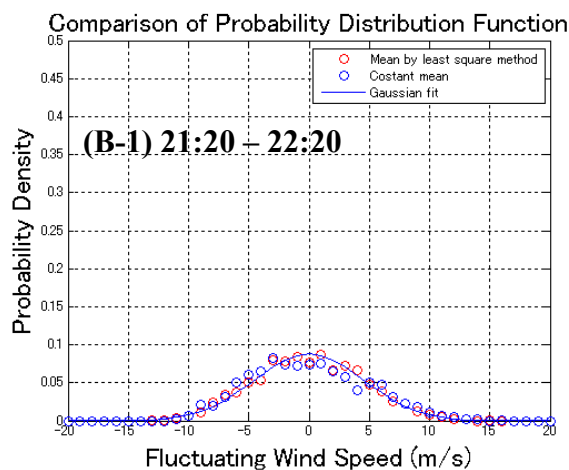


図 3. 2. 13 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

線形近似風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

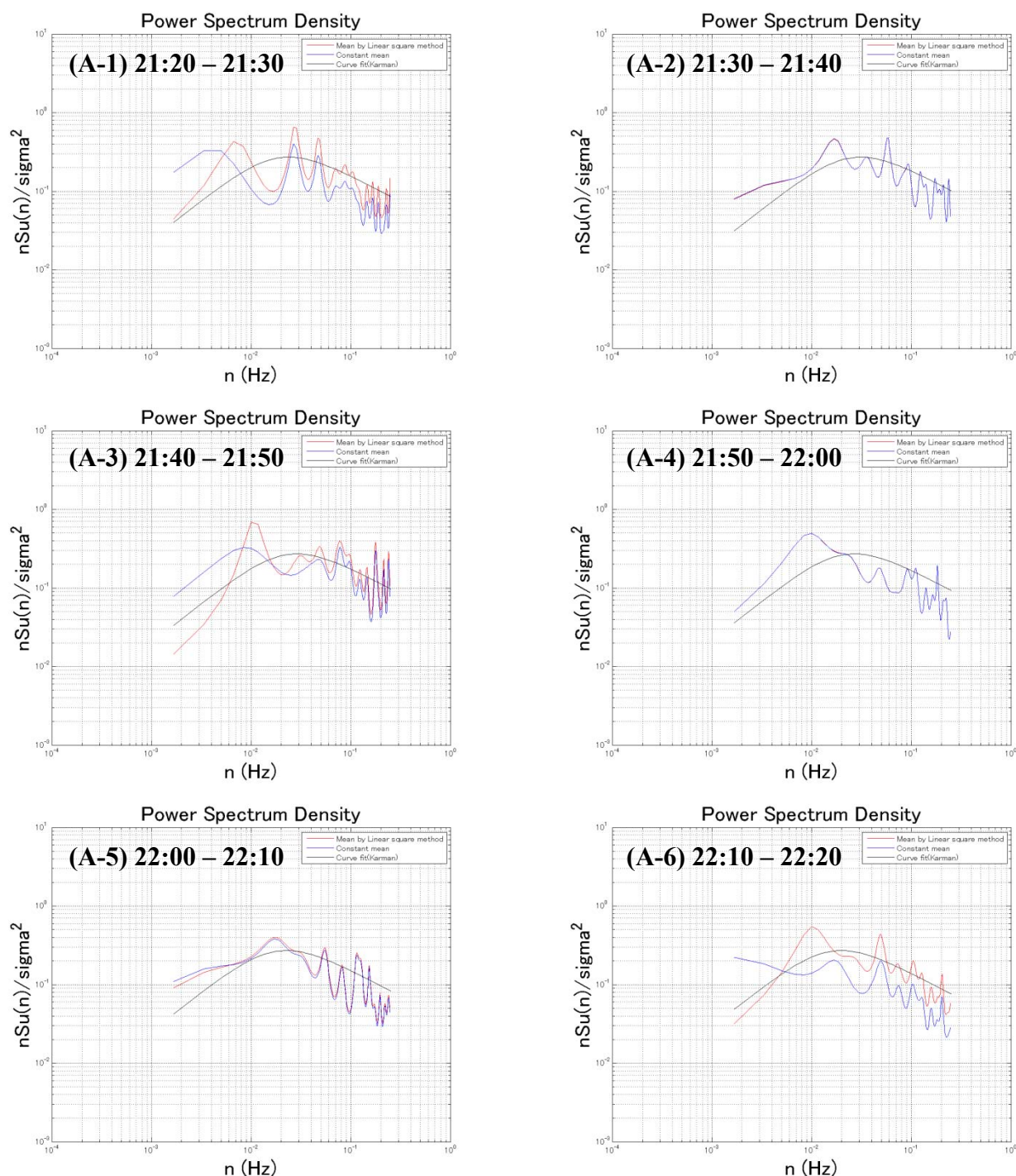


図 3.2.14 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

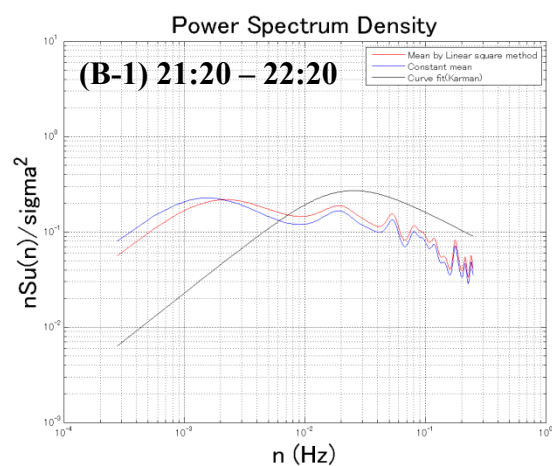


図 3.2.15 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P3 20m 地点 台風 0918 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P3 20m 地点における台風 0918 号観測風速・風向データを示す。

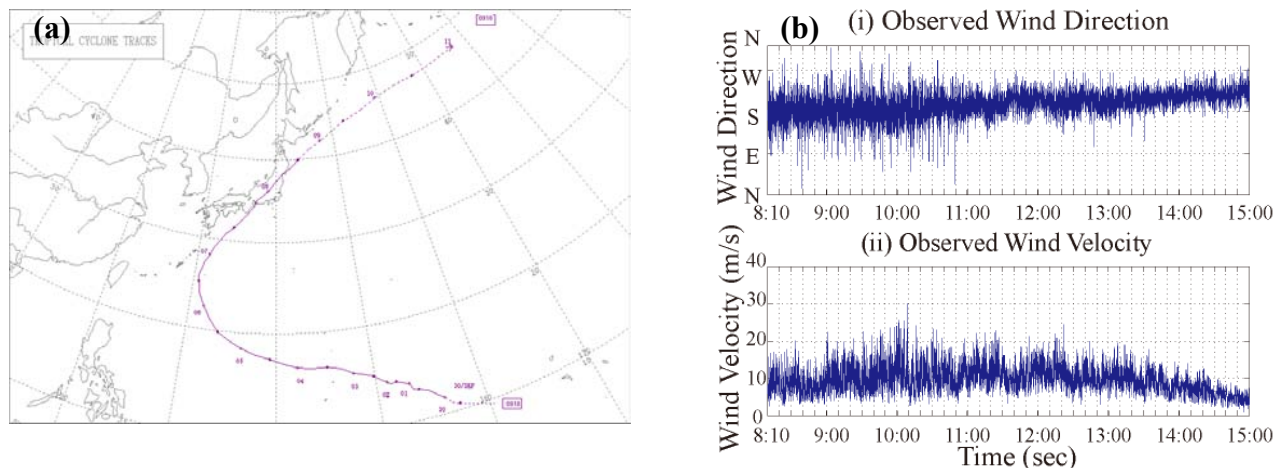


図 3.2.16 台風 0918 号 (a) 台風進路 (b) P3 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

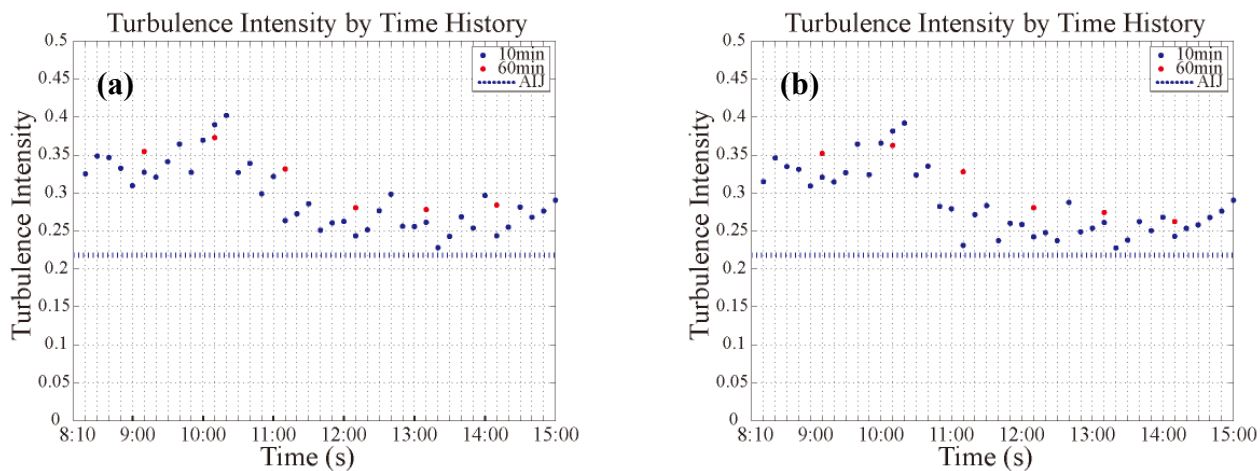


図 3.2.17 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

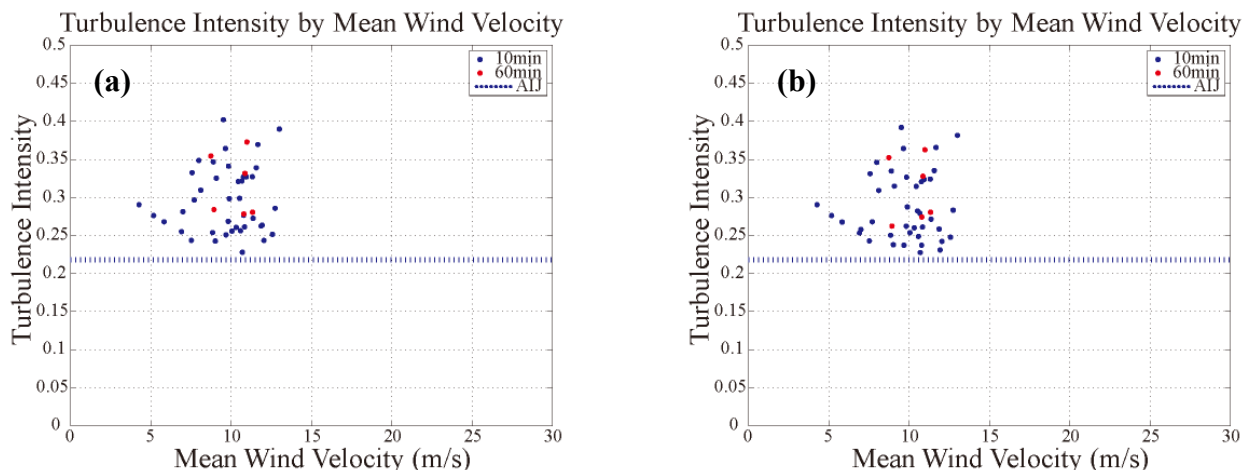


図 3.2.18 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.402

10 分間乱れ強さ最小値：0.228

60 分間乱れ強さ最大値：0.373

60 分間乱れ強さ最小値：0.278

最小二乗法による線形近似風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.392

10 分間乱れ強さ最小値：0.228

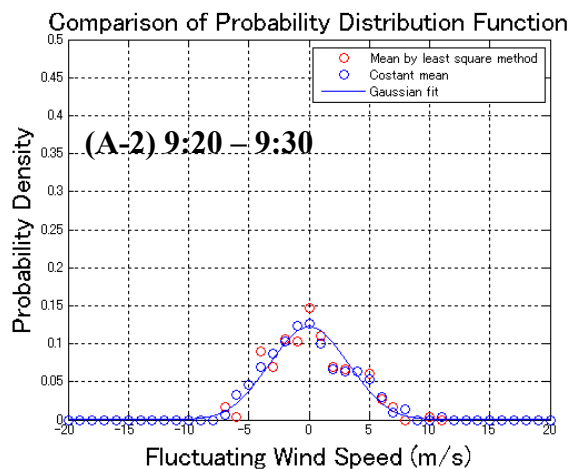
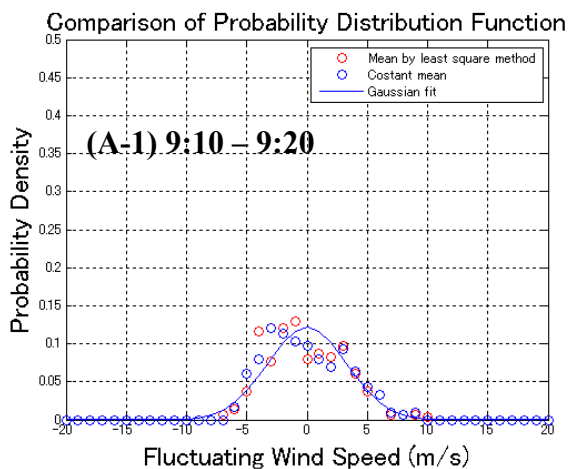
60 分間乱れ強さ最大値：0.363

60 分間乱れ強さ最小値：0.262

表 3.2.3 定常風速モデル・最小二乗法線形近似間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、最小二乗法による線形近似モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、最大風速を観測した時間帯を含む 9:10 - 10:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



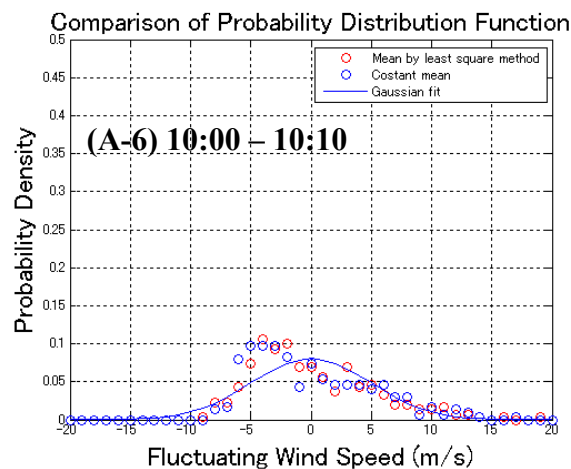
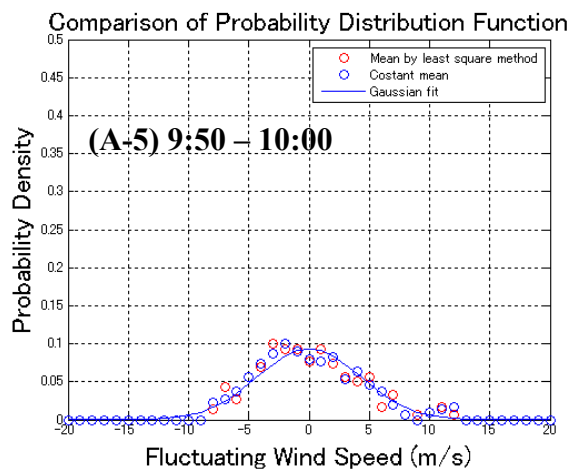
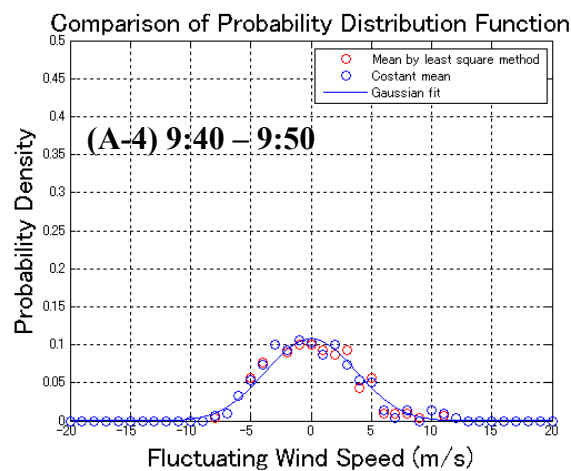
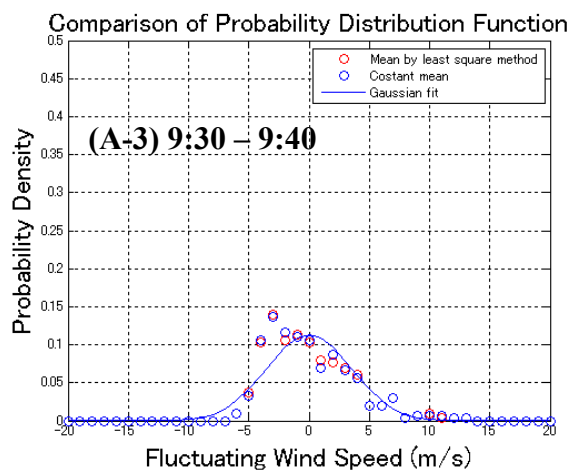


図 3.2.19 9:10 - 10:10 評価時間 10 分間確率密度関数

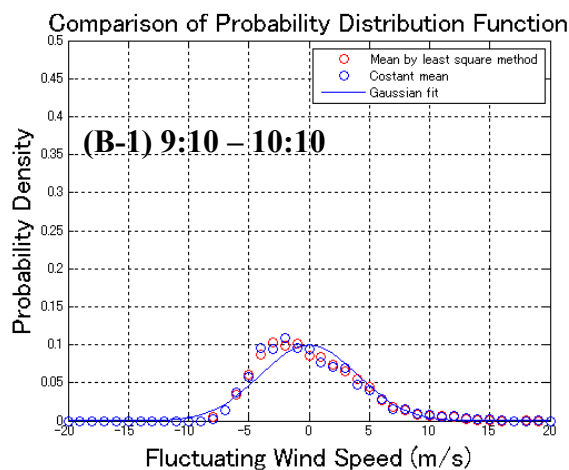


図 3.2.20 9:10 - 10:10 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

線形近似風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは最大風速観測時間帯を含む 9:10 – 10:10 の 1 時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

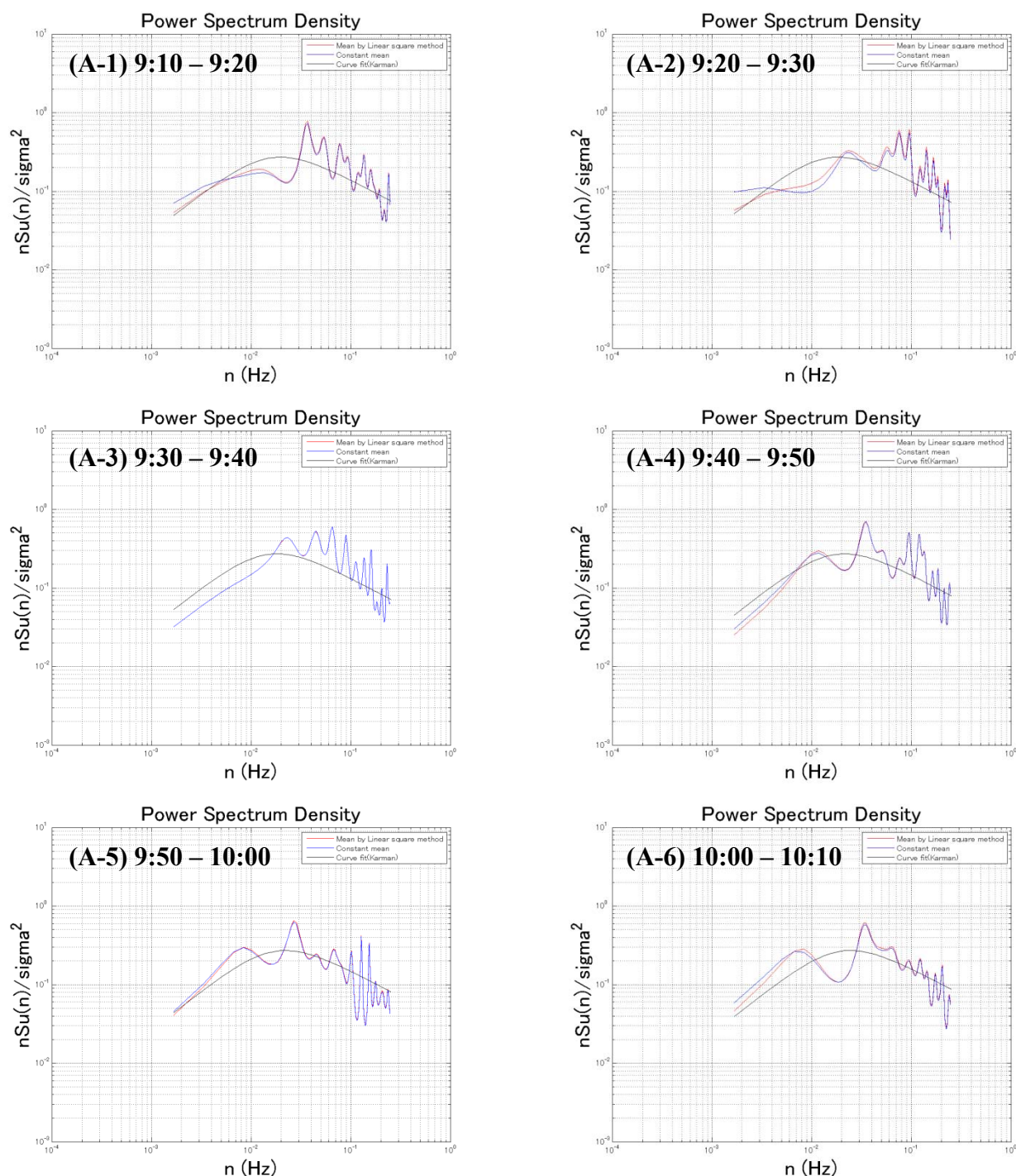


図 3.2.21 9:10 - 10:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

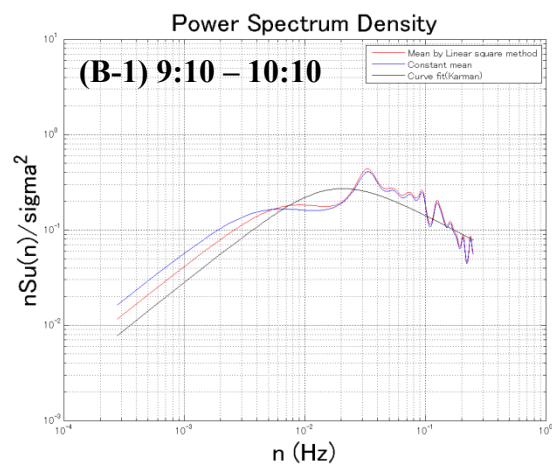


図 3.2.22 9:10 - 10:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P4 43m 地点 台風 0918 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P4 43m 地点における台風 0221 号観測風速・風向データを示す。

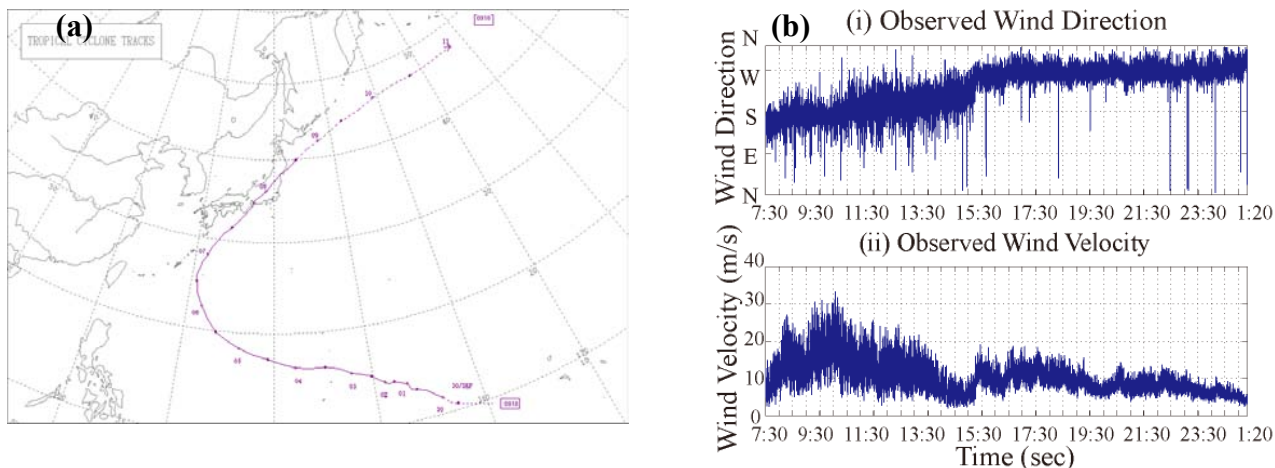


図 3.2.23 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P4 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

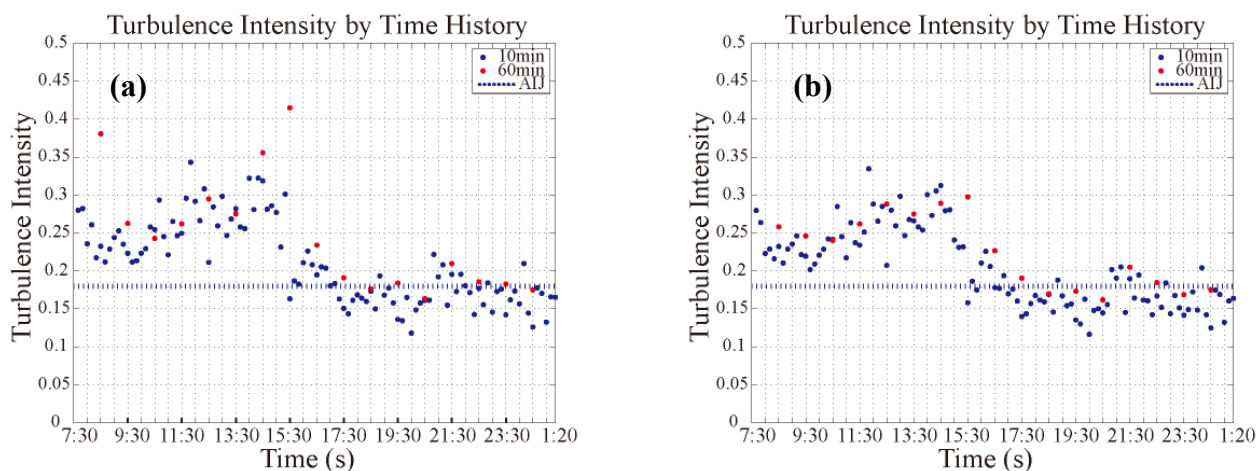


図 3.2.24 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

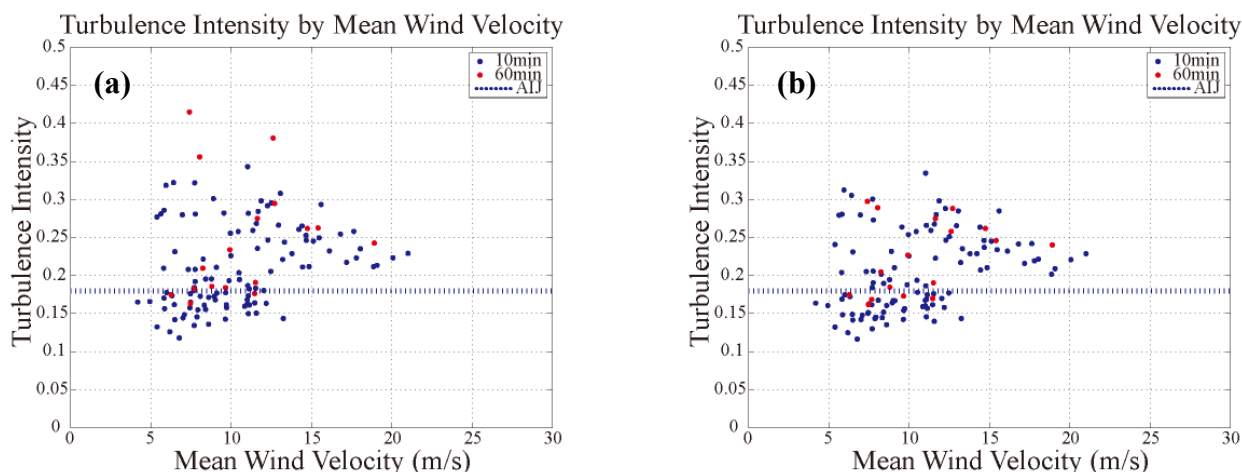


図 3.2.25 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を10分間、60分間について以下に記述する。

定常風モデル

10分間乱れ強さ最大値：0.343

10分間乱れ強さ最小値：0.118

60分間乱れ強さ最大値：0.415

60分間乱れ強さ最小値：0.163

最小二乗法による線形近似風モデル

10分間乱れ強さ最大値：0.335

10分間乱れ強さ最小値：0.116

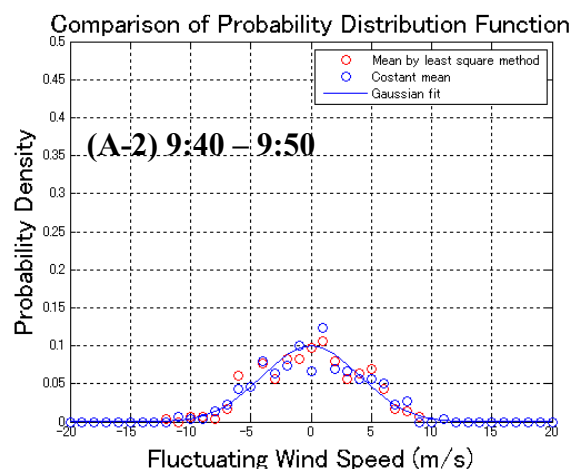
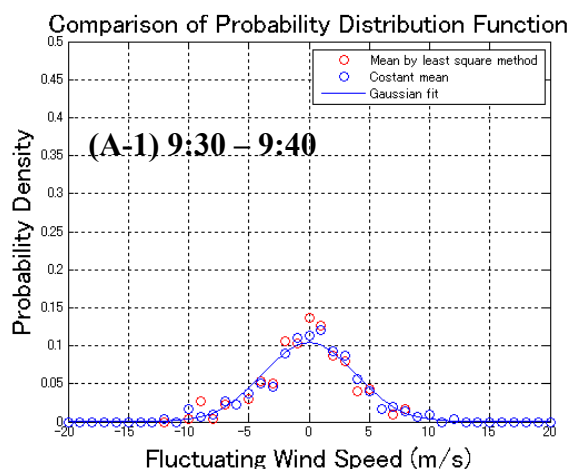
60分間乱れ強さ最大値：0.297

60分間乱れ強さ最小値：0.162

表 3.2.4 定常風速モデル・最小二乗法線形近似間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、最小二乗法による線形近似モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、最大風速観測時間帯を含む9:30–10:30までの1時間とし、(a)10分間、(b)60分間の2つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



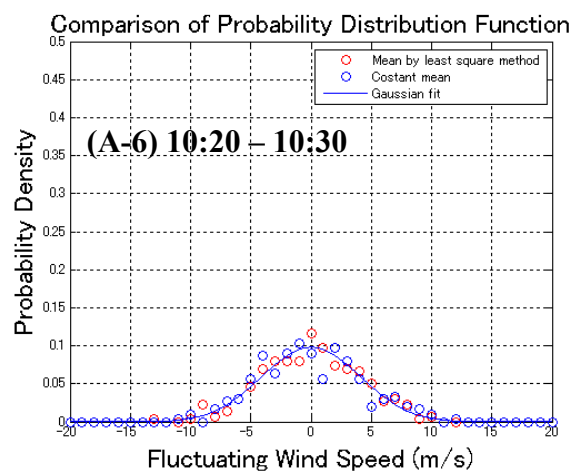
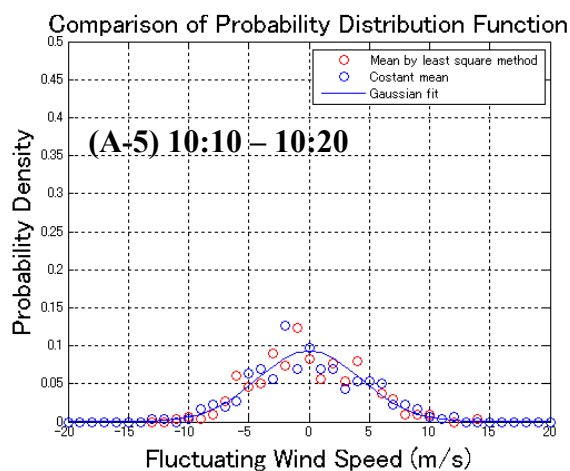
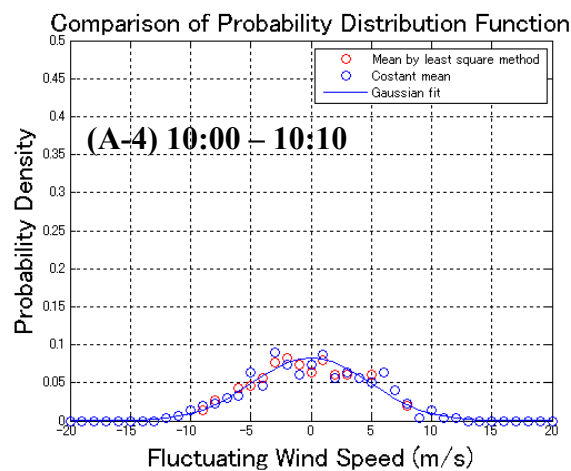
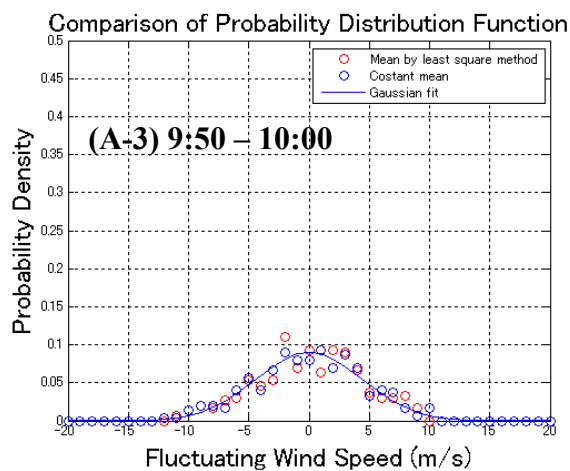


図 3.2.26 9:30 - 10:30 評価時間 10 分間確率密度関数

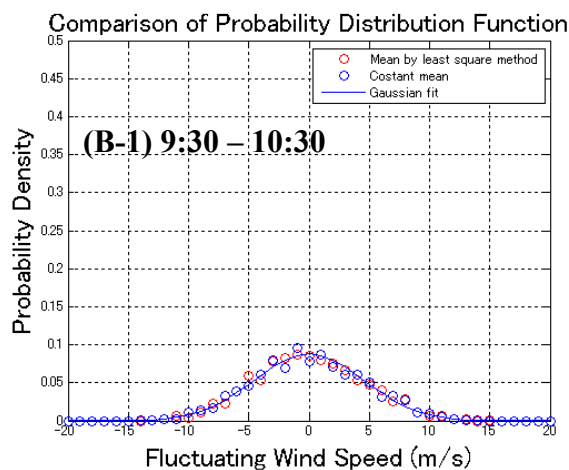


図 3.2.27 9:30 - 10:30 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

線形近似風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは最大風速観測時間帯 9:30 – 10:30 の1時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の2つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーグ法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

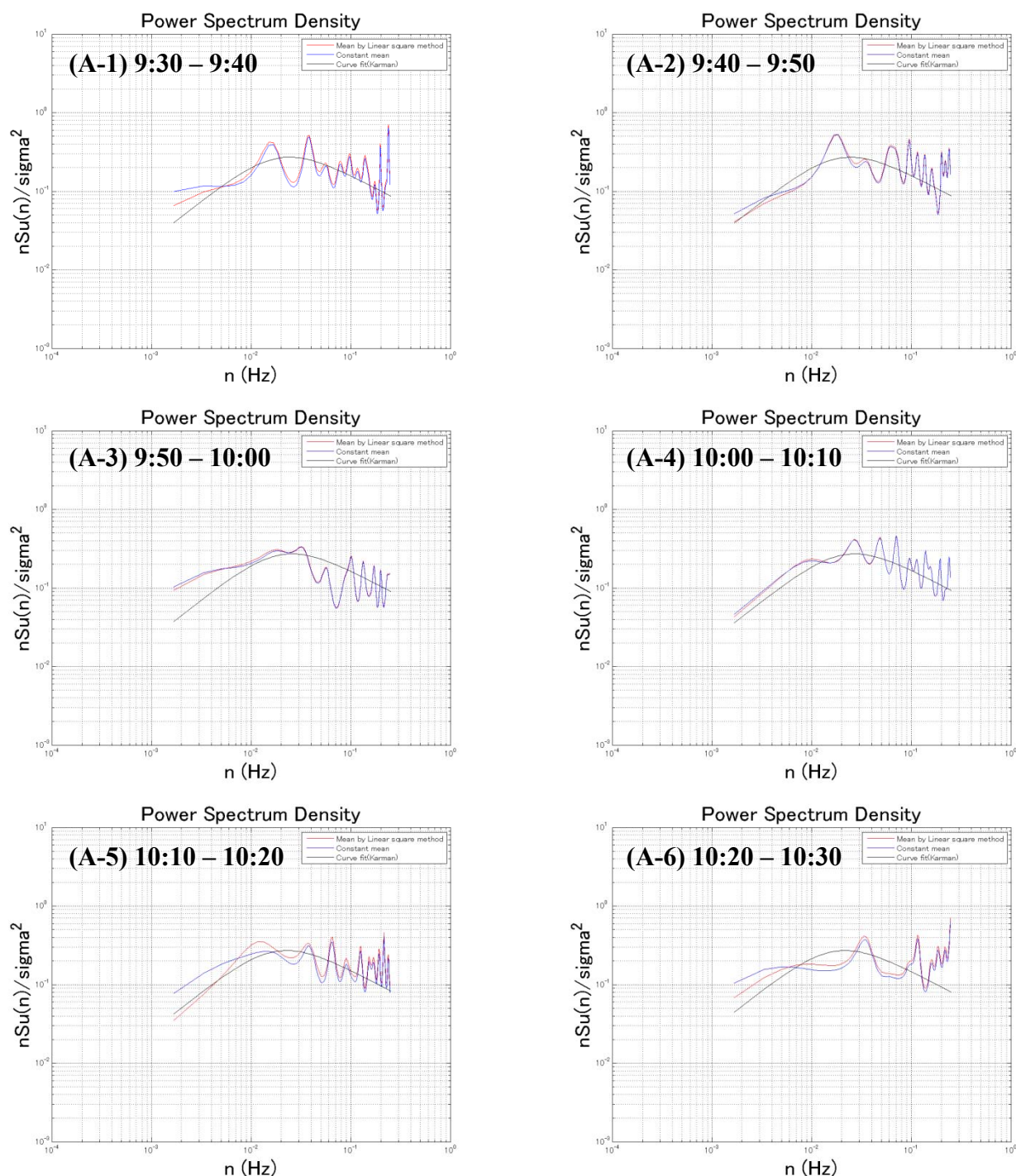


図 3.2.28 9:30 - 10:30 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

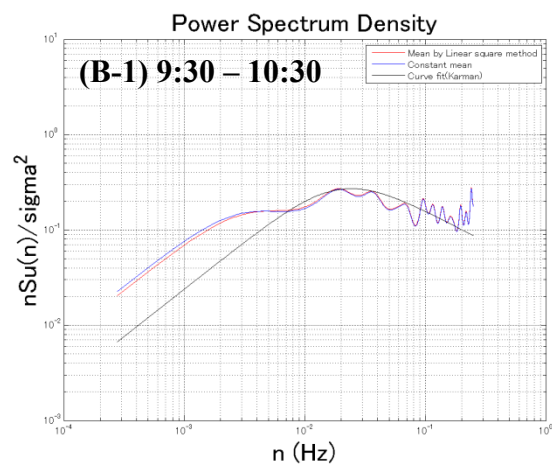


図 3.2.29 9:30 - 10:30 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

3.3 定常風速モデルと EMD 非定常風速モデルによる風特性評価とその比較

3.3.1 EMD 非定常風モデル導入について

本章における目的は、近年、新たに提案された EMD(Empirical Mode Decomposition)手法による非定常風速モデルの検証と、従来から広く用いられてきた定常確率過程による定常風モデルを比較・考察する事である。この背景には、評価時間内における風速平均成分の変動はランダムであり、線形的に近似する事は難しい、という仮定も基づく。まず、検証の手始めとして、EMD 解析についての概要を説明し、その後台風 0221 号・0918 号データを用いた検証・比較を行う。

3.3.2 EMD(Empirical Mode Decomposition)手法 : The Sifting Process について*

* Huang, etc. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis 本文訳及び自ら行った解析結果を中心に解説を行う。

3.3.2.1 はじめに

データ解析における不確定性は明らかに不可避免的なものである。利用可能なデータは多くの場合不完全もしくは不十分であり、ある程度のばらつきを含んでいる、これら不確定性は偶然的な不確定性 (aleatory uncertainty : データに起因する不確定性) もしくは認識論的不確定性 (epistemic uncertainty : 知識に起因する不確定性) に分類され、データそのものに多かれ少なかれ存在する。その原因として、

(a) 全体のデータスパンが非常に短い。

(b) データが非線形過程を示す。

といった原因が考えられる。しかし、多くのデータに存在する不完全さを含んでもなお、工学分野においては理想化されたモデルに基づく予測や推定に頼らざるを得ない現状がある。そんな不確実性を考慮しながらもデータ解析を行う訳には、主として、二つの目的が存在する。

① ある解析モデルの構築に必要なパラメーターの決定。

② ある現象を示す解析モデルの適用性の確認。

しかし、これら問題は実際の現象そのものを表しているのであり、共に関係性も存在する。そのような不完全さに対して、我々が持つ解析手法の選択支は限定的なものと言わざるをえない。

歴史的には、フーリエスペクトル解析が網羅的なエネルギー周波数分布を調べる一般的な手法であった。結果として、スペクトルそのものは、フーリエ変換されたデータとほぼ同義なものとして広く受け入れられるに至っている。その結果、ある程度の優位性と実用性、またその簡便さから、フーリエ解析はその導入以降瞬く間に広くデータ解析に用いられるようになり、数多くのデータに対して応用されてきた。しかし、フーリエ変換は極端に一般的な状態のもとで有効な手法であり、そこには以下のような明らかな適用上の制限が存在し、

① 系全体は線形でなければならない。

② データは必ず周期的もしくは定常でなければならない。

①②を満たさないスペクトルは、ほぼ物理的な意味は無いという諸刃の剣でもある。

実際問題として、暴風雨や台風、ダウンバースト、竜巻等、明らかに定常状態とは説明が出来ないような現象も自然界には存在し、これら現象に対してどう風速モデルの信頼性を保つかが本節で取り扱う分野である。

3.3.2.2 Intrinsic Mode Function (IMF)

得られた観測データが定常ではない時、風速モデルの信頼性を保つために、データそのものを定常な成分と

そうでない成分(平均成分)に分解する必要がある。EMD 手法ではこの時 Intrinsic Mode Function(以下 IMF)を用いる事でデータの分解を行う。この時 IMF とは、以下の二つの条件を満足する関数の事である。

- ① 全てのデータセットに対して極値の数とゼロクロッシング数が等しい、もしくは一つのみ違う。
- ② 極大値で定義される包絡線と極小値で定義される包絡線の平均値はゼロである。

初めの条件は、明らかに従来の正規確率過程に対する狭帯域の必要条件に近い。それに対し、二つ目の条件は新しい考え方、つまり、局所的な系に対する古典的な必要条件を修正したものと言える。しかし、これは瞬間的な周波数が非対称な波形によって引き起こされた望まれざる変動を持たないために必要なものと言える。理想的には、必要条件は“局所的なデータ平均はゼロであるべき”である。非定常データに対して、局所的な平均を計算するためには、その時間的定義が不可能な局所的時間スケールを与える必要がある。その代替策として、本報では極大値及び極小値によって定義された包絡線の平均を用いた。これは局所的な平均時間スケールの定義を避けるために必要な近似である。しかし一方で、このような近似を行う事で生じる別の問題、非線形で構成された波形に対する瞬間的な周波数内への影響、が懸念されるが、非定常性の比較に関してはそのような影響は小さく問題となることはほぼ無い。

本研究では、データ内に存在する個々の振動モードを表すために IMF を採用する。その定義によれば、個々の IMF はゼロクロッシング数によって定義され、ただ一つの振動モードを含んだ、他の周波数帯による波の重ね合わせを許さない関数である。また、IMF はある狭帯域の信号に制限されるようなものではなく、調整された周波数と振幅で構成される。実際、その波形を見ると非定常そのものと言える。上述のように、純粋な周波数、振幅調整関数が IMF であり、例えそれらが従来の定義に従った有限な周波数帯を持っていたとしても変わる事は無い。ある典型的な IMF について(図 3.3.1)に示す。

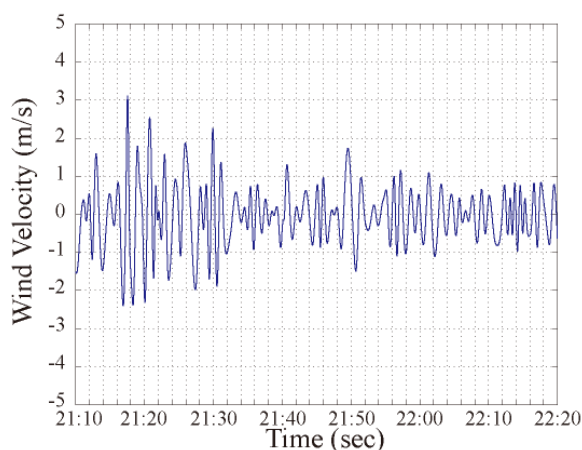


図 3.3.1 台風 0221 号 IMF (信号数 5 個 サンプリング周波数 1024 C₄)

図より、IMF における極値とゼロクロッシング数は等しく、上部包絡線及び下部包絡線はゼロに対して対称である事はわかる。

この瞬間的な周波数に対する優れた定義を用いるために、任意のデータからそれぞれの IMF 成分を分解する必要がある。その結果、複雑なデータ群に対して、ある局所的な時間でひとつ以上の瞬間的な周波数を得る事ができる。次節では、あるデータから IMF を抽出するための手法として Empirical Mode Function(EMD)を導入する。

3.3.2.3 The Empirical Mode Decomposition Method: The Sifting Process

IMF 成分がヒルベルト変換と互換性がある事を知る事はただのスタート地点に過ぎない。しかし、残念ながら多くのデータは IMF ではない。与えられたどの時間においても、データは一つ以上の振動モードを含んでいる可能性がある。そのため、単純なヒルベルト変換では全体の成分に対して完全な周波数を描く事はできない (Long et al. 1995)。その為、得られたデータを IMF 成分に分解する必要がある。

IMF 成分への分解は以下のような仮定に基づいている。

- ① 信号群は少なくとも二つの極値を持つ。(一つの極大値と一つの極小値)
- ② 特性時間スケールは極値間の時間の幅によって定義される
- ③ もしデータが完全に極値を持たず、変曲点のみを含んでいる場合、その時、一回もしくはさらなる分解を行う事で極値を見つけ出す。また、最終的な結果は成分の積分によって得られる。

本手法における本質は、データ内に存在する特性時間スケールによって固有振動モード (IMF) を経験的に特定し、分解する事である。Drazin (1992) によれば、データ解析の最初のステップは目でデータを調べる事とされている。本手法によって、二つの方法から直接的に異なった時間スケールを直ちに特定する事ができる。

- ① 連続した最大値と極小値の繰り返しによる時間幅。
- ② 連続したゼロクロッシング間の時間幅。

しかし、この場合、極値とゼロクロッシング点が混ざりあう事で複雑なデータとなる可能性がある。つまり、ある波動がもう一つの波動と重なり合い、再び他のデータと重なり合うためである。これら波動はそれぞれのデータに対する特性時間スケールによって定義され、その値は過程に対して固有なものである。ここでは、固有振動モードに対して時間スケールの定義である連続した極値間の時間幅を時間スケールとして用いる事とする。これは、振動モードに対してより良い結果を与えるからではなく、平均がゼロならないために、正負両データに対してもゼロクロッシングを考える必要がなくなるからである。データを抜き出す体系的な方法を Sifting Process として以下に描く。

IMF の定義に従い、分解手法は単純に局所的な極大値と極小値別々に定義された包絡線を用いる。一度極値が特定されると、全ての極大値は上部包絡線としてキュービックスプライン関数によって結ばれる。同様に、極小値についても、キュービックスプライン関数によって下部包絡線が結ばれる。この時、上部包絡線及び下部包絡線によって囲まれた範囲内に全てのデータが内包されるはずである。それら平均は m_1 として表され、全てのデータと m_1 との差異は初期成分 h_1 として、

$$X(t) - m_1 = h_1 \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3.3.1}$$

(式 3.3.1) のように表される。本手順については、(図 3.3.2) に示す。理想的には、 h_1 は IMF であるべきであるが、実際には新たな極値を生み出すデータのオーバーシュートやアンダーシュートが存在している事が考えられる。オーバーシュートやアンダーシュートによる不完全さは (図 3.3.2) 中 21:18 – 21:19 間においても確認する事が出来る。それら影響は、Sifting Process を行う上で包絡線に対して直接的なものではないが、それでもやはり問題は残る。しかし、例えどんなに完璧なフィッティングを行ったとしても、結局、局所的なゼロが変化するだけで極値そのものの存在を消すことはできない。

Sifting Process のもう一つの複雑さとして、包絡線による平均は非線形データに対する新の局所的な平均とは異なる可能性があるという事である。結果として、いくつかの非対称な波形というものが、例えどんなにデータシフトを繰り返したとしても存在するという事である。

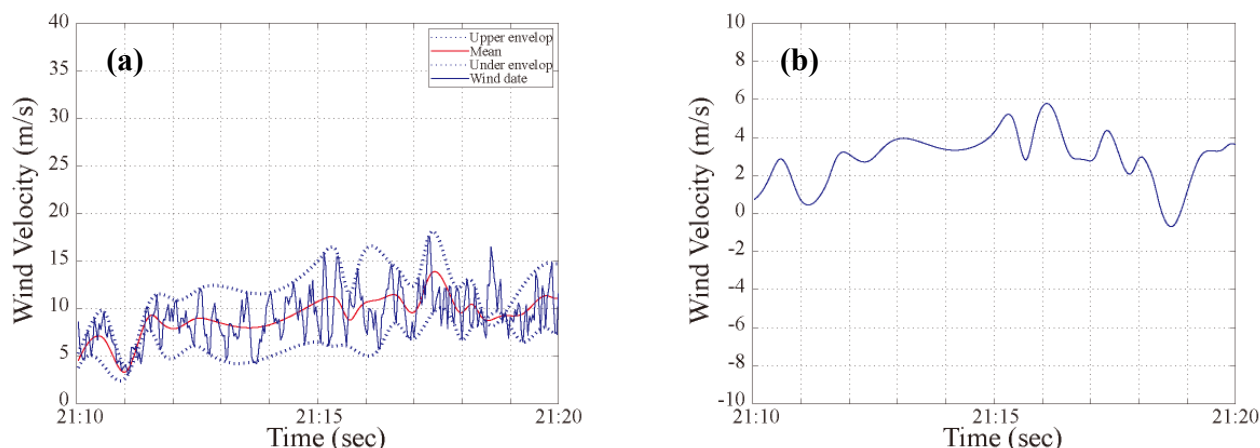


図 3.3.2 Sifting process 例 (a) 点線：上部包絡線 実線赤：平均 点線：下部包絡線 実線青：実測データ
(b) 実測データー平均 (IMF ではない)

実用上、これら理論的な難しさ以上に深刻な問題がスプラインフィッティング終盤付近に発生する。エンドスウィングと呼ばれるこの問題は、最終的にデータ内部まで影響を及ぼし、全データ区間低周波成分を破損させる。そのため、このエンド効果を排除する数式的な改訂が必要である。この詳細については別紙*を参照されたいが、スプラインフィッティングの改良は絶対的に必要である事を忘れてはならない。

このような複雑さがあるにも関わらず Sifting Process を行うには、二つの目的が存在する。

- ① 重ね合わさった波を取り除く事。
- ② 波形をより対称な形にする事。

このため、Sifting Process を何回も繰り返し行う必要がでてくる。この時、二回目の Sifting Process では、 h_1 をデータとして扱い、

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad \text{式 3.3.2}$$

と表す。(図 3.3.3) は、二回目の Sifting Process 後の改良された結果であるが、そこにはまだゼロラインを上回るローカル最大値が存在する。

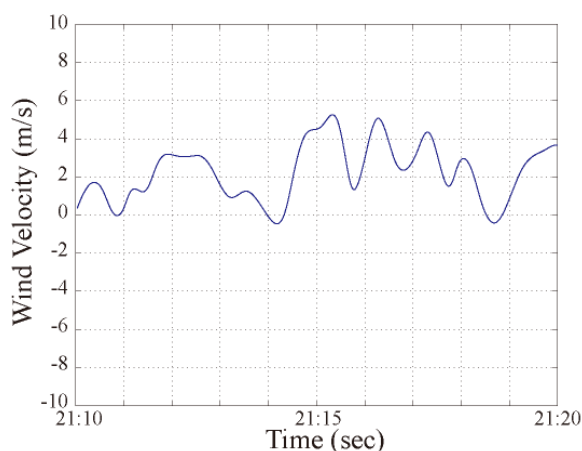


図 3.3.3 2 回目の Sift process 後 例 (IMF ではない)

この Sifting Process はすべての波が対称になるまで、つまり h_{1k} が IMF になるまで k 回繰り返される。

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad \text{式 3. 3. 3}$$

その結果について（図 3. 3. 4）に示す。この時、 h_{1k} は

$$c_1 = h_{1k} \quad \text{式 3. 3. 4}$$

として表され、初期 IMF 成分となる。

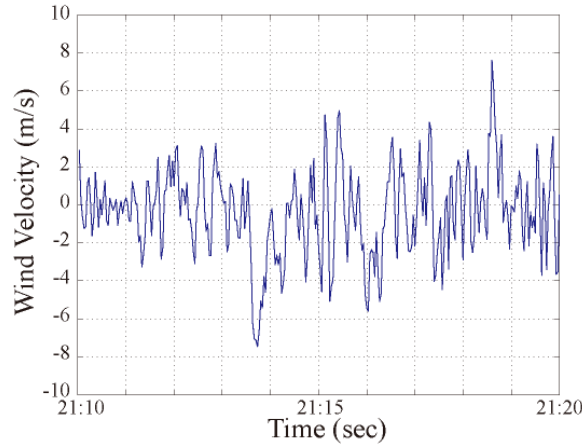


図 3. 3. 4 初期 IMF 成分

上述の Sifting Process をまとめると以下に挙げる二つの効果がある事がわかる。

- ① 重ね合わさった波を取り除く。
- ② 不均一な振幅を滑らかにする。

瞬間的な周波数が重要性を持つためにも初期条件は絶対である一方で、二番目の条件もまた隣り合う波の振幅があまりにも大きく異なった場合に必要となる。不運な事に、二番目の条件を極端に行った時、振幅の振動に物理的な意味は無くなる。それゆえ、Sifting Process は慎重に扱う必要が出てくる。IMF 成分が振幅、周波数調整の両面で十分に物理的な意味を持たせるためにも、Sifting Process を終了する何らかのクライテリアを設ける必要が出てくる。その為には、二つの連続した Sifting Process から求まる標準偏差（SD）の大きさを以下のように制限する必要がある。

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad \text{式 3. 3. 5}$$

この時、得られる典型的な標準偏差の値は 0.2 から 0.3 の間である。

結果として、 C_1 は信号に対して最も適したスケールもしくは短い周波数成分を含む事になる。この時、残りのデータから C_1 を引くと、

$$X(t) - c_1 = r_1 \quad \text{式 3. 3. 6}$$

が得られる。残余である r_1 にはまだより周期の長い成分の情報が含まれているため、次のステップとして r_1

をデータとして捉え、上述のように Sifting Process を繰り返し行う。この手順は全ての r_j に対して行われ、結果は、

$$r_1 - c_2 = r_2, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n \quad \text{A.7}$$

と表される。また、Sifting Process については以下の事前に定められたクライテリアのどちらかを満たす事で終了する。

- ① 成分 C_n もしくは残余 r_n が小さく、次の結果が事前に決められた値以下になった時。
- ② 残余 r_n がもはや IMF を抜き出すことが出来ないほどの単調関数になった時。

ただし、ゼロ平均をもったデータでさえ、最終的な残余はゼロとは異なった値をとる。そのため、ある傾向を持ったデータに対して、最終的に得られる残余もまたその傾向を持つべきであると言える。(式 3.3.5) 及び (式 3.3.6) を組み合わせる事で、最終的に

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad \text{式 3.3.8}$$

が得られる。このように、データを n 個の Empirical mode に分解する事で、一定平均もしくはある傾向を有した平均のどちらかを残余 r_n として得る事ができる。IMF 成分 C_n 、残余 r_n として与えられた値を図 3.3.5 に描く。

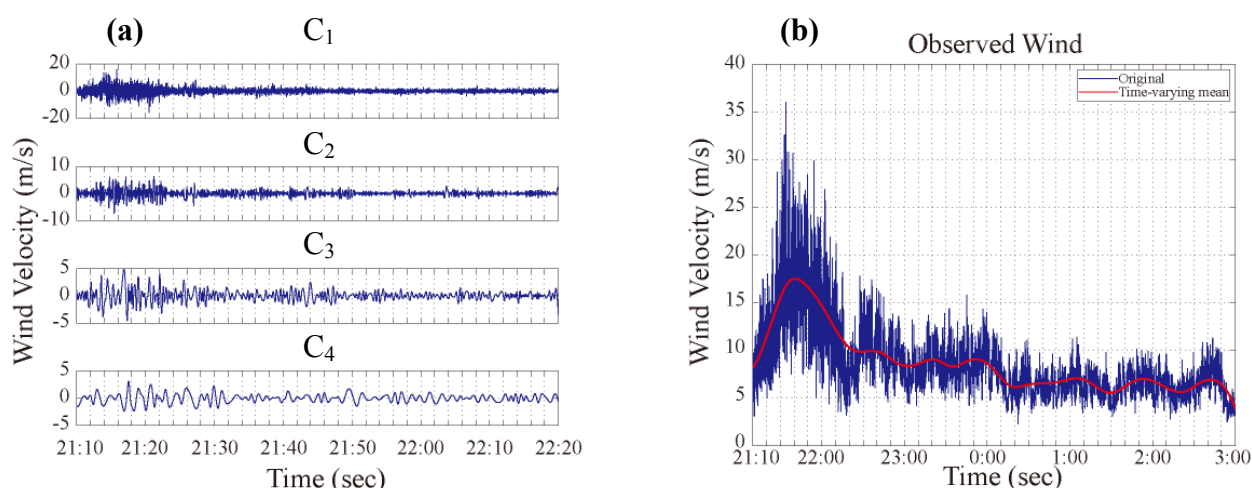


図 3.3.5 Sifting process 結果 (a) IMF 成分 ($C_1 - C_4$)

(b) 実線青：実測データ 実線赤：残余 r_n (時間変化に依存をした平均成分)

3.3.3 EMD 非定常風モデル検証とその比較

3.3.3.1 はじめに

本手法における本質は、データ内に存在する特性時間スケールによって固有振動モード (IMF) を経験的に特定し、分解する事である。その為、EMD 手法による平均成分算出には、解析を行うデータへの適切な条件設定を経験的に求める必要がある。この時解析者によって経験的に決められるパラメーターは、

- ① 局所内データ基本信号数
- ② 基本振動数
- ③ A.5 による標準偏差クライテリア

である。①は、得られた全データを局所的なデータセットに分解する際の基本信号数であり、最終的に得られる r_n 、時間変化に依存した平均成分に影響を及ぼす。一方で②③は、Sifting process を終了する為のクライテリアであり、IMF 成分に影響を及ぼす。そこで本節では、これら EMD 手法を柏キャンパスから得られたデータに適用する際の最適値を求める為、①②をパラメーターとした EMD 手法を台風 0221 号 P3, P4 データに対して行う。この時②基本振動数を決める際には、以下に示す公式内の

$$f_1 = \frac{1}{N\Delta t} \quad \text{式 3. 3. 9}$$

データ数 N をパラメーターとして扱った。また、③に関しては Huang* 等による研究成果を基に、0.2 - 0.3 の間とし、解析を行うものとした。以下に検証を行ったパラメーター群を示すと、

- A) 基本振動数内データ数 (= N) : 128, 局所内データ基本信号数 (= n) : 3
- B) 基本振動数内データ数 (= N) : 128, 局所内データ基本信号数 (= n) : 5
- C) 基本振動数内データ数 (= N) : 256, 局所内データ基本信号数 (= n) : 3
- D) 基本振動数内データ数 (= N) : 256, 局所内データ基本信号数 (= n) : 5
- E) 基本振動数内データ数 (= N) : 512, 局所内データ基本信号数 (= n) : 3
- F) 基本振動数内データ数 (= N) : 512, 局所内データ基本信号数 (= n) : 5
- G) 基本振動数内データ数 (= N) : 1024, 局所内データ基本信号数 (= n) : 3
- H) 基本振動数内データ数 (= N) : 1024, 局所内データ基本信号数 (= n) : 5
- I) 基本振動数内データ数 (= N) : 2048, 局所内データ基本信号数 (= n) : 3
- J) 基本振動数内データ数 (= N) : 2048, 局所内データ基本信号数 (= n) : 5

である。検証手法としては、風速乱れ強さ、パワースペクトル密度関数を用いて行った。詳細については次節で触れる。また、 n に関しては 7 によるケーススタディも行ったが、十分に満足される IMF 及び r_n を検出出来なかった為、本論では説明を割愛する。

3.3.3.2 EMD 手法による非定常風モデルと風特性評価について

・ 非定常風モデル

本節では、前節で得られた r_n (時間変化に依存した平均成分) を用いて風速ランダム成分を再評価し、非定常風モデルとしてモデル化する。この時、非定常風速モデル $U(t)$ で用いられる風速ランダム成分 $u'(t)$ は以下のように表わされる。

$$U(t) = \overline{U}(t) + u'(t)$$

$$u'(t) = U(t) - \overline{U}(t) \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3. 3. 10}$$

式中 $\overline{U}(t)$ は r_n であり、時間変化に依存した平均成分を表す。

新たにモデル化された風速ランダム成分を上述のように定義した事で、従来の風特性評価についても非定常風モデルに沿った再評価を行う必要が出てくる。ここでは、平均風速、分散、乱れ強さ、確率密度関数、カルマン型パワースペクトル、ガストファクターについて再評価を行う。

・ 平均風速・分散・乱れ強さ

(式 3. 3. 10) に基づき、平均風速、分散、乱れ強さを再評価する。この時、新たにモデル化された風速モ

デルに対応する平均風速・分散・乱れ強さは以下のように定義される。

$$\bar{U}' = \frac{1}{n} \sum_{t_1}^{t_n} \bar{U}(t) \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3. 3. 11}$$

$$\sigma_a'^2 = \frac{1}{n} \sum_{t_1}^{t_n} (U(t) - \bar{U}(t))^2 \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad \text{式 3. 3. 12}$$

$$I_a' = \frac{\sigma_a'}{\bar{U}'} \quad \text{式 3. 3. 13}$$

・ 確率密度関数

(式 3. 3. 10) による風速モデル化に伴い、確率密度関数についても再定義を行う。以下に示すと、

$$p(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_u'}} e^{-\frac{u'^2}{2\sigma_u'^2}} \quad \text{式 3. 3. 14}$$

となる。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについても、(式 3. 3. 10) に基づいた再定義を行う。以下に示すと、

$$\frac{f_k S_{u'}(f_k)}{\sigma_{u'}^2} = \frac{4 \frac{L_z}{U_{t_n}} f_k}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{L_z}{U_{t_n}} f_k \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad \text{式 3. 3. 15}$$

この時、 N をデータ数、 dt を時間間隔とおくと、

$$L_z = 460 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.5} \quad f_k = \frac{k}{N \cdot dt} \quad k = k_1, k_2, \dots, \frac{N}{2} \quad \text{式 3. 3. 16}$$

と表せる。

・ ガストファクター

ガストについても同様に再定義を行う。以下に示すと、

$$G = \max \left(\frac{U(t)}{\bar{U}(t)} \right) \quad t = 1, 2, \dots, 3600 \quad \text{式 3. 3. 17}$$

となる。

以上の非定常風モデルにおける再定義を踏まえ、次節において、乱れ強さ、カルマン型パワースペクトルを指標に、(A)～(J)のケーススタディを台風 0221 号データ P3 20m 地点及び P4 43m 地点について行う。また、(A)～(J)のケーススタディの結果を踏まえ、最終的なパラメーターを決定する。

3.3.3.3 EMD 手法導入への最適パラメーターの決定

- ・ CASE (A-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=128 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

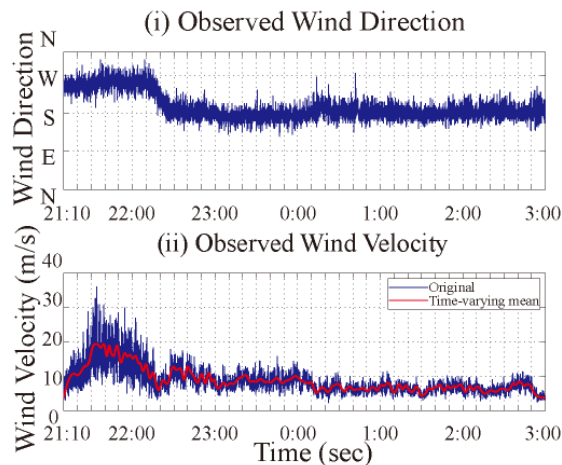


図 3.3.6 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

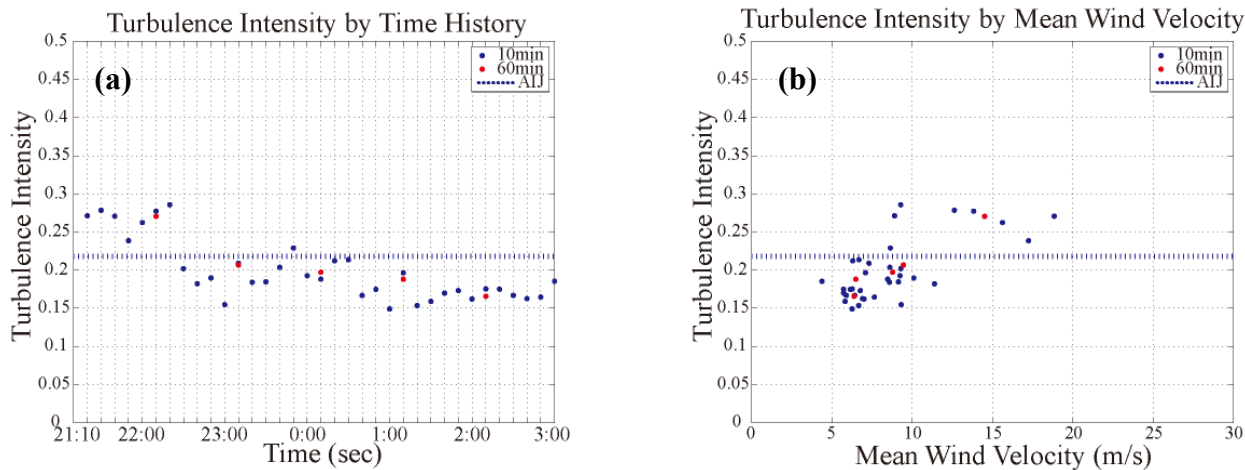


図 3.3.7 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

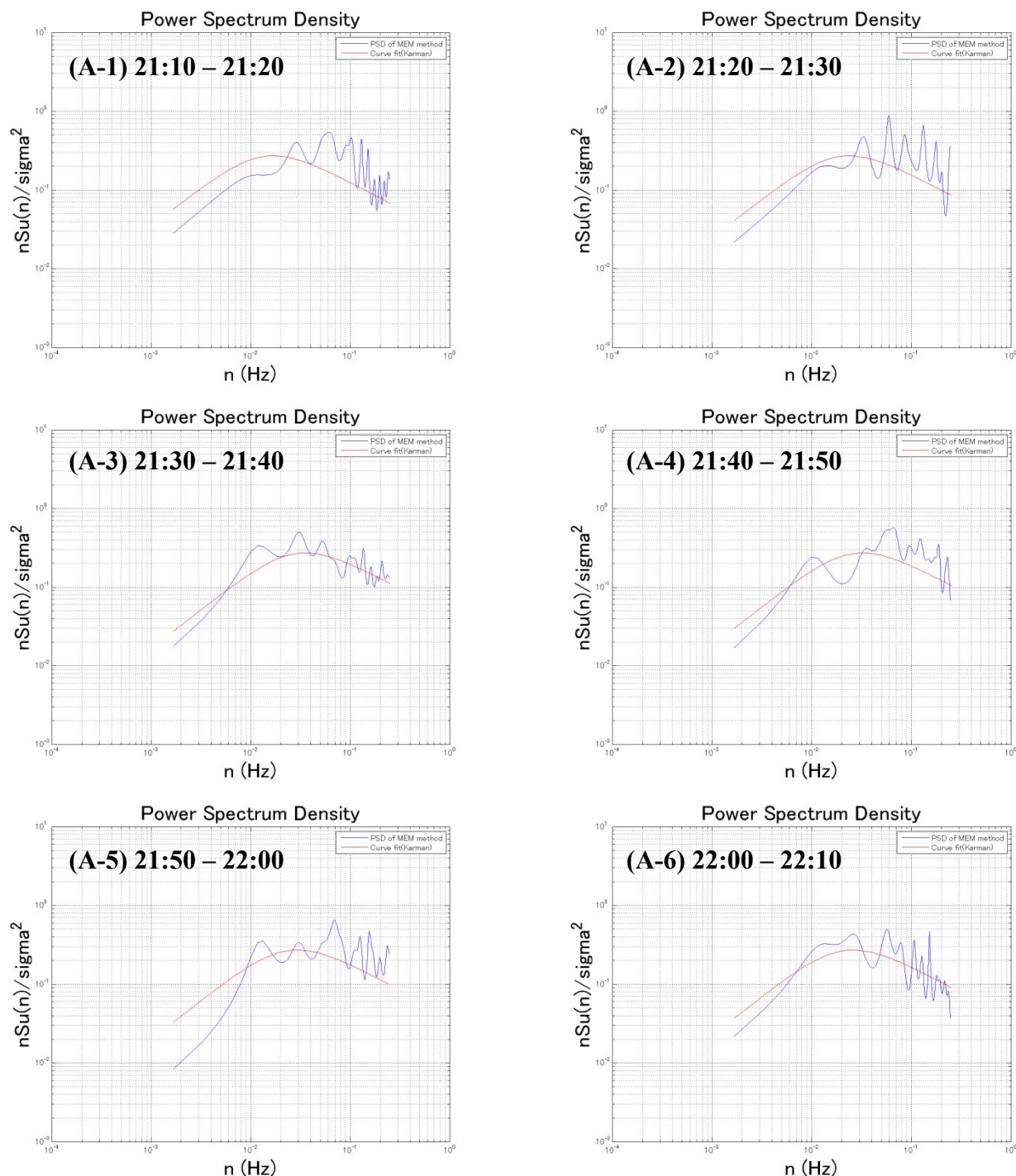


図 3.3.8 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

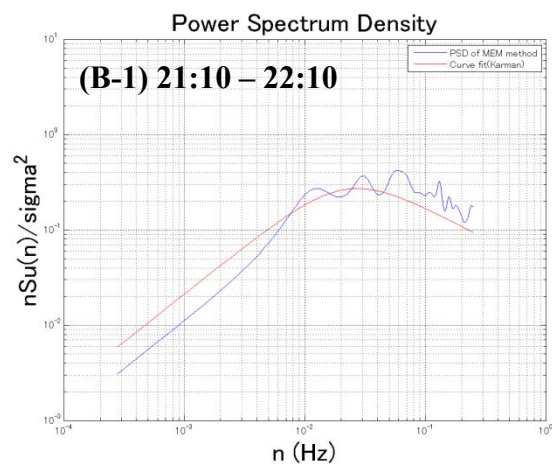


図 3.3.9 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (A-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=128 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

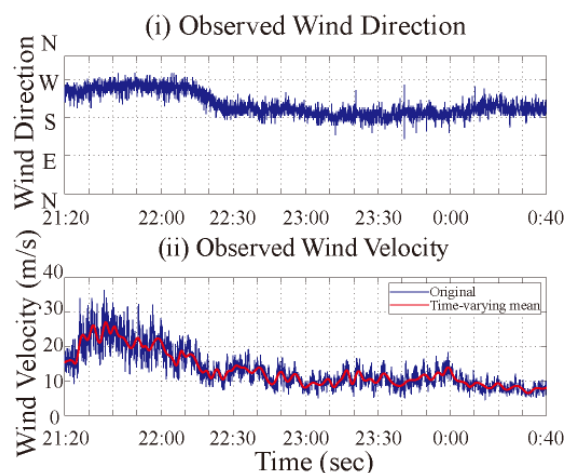


図 3.3.10 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

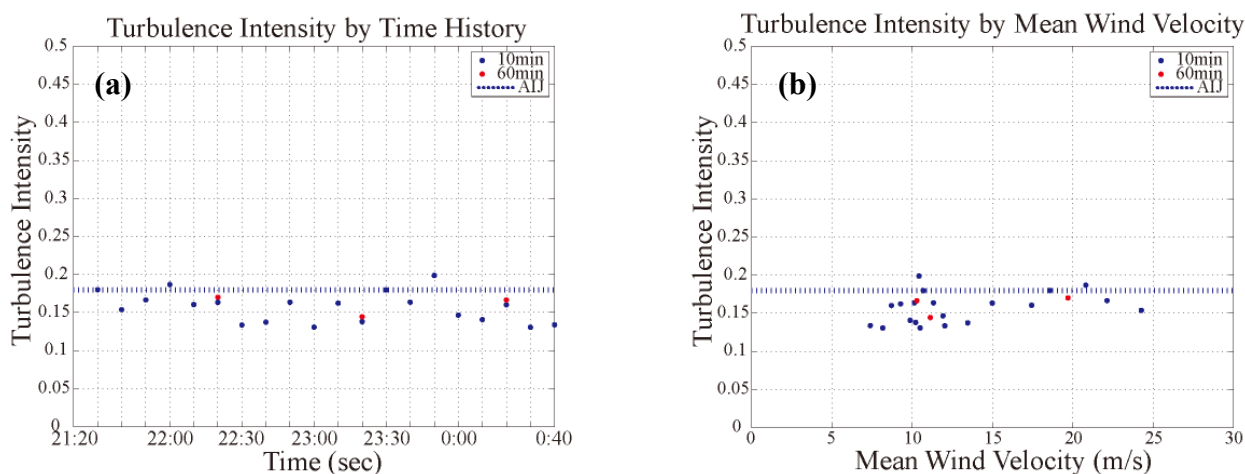


図 3.3.11 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

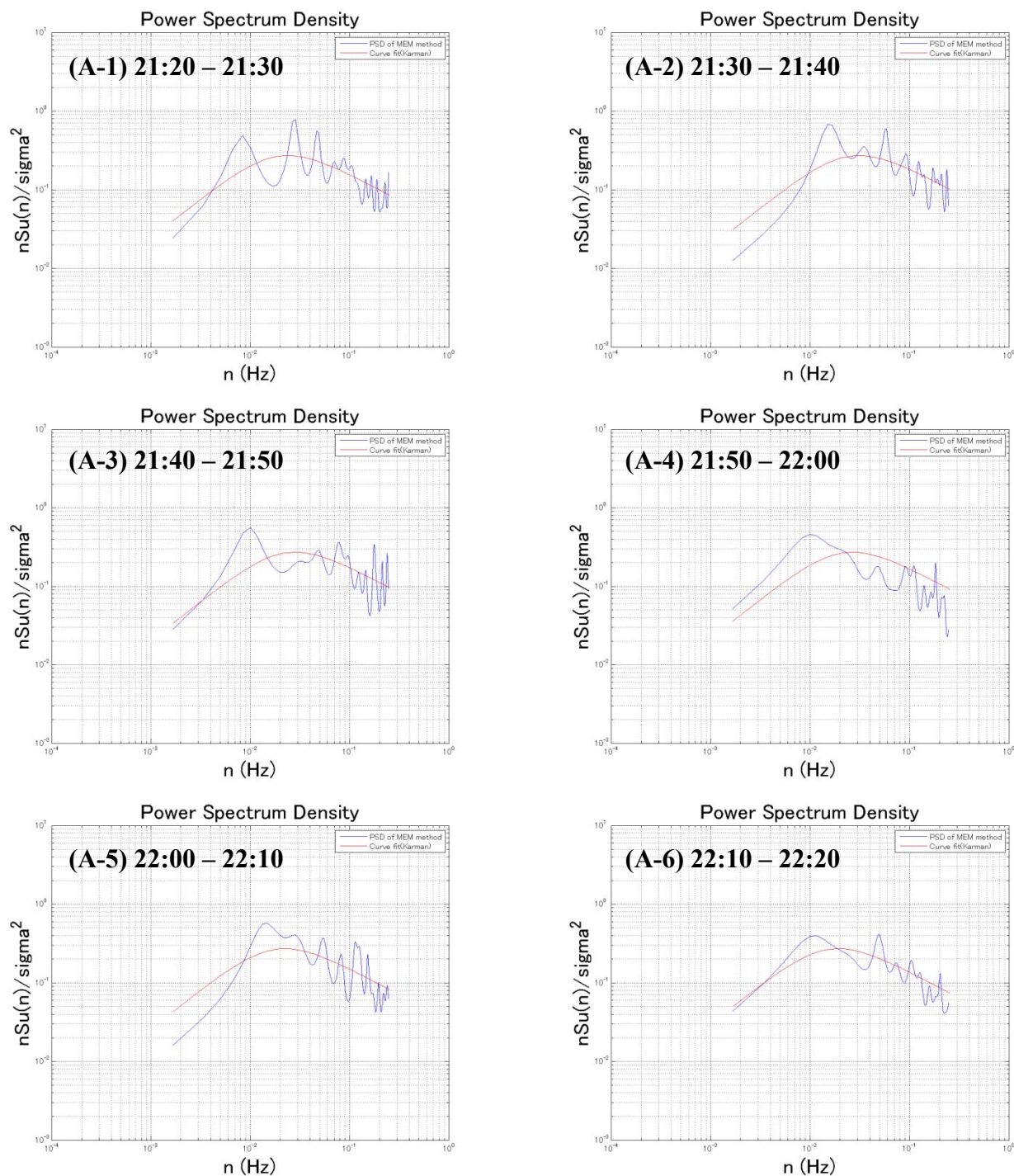


図 3.3.12 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

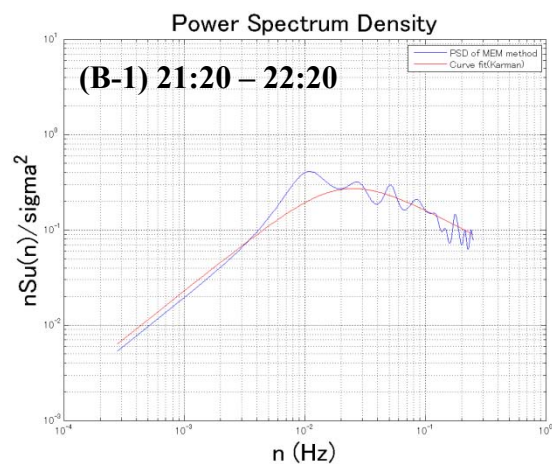


図 3.3.13 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (B-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=128 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

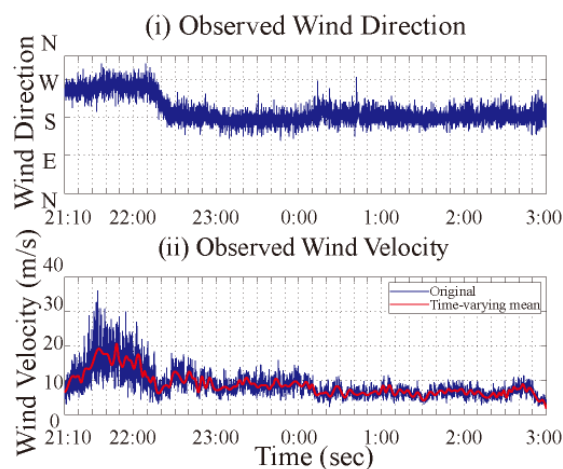


図 3.3.14 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

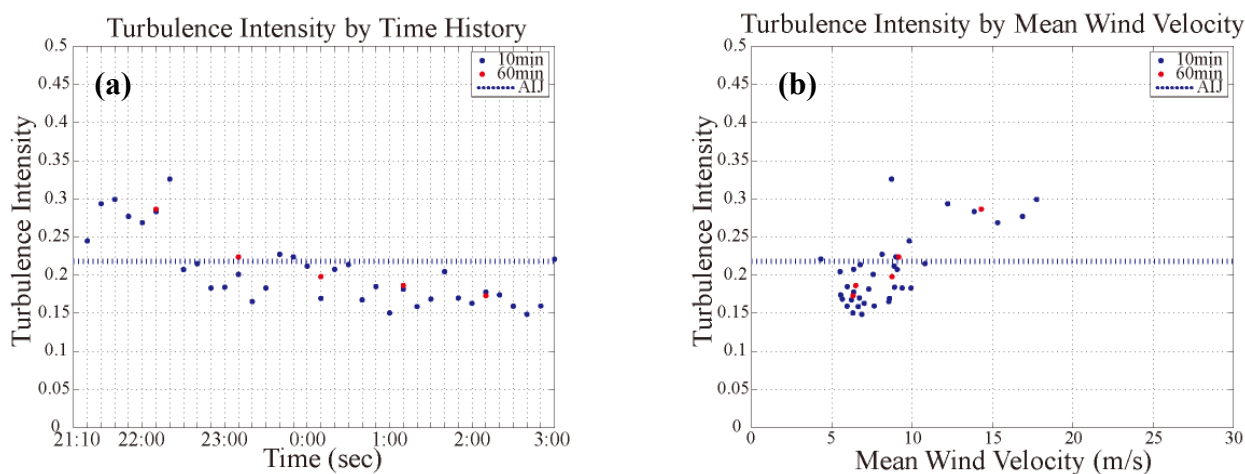


図 3.3.15 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

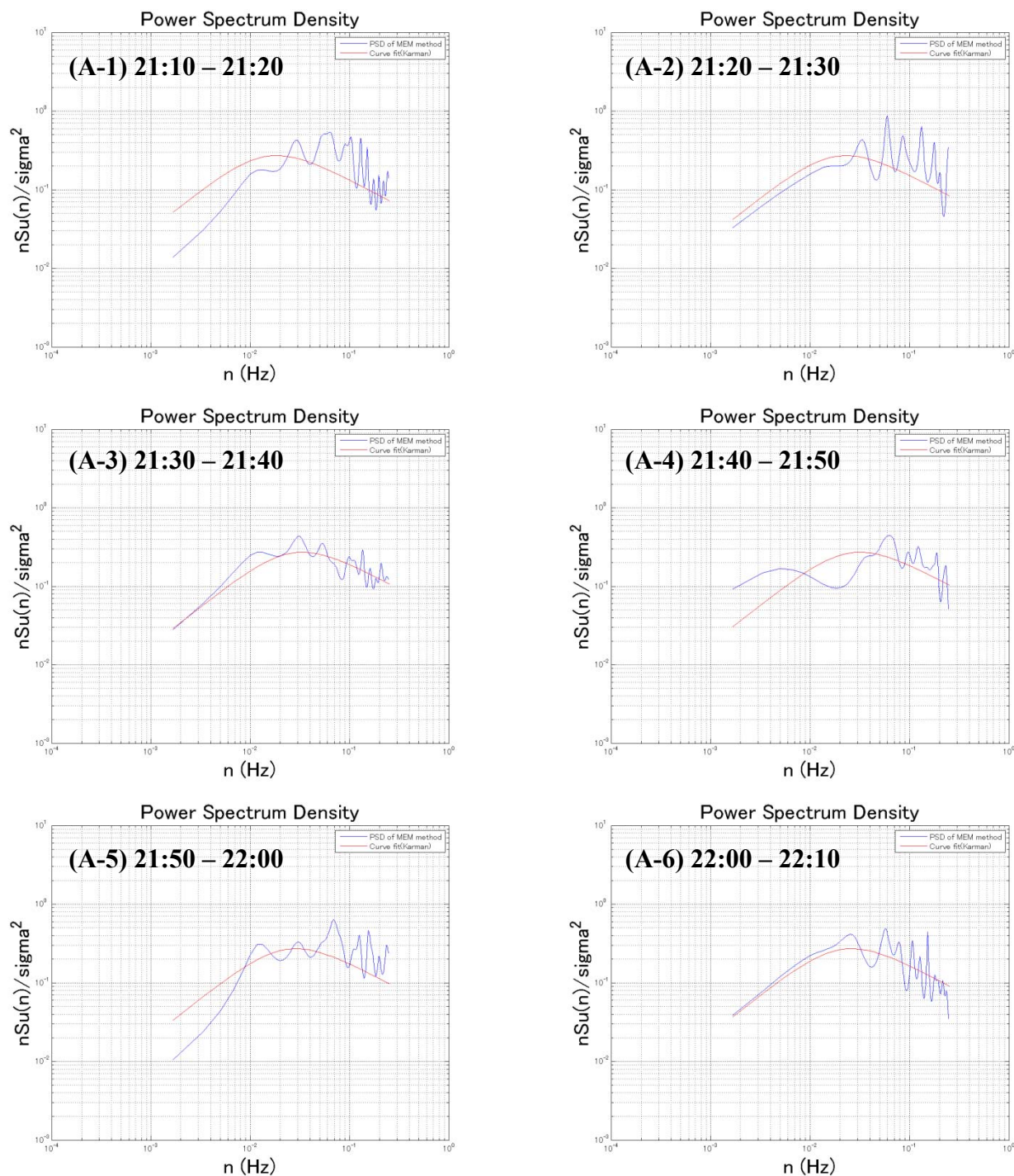


図 3.3.16 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

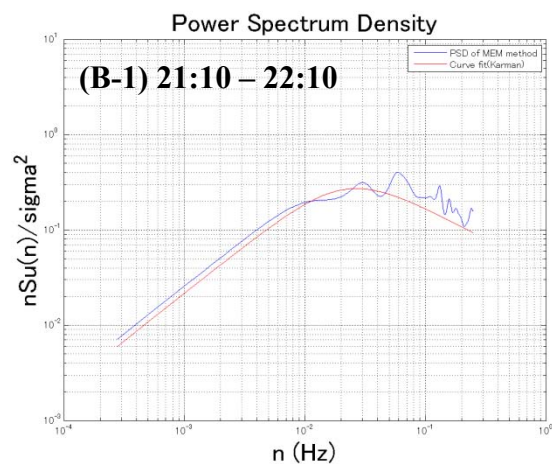


図 3.3.17 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (B-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=128 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

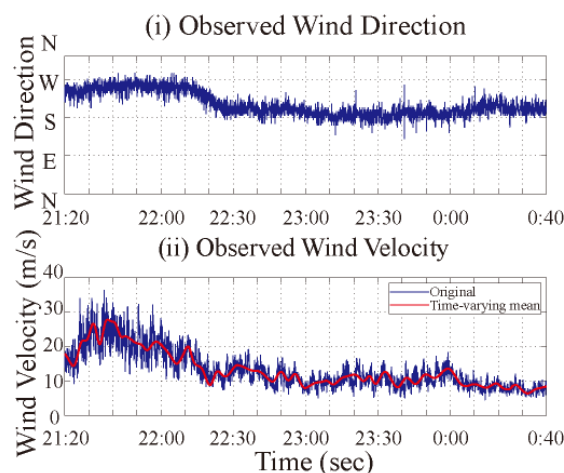


図 3.3.18 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

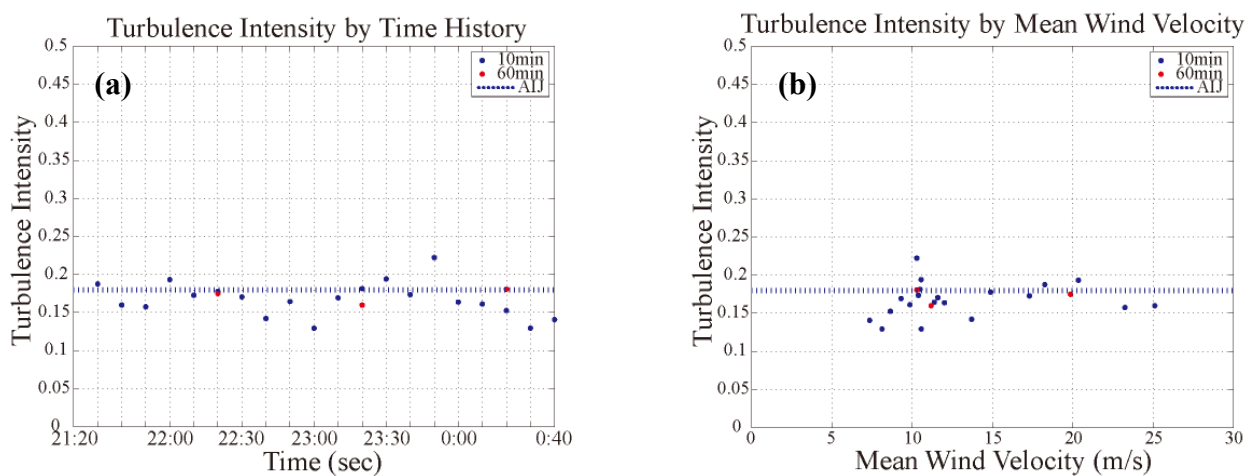


図 3.3.19 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

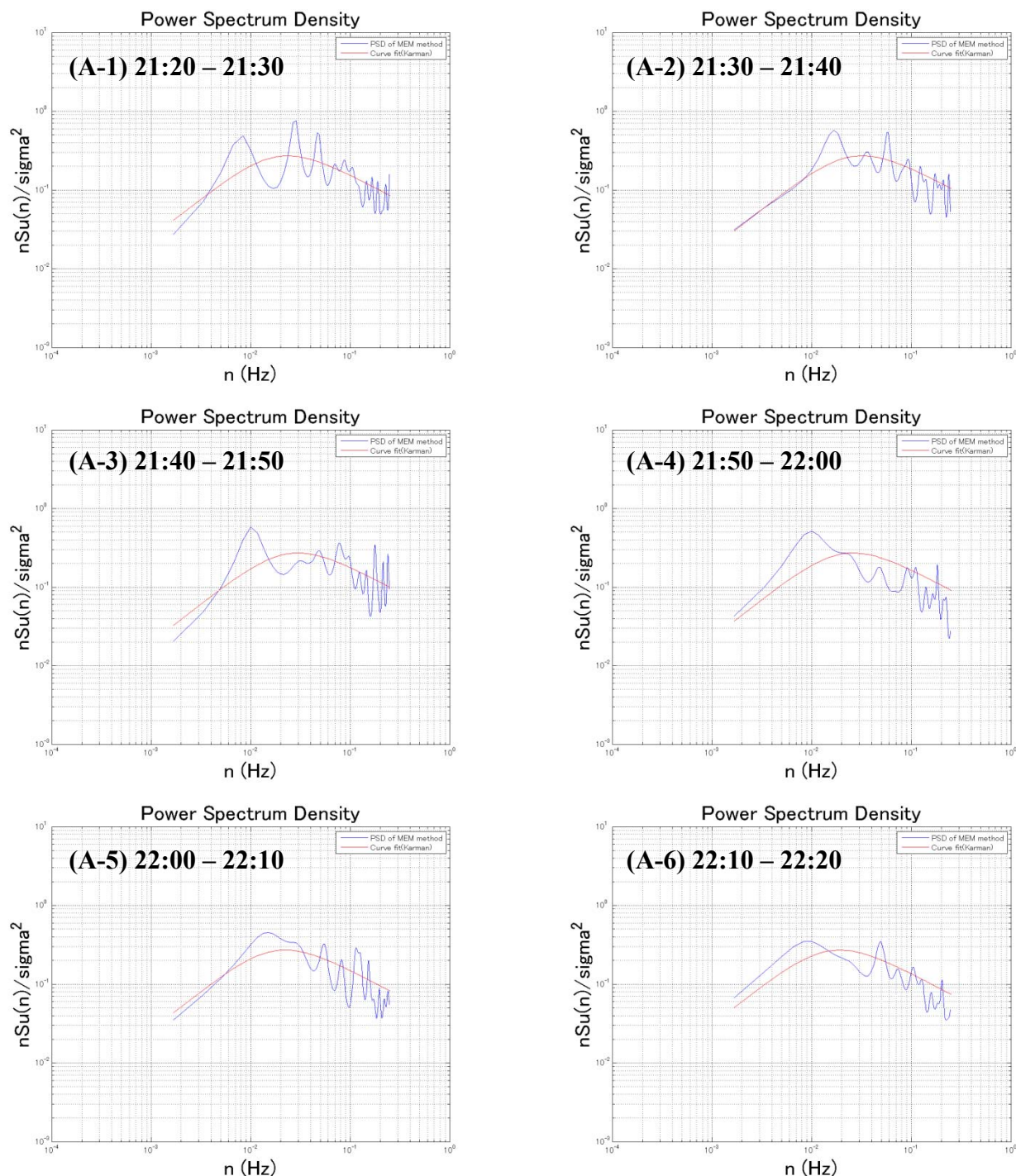


図 3.3.20 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

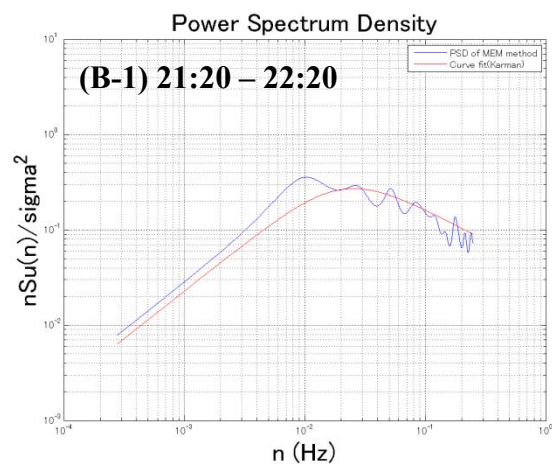


図 3.3.21 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (C-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=256 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

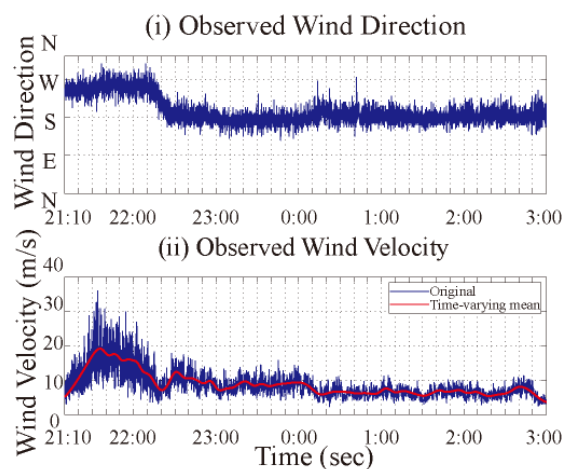


図 3.3.22 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

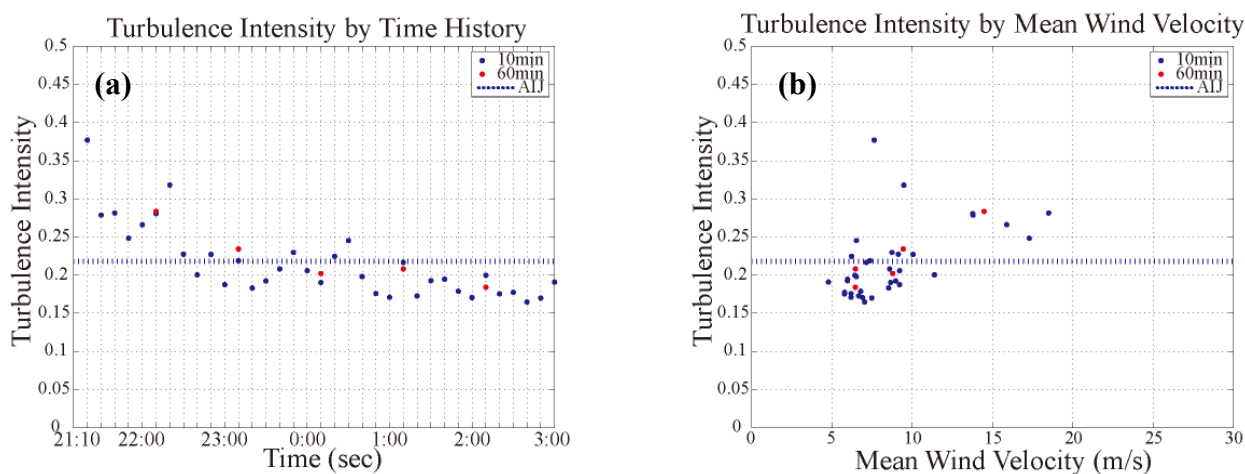


図 3.3.23 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

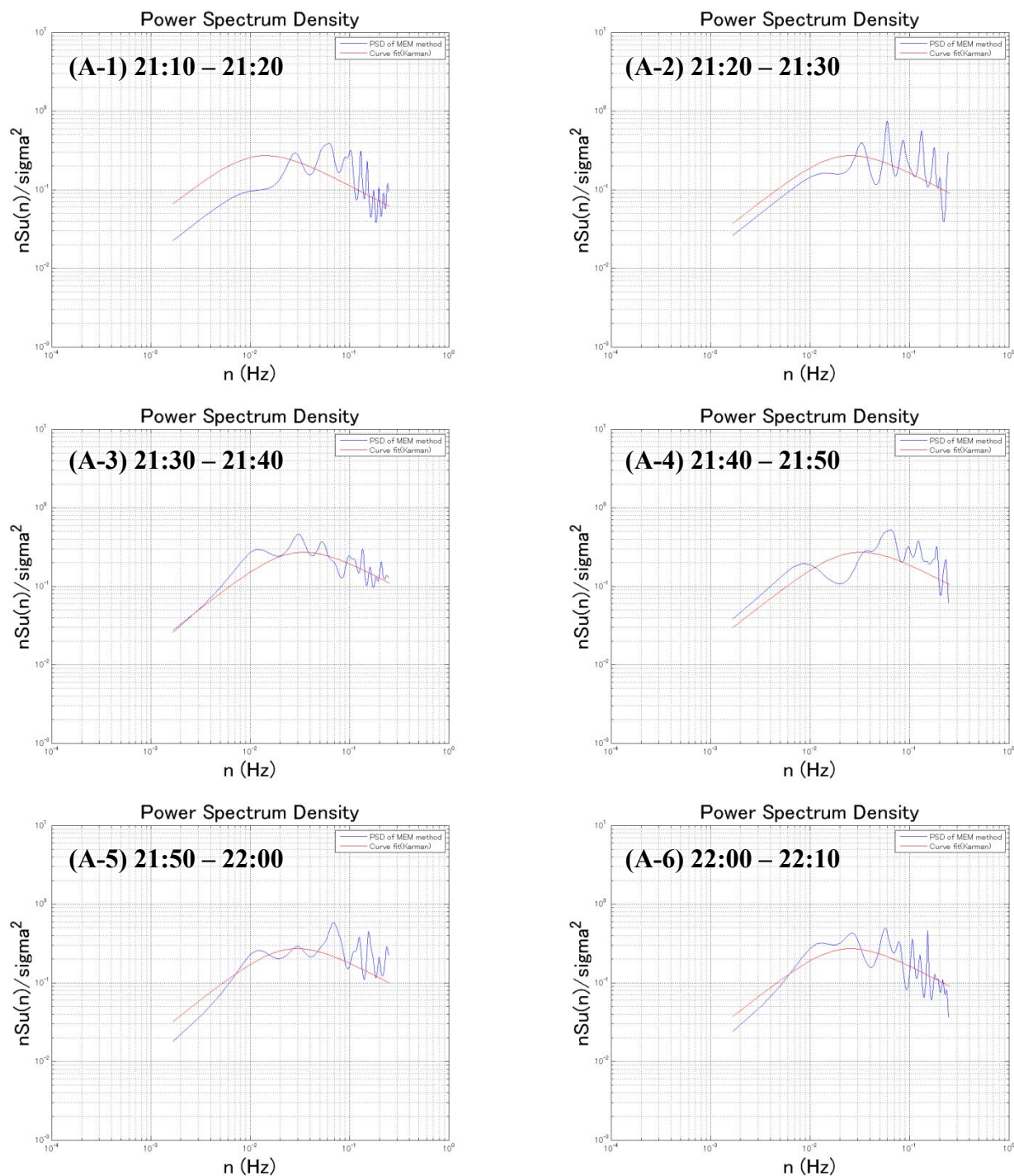


図 3.3.24 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

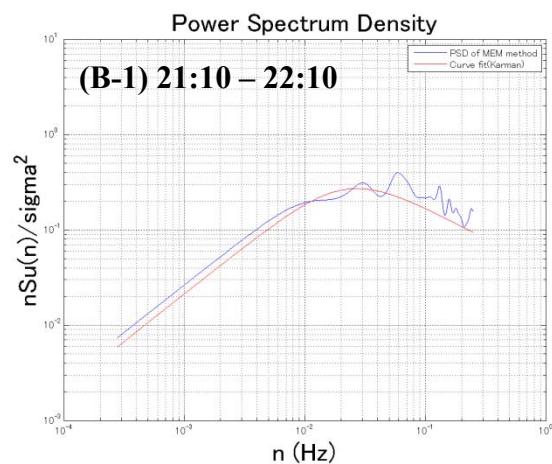


図 3.3.25 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (C-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=256 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

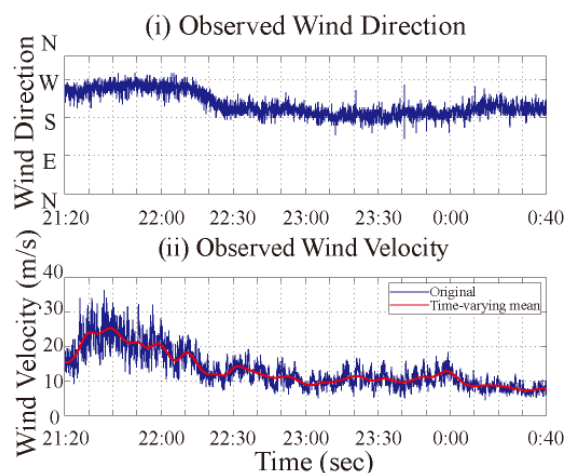


図 3.3.26 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

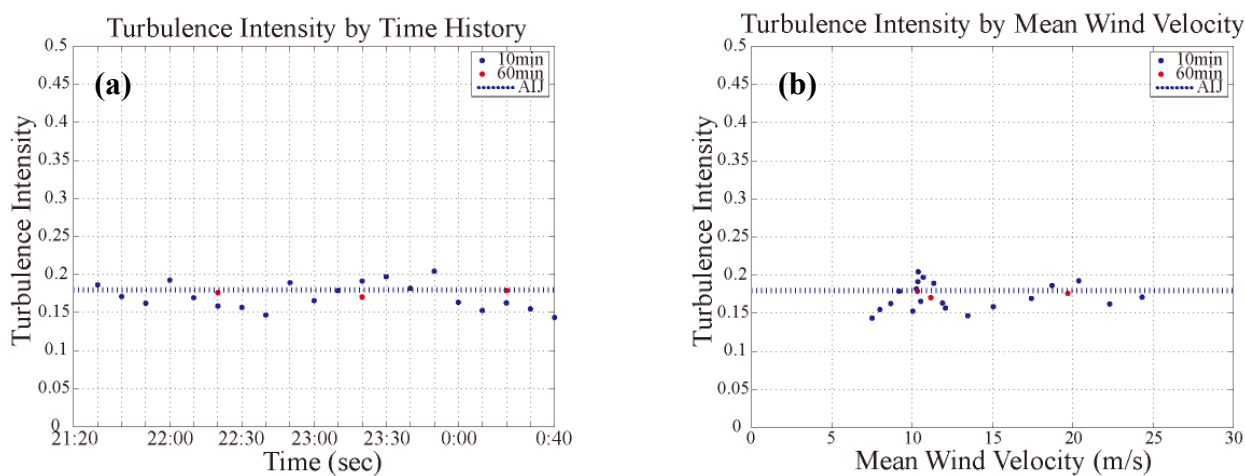


図 3.3.27 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

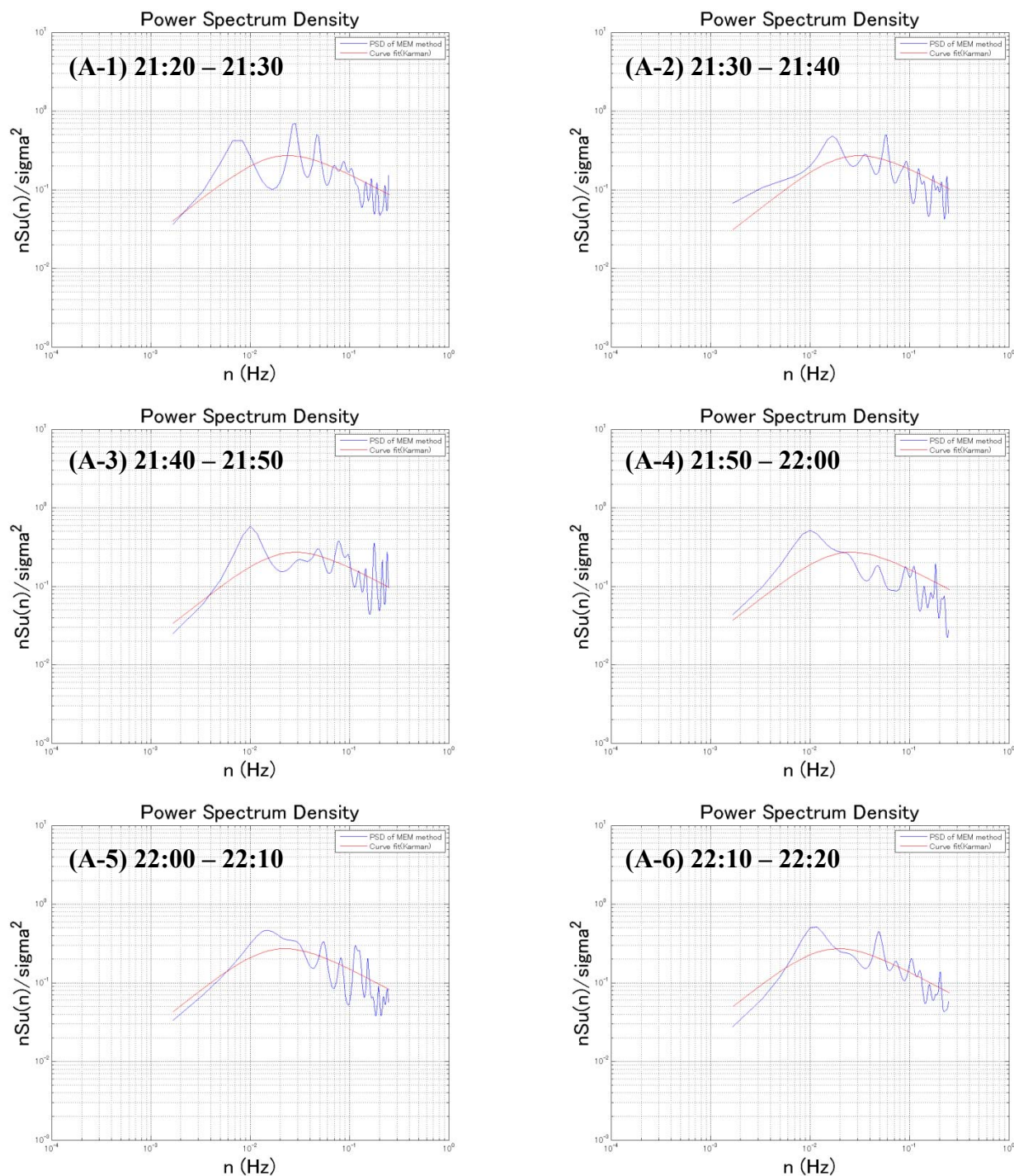


図 3.3.28 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

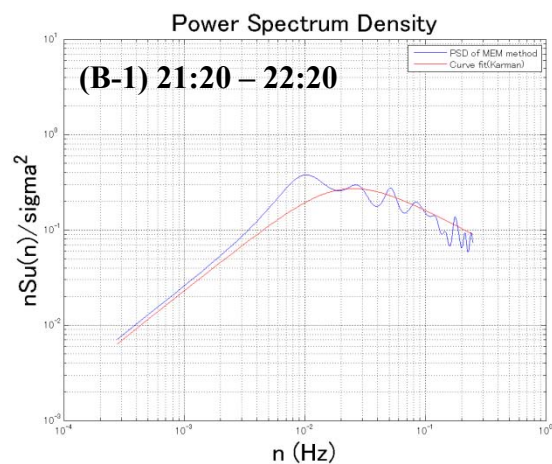


図 3.3.29 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (D-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=256 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

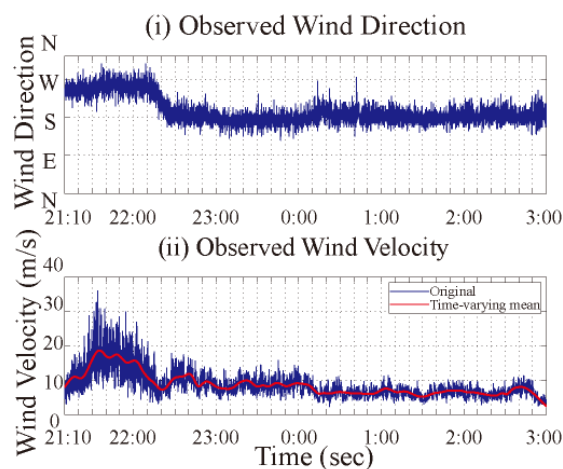


図 3.3.30 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

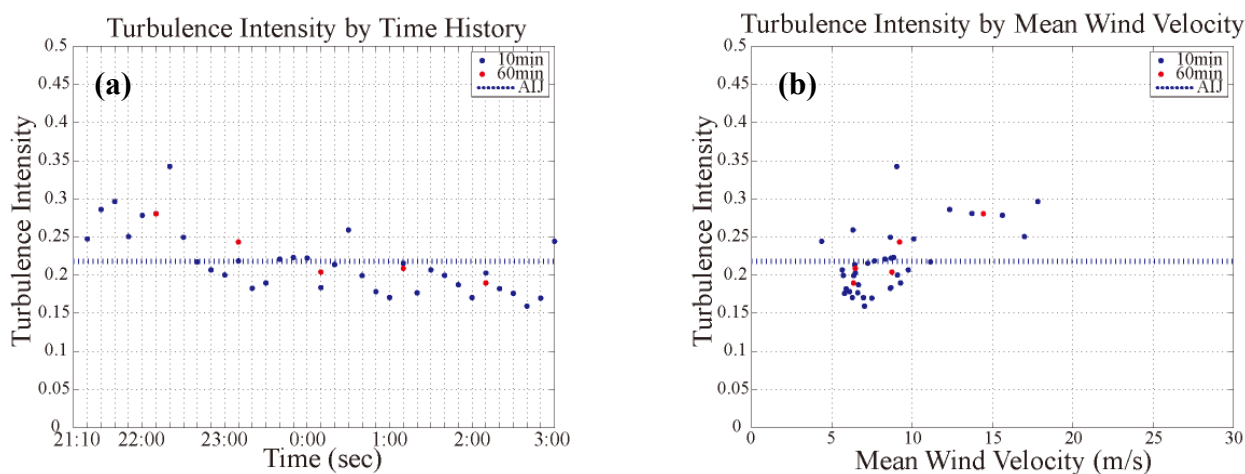


図 3.3.31 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

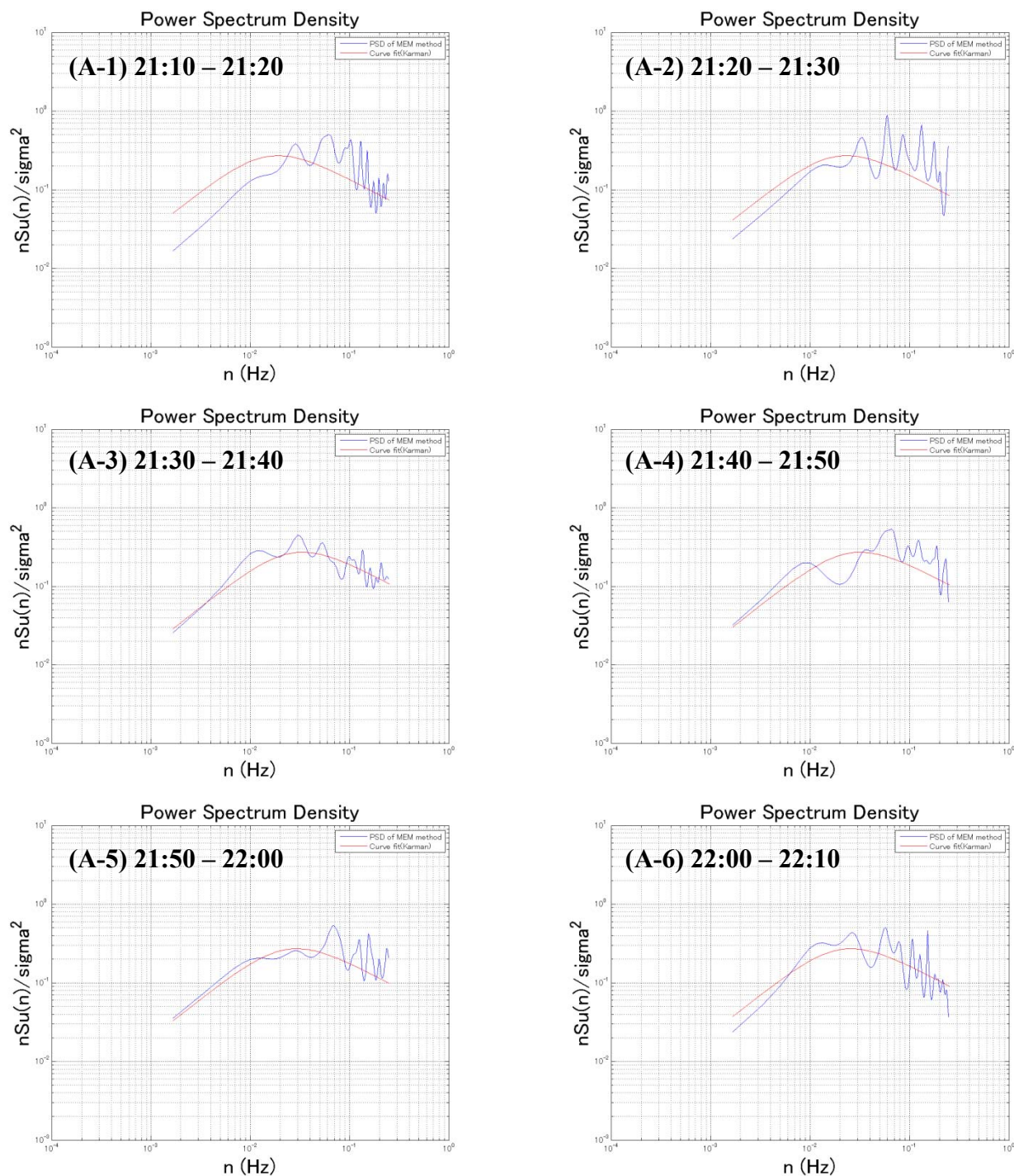


図 3.3.32 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

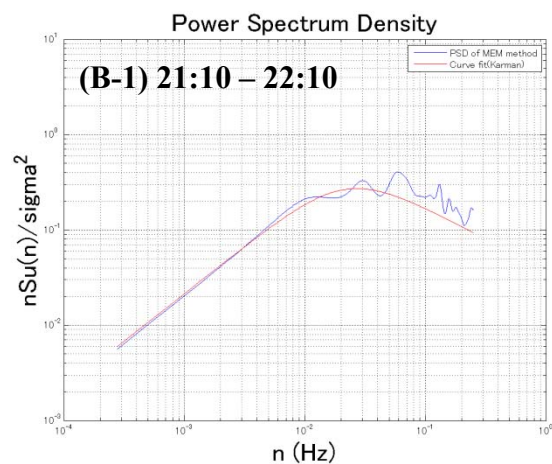


図 3.3.33 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (D-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=256 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

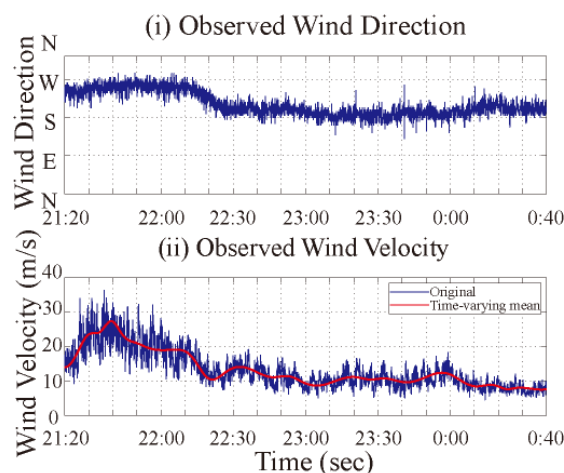


図 3.3.34 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

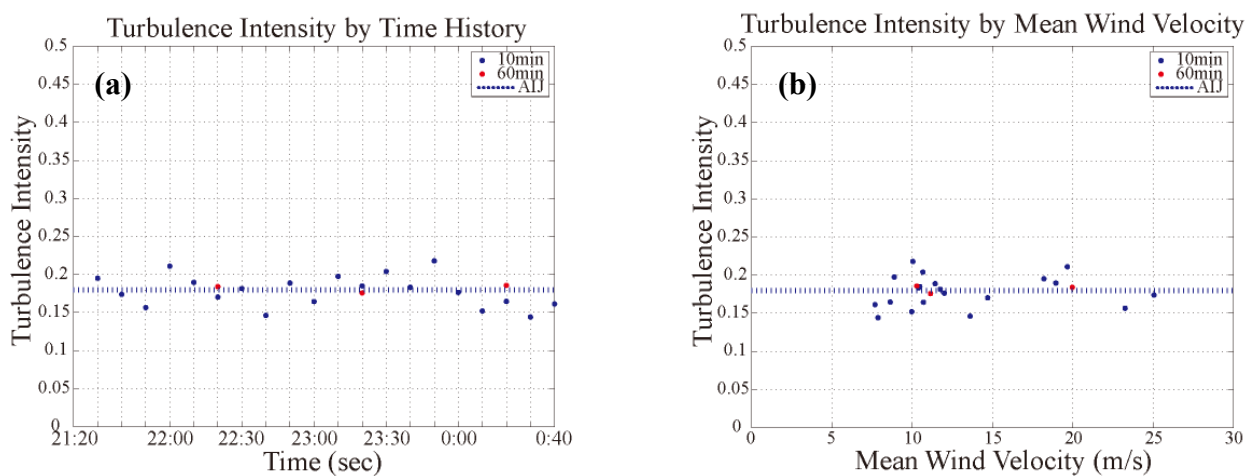


図 3.3.35 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

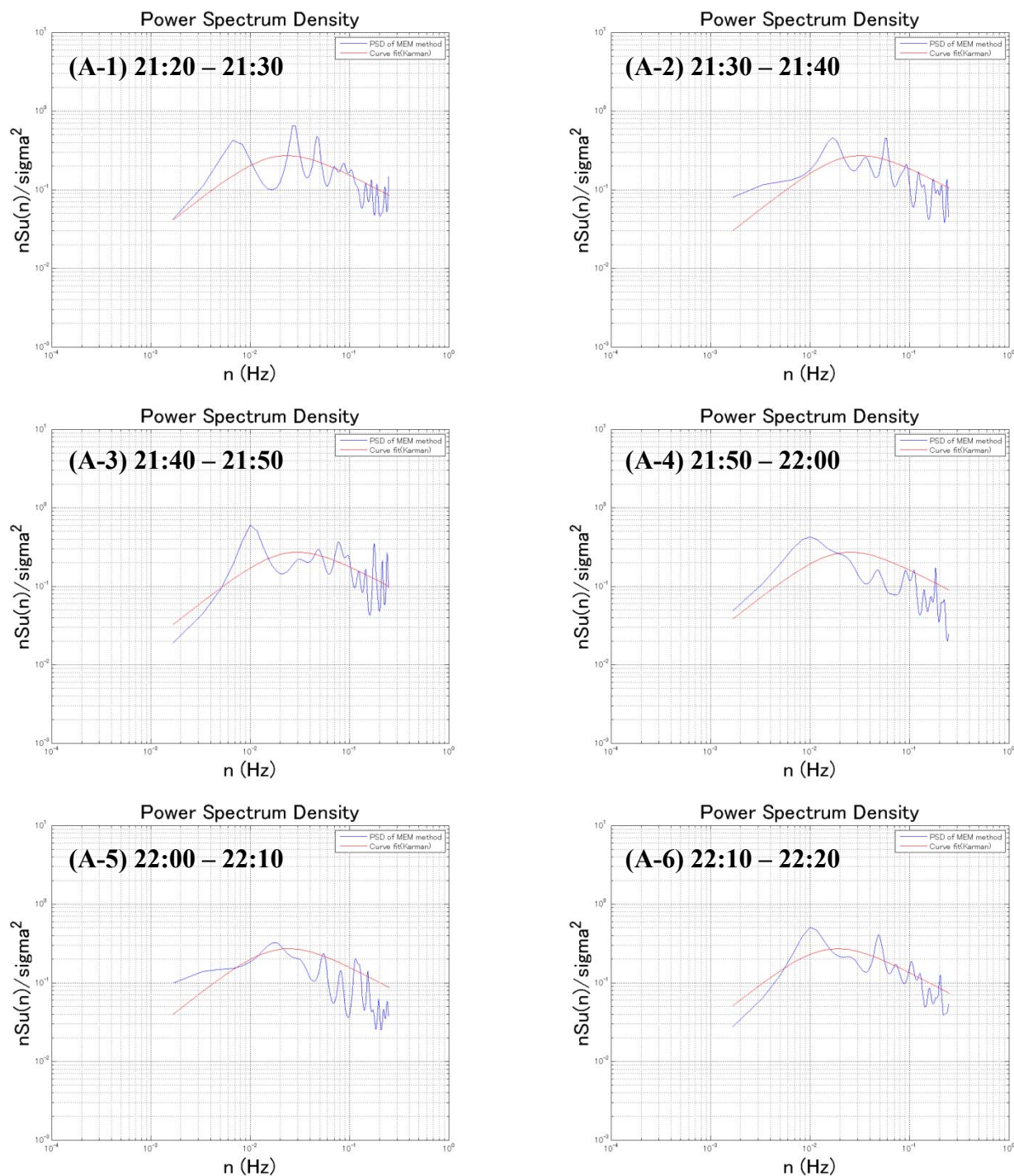


図 3.3.36 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

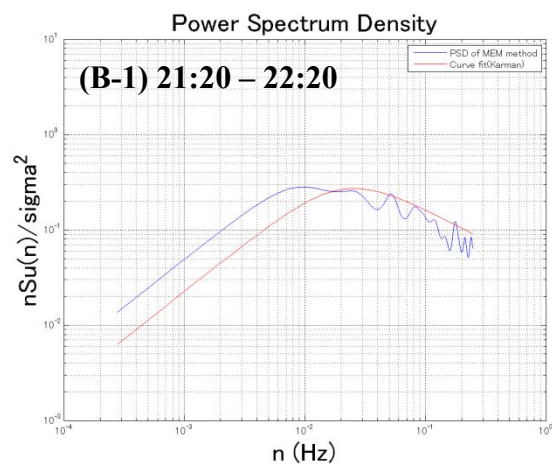


図 3.3.37 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (E-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=512 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

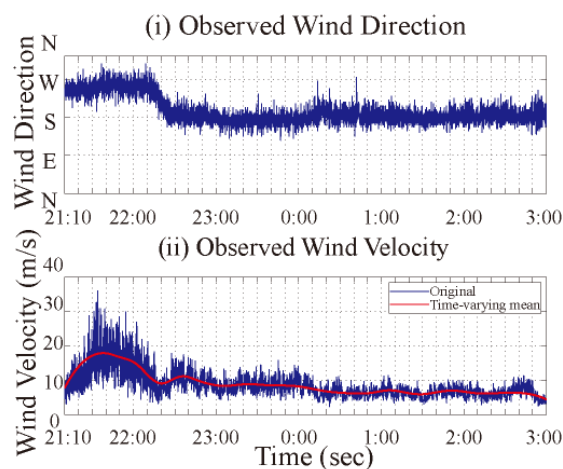


図 3.3.38 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

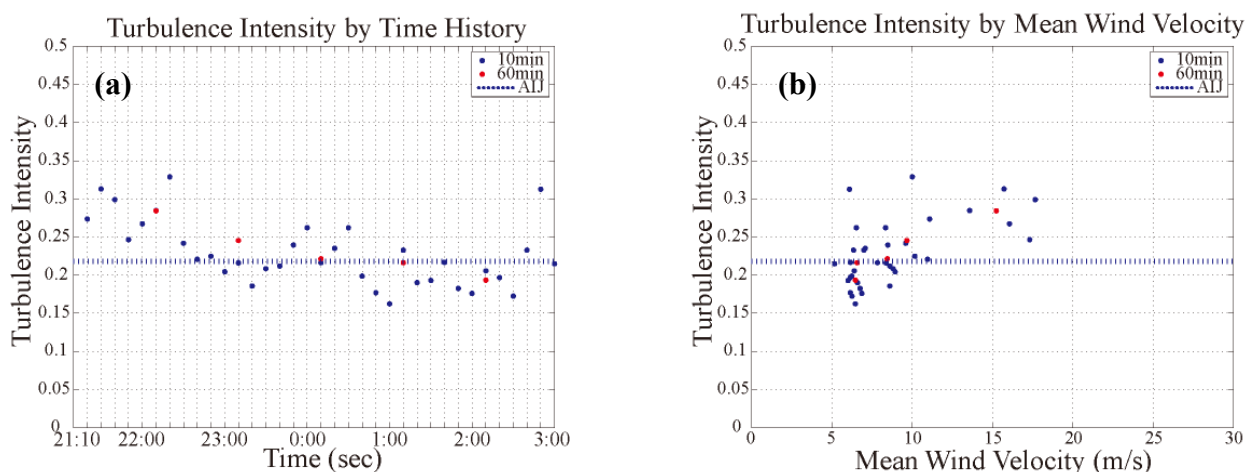


図 3.3.39 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

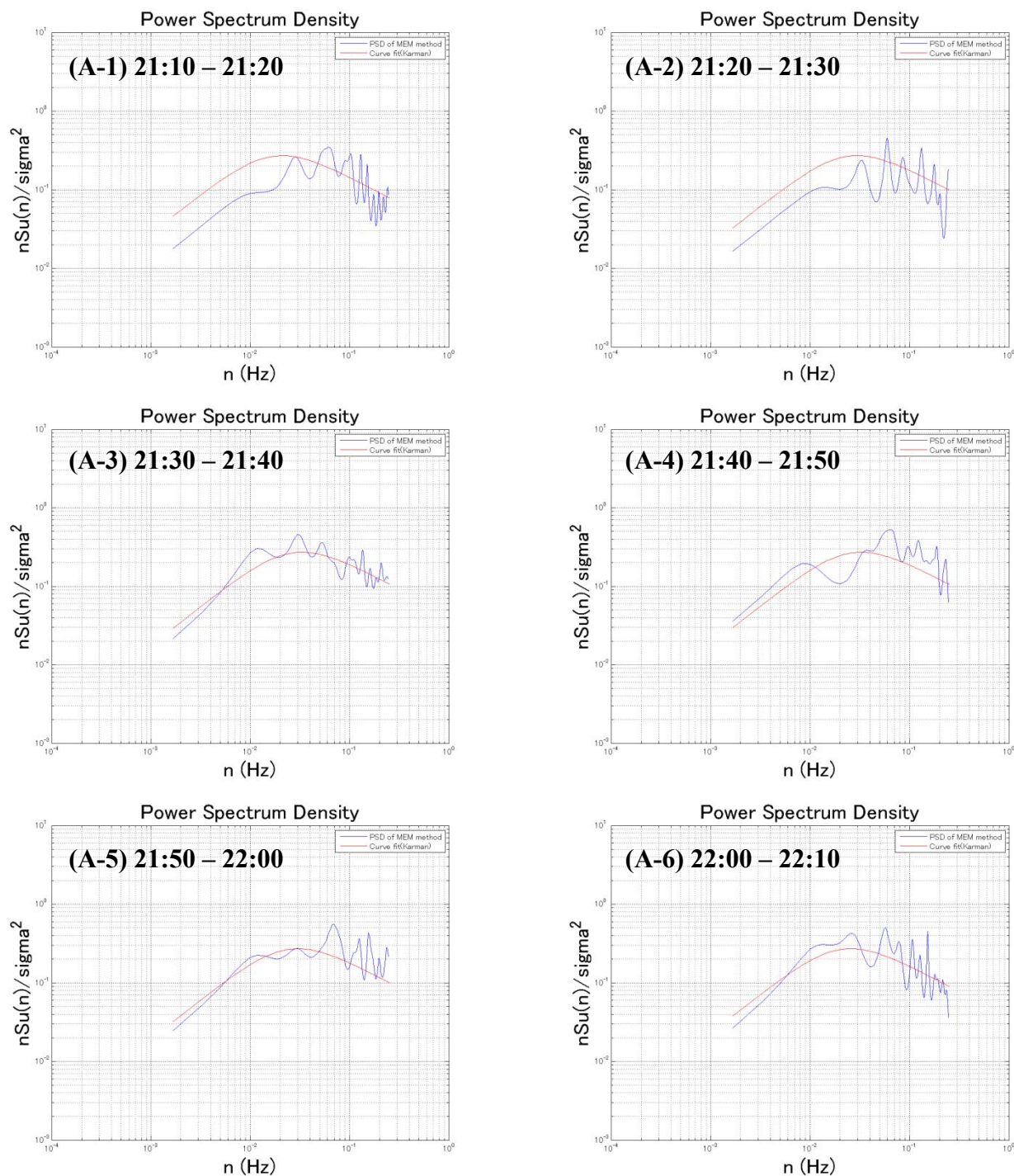


図 3.3.40 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

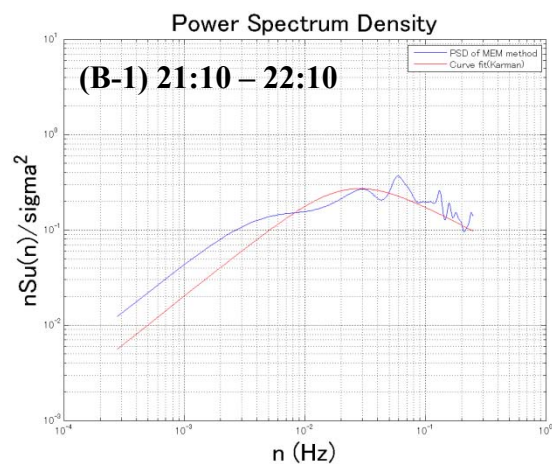


図 3.3.41 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (E-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=512 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

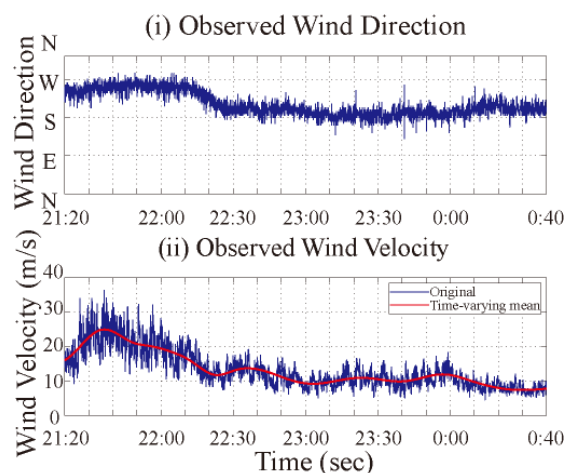


図 3.3.42 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

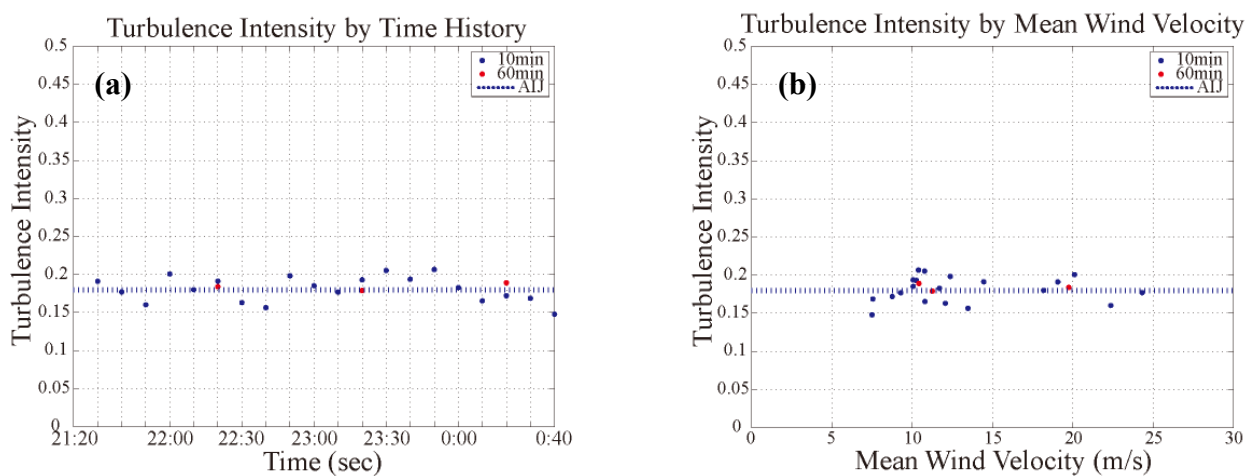


図 3.3.43 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

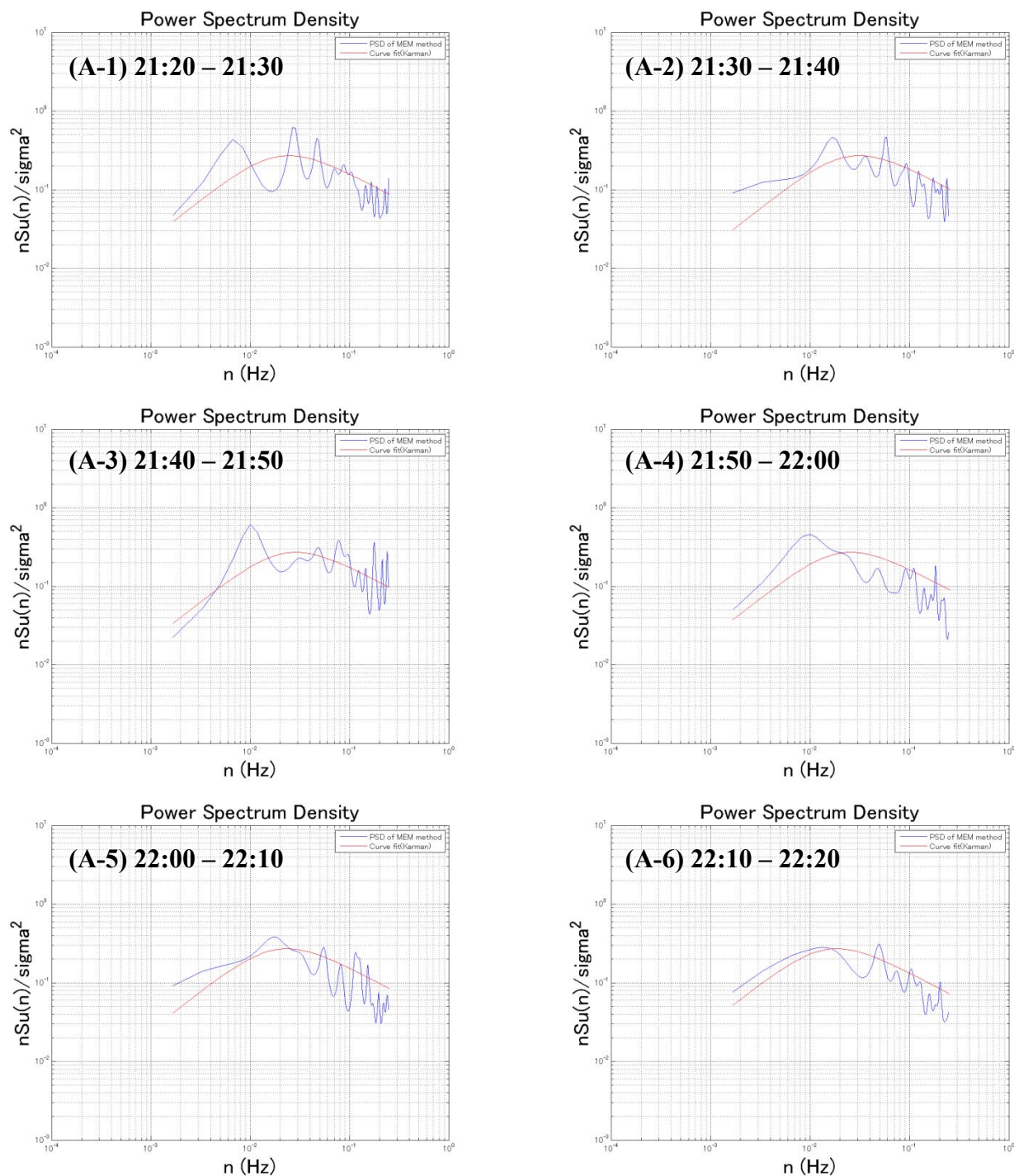


図 3.3.44 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

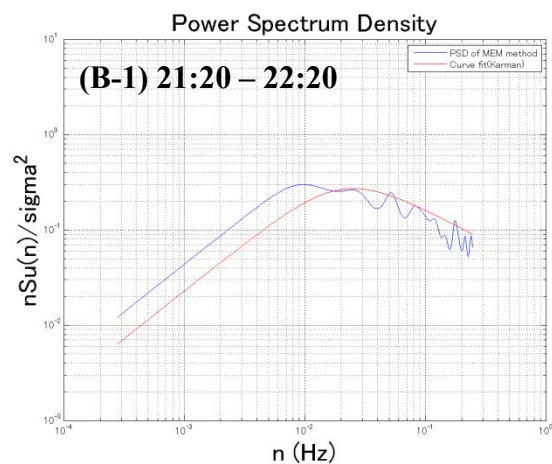


図 3.3.45 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (F-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=512 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

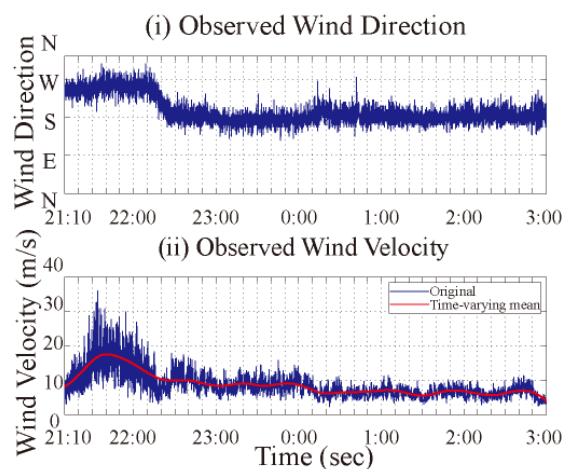


図 3.3.46 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

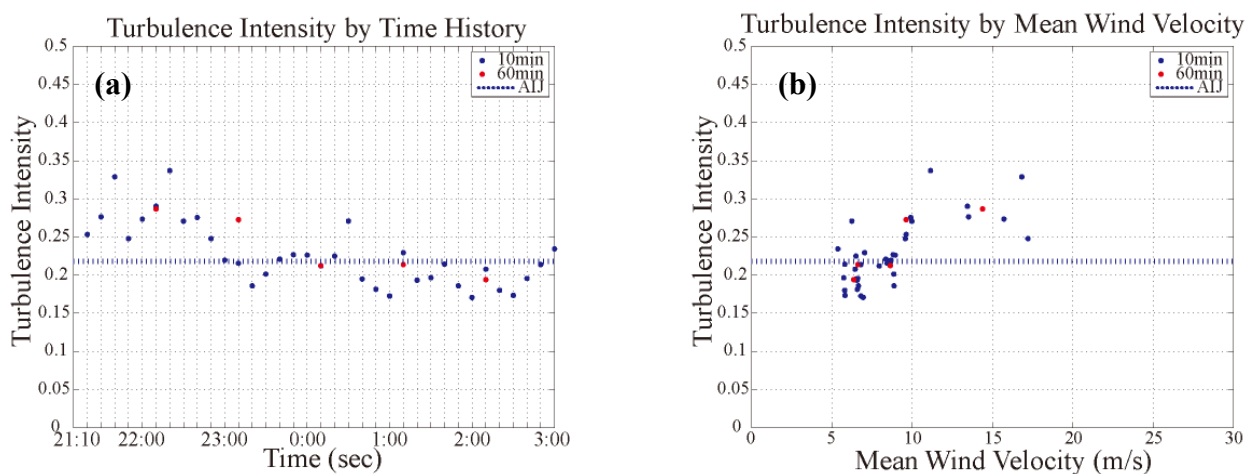


図 3.3.47 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて (式 3.3.15) を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法 (バーク法) を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

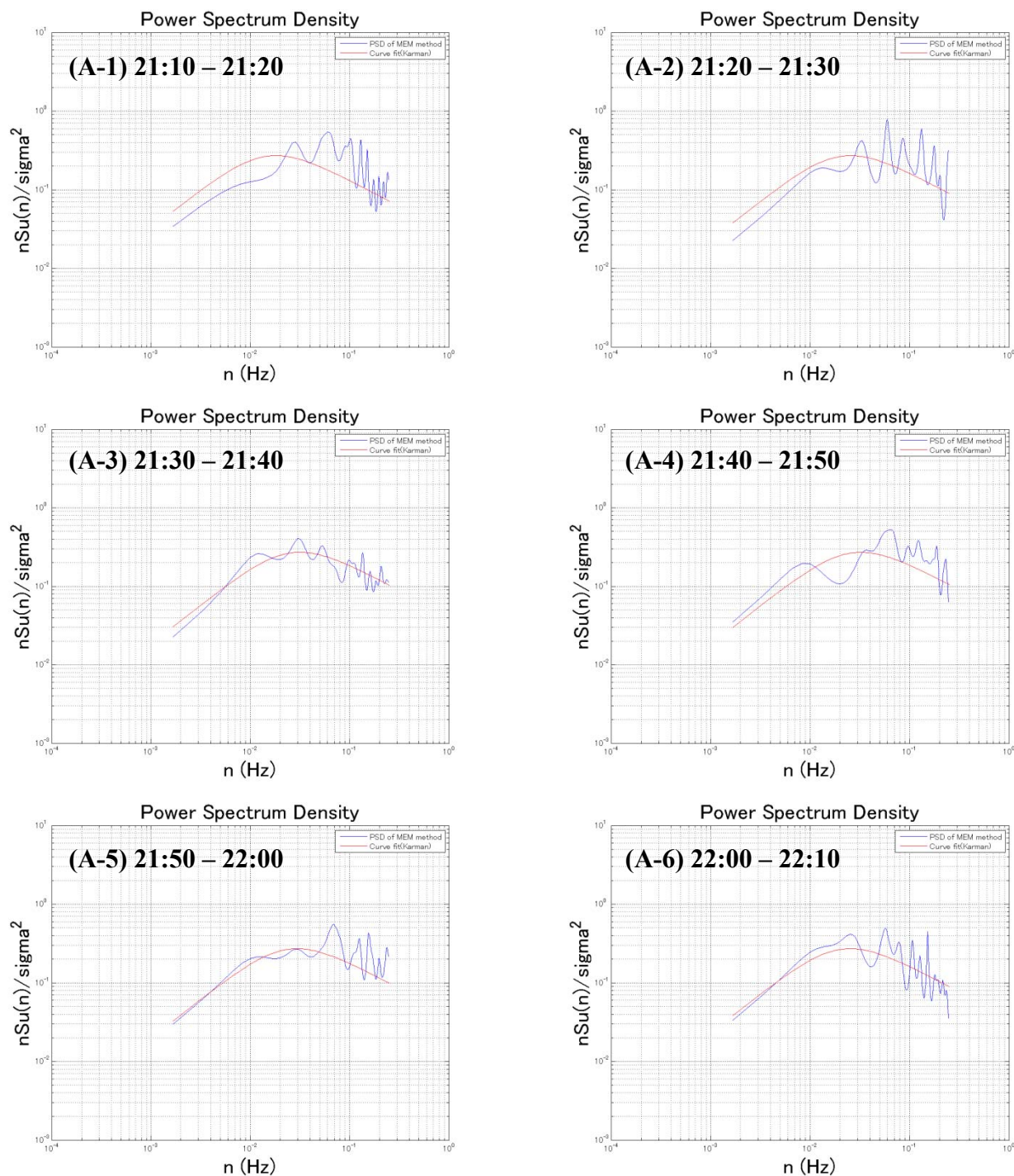


図 3.3.48 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

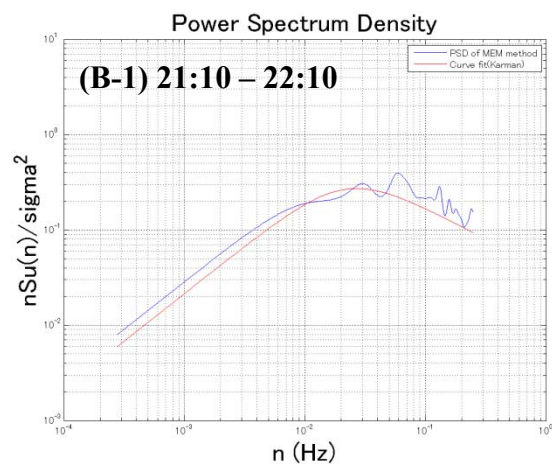


図 3.3.49 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (F-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=512 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

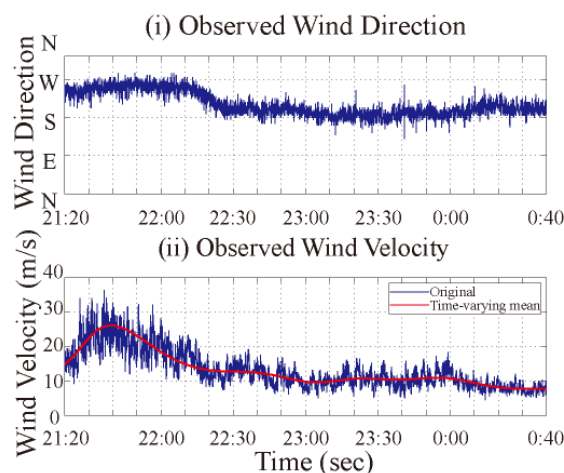


図 3.3.50 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

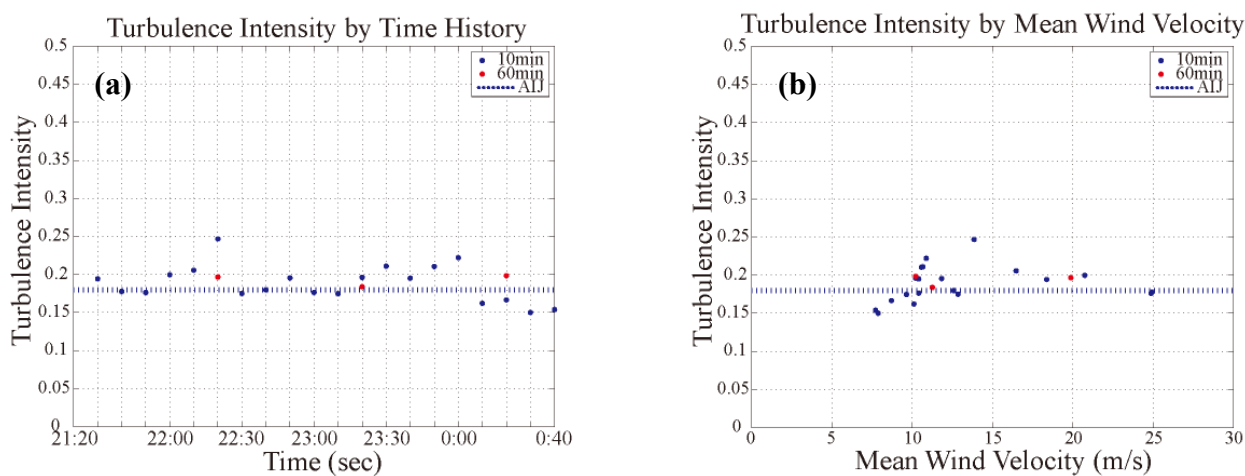


図 3.3.51 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

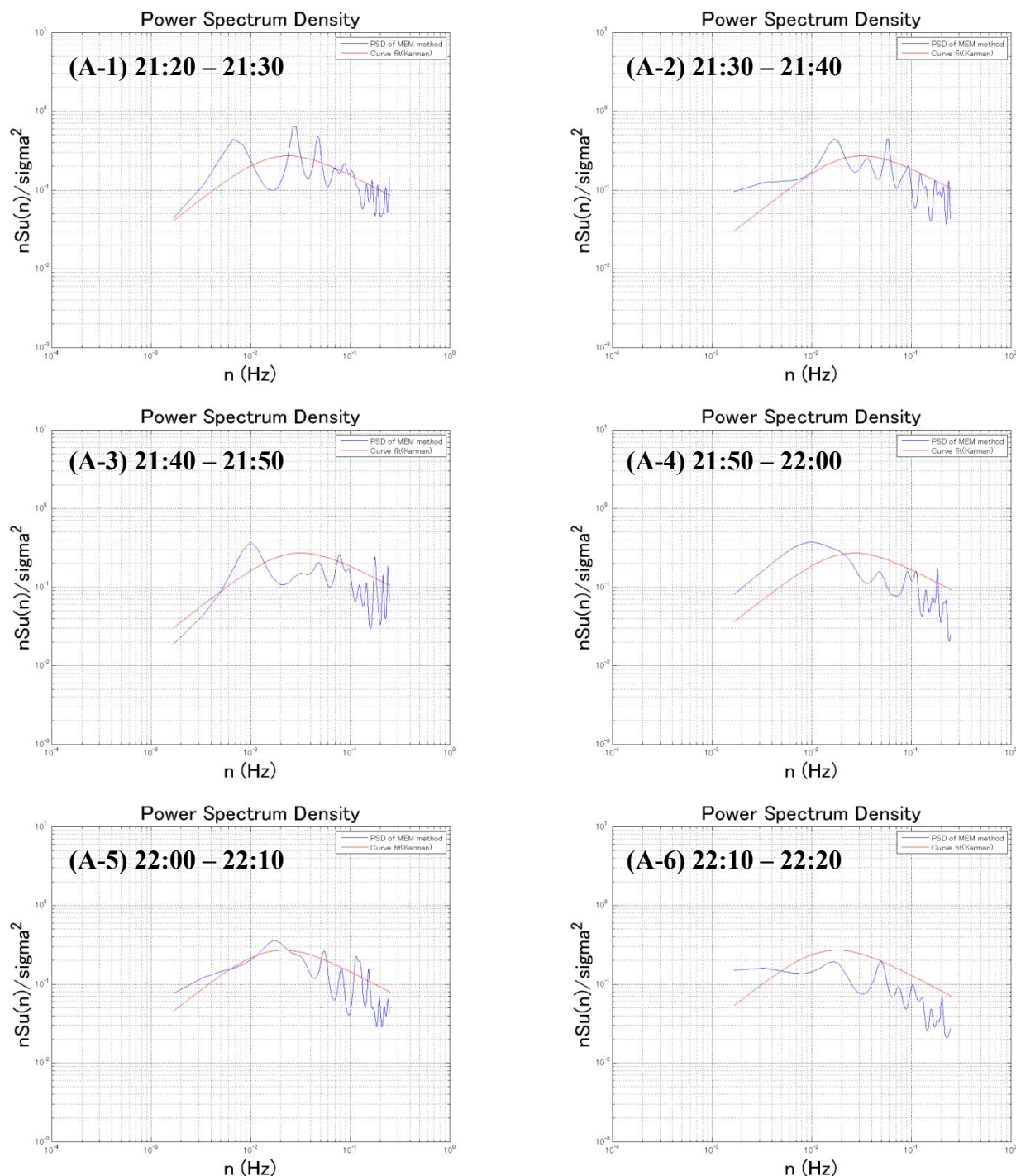


図 3.3.52 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

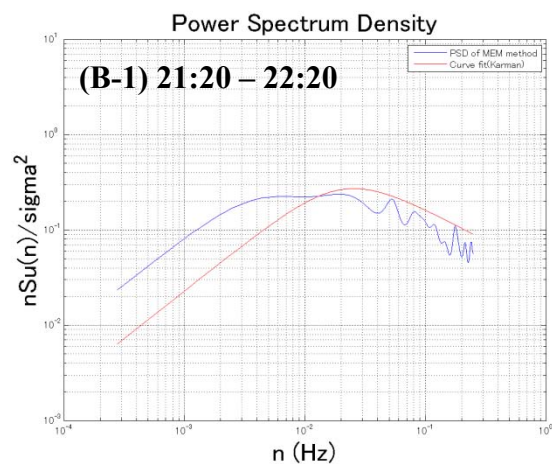


図 3.3.53 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (G-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=1024 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

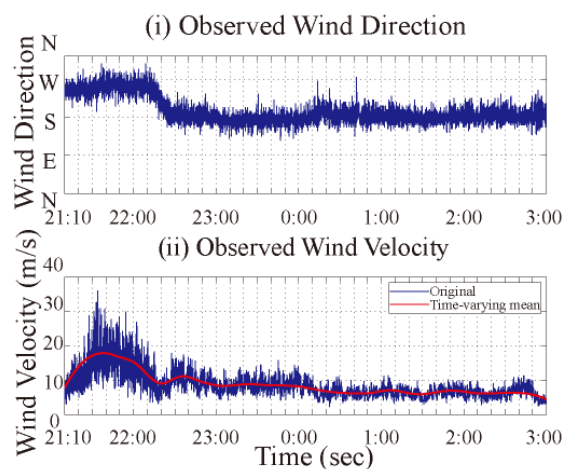


図 3.3.54 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

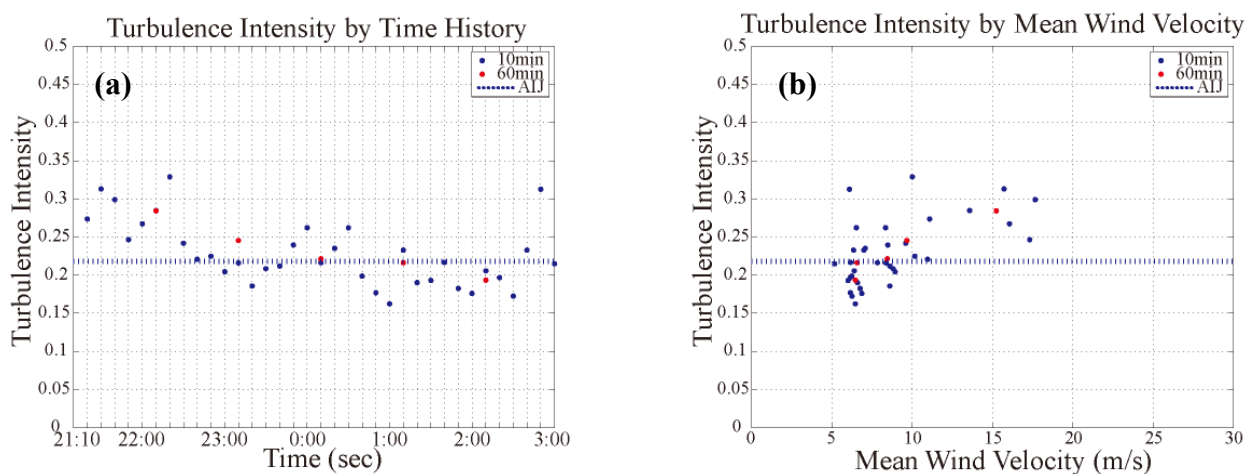


図 3.3.55 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

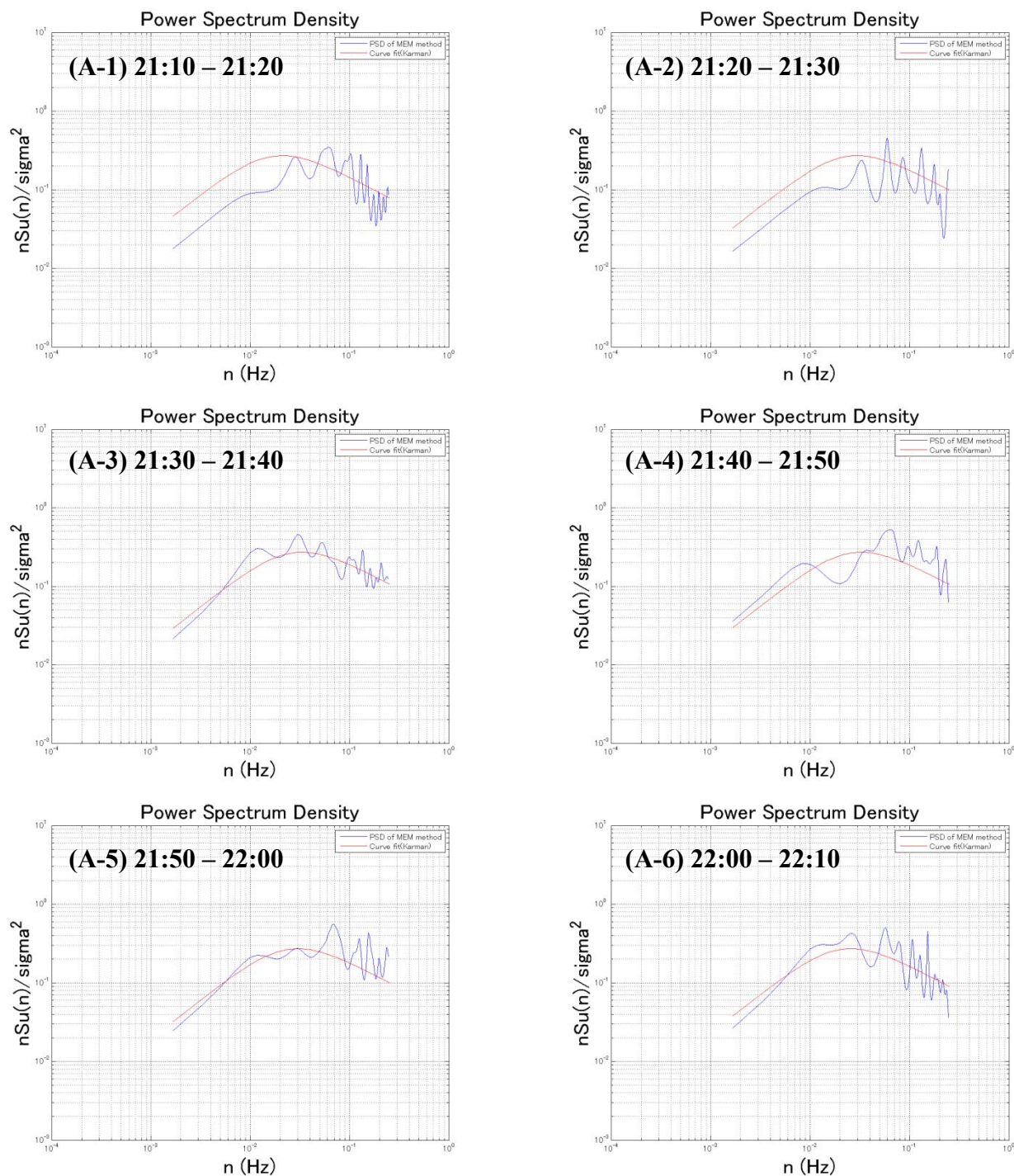


図 3.3.56 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

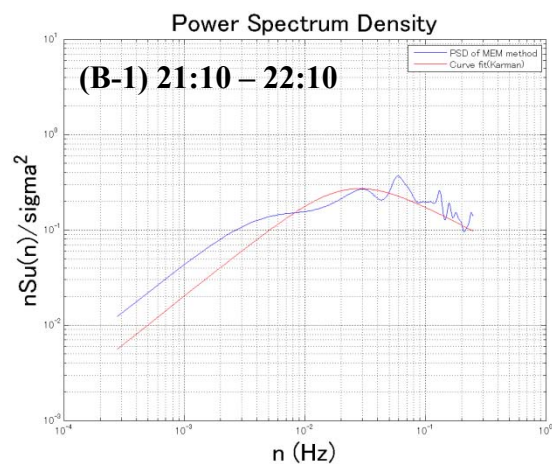


図 3.3.57 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (G-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=1024 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

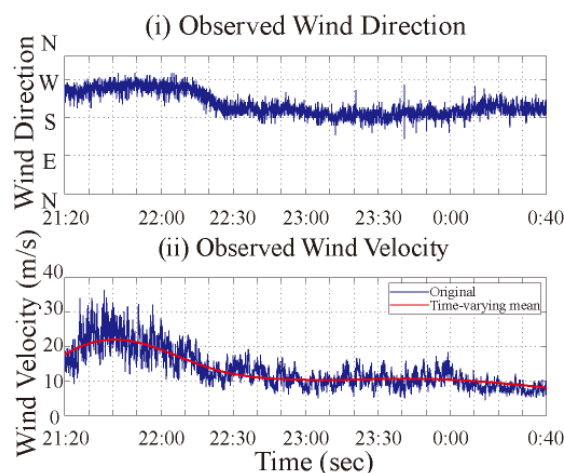


図 3.3.58 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

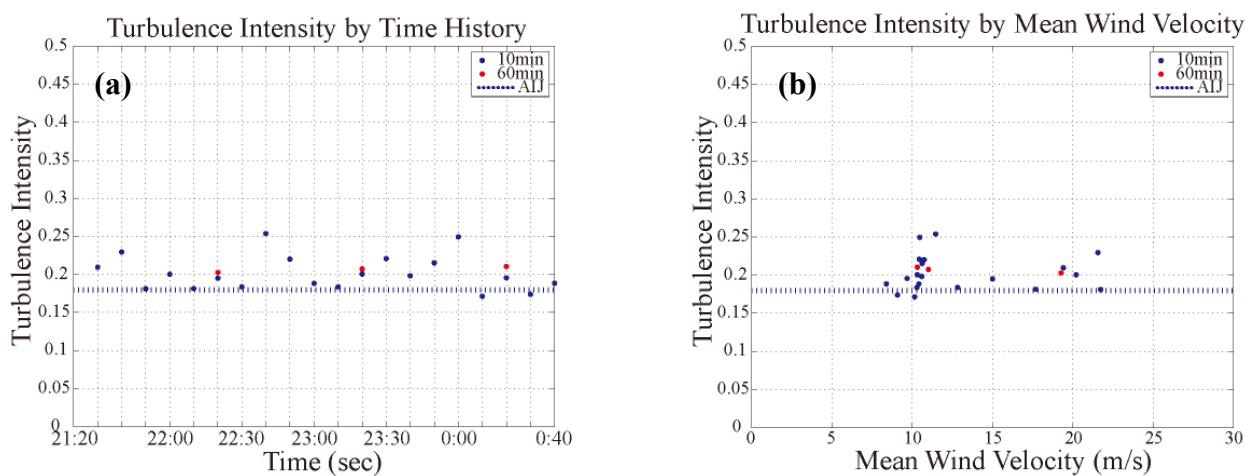


図 3.3.59 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

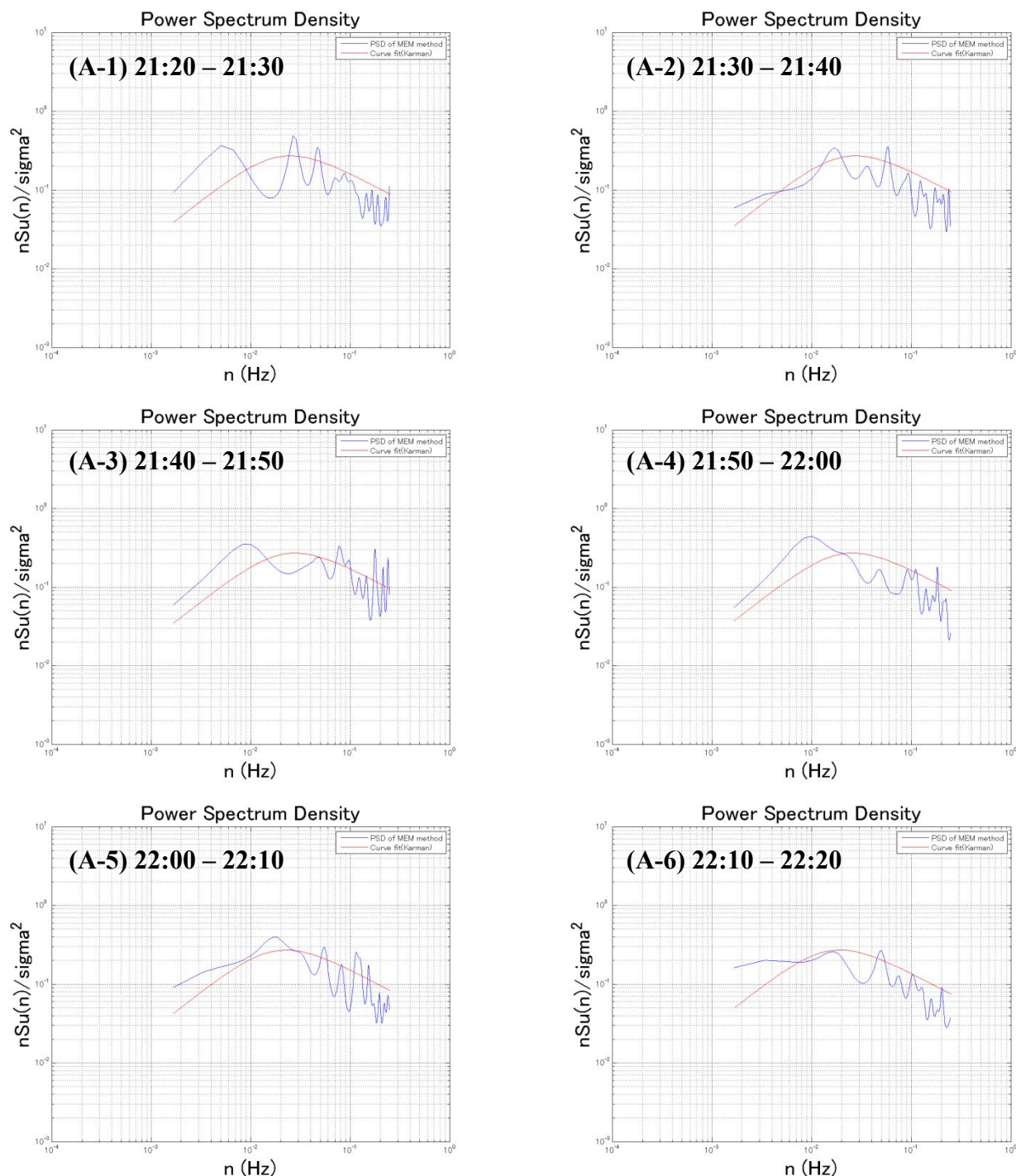


図 3.3.60 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

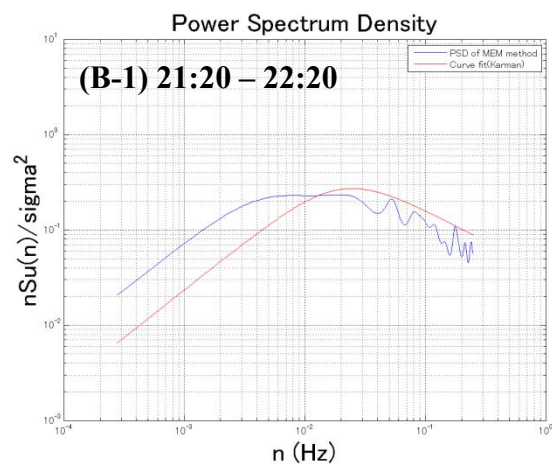


図 3.3.61 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (H-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=1024 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

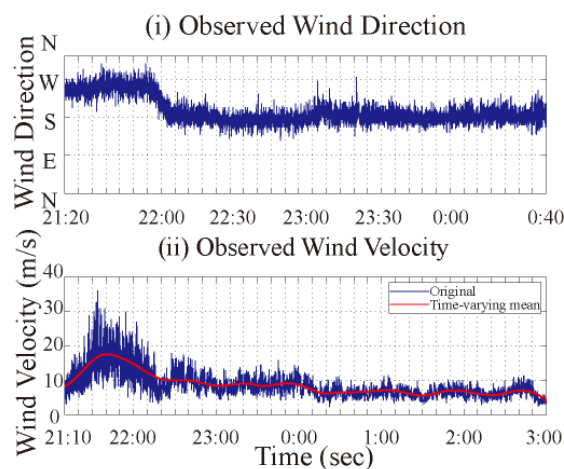


図 3.3.62 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

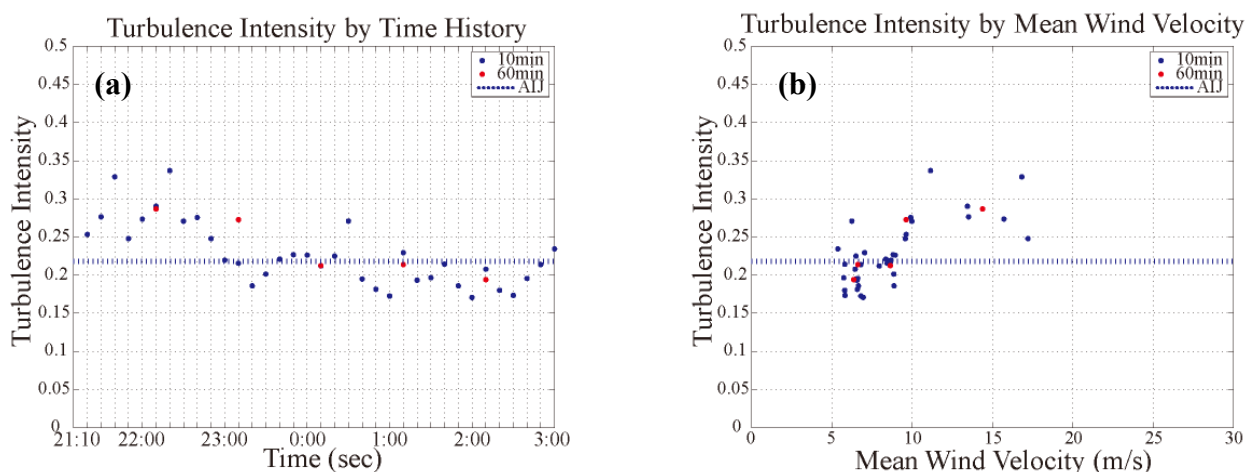


図 3.3.63 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

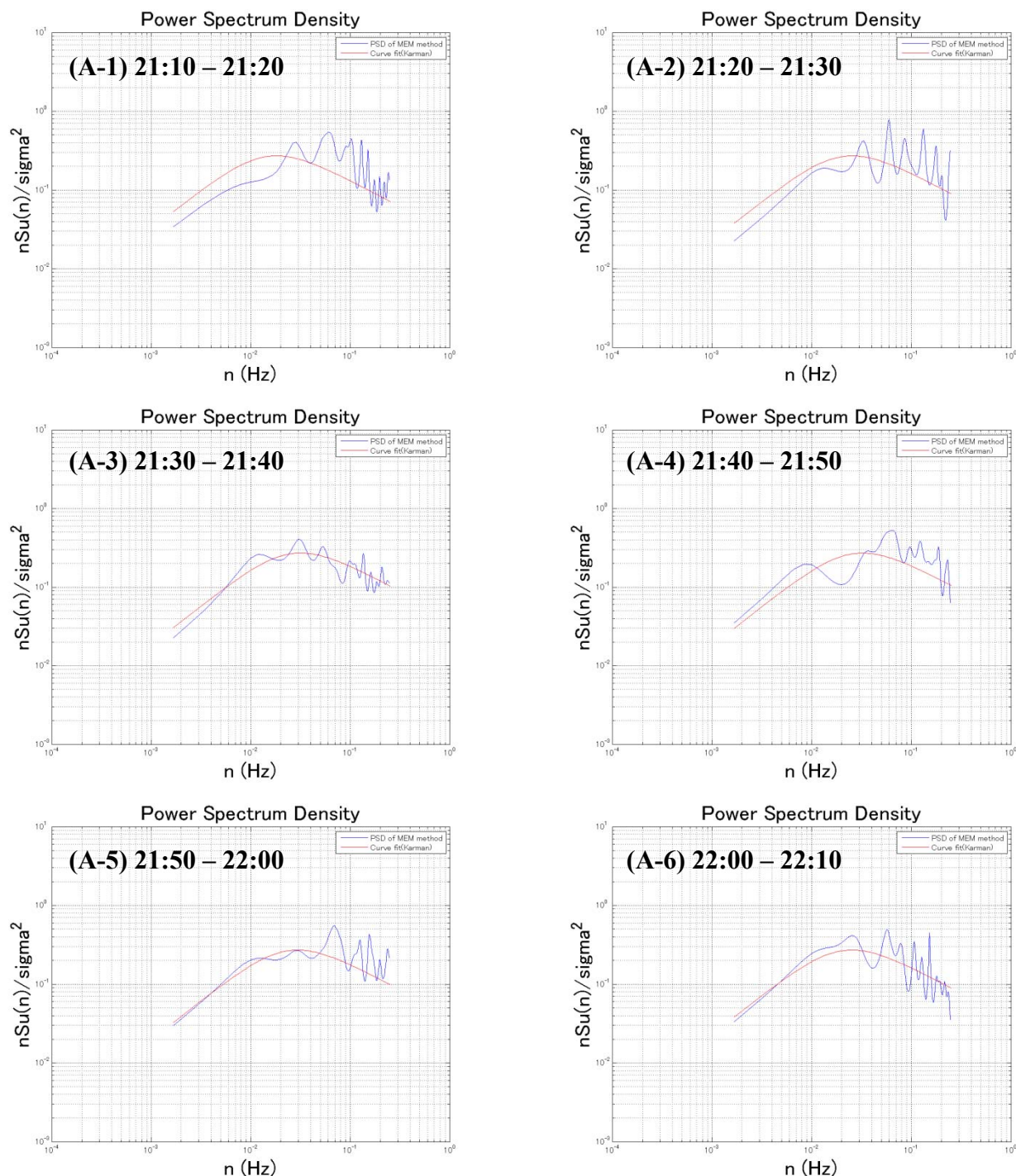


図 3.3.64 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

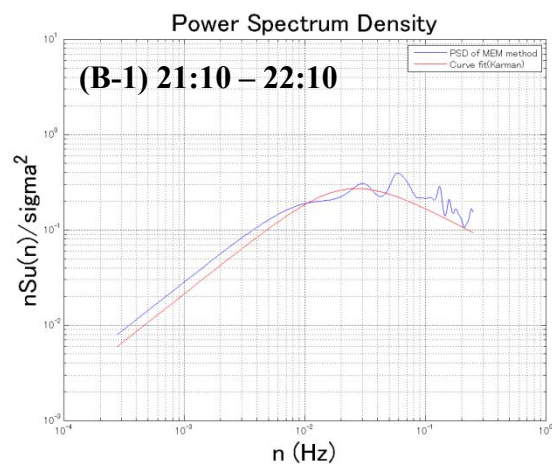


図 3.3.65 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (H-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=1024 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

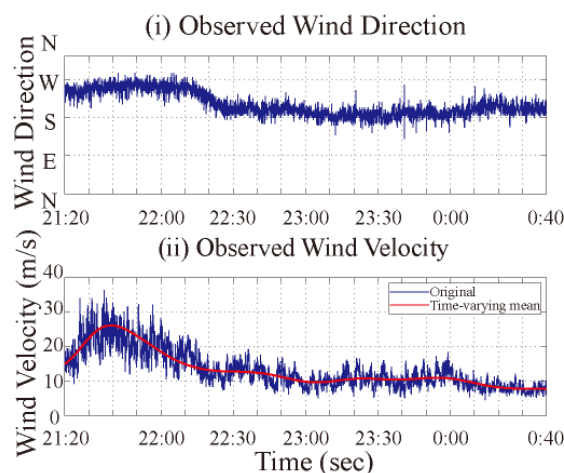


図 3.3.66 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

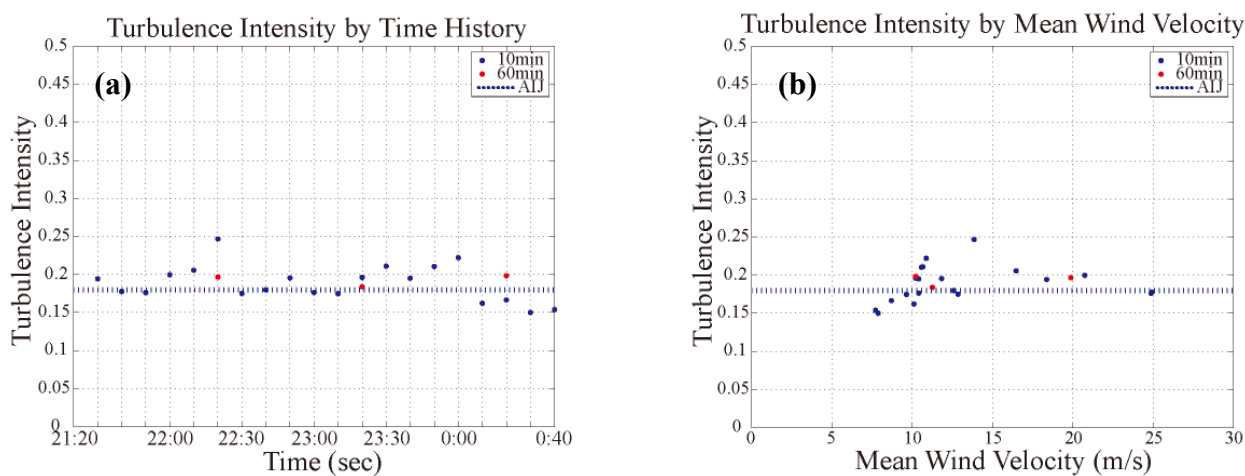


図 3.3.67 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

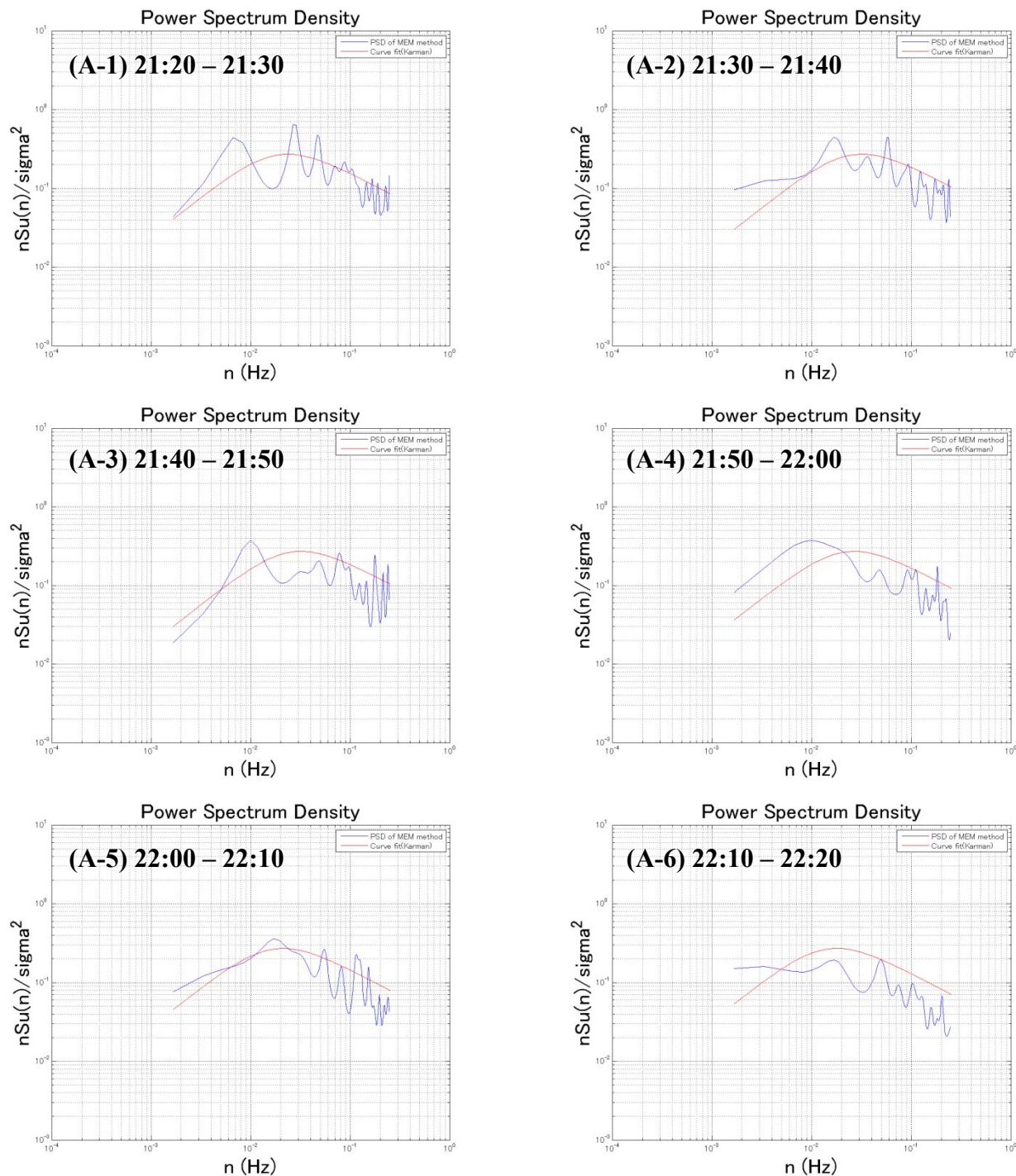


図 3.3.68 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

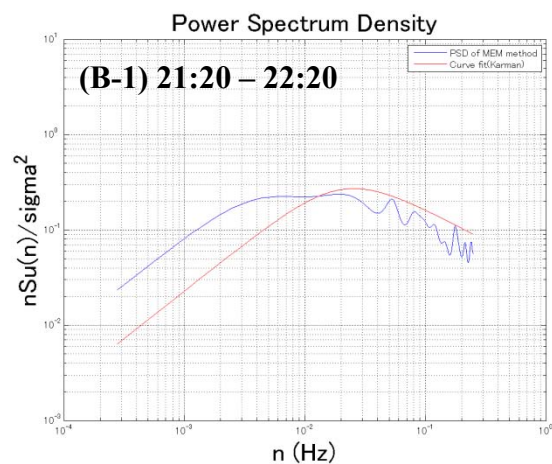


図 3.3.69 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (I-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=2048 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

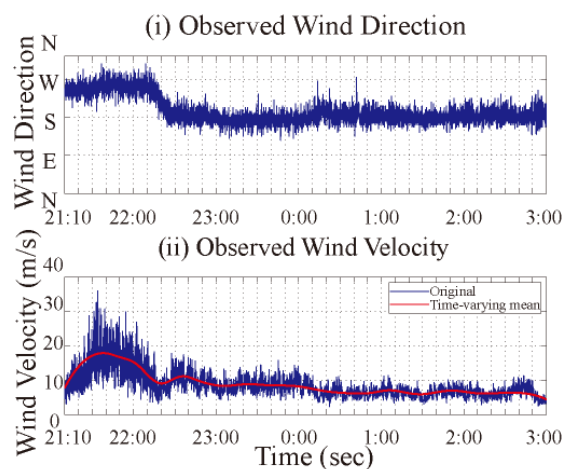


図 3.3.70 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

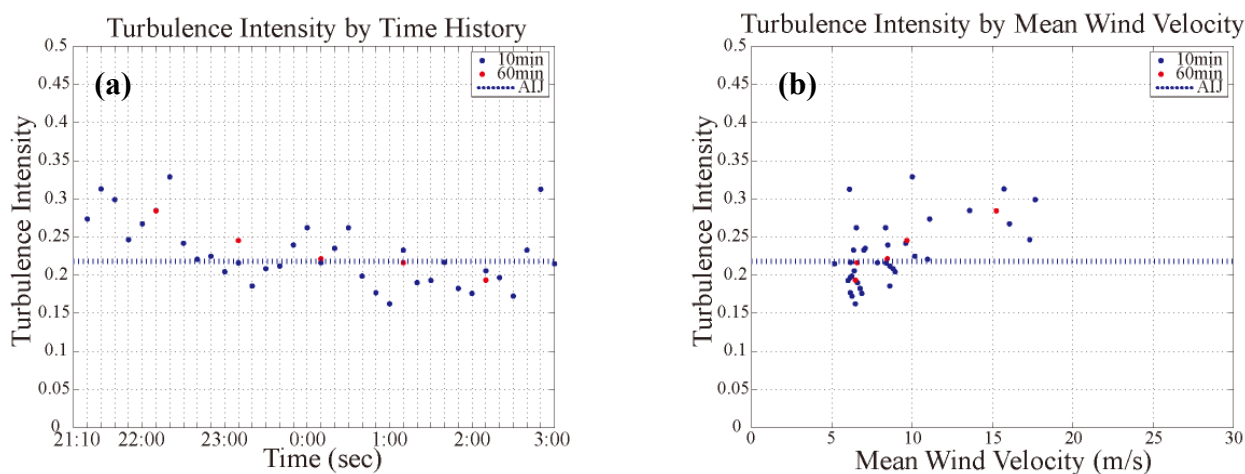


図 3.3.71 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

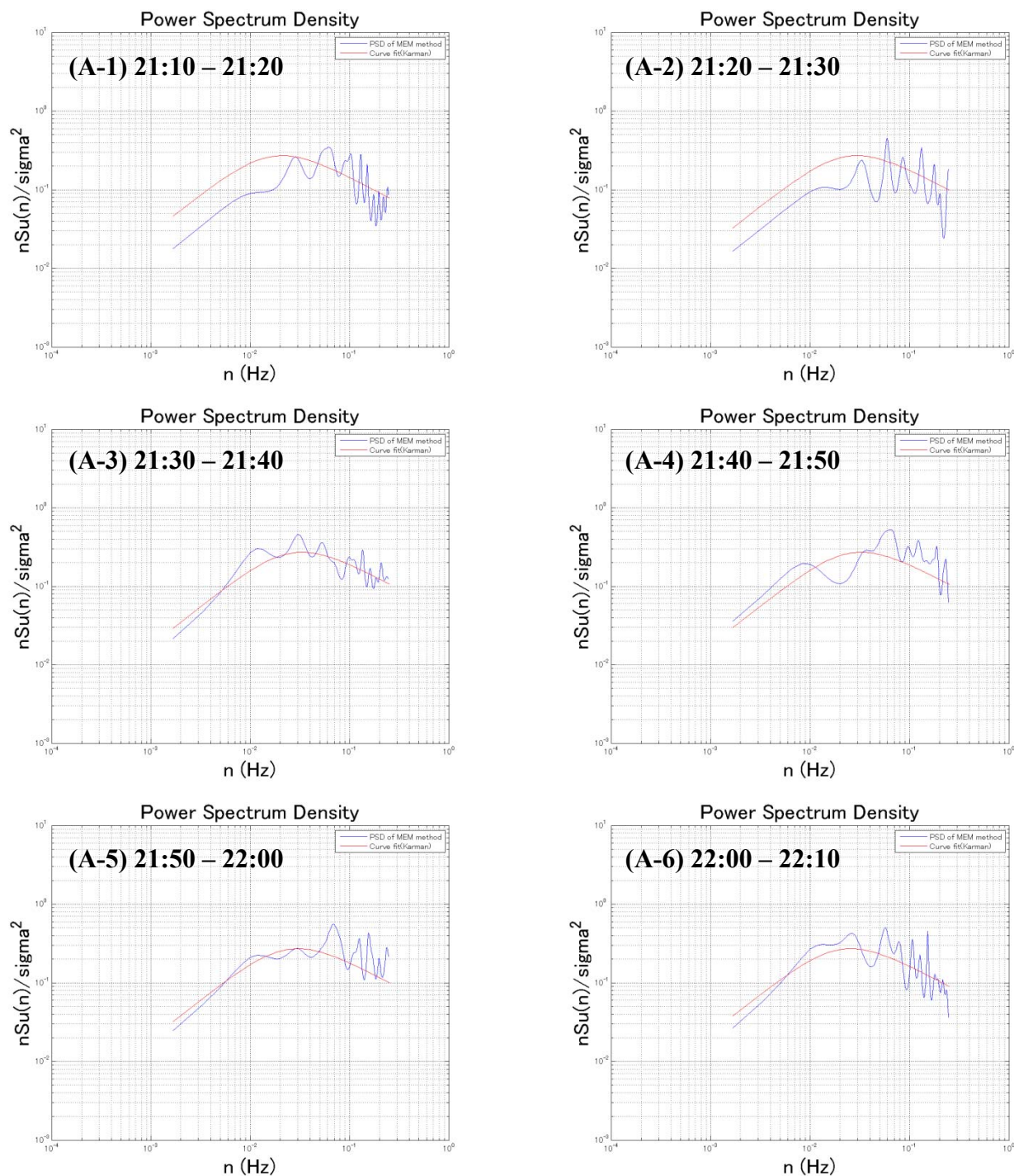


図 3.3.72 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

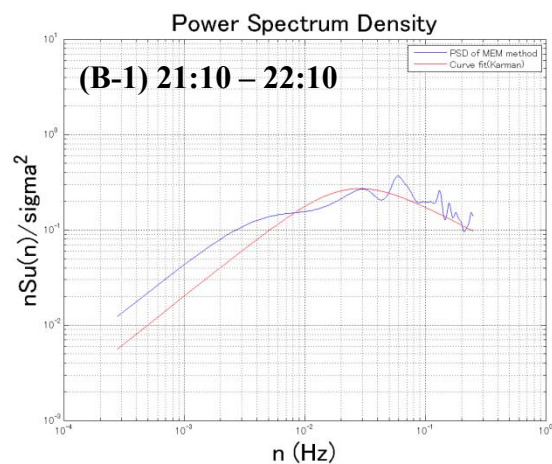


図 3.3.73 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (I-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=2048 基本信号数 : 3
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

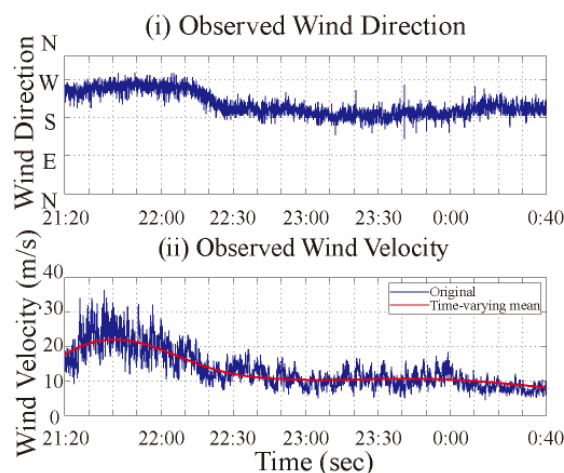


図 3.3.74 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

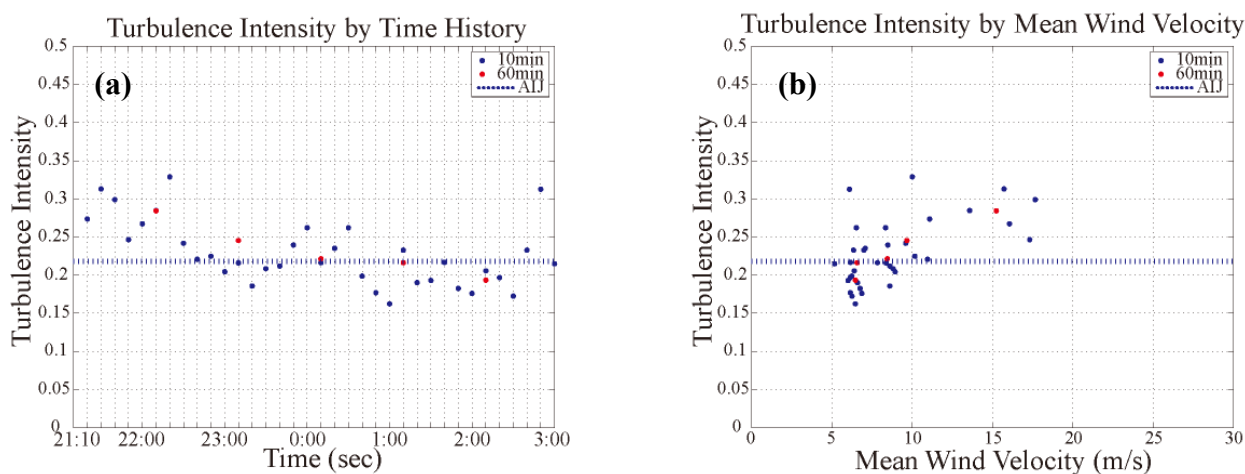


図 3.3.75 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

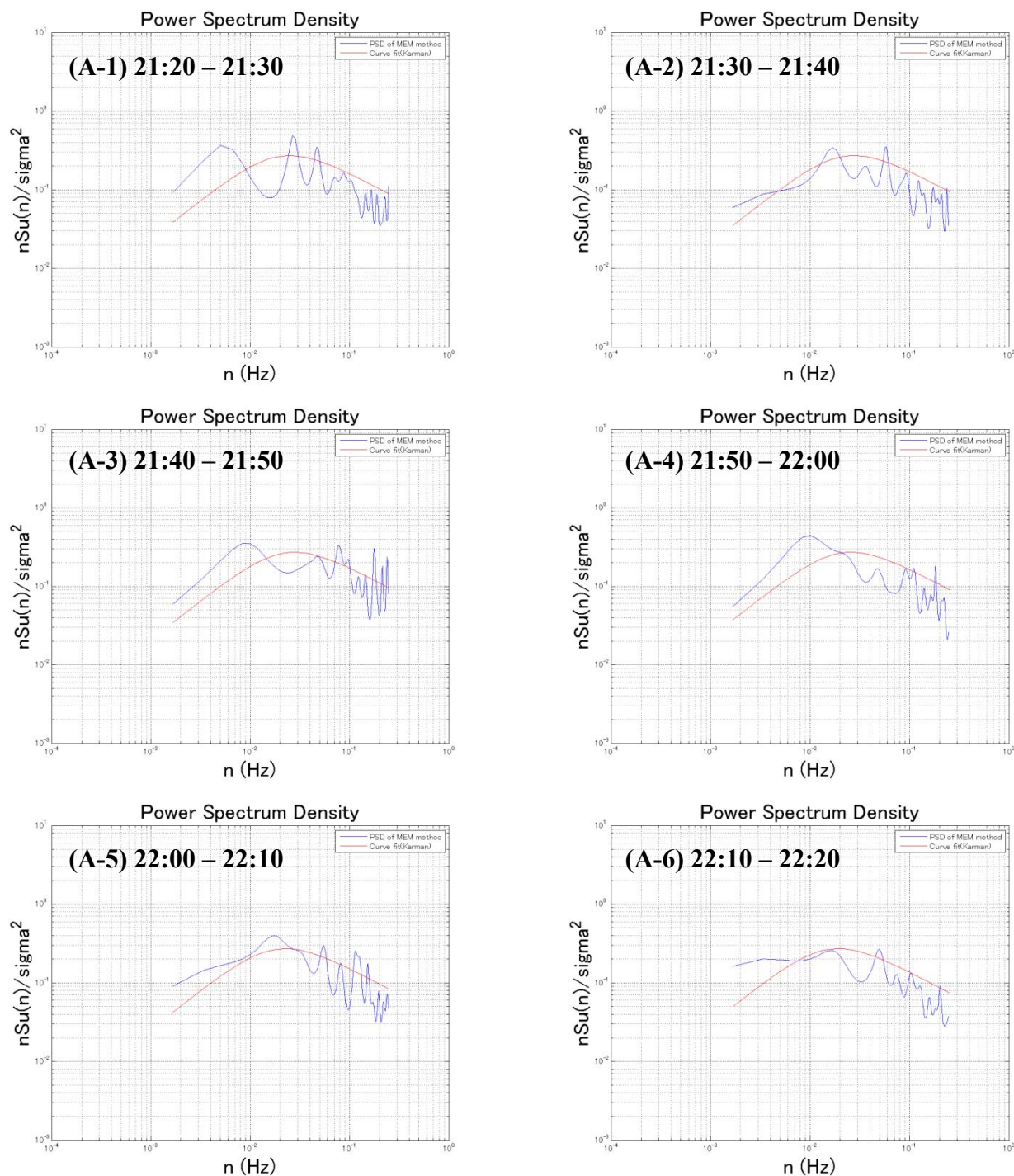


図 3.3.76 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

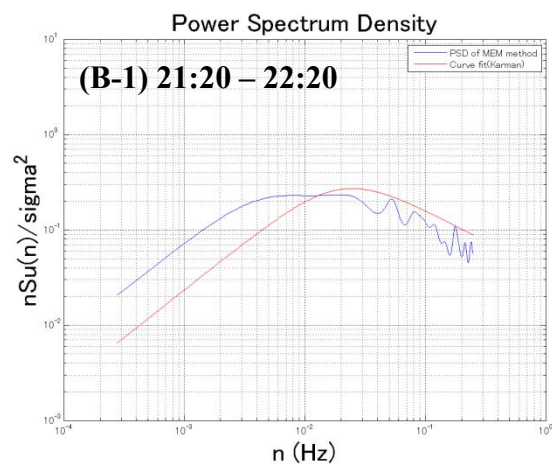


図 3.3.77 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (J-1) P3 20m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=2048 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

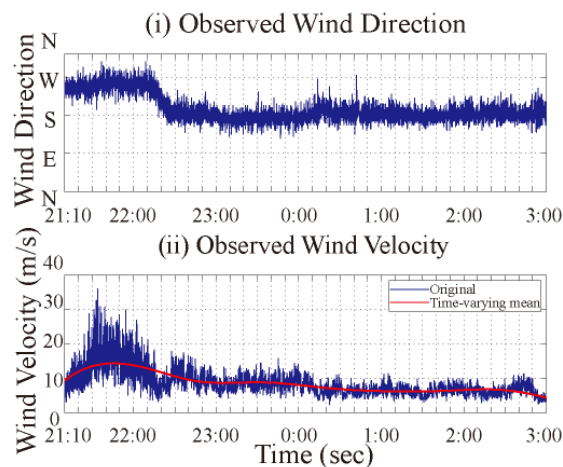


図 3.3.78 台風 0221 号 P3 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

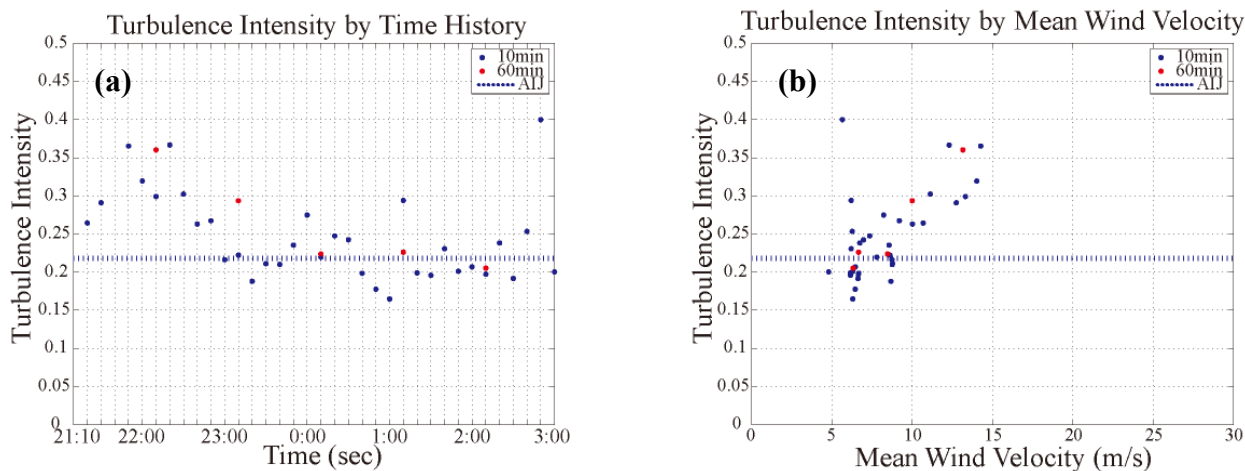


図 3.3.79 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

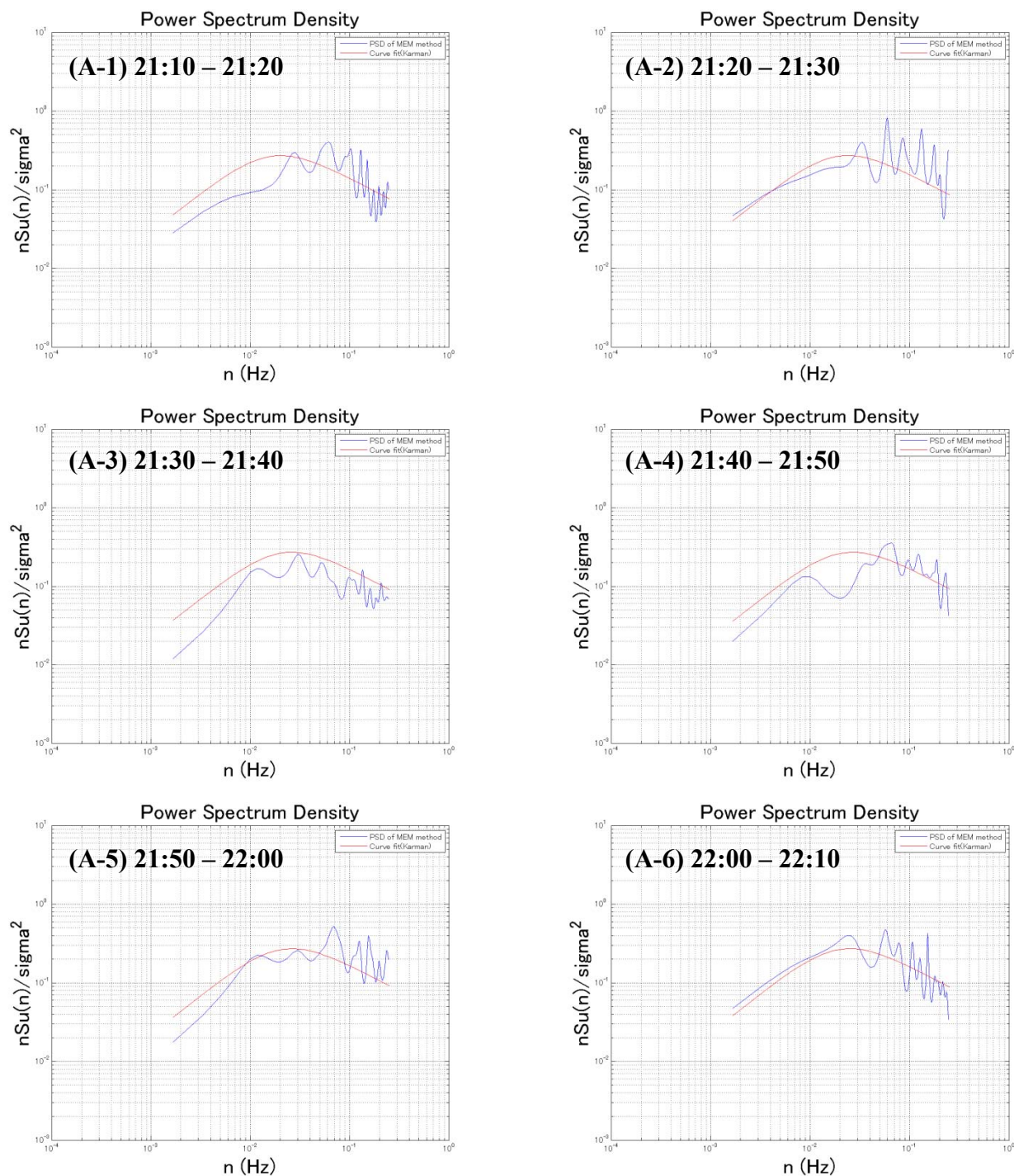


図 3.3.80 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

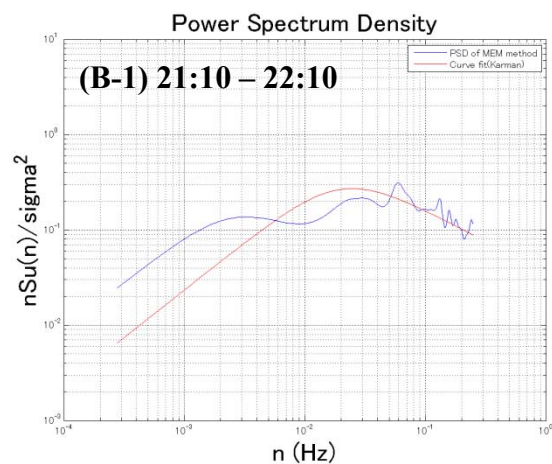


図 3.3.81 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ CASE (J-2) P4 43m 地点 台風 0221 号データによる EMD 手法検証 N=2048 基本信号数 : 5
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 手法による平均成分を併記した風向・風速観測データを示す。

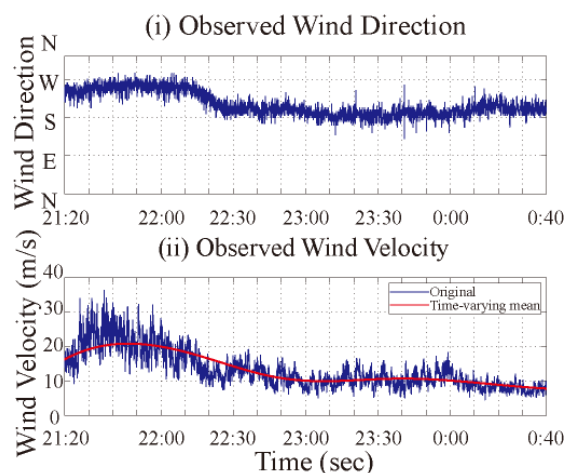


図 3.3.82 台風 0221 号 P4 風向・風速

次に、EMD 手法により得られた平均成分を基に乱れ強さについて評価を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

(式 3.3.13) に従い、非定常風モデルによる乱れ強さを評価すると、

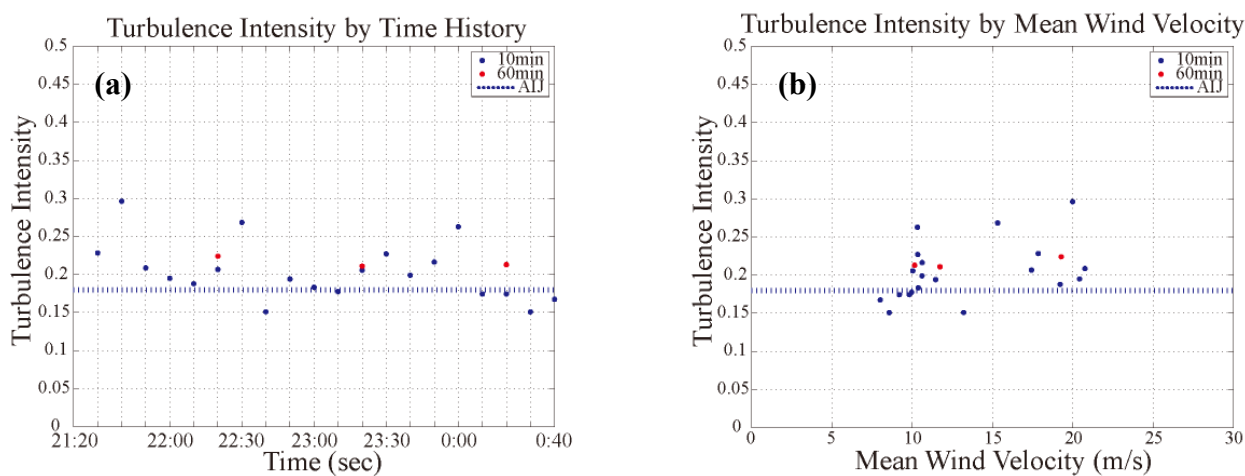


図 3.3.83 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

となる。また参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

・ カルマン型パワースペクトル

カルマン型パワースペクトルについて（式 3.3.15）を基に、評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いてカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルについても併記する。以下に得られたパワースペクトルを描くと、

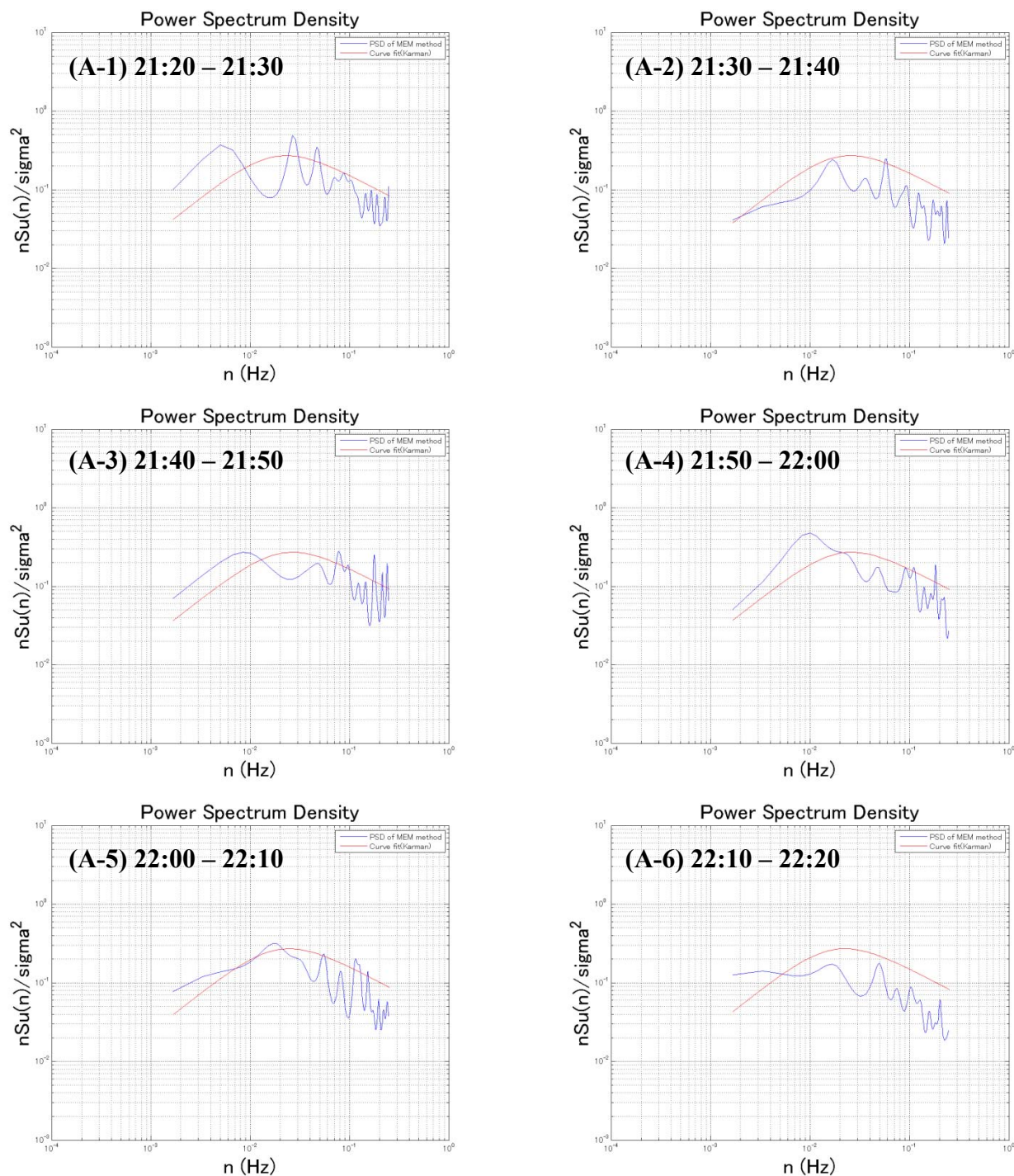


図 3.3.84 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

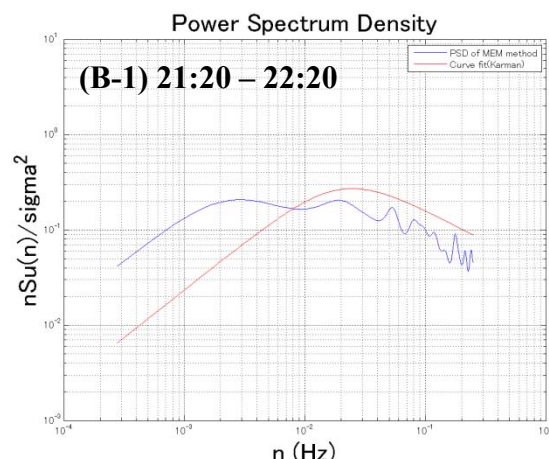


図 3.3.85 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

・ 最適パラメーターの検証と決定

台風 0221 号 P3 P4 データによる(A)–(J)の検証を以下にまとめる。

基本振動数内データ数 (= N) が少ない程 IMF 数が少なくなる。結果、得られた残余 r_n も変動の大きい時間変化する平均成分になる。一方、基本振動数内データ数が増えると IMF 数が増え、よりなだらかな平均成分が得られる。ただし、本観測データのようなサンプリング周波数の小さい場合には、データ間の変動が大きくなる傾向にあるため、IMF 数が少ない、変動の大きい平均成分が好ましいと言える。ただし、極端に IMF 数が少ない場合、変動が大きくなり過ぎる（例：N=128）ため、本データに関しては、N=256 が適切であると思われる。また、局所内データ基本信号数 (= n) は少ない（3 個）方が、瞬時の平均成分をよりの確に捉えている傾向が伺える。これは、基本振動数内データ数が同じで、基本信号数が異なるケーススタディを比較してみると、基本信号数が少ないケースの方が、乱れ強さが小さい傾向にある事から伺い知れる。パワースペクトル密度評価に関しても、基本振動数が少ないケースの方が、カルマン型パワースペクトルに良くフィッティングしている。

よって以上の事から、本観測データに対する EMD 手法には、基本振動数内データ数：N=256 及び、局所内データ基本信号数：n=3 を採用し、解析をする事とした。

3.3.4 台風データへの EMD 非定常風モデル検証と定常風モデルとの比較

- ・ P3 20m 地点 台風 0221 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

EMD 解析によって得られた平均成分を赤線で示す。

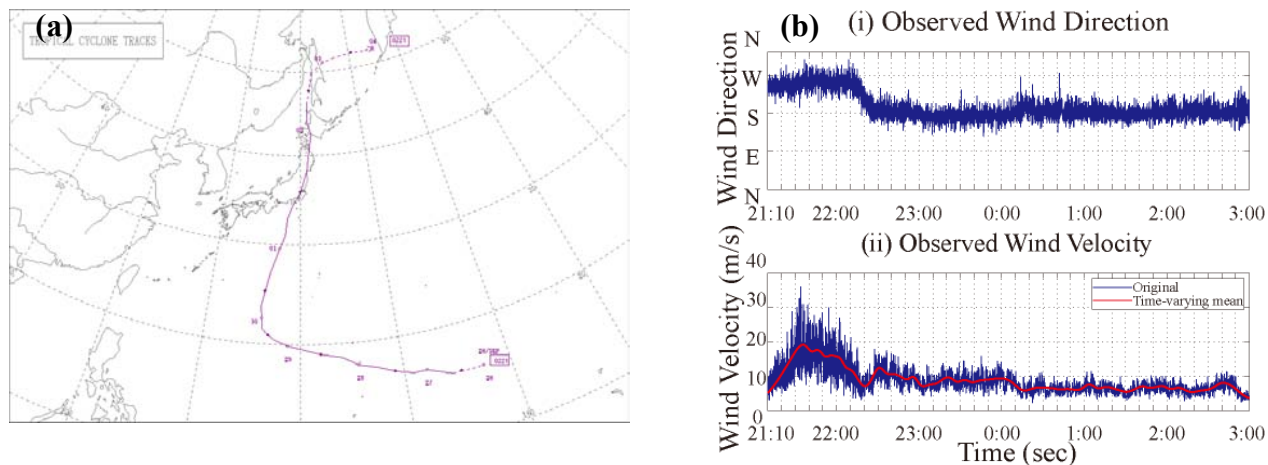


図 3.3.86 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P3 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と EMD 手法による非定常風モデル（右図）を用いた乱れ強さについて比較を行う。

- ・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

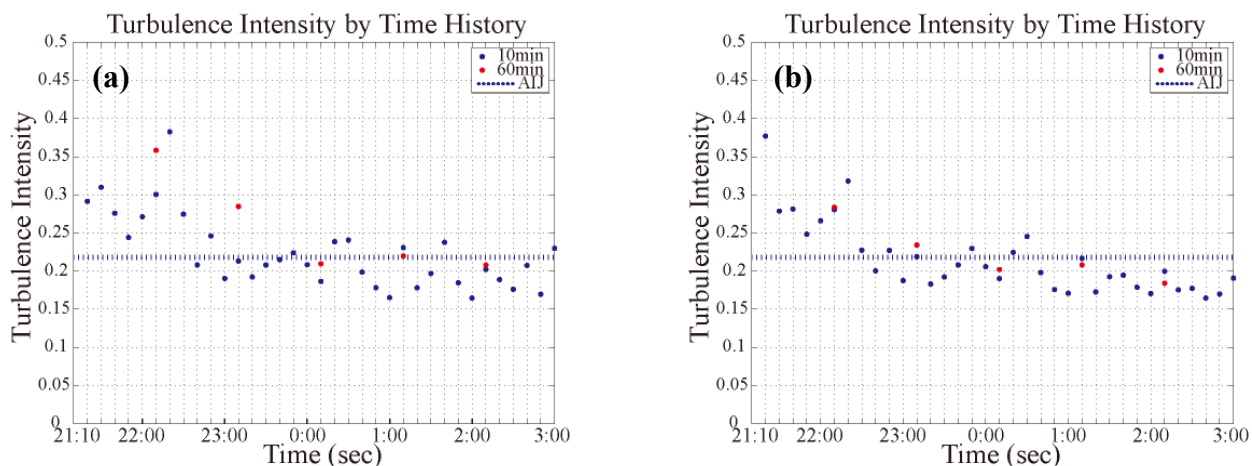


図 3.3.87 時刻歴乱れ強さと乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 非定常風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

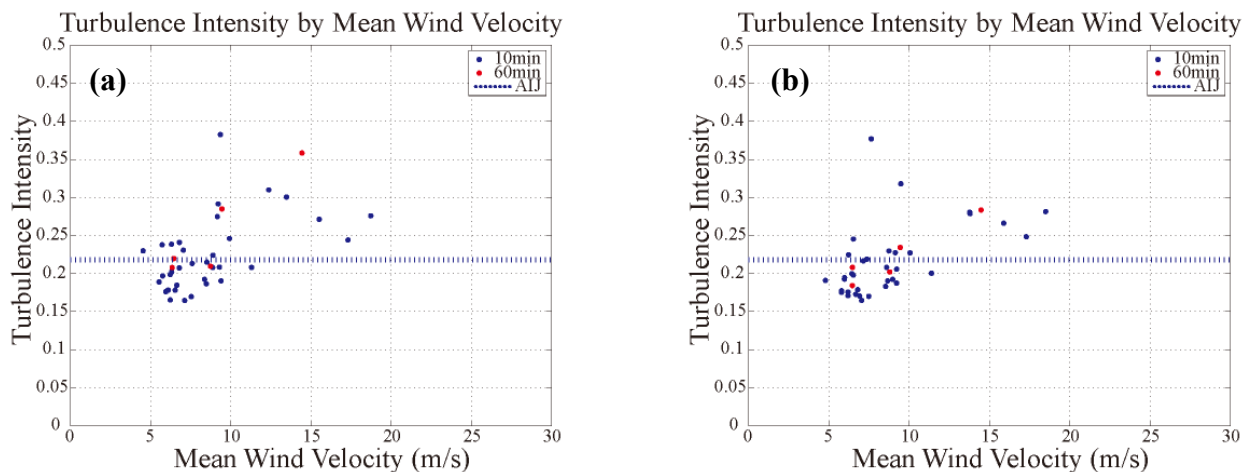


図 3.3.88 乱れ強さ評価 (a) 時刻歴乱れ強さ (b) 平均風速別乱れ強さ

また、定常風速モデルによる乱れ強さと非定常風速モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を10分間、60分間について記述すると、

定常風速モデル

10分間乱れ強さ最大値：0.383

10分間乱れ強さ最小値：0.165

60分間乱れ強さ最大値：0.356

60分間乱れ強さ最小値：0.206

非定常風速モデル

10分間乱れ強さ最大値：0.377

10分間乱れ強さ最小値：0.165

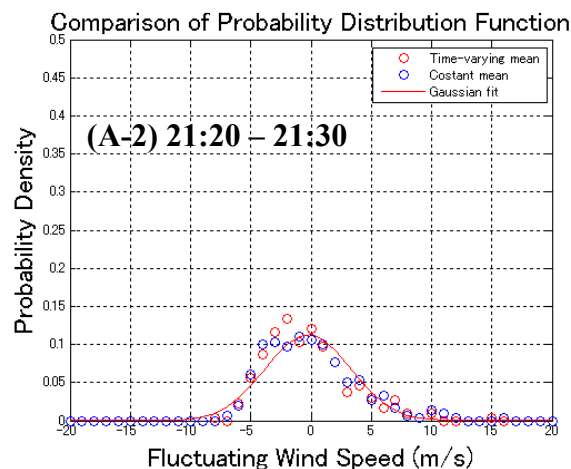
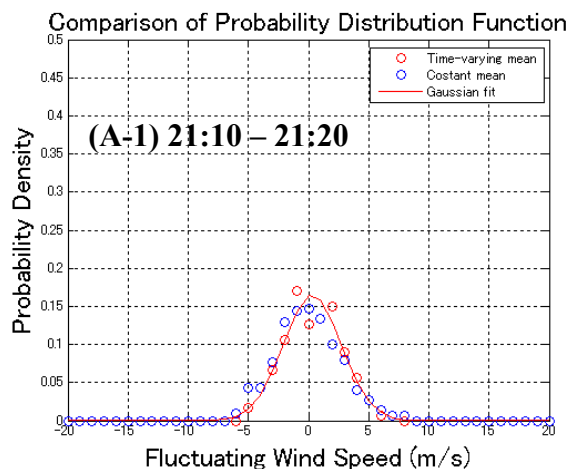
60分間乱れ強さ最大値：0.284

60分間乱れ強さ最小値：0.184

表 3.3.1 定常風モデル・EMD手法による非定常風モデル間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、EMD手法による非定常風モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、風速の変動が大きい21:10–22:10までの1時間とし、(a)10分間、(b)60分間の2つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



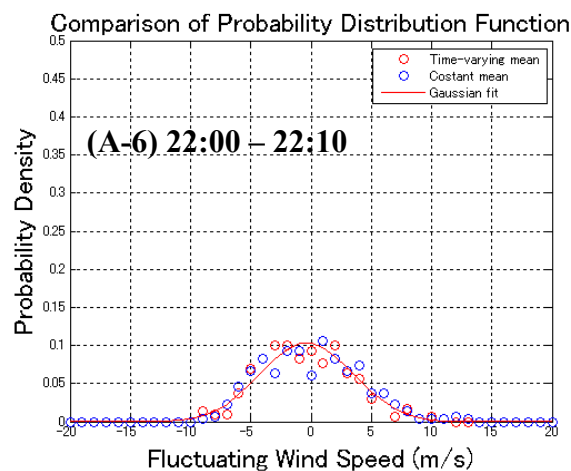
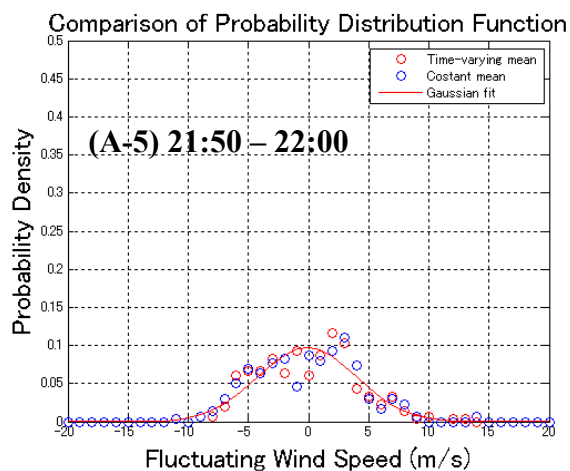
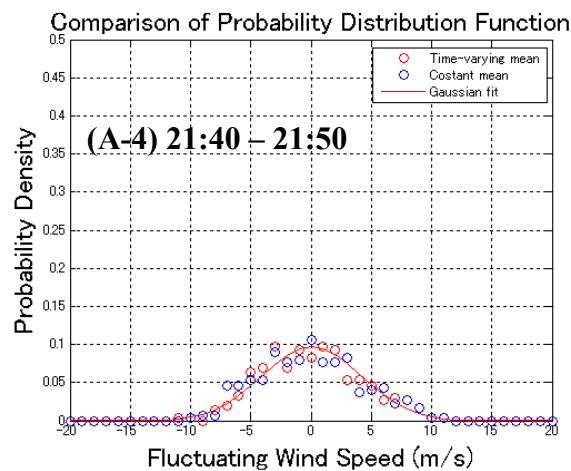
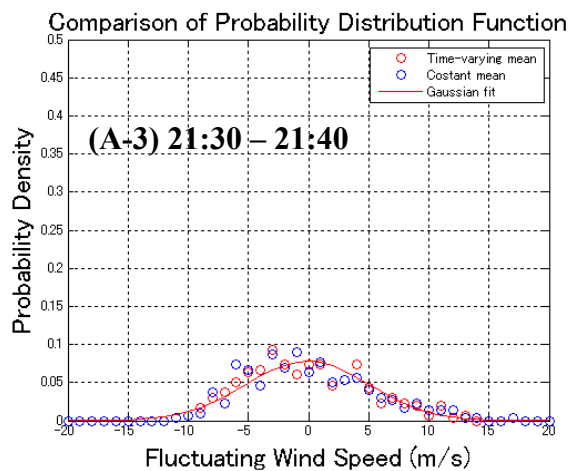


図 3.3.89 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間確率密度関数

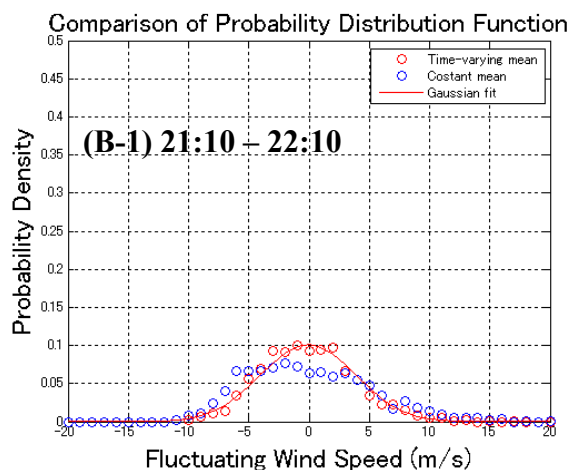


図 3.3.90 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

EMD 手法による非定常風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:10 – 22:10 までの1時間、対象時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の2つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

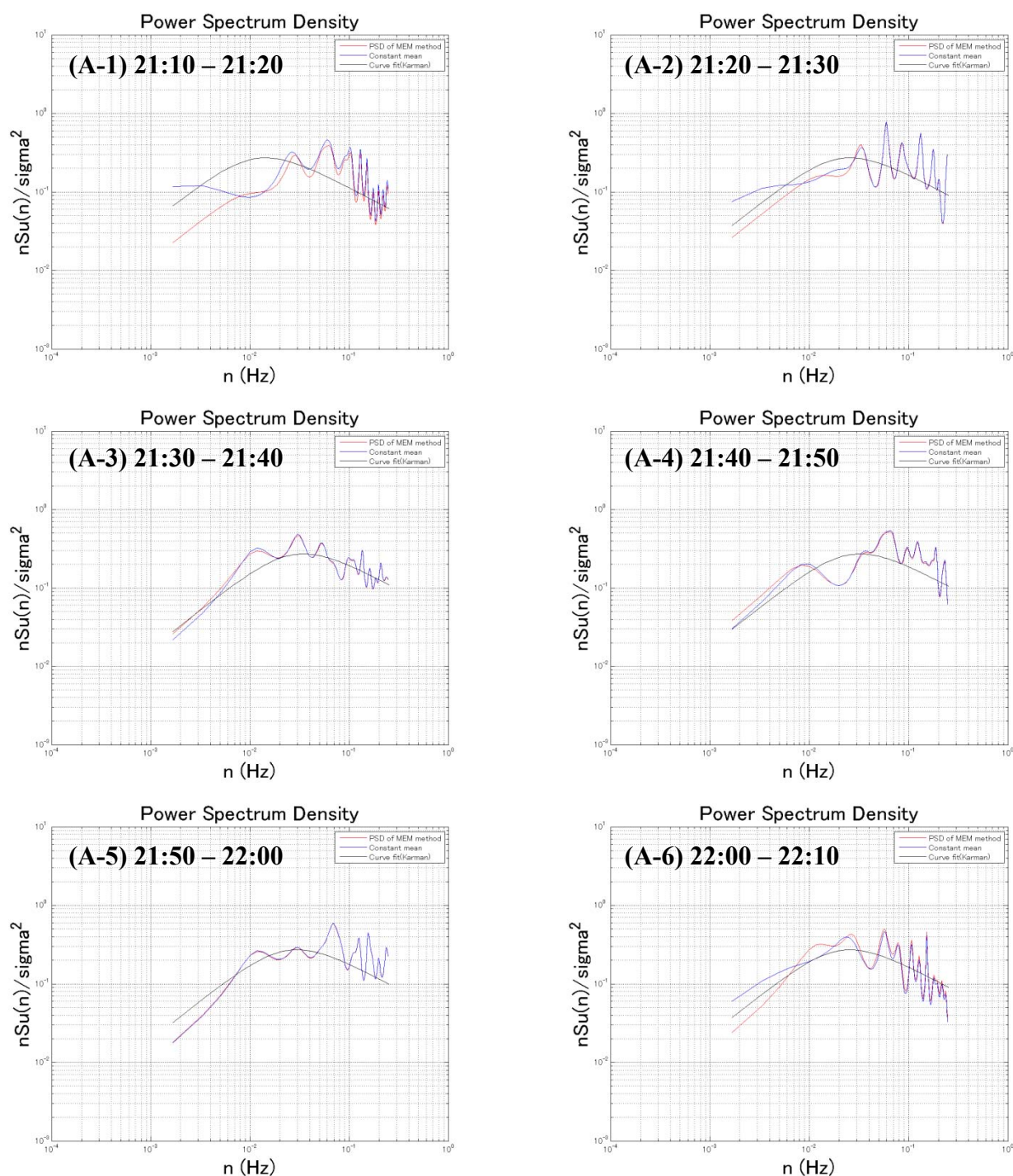


図 3.3.91 21:10 - 22:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

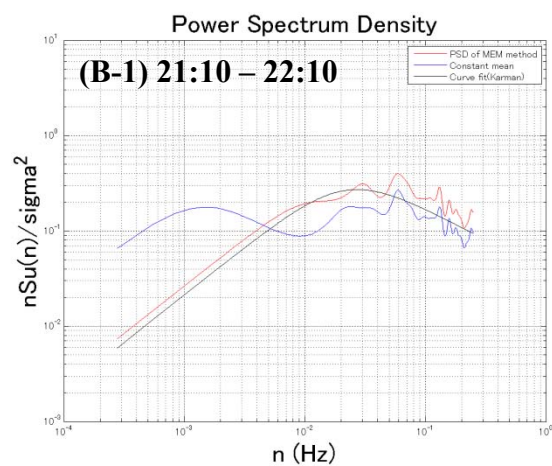


図 3.3.92 21:10 - 22:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P4 43m 地点 台風 0221 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P4 43m 地点における台風 0221 号観測風速・風向データを示す。

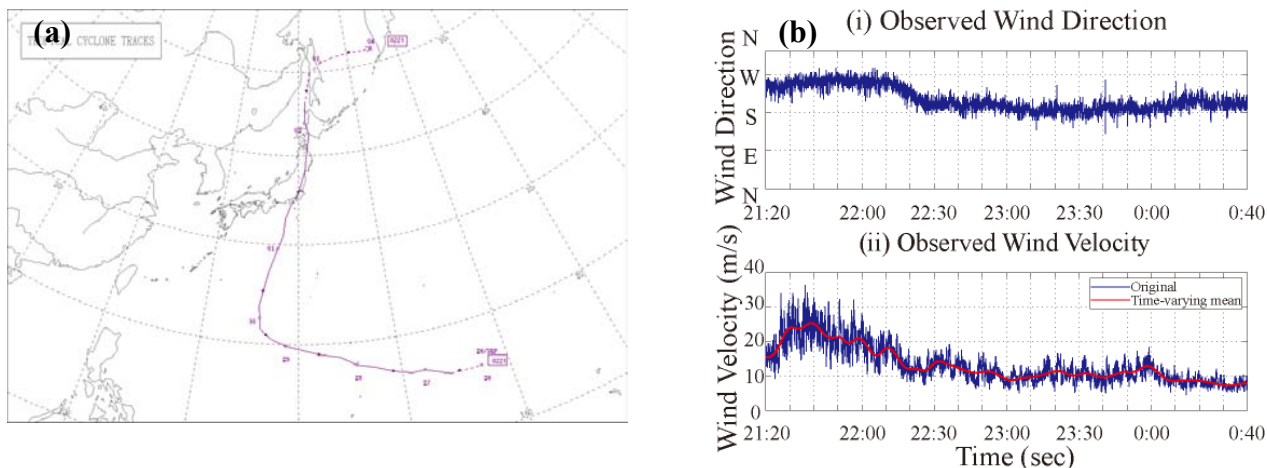


図 3.3.93 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P4 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

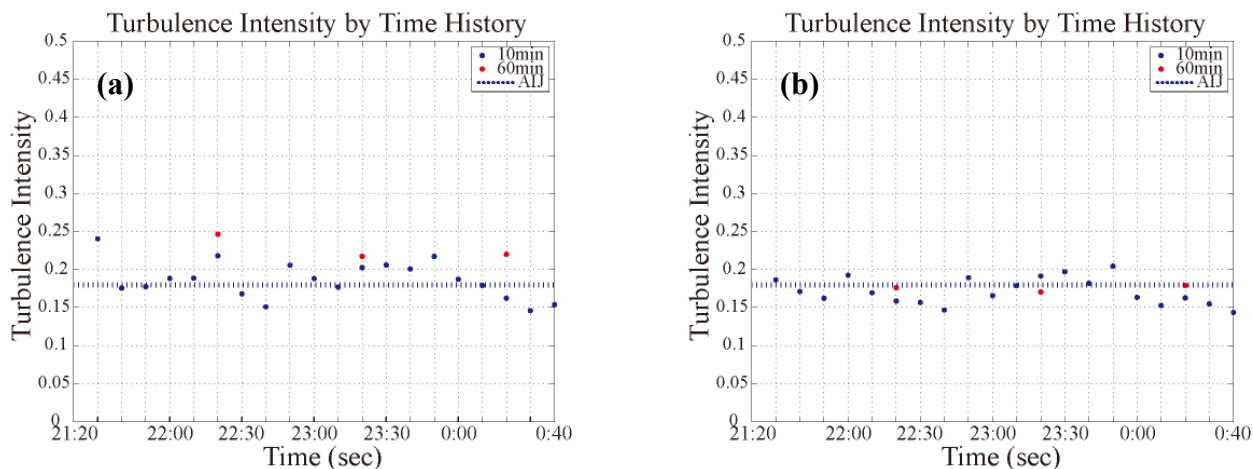


図 3.3.94 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

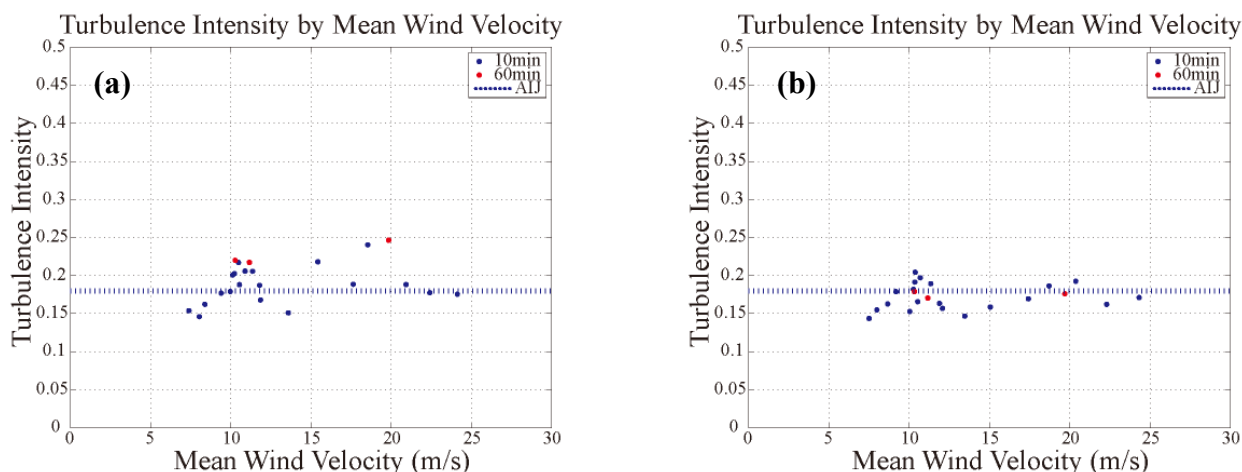


図 3.3.95 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.240

10 分間乱れ強さ最小値：0.146

60 分間乱れ強さ最大値：0.246

60 分間乱れ強さ最小値：0.217

EMD 手法による非定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.204

10 分間乱れ強さ最小値：0.144

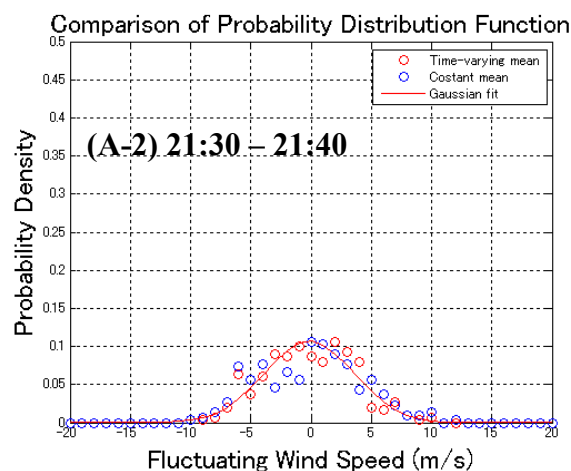
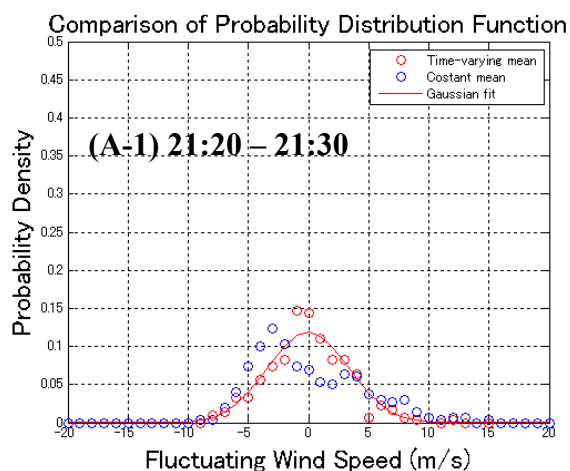
60 分間乱れ強さ最大値：0.179

60 分間乱れ強さ最小値：0.170

表 3.3.2 定常風速モデル・EMD 手法による非定常風モデル間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、EMD による非定常風モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



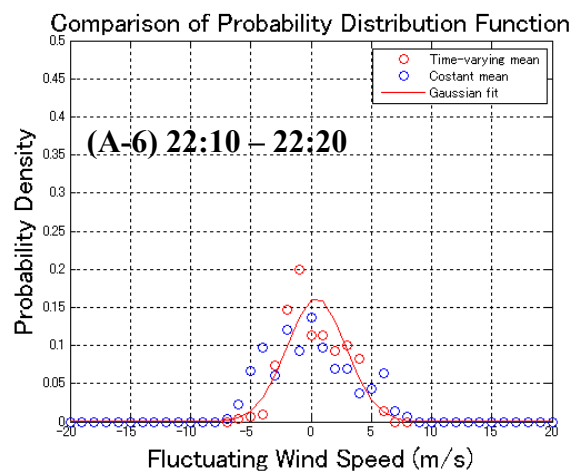
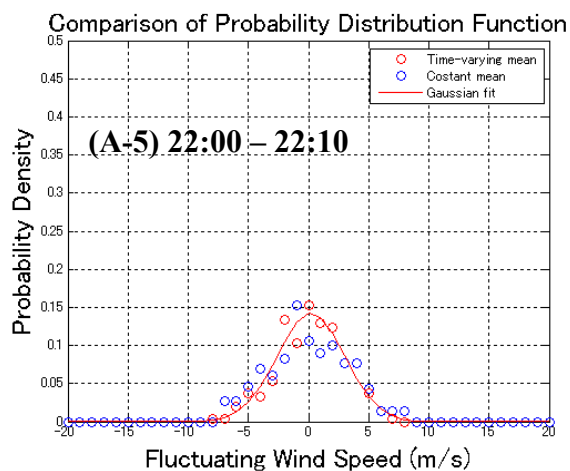
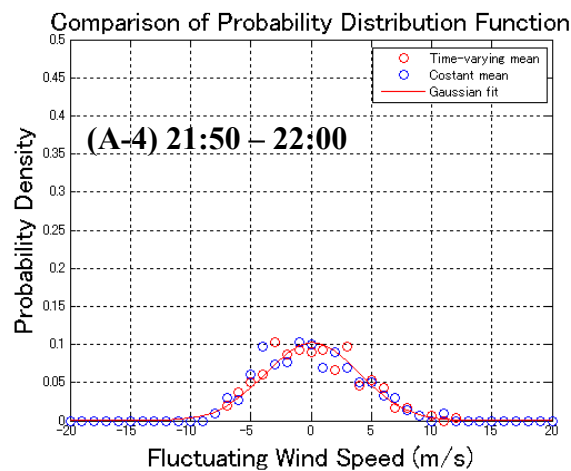
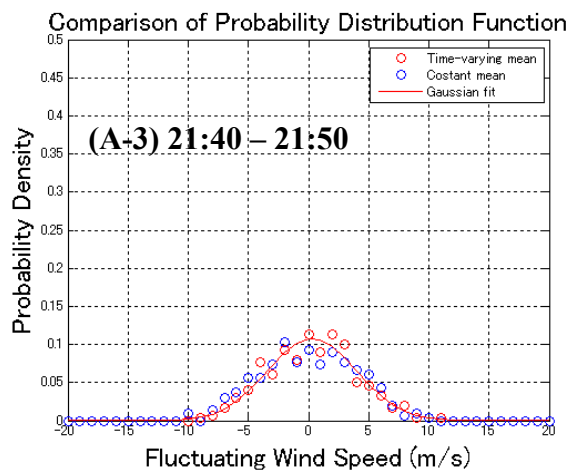


図 3.3.96 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間確率密度関数

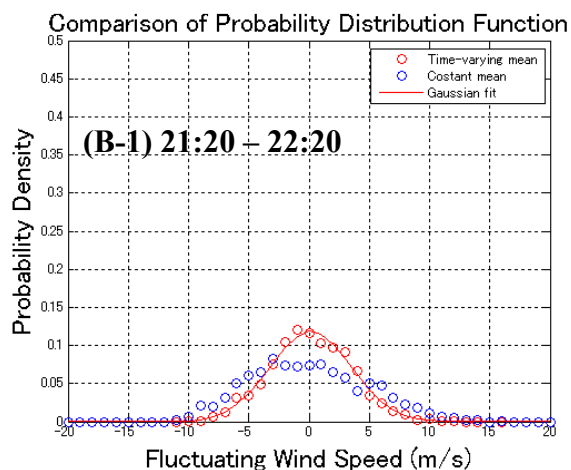


図 3.3.97 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

非定常風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは風速の変動が大きい 21:20 – 22:20 までの 1 時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（ベーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを最小二乗法による線形近似風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

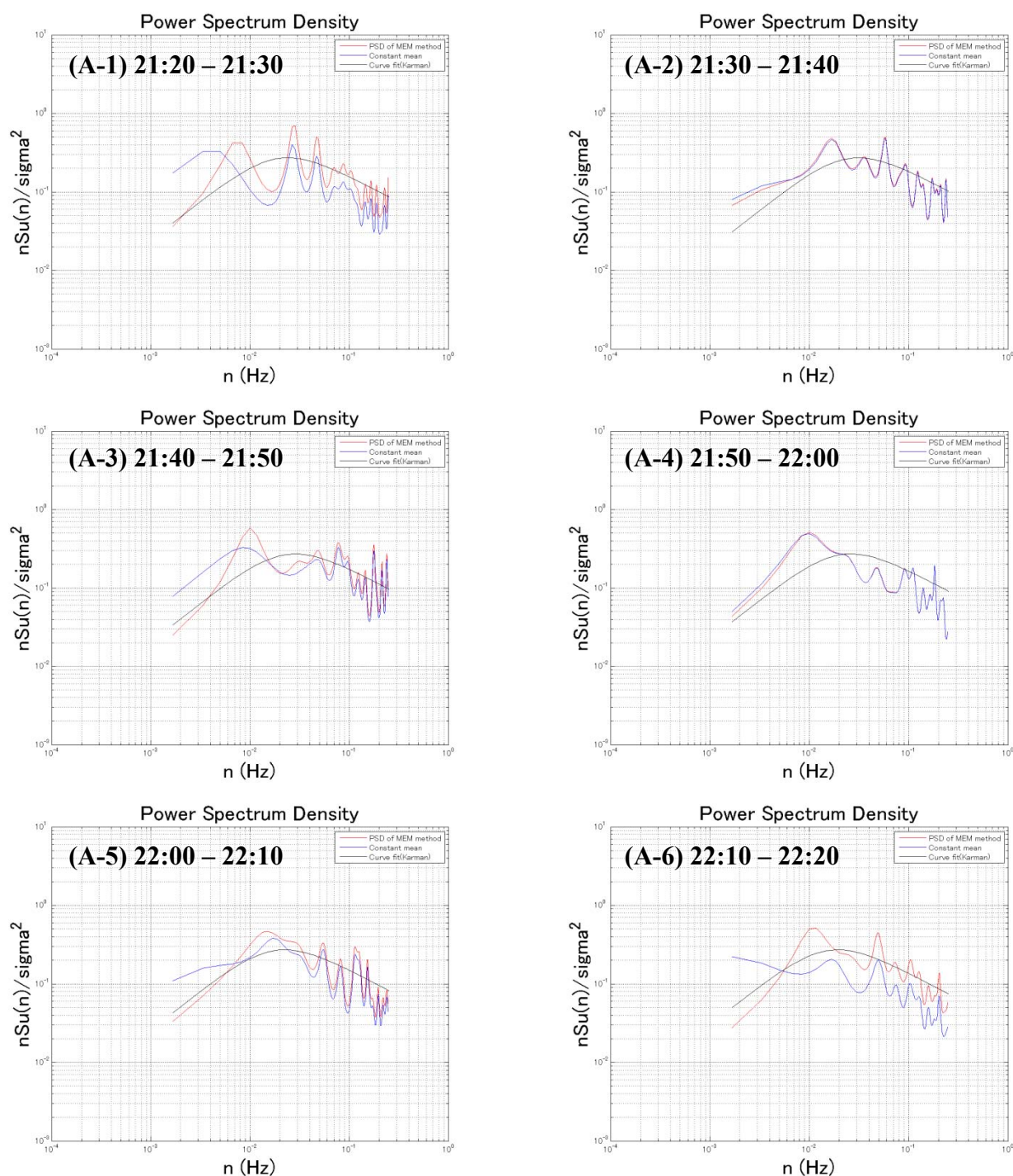


図 3.3.98 21:20 - 22:20 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

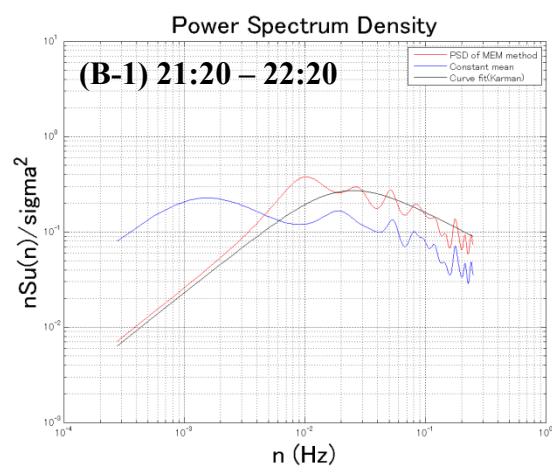


図 3.3.99 21:20 - 22:20 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P3 20m 地点 台風 0918 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P3 20m 地点における台風 0918 号観測風速・風向データを示す。

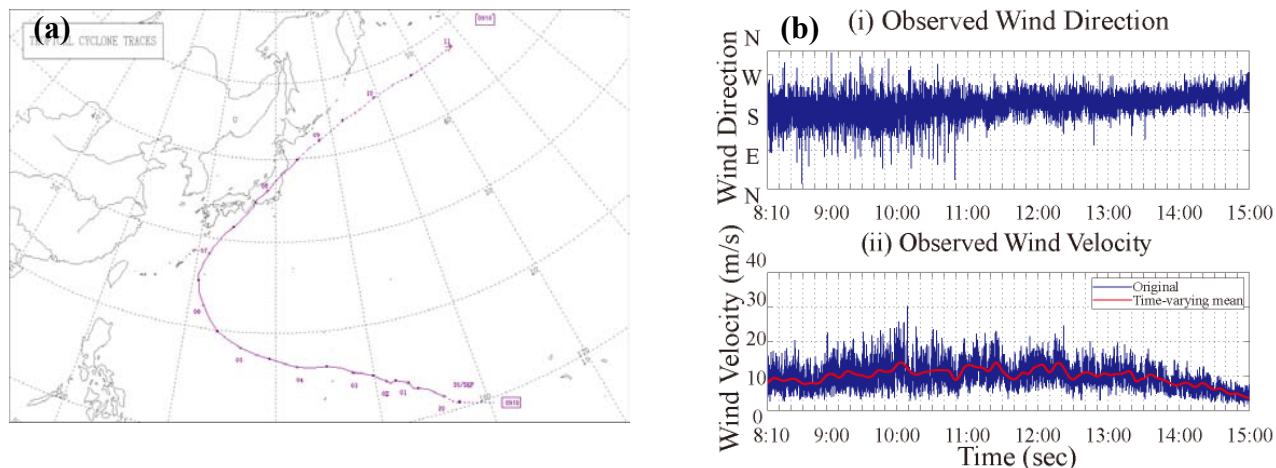


図 3.3.100 台風 0918 号 (a) 台風進路 (b) P3 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

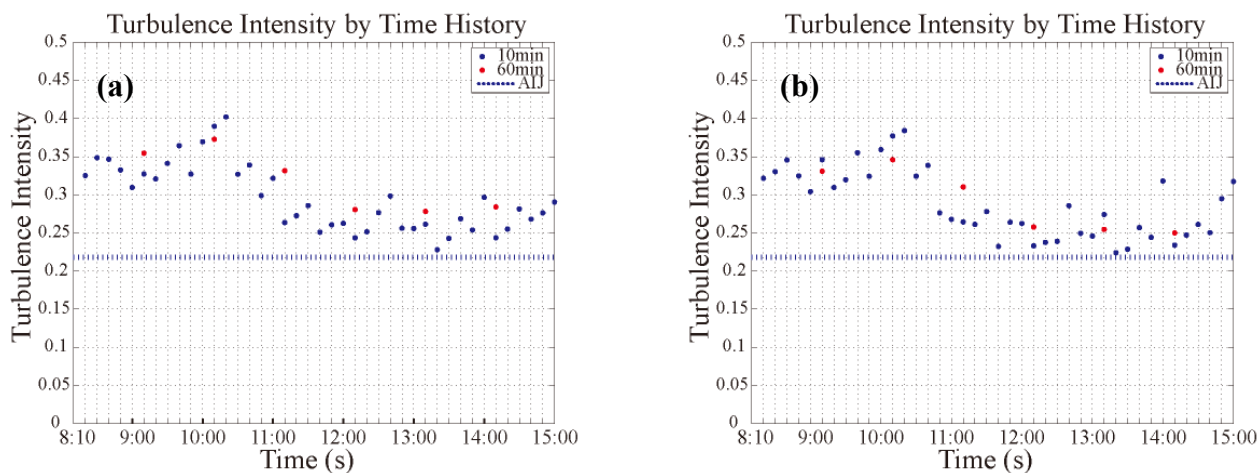


図 3.3.101 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 線形近似風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

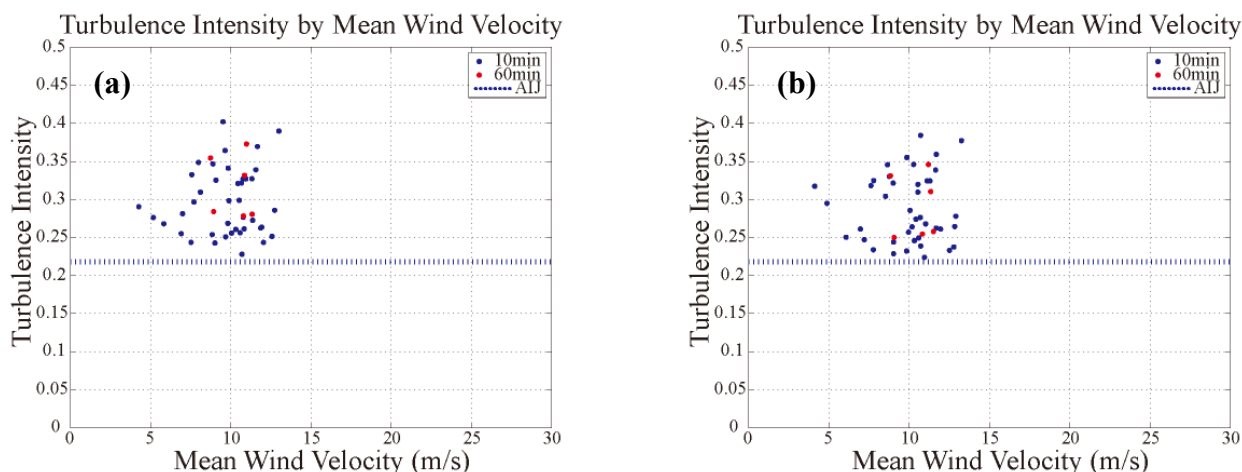


図 3.3.102 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 線形近似風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと最小二乗法を用いた線形近似風モデルによる乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.402

10 分間乱れ強さ最小値：0.228

60 分間乱れ強さ最大値：0.373

60 分間乱れ強さ最小値：0.278

EMD 手法による非定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.384

10 分間乱れ強さ最小値：0.224

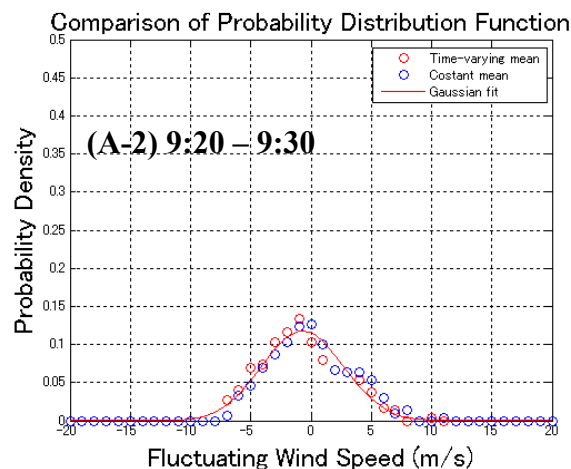
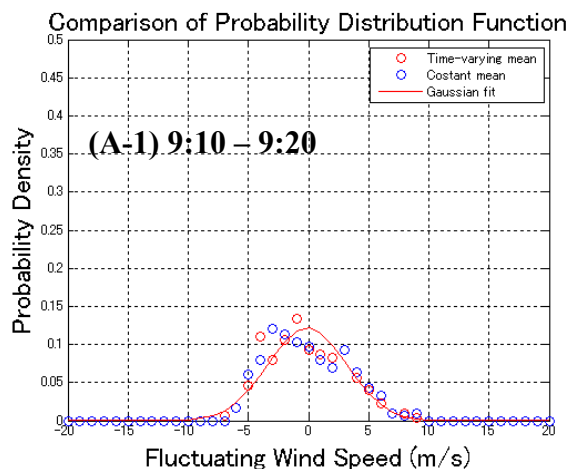
60 分間乱れ強さ最大値：0.346

60 分間乱れ強さ最小値：0.250

表 3.3.3 定常風速モデル・EMD 手法による非定常風モデル間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、EMD 手法による非定常風モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、最大風速を観測した時間帯を含む 9:10 - 10:10 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



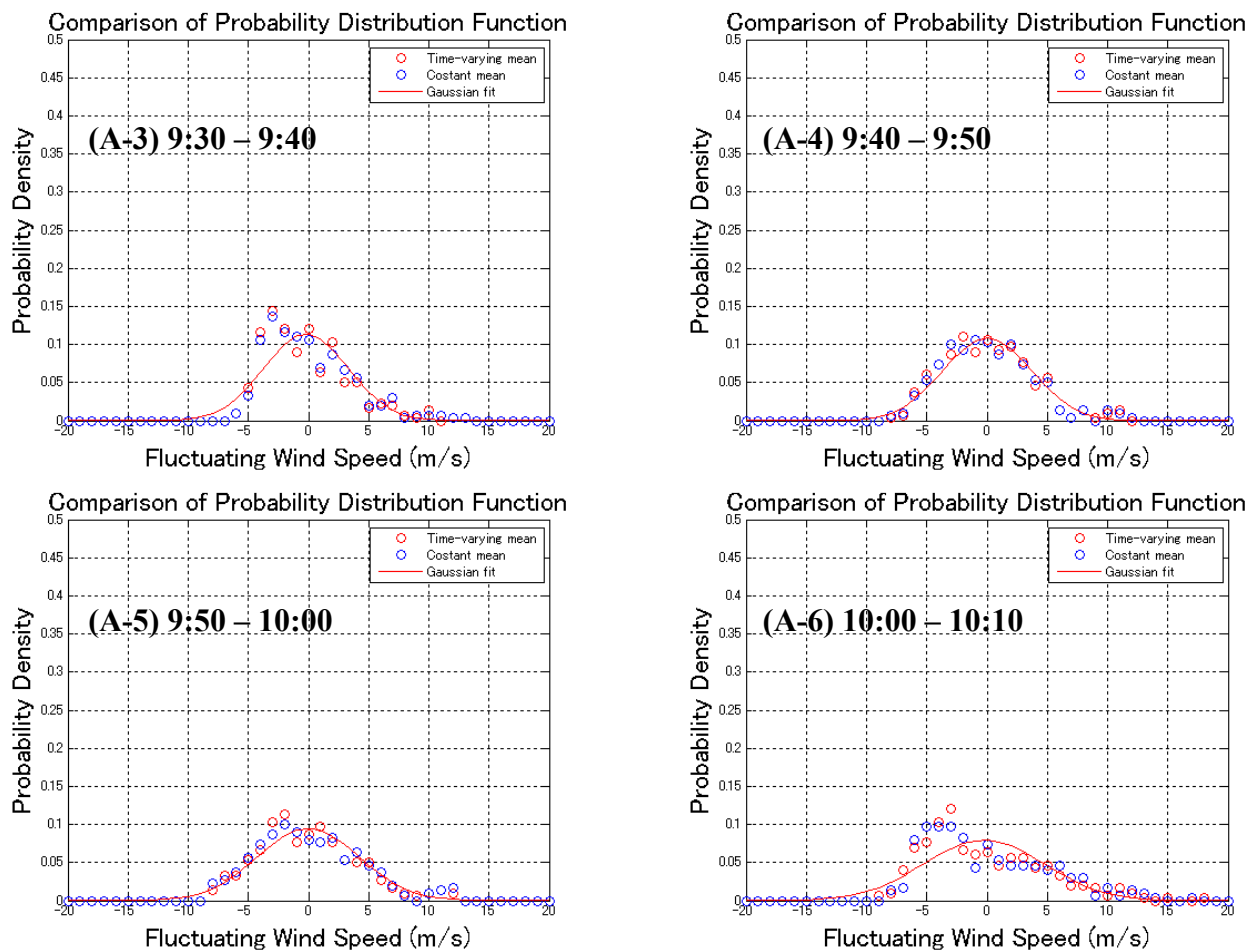


図 3.3.103 9:10 - 10:10 評価時間 10 分間確率密度関数

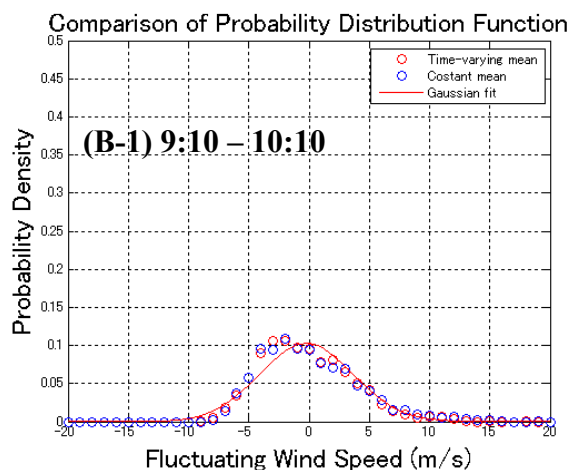


図 3.3.104 9:10 - 10:10 評価時間 60 分間確率密度関数

カルマン型パワースペクトル

非定常風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは最大風速観測時間帯を含む 9:10 – 10:10 の 1 時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーク法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを EMD 手法による非定常風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

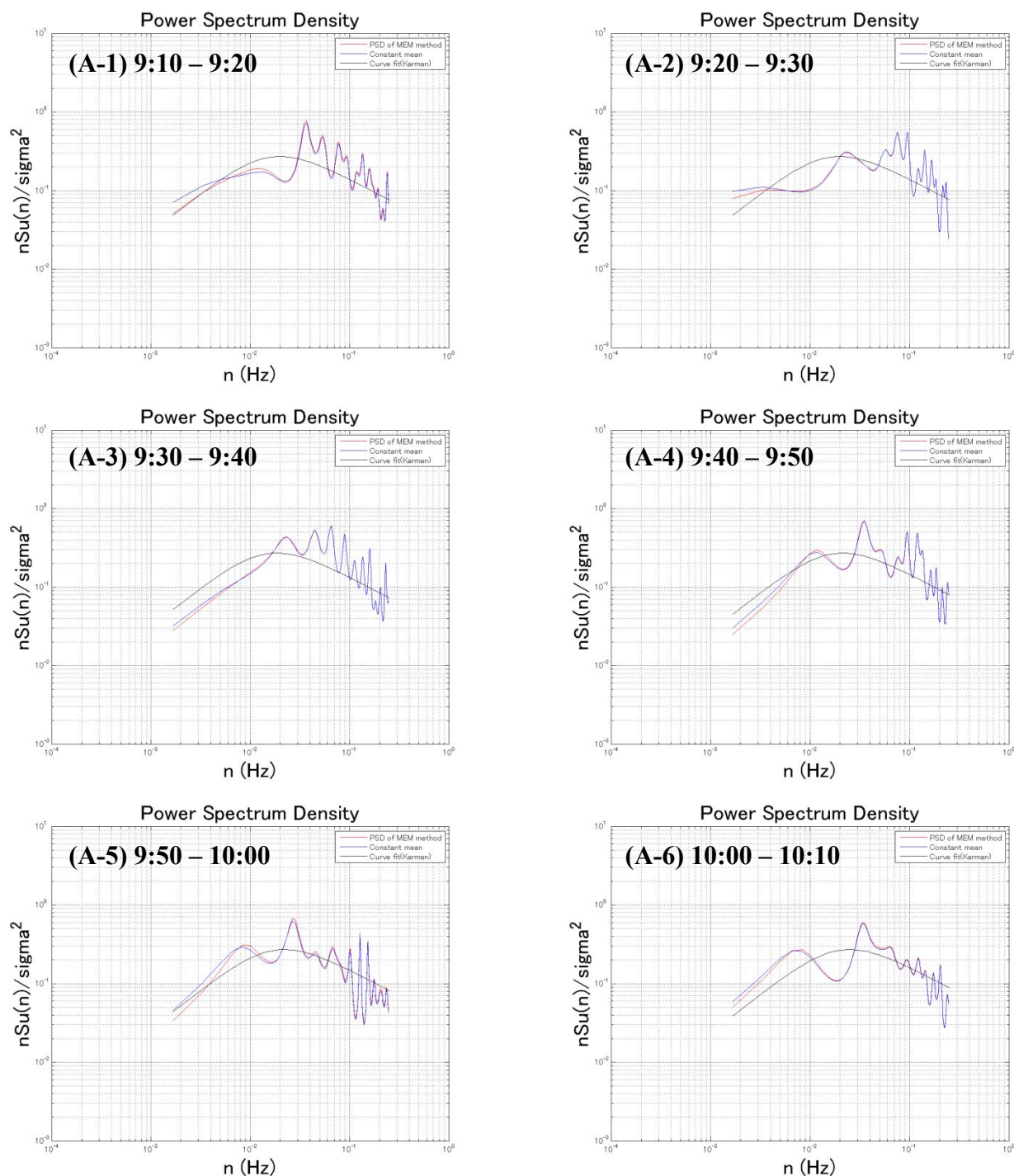


図 3.3.105 9:10 - 10:10 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

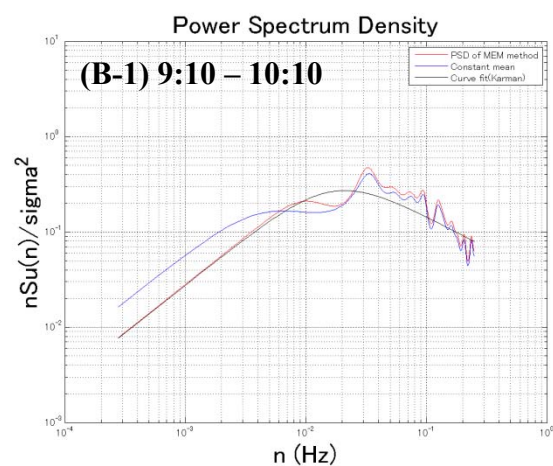


図 3.3.106 9:10 - 10:10 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

- ・ P4 43m 地点 台風 0918 号データによる風モデル別風特性評価
- ・ 観測データ／風向・風速

P4 43m 地点における台風 0221 号観測風速・風向データを示す。

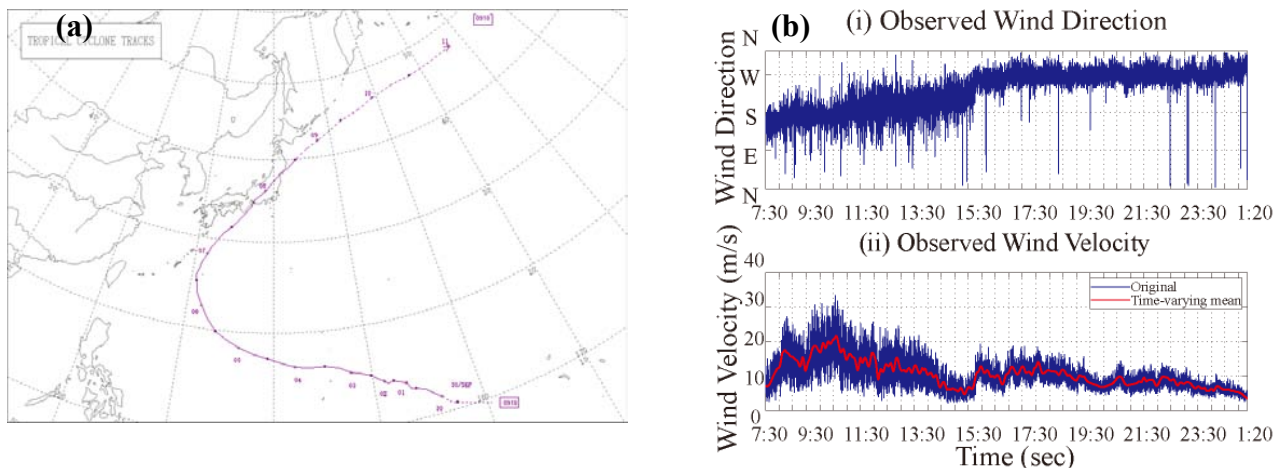


図 3.3.107 台風 0221 号 (a) 台風進路 (b) P4 風向・風速

次に、従来の定常風モデル（左図）と線形近似風モデル（右図）による乱れ強さについて比較を行う。

・ 乱れ強さ評価

乱れ強さについて、再定義された式に従い評価を行った。

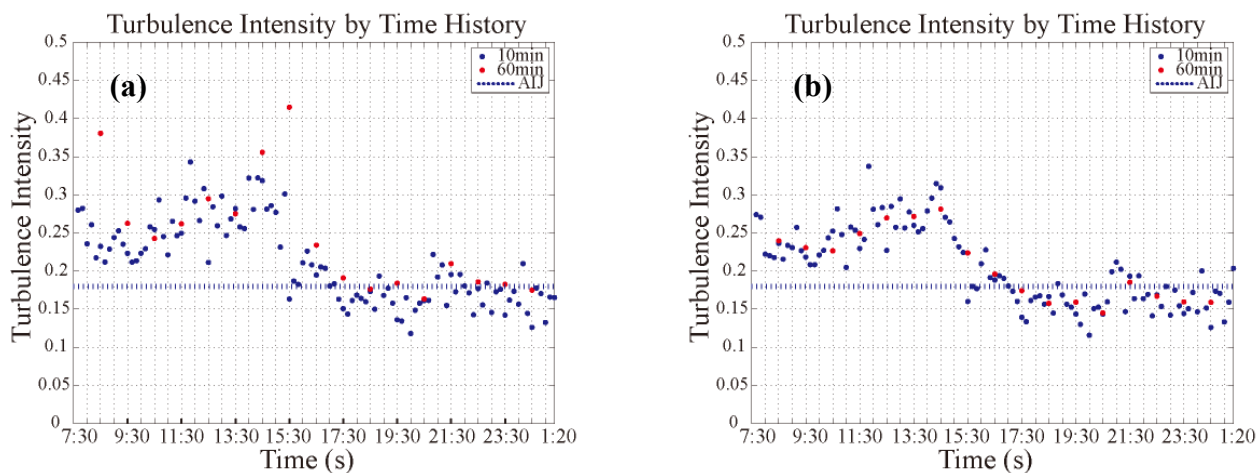


図 3.3.108 時刻歴乱れ強さ乱れ強さ評価 (a) 定常風モデル (b) 非定常風モデル

図中、参考値として、風速乱れ成分が定常確率過程に従った場合の理論値が青の点線で示されている。

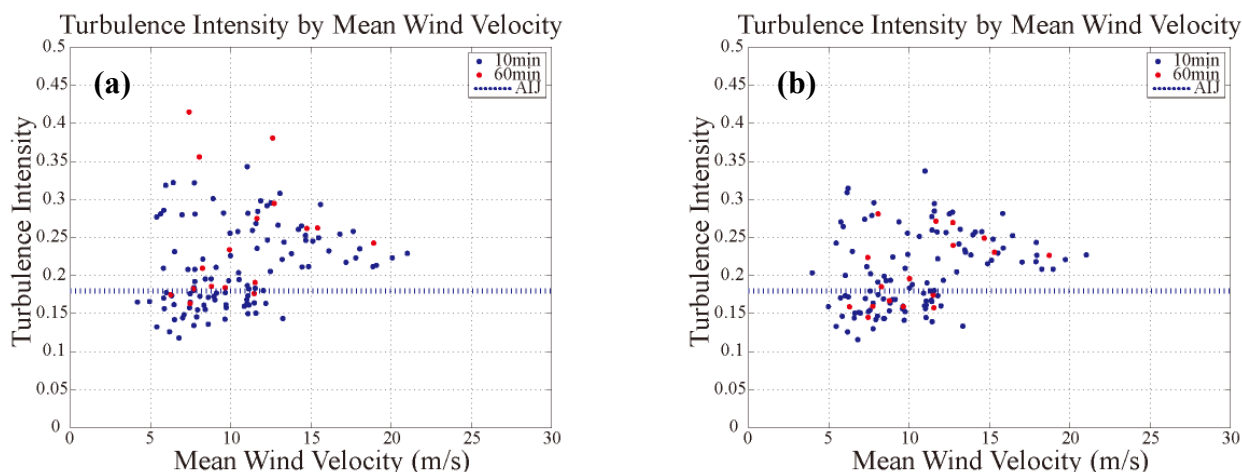


図 3.3.109 平均風速別乱れ強さ評価 (a) 定常風速モデル (b) 非定常風モデル

また、定常風モデルによる乱れ強さと EMD 手法による非定常風モデル間の乱れ強さの計測時間内最大値、最小値を 10 分間、60 分間について以下に記述する。

定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.343

10 分間乱れ強さ最小値：0.118

60 分間乱れ強さ最大値：0.415

60 分間乱れ強さ最小値：0.163

EMD 手法による非定常風モデル

10 分間乱れ強さ最大値：0.337

10 分間乱れ強さ最小値：0.116

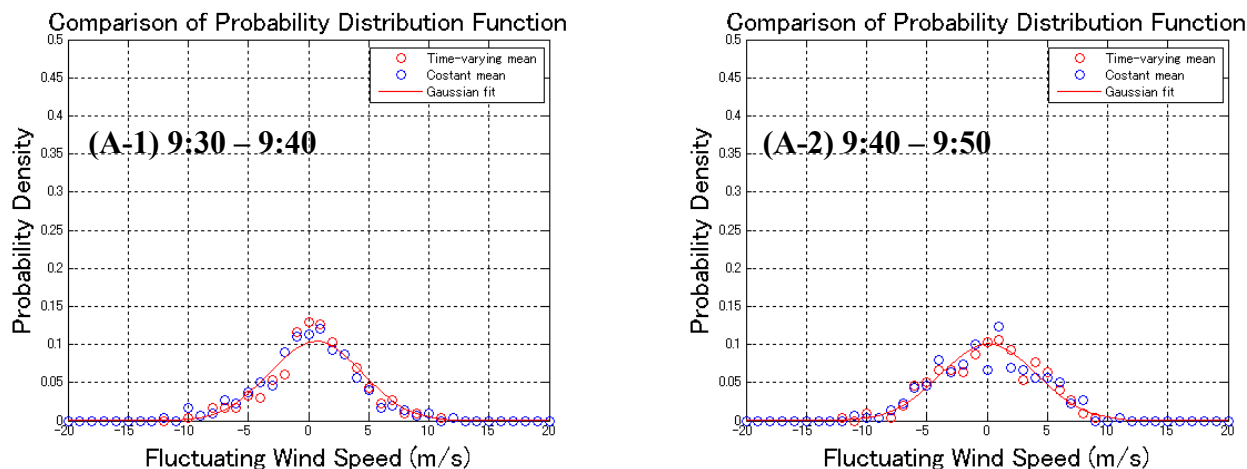
60 分間乱れ強さ最大値：0.281

60 分間乱れ強さ最小値：0.145

表 3.3.4 定常風速モデル・EMD 手法による非定常風モデル間の乱れ強さ最大・最小値の比較

確率密度関数

それぞれのモデルについて確率密度関数を示す。また、再定義された正規確率密度関数については、EMD 手法による非定常風モデルによって算出された平均成分、標準偏差を用いてフィッティングを行った。この時、評価の対象とした時間帯は、最大風速観測時間帯を含む 9:30 – 10:30 までの 1 時間とし、(a) 10 分間、(b) 60 分間の 2 つの評価時間を用いて確率密度関数を評価する事とした。



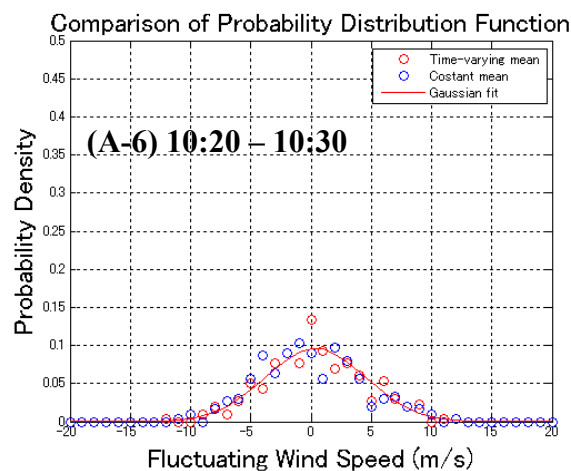
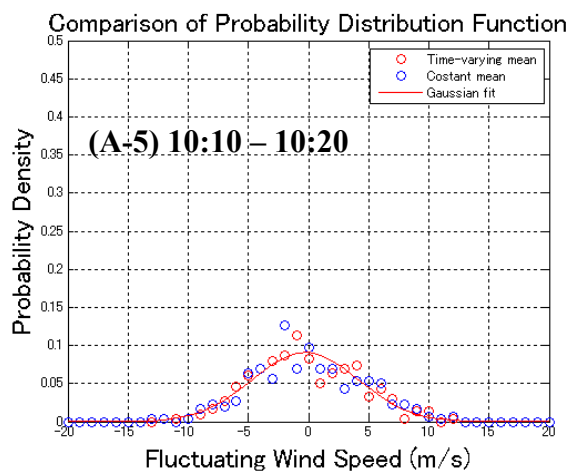
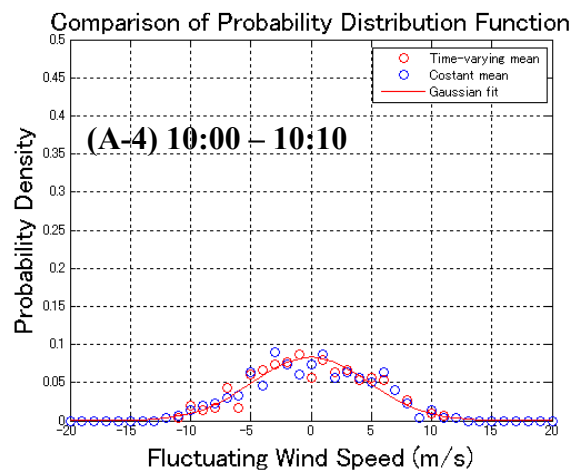
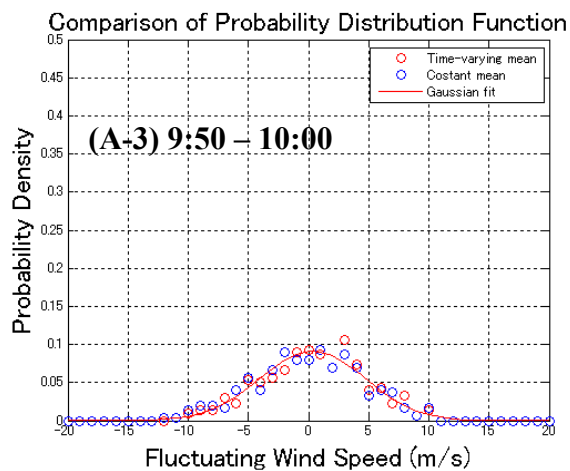


図 3.3.110 9:30 - 10:30 評価時間 10 分間確率密度関数

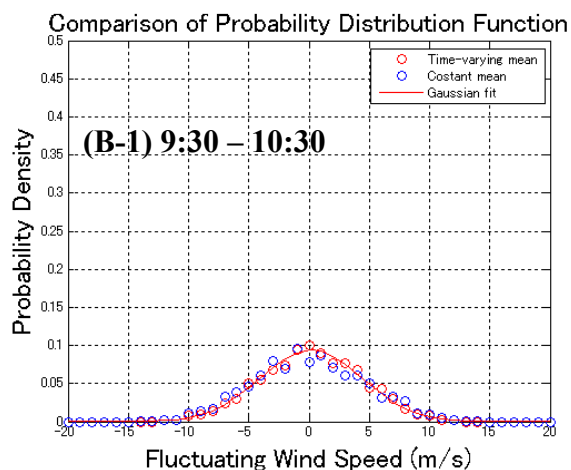


図 3.3.111 9:30 - 10:30 評価時間 60 分間確率密度関数

・ カルマン型パワースペクトル

非定常風モデルに対して再定義されたカルマン型パワースペクトル及び従来の定常風モデルによるパワースペクトルについて評価を行う。この時、評価の対象としたのは最大風速観測時間帯 9:30 – 10:30 の1時間、また、対象となる時間帯を、(a) 10 分間、(b) 60 分間の2つに分けカルマン型パワースペクトルを描く事とした。なおパワースペクトル算出に関しては、得られたデータのサンプル数が少ないことから、MEM 法（バーグ法）を用いて解析を行った。また参考値として、荷重指針に示されるカルマン型パワースペクトルを EMD 手法による非定常風モデルによって得られたパワースペクトルに対してフィッティングを行った。

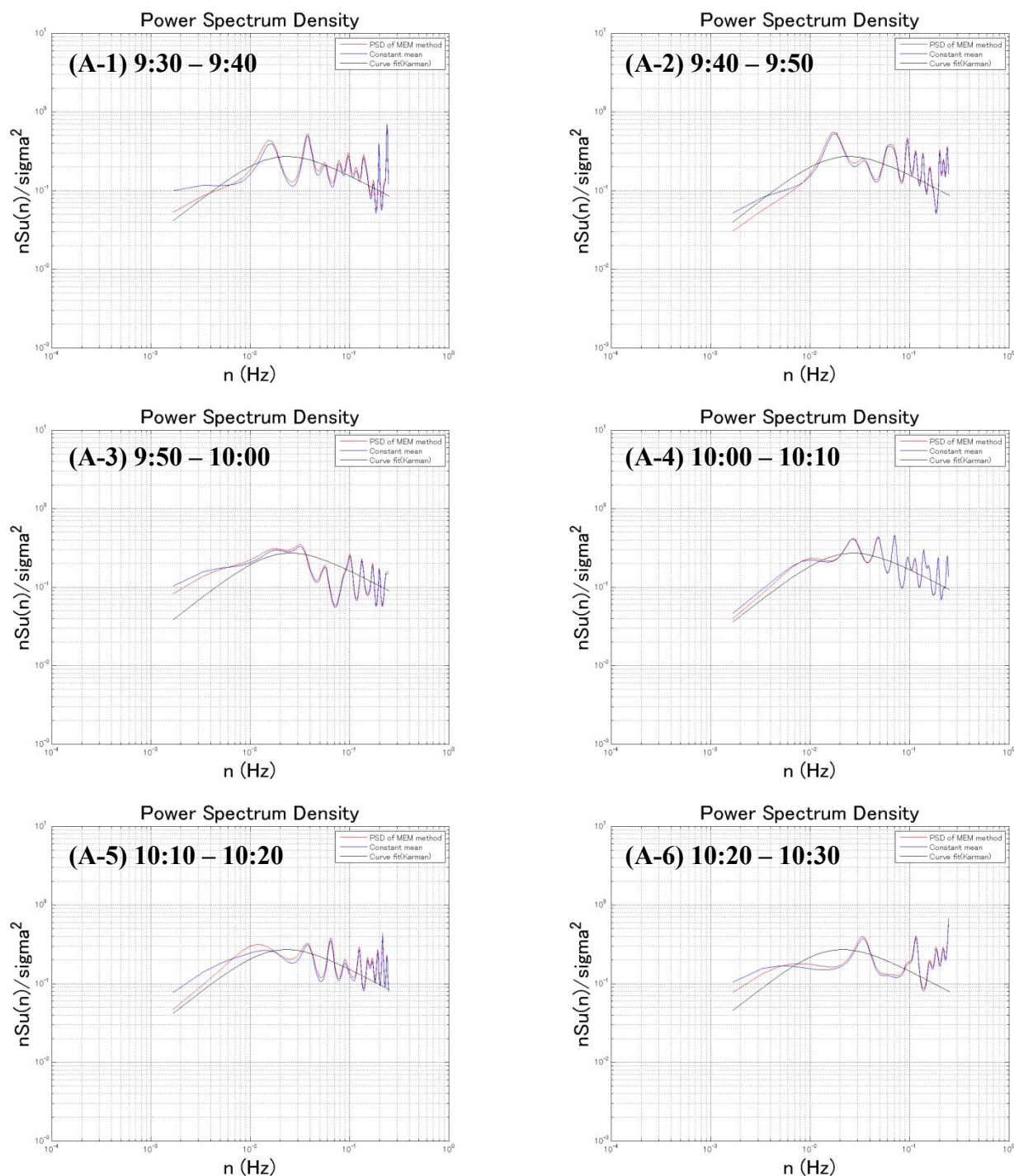


図 3.3.112 9:30 - 10:30 評価時間 10 分間カルマン型パワースペクトル

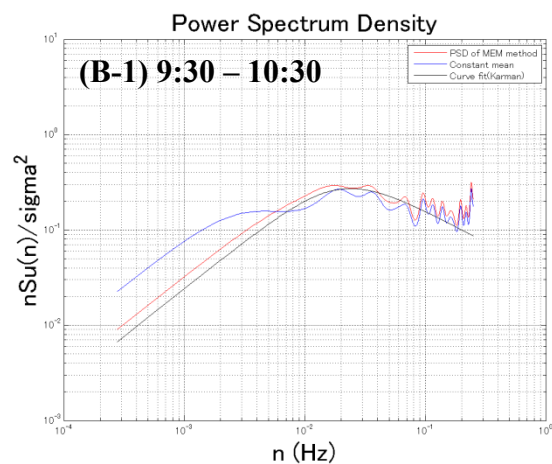


図 3.3.113 9:30 - 10:30 評価時間 60 分間カルマン型パワースペクトル

3.4 まとめ

第3章非定常風評価への新たな風モデルの導入についての成果をまとめる。

・ 線形近似風モデルについて

対象区間内（本ケースでは、10 分間及び 60 分間）での風速変動は緩やかであり、平均成分の変動は線形で十分に近似出来るという仮定に基づいた線形近似風モデルは、従来の一定平均風速によるモデル化に比べ、風速変動の大きい区間では、乱れ強さ、パワースペクトル共にやや違いは出るもの、概ね傾向は同じである。これは、例えば 10 分間という評価時間内では風速の急激な上昇等の非定常な風速変動が発生しにくかった事、また、用いたデータ内にそのような変動が少なかった事が原因と考えられる。ただし、0221 号 P3 データ内に存在した 10 分間の間に最大風速と最小風速が 20m/s 程度変化する区間では、線形近似風モデルの優位性を確認できる。(21:30 – 21:40) 一方、60 分間評価によるモデル化では、そもそも、風速の変動が線形的に表現できる、という仮定が必ずしも適用出来ないケースもあり（例：0221 号 P3, P4）、際立った成果とは言い難い。しかしそれでも、一定平均風速によるモデル化に比べ、時々刻々と変化する変動風速を取られたモデル化は出来ていると言える。特にその傾向は、10 分間という短い評価時間の時にその優位性を強く発揮できる。

・ EMD 非定常風モデルについて

EMD 手法による平均成分導出のメリットは、平均成分算出の際、Sifting Process によってデータ内の重ね合わさった波が取り除かれ、対象な波形によって構成された IMF 成分を計算出来る点にある。これら IMF 成分を足し合わせ、変動成分として風速をモデル化する事で、例え非定常に風速が変動していたとしても周波数領域での解析が可能となる。また、風速データから IMF 成分が取り除かれる事により、不均一な振幅でギザギザとした信号群から滑らかな時々刻々と変化する平均成分の算出が可能となる。しかし、EMD (Empirical Mode Decomposition) と呼ばれるように、平均成分算出には経験的なパラメーターの決定が欠かせない。本研究で用いた 2 秒間データに対しては、基本振動数内データを 256、局所内データ基本信号数 3 とした場合が最も適したパラメーターである事がわかった。また、10 分間評価時間による評価においては、線形近似風モデルと同様際立った優位性は見られない。しかし、全体として、乱れ強さのばらつきは小さくなる傾向にある。一方で、60 分間という評価時間内では、時々刻々と非線形に変化する風速の平均成分を十分捉えられる事がわかる。この時、風速乱れ強さ及び確率密度関数、パワースペクトル評価は一定平均風速による定常風モデルに比べ格段の優位性を発揮出来る。この事から、EMD 手法を用いる際には、60 分間データを用いる事で、例え風速が非線形に変化を繰り返す非定常風データにおいて、適切な風特性評価が可能である事が示唆される。しかし、一部のデータには、EMD 解析による時間変化に依存した平均成分が適切ではないケースも存在し、特に 10 分間という短い評価時間に対しては注意が必要となる。また、定常性の強いデータに対しては、従来の手法による乱れ強さとほぼ同程度の値を得る事ができる事も確認した。

評価時間毎の乱れ強さ最大値・最小値の比較に関しては、10 分間データによる比較で、両モデル間に際立った差異は見られないが、EMD 手法では一部のデータを適切に評価出来ない事、10 分間中では線形的な平均成分変化を多い事を考えると線形近似風モデルがより適していると考えられる。一方で、60 分間データに関しては、評価時間内に非線形な変化も多く、線形近似も難しい事から EMD 手法による評価が適していると言える。これは、EMD 解析による平均成分が 60 分間評価時間内に一定平均風速に比べ適切に風速の非定常性を評価できたためと考えられる。

次章では、第3章で得られた知見を基に非定常模擬風速作成と一般化を行う。

第4章

非定常変動風速の一般化と変動模擬風速の作成

4. 非定常変動風速の一般化と変動模擬風速の作成

4.1. 非定常変動風速の一般化について

本章では、第2章、第3章で得られた非定常風データを基に、非定常風性状についてデータの分類を行い、一般化を試みる。これは、例えば非定常に変化する風速状態を解析対象とする場合にも、実際に観測されたデータはランダムに変化する一つのサンプルに過ぎずそれを直接応答評価に用いる事は解析の信頼性を保つ上で望ましいとはいえないため、確率・統計的に評価された時系列データによって応答解析を行う必要がある、ためである。よって、本章では時系列データとして観測されたデータを統計的に評価し、次章での応答評価に用いられる非定常変動模擬風速のシミュレートを行う。以下に、非定常風データの分類分けと模擬風速作成の詳細を述べていく。

4.2. 非定常変動風速の分類

非定常変動風速の一般化を行う上で、非定常風性状について統計的な整理が必要となる。そこで、柏キャンパスから得られたサンプル数7つ、風速の変動が確認出来る計9データについて非定常風性状の分類化を試みる。分類方法は第3章で用いた線形近似風モデルを基に、一定平均風速に対する線形近似平均成分最大値・最小値の比（風速変化率）を用いる。（式4.2.1）

$$U_{CR} = \left| \frac{\min \text{ or } \max(\bar{U}(t) - \bar{U})}{\bar{U}} \right| \quad t = 2, 4, \dots, 600(s) \quad \text{式 4.2.1}$$

$\bar{U}(t)$: 線形近似平均成分 \bar{U} : 一定平均成分

これは、第3章の分析から、およそ非定常な風速の変化は線形近似風モデルによる平均成分を用いる事で評価が可能な事、60分間という評価時間は建物応答を対象とした解析を行う上では十分に長く10分間で代用が可能な事、に由来する。また、応答評価に必要な評価時間は建物固有周期の100倍程度で十分であるとの指摘もあり、本研究では10分間による荷重評価を行う。

本章では分析対象時間を10分に絞り非定常風の分類化を行う。非定常風速の分類を行う上で、時系列データ中最大風速を観測したポイントを中心に前後30分間ずつのデータについて（式4.2.1）による評価を行う。一部のデータについては、観測開始直後20分を経たずに最大風速を観測した為、サンプル数が欠ける事になったが、7つの台風計9データについて整理した表を4.2.1に示す。表中グレーで囲われたポイントは特に大きな風速変化率を記録したデータである。

表 4.2.1 最大風速観測前後30分間風速変化率

台風\Time	-30min	-20min	-10min	0min	+10min	+20min	+30min
No.0206 P4	9%	2%	9%	MAX	17%	22%	7%
No.0221 P3	-	2%	29%		3%	8%	7%
No.0221 P4	-	-	4%		7%	0%	20%
No.0310 P4	5%	9%	6%		10%	1%	17%
No.0406 P4	13%	2%	5%		0%	6%	12%
No.0421 P4	13%	4%	15%		8%	5%	9%
No.0422 P3	6%	0%	10%		7%	22%	20%
No.0422 P4	9%	10%	17%		25%	17%	11%
No.0918 P4	11%	1%	4%		10%	5%	5%

各台風サンプルから得られた最大風速前後 60 分の風速変化率・発生確率について表 4.3.2 に示す。

表 4.2.2 最大風速観測前後 30 分間風速変化率と発生確率

風速変化率	0 - 5 %	5 - 10 %	10 - 15 %	15 - 20 %	20 - 25 %	25 - 30 %
発生確率	23.53%	37.25%	17.65%	9.80%	7.84%	3.92%

表より、得られた台風データを最大風速観測点近傍で整理すると一定平均風速に対する風速変化率はおよそ 0% - 30% の範囲で推移していることがわかる。

4.3. 線形近似風モデルによる評価時間内スペクトル特性

次に本節では、観測データから得られた非定常風データについて特に風が強かった区間を 10 分間毎にピックアップし、より細かい時間スケールでのスペクトル特性を検証する。これは、非定常模擬風速を作成する上で評価時間内のスペクトルが時々刻々と変化する平均成分に対してどのように変化しているかを分析する為に行われる。以下に、対象となる区間データとパワースペクトル密度を示す。

・ 02. 10. 1 台風 0221 号 P3 20m

台風 0221 号 P3 20m 地点での観測データについて分類化を行う。観測された風速データ中、風速の上昇と下降を記録したデータについて以下に示すと、

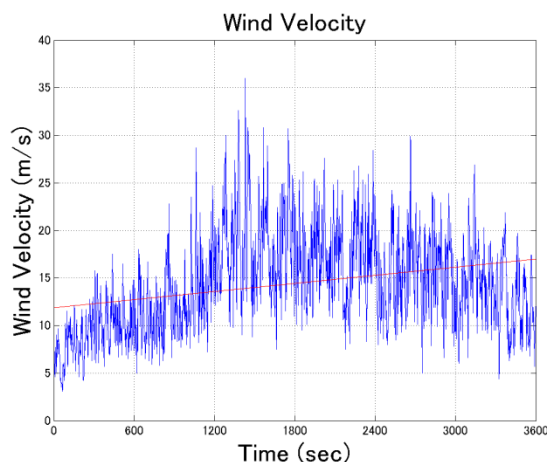


図 4.3.1 最大風速観測時間帯 P3 20m 21:10 – 22: 10

となる。また図中に赤線で線形近似による平均成分を併記した。図より、60 分間での非定常な風速の変化を確認出来るが、ここではさらに 10 分間について検証を進める。図 4.3.2 に 10 分間毎に整理した風速の時刻歴データとパワースペクトル密度データを示す。

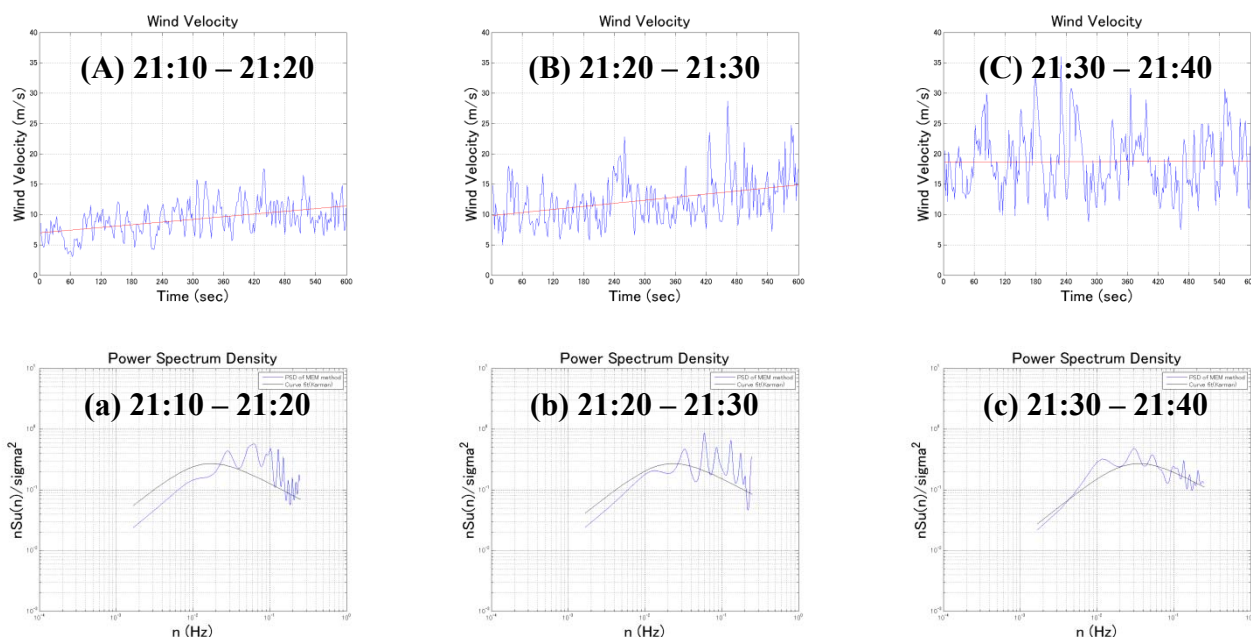


図 4.3.2 P3 20m 21:10 – 21:40 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

10 分間毎にデータを分析すると、線形近似風モデルでモデル化された変動風速によるパワースペクトルは、一定平均風速に対してモデル化されたパワースペクトル特性に比べ高周波数側にピーク位置が移行している事がわかる。また、その傾向は風速が安定してピークを迎えた 21:30 – 21:40 の区間では、逆に一定平均風速によるスペクトル特性とほぼ同じ特性を有する。このデータに対してさらに細かく 5 分間毎にスペクトル特性を描くと、

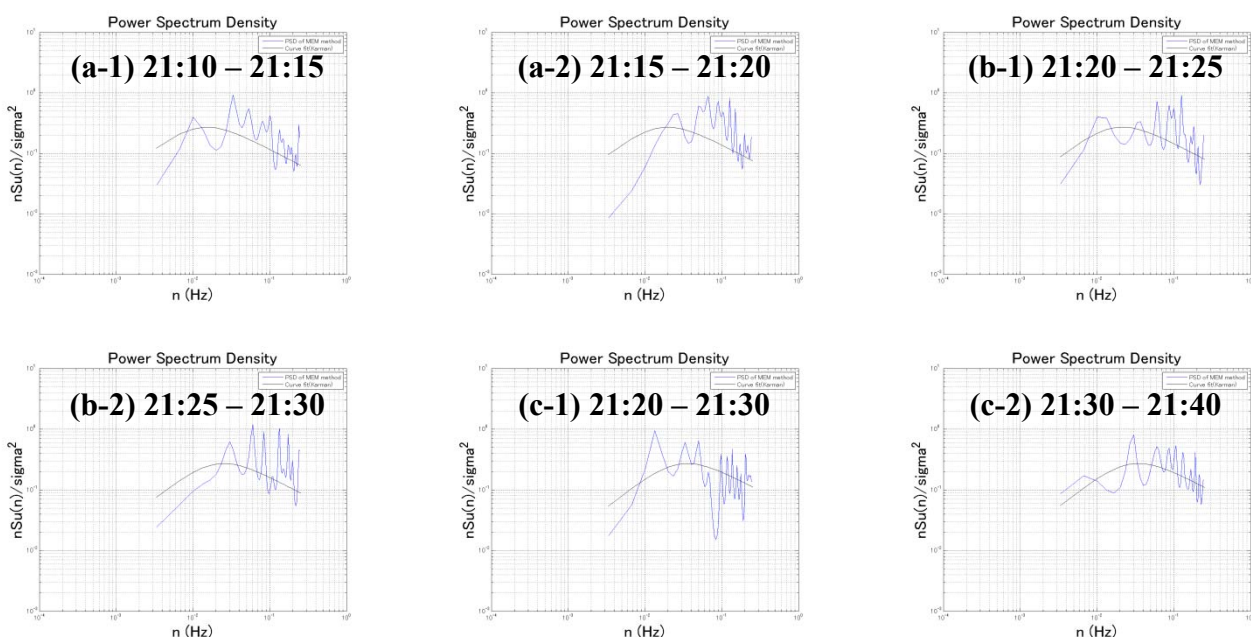


図 4.3.3 P3 20m 21:10 – 21:40 5 分間パワースペクトルデータ

となる。さらに細かく 3 分 20 秒毎にスペクトル特性を調べると、

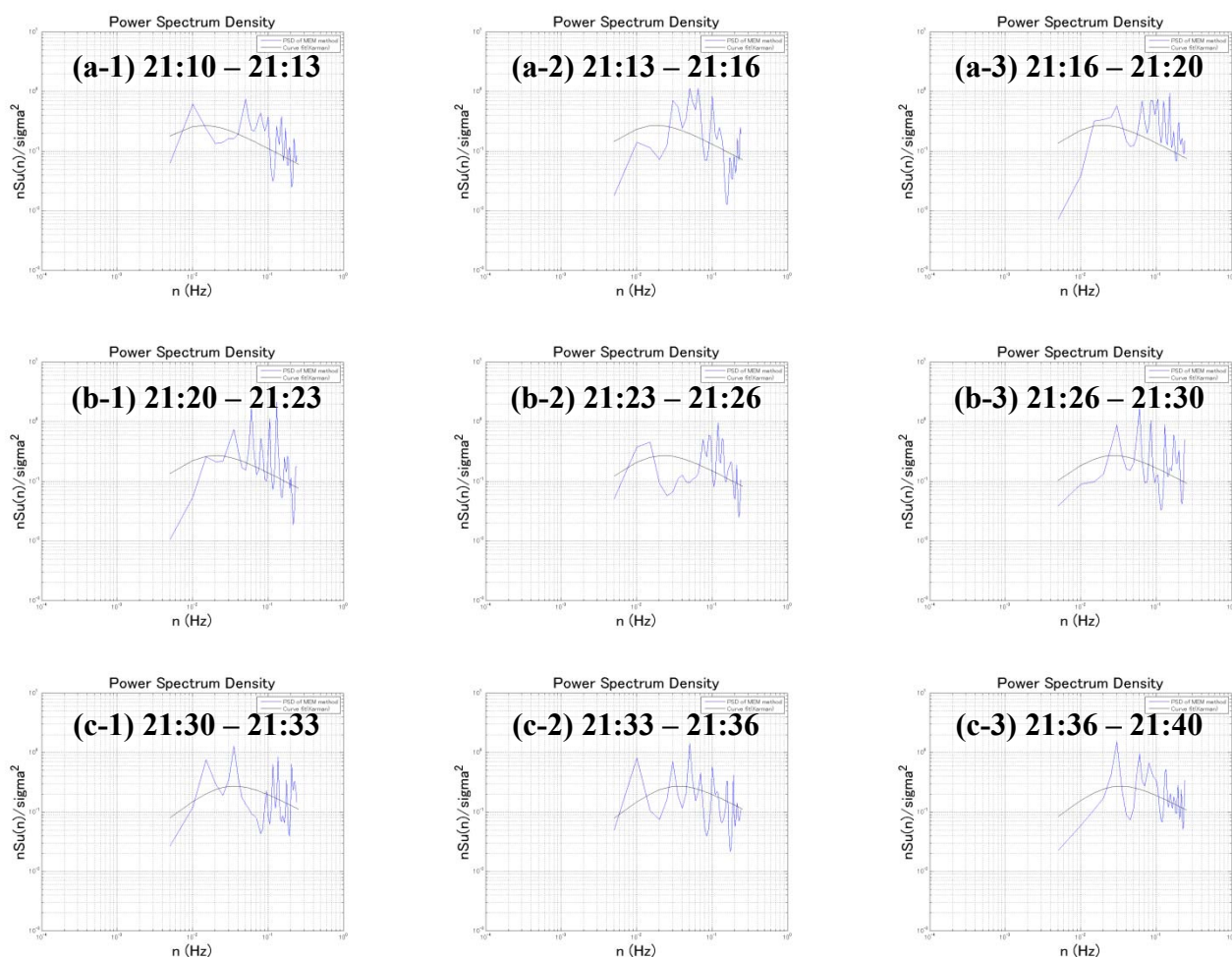


図 4.3.4 P3 20m 21:10 – 21:40 3 分間パワースペクトルデータ

図 4.3.3 及び図 4.3.4 より、明らかに 10 分間の対象時間内でもスペクトルピークの位置は一定平均風速によるスペクトルピーク位置に比べ時々刻々と変化している事がわかる。またその形状は、一定平均風速によるパワースペクトル形状とほぼ変わらず、ただ、ピーク位置がずれるという傾向にある。この事を他の事象でも確認するため、解析を同台風 21:40 – 22:10 区間において続ける。次ページに 10 分、5 分、3 分 20 秒毎に整理された時刻歴データ及びスペクトルデータを記述する。

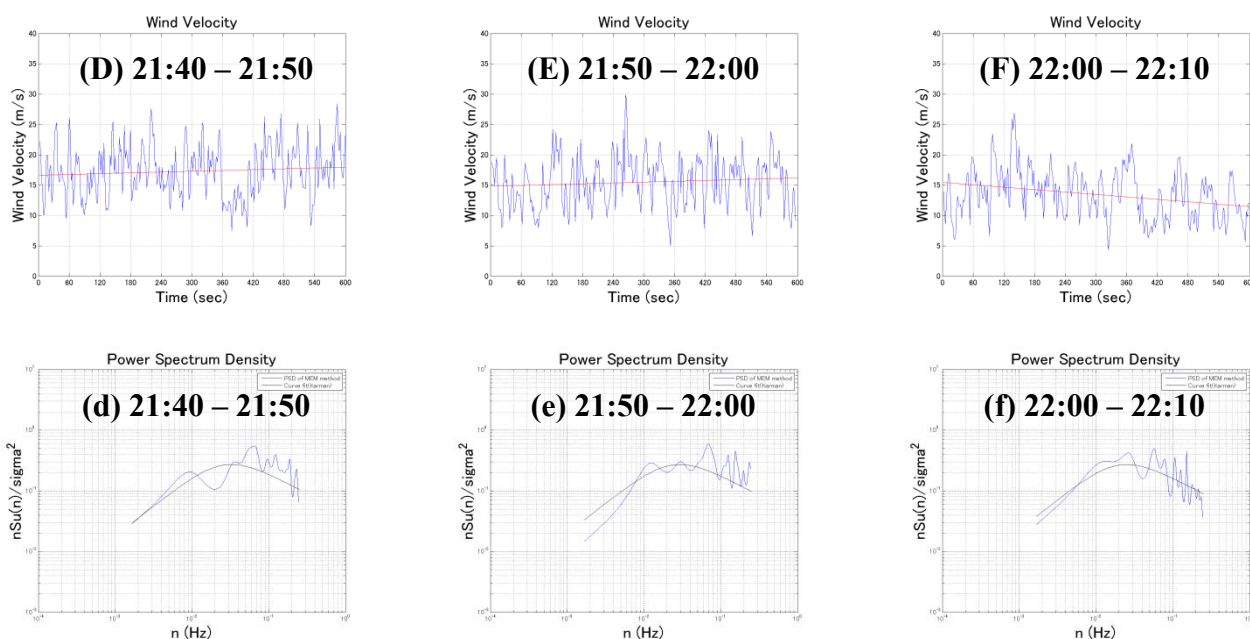


図 4.3.5 P3 20m 21:40 – 22:10 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

図 4.3.5 では、計測時間毎に目立ったスペクトルピークの変化は見られない。これは、前半のデータに比べ風速の下降の具合が緩やかであり、定常状態に近いからであると考えられる。しかし、ここではさらなる検証の為、より細かい時間帯での分析を進める。

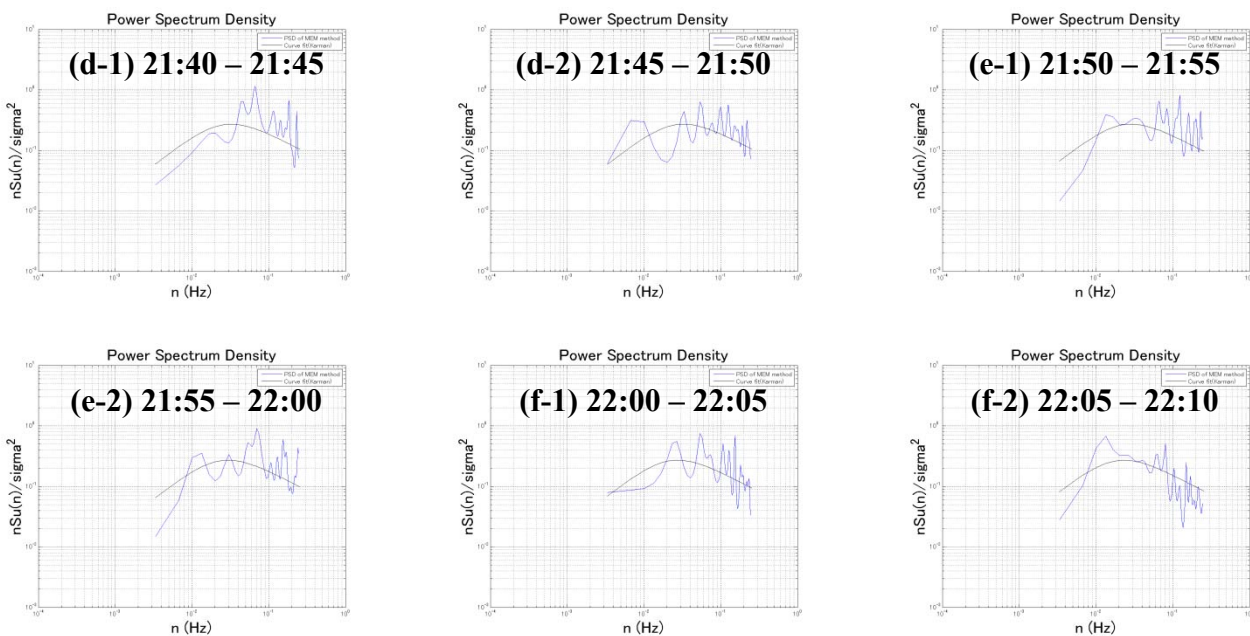


図 4.3.6 P3 20m 21:40 – 22:10 5 分間パワースペクトルデータ

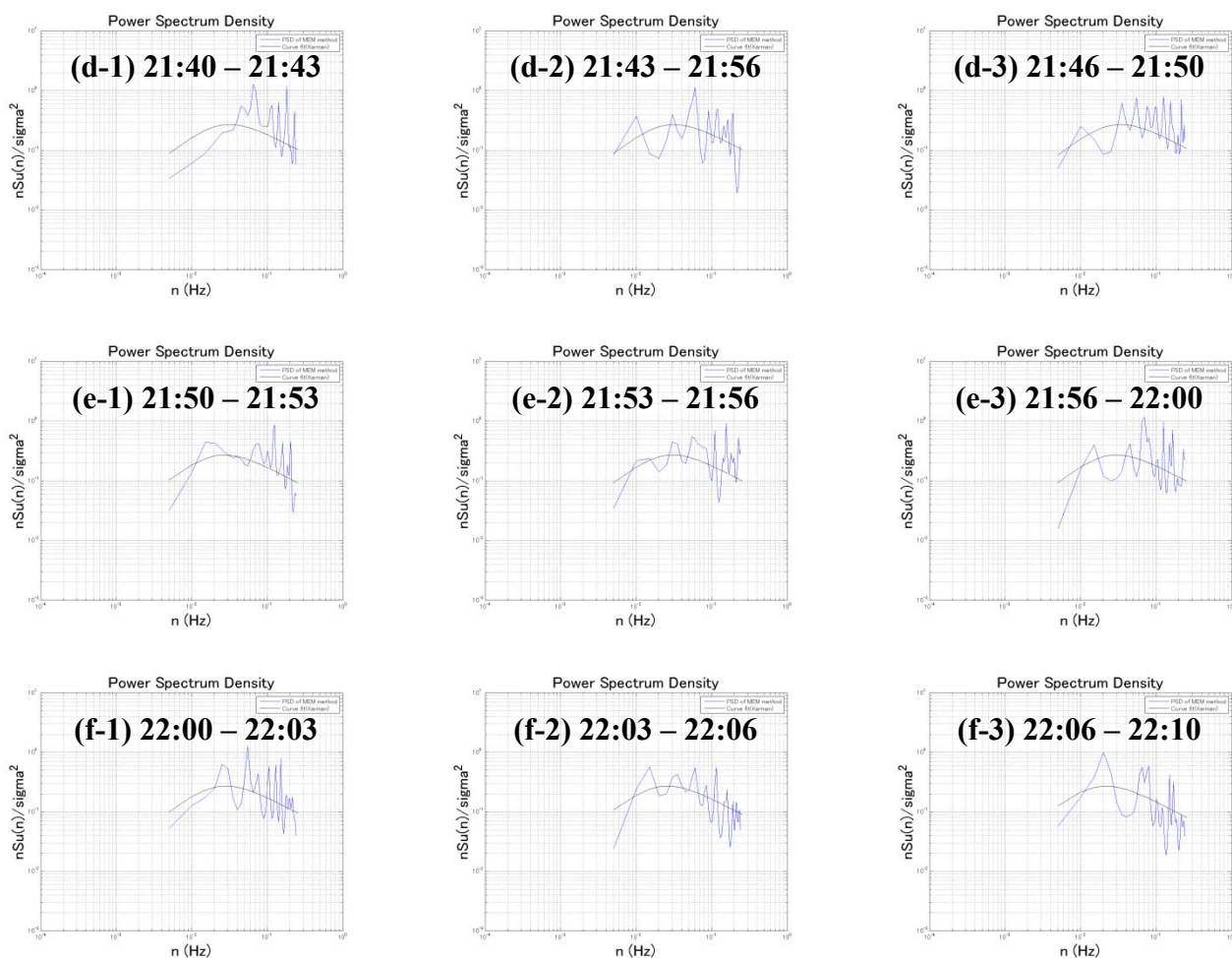


図 4.3.7 P3 20m 21:40 – 22:10 3 分間パワースペクトルデータ

図 4.3.6 及び図 4.3.7 から、風速が緩やかに変動する時には、風速が上昇する時に見られたスペクトルピークの変化は見られない。ただし、一部、上昇部のデータが残る 21:40 – 21:43 においてスペクトルピーク位置の変化を確認できる。さらに他のデータについても分析を行う。

・ 02. 10. 1 台風 0221 号 P4 43m

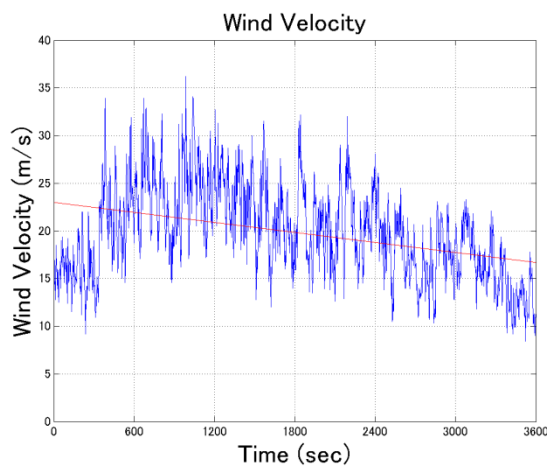


図 4.3.8 最大風速観測時間帯 P4 43m 21:20 – 22: 20

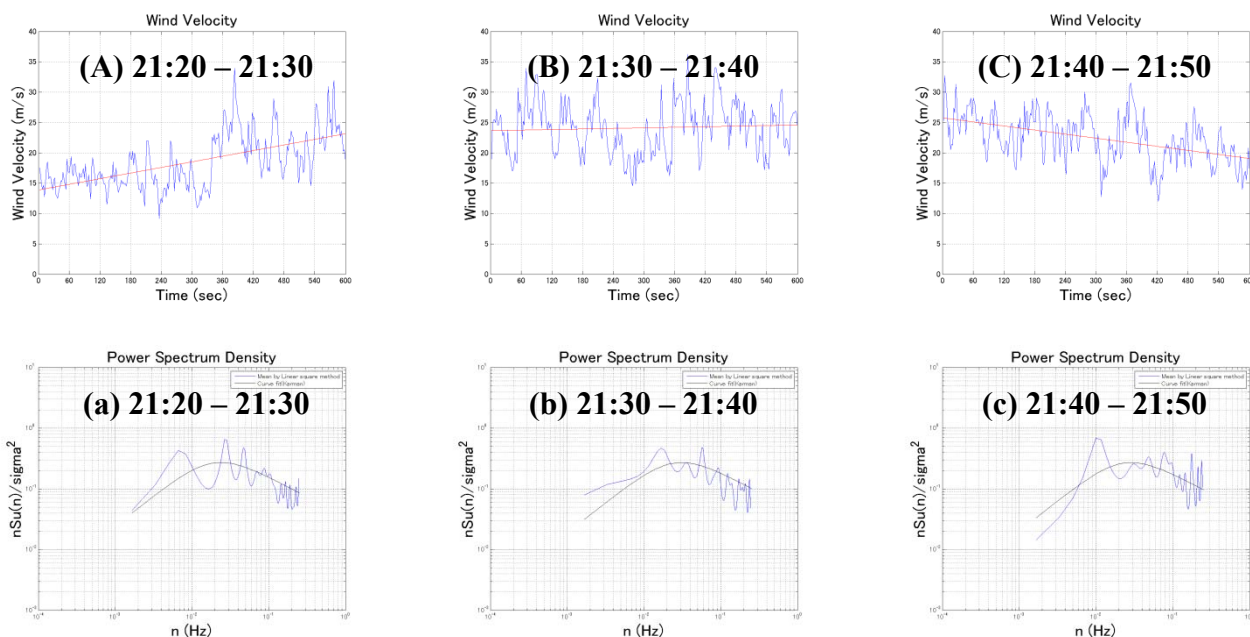


図 4.3.9 P4 43m 21:20 – 21: 50 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

図より、10 分間毎に評価されたデータではスペクトルピーク位置の変化を確認出来ない。さらに細かい時間帯での分析を進める。

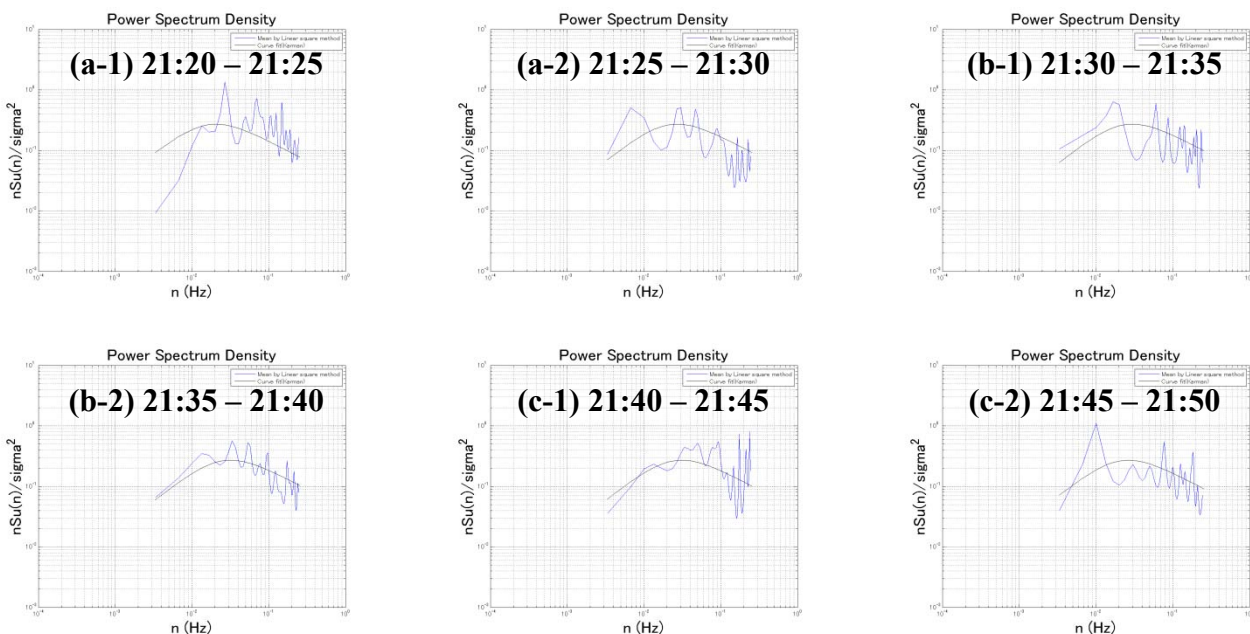


図 4.3.10 P4 43m 21:20 – 21: 50 5 分間パワースペクトルデータ

図より、風速上昇区間 21:20 – 21:30 内でスペクトルピーク位置が一定平均風速によるスペクトルピーク位置に対して高周波数側に変化している事がわかる。さらに 3 分間データについても検証を行う。

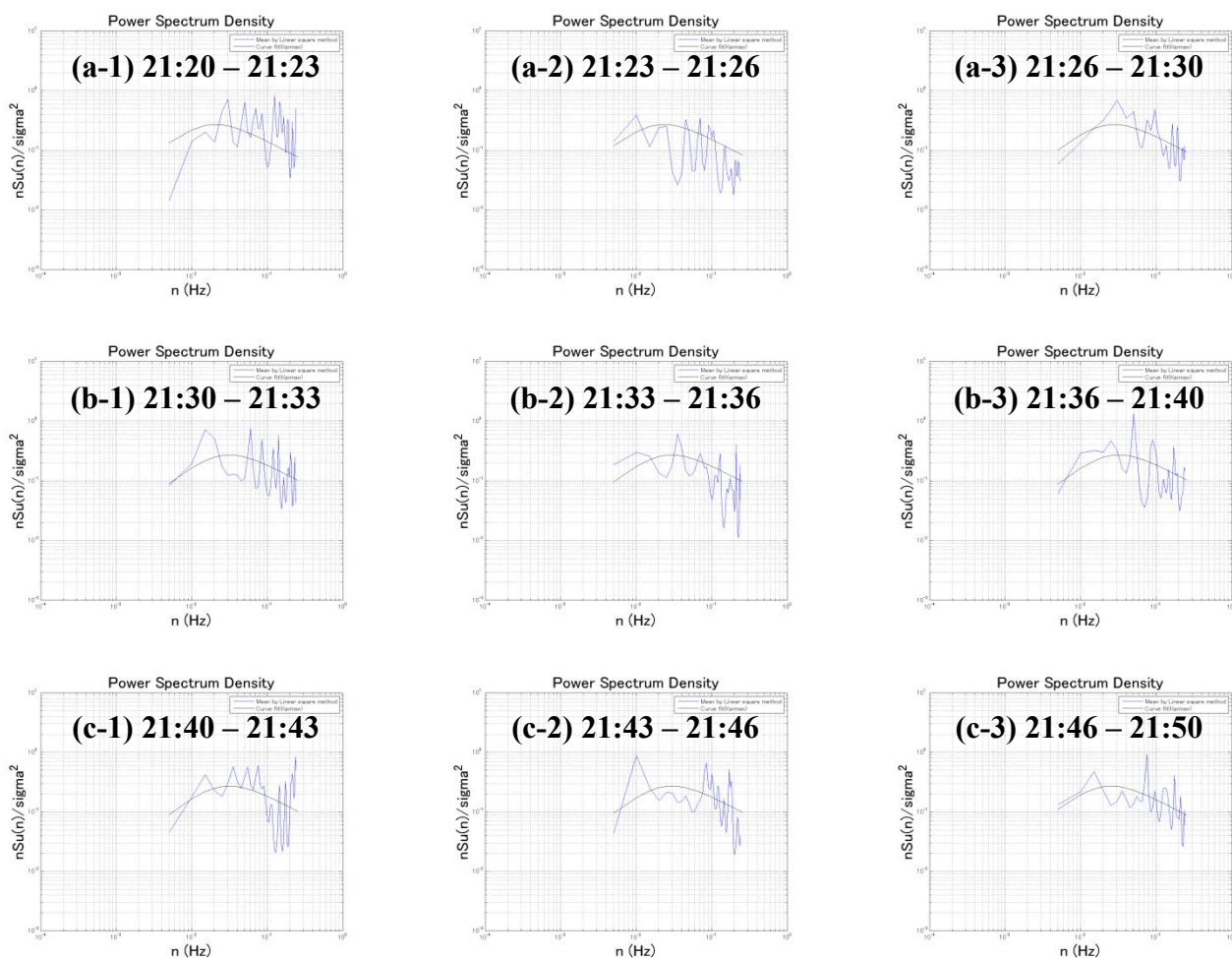


図 4.3.11 P4 43m 21:20 – 21:50 3 分間パワースペクトルデータ

図より、P4 地点における風速上昇区間 21:20 – 21:33 においてもスペクトルピーク位置が一定平均風速によるピーク位置に比べ高周波数側に変化している事が確認できる。スペクトル形状も同様に、一定平均風速によるスペクトルと近似出来るケースが多い。続いて風速下降区間についても検証を行う。

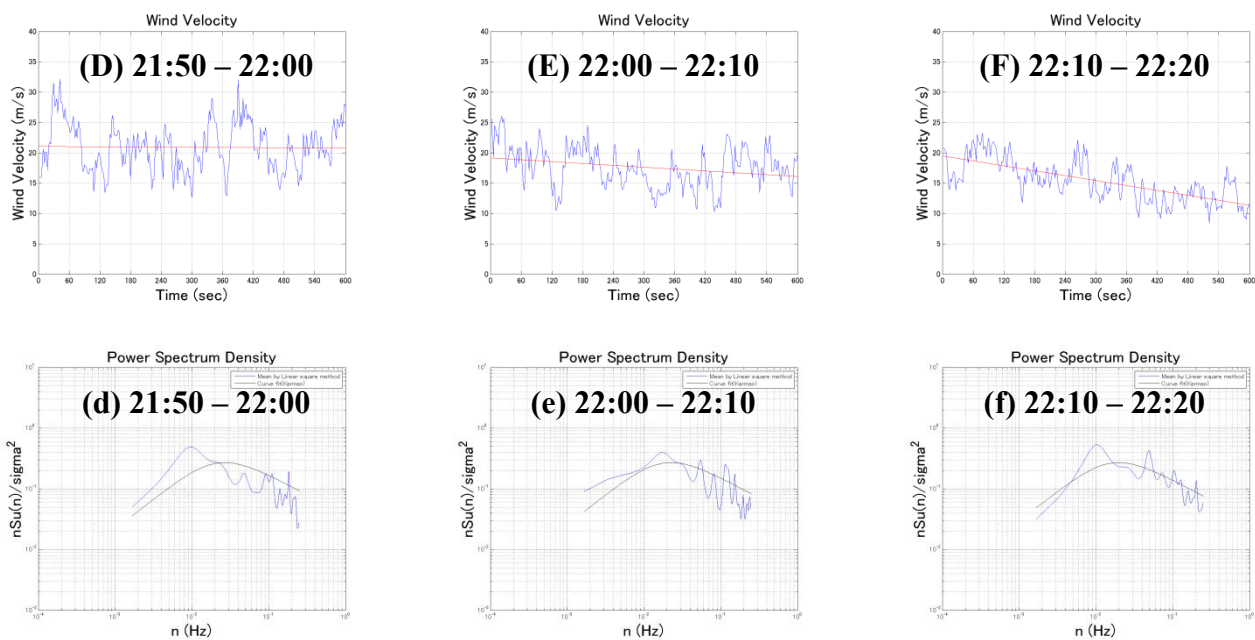


図 4.3.12 P4 43m 21:50-22:20 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

図より、10 分間の評価では一定平均風速によるスペクトルピーク位置、形状ともに変わらない。次に 5 分、3 分によるデータ検証を行う。

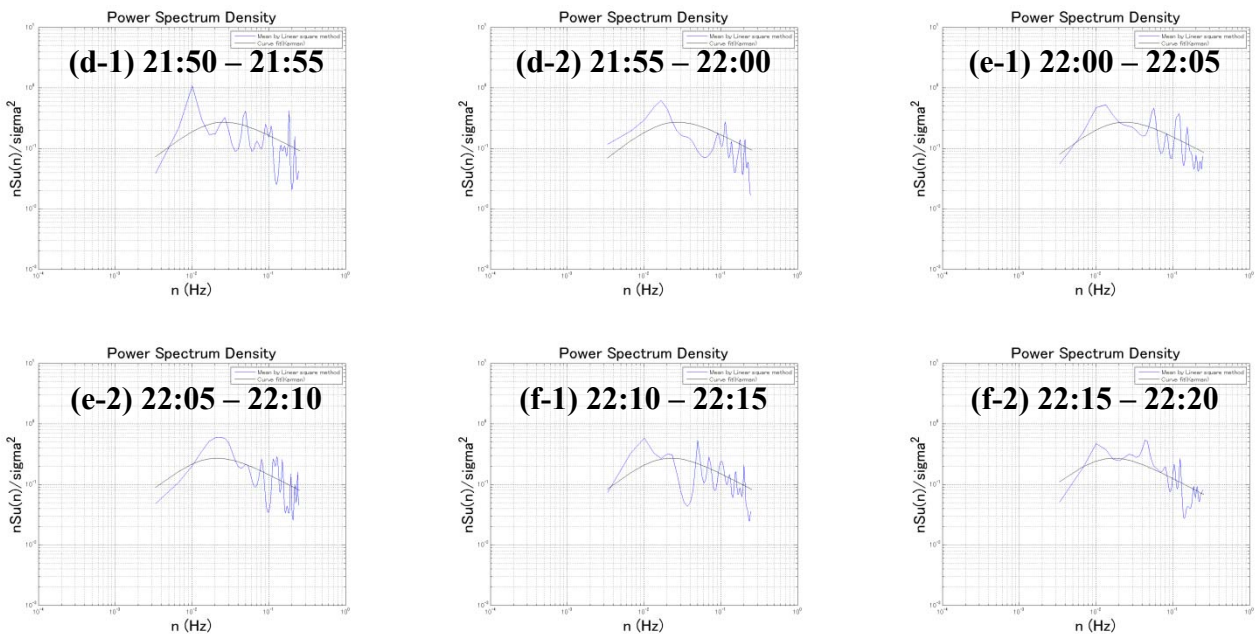


図 4.3.13 P4 43m 21:50-22:20 5 分間パワースペクトルデータ

5 分データによるスペクトル解析では、両者の間に際立った違いを確認することは出来ない。さらに 3 分データによる分析を行う。

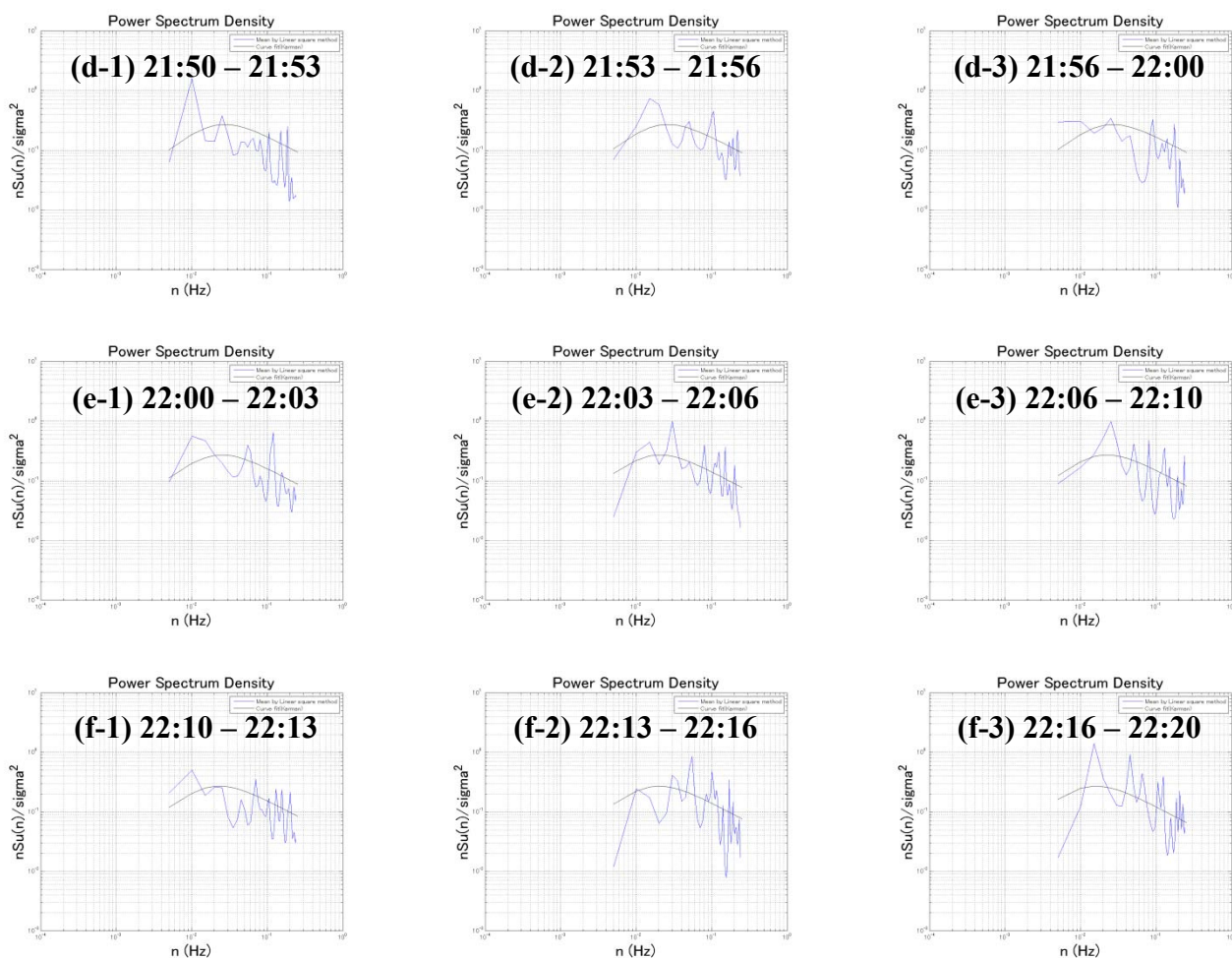


図 4.3.14 P4 43m 21:50 – 22:20 3 分間パワースペクトルデータ

3 分間データにおいてもスペクトル形状に違いはあるもののスペクトルピーク位置の変化については確認できない。

- ・ 09. 10. 9 台風 0918 号 P4 43m

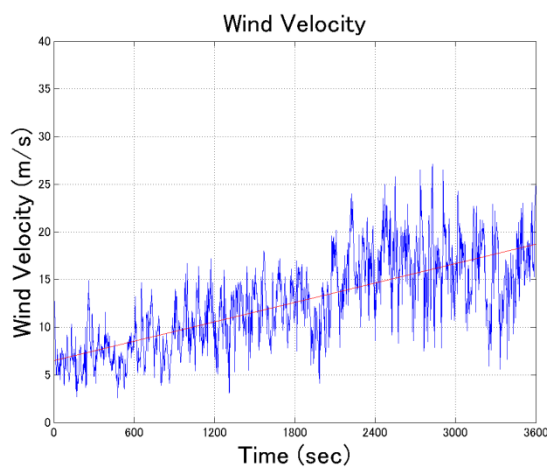


図 4.3.15 風速上昇区間 P4 43m 7:30 – 8:30 時刻歴データ

図のように約1時間程度掛けて風速が上昇する区間について分析を行う。10分間毎にまとめられた時刻歴データ・パワースペクトルデータについて以下に示す。

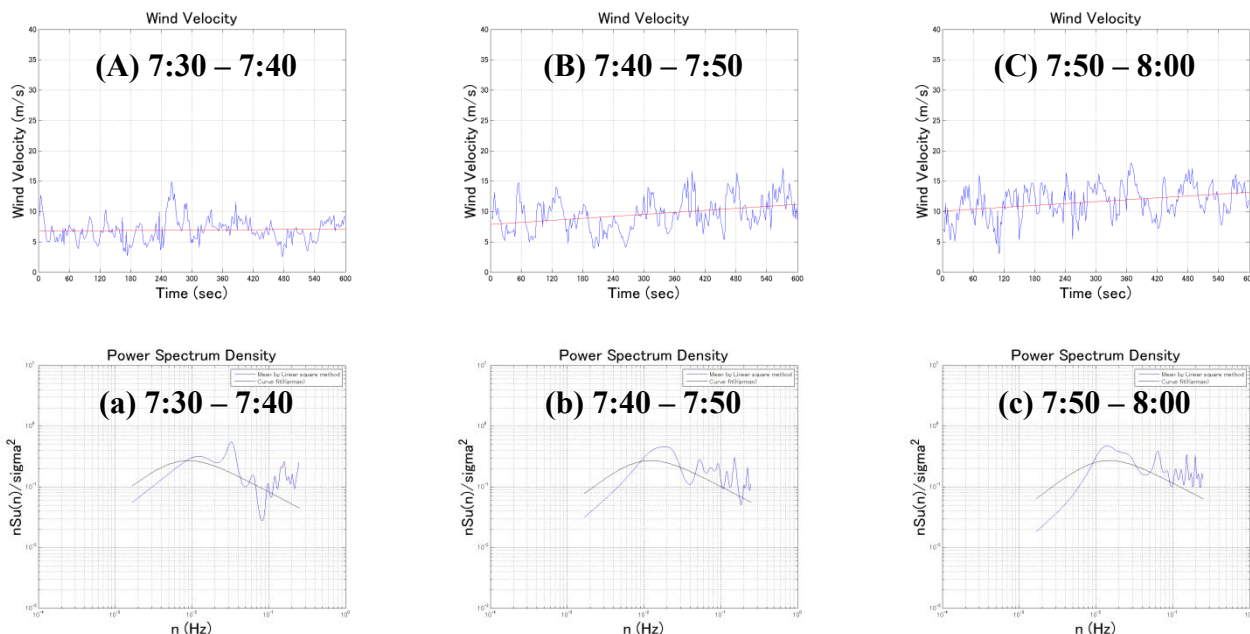


図 4.3.16 P4 43m 7:30-8:00 10分間時刻歴・パワースペクトルデータ

図から、線形近似による平均成分の傾きに比例する形でスペクトルピーク位置が変化している様子が伺える。さらに細かな5分間について分析を進める。

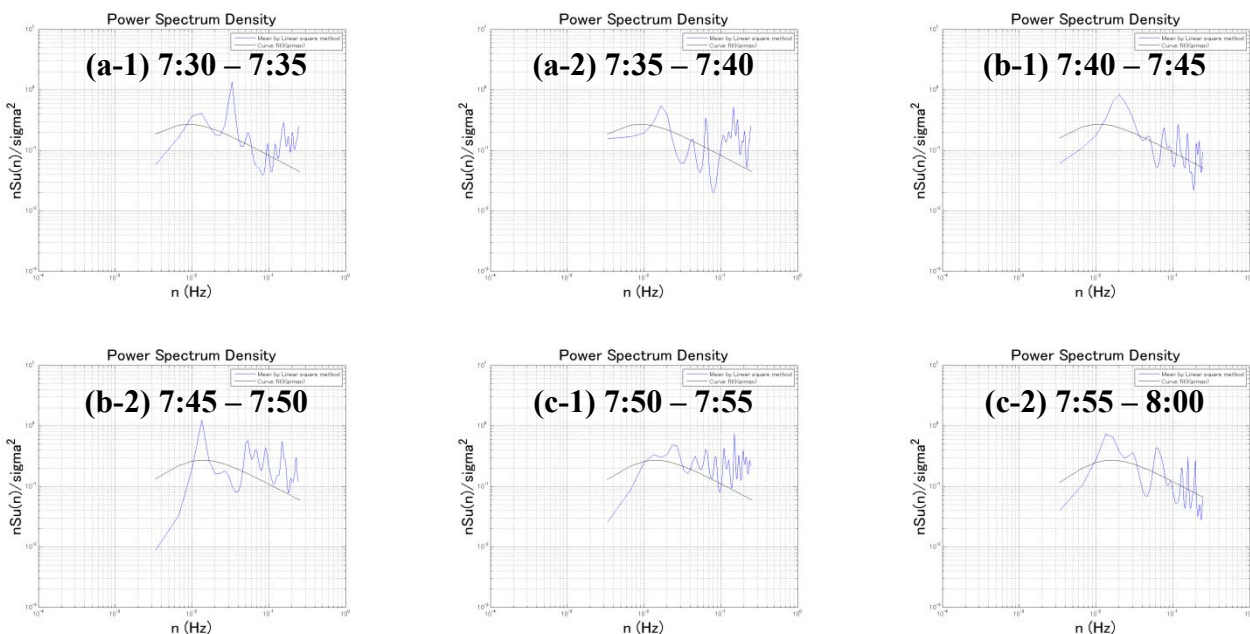


図 4.3.17 P4 43m 7:30-8:00 5分間パワースペクトルデータ

5分間毎にパワースペクトル性状を確認すると、各区間でややスペクトルピーク位置が理論値に比べ高周波数側に移行している事がわかる。3分20秒間データについても以下にまとめる。

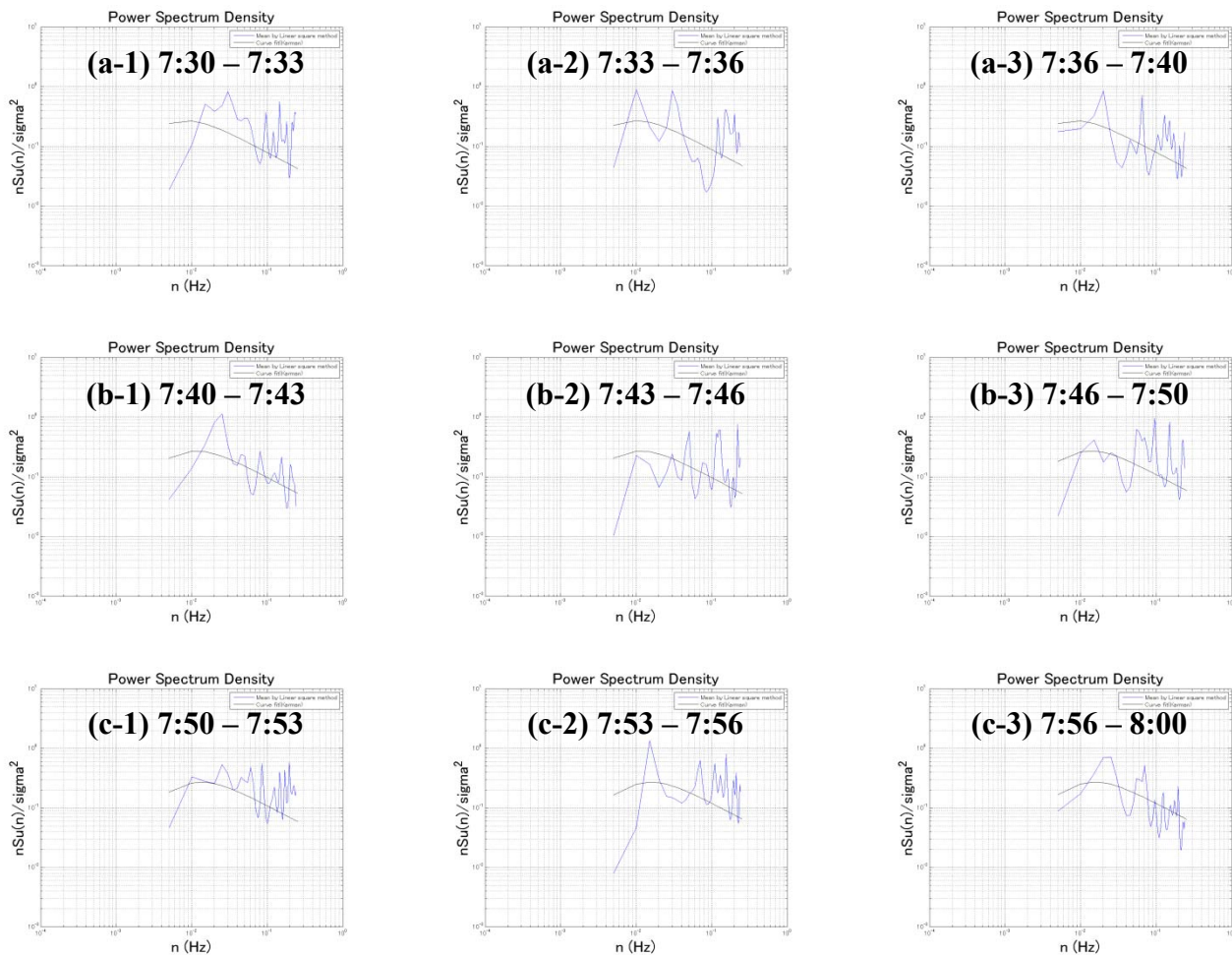


図 4.3.18 P4 43m 7:30-8:00 3 分間パワースペクトルデータ

7:30-7:33 区間のように顕著にスペクトルピーク位置が変化するケースは少ないが、全体的にややピーク位置が高周波数側に移行している様子が確認出来る。次に、8:30-9:00 一時間データ後半の上昇区間について同様にまとめる。

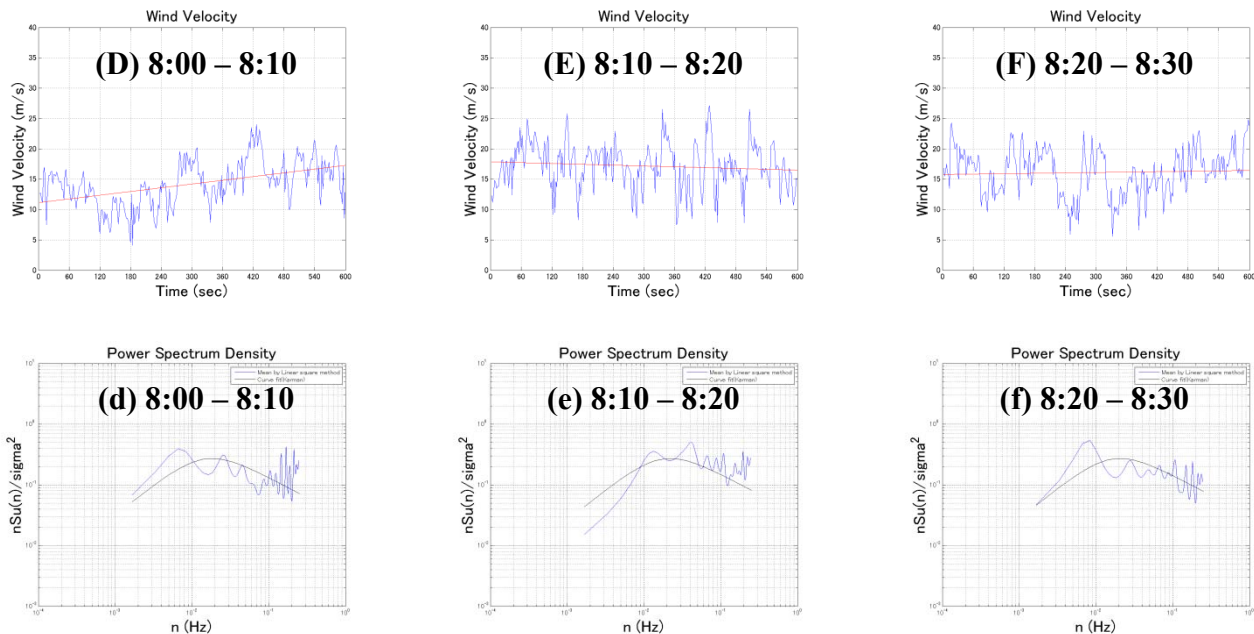


図 4.3.19 P4 43m 8:00 – 8:30 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

観測時間後半になると風速が安定的になり、スペクトル特性の変化はさほど大きくは無い。さらに分析をより細かい時間帯について進める。

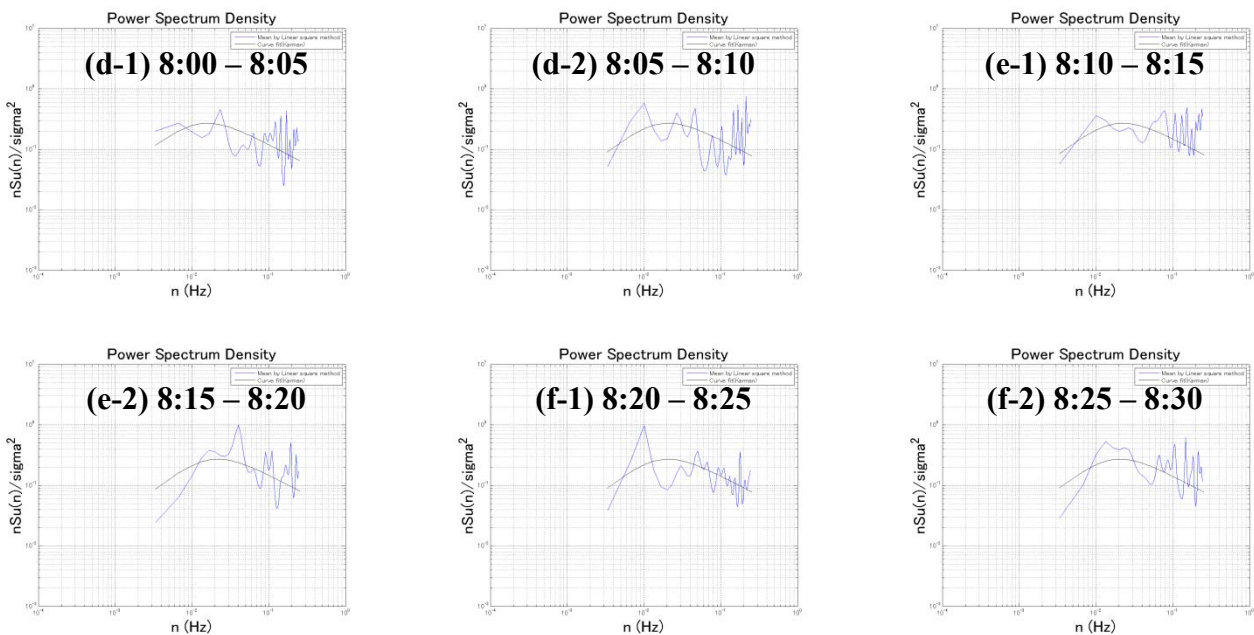


図 4.3.20 P4 43m 8:00 – 8:30 5 分間パワースペクトルデータ

全体として概ね一定平均風速によるスペクトル特性と同様の傾向が伺える。さらに、3 分 20 秒毎にまとめたデータについて分析を行う。

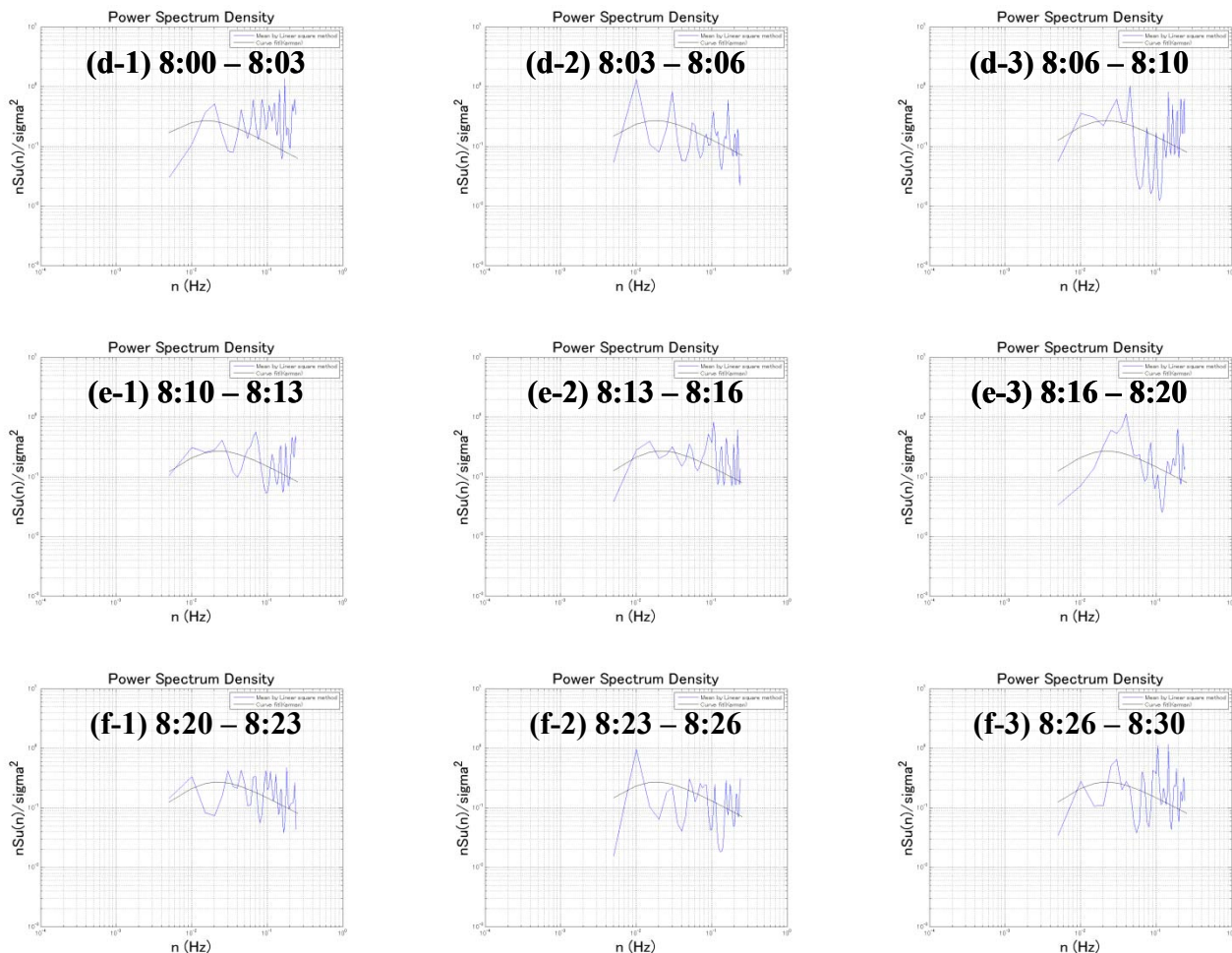


図 4.3.21 P4 43m 8:00 – 8:30 3 分間パワースペクトルデータ

8:00 – 8:03 や 8:16 – 8:20 のデータでややピークが移行している様子が伺えるが、それ以外に関しては、ばらつきが大きいもののほぼ定常状態のスペクトル特性と変わりはない。次に本データで最大風速を記録した後、およそ 1 時間を掛けて風速が下降していく 10:00 – 11:00 について分析を行う。

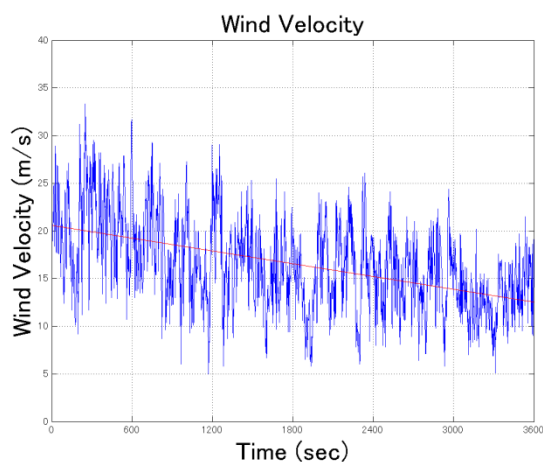


図 4.3.22 最大風速観測区間 兼 風速下降区間 P4 43m 10:00 – 11:00 時刻歴データ

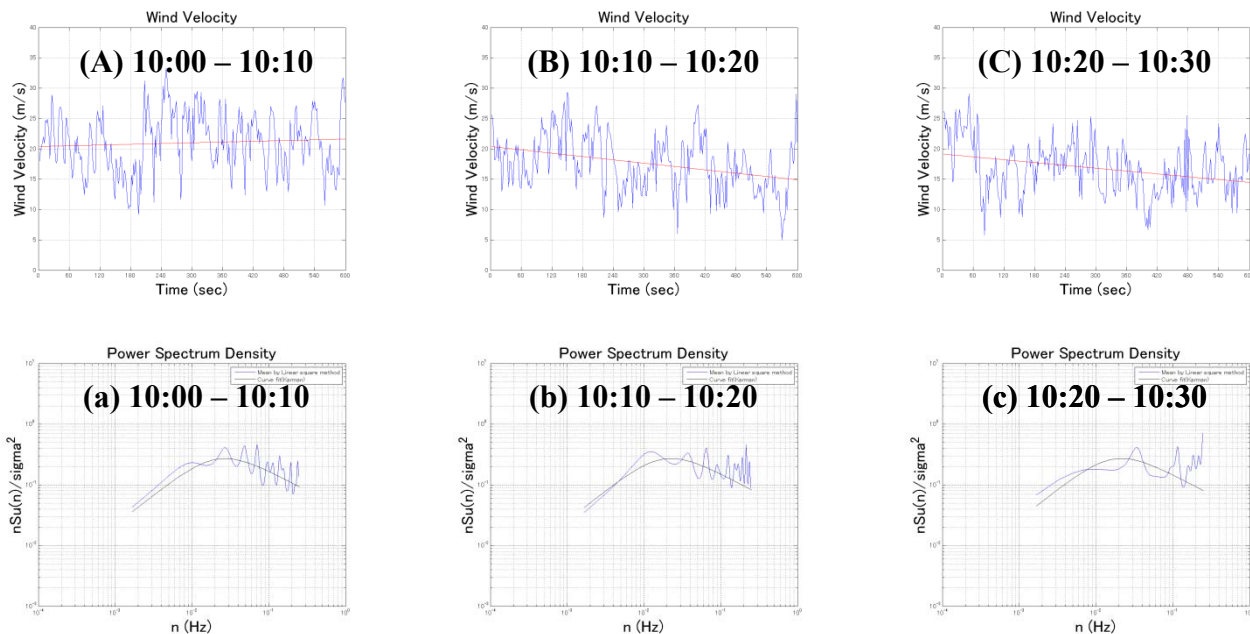


図 4.3.23 P4 43m 10:00 – 10:30 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

10 分間データによると、平均成分が時々刻々と変化している場合でもスペクトル特性は一定平均風速によるものと何ら変わりはない。さらに 5 分間についても分析を行う。

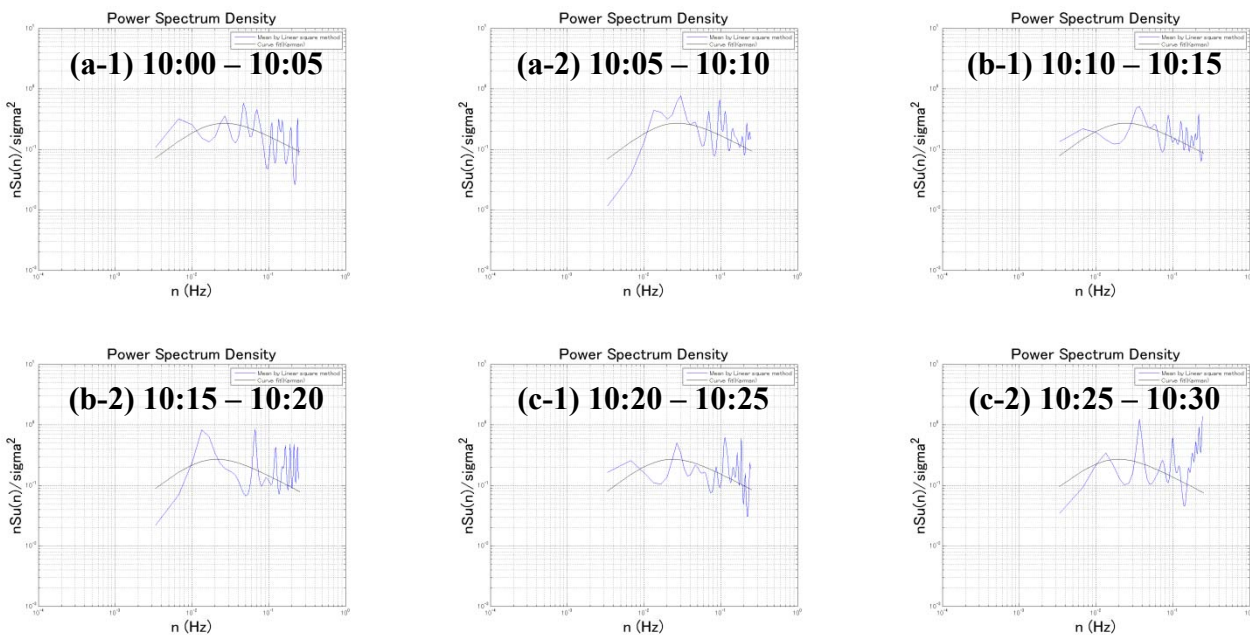


図 4.3.24 P4 43m 10:00 – 10:30 10 分間パワースペクトルデータ

5 分間データにおいても概ね一定平均風速によるスペクトル特性に従った様子が確認出来る。3 分間データについて以下にまとめる。

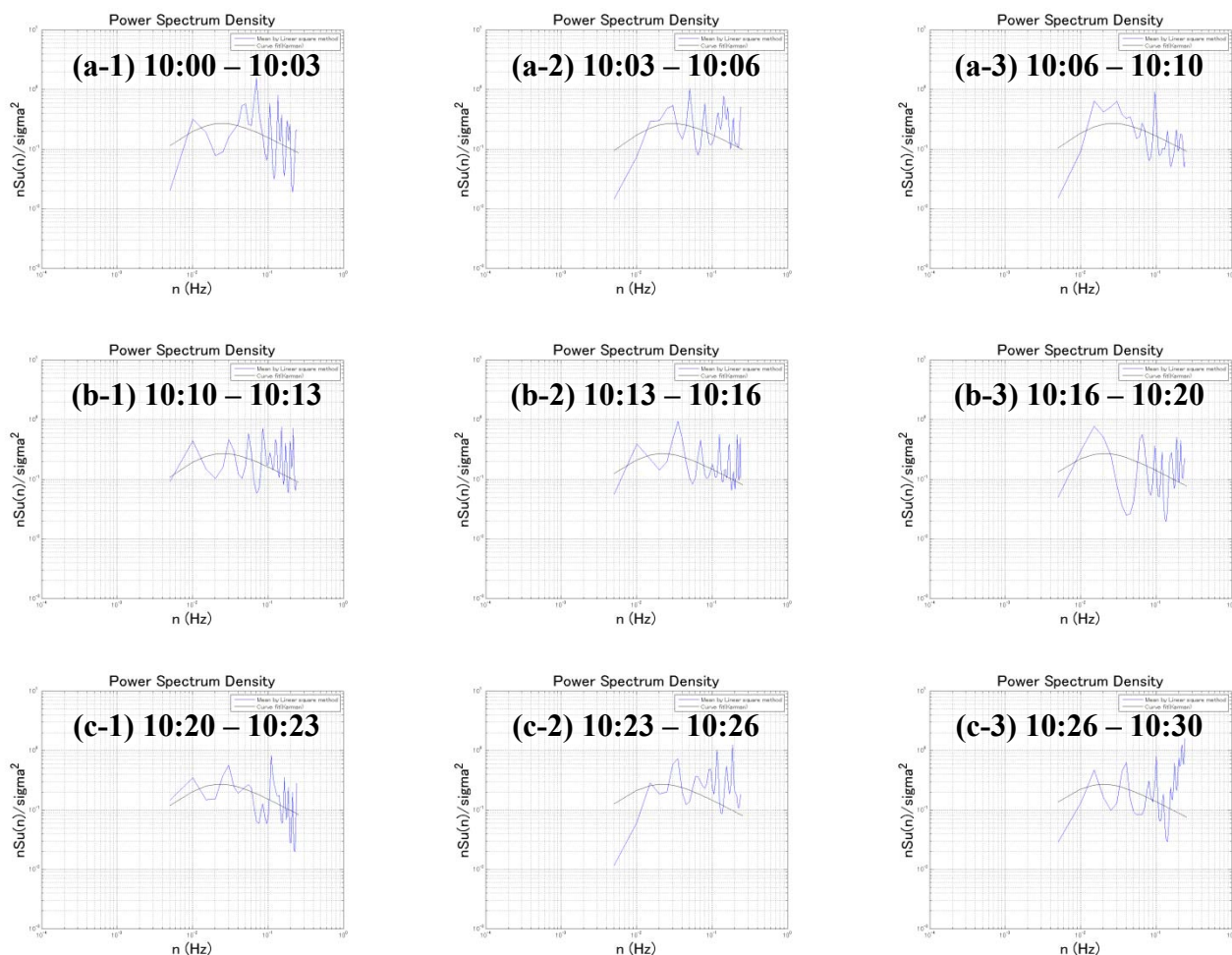


図 4.3.25 P4 43m 10:00 – 10:30 3 分間パワースペクトルデータ

3 分間データにおいても 10 分、5 分データの傾向と同様、一定平均風速によるスペクトル特性に従った値を取る。さらに下降区間後半の 30 分についても分析を行う。

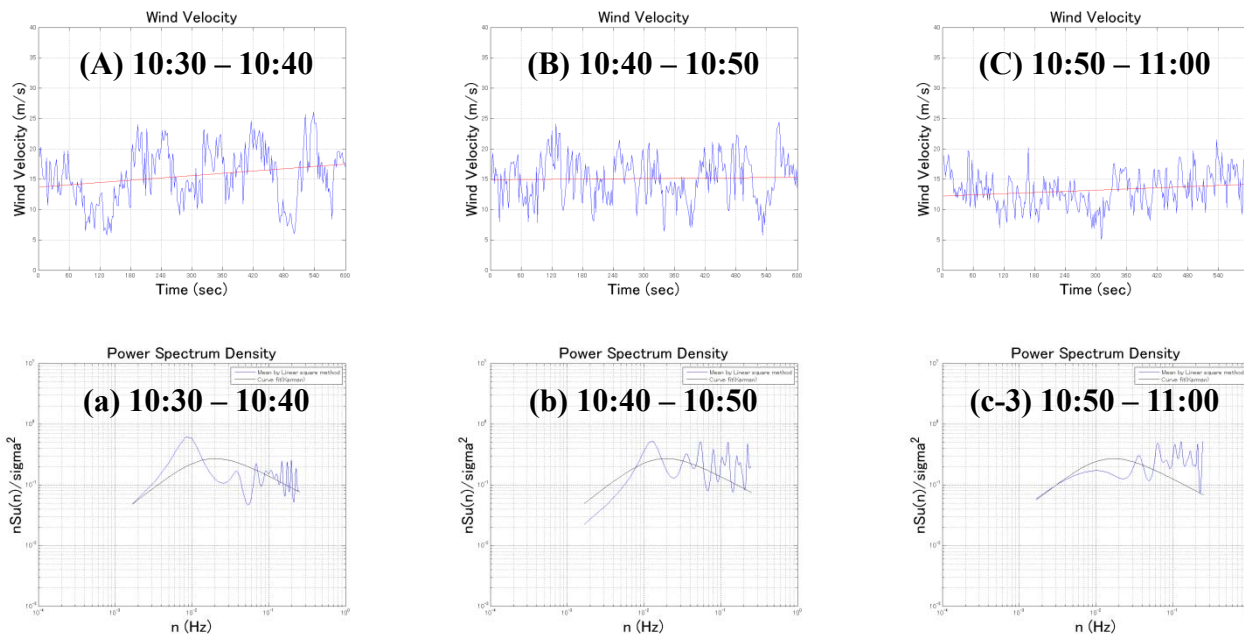


図 4.3.26 P4 43m 10:30 – 11:00 10 分間時刻歴・パワースペクトルデータ

データ全体として安定的に推移しているためか、スペクトル特性に目立った変化は少ない。さらに 5 分データについてもまとめる。

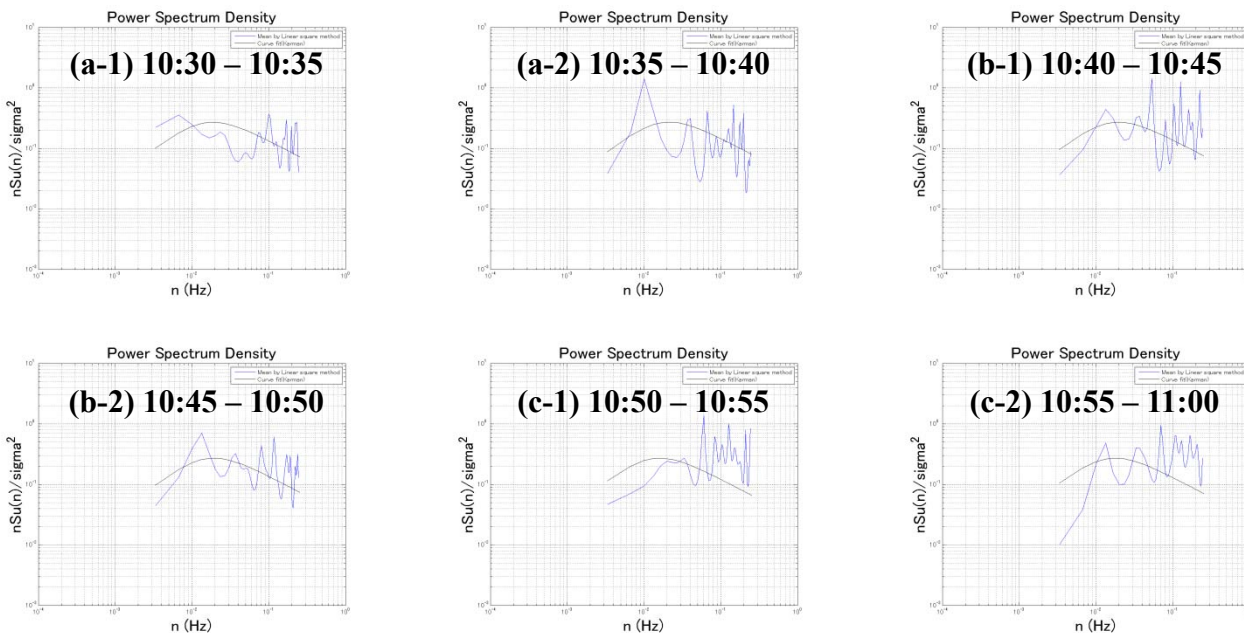


図 4.3.27 P4 43m 10:30 – 11:00 5 分間パワースペクトルデータ

5 分間毎にパワースペクトルを見ると、後半 10:50 – 11:00 のスペクトル特性は一定平均風速による理論値に比べやや高周波数側に移行している事が確認出来る。さらに 3 分間毎に分類を行う。

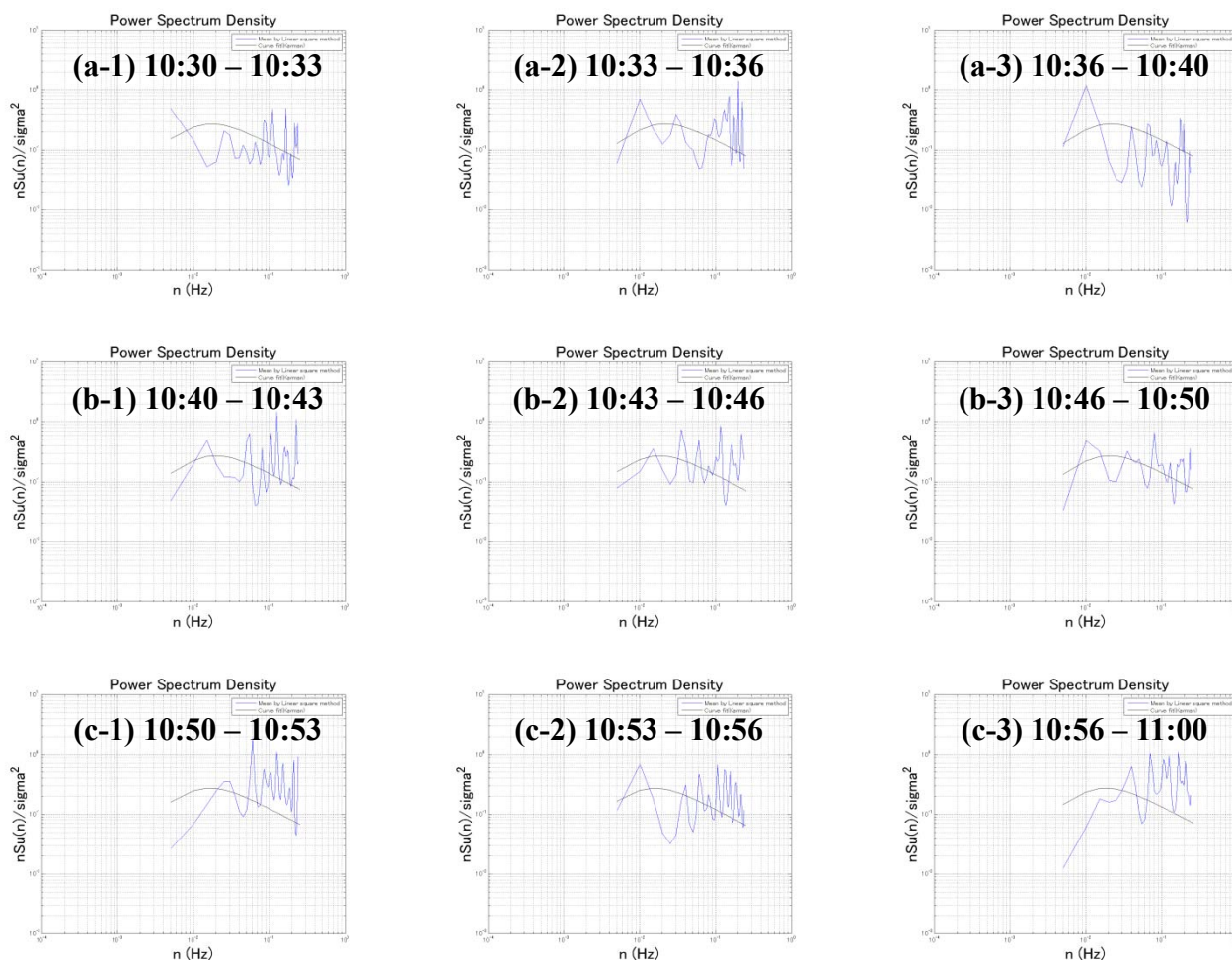


図 4.3.28 P4 43m 10:30 - 11:00 3 分間パワースペクトルデータ

3 分間毎のデータについて、一部スペクトル形状の乱れがあるものの、10:30 - 10:50 の間は概ね一定平均風速によるスペクトル特性で説明が出来るものと思われる。10:50 - 10:53, 10:56 - 11:00 に関してはスペクトルピーク位置の移行が確認出来る。

4.4. 非定常変動模擬風速の作成

4.4.1. 非定常変動模擬風速作成条件

4.2, 4.3 節から得られた分析結果を基に、柏キャンパスにおける一般化された非定常模擬風速の作成を行う。この時、非定常変動模擬風速を作成する上で以下のような条件を想定する。

- ① 対象とする風速の非定常性は、台風データを基に作成する。ダウンバーストや竜巻等の非定常風についてはその状態を考慮しない。
- ② 非定常模擬風速対象区間は 10 分間である。これは、第 3 章による 10 分間という評価時間内の風速変化は線形近似による平均成分によって十分な近似が可能であるためである。また、建物応答評価を行う上でも、固有周期 10 秒を超えるような建物がほぼ存在しない状況の中で、10 分間という評価時間は十分な評価長さを有していると考えられるためである
- ③ 非定常変動模擬風速は風速の上昇が急激な状態を想定する。これは、実用上、建物応答評価をする上で最

も危険性が高いと思われる状態を想定する必要があるためである。

④ 風速変動成分によるスペクトル形状は定常確率過程から導き出されたカルマン型パワースペクトルと同様である。これは、柏キャンパスデータでのケーススタディから線形近似によってモデル化された平均成分から算出された風速変動成分のスペクトル形状が概ね一定平均風速によるスペクトル形状と同様であるためである。

以上の条件を考慮した上で非定常模擬風速のシミュレーション方法について次項で説明を行う。

4.4.2. 非定常変動模擬風速シミュレーション手法

4.4.1項で述べた条件の基、非定常変動模擬風速をシミュレートする。まず、基本となるスペクトル特性に(式4.4.1) 定常確率過程によって導かれたカルマン型パワースペクトルを用いる。

$$\frac{n_k S_u(n_k)}{\sigma_u^2} = k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{2\beta}}} \quad k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad \text{式 4.4.1}$$

$$\beta = 2 \quad k = 0.475 \quad \tilde{n}_k = \frac{n_k L_z}{U_z} \quad L_z = 460 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.5} \quad n_k = \frac{k}{N \cdot dt}$$

N は信号数である。ここで、「荷重指針」による再現期間換算係数を用いて頂部風速を推定する。「荷重指針」によると頂部風速は以下のように定義される。

$$U_H = U_0 K_D E_H k_{rw} \quad \text{式 4.4.2}$$

U_H : 頂部風速 U_0 : 基本風速 K_D : 風向係数 E_H : 風速の鉛直分布形数 k_{rw} : 再現期間換算係数
基本風速 U_0 は荷重指針より、

$$U_0 = 38(m/s)$$

とし、風向係数 K_D については、

$$K_D = 1$$

を取る（荷重指針参照）。風速の鉛直分布係数 E_H についても荷重指針から、

$$E_H = 1.7 \left(\frac{z}{Z_G} \right)^\alpha \quad Z_b < z \leq Z_G$$

Z_b, Z_G, α : 風速の鉛直分布を定めるパラメータで表4.4.1より求める。

表 4.4.1 風速の鉛直分布を定めるパラメータ

地表面粗度区分	I	II	III	IV	V
Z_b	5	5	10	20	30
Z_G	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

再現期間係数 k_{rw} は以下のように定義される。

$$k_{rw} = 0.63(\lambda_u - 1) \ln r - 2.9\lambda_u + 3.9$$

$$\lambda_u = \frac{U_{500}}{U_0}$$

ここで、 U_{500} : 42m/s (荷重指針より) r : 設計用再現期間 である。

この時べき指数 α の値は地表面粗度区分に応じて設定する事になる。本研究では柏キャンパスが存在する粗度区分に合わせ、地表面区分Ⅲと設定した。

$$\alpha = 0.2$$

また、上空での風速の乱れについても粗度区分に関わりなく 10%程度とすると、以下の式が成り立つ。

$$I_z = \frac{\sigma_z}{\bar{U}_z} = 0.1 \left(\frac{z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} \quad \text{式 4.4.4}$$

Z_G は粗度区分によって値が変化し、本研究では 450m を取る。以上の式を展開する事で変動する模擬風速の振幅を求める。ここで (式 4.4.1) 式に線形近似風モデルで導入した時間変化の概念を組み込む。

$$\frac{n_k S_u(t_k, n_k)}{\sigma_u(t_k)^2} = 0.475 \frac{\left(\frac{n_k L(z)}{\bar{U}(t_k, z)} \right)}{\left(1 + \left(\frac{n_k L(n_k, z)}{\bar{U}(t_k, z)} \right)^2 \right)^{\frac{5}{6}}} \quad \text{式 4.4.5}$$

式 4.4.5 を展開していくと、

$$X_{(t)} = \bar{U}_z(t) + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \sigma_z(t)^2 \cdot 0.475 \cdot \frac{\frac{L_z}{\bar{U}_z(t)}}{\left(1 + \left(\frac{n_k \cdot L_z}{\bar{U}_z(t)} \right)^2 \right)^{\frac{5}{6}}} \cos(2\pi n_k t + \phi_k)} \\ + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{T} \sigma_z(t)^2 \cdot 0.475 \cdot \frac{\frac{L_z}{\bar{U}_z(t)}}{\left(1 + \left(\frac{n_{N/2} \cdot L_z}{\bar{U}_z(t)} \right)^2 \right)^{\frac{5}{6}}} \cos(2\pi n_{\frac{N}{2}} t)} \\ t = dt, 2 \cdot dt, \dots, N \cdot dt$$

式 4.4.6

となる。 $dt = 0.5$, $z = 10$ とした時、(式 4.4.6) によって描かれた模擬風速を (図 4.4.1) に示す。

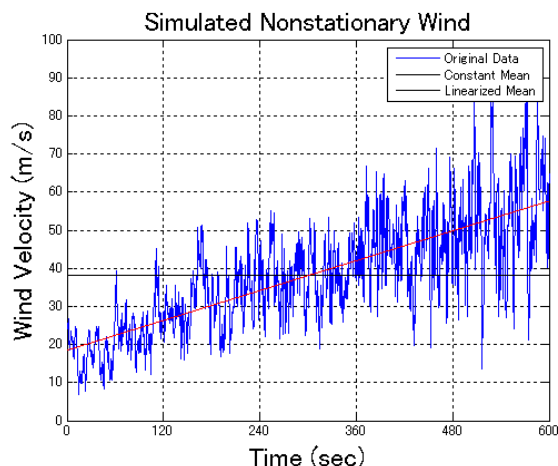


図 4.4.1 風速上昇率 50% 非定常模擬風速

また、図 4.4.1 から得られたパワースペクトルについて 10 分、5 分 3 分 20 秒ずつに分けて示す。

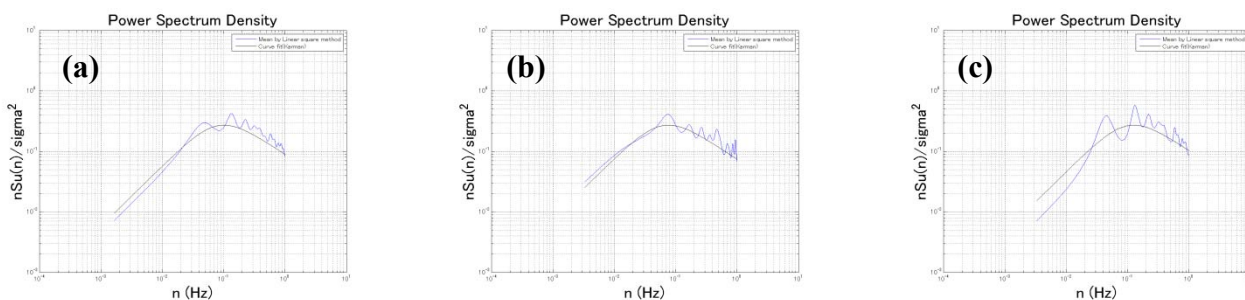


図 4.4.2 各評価時間内パワースペクトル (a) 10 分間 (b) 5 分間 (前半) (c) 5 分間 (後半)

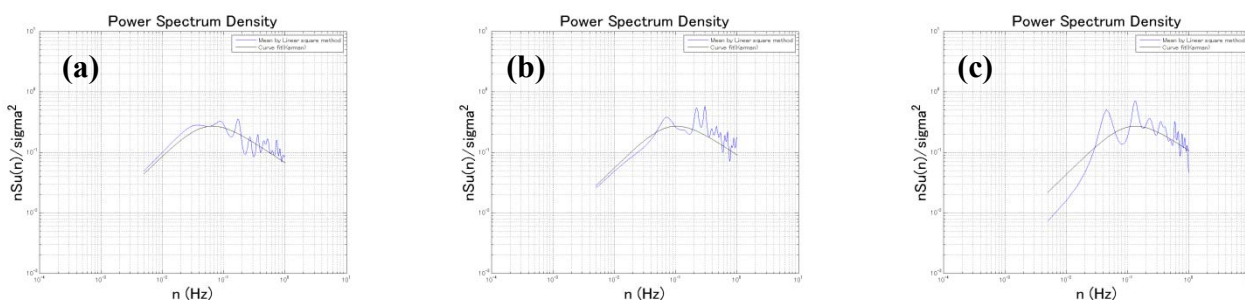


図 4.4.3 各評価時間内パワースペクトル (a) 3 分間 (前半) (b) 3 分間 (中) (c) 3 分間 (後半)

4.4.3. 非定常変動模擬風速シミュレーション

4.4.2 項で展開された数式からシミュレーションを行う。この時、柏キャンパスにおける非定常変動模擬風速を想定する上でいくつかの風速変化率を仮定した。風速変化率について再記述すると、

$$U_{CR} = \left| \frac{\min or \max(\bar{U}(t)) - \bar{U}}{\bar{U}} \right| \quad \text{式 4.4.7}$$

となり、一定平均風速に対する風速の上昇率 (or 下降率) である事がわかる。シミュレーションで用いた風

速は、最大風速まで風速変化率 50%で線形的に単純増加をする場合と最大風速まで風速変化率 25%で上昇した後に風速が下降する場合の二種類を想定した。以下にシミュレートされた風速について示す。

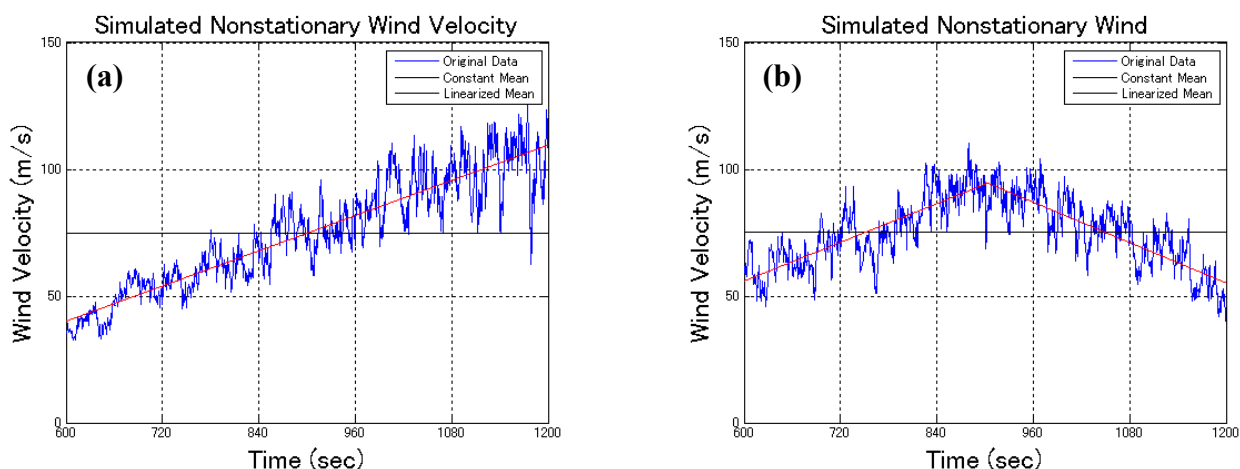


図 4.4.4 非定常変動模擬風速 (a) 風速変化率 50% 単調増加モデル (b) 風速変化率 25% 逆 V 字モデル

この時シミュレートの際に想定した観測高さは 300m であり、次章ではこれらシミュレートされた非定常模擬風速を用いた応答解析を行う。

4.5. まとめ

第 4 章では、第 3 章で示した線形近似風モデルに基づき 10 分間に対する非定常模擬風速を提案した。このとき、非定常風速の一般化は一定平均風速に対する風速変化率によって定義した。以下に第 4 章について得られた成果をまとめる。

・ 非定常風の分類について

第 3 章非定常風データのモデル化から、風速変化率を新たに定義し、線形近似風平均成分をそれぞれの変化率に合わせて分類分けした。このとき、7 つの台風、9 つの観測データから最大風速観測ポイント前後 30 分を抜き出し評価を行った。10 分間評価時間内一定平均風速に対する風速変化率はおよそ 0–30%の範囲で推移し、その発生確率は 5–10%の間が最も高い事を確認した。また最大風速変化率は 29%であった。

・ 線形近似風モデルによる評価時間内スペクトル特性について

評価時間 10 分間における非定常変動風速のスペクトル解析を行った。10 分間、5 分間、3 分 20 秒毎に風速の非定常性が確認出来る区間に対して各々のスペクトル特性を解析し、一部のデータで一定平均風速によるピーク位置と線形近似による平均成分の間の変化を確認した。従来の定常確率過程による風速のモデル化とは異なる結果から、非定常性の強い風に対しては平均成分の変化に比例したスペクトルピーク位置の変化を考慮する必要があると考えられる。

・ 非定常変動模擬風速の作成

非定常変動模擬風速を作成するにあたり、以下のような条件を仮定した。

- ① 対象とする非定常風は台風とする。
- ② 評価対象時間は 10 分間とする。
- ③ 評価対象時間内での風速変化は線形的とする。
- ④ 風速変動成分によるスペクトル形状（総エネルギー量）は、一定平均風速によってモデル化されたカルマ

ン型パワースペクトルに準ずる。ただし、そのスペクトルピーク位置に関しては時々刻々と変化する平均成分の変化に比例して変化する。風速の乱れ強さは荷重指針による式から一定と仮定し、平均風速が時々刻々と変化するのに合わせ、風速の標準偏差も変化する事とする。

以上の仮定のもと、一定平均風速に対するカルマン型パワースペクトルから平均風速の時間変化を考慮に入れた三角級数モデルによる非定常模擬風速のシミュレートを行った。想定される風速変化率は50%, 25%とし、その風速モデルを単純増加モデル（Type A）と逆V字型モデル（Type B）である。

このように第4章では、第3章での知見をもとに柏キャンパスにおけるスペクトル特性を含んだ非定常変動模擬風速の一般化を行った。次章ではさらにシミュレートされた模擬風速は用い、時々刻々と時間変化する平均成分を考慮した建物応答スペクトル解析へと応用範囲を広げる。

第 5 章

非定常変動風力による応答解析と建物応答評価

5 非定常変動風力による応答解析と建物応答評価

第4章までの非定常風特性の分析と模擬風速の提案から、本章では非定常模擬風力によるスペクトル応答解析を行う。本章における目的は、時間変化する風速平均成分に対応したスペクトル応答解析による最大応答を推定する事である。そのためにまず、従来のスペクトル解析による応答推定について「建築物の耐風設計」による式を展開する。その後、新たに提案された非定常模擬風速を用いた新たな応答予測式について概説する。

5.1 想定建物概要と解析モデルの作成

対象建物は、平面系 $B \times D = 50\text{m} \times 50\text{m}$ 、高さ 300m 、建物密度 $\rho = 175\text{kg/m}^3$ とする。解析モデルは、減衰定数 $h = 0.01, 0.02, 0.05, 0.10$ 、1次モードの風応答のみに着目し、水平1自由度の1質点系モデルにより行った。振動モデルの質量と外力は、建物の1次固有モードを頂部1とした直線モードであると仮定して、1次のモーダル質量とモーダル外力として与えた。検討に用いる建物の概要と想定立地条件、解析モデルについて（図5.1.1）に示す。風外力は、第4章で定義された時々刻々と変化する風速平均による風方向の変動風力パワースペクトル密度をもとに作成した。風速は再現期間500年に相当するレベルとして荷重指針の再現期間換算係数を用いて頂部平均風速 $U_H = 65.9(\text{m/s})$ を設定した。（図5.1.2）に平均風速が風速変化率50%で時々刻々と変化する場合の変動風力のパワースペクトル密度を示す。変動風力パワースペクトルから三角級数モデルによりシミュレートされた模擬風力波形について（図5.1.3）に示す。模擬風力波形は1波形につき0.5秒刻みで1200ステップ作成した。

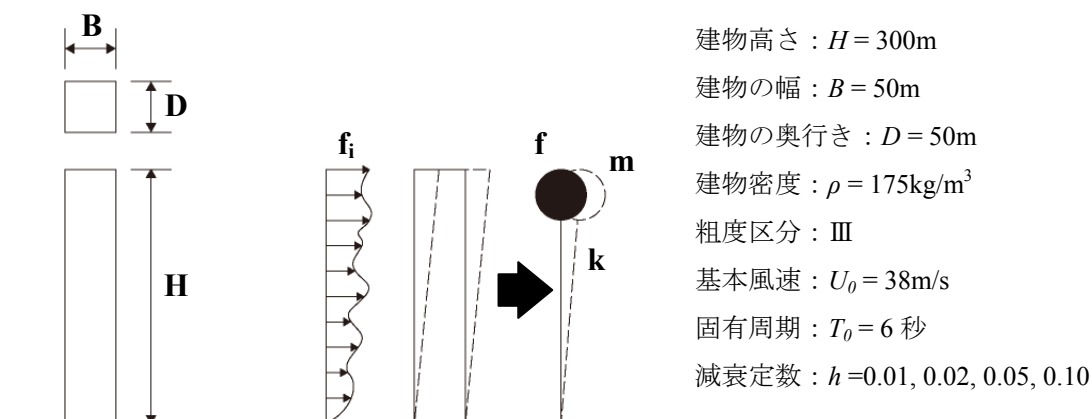


図 5.1.1 対象建物と想定立地条件 解析モデル

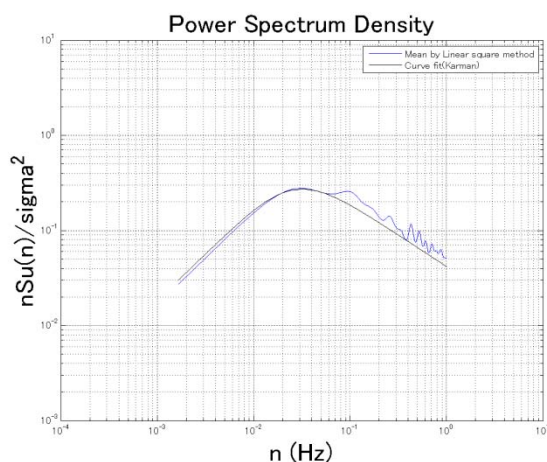


図 5.1.2 変動模擬風力パワースペクトル密度

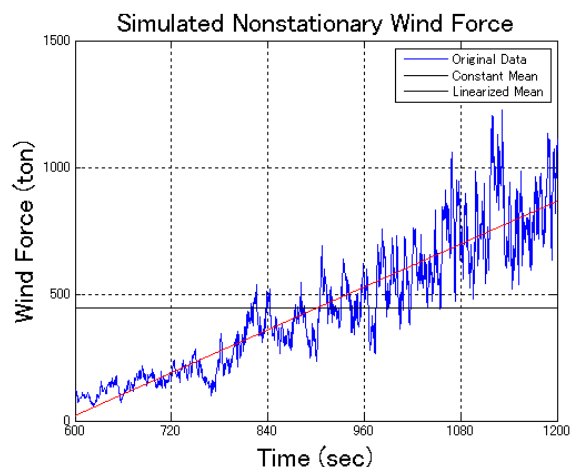


図 5.1.3 非定常模擬風力の時刻歴波形例

5.2. 定常模擬風速による時刻歴応答解析と周波数応答解析との整合性について

本節では、建築物荷重指針・同解説による変動風速のパワースペクトル密度をもとに、三角級数モデルから定常模擬風速波形を求め、変動風力による時刻歴応答解析及び周波数応答解析を行う事で、相互の応答解析の関係性と解析結果の整合性を確認する。以下に、変動模擬風速の算出方法及び解析結果を述べていく。

5.2.1. 定常模擬風速算出方法

応答解析手法の確認のため、荷重指針に示されたパワースペクトル密度を基にした定常模擬風速作成の手順を示す。模擬風速作成に関するフローチャートについては（図 5.2.1）を参照されたい。

まず、式を展開する上での立地・解析条件について（図 5.1.1）に補足を行う。式中、 N はデータ数、 dt は時間刻み、 α 、 Z_G はそれぞれ粗度区分に応じたべき指数、上空風高さ、 Z_0 は基準高さである。以下に定常模擬風速を作成する為の式展開を行う。定常確率過程による理論展開から導かれたカルマン型パワースペクトルより、

$$\frac{n_k S_u(n_k)}{\sigma_u^2} = k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{3\beta}}} \quad \text{式 5.2.1}$$

この時、

$$\beta = 2 \quad k = 0.475 \quad \tilde{n}_k = \frac{n_k L_z}{\bar{U}_z} \quad n_k = \frac{k}{N \cdot dt} \quad k = 1, 2, 3 \dots N/2-1$$

式 5.2.2

また荷重指針を参考に、

$$I_z = \frac{\sigma_z}{\bar{U}_z} = 0.1 \left(\frac{z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} \quad L_z = 460 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.5} \quad \bar{U}_z = \bar{U}_{z_0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\alpha}$$

式 5.2.3

(4.2.2.A)より、

$$S_u(n_k) = \frac{\sigma_z^2}{n_k} k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{3\beta}}} \quad \text{式 5.2.4}$$

ここで、フーリエスペクトルとフーリエパワースペクトルの関係から、

$$S_u(n_k) = \frac{2}{T} F(n_k)^2$$

よってフーリエスペクトルは、

$$F(n_k) = \sqrt{\frac{T}{2} S_u(n_k)} \quad \text{式 5.2.5}$$

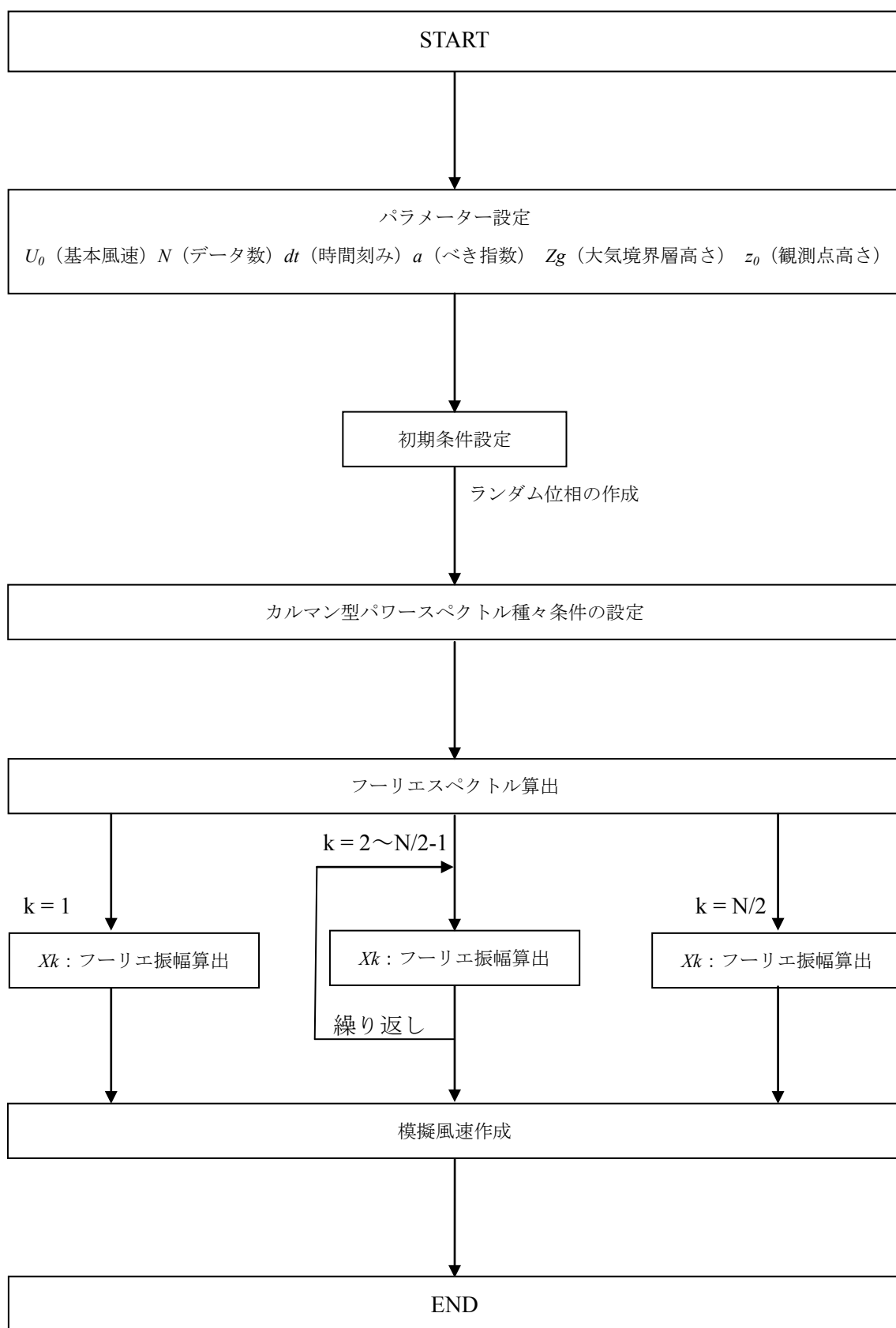


図 5.2.1 変動模擬風速作成フローチャート

そこで、(式 5.2.4) を (式 5.2.5) に代入すると、

$$F(n_k) = \frac{T}{2} X_{n_k} \quad \text{式 5.2.6}$$

N 次のフーリエスペクトルとフーリエ振幅との間には以下の関係が存在し、

$$F(n_k) = \sqrt{\frac{T}{2} \frac{\sigma_z^2}{n_k} k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{6}}}}$$

これを⑥に代入する事で求めたいフーリエ振幅を得ることができる。

$$X_{n_k} = \sqrt{\frac{2}{T} \frac{\sigma_z^2}{n_k} k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{6}}}} \quad \text{式 5.2.7}$$

ここで、時刻歴領域とフーリエ振幅との間には、

$$X_{(t)} = \frac{X_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} X_k \cos(2\pi n_k t + \phi_k) + \frac{X_{N/2}}{2} \cos(2\pi \frac{N}{2} t)$$

の関係が成り立ち、(式 5.2.7) を代入すると、

$$X_{(t)} = \frac{X_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \sqrt{\frac{2}{T} \frac{\sigma_z^2}{n_k} k \frac{\tilde{n}_k}{(1 + \tilde{n}_k^2)^{\frac{5}{6}}}} \cos(2\pi n_k t + \phi_k) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{T} \frac{\sigma_z^2}{n_{N/2}} k \frac{\tilde{n}_{N/2}}{(1 + \tilde{n}_{N/2}^2)^{\frac{5}{6}}}} \cos(2\pi \frac{N}{2} t)$$

となり、建物想定条件、(式 5.2.2)、(式 5.2.3) を用いると、

$$X_{(t)} = \bar{U}_z + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \sigma_z^2 \cdot k \cdot \frac{\frac{L_z}{\bar{U}_z}}{\left(1 + \left(\frac{n_k \cdot L_z}{\bar{U}_z}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}}} \cos(2\pi n_k t + \phi_k) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{T} \sigma_z^2 \cdot k \cdot \frac{\frac{L_z}{\bar{U}_z}}{\left(1 + \left(\frac{n_{N/2} \cdot L_z}{\bar{U}_z}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}}} \cos(2\pi \frac{N}{2} t)$$

$$t = 1*dt, 2*dt, 3*dt \dots N*dt$$

この時、

$$T = N \cdot dt \quad k = 0.475 \quad \bar{U}_z = \bar{U}_{z_0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad n_k = \frac{k}{T}$$

となる。

また、 ϕ はランダム変数に 2π を掛けて求める。

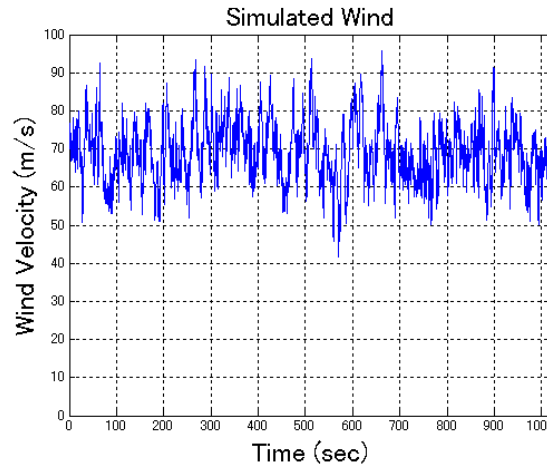


図 5.2.2 三角級数モデルによってシミュレートされた模擬風速

5.2.2. 周波数応答解析手法

本節では、周波数応答解析手法について概説する。また、本研究で用いる解析モデルは1質点1自由度モデルである。そのため一般に、変位応答、速度応答、加速度応答をそれぞれ $x, \dot{x}(dx/dt), \ddot{x}(=d^2x/dt^2)$ とし、入力振動を \sin 波とすれば、1質点系の振動方程式は次式のように表せる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_0 \sin \omega t \quad \text{式 5.2.8}$$

この時、 m は質量、 c は減衰係数、 k はバネ定数、 f_0 は外力の振幅、 t は時間を表す。また、(式 5.2.8) を書き直すと、

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f_0}{m} \sin \omega t \quad \text{式 5.2.9}$$

となる。この時、 h は減衰定数、 ω_0 は固有振動数を表す。(式 5.2.9) の解は、自由振動を表す解と、強制振動を表す解の和からなるが、減衰のある自由振動は時間の経過とともに消滅するので、実質的には強制振動の解が意味を持つ。その解は次式のように表せ、

$$x = \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \sin(\omega t - \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2h(\frac{\omega}{\omega_0})}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2} \quad \text{式 5. 2. 10}$$

となる。この時、いわゆる変位応答倍率 $X(\omega)$ は

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad \text{式 5. 2. 11}$$

である。

また、準定常仮定に基づき、時間的に変動する風力 $F(t)$ を表すと、

$$F(t) = C_D A \frac{1}{2} \rho (\bar{U} + u(t))^2 \quad \text{式 5. 2. 12}$$

となる。この時、 C_D は風力係数値、 A は受風面積、 ρ は空気密度 (1.2 kg/m^3)、 \bar{U} は平均風速、 $u(t)$ は変動風速を表す。また、 $u(t)$ が十分に小さいと仮定をすると変動風力は以下のように分解できる

$$\bar{F} = C_D A \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \quad \text{式 5. 2. 13}$$

$$F'(t) \cong C_D A \rho \bar{U} u(t) \quad \text{式 5. 2. 14}$$

(式 5. 2. 14) は変動風速 $u(t)$ に比例する形で表される。従って、変動風力のパワースペクトル密度 $S_F(n)$ は、

$$S_F(n) = (C_D A \rho \bar{U})^2 S_u(n) \quad \text{式 5. 2. 15}$$

となる。

この時、 n は周波数である。また、(式 5. 2. 15) を (式 5. 2. 13) の式を用いて描くと、

$$S_F(n) = 4 \frac{\bar{F}^2}{\bar{U}^2} S_u(n) \quad \text{式 5. 2. 16}$$

となる。ここから変動風力による変位応答パワースペクトル $S_x(n)$ を求めるためには、機械的アドミッタンス $H(n)$ が必要となる。機械的アドミッタンスは、(式 5. 2. 11) を用い、

$$H(n) = \frac{X(\omega)}{k} \quad \text{式 5. 2. 17}$$

となる。よって、変位応答パワースペクトルは、

$$S_x(n) = |H(n)|^2 S_F(n) \quad \text{式 5. 2. 18}$$

となる。また、(式 5.2.18) と変位応答分散値 σ_x^2 の関係は、

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(n)dn \quad \text{式 5.2.19}$$

である。

本節では、(式 5.2.19) を用いて時刻歴変位応答分散値との比較を行う。また、スペクトル解析による応答最大値推定についても展開すると、

$$x_{\max} = \bar{x} + k_p \sigma_x \quad \text{式 5.2.20}$$

となる。式中、 \bar{x} は変位応答平均値であり、

$$\bar{x} = \frac{F_q}{k} \quad \text{式 5.2.21}$$

と表される。ピークファクターである k_p は風速変動成分が定常確率過程に従う事を前提として、

$$k_p = \sqrt{2 \ln(nT)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln(nT)}} \quad \text{式 5.2.22}$$

と扱われる。式中 n は建物固有周波数、 T は対象評価時間(s)、 γ は 0.5772 を取る。

5.2.3. 時刻歴応答解析手法について

ここでは、時刻歴応答解析による変位応答分散値の算出手法について述べる。計算の方法は、1 自由度 1 質点系モデルによる直接積分法（線形加速度法）を用いた。質点の地面に対する相対変位を x 、固有円振動数を ω 、系に対する入力加速度を $\ddot{y}(t)$ とした時、系の運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{y}(t) \quad t = t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots \quad \text{式 5.2.23}$$

となる。この時、 \ddot{y}_i と \ddot{y}_{i+1} の間を直線によって補完し、 t_i を原点とするこの区間 $t_i \sim t_{i+1}$ 内の局所的な時間を τ 、 $\Delta\ddot{y} = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i$ とすれば、

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t} \tau + \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t \quad \text{式 5.2.24}$$

と表され、(式 5.2.23) は区間的に、

$$\ddot{x}(\tau) + 2h\omega_0\dot{x}(\tau) + \omega_0^2 x(\tau) = -\frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t} \tau - \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t \quad \text{式 5.2.25}$$

となる。(式 5.2.25) を解くために、初期条件として、

$$\tau = 0: x = x_i, \dot{x} = \dot{x}_i$$

を与える事で、相対変位応答および相対速度応答が以下のように求まる。

$$x_{i+1} = A_{11}x_i + A_{12}\dot{x}_i + B_{11}\ddot{y}_i + B_{12}\ddot{y}_{i+1}$$

$$\dot{x}_{i+1} = A_{21}x_i + A_{22}\dot{x}_i + B_{21}\ddot{y}_i + B_{22}\ddot{y}_{i+1}$$

式 5. 2. 26

この時、 A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , B_{11} , B_{12} , B_{21} , B_{22} は、

$$A_{11} = e^{-h\omega\Delta t} (\cos \omega_d \Delta t + \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t)$$

$$A_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \frac{1}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{21} = -e^{-h\omega\Delta t} \frac{\omega^2}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{22} = -e^{-h\omega\Delta t} (\cos \omega_d \Delta t - \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t)$$

$$B_{11} = e^{-h\omega\Delta t} \left[\left(\frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \right) \cos \omega_d \Delta t + \left(\frac{h}{\omega \omega_d} - \frac{1-2h^2}{\omega \omega_d \Delta t} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{2h}{\omega^3 \Delta t}$$

$$B_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \left[-\frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{1-2h^2}{\omega \omega_d \Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t}$$

$$B_{21} = e^{-h\omega\Delta t} \left[-\frac{1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t - \left(\frac{h}{\omega \omega_d \Delta t} + \frac{1}{\omega_d} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] + \frac{1}{\omega^2 \Delta t}$$

$$B_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left[\frac{1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{h}{\omega \omega_d \Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2 \Delta t}$$

となる。よって、絶対加速度応答は、(式 5. 2. 27) より、

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_{i+1} = -(2h\omega_0 \dot{x}_{i+1} + \omega_0^2 x_{i+1})$$

式 5. 2. 27

によって求められる。従って、 $t=0$ における応答の初期値、

$$x_1 = 0$$

$$\dot{x}_1 = -\ddot{y}_1 \Delta t$$

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_1 = 2h\omega \ddot{y}_1 \Delta t$$

を与えれば応答の値が逐次計算出来る。

5.2.4. 検証結果

カルマン型パワースペクトルから三角級数モデルを用いた模擬風速シミュレーションによる変動風力周波数応答及び時刻歴応答解析値の整合性を確認する。カルマン型パワースペクトルから模擬された風速を（図 5.2.3）に示す。ここで、模擬風速シミュレーション結果の検証の為、カルマン型パワースペクトルから得られた変動風速を用い再度パワースペクトルを描いた図を（図 5.2.4）に示す。この時スペクトル推定には MEM 法（バーク法）を用いた。

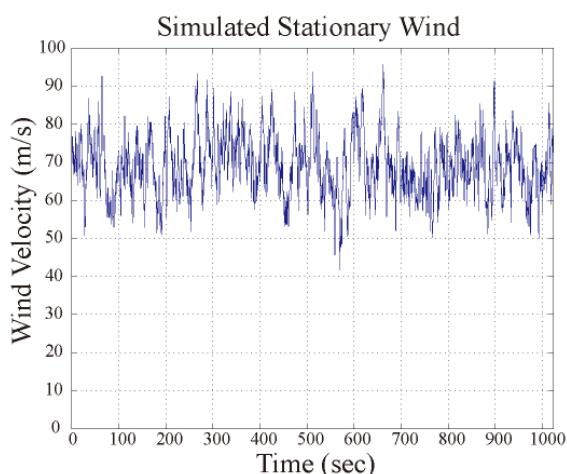


図 5.2.3 定常模擬風速の時系列データ

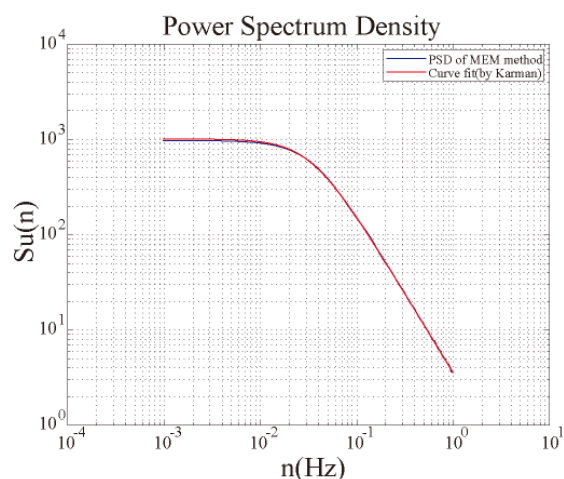


図 5.2.4 時系列データからのスペクトル比較

図より、三角級数モデルにより模擬された変動風速とカルマン型パワースペクトルとの間に整合性が取れている事がわかる。また、左図変動風速を用い、表に描かれた建物パラメーターを用いる事で変動風力は以下のようになる。この時、比較の為、時刻歴変動風力から求めた変動風力パワースペクトルを左図に、周波数領域から求めた変動風力パワースペクトルを右図に示す。

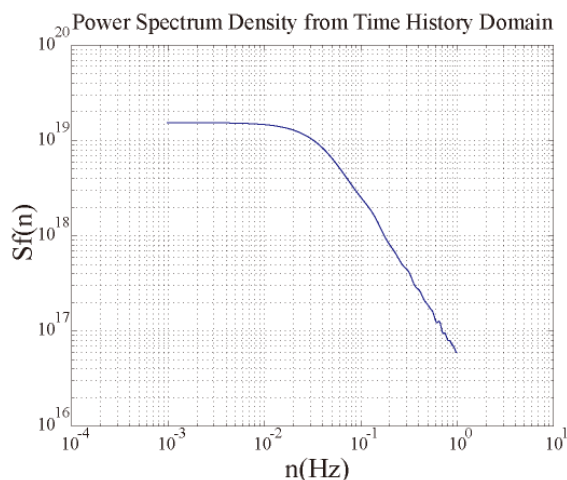


図 5.2.5 時系列データによる風力スペクトル

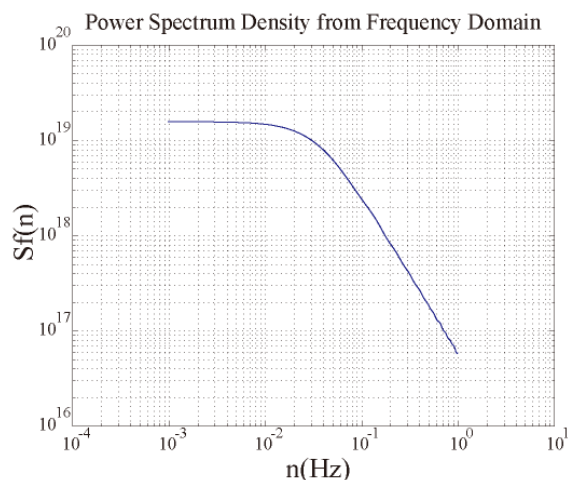


図 5.2.6 周波数データによる風力スペクトル

両図ともほぼ等しく、時間領域、周波数領域において相互の関係性が保たれている事が確認出来る。さらに、求められた変動風力を用い、時刻歴・周波数領域共に応答解析を行う事で変位応答パワースペクトルを比較する。比較に際しては、時刻歴応答解析により得られた変位応答に対してパワースペクトルを描く事で行った。

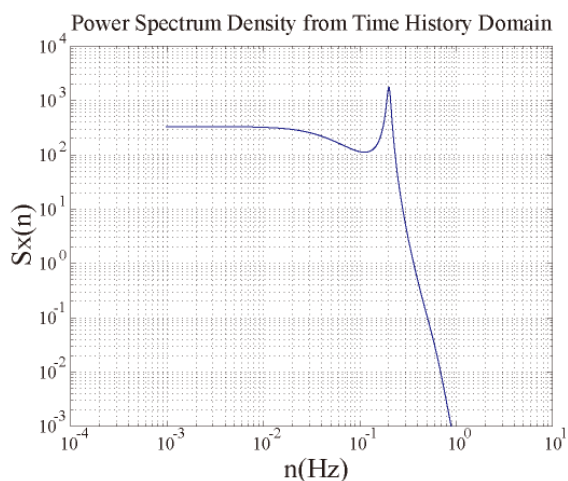


図 5.2.7 時系列データによる変位応答スペクトル

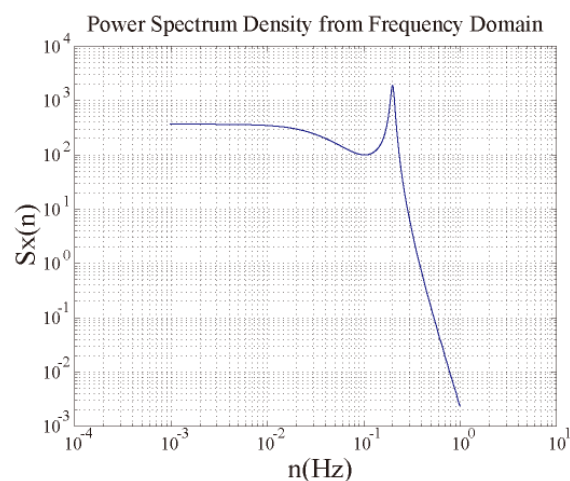


図 5.2.8 周波数による変位応答スペクトル

図より、時刻歴領域・周波数領域共に固有振動数 0.2Hz 付近で応答の共振を確認でき、ピーク位置も等しい。変位応答に関する時間領域、周波数領域相互の関係性についても確認した。また、応答パワースペクトル積分値と時刻歴変位応答分散値についても計算を行い、誤差率 5%以内であることを確認した。

5.3. 非定常模擬風速による建物応答

5.1 節 で想定した建物条件に対する非定常模擬風力は風速変化率 50%, 25%である。(図 5.3.1)

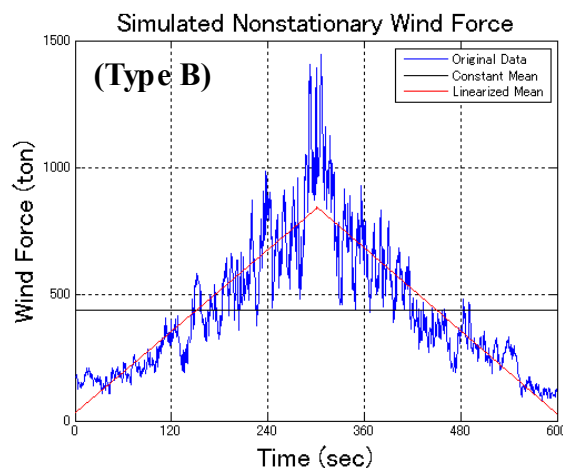
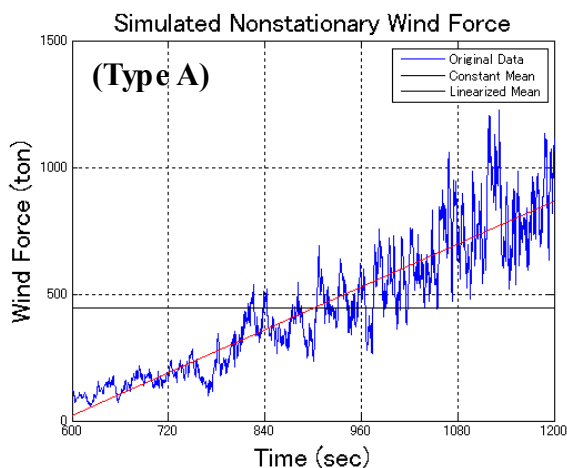


図 5.3.1 非定常模擬風力 (Type A) 風速変化率 50% 単調増加モデル

(Type B) 風速変化率 50% 逆 V 字モデル

(図 5.3.1) に示す模擬風速は風速変化率 50%である。ただし(b)はピークに到達するまでの時間が(a)の半分である。このとき時々刻々と変化する平均成分に対して最大変位応答値を推定するため、5.2 節で展開した定常応答に対する式に平均風速の時間変化の概念を導入する必要がある。そこで 5.2 節による一定平均風速に対

する応答予測式に対して、新たに提案された非定常模擬風速に対応したスペクトル応答解析手法を示す。まず、(式 5.2.15) , (式 5.2.16) に平均風速の時間変化成分を加える。

$$S_F(n, t) = (C_D A \rho \bar{U})^2 S_u(n, t)$$

$$S_F(n, t) = 4 \frac{\bar{F}^2}{\bar{U}^2} S_u(n, t) \quad t = t_1, t_2, \dots, t_N \quad \text{式 5.3.1}$$

この時平均風速の時間変化で構成される $\bar{U}(t)$, $\bar{F}(t)$ は、その一定平均としてそれぞれ \bar{U} , \bar{F} と与えられている。その平均は以下のように表される。

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{U}(t_i)}{N} \quad \bar{F} = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^N F_q(t_i)}{N} \quad \text{式 5.3.2}$$

次に、(式 5.2.18) , (式 5.2.19) に対して平均風速の時間変化成分を加える。

$$S_x(n, t) = |H(n)|^2 S_F(n, t)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N S_x(n_i, t_k)}{N^2} \quad \text{式 5.3.3}$$

(式 5.2.20) を基に、(式 5.3.1) , (式 5.3.2) , (式 5.3.3) から時間変化する平均成分に対応したスペクトル応答値を提案する。

$$x(t)_{\max} = \frac{9}{10} (\bar{x}(t)_{\max} + (1 + U_{CR}) k_p \sigma_x)$$

$$\bar{x} = \frac{F_q(t)}{k} \quad \text{式 5.3.4}$$

この時、 k_p はダヴェンポートによる平均ピークファクター、 U_{CR} は風速変化率である。「建築物の耐風設計」による推定式に対して、最大風速の発生時間帯を風速が上昇する時間帯に対応させる補正係数と風速変化率を新たに代入した点に新規性がある。次項で (式 5.3.4) による応答値について時刻歴応答解析結果とのばらつきを検証する。

5.3.1. スペクトル応答解析

図 5.3.1 に示す変動風力に対して減衰定数を 1%, 2%, 5%, 10% とパラメトリックに解析を行う。(式 5.3.4) による応答計算値と時刻歴応答計算値の比較を風速変化率 50%, 25% についてそれぞれ表 5.3.1, 表 5.3.2 に示す。この時、Type A は単調増加モデルによる非定常模擬風速であり、Type B は逆 V 字モデルによる模擬風速である。また、参考値として、定常模擬風速による応答値を Type C として併記してある。応答評価は、スペクトル解析値、時刻歴解析値共に 50 波による応答値のアンサンブル平均によって求め、評価を行った。表より、(式 5.3.4) によるスペクトル応答解析値と時刻歴応答解析による応答値との間に高い相関性があることが確認できる。同様に、50%, 25% と風速変化率に異なっている場合にも高い相関性が見られる。

表 5.3.1 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 50%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h = 0.01	145cm	161cm	150cm	165cm	86cm	96cm
h = 0.02	135cm	134cm	133cm	135cm	76cm	78cm
h = 0.05	113cm	108cm	114cm	110cm	64cm	62cm
h = 0.10	105cm	97cm	105cm	98cm	57cm	55cm

表 5.3.2 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 25%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h = 0.01	106cm	117cm	110cm	119cm	86cm	96cm
h = 0.02	94cm	95cm	94cm	97cm	76cm	78cm
h = 0.05	81cm	78cm	82cm	79cm	64cm	62cm
h = 0.10	75cm	70cm	73cm	71cm	57cm	55cm

さらに時間変化に依存した平均成分による最大変位応答値 $x(t)_{\max}$ と一定平均成分による最大変位応答値 x_{\max} との間の誤差を応答誤差率として以下のように定義する。

$$Er = \frac{x(t)_{\max}}{x_{\max}} \quad \text{式 5.3.1}$$

$x(t)_{\max}$: 非定常模擬風力による最大変位応答値 x_{\max} : 定常模擬風力による最大変位応答値

(式 5.3.1) による一定平均風速に対する応答誤差について、風速変化率 50%, 25%それぞれの結果を表 5.3.3, 表 5.3.4 に示す。

表 5.3.3 減衰定数, 風力別応答誤差率 風速変化率 50%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h = 0.01	168%	168%	173%	172%	100%	100%
h = 0.02	178%	172%	176%	174%	100%	100%
h = 0.05	176%	174%	178%	176%	100%	100%
h = 0.10	185%	176%	185%	178%	100%	100%

表 5.3.4 減衰定数, 風力別応答誤差率 風速変化率 25%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h = 0.01	123%	122%	128%	124%	100%	100%
h = 0.02	124%	123%	124%	125%	100%	100%
h = 0.05	127%	126%	128%	128%	100%	100%
h = 0.10	132%	127%	128%	128%	100%	100%

表より、応答誤差率は風速タイプ、減衰定数によらず風速変化率毎におよそ一定の値を取る事を確認できる。また、その値は風速変化率が高い程大きくなる傾向が伺える。

5.4. まとめ

第5章から得られた知見についてまとめる。

風速平均成分が時々刻々と変化する非定常模擬風速に対するスペクトル応答解析は、従来のランダム変動による応答解析手法とは異なり、最大風速が発生する時間帯が限定的になり得る。そのため、最大値発生の確率も評価区間内一定とはならず、平均風速が上昇するに従い高くなる傾向にある。本研究では、この最大風速発生区間について従来の式に補正係数を掛ける事により評価している。これは、本研究で想定した非定常模擬風速が「荷重指針」による一定乱れ強さを用いているために、平均風速が大きくなるにつれて風速の乱れも大きくなる性質があるため、風速平均成分の最大値観測ポイント周辺で特に最大風速が発生しやすいという事を考慮した結果である。しかし、この現象自体についても“風速上昇時の乱れ強さ”として十分に議論の余地があることから、最大風速観測前後の風速特性をさらに定量的に検討をする必要があると思われる。仮に、平均風速の上昇に合わせて風速の乱れも上昇するのであれば、(式 5. 3. 4) による応答値の推定は有効であると考えられる。ただし、式中掛けられている補正係数については、風速変化率だけではなく風速の乱れが強く関係してくるために、さらなる統計的な結果次第では補正係数の訂正も考えられる。しかしそのためには、柏キャンパスに限らないより多くの観測データが必要になると考えられる。

第4章で提案した非定常模擬風速をもとに定常模擬風速との間で荷重評価を行った。評価結果を応答誤差率として表すことにより風速変化率が50%に及ぶ場合、従来の定常風による荷重評価との間で最大180%程度の誤差が生じる危険性を指摘した。ただし、この結果についてはあくまでも50%という風速変化率に対してであり、また、実測データ全体として50%という大きな風速変化率が観測されていない事も加味すれば、今すぐ建物が倒壊するという危険性には結びつかないと思われる。現実的に評価をすれば、柏キャンパスによる実測データからおよそ30%程度の風速変化率は十分に考えられるため、130%程度の誤差は場合によってはあり得る。しかし、得られたデータは10年にも満たず、台風サンプルも十分な数を揃えられていない事も考えると、さらなる統計的分析は必要であることは言うまでもない。本研究から得られた応答予測値は未だ数あるデータの中の一部のデータを一般化したに過ぎず、このデータから実際の設計への応用は難しい。このため、より広義の一般化非定常模擬風速の作成は今後の研究課題と言える。そのためにも、より多くの統計データによる定量的な評価が望まれる。

第 6 章

総括・今後の展望

6. 総括

第6章では、各章から得られた知見と成果をまとめ、今後の展望を述べる。

第1章

第1章では一定平均風速による定常風モデルにもとづいた荷重評価の現状とその問題点を指摘した。以下に第1章で取り上げられた研究背景について述べる。

最大荷重を評価対象とする耐風設計では、近年普及してきた履歴型制振部材やアクティブ制振装置等、累積疲労損傷やエネルギー吸収能力を評価対象とした設計に対応することは難しい。そのため、平均風速の時間変化を考慮した風モデルが必要となる。建物レベルでは、予め定められた設計許容値に対して一定平均風速による荷重評価を行うため、実際の現象として起こり得る評価時間内の予期せぬ平均風速の上昇や下降に対して危険性が存在する。予期せぬ一定平均風速に対する平均風速の時間変化は、場合によっては従来の荷重評価との間で大きな設計誤差を生み出しかねない。そこで、本研究は風速の平均成分が時間変化する風速の非定常性に着目をした研究を進める。自然風が本来持つ非定常性の現象を解明し、風速の非定常性による荷重評価について明らかにする。そのために柏キャンパスで観測された実測データに基づき非定常風のモデル化を行う。モデル化された風速に対して、風速の非定常性を反映した指標による一般化を行い、新たに作成された非定常模擬風速による荷重評価を行う。非定常模擬風速による荷重評価と従来の定常風による荷重評価との差異を明確する。

第2章

第2章では、柏キャンパスの観測データの概要を述べると共に、柏キャンパスで過去に観測したデータサンプルの中から非定常風データの顕著な例として台風をピックアップし、風向・風速とは別に乱れの指標として風速の乱れ強さを、時刻歴、平均風速、平均風向、別にまとめることで分析を行った。2つの観測地点、7つの台風サンプルから計14のデータサンプルを検証した。分析から以下の知見を得た。

風速は比較的短い時間（10分間程度）でも瞬間的には20m/sを超えた変動をする。また、そのような場合、従来の10分間一定平均風速から変動成分を求める手法では、平均風速が高いために理論値に収束しやすいに関わらず、乱れ強さが荷重指標理論値より高くなる。（例：0221号P3, 0422号P4, 0918号P4）しかし、他のケースについては、平均風速が高くなるにつれて定常確率過程による理論値に収束していく様子が伺える。また、10分程度の比較的短い風速変動とは別に、1時間を超える大きく長い風速変動も観測データから確認できる。このような場合、風速乱れ強さは荷重指標理論値に比べ高くなる傾向にあった。（例：0406号P4, 0918号P4）

台風データより、風速の瞬間的な非定常性について確認する事ができた。また、台風が東京地方を通過した観測データ（0221号P3, 0422号P4）は他の観測データに比べ平均風速に対する乱れ強さが高くなることは興味深い。これは、平均風速の上昇に伴い風速の乱れがそれ以上に高くなっている事を意味し、非定常風の現象としてさらなる定量的評価が必要と思われるが、仮にこのような傾向が真であるならば、従来の定常風モデルによる最大値推定（平均風速の上昇に伴い風速乱れ強さはある一定値に収束する、としているため）と実測データとの間に大きな誤差を生み出しかねないと思われる。

第3章

第3章では、第2章での非定常風データサンプルに対し、従来の一定平均風速による定常風モデルから線形近似風モデル、EMD 非定常風モデルによる風速のモデル化を提案した。提案されたモデルはそれぞれ対象とする荷重評価が異なり、線形近似風モデルは建物レベルの荷重評価に用いられる評価時間 10 分間を対象に、EMD モデルはダンパー等のエネルギー吸収機構を有する部材レベルでの荷重評価に用いられる比較的長い評価時間（ここでは 60 分間とした）を対象とした。それぞれのモデルに対して得られた知見を以下に述べる。

・ 線形近似風モデル

対象区間内での風速変動は線形的に増加（もしくは減少）する平均成分を中心に変動しており、平均成分の変動は線形で十分に近似出来る、という仮定に基づき一次近似直線による風速平均成分のモデル化を行った。線形近似風モデルは、従来の一定平均風速によるモデル化に比べ、風速変動の大きい区間でその優位性を発揮できる。特に、0221 号 P3 データ内に存在した 10 分間の間に最大風速と最小風速が 20m/s 程度変化する区間、0421 号 P4 での最大風速観測後の区間などでは、線形近似風モデルの優位性を確認できる。ただし、その傾向は風速の変動が一定平均風速に対して大きい時であり、他の区間においては従来の評価とさほど変わらない。しかし、その評価は一定平均風速による評価と同じものになる事はあってもそれ以下になる事はない。

・ EMD 非定常風モデル

EMD 手法による平均成分導出のメリットは、平均成分算出の際、Sifting Process によってデータ内の重ね合わさった波が取り除かれ、対象な波形によって構成された IMF 成分を計算出来る点にある。これら IMF 成分を足し合わせ、変動成分として風速をモデル化する事で、例えば非定常に風速が変動していたとしても周波数領域での解析が可能となる。また、風速データから IMF 成分が取り除かれる事により、不均一な振幅でギザギザとした信号群から滑らかな時々刻々と変化する平均成分の算出が可能となる。しかし、EMD (Empirical Mode Decomposition) と呼ばれるように、平均成分算出には経験的なパラメーターの決定が欠かせない。本研究で用いた 2 秒間データに対しては、基本振動数内データを 256、局所内データ基本信号数 3 とした場合が最も適したパラメーターである事がわかった。また、10 分間評価時間による評価においては、線形近似風モデルと同様際立った優位性は見られない。しかし、全体として、乱れ強さのばらつきは小さくなる傾向にある。一方で、60 分間という評価時間内では、時々刻々と非線形に変化する風速の平均成分を十分捉えられる事がわかる。この時、風速乱れ強さ及び確率密度関数、パワースペクトル評価は一定平均風速による定常風モデルに比べ格段の優位性を発揮出来る。この事から、EMD 手法を用いる際には、60 分間データ（もしくはより長いデータ）を用いる事で、例えば風速が非線形に変化を繰り返す非定常風データにおいて、適切な風特性評価が可能である事が示唆される。しかし、一部のデータには、EMD 解析による時間変化に依存した平均成分が適切ではないケースも存在し、特に 10 分間という短い評価時間に対しては注意が必要となる。また、定常性の強いデータに対しては、従来の手法による乱れ強さとはほぼ同程度の値を得る事ができる事も確認した。

第4章

第4章では、第3章による建物レベルでの荷重評価に適した評価時間 10 分間に対する風モデルを用い非定常模擬風速を提案した。非定常模擬風速は一定平均風速に対してモデル化されたパワースペクトル特性を用い、平均風速の時間変化する項をパラメーターとして代入する事で非定常風速特性として再現した。これは、非定

常風データによる10分間、5分間、3分20秒毎のスペクトル解析から、一部のデータで一定平均風速によるピーク位置と線形近似による平均成分の間の変化を確認したためである。スペクトルピーク位置の変化量については統計的な見地からさらなる定量的な議論が必要であるが、従来の定常確率過程による風速のモデル化とは異なる結果から、本研究では非定常性の強い風に対しては平均成分の変化に比例したスペクトルピーク位置の変化を考えることとする。

風速の非定常特性をデータ内に反映させた上で、評価時間内での一定平均風速に対する風速平均成分の最大値（もしくは最小値）として定義された風速変化率によって非定常模擬風速を一般化している。風速変化率による一般化は、柏キャンパス観測データから得られたサンプルデータに対してその最大風速観測ポイント前後30分に対して検証を加えた結果得られた。また、得られたデータサンプルに対する風速変化率はおよそ0-30%である。

以下に非定常模擬風速を作成するにあたり用いた仮定条件を示す。

- ① 対象とする非定常風は台風とする。
- ② 評価対象時間は10分間とする。
- ③ 評価対象時間内での風速変化は線形的とする。
- ④ 風速変動成分によるスペクトル形状（総エネルギー量）は、一定平均風速によってモデル化されたカルマン型パワースペクトルに準ずる。ただし、そのスペクトルピーク位置に関しては時々刻々と変化する平均成分の変化に比例して変化する。風速の乱れ強さは荷重指針による式から一定と仮定し、平均風速が時々刻々と変化するのに合わせ、風速の標準偏差も変化する事とする。

以上の仮定のもと、一定平均風速に対するカルマン型パワースペクトルから平均風速の時間変化を考慮に入れた三角級数モデルによる非定常模擬風速のシミュレートを行った。想定される風速変化率は50%, 25%とし、その風速モデルを単純増加モデル（Type A）と逆V字型モデル（Type B）とした。

第5章

第5章では、第4章で提案された非定常模擬風速に対して、従来の一定平均風速に対するスペクトル応答解析に基づく応答最大値推定式を踏襲した新たな式を提案した。提案式は最大風速発生確率の高い評価時間を特定する補正係数と風速変化率を従来の式に加えることで、最大応答値を推定する。以下に、推定式を提案するまでに得られた知見と、提案式による解析結果について分析を行う。

風速平均成分が時々刻々と変化する非定常模擬風速に対するスペクトル応答解析は、従来のランダム変動による応答解析手法とは異なり、最大風速が発生する時間帯が限定的になり得る。そのため、最大値発生の確率も評価区間内一定とはならず、平均風速が上昇するに従い高くなる傾向にある。本研究では、この最大風速発生区間について従来の式に補正係数を掛ける事により評価している。これは、本研究で想定した非定常模擬風速が「荷重指針」による一定乱れ強さを用いているために、平均風速が大きくなるにつれて風速の乱れも大きくなる性質があるため、風速平均成分の最大値観測ポイント周辺で特に最大風速が発生しやすいという事を考慮した結果である。しかし、この現象自体についても“風速上昇時の乱れ強さ”として十分に議論の余地があることから、最大風速観測前後の風速特性をさらに定量的に検討をする必要があると思われる。仮に、平均風速の上昇に合わせて風速の乱れも上昇するのであれば、(式 5.3.4) による応答値の推定は有効であると考えられる。ただし、式中掛けられている補正係数については、風速変化率だけではなく風速の乱れが強く関係してくるために、さらなる統計的な結果次第では補正係数の訂正も考えられる。しかしそのためには、柏キャン

パスに限らないより多くの観測データが必要になると考えられる。

第4章で提案した非定常模擬風速をもとに定常模擬風速との間で荷重評価を行った。評価結果を応答誤差率として表すことにより風速変化率が50%に及ぶ場合、従来の定常風による荷重評価との間で最大180%程度の誤差が生じる危険性を指摘した。ただし、この結果についてはあくまでも50%という風速変化率に対してであり、また、実測データ全体として50%という大きな風速変化率が観測されていない事も加味すれば、今すぐ建物が倒壊するという危険性には結びつかないと思われる。現実的に評価をすれば、柏キャンパスによる実測データからおおよそ30%程度の風速変化率は十分に考えられるため、130%程度の誤差は場合によってはあり得る。しかし、得られたデータは10年にも満たず、台風サンプルも十分な数を揃えられていない事も考えると、さらなる統計的分析は必要であることは言うまでもない。本研究から得られた応答予測値は未だ数あるデータの中の一部のデータを一般化したに過ぎず、このデータから実際の設計への応用は難しい。このため、より広義の一般化非定常模擬風速の作成は今後の研究課題と言える。そのためにも、より多くの統計データによる定量的な評価が望まれる。

今後の展望

以下に本研究から得られた知見をもとに今後の研究展開について私見を述べる。

第2章

さらなる非定常風データの構築が求められる。また、柏キャンパスに限らない台風データが望まれるだろう。サンプリング周波数は本キャンパスの0.5Hzより高い周波数によるものであると良い。これは実観測データを用いた応答解析を行う際、ナイキスト振動数として分解能の限界に影響を及ぼすためである。特に、10分間の評価時間内で非定常性の強い風速乱れ強さがどのような傾向にあるかは興味深い。仮に平均風速に比例して荷重指針に定める乱れ強さに収束をしないのならば、非定常模擬風速作成に大きな影響を与えるだろう。しかし、この傾向は台風がキャンパス周辺を通過したデータで見られ実現象としても同様な現象が起きている可能性が示唆される。

第3章

本研究では非定常風に対する荷重評価を行う目的で評価時間10分間に対する線形近似風モデルを最終的に採用した。しかし、仮に研究目的を非定常風による部材レベルでのエネルギー吸収量、とするならばEMD手法による非定常風モデルが有効となるであろう。これは、最大荷重を評価対象とする建物レベルでの評価ではなく、部材レベルでのエネルギー吸収量が議論の対象となるために時々刻々と長い時間（おそらく台風通過による上昇・下降区間が対象となろう）で継続的に変化する最大風速を観測するような時系列データが必要となるためである。このとき、どの程度の台風継続時間を評価の対象とするかが一つのポイントとなる。仮に、台風サンプルが数多く存在し、継続時間について定量的な議論が可能であれば、この問題について問題はないと思われる。定量的に評価された評価時間内で変化する平均成分をEMD手法により抽出する事で、比較的長い評価時間に対応した新たな非定常模擬風速を提案できるであろう。新たな非定常模擬風速を部材レベルでの弾塑性解析に用いる事で、風速平均成分の時間変化が加味された総エネルギー吸収量の問題に帰着ができる。また、多質点系でのエネルギー吸収機構最適配置問題への展開も可能かと思われる。

第4章

非定常模擬風速の作成手法としては、一定平均風速によるパワースペクトル特性から三角級数モデルによる模擬風速のシミュレーションの過程で、平均風速成分のみをパラメーターとして扱うのではなく、長さの定数 (L_z) もパラメーターとして評価する余地がある。ただし、風速平均成分、長さの定数ともスペクトルピーク位置に対するパラメーターであり、両者とも実観測データに従った細やかな評価が必要となる。第2章でも述べたが、非定常風データのさらなる構築がここでも求められる。スペクトルピーク位置に関して、より定量的な議論を行った上で、長さの定数も含めた非定常模擬風速の作成が求められる。また、模擬風速作成における乱れ強さが一定との仮定についても議論の余地がある。これは、平均風速が高くなるにつれて乱れ強さはある一定値に収束するとの荷重指針を参考にした仮定ではあるが、一部の実測データではより乱れ強さは収束をしていない傾向が伺える。これについても良質な実データに基づく分析が必要と言える。

第5章

時間変化する風速平均成分に対してスペクトル応答解析による最大値を推定する式を提案したが、その手法は未だ議論の余地がある。それぞれの時系列データに対応する時間変化する平均成分を取り除くことでスペクトル解析を行っているため、その評価はあくまでも全体の平均に対するものでしかない。つまり、応答の分散を求める時に平均風速も時々刻々と変化しているにも関わらず、その平均風速（一定）を取る事で周波数領域のみの積分値を利用しているというわけである。ただし、これは仮に時々刻々と変化した状態で応答分散値を求める場合、周波数領域のみではなく、時間領域での積分を行うわけであるが、その積分値は結局一定平均風速のそれと変わらないだろうとの推測に基づく。しかし、本手法は平均風速が上昇するにつれて風速の標準偏差も大きくなるので、もしかすると評価時間前半と後半で平均が変わる可能性も否定できない。従って、この事は、一度解析をして確かめる必要があると思われる。また、新たに提案した最大応答推定式は、本手法による模擬風速に対して有効であり、未だ一般性に乏しい。ここでも風速の非定常性についてさらなる定量的な議論が求められるだろう。

参考文献

- 西嶋, 神田, 崔 非正規性を有する変動風圧のピークファクター評価式の提案 日本建築学会構造系論文集 第557号 2002年7月
- 大熊, 神田, 田村 建築物の耐風設計 1996
- 日本建築学会 建築物荷重指針・同解説 2004
- 鈴木, 田村他 正方形平面建物の風応答・風圧特性に対する風向の非定常性の影響 日本建築学会構造系論文集 第550号 2001年12月
- 崔 高層矩形建物の3自由度応答解析のための動的風力評価に関する研究 東京大学大学院学位論文 1991年
- R. Adhikari, H. Yamaguchi A study on the nonstationarity in wind and wind-induced response of tall buildings for adaptive active control Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 72(1997) 213-224
- 吉江, 北村, 大熊 変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究 日本建築学会構造系論文集 第572号 2003年10月
- L. Wang, A. Kareem Modeling of Non-stationary Winds in Gust-Fronts 9th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, (2004)
- K. Gurley, A. Kareem Application of wavelet transforms in earthquake, wind and ocean engineering Engineering Structures (1999), 21, 149-167
- N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu The Empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis Proceedings of the Royal Society of London A, 454, 903-995 (1998)
- A. Kareem, T. Kijewski Time-frequency analysis of wind effects on structures Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(12-15), 1435-1452 (2002)
- Y. L. Xu, M. ASCE, J. Chen Characterizing Non-stationary Wind Speed Using Empirical Mode Decomposition Journal of Structural Engineering, (2004)
- Ang, Tang 改訂 土木・建築のための確率・統計の基礎 丸善 2007
- Huang, etc. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, 1998, The Royal Society
- Chen, Hui, Xu, A comparative study of stationary and non-stationary wind models using field measurements, 2007 Boundary-Layer Meteorol
- 日野 スペクトル解析 1977
- 大崎 新・地震動のスペクトル解析入門 1994
- 濱田, 崔, 神田 千葉県柏市における台風時の変動風向・風速特性 日本建築学会関東支部研究報告集 2002
- 佐藤, 鈴木, 吉江, 北村 変動風力を受ける超高層免震建築物の応答評価に関する研究 その1 風応答評価に及ぼすアンサンブル平均のばらつきの検討および高次モードの評価 日本建築学会大会学術梗概集 2009
- 松井, 大熊, 田村 経験的風況特性を用いた仮想台風による風速時刻歴の生成方法 日本建築学会大会学術梗概集 2009

- ・ Kanda Reliability of Gust Response Prediction Considering Height Dependent Turbulence Parameters, 1982, Research Report 82-03
- ・ 崔, 神田 本郷地区における市街地強風の特性について 日本風工学会誌 昭和 62 年
- ・ 谷口, 谷池 ウェーブレット変換を用いた非定常空気力の評価法 第 15 回 風工学シンポジウム 1998
- ・ 北川, 野村, 橋本 非定常風速変動におけるガスト応答特性に関する解析的検討 第 16 回 風工学シンポジウム 2000
- ・ 北川, 野村 ウェーブレットを用いた間欠性を含む人工風速波形の生成の試み 日本風工学会誌集 第 81 号 平成 11 年 10 月
- ・ 佐々木, 前田 ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析 日本建築学会関東支部研究報告集 1991 年度
- ・ 北川 ガスト応答時刻歴のウェーブレットベース・シミュレーション 第 18 回 風工学シンポジウム 2004
- ・ 北川 ウェーブレット係数のエントロピーを用いた風速変動の非定常性評価の可能性 第 17 回 風工学シンポジウム 2002
- ・ J. CHEN, Y.L. XU On Modeling of Typhoon-induced Non-stationary Wind Speed for Tall Buildings, 2004, The Structural Design of Tall and Special Buildings
- ・ 市原, 佐藤, 他 8 名 観測記録に基づく超高層免震建物の応答特性に関する研究 その 2 風応答特性および振動数の変化 日本建築学会大会学術梗概集 2008
- ・ 吉江, 北村, 大熊 エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法 日本建築学会構造系論文集 第 589 号 2005 年 3 月
- ・ 眞田, 吉田 都心の高層建物に作用する風と風圧の実測 第 13 回 風工学シンポジウム 1994
- ・ 藤本, 大熊, 他 4 名 7920 号台風次の建物風圧力および建物振動についての実測 風工学シンポジウム 1980
- ・ 白石, 松本, 北川 風速が急変する場合の物体に作用する空気力 風工学シンポジウム 1982
- ・ 藤本, 大熊, 他 4 名 7920 号台風時の建物風圧力および建物振動についての実測結果 風工学シンポジウム 1980
- ・ 山田, 橋梁の空力弾性応答解析と非定常空気力について 風工学会誌 第 78 号 平成 11 年 1 月
- ・ 神田, 数値制御ファンを用いた気流作成の試み 日本風工学会誌 第 78 号 平成 11 年 1 月
- ・ 神田, 岩崎, 喜々津 複数ファン制御による乱流風洞の基礎的性質 第 14 回 風工学シンポジウム
- ・ 喜々津, 神田, 岩崎 複数ファンを用いた乱流風洞におけるココヒーレンスの模擬 日本建築学会大会学術講演梗概集 1997 年
- ・ 池内, 谷池, 谷口 瞬間的な風向変化により外装材に作用する風圧性状 日本建築学会構造系論文集 第 563 号 2003 年 1 月
- ・ 池内, 谷口, 丸山, 谷池 自然風中における風向変化の性状に関する研究 日本建築学会学術講演梗概集 2003
- ・ 前田, 牧野 大気乱流の平均流方向成分の統計的性質に関する研究 -従来の提案式の等方性乱流理論に基づく分類とその基本的性質の比較検討- 日本建築学会論文報告集 第 287 号 昭和 55 年 1 月

- ・ 崔, 神田 風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性 日本風工学会誌 第45号 平成2年
- ・ 小賀, 大熊, 安井, 下村 神奈川大学 23 号館 (免震棟) の風応答性状に関する研究 日本建築学会大会学術講演梗概集 2002
- ・ 原, 竹下 数秒の時間領域における風速変化パターンの検出に関する研究 日本風工学会誌 第34巻第2号 平成21年4月
- ・ A. Kareem, T. Kijewski Time-frequency analysis of wind effects on structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90(2002)
- ・ M. T. Chay, R. Wilson, F. Albermani Gust occurrence in simulated non-stationary winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(2008)
- ・ Anil K. Chopra Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second Edition
- ・ Julius S. Bendat, Allan G. Piersol Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 1971
- ・ 崔, 神田 スペクトル表現により模擬された定常確率過程の正規性と収束性 日本建築学会構造系論文集 第568号 2003年6月

梗概

非定常変動風力が建物応答に与える影響について

Influence of Non-stationary Wind Force on Building Response

学籍番号 47-086734

氏 名 市原 義孝 (Ichihara, Yoshitaka)

指導教員 神田 順 教授

1. 研究背景・目的

現在、最大荷重を評価対象とする耐風設計では、設計期間内で最大となる一定平均風速と風速乱れ成分からなる荷重評価が行われる。しかし近年、超高層建物で普及してきた履歴型制振部材やアクティブ制振装置等、累積疲労損傷やエネルギー吸収能力を評価対象とした部材を設計する際には、最大荷重の評価以外に時間変化する平均風速の評価が求められる。そのため、予め定められた設計許容値を最大荷重が超えない事を確認する現在の手法では、平均風速が時々刻々と変化する時系列データに対して構造性能を評価する事は難しい。また、平均風速の時間変化を考慮しない評価は、一定平均風速と予期せぬ平均風速の傾きとの間で荷重評価の誤差を生み出しかねない。

そこで本研究は、自然風の非定常状態の解明と風速の非定常性を考慮した荷重評価を明らかにする事を目的に、柏キャンパスデータに基づいた非定常模擬風速の一般化を行う。平均風速の時間変化に着目したスペクトル応答解析による推定式を提案する事で、非定常風荷重評価について議論する。

2. 非定常風データ観測概要

解析の対象となる台風を図 1 に示す。観測地点は東京大学柏キャンパス P3 (高さ

20m)、P4 (43m) である。(図 2) 観測データは 2 秒毎に記録された風向 (72 風向)・風速 (m/s) データを用いる。

3. 新たな風モデルの提案

従来の風モデルは、評価時間一定平均風速 \bar{U} と定常確率過程に従った風速乱れ成分 $u(t)$ によって (1) 式のように定義される。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (1)$$

(1) 式によるモデル化は、最大風力による荷重効果を推定する上で有効であるが、平均風速の時間変化が考慮されていない。そこで本研究では新たに時間変化の概念を組み込み、非定常風モデルとして

$$U(t) = \bar{U}(t) + u'(t) \quad (2)$$

$\bar{U}(t)$: 時間変化する平均風速, $u'(t)$: 乱れ成分

(2) 式を提案する。(2) 式は時間変化する平均成分の扱い方によって定義が異なる。ここでは以下の 2 つのモデルを提案する。

3.1 線形近似風モデル

線形近似風モデルは、対象時間を短く評価する事で風速平均値の変動は線形的に近似が可能、という仮定に基づく非定常風モデルである。その変動成分は最小二乗法による近似直線を平均成分として定義される。表 1 に風速乱れ強さについて定常風モデルとの比較結果を、サンプルデータ中最大風速を観測した前後 30 分間のデータを抽出

表 1 風速乱れ成分 線形近似モデルと定常風モデルの比較

Linear/Constant	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C
台風\Time	-30min	-20min	-10min	0min	+10min	+20min	+30min
No.0206 P4	0.16/0.17	0.15/0.15	0.19/0.19	MAX	0.18/0.21	0.20/0.24	0.23/0.23
No.0221 P3	-	0.25/0.25	0.29/0.33		0.26/0.26	0.26/0.27	0.27/0.27
No.0221 P4	-	-	0.18/0.18		0.15/0.15	0.19/0.19	0.17/0.20
No.0310 P4	0.19/0.20	0.16/0.16	0.18/0.19		0.18/0.19	0.20/0.20	0.17/0.20
No.0406 P4	0.21/0.22	0.17/0.17	0.25/0.25		0.18/0.18	0.16/0.17	0.20/0.21
No.0421 P4	0.18/0.19	0.23/0.23	0.21/0.22		0.23/0.24	0.15/0.16	0.22/0.23
No.0422 P3	0.26/0.26	0.26/0.26	0.23/0.23		0.24/0.25	0.28/0.31	0.22/0.25
No.0422 P4	0.23/0.24	0.21/0.22	0.23/0.25		0.25/0.29	0.24/0.26	0.19/0.20
No.0918 P4	0.19/0.20	0.21/0.21	0.24/0.24		0.21/0.22	0.26/0.26	0.27/0.27

表 2 EMD モデルとの比較

EMD/Constant	E/C	E/C
台風\Time	-30min	+30min
No.0206 P4		0.18/0.25
No.0221 P3		0.28/0.33
No.0221 P4		0.17/0.20
No.0310 P4		0.18/0.20
No.0406 P4		0.20/0.21
No.0421 P4		0.21/0.23
No.0422 P3		0.25/0.31
No.0422 P4		0.23/0.32
No.0918 P4		0.23/0.25

表 3 最大風速観測前後 30 分間風速変化率

台風\Time	-30min	-20min	-10min	0min	+10min	+20min	+30min
No.0206 P4	9%	2%	9%	MAX	17%	22%	7%
No.0221 P3	-	2%	29%		3%	8%	7%
No.0221 P4	-	-	4%		7%	0%	20%
No.0310 P4	5%	9%	6%		10%	1%	17%
No.0406 P4	13%	2%	5%		0%	6%	12%
No.0421 P4	13%	4%	15%		8%	5%	9%
No.0422 P3	6%	0%	10%		7%	22%	20%
No.0422 P4	9%	10%	17%		25%	17%	11%
No.0918 P4	11%	1%	4%		10%	5%	5%

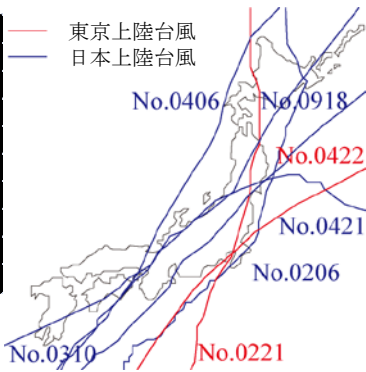


図 1 台風進路図

表 4 最大風速観測前後 30 分間風速変化率と発生確率

風速変化率	0 - 5 %	5 - 10 %	10 - 15 %	15 - 20 %	20 - 25 %	25 - 30 %
発生確率	23.53%	37.25%	17.65%	9.80%	7.84%	3.92%

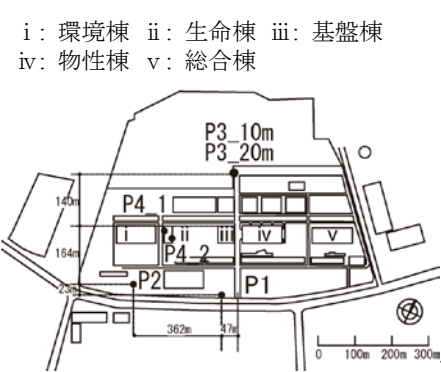


図 2 柏キャンパス観測地点

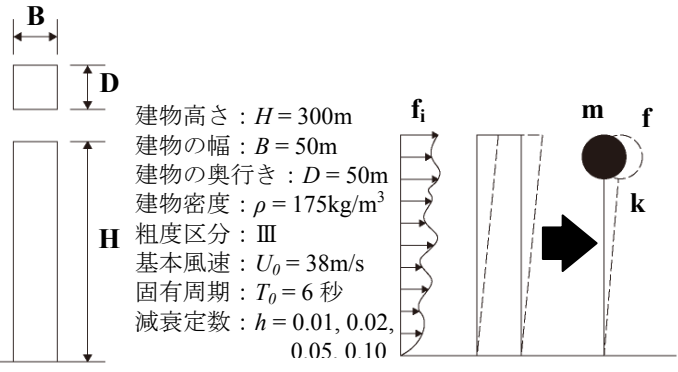


図 4 想定建物条件と解析モデル

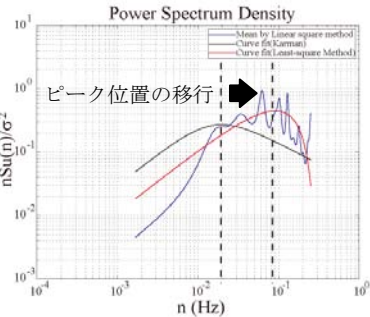


図 3 スペクトル特性 例

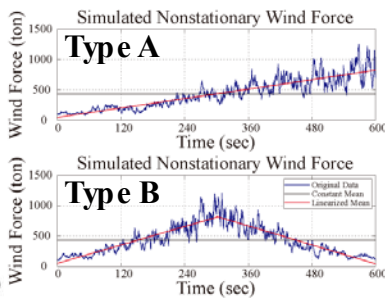


図 5 非定常模擬風力

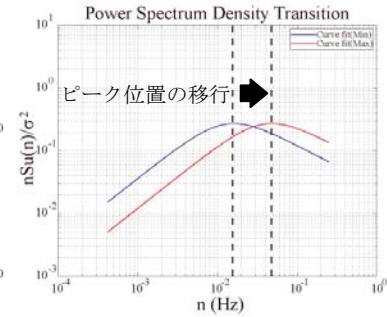


図 6 模擬風速スペクトル特性

して比較した。表より 10 分間の評価時間に対して線形近似風モデルの優位性を確認できる。

3.2 EMD 非定常風モデル

Xu 等^{*1}による非定常風モデルは、長い対象時間の平均風速変動をモデル化するのに適している。表 2 に乱れ強さについて EMD 手法と定常風モデルとの比較を示す。表より 60 分間の評価に対して EMD 手法の優位性が確認出来る。

4. 非定常風速の一般化と模擬風速作成

非定常風速に対する荷重評価を行う上で、「荷重指針^{*2}」による評価時間 10 分間を採用する。3.1 節より、10 分間に対する平均成分は線形的に近似可能なことから、本研究では線形近似風モデルに基づく非定常風速の一般化と模擬風速の作成を行う。非定常風の一般化のため、図 1 に示された台風について風速変化率を新たに定義する。

$$U_{CR} = \left| \frac{\overline{U}(t)_{\max or \min} - \overline{U}}{\overline{U}} \right| \quad (3)$$

各台風サンプルから得られた最大風速前後 60 分の変化率・発生確率を表 3, 4 に示す。表より風速の変化率はおおよそ 0% - 30% の間で推移している事が確認できる。

次に非定常変化時のスペクトル特性について図 3 に示す。図よりスペクトル形状は一定平均風速による理論値に近いのに対して、ピーク位置がやや高周波数側に移行している事を確認できる。この傾向はサンプルが観測地近くを通過したデータで特に確認出来た。そこで、線形近似風モデルに基づく非定常模擬風速を作成するにあたり、風速平均成分の変化に比例したスペクトル

ピーク位置の変化を組み込む。この時スペクトル形状は「荷重指針^{*2}」によるパワースペクトル密度に従うとし、時間変化する平均成分を三角級数モデルに代入し、求めた。風速は再現期間 500 年に相当するレベルとして「荷重指針^{*2}」の再現期間換算係数を用いて頂部風速 $U_H = 65.9(\text{m/s})$ とした。対象建物と想定立地条件を図 4 に示す。図 5 にシミュレートされた単調増加モデル (Type A)、逆 V 字モデル (Type B) の風力を、図 6 に模擬風速内でのスペクトルピーク位置変化の範囲を示す。図 5 に示す風速変化率は 50% である。模擬風力波形は 1 波形につき 0.5 秒刻み 1200 ステップで作成した。

5. 非定常変動模擬風力による応答評価

解析モデルは、減衰定数 h をパラメータとし、1 次モードの風応答のみに着目し、水平 1 自由度の 1 質点モデルにより行った。振動モデルの質量と外力は、建物の 1 次固有振動モードを頂部 1 とした直線モードであると仮定し、1 次のモーダル質量とモーダル外力を与えた。(図 4)

本研究は、時間変化する平均成分に対応したスペクトル解析による最大変位応答を推定するため、「建築物の耐風設計^{*3}」による式に最大風速時間帯を推定する補正係数と風速変化率を加えた (4) 式を提案する。

$$x(t)_{\max} = \frac{9}{10} \left(\bar{x}(t)_{\max} + (1 + U_{CR}) k_p \sigma_x \right) \\ \bar{x}(t) = \frac{F_q(t)}{k} \quad (4)$$

$\bar{x}(t)$: 時間変化する平均成分による変位, k_p : ピークファクター, σ_x : 応答標準偏差, k : 建物水平剛性

(4) 式による応答計算値と時刻歴応答計算値の比較を、風速変化率 50%, 25% 毎にそれ

表 5 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 50%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h=0.01	145cm	161cm	150cm	165cm	86cm	96cm
h=0.02	135cm	134cm	133cm	135cm	76cm	78cm
h=0.05	113cm	108cm	114cm	110cm	64cm	62cm
h=0.10	105cm	97cm	105cm	98cm	57cm	55cm

表 7 応答誤差率 風速変化率 50%

Type A(単調増加)		Type B(逆V字)	
時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
168%	168%	173%	172%
178%	172%	176%	174%
176%	174%	178%	176%
185%	176%	185%	178%

表 6 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 25%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h=0.01	106cm	117cm	110cm	119cm	86cm	96cm
h=0.02	94cm	95cm	94cm	97cm	76cm	78cm
h=0.05	81cm	78cm	82cm	79cm	64cm	62cm
h=0.10	75cm	70cm	73cm	71cm	57cm	55cm

表 8 応答誤差率 風速変化率 25%

Type A(単調増加)		Type B(逆V字)	
時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
123%	122%	128%	124%
124%	123%	124%	125%
127%	126%	128%	128%
132%	127%	128%	128%

ぞれ表 5, 6 に示す。参考値として、定常模擬風力による応答値を Type C として併記する。スペクトル解析値、時刻歴解析値は共に 50 波による応答値のアンサンブル平均によって求め、各応答値を評価した。表より、風速変化率に関わらず、(4) 式による応答値と時刻歴応答解析による応答値の間にばらつきが少なく、応答期待値としての提案式の妥当性を確認できる。

次に、一定平均風速による定常風モデルとの応答誤差率を検証する。応答誤差率は、定常模擬風力 (Type C) による最大値 x_{max} に対する非定常模擬風力 (Type A, B) による最大値 $x(t)_{max}$ として以下に定義する。

$$Er = \frac{x(t)_{max}}{x_{max}} \quad (5)$$

(5) 式によるモデル毎の応答誤差率を表 6, 7 に示す。表より、応答誤差率は風速タイプ、減衰定数によらず風速変化率毎におよそ一定の値を取ることが確認できる。

6. まとめ

本研究は、従来の定常風モデルに対する荷重評価に対して、時間変化する平均成分を考慮した非定常風モデルによる荷重評価

を明らかにする事を目的に行われた。以下に、本研究から得られた知見をまとめる。

3 章では、風速の非定常風が強い事象に対して、線形近似モデルもしくは EMD 非定常風モデルによる風速のモデル化を提案した。この時、線形近似風モデルは 10 分間に対して有効であるのに対して、EMD 非定常風モデルは 60 分間と長い時間に対して有効であることを示した。

4 章では、評価時間 10 分間に対する非定常模擬風速を提案した。非定常模擬風速の一般化は、一定平均風速に対する風速変化率によって定義される。時間変化する平均風速成分に対してスペクトルピーク位置を時々刻々と変化させる事で、模擬風速に非定常風特性を反映した。

5 章では、非定常模擬風力に対してスペクトル解析による応答予測式を提案した。提案式は最大風速発生確率の高い評価時間を特定する補正係数と風速変化率を従来の式に加えることで、応答値を推定する。

参考文献

- *1 Xu, Chen Characterizing Non-stationary Wind Speed Using Empirical Mode Decomposition Journal of Structural Engineering, (2004)
- *2 日本建築学会 建築物荷重指針・同解説 2004
- *3 大熊, 神田, 田村 建築物の耐風設計 1996

謝辞

本研究を進めていく過程で多大なるご理解とご配慮を賜りました東京大学 神田 順 教授に心より御礼を申し上げます。先生のご指導無しにはこの論文を書き上げることは出来ませんでした。

他大からではございますが、学部より、「風」という分野とお付き合いをして早3年、先生のもとで学問とはこうも奥が深いものかと日々戦々恐々としながらも、どうにかここまで階段を登る事が出来ました。先生の常人離れしたアイデアと見識の広さは、入学当初より感服しておりましたが、それ以上に今なお各方面で活躍されているその姿を眺め、尊敬の念を抱かずにはいられません。先生のその「知」への純粋さと、何事にも活動的な姿勢を今後社会にでる著者も見習っていきたいと思います。プライベートに付きましても、先生のお家でのバーベキューやおせち、キャンパスでのテニスなど、数え上げればきりがありませんが、どれも大変お世話になりました。在学中は、著者が主催したクリスマスパーティーにも参加して頂きありがとうございました。また、日々勉強に勤しむことに飽き足らず、留学生との交流イベントの企画や IPoS 209 へ参加する著者を暖かく見守って頂き感謝しております。おかげで、建築構造学以外の幅広い知識を修めることができました。まさに学融合とは、このようにバックグラウンドも言語も全く異なる他者と知を共有し、互いを刺激合うことなのだ実感が出来た2年間でありました。このような場を提供してくれた東京大学柏キャンパスにも感謝しております。

研究室を共にし、苦楽を共有した神田研究室の面々にも感謝しております。以下順不同に研究室のメンバーに謝辞を送りたいと思います。

羅 元隆 (Loren) さんには、研究への多大なアドバイスと風工学への知識を教わる事ができました。朝早くから夜遅くまで研究に勤しむその姿は尊敬に値します。そして、プログラムがうまく回らず深夜に至るまで共に問題解決に付きあってくれたあの日のことは忘れることができません。無事論文を書き上げる事ができたのも Loren さんの力添えがあればこそ、でした。これからも研究室での一番身近な存在として、また、頼れる兄貴として、残り2年間の博士課程を過ごして下さい。台湾に遊びに行くときはぜひガイドをお願いします！

青山 大樹くんには、唯一の同期生として研究室内でお世話になりました。体調が優れないようで心配ではありますが、今後の活躍に期待をしたいと思います。

寺井 亮くんには、2年間、研究室の事からその他の行事に至るまで、紙面では書きつくせない程お世話になりました。この2年間、研究室内で同じ風グループとして、また、困った事があればなんでも頼める後輩として、いろいろとお願い事をしてきました。しかし、今にして思えば、寺井くんの学部論文を手伝っていたあの頃が懐かしいですね。思い出を紐解けば、本郷の風洞に寝泊まりをして実験に取り組んだ事、寺井くんが酔った状態でひき逃げされた事などはとても良い思い出です。(笑) 頼まれたことに対して、前向きに取り組む君のその姿勢は神田研究室にとって貴重な存在でした。残り1年、自己研鑽に大いに励み、自らの視野を広げて下さい。

谷口 裕子さんには、1 年間、神田研究室紅一点として研究室に潤いと癒しを届けてくれて、とても感謝しています。谷口さんのその何事にも前向きな姿勢と純粋さは研究室の宝です。誰にも気兼ねなく、そして好奇心旺盛で、努力を欠かさない君は、これからもきっと大いに活躍されることでしょう。残り 1 年間、修士 2 年生として新しく入学される新入生と共により一層の潤いを神田研究室届けて下さい。でも、そのためにはまず、研究室での寝泊まりは程々にしないとね。(笑)

永雄 健一くんには、君が学部生として神田研究室に配属されてから 2 年間、大変お世話になりました。その独特な魅力と研究に取り組み姿勢には常々感心していました。著者も見習いたいものです。今、アメリカで日々の生活に格闘している事とは思いますが、ながうならどんな大きな壁も乗り越えられるでしょう。そして君がこれを読んでいる時には、一段と大きな進化を遂げていることと思います。いつか、一皮も二皮も三皮も四皮もむけたながうと会える事を期待しています。また、日々のながうのブログを見てみると、著者もがんばらねばと思うことがしばしばです。これからもブログの更新は続けて欲しいと思います。残すところ、残り 2 年間、悔いの無いように自分の正しいと思った道に向かって走り続けて下さい。そして、たまにはのんびりとお酒でも酌み交わしましょう。(笑)

また、既にご卒業された神田研究室のメンバー、金さん、野口さん、石野さん、大西さん、その他社会文化環境学専攻のみんなにも謝辞を送りたいと思います。大変お世話になりました。金さんには、風工学のいろはだけではなく、お酒をよく一緒に飲みましたね。短い間でしたがとても楽しかったです。感謝しております。野口さんには大学院入試の際、いろいろと情報を頂きました。感謝しております。石野さんには、研究室の運営で大変お世話になりました。また、研究に関して様々なアドバイスを頂きました。感謝しております。大西さんの破天荒な性格は面白かったです。感謝しております。社会文化環境学専攻に入学し、建築学専攻に限らず、都市工学系の学生から情報系の学生に至るまで実に多種多様な人達と交流が出来ました。感謝しております。とても楽しく、あっという間に時間が過ぎてしまった事が残念でありませんが、各方面でのこれからのみんなの活躍を期待しております。

謝辞を締めくくるにあたり、25 年間常に暖かい心で著者を迎えてくれた父義男、母みつよに深い感謝の意を表したいと思います。両親の支えと理解がなければこのような成果を残すことは出来ませんでした。愛情表現が苦手な著者は、用事が無ければなかなか家に帰る事はありませんでしたが、そんな中でも両親からのさりげない電話やメールには大変励まされました。この論文を機に社会にでる著者は、社会人の一員として、期待と不安の中これからも自分が信ずる道を進んで行きたいと思います。

2010 年 1 月 24 日 著者記す