

ウェーブレットによる低周波風雑音の解析

文 燦*, 高桑 誠明

(平成23年10月5日受理)

Analysis of Low-frequency Wind Noise by Wavelet

Can WEN* and Yoshiaki TAKAKUWA
(Received October 5, 2011)

The low-frequency wind noises measured at a wind-power plant are examined with the continuous Gabor wavelet transform in order to find out a clue to improve the countermeasure against the wind noise in the low-frequency noise measurement. The results show the biggest cross-correlation coefficient between the wind speed near the microphone and the Gabor wavelet with the characteristic parameters of a frequency $f=3$ Hz and a time window $\sigma=4$. The problems of examining the wind noise at the higher frequency ranges and for various kinds of wind situation, and of applying the results to improve the countermeasure against the wind noise are still remained to future study.

Keyword : low-frequency noise, wind noise, Gabor wavelet, wind speed, cross-correlation

低周波音計測における風雑音対策法改善の糸口を見い出すべく、風力発電所で計測された低周波風雑音の連続ガボールウェーブレット変換による解析を行った。その結果、ガボールウェーブレットの特徴パラメータである周波数 $f=3\text{Hz}$ 、時間窓 $\sigma=4$ でのウェーブレットとマイクロホン近傍の風速情報との相関係数が最も大きいことが示された。より高い周波数領域での解析と、様々な風況での確認、及びこの結果の風雑音対策への適用の問題は今後の課題として残されている。

キーワード：低周波騒音, 風雑音, ガボールウェーブレット, 風速, 相互相関

* 広島国際学院大学大学院工学研究科修士課程 (現在：公興和投資顧問有限公司)

1. はじめに

環境騒音は野外で計測されることも多く、自然風を原因とする風雑音がマイクロホンに混入することがしばしば問題となっている。騒音レベル測定法においても、強風時の騒音計測を避けるようにとの指示がある^{1), 2)}が、風車発電機の低周波音計測の場合のように、風が存在する環境下で実施しなければならない場合もある。

一般に、風雑音対策としてウインドスクリーンの着用が有効であるが、風雑音の低周波成分を通常のウインドスクリーンのみで除去することは困難であり、特別な大型ウインドスクリーンの開発研究が引き続きなされている^{3) ~5)}。他方、もともと風によって運ばれる低周波圧力変動成分と、計測対象とする音の圧力変動成分とを物理的に分離する方法としてのウインドスクリーンの利用には限界があると考えられる。このため、ウインドスクリーンの装着に加えてマイクロホンを地表面近くに設置して風の影響を少なくさせようとする方法が規定されたり^{6), 7)}、複数マイクロホンの利用に基づく相関法⁸⁾の適用などが提案されている。他方では、風雑音を風の微細構造との関連で捉えようとする原則的な立場から、熱線式風速計を用いた研究も報告されている⁹⁾。また、複数マイクロホンの配置に基づく風雑音対策風法の実用性向上のため、風の局所的空間構造をウェーブレットを用いて解析する研究も報告されている¹⁰⁾。一方、筆者らはマイクロホン近傍の風速情報と風雑音の相互相関特性に着目した簡易手法、混入した風雑音自身の特徴帯域成分と低周波成分との相関を利用した簡易手法などのソフト的な風雑音対策法を提案してきたが^{11) ~13)}、計測対象音の推定精度を向上させる課題などが残されている。

本研究は、上述のソフト的な風雑音簡易対策法の精度向上をめざし、風雑音の超低周波成分の特徴をより詳細に捉えようとする試みである。具体的には、不規則に変動する風雑音データに、新たにウェーブレットを用いて連続解析を行う。すなわち、低周波風雑音は風のカスト¹⁰⁾を原因と考えられ、従来筆者らが用いてきた時間窓を固定した短時間フーリエ解析よりも、時間軸上で局在するウェーブレットを用いる解析のほうがその特徴をより詳細に捉えられるという見通しに基づく。解析に用いるウェーブレットととして何を用いるかが大きな問題となるが、ここでは、時間的に局在する周波数成分の特徴を捉えるのに有効である公知のガボールウェーブレット^{14) ~16)}を用いる。

2. 連続ガボールウェーブレット変換

アナライジングウェーブレット $\psi(t)_{a,b}$ を用いた信号 $x(t)$ の連続ウェーブレット変換 $G_W(b, a)$ は次のように表される^{14), 16)}。

$$G_W(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\psi(t)_{a,b}} x(t) dt, \quad (1)$$

$$\psi(t)_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2)$$

ここに、 $\overline{\psi(\cdot)}$ は $\psi(\cdot)$ の複素共役であり、 b は t 軸上のシフト、 $a > 0$ は拡大縮小のパラメータである。

アナライジングウェーブレットとして上述のガボールウェーブレットを採れば、その基底に正弦波成分を持つため、短時間フーリエ解析との直感的な対比が容易であり、時間的に局在する正弦波成分の解析に有効である。ここでは、以下で表されるガボールウェーブレット $\psi(t)_{\sigma, \omega_0}$ を用いる¹⁵⁾。

$$\psi(t)_{\sigma, \omega_0} = \frac{\omega_0^2}{\sigma^2} e^{-\frac{\omega_0^2}{2\sigma^2} t^2} \left[e^{i\omega_0 t} - e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \right]. \quad (3)$$

ここに、 σ はウェーブレットを拡大縮小するパラメータであり、 $\omega_0 (=2\pi f)$ は基底となる正弦波の周波数を示す。なお、ガボール変換はフーリエ変換で成立したような直交基底の条件を満たさない。

短時間フーリエ変換では解析する周波数が高くなっても時間窓幅 T は変わらないが、ガボールウェーブレットでは解析の周波数が高くなると時間窓幅 T が狭くなるのが特徴であり、これにより信号の時間分解能を上げようとする。例えば、(3)式において $\sigma = 1$ の場合、 $f = 1\text{Hz}$ での事実上の時間幅は $T \simeq 1.0\text{s}$ であるが、 $f = 10\text{Hz}$ では事実上の時間幅が $T \simeq 0.16\text{s}$ と小さくなる。波形例として、Fig. 1 a), b) にそれぞれ $\sigma = 1, f = 1\text{Hz}$ 及び $\sigma = 5, f = 5\text{Hz}$ に対するガボールウェーブレットの実部と虚部を示す。

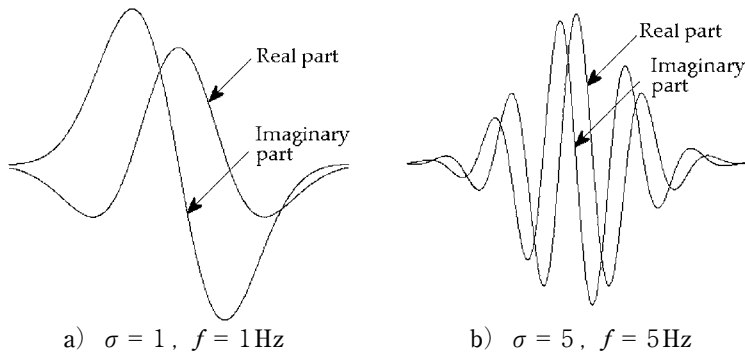


Fig. 1 Examples of the real parts and the imaginary parts of the Gabor wavelets of two cases: a) $\sigma = 1, f = 1\text{Hz}$ and b) $\sigma = 5, f = 5\text{Hz}$.

3. 実験及び解析結果

3.1 ガボールウェーブレット解析の実効値表示

一般に短時間フーリエ変換では解析結果はパワースペクトルで表わされるが、ここでは、連続ガボールウェーブレット変換の解析結果を簡易的に実効値で表す。すなわち、時刻 t でのガボールウェーブレット変換を $G_{\sigma, \omega_0}(t)$ と表わし、その実部を $\text{Re}[G_{\sigma, \omega_0}(t)]$ 、虚部を $\text{Im}[G_{\sigma, \omega_0}(t)]$ と表わせば、実効値 $R_{\sigma, \omega_0}(t)$ が次のように算出される。

$$R_{\sigma, \omega_0}(t) = \sqrt{\text{Re}[G_{\sigma, \omega_0}(t)]^2 + \text{Im}[G_{\sigma, \omega_0}(t)]^2}. \quad (4)$$

本研究では、時間軸のシフトはガボール変換時間幅 T とし、ガボールウェーブレットがほぼ0から最大値又は最小値を経てほぼ0まで減衰する時間幅を算出して用いた。

手法の有効性を確認するため、シミュレーション信号を用いて連続ガボールウェーブレット解析した結果の一部を Fig. 2 a) ~ d) に示す。図において、a) は解析対象として合成したシミュレーション信号である。(1)は直流分、(2)~(4)はそれぞれ、正弦波 1, 3, 5Hz, (5)は正弦波 3Hz と 5Hz の加算合成、さらに(6)白色性雑音を、それぞれ10秒間ずつ発生させたものである。この信号を時間軸ガウス窓 $\sigma = 1$ 、ウェーブレット正弦波成分の周波数 $f = 5\text{Hz}$ にて変換した結果の実成分をb)

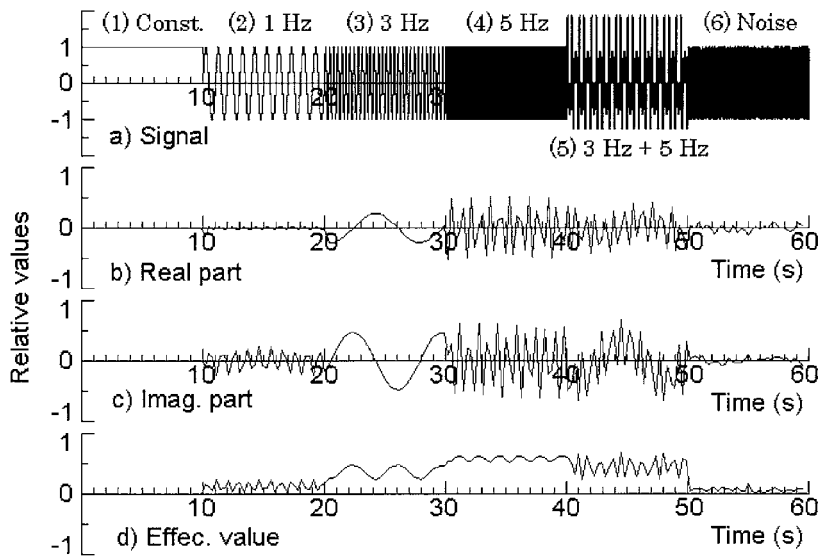


Fig. 2 An example of Gabor wavelet transform of a simulation signal at $\sigma = 1$ and $f = 1$ Hz.

に、虚成分をc)に示す。さらに、これらを用いた実効値成分をd)に示す。ここでは、定常信号を用いているため、ウェーブレット解析自体の効果を示すことは出来ないが、d)図で示される実効値で捉える有効性が示される。なお、(3)3Hz信号部で実効値が脈動してやや大きく現れているが、これは解析の時間窓が小さいため近接周波数成分での周波数分解能が劣っているためであると判断される。同じ時間軸ガウス窓 $\sigma = 1$ で、他のウェーブレット正弦波成分の周波数 $f = 1 \sim 4$, $6 \sim 10$ Hzにて変換した結果も同様に確認している。

3.2 風雑音の連続ウェーブレット解析

3.2.1 使用風雑音データ

風雑音は過去に行なわれた風力発電所での実測データを用いた。観測は、山口県大津郡日置町中国電力日置ウィンドパーク（当時）において、2002年8月30～31日に台風15号が五島列島の西海上を通過した際に行った。実験の様子をFig. 3に示す。

音響計測は精密騒音計Sと低周波音騒音計L1各1台（地上高約1.5m）と、マイクロホン地表設置板上の低周波音騒音計L2の3カ所で行い、同時刻での風速はトランジスタ式微風速計2台：W1（地上高約1.7m）及びW2（地表設置板上）を用いて行った。各騒音計及び各風速計からの観測信号はデータレコーダ（DAT）にサンプリング周波数12kHzにて記録した。その後、low-passフィルター（FIR型、カットオフ周波数305Hz）を通してサンプリング周波数1kHzに変換した。このようにして得られた観測結果の一部から、各約10分間の(1)風

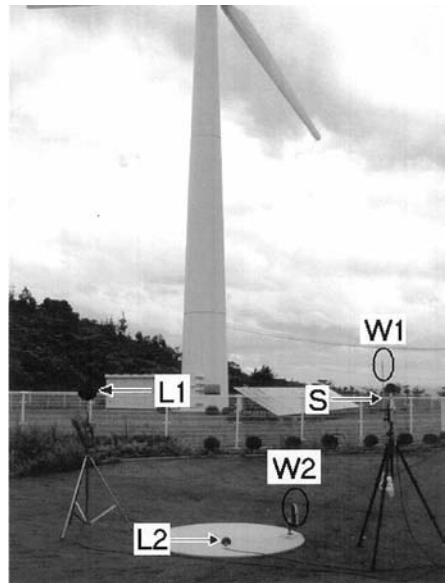


Fig. 3 Experimental arrangement at Heki Wind Park in Yamaguchi Pref.

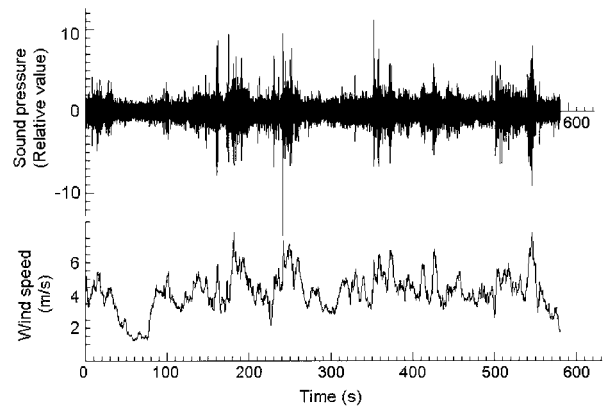
車発電機の「停止中」(ほぼ風雑音のみ)の音圧データと、(2)風車発電機「稼動中」(風雑音+風車発電機騒音)の音圧データを選んで解析対象とした。各音圧データを同時に観測された風速データとともに Fig. 4 a), b) に示す。さらに、同図 Fig. 4 a) において、風雑音が小さいときの時刻70sから、及び風雑音が大きいときの時刻181sから1秒間を抜き出して時間軸を拡大した図を Fig. 5 a), b) に示す。

図において、マイクロホン近傍の風速が大きい時には観測音圧の時間変動が大きくなっていることがわかる。前述の既報告の風雑音対策法では、短時間フーリエ変換を用いてこの解析をしたことを基礎としているが、本研究ではウェーブレット変換によりその基礎的解析を行う。

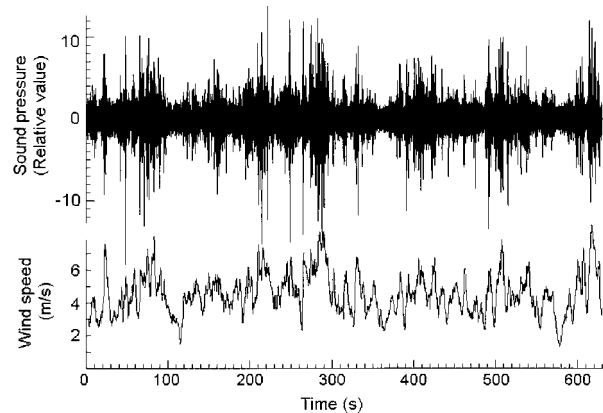
3.2.2 解析結果

上述のように、ガボールウェーブレットは時間幅パラメータ σ が一定であっても、周波数 f が大きくなるとウェーブレットが狭くなり、事実上の解析窓幅 T が小さくなる。時間幅パラメータ σ を大きくすることによってこの窓幅 T が広がり、この σ と f の設定がガボールウェーブレット解析の特徴となる。例えば、 $\sigma = 3$, $f = 2\text{Hz}$ の場合、事実上の窓幅 $T = 2.09\text{s}$ であり、 $f = 3\text{Hz}$ では $T = 1.43\text{s}$ となる。 $\sigma = 4$, $f = 2\text{Hz}$ の場合、 $T = 2.65\text{s}$ となり、 $f = 3\text{Hz}$ では $t = 1.79\text{s}$ である。

過去の短時間フーリエ変換による解析結果では、周波数 $f = 4\text{Hz}$ 付近の風雑音が風速

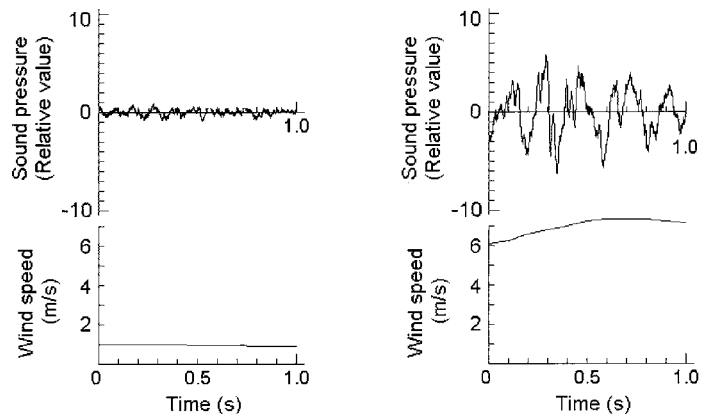


a) A case at the wind turbine generator is not in operation.



b) A case at the wind turbine generator is in operation.

Fig. 4 Two cases of observed wind noise in sound pressure with wind speed used in the analysis.



a) $T = 70\text{s}$ to 71s .

b) $T = 180\text{s}$ to 181s .

Fig. 5 Detailed figures of the wind noise in Fig. 4 a) when the turbine generator is not in operation: a) One second from $T = 70\text{s}$ and b) One second from $T = 180\text{s}$.

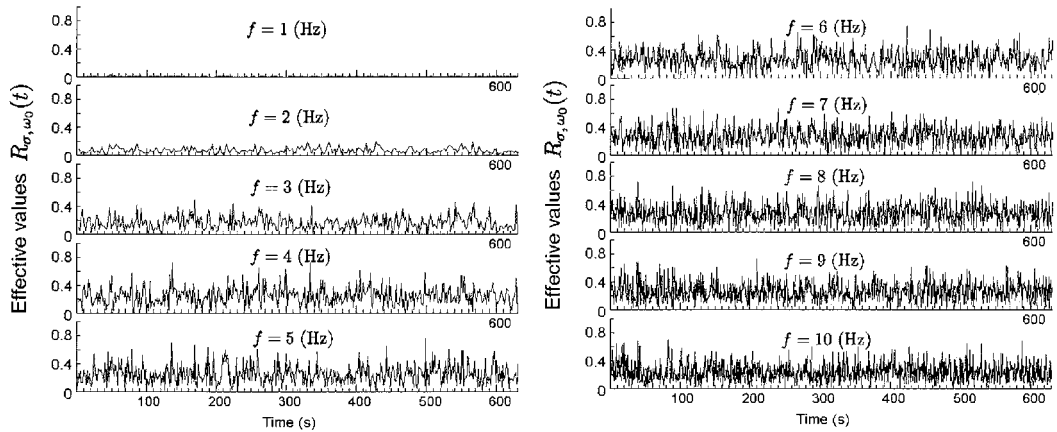
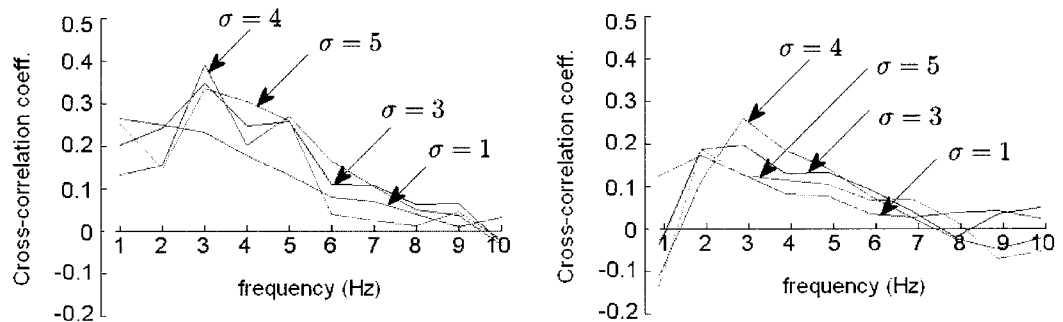


Fig. 6 Results of continuous Gabor wavelet transform of the sound data in Fig. 4 b) for a case $\sigma = 4$ with $f = 1, 2, \dots, 10$ Hz.

との相関がかなり大きかったので、本研究では、周波数範囲 $f = 1 \sim 10$ Hz に注目する。また、窓幅が広くなると、時間軸上の分解能が悪くなり、風雑音と風速の関係をより精密に捉えようとする本研究の目的に離れるため、本研究では時間幅パラメータ $\sigma = 1, 3, 4, 5$ について、前述の Fig. 4 a) の風車発電機の「停止中」（ほぼ風雑音のみ）の音圧データと、Fig. 4 b) の風車発電機「稼動中」（風雑音 + 風車発電機騒音）の音圧データを解析した。

解析結果の一部を Fig. 6 に示す。図は Fig. 4 b) 風車発電機「稼動中」の音圧データに対して解析した結果の一部で、時間幅パラメータを一定 $\sigma = 4$ として、上から順に $f = 1, 2, 3, \dots, 10$ Hz について算出した実効値 $R_{\sigma, \omega_0}(t)$ の時間変化を示したものである。図に於いて、上から 4, 5 番目の $f = 4, 5$ Hz での解析結果の実効値がやや大きく現れていることが分かる。パラメータ $\sigma = 1, 3, 5$ について同様に得られた解析結果と、さらに、Fig. 4 a) の風車発電機の「停止中」の音圧データに対しての $\sigma = 1, 3, 4, 5$ のそれぞれ一定値に対する $f = 1, 2, \dots, 10$ Hz について同様に解析



a) The case at the wind turbine generator is not in operation.

b) The case at the wind turbine generator is in operation.

Fig. 7 Cross-correlations between the results of continuous Gabor wavelet transforms of the sound data and the wind speed observed near the microphone at the same time for two cases in Fig. 4 a) and b).

した結果は省略する。

3.2.3 風速とガボールウェーブレットによる連続解析結果との相互相関

いま, Fig. 6 に示されるように, 時間幅パラメータ $\sigma = 1, 3, 4, 5$ のそれぞれについて, 周波数 $f = 1 \sim 10\text{Hz}$ に対して得られたガボールウェーブレットによる連続解析結果 $R_{\sigma, \omega_0}(t)$ を用いて, 同時に観測されているマイクロホン近傍の風速情報との関係を捉える。これにより, 今後のソフットの風雑音対策の新たな糸口を得ようとする。

さて, $R_{\sigma, \omega_0}(t)$ と風速情報とを用いて算出した相互相関係数を Fig. 7 a), b) に示す。Fig. 7 a) は風車発電機が停止中の場合であり, また, Fig. 7 b) は風車発電機が稼働中(風雑音+風車発電機騒音)の場合である。図において, 時間幅パラメータ $\sigma = 4$, 周波数 $f = 3\text{Hz}$ の風雑音成分が風速変動と大きな相関関係(相関係数が約0.4)が示される。a) に比べてb) では, 相関係数がやや小さいが, これは風車発電機からの騒音が影響していると考えられる。以上の結果は, 風雑音の卓越周波数成分が4Hz付近であるという過去の短時間フーリエ変換を用いて解析した結果と一致している¹⁸⁾。しかしながら, 過去には得られなかった時間軸方向での風雑音の特性が一部明らかとなった。すなわち, 風雑音音圧をガボールウェーブレットで捉える場合には, 風速情報との相関が $\sigma = 4$, 周波数 $f = 3\text{Hz}$ で最も大きいことが示された。

以上の結果は3.2.1の実験で観測された風雑音の主要な時間, 周波数特性が, マイクロホン近傍の風速情報によって, パラメータ $\sigma = 4$, $\omega = 6\pi$ で表されるガボールウェーブレットを用いて特徴的に表されることを意味する。

4. まとめ

本研究では, 野外で低周波音を計測する場合に問題となる自然風を原因とする風雑音混入問題を取り上げ, 新たにウェーブレット解析を用いて風雑音の解析を試みた。その背景としては, 近年, 風車発電機の増設とともに環境問題として低周波音による影響が取り上げられることなど, 自然風の存在下で低周波音を計測する必要性が増えていることがあげられる。

風雑音は局所的に不規則に変動することが多く, 一般に使われる短時間フーリエ解析よりも, ウェーブレット解析のほうが有効に特徴を捉える可能性がある。この視点から, 周波数成分と時間幅を独立に設定可能なガボールウェーブレットを用いて, 低周波風雑音の初期的解析を行った。具体的には, 実観測された約10分間の2種風雑音観測データを用いて, 周波数 $f = 1 \sim 10\text{Hz}$, 時間幅のパラメータ $\sigma = 1, 3, 4, 5$ について解析を行った結果, ガボールウェーブレットの周波数 $\omega = 6\pi$, $f = 3\text{Hz}$ で, 時間窓幅に対応するパラメータ $\sigma = 4$ の場合に, マイクロホン近傍の風速との相関が最も大きいことが示された。今後, より高い周波数範囲($\sim 500\text{Hz}$)に対する解析と, さまざまな風況での確認をする必要がある。

本結果は, マイクロホン近傍の風速情報を用いる, 風速による条件付き風雑音推定法の改善につながると思うが, 今後に残された課題となる。

謝 辞

関連する実験と基礎的データ処理にご協力頂いた本学大学院工学研究科電気工学専攻修士大田博文氏, 及び伊達隆幸氏に深謝する。

文 献

- 1) 低周波音圧レベル測定方法 日本騒音制御工学会認定技師の会実用規格 日本騒音制御工学会, INCE/J・C004-1997 (1997)
- 2) 騒音レベル測定方法 JISZ-8731 (1983).
- 3) 低周波騒音計測用防風スクリーンの開発 落合, 牧野, 山田, 月岡, 黒澤, 福島, 横田 騒音制御, 30 (5), pp408-417 (2006)
- 4) 低周波音領域を含む環境騒音測定のための防風スクリーンの試作 太田, 矢野, 橘 日本音響学会2011年春季研究発表会, 3-10-13
- 5) 低周波音計測用2次防風スクリーンの性能試験法の検討 丸山, 島村, 長船, 山本, 野村, 長谷部, 志村, 丹羽 日本音響学会2011年春季研究発表会, 3-10-14
- 6) Acoustic Noise Measurement Techniques, Wind Turbine Generator Systems – Part II, IEC 61400-11 (1998)
- 7) 騒音測定方法 風力発電システム—第II部 JIS C 1400-11 (2001)
- 8) Low-frequency wind noise correlation in microphone arrays, F. D. Shields, J. Acoust. Soc. Am., 117, pp3489-3496 (2005)
- 9) Hot-wireによる風速計測と風雑音の検討 高橋, 今泉 騒音・振動研究会資料, N-2005-26, pp1-6 (2005)
- 10) Spatial structure of low-frequency wind noise, D.Keith Wilson, Roy j. Greenfield, J. Acoust. Soc. Am., 122 (6) (2007)
- 11) A simplified method using wind speed for the estimation of low-frequency acoustic signal under the contamination of wind noise, Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura, and H. Minamihara, J. Acoust. Soc. Japan (E), 15, pp45-52 (1994)
- 12) 風雑音下の低周波域 BPL 計測における簡易的2種対象音推定の実験的考究 — 風雑音の特徴 BPLと風速情報の活用 — 高桑, 太田, 藤田 日本音響学会誌53 (10), pp779-787 (1997).
- 13) An Experimental Study on the Measurement of Objective Sound under Contamination of Wind Noise, Y. Takakuwa, M. Ohta, M. Nishimura and H. Minamihara, Intl. J. Acoust. and Vib., 2, 147-152 (1997)
- 14) ウェーブレットによる信号処理と画像処理 中野, 山本, 吉田 共立出版, 東京 (1999)
- 15) ウェーブレット (wavelet)
<http://www.yobology.info/text/wavelet/wavelet.htm> (2011/09/24確認)
- 16) 短時間フーリエ変換と連続ウェーブレット変換 井澤
<http://laputa.cs.shinshu-u.ac.jp/~yizawa/InfSys1/basic/chap11/index.htm> (2011/09/24確認)
- 17) スペクトル解析 日野 朝倉書店, 東京 (1997)
- 18) 風速情報を用いた風車発電機の騒音推定に関する基礎的検討 高桑, 歌谷, 門野, 小谷 日本音響学会2001年春季研究発表会講演論文集, pp703-704 (2001年03月)