

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06336

研究課題名(和文) 風力発電施設から発生する周期性変動音の物理的特性の解明と評価指標モデルの構築

研究課題名(英文) Study on analysis and quantifying of the amplitude modulated sound generated from wind turbines

研究代表者

岡田 恭明 (OKADA, Yasuaki)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：20367741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：風車のブレードが回転することで発生する周期的な変動音が、しばしば施設周辺の住民に対して聴感的な煩わしさを引き起こすと言われている。本課題では、この変動音成分の特性を解明するため、様々な気象条件下にてフィールド実験を実施した。また音響データから変動成分を抽出する実用的な方法についても検討した。主な成果として、風車騒音に含まれる変動成分には明確な指向特性を有し、特にナセル前方60度方向で強くなることなどを明らかにした。さらに、風車騒音のレベル自体は徐々に低下していくが、周期性変動成分の強さは200m程度離れた点でも2dB以上になり、人に知覚され易いレベルであることも確認した。

研究成果の概要(英文)：Wind turbine noise generally has the amplitude modulation components which often cause psychological annoyance in residential areas around wind farms. To examine the characteristics of amplitude modulated sound generated from a single wind turbine, field measurements have been performed under various wind conditions. The method for extracting the amplitude modulation components from the analyzed sound pressure levels was proposed. The distinguishable directivity of the amplitude modulation contained in wind turbine noise was revealed, whose pattern tended to be highest in the directions of approximately 60 degrees relative to the nacelle. In addition, the strength distributions of the amplitude modulation at distances of up to 200 m were examined. Almost all the strengths of the amplitude modulation component still remained 2 dB or more at distances of even a few hundred meters, whereas the A-weighted sound pressure levels decreased with increasing propagation distance.

研究分野：建築環境計画, 社会音響学, 騒音制御

キーワード：風車騒音 周期性変動音 振幅変調深さ 音響測定 指向特性 伝搬特性 ロータ回転速度 風速

1. 研究開始当初の背景

我が国においても再生可能エネルギーの利用推進の観点から、風力発電施設が各地で建設されている。将来の低炭素社会の実現に向けて、このようなエネルギー事業は、ある一定の評価を得ているものの、風車特有のブレードの回転に伴って発生する周期的な変動音(“スイッチ音”とも呼ばれる)に住民が悩まされているとの報告例も少なくない。そのため、2012年10月に環境影響評価法の対象事業に新たに追加され、その建設に際しては事前に予測・評価することが義務付けられた。しかしながら、風車から発生する周期性変動音なども含め騒音を評価する指標値や目標値に対する統一した知見が乏しく、その判断は各自治体に委ねられている状況であった(昨年5月に風車騒音に対する指針値が初めて環境省から公表されている)。

2. 研究の目的

風力発電施設から伝搬してくる騒音レベル自体は他の音源に比べて低いものの、通常、静穏な地域に建設される場合が多いためブレードの回転に伴って発生する周期的な変動音(amplitude modulated sound)が、周辺住民のアノイアンス(聴感的なわずらわしさ)を引き起こすと言われている。そこで、本研究課題では、欧米諸国でも議論されている風車特有の周期性変動音成分の物理的な特性について音源側の視点から解明し、変動成分の強さを評価する実用的な計算方法の構築を大きな目的とした。

3. 研究の方法

風車特有の周期性変動成分の検討に用いた音響データは、図1に示す出力1.5 MWのアップウィンド型の風車(定格風速・回転速度: 12 m/s, 20 rpm)を取り囲むように210°の範囲に配置した計6点(○)で測定したものである。風車までの水平距離は50 m(1点は40 m)、分析に有効な測定期間は8日間である。さらに、変動音の距離依存性をみるために、一直線上に配置した4点(●: 80, 100, 150, 200 m)で、同様の測定を数日間行った。測定点の高さは1.2 m、全ての騒音計には風雑音の影響を可能な限り避けるため直径20 cmのウレタン製全天候型ウィンドスクリーンを取付けた。周波数重み特性はA、時間重み特性はFASTである。

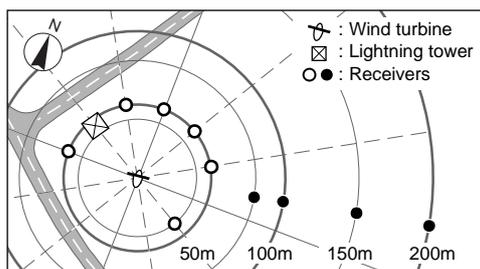


図1. 測定位置関係

風車周囲で測定した音響データには、ブレードの回転に伴う周期性変動成分(periodic fluctuations)以外に、風の変化による発生音自体の増減(gradual changes)も含まれてくる。そこで測定データから変動成分のみを抽出するために、既往のF-S法を参考にPCMレコーダに収録した音を聴取しながら分析した100ms間隔のA特性音圧レベル $L_{A,100ms}$ と、その3秒間の移動平均 $L_{Ave,3s}$ とのレベル差 ΔL_A (変動成分に相当)を求めた。また、その変動成分の強さの程度を表わす振幅変調深さ D_{AM} は、F-S法に倣い ΔL_A の90%レンジにより算出した。

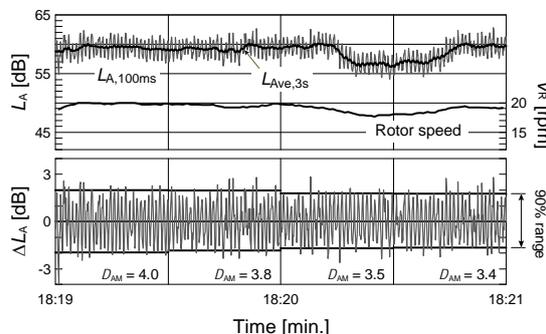
$$\Delta L_A = L_{A,100ms} - L_{Ave,3s} \quad (1)$$

$$D_{AM} = \Delta L_{A,5} - \Delta L_{A,95} \quad (2)$$

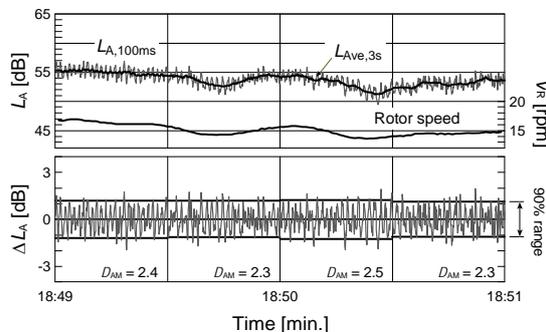
4. 研究成果

(1) 変動成分 ΔL_A と振幅深さ D_{AM} の算出例

図2は算出過程の一例で、風車がほぼ定格回転20 rpmに達している場合と、逆に低速回転している場合での周期性変動成分 ΔL_A から、30秒間ごとの振幅変調深さ D_{AM} を求めたものである。まず、風車騒音のレベルはロータ回転速度 V_R と共に緩やかに増減(gradual changes)しており、 $L_{Ave,3s}$ の変化と V_R のそれとの対応も良好であることがわかる。変動成分の強さ D_{AM} は、この例では、定格回転時は約4 dB、低速回転時は2 dB程度と見積もられる。



(a) CASE1 (rotor speed: 17-20rpm)



(b) CASE2 (rotor speed: 13-17rpm)

図2. A特性音圧レベル $L_{A,100ms}$ 、移動平均値 $L_{Ave,3s}$ 、レベル差 ΔL_A 、変調深さ D_{AM} の算出例

一方、図3は、周期性変動成分 ΔL_A の妥当性を確認するため、図2の開始30秒間の ΔL_A

から求めたフーリエスペクトル（分解能：0.039 Hz）と自己相関係数の結果である。データから抜き出した ΔL_A には、ブレード通過周波数 BPF (blade passing frequency, 0.98, 16.41 Hz) と、それに対応する周期 (1.0, 1.2 sec) が、それぞれ明確に現れている。さらに、それらから推定した回転速度 19.53 rpm と 16.41 rpm は、実際 V_R の範囲内 (図 2) にある。すなわち、本手法により風車特有の周期性変動音の抽出は可能であると考えられる。

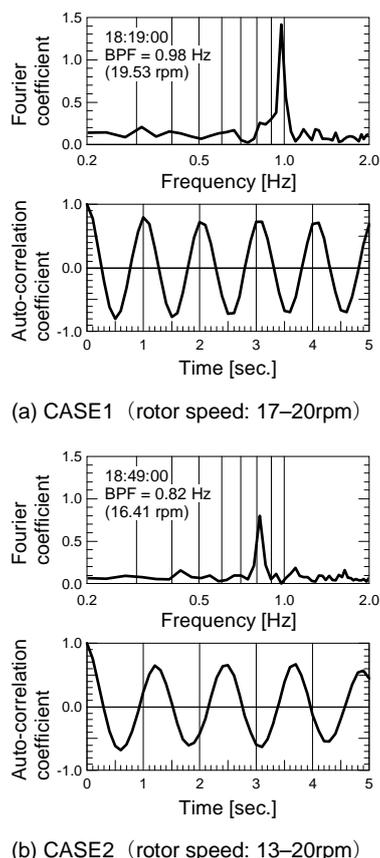


図 3. 30 秒間の周期性変動成分 ΔL_A のフーリエ係数と自己相関係数の算出例

図 4 は、ある点で測定した全データから計算した $D_{AM,30s}$ と、F-S 法により求めたそれとを比較した例 (時間幅: 30 s, データ数: 525) である。F-S 法による $D_{AM,30s}$ との差が 1dB 程度になる場合も見受けられるが、平均で約 -0.2 dB、標準誤差は 0.5 dB と、両手法でも同程度の値が得られることが確認できる。

一方、風車騒音に含まれる変動成分の強さ D_{AM} を見積もる際、どの程度の時間幅でみるかによっても、その値は異なってくると考えられる。さらに、図 2 に示すように、風車の稼働状況 (ロータ回転速度) は数分間でも 2 rpm 以上変化することから、ここでは 30 秒間と 1 分間の時間幅とでの D_{AM} を比較することにした。その結果を図 5 に示す。両者の値 (データ数: 218×2) は良く一致している。そこで、以後は 30 秒間隔の D_{AM} を用いて種々の検討を行うこととした。

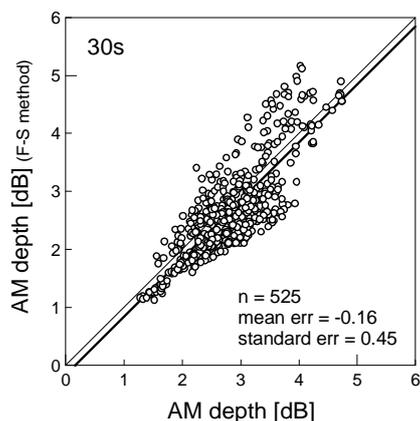


図 4. F-S 法の $D_{AM,30s}$ の計算結果との比較 (データ数:525)

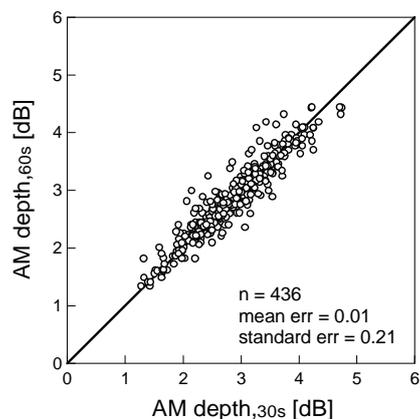


図 5. 分析対象時間による D_{AM} の比較 (分析時間:30, 60s データ数:436)

(2) 振幅変調深さ D_{AM} の水平分布

全測定点で得られた $D_{AM,30s}$ を測定点とナセル方位との位置関係を基に整理した。なお、50 m と 40 m の点で得られた $D_{AM,30s}$ には、風車から測定点までの距離の差による変動幅の大きさに違いが無いものと仮定した。

図 6 は、風車前方 $30\sim 60^\circ$ と $300\sim 330^\circ$ 範囲内における $D_{AM,30s}$ の度数分布を、ブレードの定格回転 20 rpm から 2 rpm 間隔で整理した結果である。変動成分の強さ $D_{AM,30s}$ は、ロータ回転速度と共に大きくなる傾向はみられるが、各平均値 (●) の差は最大で 1 dB であり、18 rpm 以上ではほぼ同じ範囲内に分布していることがわかる。

以上の結果を踏まえ、ブレードの回転速度が 18 rpm 以上の場合のデータを用いて、変調深さ $D_{AM,30s}$ の指向特性について検討を行った。図 7 はその結果で、風車騒音の主要な帯域成分 (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz) のそれらも併せて示す。また、参考に距離 50 m に相当する点での A 特性時間平均音圧レベル $L_{Aeq,30s}$ を図 8 に示す。それぞれの図中の丸印 (○, ○) は、 15° 間隔の算術平均値である。

ここで、各分布形状をみるために、 $D_{AM,30s}$ については 4 次回帰式 (式 3) から、 $L_{Aeq,30s}$ は無指向性と双指向性を組み合わせた式 4 ($a=1.8, b=0.7, c=60.1$) により回帰した。

$$D_{AM,\theta} = \sum_{n=0}^4 a_n \cos^n \theta \quad (3)$$

$$L_{Aeq,\theta} = 10 \log \left(\frac{1 + a |\cos^b \theta|}{1 + a} \right) \quad (4)$$

ただし、 θ はナセル前方に対する受音位置 ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$) である。表 1 の係数 (a_0, a_1, \dots, a_4) は、 15° 間隔の $D_{AM,30s}$ の平均値を基に最小 2 乗法により導出した値である。

表 1 変動成分の強さ $D_{AM,30s}$ の係数 a_n

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
L_A	2.89	1.90	0.49	-1.64	-0.71
250Hz	3.39	2.13	2.14	-1.59	-2.24
500Hz	3.84	1.70	0.08	-1.50	-0.08
1kHz	3.38	1.92	1.14	-1.72	-1.57

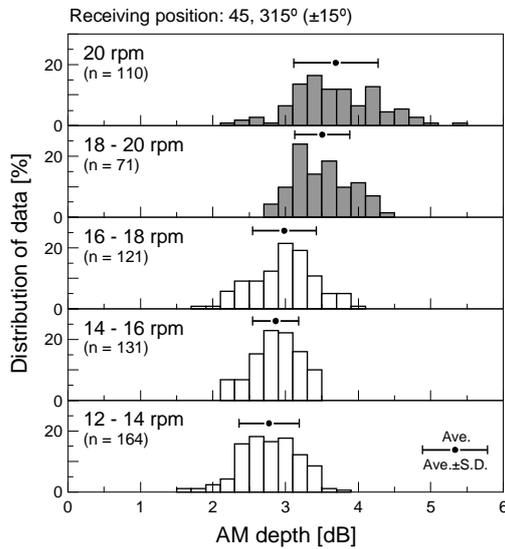


図 6. ロータ回転速度に対する $D_{AM,30s}$ の分布 (回転速度:12-20 rpm, n:データ数)

これらより、ブレードの回転に伴う周期性変動音の強さ $D_{AM,30s}$ は、平均で 2~4 dB であり、ナセル前方 60° 方向で全体的に大きくなる明瞭な指向性が伺える。また、その傾向は風車騒音の主要な周波数成分 (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz) でも確認できる。振幅変調深さ D_{AM} がナセル前方で強くなる理由としては、ブレード自体の回転に起因するエッジ音の他に、それが支柱の前を通過する際に両者の間での空気の乱れによって生じる空力音が寄与しているものと推測している。また、A 特性時間平均音圧レベル $L_{Aeq,30s}$ については、ナセルの前後方に比べて側方で 5 dB 程度低下する傾向が確認できる。

以上のように、風力発電施設から発生する騒音レベル $L_{Aeq,30s}$ およびブレードの回転に伴う変動音 D_{AM} には、それぞれ異なる指向性を有することを明らかにできた。

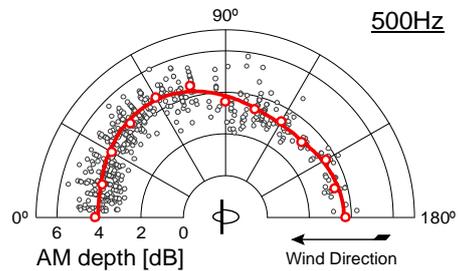
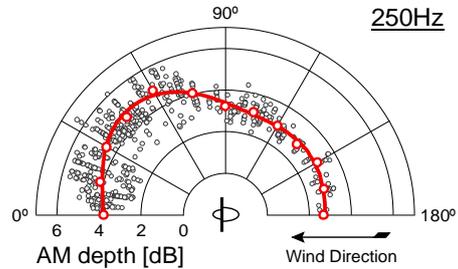
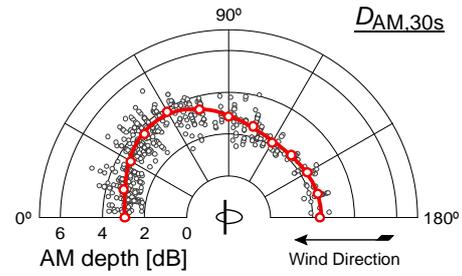


図 7. 水平方向への周期性変動成分の強さ $D_{AM,30s}$ の分布 (周波数 250, 500, 1kHz)

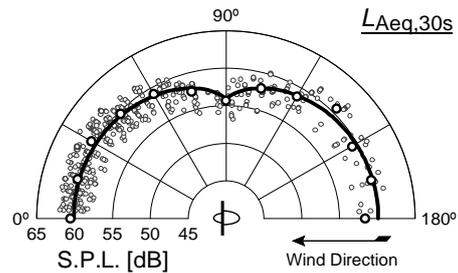


図 8. 水平方向への A 特性平均音圧レベル $L_{Aeq,30s}$ の分布 (風車騒音のレベル)

(3) 振幅変調深さ D_{AM} の距離依存性

上述した風車騒音特有の変動成分の強さの程度が、伝搬距離によってどの程度変化するかをみるために、直線上に配置した 4 点 (図 1) で測定した音響データのうち、ロータ回転速度が 18 rpm 以上の条件下でのものを用いた。この時の測定位置は、ナセルのほぼ側方 $80 \sim 100^\circ$ の範囲内であった。

図 9 は、各点で得られた変動成分 ΔL_A から

求めた 30 秒間の $D_{AM,30s}$ (平均値: \circ) と、距離 50m 点でのそれ (平均値: ∇) を、ナセル中央からのスラントディスタンスで整理した結果 (データ数: 79~117) である。また、各点における A 特性時間平均音圧レベル $L_{Aeq,30s}$ も併せて示す。

風車騒音のレベル自体 $L_{Aeq,30s}$ は、距離と共に低下していく様子が見られるが、変動音の強さ $D_{AM,30s}$ は小さくなることなく、100 m 以遠の点でも 2 dB 程度を推移する傾向であった。既往の被験者実験やアンケート調査によると、変動成分の強さ D_{AM} が 1.7 dB になると、その変動感が知覚され易いと報告されている。今回の測定結果でも、大部分が 2 dB 以上であった。すなわち、風車騒音に含まれる変動成分が距離と共に小さくならないことが、周辺の静穏地域で問題になる要因の一つと思われる。

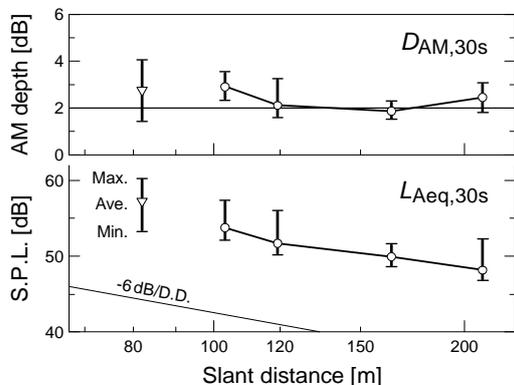


図 9. 変動成分の強さ $D_{AM,30s}$ と騒音レベル $L_{Aeq,30s}$ の距離減衰 (50, 80, 100, 150, 200 m)

(4) ロータ回転速度の推定

風車周囲の 6 点で測定した全データを用いて、30 秒間と 1 分間の ΔL_A から検出したブレード通過周波数 BPF を基にロータ回転速度を推定し、実際のそれとの平均値と比較した。図 10 はその結果で、データ数は 30 秒間の場合 2,355 (\circ)、1 分間では 874 (\bullet) である。また推定した回転速度と実際のそれとの差を累積度数で整理したのが図 11 である。

これらより、回転速度の推定値が、実際のそれと大きく外れる場合もいくつか見受けられるが、平均誤差はそれぞれ 0.15, 0.05 rpm で、また全体の 90% が実際の速度の 0.5 rpm 内に収まっている。したがって、風車周囲での測定結果から抽出した変動成分 ΔL_A ($=L_{A,100ms} - L_{Ave,3s}$) を用いて、一般に入手が難しいとされている測定時のロータ回転速度を、音響データから逆に推定することも可能であると言えよう。

(5) 回転速度の推定値と L_{WA} との対応

最後に、30 秒間の変動成分 ΔL_A から推定したロータ回転速度を基に整理した実効的音響パワーレベル L_{WA} と実際の回転速度を用いたそれとを比較した。図 12 はその結果で、

ナセル前方 (upwind) と側方 (crosswind) へのパワーレベル L_{WA} である。なお、推定値の場合は 1 rpm 間隔の L_{WA} で、実際の回転速度を用いた場合は IEC 61400-11 の規格に倣い 10 秒間のデータを基に 0.5 rpm 間隔の L_{WA} の平均値で整理した。

回転速度の推定値を基にした風車の実効的音響パワーレベル L_{WA} (\bullet , \circ) は、実際のそれを用いた結果 (\circ , \circ) と良く一致している。すなわち、測定期間中におけるロータ回転速度が入手できない場合には、それを音響データから推定することで、風車騒音の放射特性 L_{WA} を解析することも有効であると考えられる。ただし、ナセルの方位によって音圧レベルが異なること (図 8) には注意する必要がある。

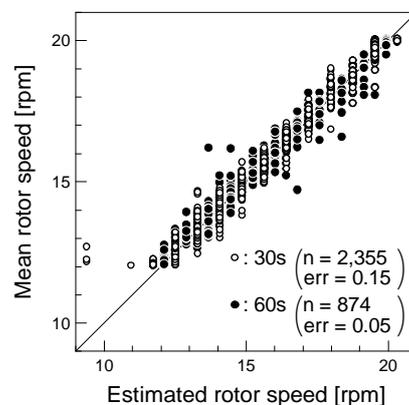


図 10. ロータ回転速度の推定値と実際のそれとの比較 (分析時間: 30, 60s)

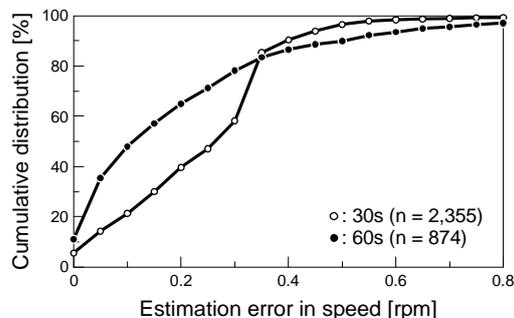


図 11. ロータ回転速度の推定誤差 (分析時間: 30, 60s)

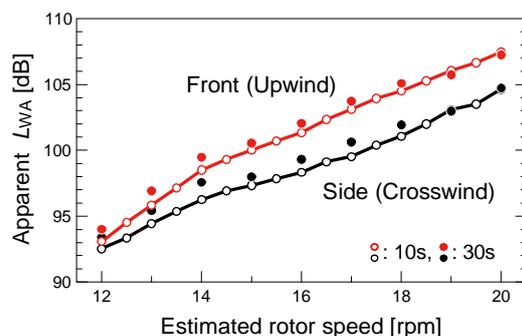


図 12. ロータ回転速度の推定値と風車の実効的音響パワーレベル L_{WA} との対応

(6) 今後の展望等

風力発電施設から発生する周期的な変動音の特性と、その距離減衰を把握するため、定格出力 1.5 MW の風車 1 基を対象に、ナセルのタワー周囲および数百メートル離れた多点において、騒音の同期測定を長期にわたり実施し、住民のアンノイアンスの一要因とされている周期性変動成分の強さ（振幅変調深さ D_{AM} ）の水平分布などに着目した種々の検討を行った。その成果として、次のことを明らかにした。

- ① 風車周囲での周期性変動音成分の強さ D_{AM} は、概ね 1~5 dB であり、その程度はブレードの回転速度と共に大きくなる傾向がみられる。
- ② 水平方向に対する D_{AM} の指向特性は、全体的にナセル前方で大きく、そのうち 60° 方向で顕著に現れる。また、風車騒音の主要な中音帯域成分でも同様の傾向が確認できた。
- ③ 風車騒音自体 L_{Aeq} は、伝搬距離と共に徐々に低下していくが、変動音成分 D_{AM} は数百メートル離れても、その大部分は 2 dB 程度で変化は小さい。
- ④ 風車の稼働データの一つであるロータ回転速度は、通常、入手することが難しいとされているが、風車から 50 m 程度離れた点で測定した音響データ ΔL_A から比較的容易に回転速度を推定することは可能である。
- ⑤ 推定したロータ回転速度を用いて、風車騒音 L_{WA} の放射特性を検討することも有効な手段である。

以上、風車騒音特有の周期性変動成分の抽出方法を提案し、その有効性について既往の手法による計算結果や実際のロータ回転速度との比較により検証すると共に、その変動成分の音響特性に関するいくつかの知見を得た。

なお、本課題は風車 1 基を対象にした検討であり、ウィンドファームとも呼ばれている複数基設置されているような大規模な施設における変動成分の強さや、同手法を用いた場合の有効性などについて検討する必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① Y. Okada, Y. Mizutani, K. Yoshihisa and T. Iwase, “Experimental study on noise radiation from wind turbines”, Journal of the Acoustical Society of America, Abstract-Reviewed, Vol.140, No.4, 2016, 3383.
DOI: 10.1121/1.4970822
- ② Y. Okada, K. Yoshihisa, H. Higashi and N. Nishimura, “Horizontal directivity of sound

emitted from wind turbines”, Journal of the Acoustical Science and Technology, Peer-Reviewed, Vol.37, No.5, 2016, 239–246.
DOI: 10.1250/ast.37.239

- ③ Y. Okada, K. Yoshihisa, H. Higashi and N. Nishimura, “Radiation characteristics of noise generated from a wind turbine”, Journal of the Acoustical Science and Technology, Peer-Reviewed, Vol.36, No.5, 2015, 419–427.
DOI:10.1250/ast.36.419

〔学会発表〕（計 12 件）

- ① 岡田恭明, 兵藤伸也, 吉久光一, “風車騒音の周期性変動成分の指向特性に関する実験的検討”, 日本音響学会講演論文集, 2018, 867–870.
- ② Y. Okada, S. Hyodo, K. Yoshihisa and T. Iwase, “Analysis of sound emission by using amplitude modulation components of wind turbine noise”, Proceedings of the 7th Intl. Meeting on Wind Turbine Noise, 2017, 10 pages.
- ③ Y. Okada, T. Uemura, K. Yoshihisa and T. Iwase, “Study on the empirical formula for the sound directivity around a wind turbine”, Proceedings of the 45th Intl. Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2016, pp.7821–7829.
- ④ Y. Okada, K. Yoshihisa, T. Iwase, K. Higashi and N. Nishimura, “Horizontal directivity characteristics of noise emitted from different wind turbines”, Proceedings of the 44th Intl. Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2015, 9 pages.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 恭明 (OKADA, Yasuaki)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号：20367741