

環境条件に適応した風車騒音制御システムの開発

DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE NOISE CONTROL SYSTEM ADAPTED TO THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS

細田 直久¹⁾ 細見 雅生¹⁾ 岩井 憲一¹⁾
Naohisa Hosoda Masao Hosomi Kenichi Iwai

風車の騒音問題は日本では関心が高く、環境問題の中でも特に重点的な配慮が必要である。これと合わせて法的な環境規制があり、準拠していることが必要である。また、気候条件によって騒音発生が大きく変化するという風車特有の特徴があり、風車の騒音対策としてはこれらの条件を総合的に満足させることが求められる。今回このような要求に対する対策としてファジィ理論を用いた環境条件適応型の騒音制御システムの開発を行った。ここではその内容について紹介する。この開発は環境省「地球温暖化対策技術開発等事業（騒音を回避・最小化した風力発電に関する技術開発）（平成 21～23 年度）」の一部として当社が担当して実施したものである。

キーワード：風力発電，風車，騒音，ファジィ制御

1. まえがき

風車における環境問題の中でも騒音の問題は非常に重要な問題の一つである。特に風車建設位置周辺の住民にとっては健康にかかわる最重要な問題である。

風車の騒音にはブレードから発生する風切り音とナセル内から発生する機械音がある。風切音の対策としてはブレードの回転数を低くすることや、ブレード形状を改良¹⁾するなどの方法がある。機械音の発生に対しては騒音の低い発電機の機種選定やナセル内壁に防音材を設置する等の方法がある。また、風車設置による周辺地域への騒音の影響を解析により予測し、影響度の少ない風車配置とすることなどの方法も使われている。本開発では当社の風車 KWT300 で特に影響度の大きいブレード風切音に対する対策を対象とした。

風車の騒音問題の特徴として

- ① 風車の回転数（風速）によって騒音（ブレードの風切音）が変化する。
- ② 騒音レベルの評価は風車からの騒音と背景音（暗騒音）との重ね合わせで評価される。暗騒音が大きい場合は風車騒音の影響は小さいが、暗騒音が小さい場合には影響が大きいという特徴がある。
- ③ 騒音は風車から離れた住居位置で評価され、夜は暗騒音が低いという特性から風車音の制限は厳しくなる（住居地域で 45dB 以下）。

このような風車騒音に対する要求に応えられる制御システムとして下記の条件を設定した。

- ・風車の回転数（風速）に応じて制御できる。

- ・暗騒音のレベルに応じて制御できる。
 - ・昼と夜で制御（騒音の限界値）が変えられる。
 - ・住居位置での騒音レベルの評価によって制御できる。
- 上記条件を総合的に判定し制御する方法としてファジィ理論²⁾を用いた環境条件適応型のシステムを開発した。

2. 騒音制御システムの紹介

風車の騒音制御を行うためには、まず風車から発生する騒音レベルを知る必要がある。

これは、風車音と暗騒音の切り分けを行うためである。例えば、降雨時のように暗騒音が大きい場合、風車自体の騒音を抑制しても全体の騒音が下がらないため、風車の騒音を制御する必要性はない。

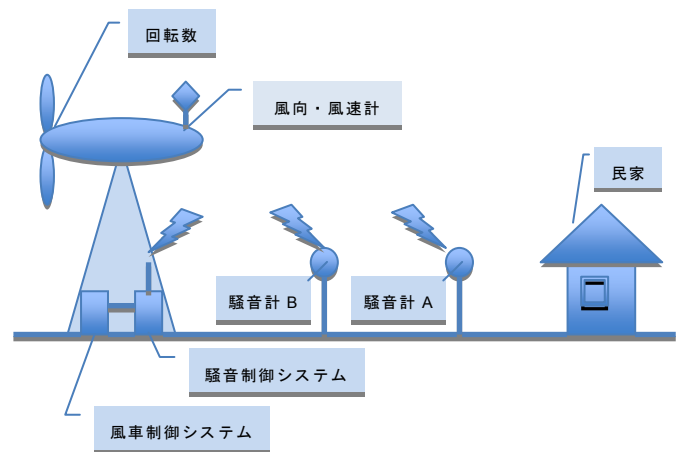


図-1 風車および騒音制御システムの構成

1) 環境事業部

図-1 に示す通り風車から離れた地点に騒音計を設置・計測し、騒音発生源（0m）地点の騒音値を計算する。同時に発電機の回転数、風向、風速値を取得し相関を取ることによって、風車の騒音特性を取得する。騒音制御システムの開発で使用した風車（駒井ハルテック富津工場内）を写真-1 に示す。



写真-1 富津工場プロトタイプ風車 (300kW)

2.1 ハードウェア構成

騒音制御システムは、2つの騒音計、時刻同期用のGPS、および制御コンピュータで構成される。風車内に設置された騒音制御部を写真-2 に示す。



写真-2 風車内の騒音制御部

騒音制御部は、騒音計からの騒音データを収集・判定し、風車に対して発電機の回転数の上限を指示する。

一方、騒音計は風車から離れたところにあるため、騒音データの収集は無線LANを通して行われる。2つある騒音計のうちの1つの外観と内部を写真-3、写真-4 に紹介する。騒音計は野外観測機器であるため、防水、耐熱などの対策が施されている。



写真-3 騒音計マイクロフォンと計測ボックス



写真-4 騒音計測ボックス内部

2.2 風車側の条件

風力発電機は通常、1つのトルクカーブ（発電機のトルクと回転数で与えられる曲線）を使用して発電を行う。同じトルクカーブを使って回転数制御をするとトルクが大きく抑えられてしまうことになるが、低回転数用のトルクカーブを定義すれば、トルクを大きく抑えることなく制御できる。図-2 にその仕組みのイメージを示す。

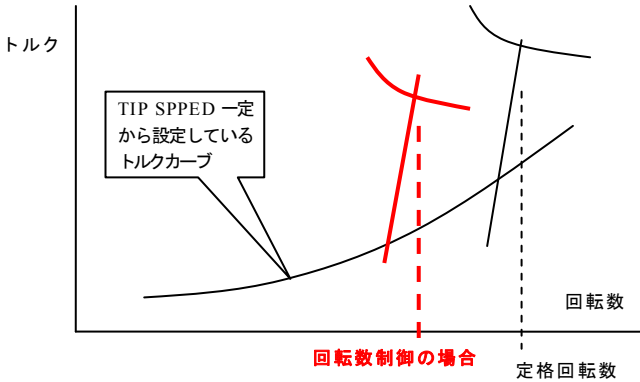


図-2 回転数制御の手法

黒線が通常のトルクカーブ，赤線が回転数制御時のトルクカーブである．回転数を下げると発電機を冷やすための空冷 FAN の回転数も同時に下がるため，定格回転数よりは若干上限トルクを下げる必要があるが，抑制された回転数で効率よく発電するのに適したトルク値を設定した。

2.3 制御システム（ソフトウェア）の開発

騒音制御システムは騒音計測値から暗騒音を計算し，風車の回転数を制御することにより騒音を抑制する．これを実現するために予め「回転数と騒音の関係」，「風車上の風速と地上の風速の関係」および「A 地点の暗騒音と B 地点の暗騒音の関係」をパラメータ化した。

制御システムはこれらのパラメータを使用して風車騒音 L_w を求め，暗騒音を計算する．

風力発電機からの騒音予測地点での騒音レベルは，

$$L_p = L_w - 10\log(r^2 + h^2) - 8 - \Delta L_{air} \dots\dots\dots ①$$

- L_p : 騒音予測地点での風力発電機の騒音レベル (dB)
- L_w : 風力発電機の音響パワーレベル (dB)
- r : 風力発電機から騒音予測地点への水平距離 (m)
- h : 風力発電機のローター中心までの高さ (m)
- L_{air} : 空気減衰 (dB) = $\alpha(r^2 + h^2)^{1/2}$

で，予測地点における将来の騒音レベルは，

$$L = 10\log(10^{L_p/10} + 10^{L_b/10}) \dots\dots\dots ②$$

L : 風力発電所稼動後の将来の騒音レベル (dB)

- L_p : 風力発電所による騒音レベル (dB)
- L_b : 現地調査によって得られる暗騒音 (dB)

となる．よって，①と②より暗騒音は，

$$L_b = 10\log(10^{L/10} + 10^{L_p/10}) \dots\dots\dots ③$$

で求められる．

制御システムは計算で求められた暗騒音を使用してブロック図-3 に示す制御を行う．

騒音制御のための計測は 1 分毎に行い，処理は大きく

- ・暗騒音を求める
- ・騒音制御の要不要を判定する
- ・ファジィ制御で制御回転数を求める

の 3 ブロックに分けられる．

暗騒音は，風車の回転数，風速（必要であれば風向），騒音 A，および騒音 B を入力とし，「回転数と騒音のパラメータ」，「風車上の風速と地上の風速のパラメータ」および「A 地点の暗騒音と B 地点の暗騒音のパラメータ」を使用して求める．

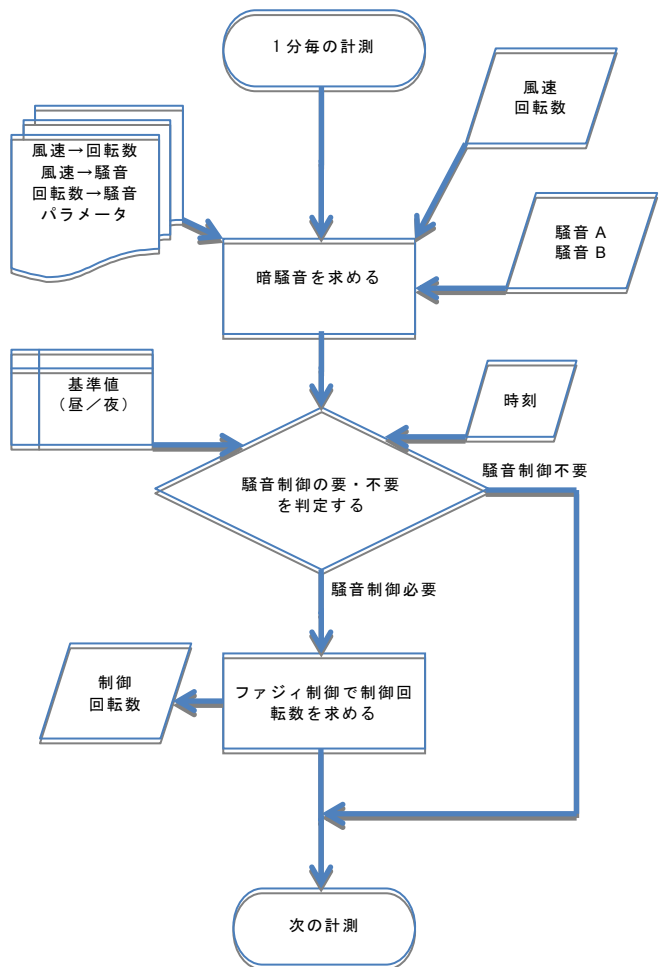


図-3 回転数制御ブロック図

騒音制御は暗騒音が小さく且つ騒音 A が大きい場合に必要となる．ただし，1 分毎の単独の判断ではなく，3 分程度連続して必要と判断され場合に騒音制御を行うものとする．騒音制御中の制御システム画面を写真-5 に示す．



写真-5 騒音制御部の騒音計測中の画面

制御ソフトウェアが騒音制御を行うと判断した場合、暗騒音と回転数の関係をファジィ制御し、風力発電機に指示する回転数を求める。

2.4 騒音計を撤去した場合のシステム制御

騒音制御システムは、2つの騒音計から暗騒音を求めるシステムであるが、「A地点の暗騒音とB地点の暗騒音の関係」のパラメータを使用して、1台の騒音計でも暗騒音を計算できる機能を持たせた。さらに、騒音計を2台とも撤去した場合は、風速・風向から暗騒音を導き出すデータベースを使用することで暗騒音を仮定することができる。これは騒音計を使用しない風車音監視システムを構成することが可能となる機能である。

これらの制御を可能にする制御パラメータの一部を図-4、図-5に紹介する。

```

# 騒音制御パラメータ
STD_BGN      45 40      ## 騒音基準値(昼・夜)(dB)
DAY_START    07:00     ## 昼判定開始時刻(hh:mm)
NIGHT_START  21:00     ## 夜判定開始時刻(hh:mm)
CTL_NOISE    20        ## 騒音制御開始騒音(dB)
TGT_NOISE    5         ## 騒音目標値(dB)
HZ_DIST_A    150       ## A地点と風車の距離(m)
HZ_DIST_B    60        ## B地点と風車の距離(m)
VI_DIST      43.5      ## 風車の高さ(m)
L_AIR        0.005     ## 空気減衰(dB/m)
RATE_RPM     1274 1820 ## 制御開始と定格の回転数(rpm)
EPS_RPM      100       ## 目標とする回転数誤差(rpm)
VIRTUAL_P    1         ## 仮想観測点(No=0/A=1/B=2/Both=3)
    
```

図-4 騒音制御パラメータの一部

```

# 暗騒音の補正テーブル
# 1行に「暗騒音 A 暗騒音 B」の順で記述すること
#
43.389 44.891
44.1217 45.3623
44.8544 45.8336
45.5871 46.3049
46.3198 46.7762
47.0525 47.2475
47.7852 47.7188
    
```

図-5 騒音制御テーブルの一部

3. 騒音制御の結果

騒音制御システムが風力発電機の回転数を制御している様子を以下に紹介する。騒音制御システムは図-6に示すように制御結果をデータ出力する。図-7以降は制御結果をグラフにしたものである。各図の上下のグラフは時間軸で対になっており、上段には風速、騒音、騒音判定基準値を表示し、下段では風車への回転数制御値と実際の回転数を表示している。

なお、図中の合成騒音とは計測された騒音より求められた暗騒音と風車が発する騒音を計算により合成したものである。

3.1 騒音計2台使用の制御

騒音計を2台使用した騒音制御システムでの検証結果を報告する。

(1) 昼間高風速時

昼間は暗騒音が大きいが、高風速の環境では風車音が大きくなるため騒音制御システムが働く。図-7に示す通り、ほとんど回転数を下げる方向に回転数制御されているが、一部回転数を上げる制御も行えている。

(2) 夜間から昼間への移行時

夜間は騒音基準値が厳しく、昼間に移行する際に騒音基準値は緩和される。図-8に夜間から昼間に切り替る際の風速と騒音の推移および回転数制御の働きを示す。

夜間の騒音基準値は45dBのため、7:00までは回転数を減らす制御が働いているが、7:00直後には昼間の騒音基準値(55dB)で判定し、回転数を上げる制御となる。その後風速が上がり再び回転数を下げる制御となっている。

日時	風速	風向	回転数	発電量	騒音A	騒音B	風車騒音	暗騒音選択後	合成騒音	暗騒音チェック	合成騒音チェック	Fuzzy制御方向	Fuzzy制御結果	制御回転数(計算値)	制御回転数(命令値)
2013/12/13 10:19:56	m/s	degree	rpm	kW	dB	dB	dB	dB	dB	昼<75.0dB 夜<65.0dB	昼>55.0dB 夜>45.0dB	DOWN or UP	制御有=1	>1295rpm	>1295rpm
2013/12/13 10:19:56	0	0	0	0	-	-	89.6	46.5	47	YES	YES	UP	0	0	1850
2013/12/13 10:20:42	13.2	143.2	1293.6	188	-	60	109.8	60	61.8	YES	NO	DOWN	1	1293.6	1850
2013/12/13 10:21:42	10.7	146.6	1632.3	236.2	-	59.7	99.8	58.3	58.6	YES	NO	DOWN	1	1587.4	1850
2013/12/13 10:22:42	10.5	146.4	1781	257.7	-	60.1	101.7	58	58.5	YES	NO	DOWN	1	1740	1850
2013/12/13 10:23:42	10.4	152	1778.2	255	-	60.3	101.7	54.3	55.4	YES	NO	DOWN	1	1720.2	1720.2
2013/12/13 10:24:42	10.3	146.2	1781.6	257.7	-	60.6	104.8	55.4	57.1	YES	NO	DOWN	1	1732.8	1732.8
2013/12/13 10:25:42	8.9	152.7	1697.7	217.9	-	59.9	100.7	52.6	53.9	YES	YES	UP	1	1717	1717
2013/12/13 10:26:42	9.8	148.7	1651.6	236.5	-	60	100.1	54.4	55.2	YES	NO	DOWN	1	1601.9	1717

図-6 騒音制御データ出力例

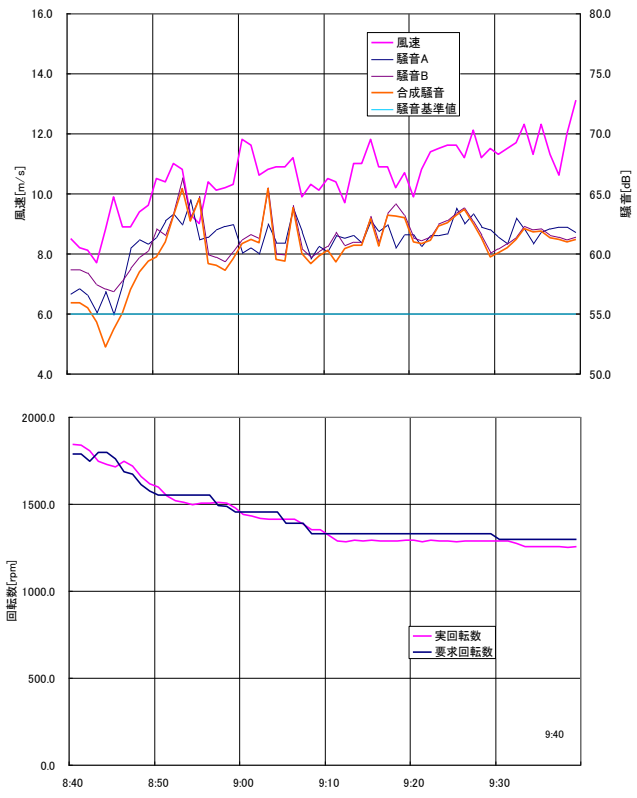


図-7 高風速時の騒音制御

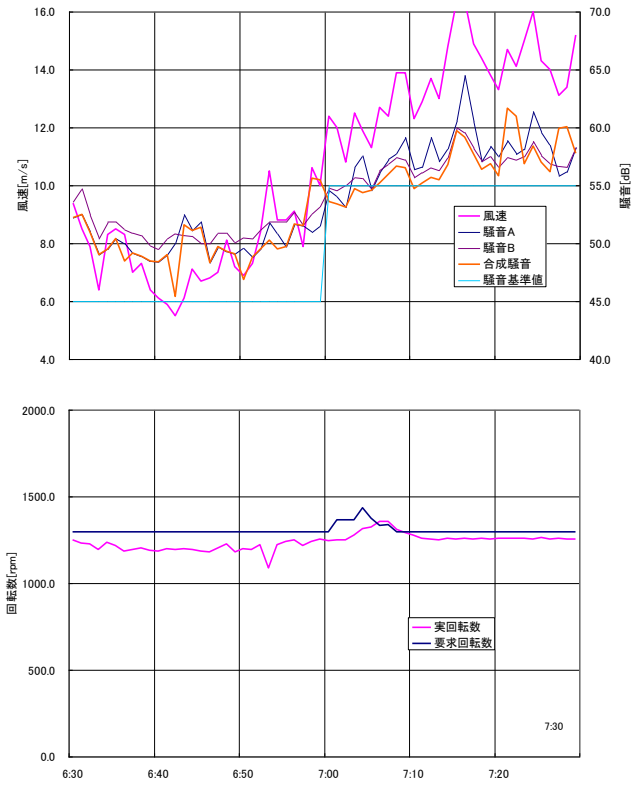


図-8 夜昼移行時の騒音制御

3.2 発電機トルク減少対策の効果

騒音制御システムによりフィードバックされた回転数制御命令値が、発電量に与える影響について報告する。

図-9中の「参考」で示した値は通常運転時のパワーカーブであり、「回転数制御」を行った際のパワーカーブが風速7m/s付近までほぼ重なっていることがわかる。風速が大きいき「参考」から外れていくのは、「回転数制御」を行うことで回転数とトルクを制限値で固定しているためであり、意図通り制御できていることを示している。また、発電機トルク制御を併せて行っているため、「回転数70%制御時」の場合よりは効率がよいことが判る。

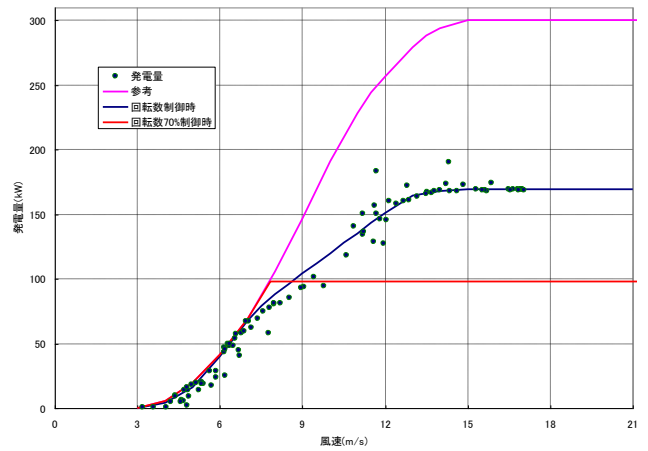


図-9 回転数制御時のパワーカーブの検証

3.3 騒音計1台使用の制御

騒音計を撤去しても騒音制御システムが動作することを検証する。これは騒音計が1台しか設置できない場合、または騒音計が故障した場合を想定した制御手法である。

風車から遠い側の騒音計Aがない場合の制御結果を図-10に示す。制御を開始した時点を示しているが、計測した騒音計Bのデータから騒音計Aの騒音を予測して回転数を制御している。

また、風車に近い方の騒音計Bがない場合でも同様に騒音計Aのデータから騒音計Bの騒音を予測することで回転数を制御することができる。

この制御手法により、騒音計が1台しかない場合であっても騒音計が2台ある制御手法と同様の回転数制御を行うことができる。

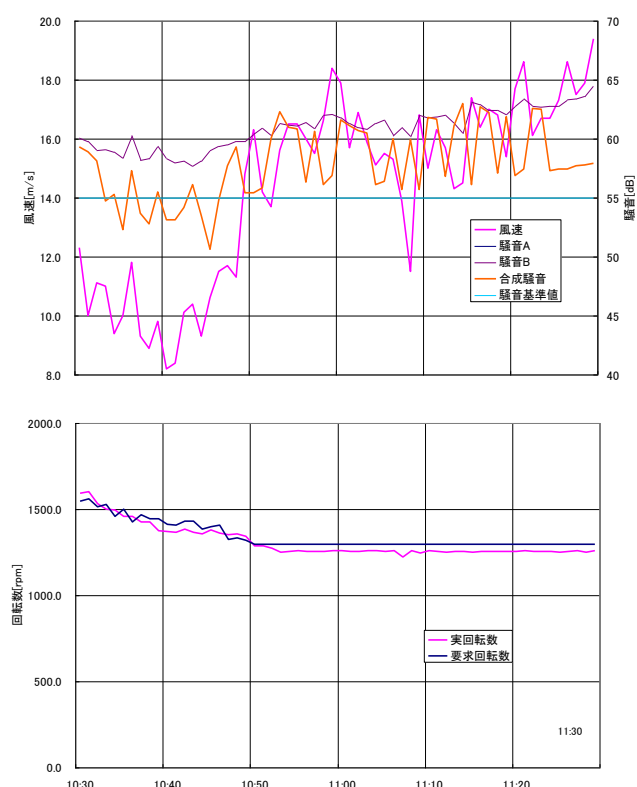


図-10 騒音計 1 台のときの騒音制御

3.4 騒音計がないときの制御

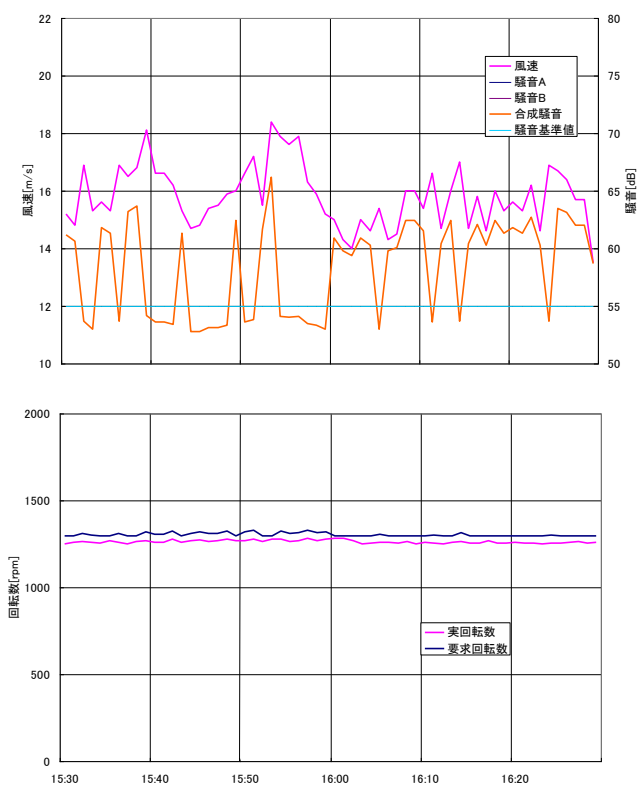


図-11 騒音計がないときの騒音制御

騒音計がない場合でも、風向・風速から騒音を予測するデータベースを使用して回転数を制御することが可能であることを確認する。

図-11は、騒音計がない状態での騒音制御の様子を示したものである。騒音制御システムは、風向・風速によって予測された騒音が騒音基準値を上下することによって回転数制御の要求値を変動させている。

4. まとめ

今回開発した騒音制御システムについて当社富津工場の風車を使用して効果を確認した結果、ほぼ期待通りの成果を得ることができた。しかし、制御を実際に行うためには、風向ごとの風車音と風車回転数との関係、暗騒音の特性など、事前のデータ収集に多大な労力を要する。実用化に向けては、さらにシステムを簡略化する必要があると考えている。

今回の開発では、騒音計を風車近くと住居位置付近に2台設置し、住居位置の騒音を制御する方法を中心に検証した。しかし、騒音計は長期的には故障する可能性があること、住居位置付近では騒音計の設置が困難であることなどを想定し、騒音計1台のみ使用のケース、また騒音計を使用しないケースについても本システムが適用可能であることを検証した。

風車風切り音の制御の方法として回転数を低下させた場合、発電量が急激に低下することになる。本システムでは、風車回転数を低下させた時に風車側のトルクの低減を少なくする対策（トルク制御対策の改良）も合わせて行うことで、風車回転数低下時の発電量確保が可能であることが確認できた。

謝辞

本開発業務を進めるにあたりまして「地球温暖化対策技術開発等事業」の検討会の各委員から多くの有益なご指導とアドバイスを頂きました。また、共同実施会社である株式会社東洋設計のご担当とは最新の技術情報を交換しながら円滑に業務を進めることが出来ました。これらのご指導とご協力に対しまして心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細田直久, 細見雅生: 風車空力音低減のためのブレード先端形状の検討, 駒井ハルテック技報 Vol.1 2011, p34-37
- 2) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988.5