

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07025

研究課題名（和文）大型風車から発生した低周波振動の伝播に関する研究

研究課題名（英文）Low frequency ground vibration originated from largescale windturbine

研究代表者

小野寺 英輝（ONODERA, Hideki）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：50233599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：大型風車の運転に伴って発生する地盤振動の伝播の様相に関して調べた。第一番目に行ったのは、振動の距離による変化をFFTによる振動の周波数分析から明らかにし、その風車の立地する土質がその原因ではないかという仮説を得た。

次に、風車公害の進行の拳がっている地域で計測を実施し、付近住民の体感に関して、解的に説明を試みた。

一連の研究結果として、風車のアノイアンス問題は、空振に加えて地盤振動面からも解析を進めるべきではないかという示唆を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで考慮されてこなかった、大型風車に起因する地盤振動が、昨今顕在化してきた風車周辺住民への健康被害の要因の一つではないかという事実を指摘している。

例えば、冬季は地盤が締まり、振動の減衰が少なく、夏・晴天時のアノイアンスが少ないことの説明、また、水田においてアノイアンスが十分に小さくなることに関しては、水と地盤の特性速度の差を表す音響インピーダンスの値が含水率とともに非線形に変化することによるのではないかと示された。

このことは、今後の風車アノイアンス低減の一つの要素に関しての特性把握の基礎的知識となる。

研究成果の概要（英文）：Investigated the mode of propagation of ground vibration that occurs with the operation of large wind turbines. The first attempt was to clarify the change of vibration with distance from the frequency analysis of vibration by FFT, and obtain the hypothesis that the soil quality where the wind turbine is located might be the cause. Next, measurements in an area where wind turbine pollution was progressing, and tried to explain the experience of local residents from a descriptive perspective. As a series of research results, the suggestion that the annoyance problem of the wind turbines should be analyzed from the ground vibration in addition to the air vibration.

研究分野：流体工学

キーワード：大型風車 振動 空振 アノイアンス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国をはじめ多くの国で風力エネルギーへの関心が高まっている。特に、大型風車は、大規模な電力供給原となりえるポテンシャルを持つとともに、環境保護の目に見えるモニュメントとしての役割も担っているといえる。現在の我が国の大型風車による発電量は 168 万 kWh にのぼるが、エネルギー全体の 1%程度にすぎず、低環境負荷という特性からも今後の設置の増加が期待される。

しかし、近年大型風車による低周波の空気振動(空振)が健康被害につながっているのではないかと
いう疑念が生じ、政府の事故調査委員会がその調査を開始している。しかし、空力騒音は、距離により
指数関数的に減少するので、一般住宅から 500m 隔てることが求められているため、その影響はなく、
最近の裁判においても民家に到達する空振(空气中を伝わる波の振動。音と考えてかまわない)の強度
は環境騒音程度であり、受忍限度内とした判決がある(風力エネルギー学会誌 39-2)。

しかし、健康被害、あるいは家屋等が振動するという訴えが出現していること自体は否定できない⁽⁴⁾。
このような長い周期の波(振動)によって引き起こされる環境への影響に関しては、エコキュートや道路
橋梁の接続板など、比較的小さな振動数で振動するものの周囲に発生する特有な現象といえるよう
である。そして前述の通り、残念ながら同様の周期の振動を発生する大型風車の周辺の住民が、感覚的
不快感を訴える事例もでてきた。ただし、これはあくまでの主観的な訴えにとどまる。

地盤内の振動伝播としては、地震波があるが、これは反復する波によるものではなく単一の孤立波の
減衰振動であり、周期的変動を扱っているわけではない⁽⁵⁾。また、風車ナセルあるいは翼からの空力騒
音の伝播に関する研究もあるが、地表への吸収に関するもので、地中伝播の面からは検討されて
いない。また、同様に境界面を通過する波(音波としての繰り返し波)に関する研究はあるが、可聴音
域についてのものである。

大型風車を取りまく、問題としての低周波騒音の訴え自

身は少なくないものの、空振による検討ばかりが目立ち、風車由来の地盤の振動励起という観点は欠
落している。地盤振動は、直接的に身体に感覚的に察知されるものであり、これまでの耳へ到達する圧
力変化と言える空振だけではなく、これまで着目されていなかった、地盤振動の身体への影響に調査も
学術的に重要である。

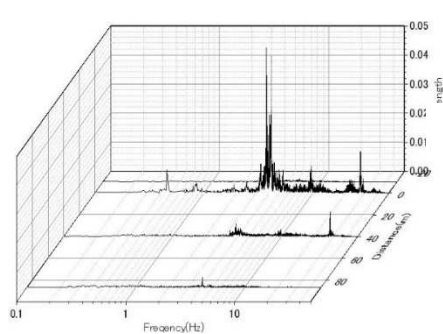
2. 研究の目的

大型風車は環境負荷の小ささや、新エネ
ルギーに対する意識醸成に効果があり、普
及が急速に進んでいる。設置にあたっては
人家からの最低距離が定められ、風車に
起因する空力騒音や機械騒音は環境騒音
の範囲内に減衰する。しかし、一部で低周
波騒音によるという健康被害を訴える事例
も出現している。この問題に関しては、ほ
ぼ解決していると言ってよい空震だけ
ではなく、地盤伝播する低周波に関する
調査研究を行うべきであるが、知見する
かぎりない。

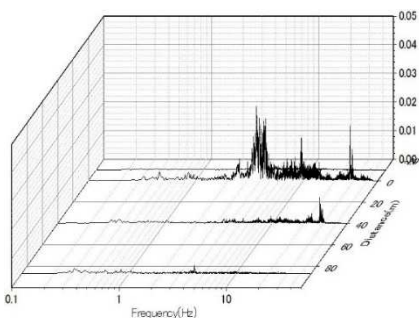
本研究は、この風車由来の地盤振動の伝
播という視点から、風車運転に起因する
低周波擾乱が、地盤の持つ物理的特性(音

Table 1 Measured Wind turbines

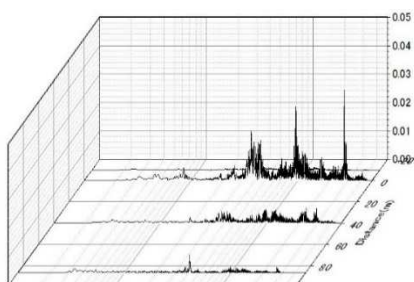
	Manu- facturer	Output	PT	SF	Dis- tance
I	SIMENS	3MW	1	Sand	-
II	TACKE	1.5MW	1	Sand	-
III	Repower Systems AG	1.5MW	3	Sand	87
			1		-
IV- 1	MITSU- BISHI	1MW/ 250kW	2	Clay	60
IV- 2	MITSU- BISHI	1MW/ 250kW	1	Clay	-
V	ENERCON	1.99MW	4	Clay	47
VI	SIMENS	1.3MW	1	Clay	950
VII	SIMENS	1.3MW	1	Clay	76
VIII	SIMENS	1.3MW	1	Clay	50



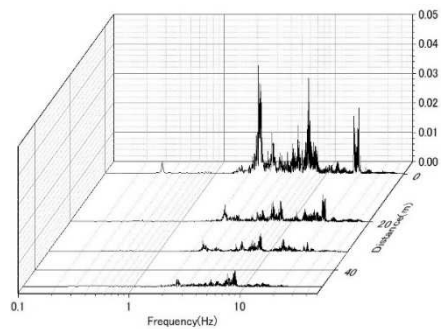
(a) x-direction



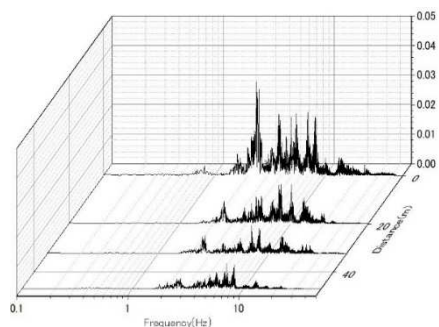
(b) y-direction



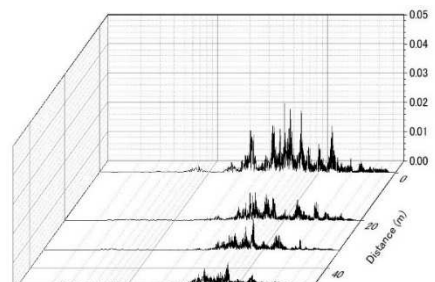
(c) z-direction



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig.1 Frequency profile by the distance(III) Fig.2 Frequency profile by the distance(IV)

響インピーダンス、密度など)により、振幅・周波数にどのような影響を与えるか、フィールド調査および実験室実験の結果から一般化して示すことを目的とする。

3. 研究の方法

地盤振動の計測には、当補助にて導入した微動強震計(白山 DATA MARK JU400)を用い、表 1 に示す 8 地点においてデータを取得した。サンプリング周波数は 500Hz(解析周波数は 0~250Hz となる)、1 回のサンプリング時間はおよそ 600s とし、そこから 100s 分を抽出した。

計測は、風車直下を原点とし、風車翼回転面に平行な方向を x 、直交方向を y 、地表垂直方向を z とし、 y 軸に沿っての振動特性変化を解析した。計測に当たっては、継続的に風車のほぼ一定回転数(一部可変速のものもある)でのデータを取得しており、また、十分な点数を抽出して解析を行っていると考え、特に複数データによる平均化処理は行っていない。

風車基礎部以外の場所では、地表面を十分突き固めた後に計測器を設置し、風車基準位置から計測点までの距離の計測には赤外線距離計(Nikon COOL SHOT 40i)を使用した。なお、データ処理には ORIGIN 2018 を使用している。

4. 研究成果

(1)地質による振動特性の差異

図 1 に、風車Ⅲの振動振幅の周波数分布について、距離による変化を示す。横軸が周波数、奥行き方向が奥を 0 とした距離、縦軸が振幅を示す。また、それぞれ、(a)が風車翼面平行の x 方向、(b)が直交する y 方向、(c)が上下の z 方向である。

およそ 0.4Hz が風車の固有振動、2～20Hz の領域が、前述の風車翼の曲げおよびねじり振動、それより高周波数(30Hz 付近)のピークは軸回転の不均一に伴う振動と考えることができる⁽⁷⁾。なお、図中-10m に相当する位置にある周波数分布は非稼働時(常時微動)を示している。

風車Ⅲは海岸の砂地に立地するためと思われるが、次に示す図 2 に比して、距離による減衰割合が大きい。ピーク値(4～5Hz の位置)で見ると、風車から 40m の地点では距離 0m の場合の約 8.9%にまで減衰している。その後、ピークとなる周波数は変化せず、大きさもあまり変化なく 90m まで伝播している。一方、20Hz 付近の大きなピークは 90m 以前に消滅してしまっている。

図2に表層が土の場所(以後土質地と表記)に立地する風車Ⅳの場合を示す。(a)(b)(c)は図 6 と同じくそれぞれ、 x,y,z 方向を表している。風車直下(距離 0m)における振幅の分布をみると、 x 方向の最大値が 0.04 であるのに対し他の二つの軸の最大値はおよそ 0.02 となっている。一方、距離による減衰は x 軸方向成分(a)が最も大きく、20m 付近で、約半分まで減衰するのに対し、他の 2 軸は減衰の小さい。Ⅲの場合より 20%長い 48m までの減衰を見ると、風車直下の 9.8%となり、等距離の場合の値を類推すると差は 1 ポイントを大きく上回る。したがって、土質地に立地した場合の方が砂地より振動がより長い距離強度を保って伝播することになる。また、3 つの軸に共通する傾向としては、ねじり曲げ振動領域に相当する 8Hz 付近の振動成分は、距離方向の減衰量が小さい。

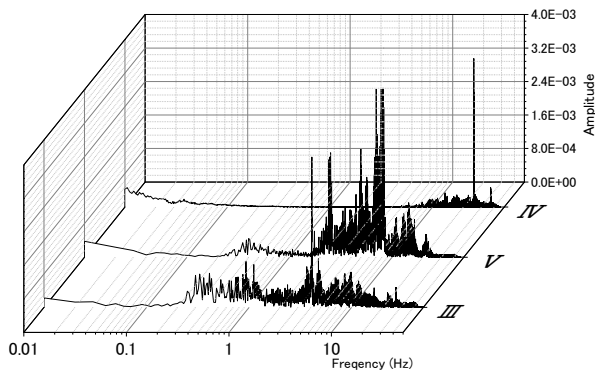
(2)アノイアンス問題発生地域での計測

風車近隣(それでも数百 m 離れている)住民が申告する被害と地盤振動の伝播との関連に関して具体的な状況を知るため、当該地域へ赴き、ヒアリングと地盤振動の計測を行った。計測結果の一例を図 5 に示す。(a)は、特にアノイアンス申告のない地域における計測結果の代表例、(b)が今回計測したアノイアンス問題申告のある地域での結果を示す。(b)では、微細な変化の観察を容易とすることを目的に縦軸を(a)の 200 倍としてある。ただし、(b)を(a)と同じスケールの縦軸にすると振幅データは、およそ 10Hz 以上の領域を除けば、値の上下はほとんど観察されない。なお、図中のギリシャ数字は風車立地の略号を示す。ただし、それぞれの計測個所までの距離は、一定ではない。これらのうち、最大のピーク値を示す V の場合の振動加速度は 8.9×10^{-2} (Gal)、アノイアンスの申告があった VI の場合、 6.7×10^{-6} (Gal)で、数値的には非常に小さくなっている。なお補足であるが、震度 1 の最小値は 0.6(Gal)である。

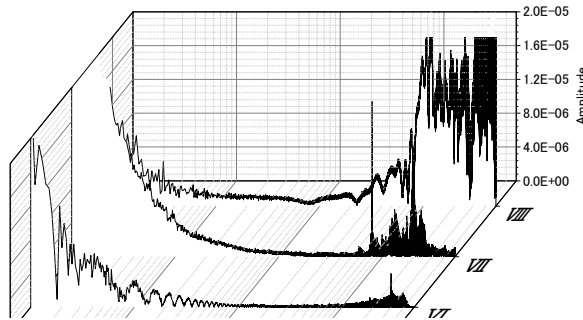
次に、これまでの計測結果とヒアリング内容を対照してみたい。ヒアリングによると、風車の稼働に伴う体調への影響は、ある限定された状況で、強度が増すという申告を得た。今般のヒアリングにおいては、具体的には以下の 3 項目が挙げられた。

1. 雨の日には 24 時間強い不快感が強い
2. 水田にいと楽になる
3. 冬がひどく、夏はいくらかよい

今回の計測時は、数日前に降雨があったものの、地表は完全に乾燥していた。従って、上記申告に基づくと、やや症状が軽い状況になる。なお、伝播途中の土質の変化、あるいは振動の面的分散によるものかは不明であるが、VI の場合に、 x 方向の振動振幅が他と比して若干大きくなっていたので、他のデータについても、 x 方向の計測結果を用いている。



(a) Referring places



(b) Abnormal places

Fig.3 Frequency profiles of measure places

計測データを見ると、Ⅲでは、Ⅳ、Ⅴと比較して 0.1～2Hz の範囲の振幅値も大きくなっている。この領域の振動は、俗にいう船酔いの原因となる振動(揺動)周波数⁽⁸⁾に近接している。風車から直線距離で 950m 離れたⅥについても距離減衰に伴い値は非常に僅かであるが、振動特性は類似しており、これも、およそ 1Hz 以下で上昇がみられる。Ⅷに関しては、0.08Hz 程度以下での上昇があるが、他の 2 つに比してその傾きは小さい。

周波数が大きい側の領域をみると、Ⅲ、Ⅴでは 0.3～20Hz の範囲で値の上昇がみられるのに対し、Ⅳでは 8～40Hz、Ⅵでは 10～40Hz、Ⅶでは 7～50Hz、風車近傍のⅧでは 0.9Hz～となっている。

これらのうち、アノイアンス申告が顕著であったのがⅥ関係地域であり、次いでⅧ地(民間の作業所)であるが、後者は風車に近接していることから、一般の空力騒音によるものではないかと考えられる。一方、Ⅵで非常に特徴的な性状として、1Hz 以下でデータが周波数の変化とともに明白に波打っている。この結果は、空振における翼

後流とマストの干渉音に対応⁽⁸⁾していると思われるが、値は干渉周波数(1Hz 程度)と比して小さく、地盤特性による変化とも考える余地もある。したがって、今後、空振と地盤振動の波形の周波数の相互対照により共鳴などの可能性も検討する必要がある。

さて、前記3項目に関して、もしアノイアンスが風車周りで発生した場合、原因を地盤振動に求めると説明が可能になる。即ち、前述の伝播特性から、雨天では土が締まり振動を伝えやすい、冬も地盤温度が下がり、粒子が密着するので、振動が伝播しやすい。一方、水田に関しては、地盤が濡れているので、振動は大きくなりそうであるが、水田の泥濘は基盤までの部分のみが水に浸っており、その下の地盤は濡れの量は非常に少ない。したがって、地盤内の伝播量は比較的少なく、表層の泥濘は人間(の足)と基盤間のクッションになり、振動伝播が弱まる。夏に関しても地層が膨張し、粒子の密着度が下がるので振動の伝播がしにくくなるという説明ができる。

ただし、これまで述べてきたとおり、振動の振幅自体は常時微動に十分に近いレベルであり、振動単独での影響は非常に限定的と思われる。

(1) 汐見文隆:低周波音被害を追って, 寿郎社(2016)

(2) McCauley, M. et al.: Motion Sickness Incidence: Exploratory Studies of Habituation, Pitch and Roll and the Refinement of a Mathematical model, Human Factor Research Inc., April-1976

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小野寺英輝	4. 巻 43-4
2. 論文標題 大型風車が誘起する地盤振動の伝播特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 風力エネルギー	6. 最初と最後の頁 64-69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小野寺英輝
2. 発表標題 大型風車による地盤振動伝播
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新毛将太, 小野寺英輝
2. 発表標題 風車からの発生を想定した低周波振動の伝播特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 東北支部第53期総会, 講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野寺英輝
2. 発表標題 大型風車による地盤振動伝播
3. 学会等名 第41回風力エネルギーシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺英輝
2. 発表標題 大型風車の誘起する地盤振動についての序論
3. 学会等名 第40回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考