

令和6年能登半島地震と風力発電設備の耐震設計

東京大学 大学院工学系研究科
石原孟, 難波治之

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に石川県能登地方の深さ約15kmを震源とするマグニチュードM7.6の地震が発生し、石川県輪島市や志賀町で最大震度7が観測された¹⁾。また現地調査により、石川県能登町や珠洲市で4m以上の津波の浸水高や新潟県上越市で5m以上の遡上高が観測され、輪島市西部で最大4m程度の隆起、最大2m程度の西向きの変動、また珠洲市北部で最大2m程度の隆起、最大3m程度の西向きの変動が検出された。本地震による直接的な被害に加え、津波や地盤の隆起や変動により能登地方に甚大な被害がもたらされた²⁾。

今回の地震により被害を受けた風車³⁾は2基報告された。道路などが被害を受け、現地に入れない現状を考えると、風車被害の全容解明には今後の調査が待たれる。一方、今回の地震による風車の被害は、東北地方太平洋沖地震⁴⁾や熊本地震⁵⁾の時の被害と異なる点がある。例えば、今回の被害は、現状知る限り風車のタワーと基礎ではなく、風車のブレードに見られた。地震による風車ブレードの被害は、著者の知る限り、過去に報告された例がなく、極めて稀事象だと思われる。

NEDOの調査⁶⁾によると、2018年3月末まで石川県に12万4500kW、71基の風車が導入され、また2020年8月27日の中日新聞⁷⁾によると、能登地方で新たな風力発電の整備計画が進んでおり、環境アセスメントの手続き⁸⁾に入っているのは9事業で計154基、既存の2倍余りに達する。従って、今後能登地方における風力発電設備は急激に増えると予測される。

本報告では、まず今回の令和6年能登半島地震を概説すると共に、能登半島で観測された地震波の特徴を明らかにする。そして、今回の地震の影響を受けた能登半島における風力発電所の被害状況を報告する。最後に、令和6年能登半島地震で観測された地震動および風力発電設備の耐震設計に用いられている地震動との関係を調べると共に、今回の地震による風車ブレードの損傷メカニズムの考察を試みる。

2. 令和6年能登半島地震の概要

令和6年能登半島地震が風力発電所に与える影響を理解するために、まず今回の地震の発生メカニズムおよびそれに伴う地震波の特性について明らかにする。

(1) 地震発生のメカニズム

2024年1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震では、石川県輪島市や志賀町で最大震度7が観測されたほか、能登地方の広い範囲で震度6弱以上の揺れが観測され、また、石川県では長周期地震動階級4が記録された。

図1には今回の地震の詳細震央分布を示す¹⁰⁾。防災科学技術研究所の強震観測網で捉えられたこの地震による最大加速度は、K-NET 富来観測点における2828ガル（三成分合成値）であり、2011年の東日本大震災の2933ガル（三成分合成値）に匹敵する。震度7が我が国で観測されたのは、1995年兵庫県南部地震(M7.3)、2004年新潟県中越地震(M6.8)、2011年東日本大震災、2016年熊本地震(M6.5)（2回）、2018年北海道胆振東部地震に次いで7度目である。

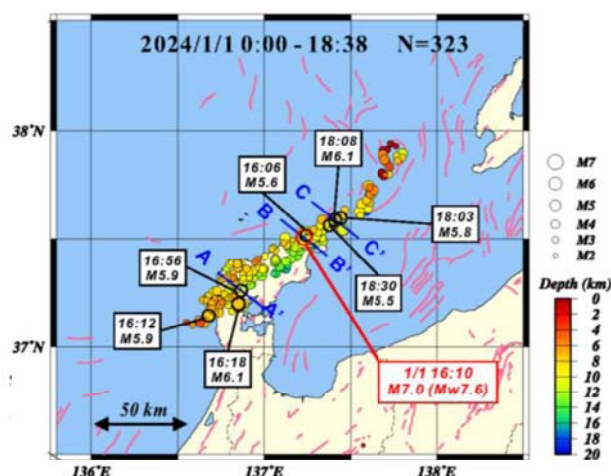


図1 令和6年能登半島地震の詳細震央分布¹⁰⁾

図2には、令和6年能登半島地震における発震機構解を示す¹¹⁾。今回の地震は、北西—南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、地殻内で発生した地震である。2024年1月1日16時から2日13時までの間に、最大震度1以上を観測した地震が169回（震度7：1回、震度5強：3回、震度5弱：6回）発生した¹⁰⁾。

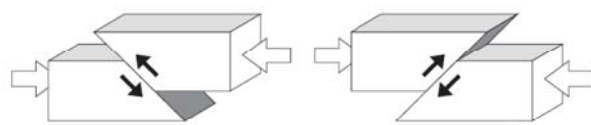


図2 令和6年能登半島地震における発震機構解¹¹⁾

(2) 地震動

図3には、K-NET 富来 (ISK006) 観測点の地震加速度波形を示し、EW方向の加速度波形 (2024年1月1日 16:10:06 から) には図に示す4638秒付近と5123秒付近に顕著な2つのピークが見られる。加速度の最大値は南北 (NS) 方向に1479ガル、東西 (EW) 方向に2678ガル、鉛直 (UD) 方向に1142ガルが記録されている。

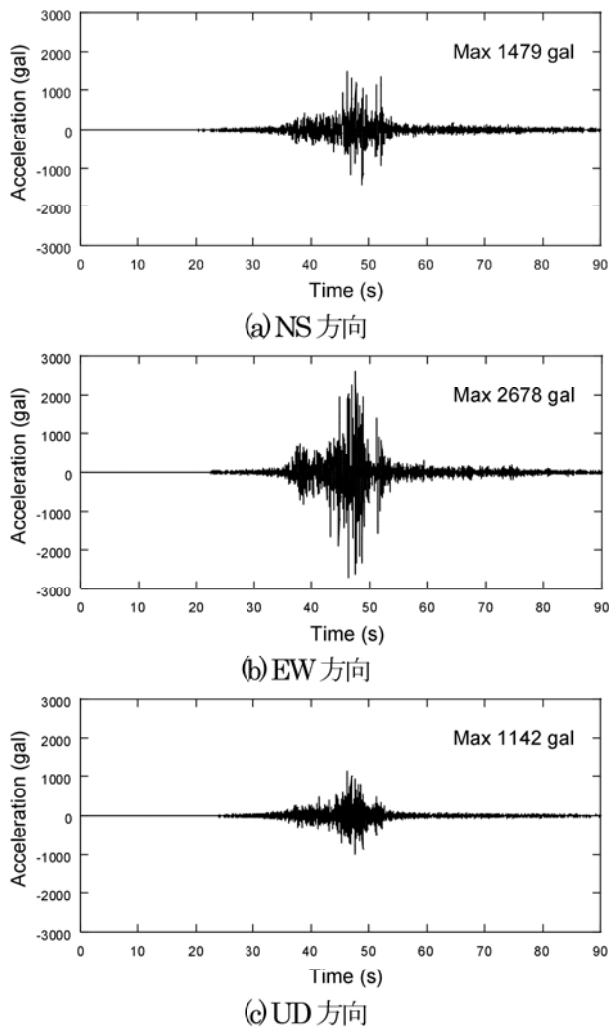


図3 K-NET 富来 (ISK006) 観測点の地震加速度波形

表1には、防災科学技術研究所の強震ネットワーク K-NET で観測された志賀町と珠洲市における地震観測の地点の地表面と深部の最大加速度¹⁰⁾を示し、地表面の最大加速度は K-NET 富来の2828ガル、深部は KiK-net 富来の588ガルである。

図4には地盤加速度応答スペクトルの観測値 (K-NET 富来 ISK006) と設計用レベル2 (第1種地盤) の比較を示す。第1種地盤における設計用レベル2地盤加速度応答スペクトルは土木学会指針¹²⁾に示す告示波の設計用入力地震動 (平成12年建設省告示第1461号第4項イの「極めて稀に発生する地震動」) に建築基準法施行令 (昭和55年建設省告示第1793号)¹³⁾に示す地盤増幅係数

を乗じて求めた。大型風車の1次固有周期3秒付近の範囲においては、設計用レベル2 (第1種地盤) の値より低いが、周期0.1~0.4秒の範囲においては応答加速が設計用レベル2 (第1種地盤) の値を大きく超えていることが分かる。今回の地震では、風車の支持構造物より、ブレードを含む風車本体の各部位で許容応力度を超えて損傷の可能性があることを示唆している。

表1 地震観測地点の地表面と深部の最大加速度

観測点		最大加速度		
名称	コード	地表面	深部	
		Gal	Gal	深さ(m)
KiK-net 珠洲	ISKH01	1007	500	200
K-NET 富来	ISK006	2828	—	—
KiK-net 富来	ISKH04	1220	588	116
KiK-net 志賀	ISKH06	804	540	200

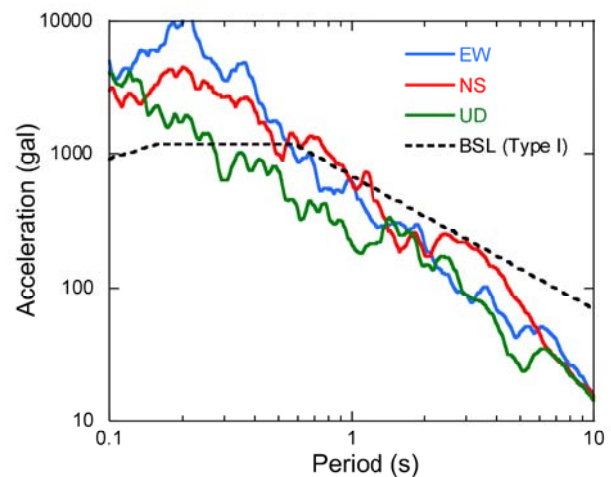


図4 地盤加速度応答スペクトルの観測値と設計用レベル2 (第1種地盤) の比較

(3) 地震発生時の風向・風速

国際規格 IEC61400-1 では運転時・緊急停止時・停止時の風荷重と地震荷重を組み合わせて最大荷重を評価することとしている。石原と飯田の研究¹⁴⁾によると、運転時と緊急停止時に風車の支持構造物に作用する地震荷重は、風と地震の入射角度によって大きく変化する。風と地震が同方向から作用する場合には緊急停止時が最大荷重となるが、地震が風直角方となる場合には運転時の荷重が最大となる。一方、停止時における風と地震のなす角0度と90度の場合には大きく異なる。停止時にはブレードがフェザーとなっているため、風直角方向に大きな空力減衰が発生し、風と地震のなす角90度の場合に比べ、0度の場合のモーメントが大きくなる。従って、風力発電設備に作用する風荷重を評価する際には、風の有無および風車の運転状況を把握することは重要である。

図5と表2には珠洲アメダス (標高4m, 風向・風速

計高さ 7.5m) と志賀アメダス (標高 6m, 風向・風速計 高さ 8.5m) における地震時の平均風速と平均風向を示す。珠洲アメダスでの平均風速は 0.4m/s, 平均風向は 0 度 (北) であり, 志賀アメダスでの平均風速は 1.0m/s, 平均風向は 67.5 度 (東北東) である。風車のハブ高さはアメダスでの観測高さより高いので, 平均風速も高くなる可能性があるが, 風車がアイドリングまたは低速で回転していると推測され, 今後の調査により地震時の風車の運転状況が判明される。

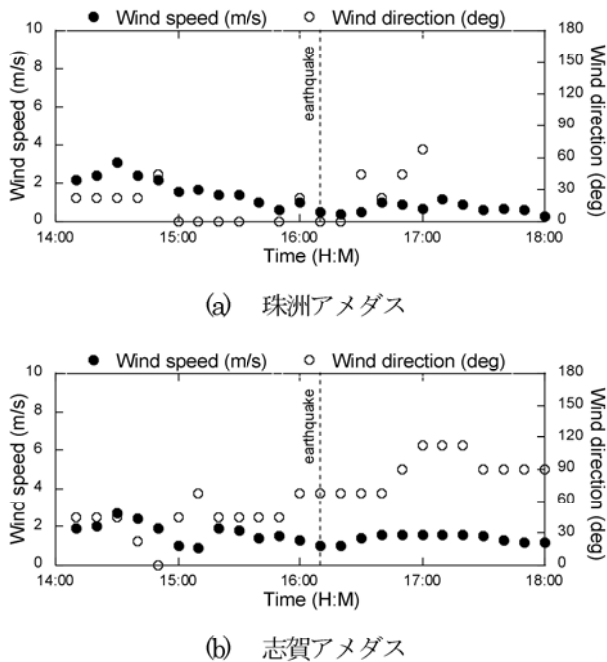


図 5 珠洲アメダスと志賀アメダスにおける地震発生時の平均風速と平均風向

表 2 地震発生時の平均風速と平均風向

時刻	風速 (m/s)		風向 (deg)	
	珠洲	志賀	珠洲	志賀
1600-1610	0.5	1.0	0.0	67.5
1610-1620	0.4	1.0	0.0	67.5
1620-1630	0.5	1.4	45.0	67.5
1630-1640	1.0	1.6	22.5	67.5
1640-1650	0.9	1.6	45.0	90.0
1650-1700	0.7	1.6	67.5	112.5

3. 風力発電設備の被害状況とメカニズム

本章では, 今回の令和6年能登半島地震による風車の被害状況を明らかにし, 被害発生メカニズムを考察する。

図 6 には珠洲市と志賀町の地震計とアメダスおよび被害風車の位置を示す。珠洲市および志賀町における被害風車は地震計とアメダスの位置に近い。表 3 には 2018 年 3 月末まで石川県風力発電設備・導入実績を示す⁷⁾。今回被害を受けた風力発電設備は GE 社製 1500kW 風車

30 基中の 1 基と Enercon 社製 1870kW 風車 4 基中の 1 基のブレードである。



図 6 珠洲市と志賀町の地震計とアメダスおよび被害風車の位置

表 3 石川県風力発電設備・導入実績 (2018 年 3 月末まで)

年度	稼働年月	設置場所 (市町村)	定格出力 (kW)	基 数	総出力 (kW)	メーカー
H15	2003年11月	内灘町	1,500	1	1,500	GE Wind Energy
H16	2004年11月	七尾市	1,500	6	9,000	RePower
H18	2006年11月	七尾市	1,500	4	6,000	GE Wind Energy
H18	2007年2月	志賀町	1,990	1	1,990	Enercon
H18	2007年3月	珠洲市	1,500	10	15,000	GE Wind Energy
H19	2007年11月	志賀町	1,990	5	9,950	Enercon
H19	2008年2月	珠洲市	1,500	10	15,000	GE Wind Energy
H20	2008年12月	珠洲市	1,500	10	15,000	GE Wind Energy
H21	2009年10月	志賀町	2,400	4	9,600	三菱重工業
H22	2010年6月	輪島市	1,980	1	1,980	Repower
H22	2010年12月	輪島市	2,000	10	20,000	Repower
H22	2011年1月	志賀町	2,400	5	12,000	三菱重工業
H26	2015年3月	志賀町	1,870	4	7,480	Enercon

写真 1 には珠洲市の GE 社製 1500kW 風車の被害状況を示し, 国土地理院が地震後 1 月 2 日撮影した航空写真である¹⁹⁾。ブレードが根元付近で後ろ方向に座屈し (図中の赤い点線で囲まれた部分), 風車近くの斜面が地震より崩落した様子 (図中の青い点線で囲まれた部分) が見られる。ブレード損傷の様子をピースウィンズ・ジャパンの配信動画からも確認できる³⁾。当該風力発電所へのアクセス道路は 20 か所以上にわたる崩落により寸断され, 現地調査を実施できない状況にあるため, 被害の詳細について不明なところがある。

写真1 珠洲市の風力発電設備のブレード損傷^{15,3}

写真2には志賀町のEnercon社製1870kW風車の被害状況を示し、国土地理院が地震後1月17日に撮影した航空写真である¹⁵。ブレードが根元付近で横方向に座屈し（図中の赤い点線で囲まれた部分）、地面に落下したこと（図中の青い点線で囲まれた部分）を確認できる。ブレード損傷の様子は能登の風力発電を考える会のfacebookの写真からも確認できる²。

写真2 志賀町の風力発電設備のブレード損傷^{15,2}

過去台風時の強風によりブレードの被害が何回も見られたが、地震によるブレードの損傷は著者の知る限り、今回初めてである。今回に似た被害は東日本大震災の時に東京タワーアンテナ支柱で発生した¹⁶。解析から一般に呼ばれる「むちふり現象」が発生したとされている。

写真1と2から、風車のブレードは地震時の揺れにより根元付近で座屈が発生した。地震により風車のナセルが大きく揺れ、ハブに固定されたブレードはナセルの揺れに伴い、さらに大きく揺れることが想像される。今回損傷を受けた2本のブレードともナセルの上に止まったブレードであり、ブレードの根元で最も大きな地震荷重を受けたと推測される。今回の地震による鉛直地震動も大きく、鉛直方向の地震荷重により座屈が発生しやすい状況になる可能性もあり、今後詳細な地震応答解析を行い、ブレード損傷のメカニズムを解明できれば、風力発電設備の耐震性能の更なる向上に寄与する。

4. まとめ

本報告では、令和6年能登半島地震を概説すると共に、能登地方で観測された地震波の特徴および風力発電設備の被害状況を明らかにした。

今回の令和6年能登半島地震で観測された地震動は東北地方太平洋沖地震と同レベルであり、現行基準のレベル2（極めて稀に発生する地震動）の加速度応答スペクトルは、大型風車の固有周期3秒付近で今回の地震の加速度応答スペクトルを包含していることが分かった。

一方、今回の地震によりこれまでに見られなかったブレードの被害が発生した。今後地震応答解析を行い、ブレード損傷のメカニズムを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 気象庁：令和6年能登半島地震の関連情報，2024。
https://www.jmago.jp/jma/menu/20240101_noto_jishin.html
- 2) 能登の風力発電を考える会：令和6年能登半島地震
<https://www.facebook.com/notofuryoku/>
- 3) ピースウィンズ・ジャパン：令和6年能登半島地震
<https://www.youtube.com/watch?v=ML36XSsbHY>
- 4) 石原孟，山口敦，高本剛太郎：東日本大震災と風力発電設備支持物の耐震設計，風力エネルギー，35(1)，8-11，2011。
https://doi.org/10.1133/jwea35.1_8
- 5) 久木野風力発電所2号機タワー損傷（速報）：第9回新エネルギー発電設備事故対応・構造強度WG資料
https://www.mti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohidenryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/009_05_00.pdf
- 6) 阿蘇にしはらウインドファーム熊本地震による被災と復旧について：第13回新エネルギー発電設備事故対応・構造強度WG資料
https://www.mti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohidenryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/013_03_02.pdf
- 7) NEDO：日本における風力発電設備・導入実績（石川県）
https://www.nedo.go.jp/library/furyoku/case/pdf/pref_17.pdf
- 8) 中日新聞：能登風力発電計画が急増 9事業環境評価154基、既存の2倍，<https://www.chunichi.co.jp/article/110726>
- 9) 石川県環境アセスメントの手続き状況；
<https://www.pref.shikawa.lg.jp/kankyo/assess/studukishuuryou.html>
- 10) 防災科学技術研究所：令和6年能登半島地震，2024。
<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/20240101/LANG-ja>
- 11) 政府の地震調査研究推進本部：令和6年能登半島地震の評価。
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2024/20240101_noto_3.pdf
- 12) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010年版，2010。
- 13) 建築基準法施行令：昭和55年建設省告示第1793号
- 14) 石原孟，飯田芳久：連成と分離解法を利用した風車支持構造物に作用する風と地震の組み合わせ荷重の予測，第42回風力エネルギー利用シンポジウム，2020
https://doi.org/10.1133/jweasympo420_37
- 15) 国土地理院：令和6年(2024年)能登半島地震に関する情報
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html
- 16) 古河電工：「電波を守れ！」3.11 東京タワーアンテナ支柱復旧物語～333mの記憶～
<https://www.furukawa.co.jp/platform/13miharu-tokiotower.html>