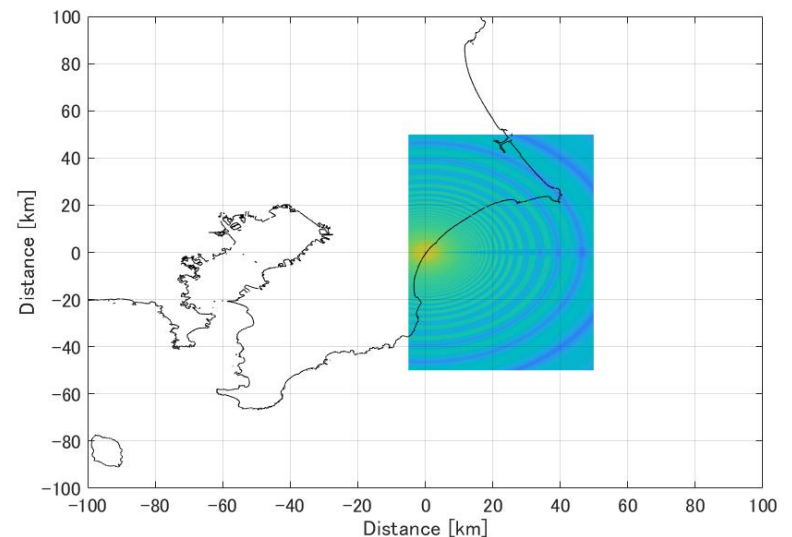
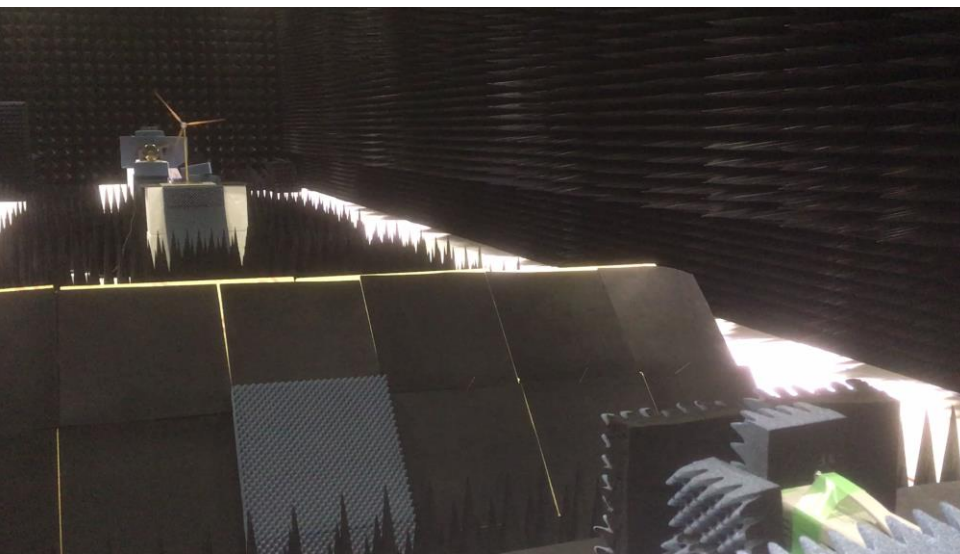


# 風力発電設備の航空無線システムへの 電波干渉評価

海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所  
米本成人、本田純一

ブラウンシュバイク工大 Robert Geise



# 回転している風車の影響



The image shows a screenshot of the Spiegel Online website's 'WIRTSCHAFT' (Economy) section. The article title is 'Flugsicherheit: Windräder verwirren Flieger - und Energieunternehmen' (Flight safety: Wind turbines confuse pilots - and energy companies). The author is Matthias Bartsch. The article text states that besides nature conservation and residents, wind power plants have a new opponent: the German Federal Aviation Authority (DFS), which fears that wind turbine rotors can divert passenger jets from their course. A red box highlights a key point: '風力発電機の動作がレーダーに対して偽像や検出確率の低下を引き起こす。' (The operation of wind turbines causes false images or a decrease in detection probability for radar). Another red box contains a summary: 'ドイツでは現在2300MWの風力発電に対して投資が凍結されている。(20憶ユーロ以上) 理由はVORの風車間の両立性が成り立たないからである。' (In Germany, investment in 2300MW of wind power is frozen. (Over 20 billion euros) The reason is that the compatibility between wind turbines in VOR is not possible). The source is cited as 'Quelle: Bundesverband für Windenergie e.V., Pressemitteilung, September 2015.' An image at the bottom shows a close-up of wind turbine blades with a small airplane flying in the background. The caption below the image reads 'Windenergie vs Flugsicherheit: 208 Windparks sind derzeit "blockiert"' (Wind energy vs flight safety: 208 wind parks are currently 'blocked').

**VHF omnidirectional radio range (VOR) に AM、FM 成分**

## Flugsicherheit: Windräder verwirren Flieger - und Energieunternehmen

Von Matthias Bartsch

Neben Naturschützern und Anwohnern, die sich gegen Windkraftanlagen in der Nähe ihrer Häuser einsetzen, haben die Windkraftanlagen inzwischen einen weiteren Gegner: Die Deutsche Flugsicherung (DFS) fürchtet, dass die Rotoren Passagierjets vom Kurs abbringen können.

**風力発電機の動作がレーダーに対して偽像や検出確率の低下を引き起こす。**

**ドイツでは現在2300MWの風力発電に対して投資が凍結されている。(20憶ユーロ以上) 理由はVORの風車間の両立性が成り立たないからである。**

Quelle: Bundesverband für Windenergie e.V., Pressemitteilung, September 2015.

Windenergie vs Flugsicherheit: 208 Windparks sind derzeit "blockiert"

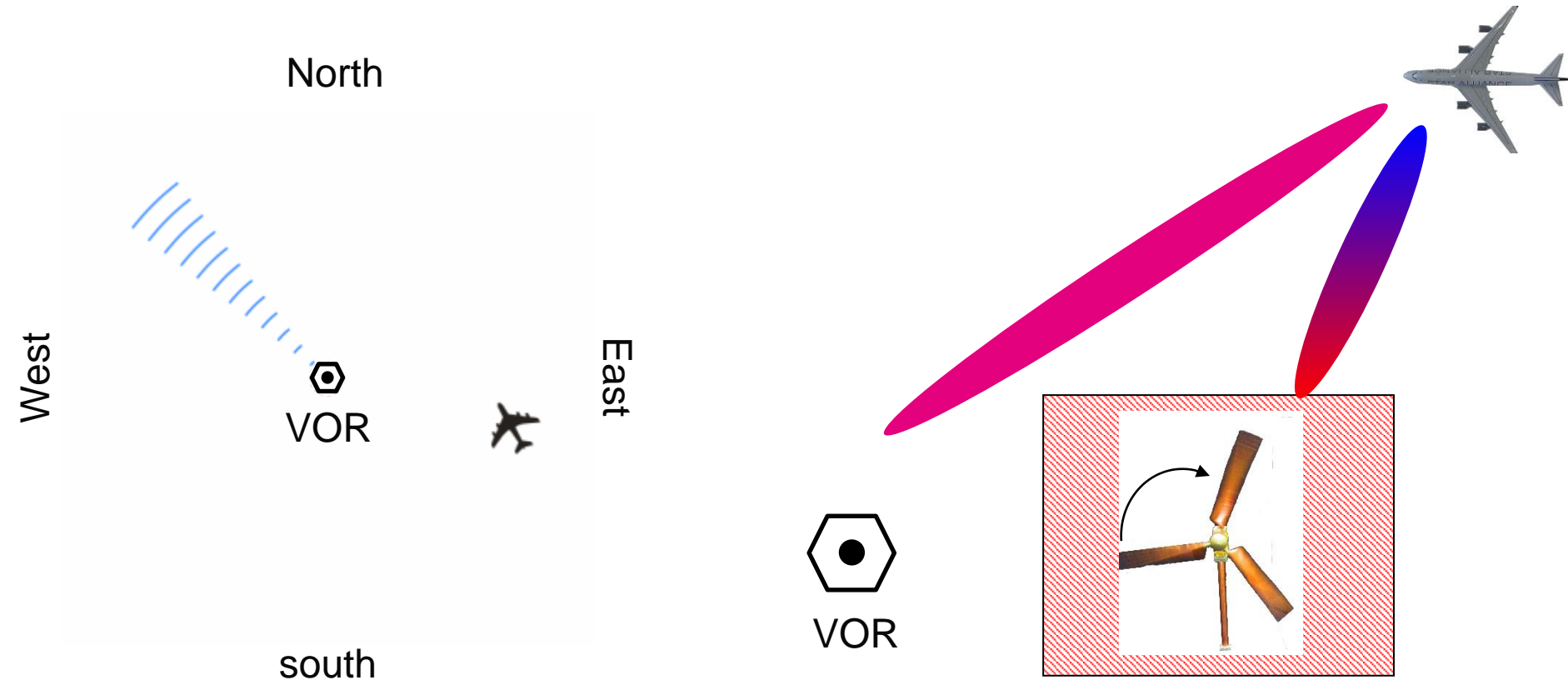
# 研究の概要

- 風力発電設備の航空無線システムへの影響を推量
  - スケールモデル実験による回転する風車の電波散乱、遮蔽
  - 得られた測定値から統計モデルを作成
  - 仮想的に航空無線システム、風車を配置した場合の影響の範囲を計算



# スケールモデル実験

# VOR (VHF Omnidirectional Range) への影響



- 航空機誘導用電波標識
- 全方位に出す基準信号と指向性のある方位信号との位相差でベアリング(方位)を計測

- マルチパス成分として混入する風車による電波の振幅・位相の乱れを計測

設置制限エリアを設定するために  
**動いている風車がどの程度電波を散乱するのかを計測**

# 使用した縮尺模型

- ・3次元風車模型(フル3D)

型式: Siemens SWT-2.3-130

高さ: 62m

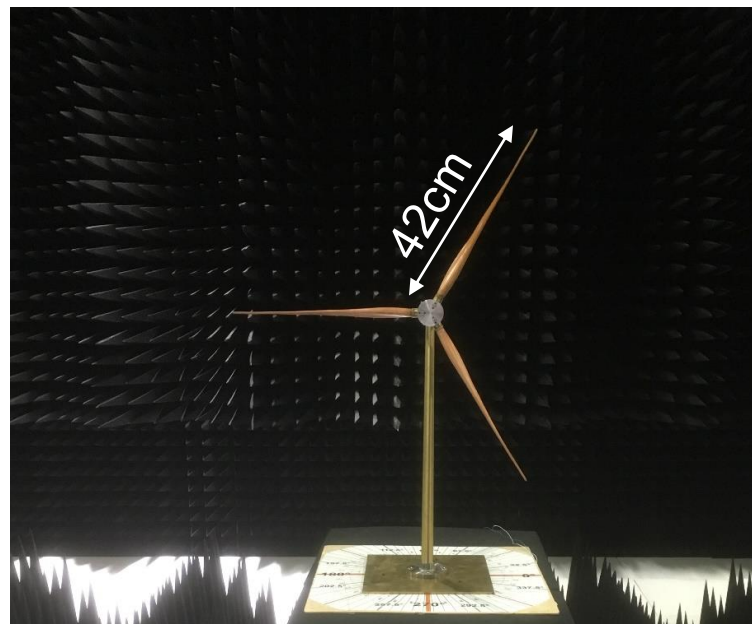
Scale: 1:144

Ex.測定周波数

VOR 115MHz -> 16 GHz

送信アンテナから模型までの距離

10m->1440m



- ・平面風車模型(羽根は平面)

型式: Siemens SWT-2.3-130

高さ: 62m

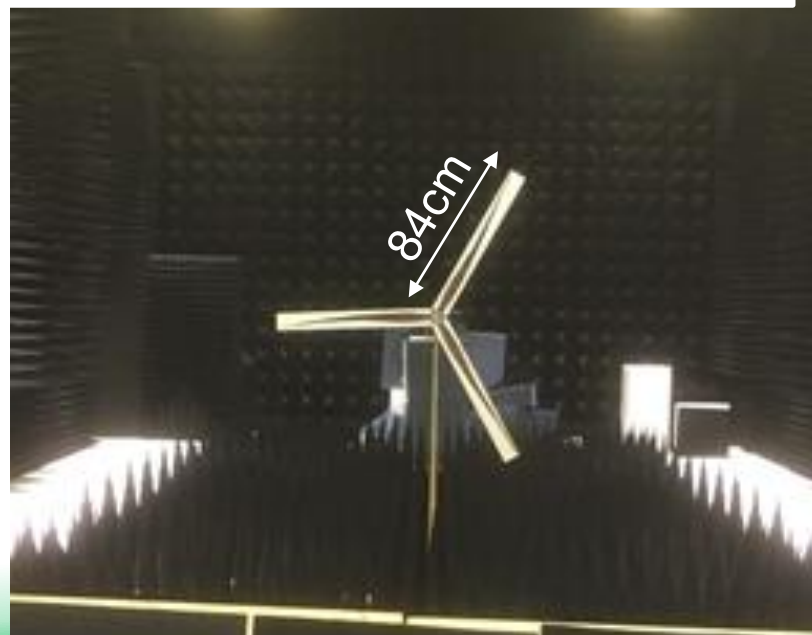
Scale: 1:72

Ex.測定周波数

ARSR 1.3GHz -> 93.6 GHz

送信アンテナから模型までの距離

10m->720m

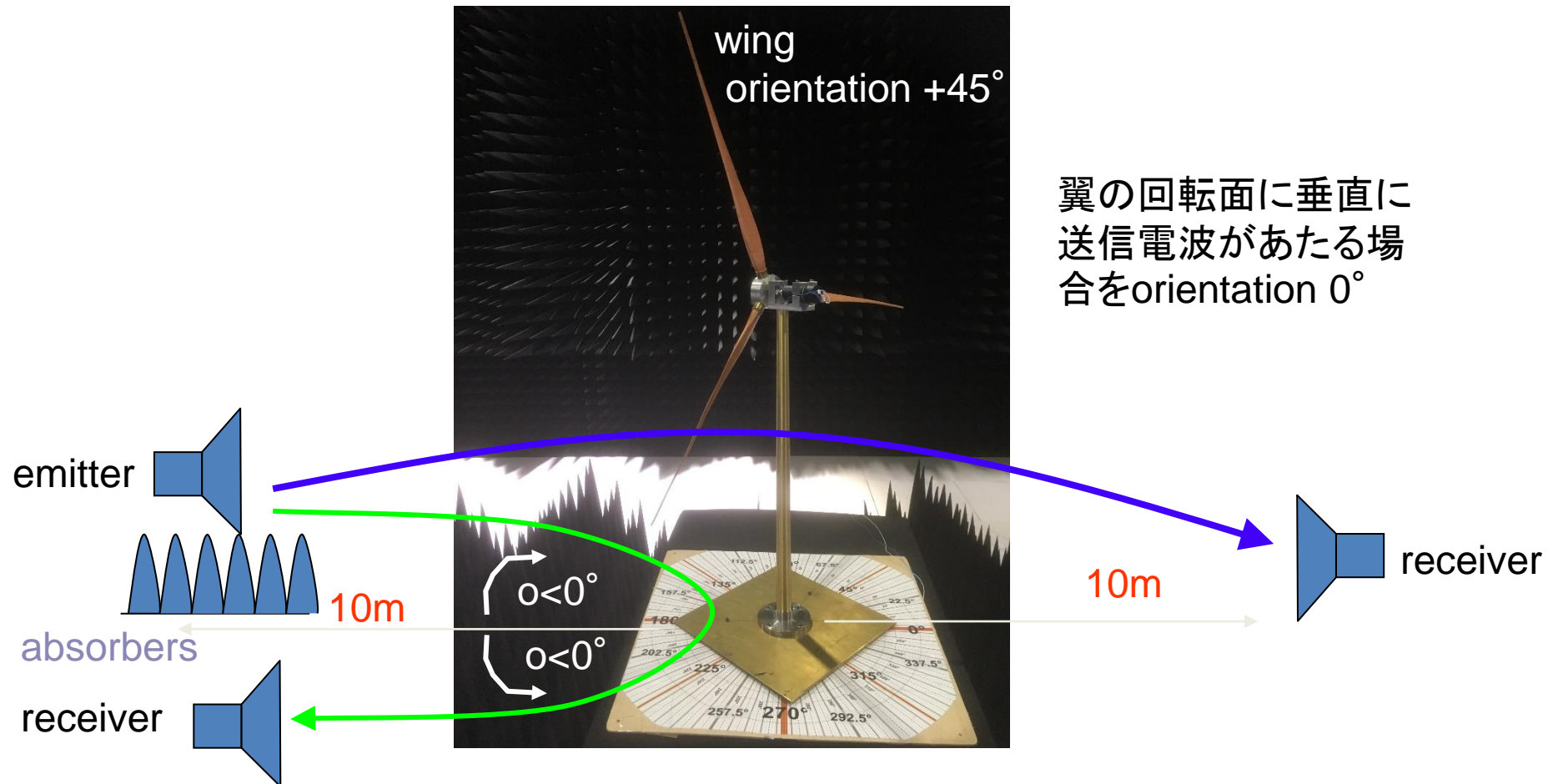




# 測定シナリオ

## 1. 反射測定

## 2. 透過測定



翼の回転面に垂直に  
送信電波があたる場  
合をorientation  $0^\circ$

# 測定システム(VNA)の設定条件

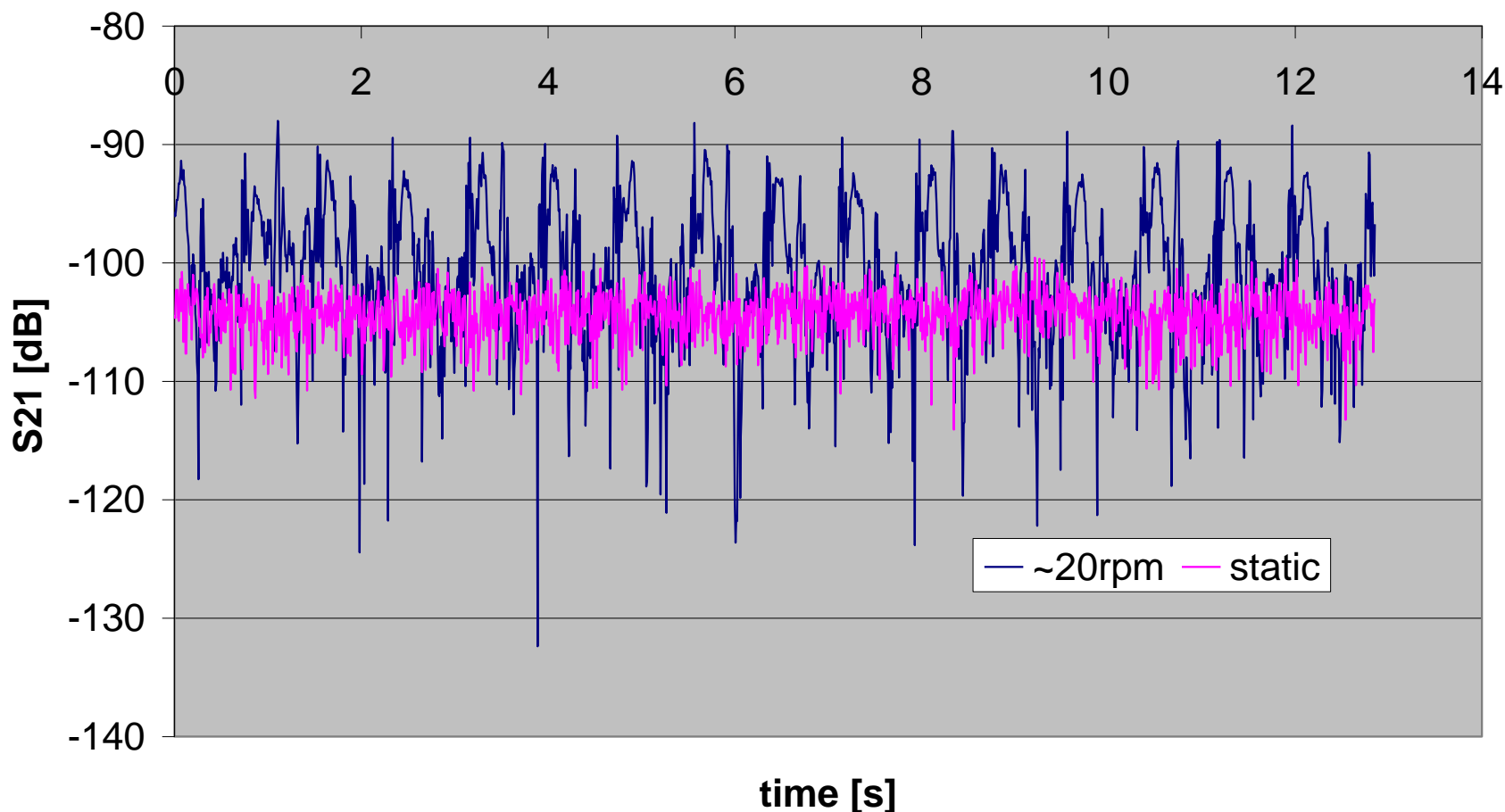
- 模型のサイズと対象となる航空無線機器に合わせて周波数を選定
- 連続波モードで伝搬係数  $S_{21}$  を測定

測定シナリオ	風車模型	対象航空無線機器	スケール周波数	測定した周波数帯域
反射特性 透過特性	3D scale 1:144	VOR	16GHz	10GHz-20GHz
反射特性 透過特性	2D scale 1:72	Primary or Secondary Radar	72GHz	80GHz-110GHz



# VOR模型の反射測定 - 停止時・回転時の違い

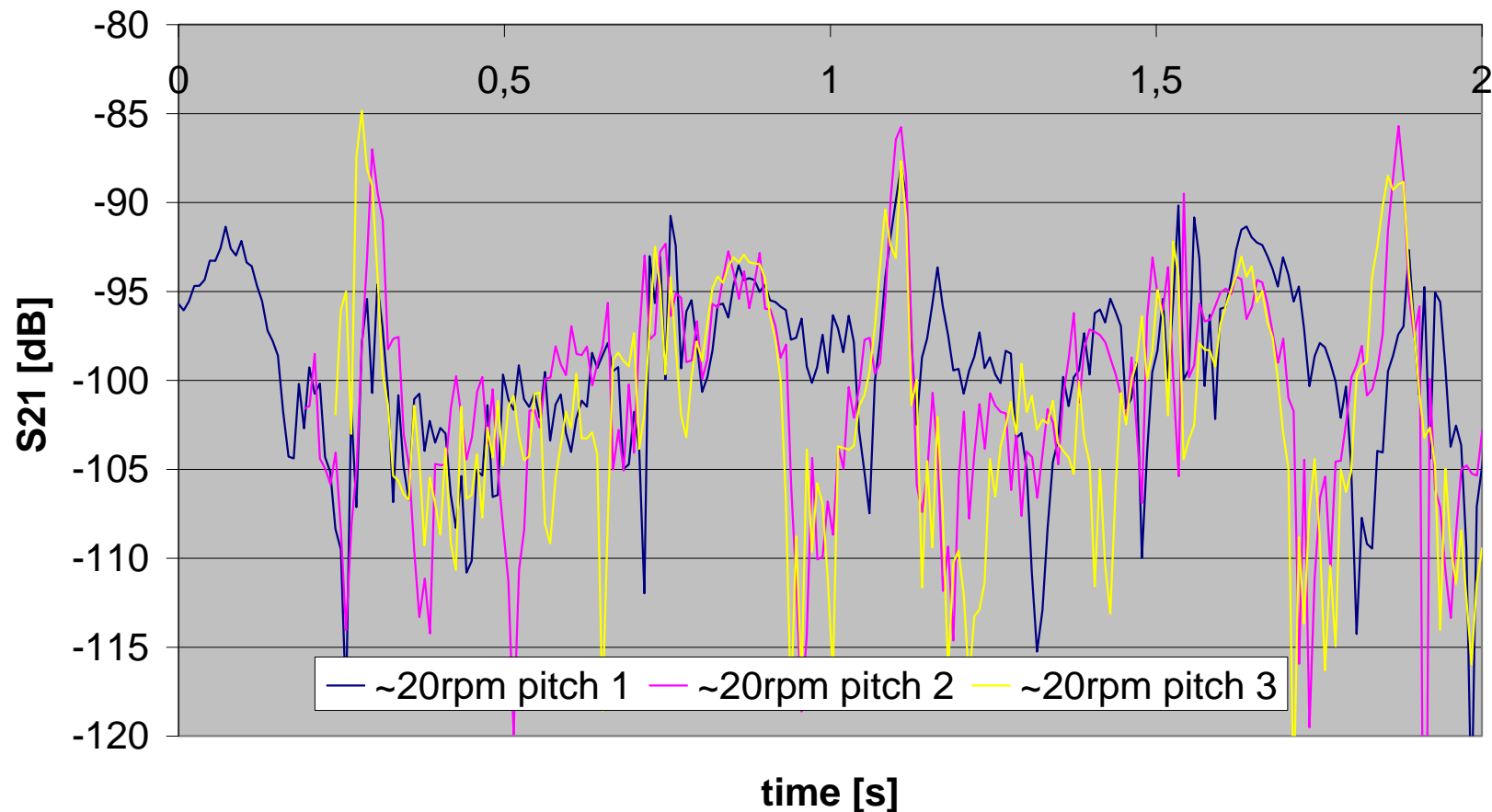
monostatic 16 GHz, horizontal polarization , orientation 45°, pitch  
set 1



風車により反射波が発生、羽根の回転に同期して反射波強度が変化

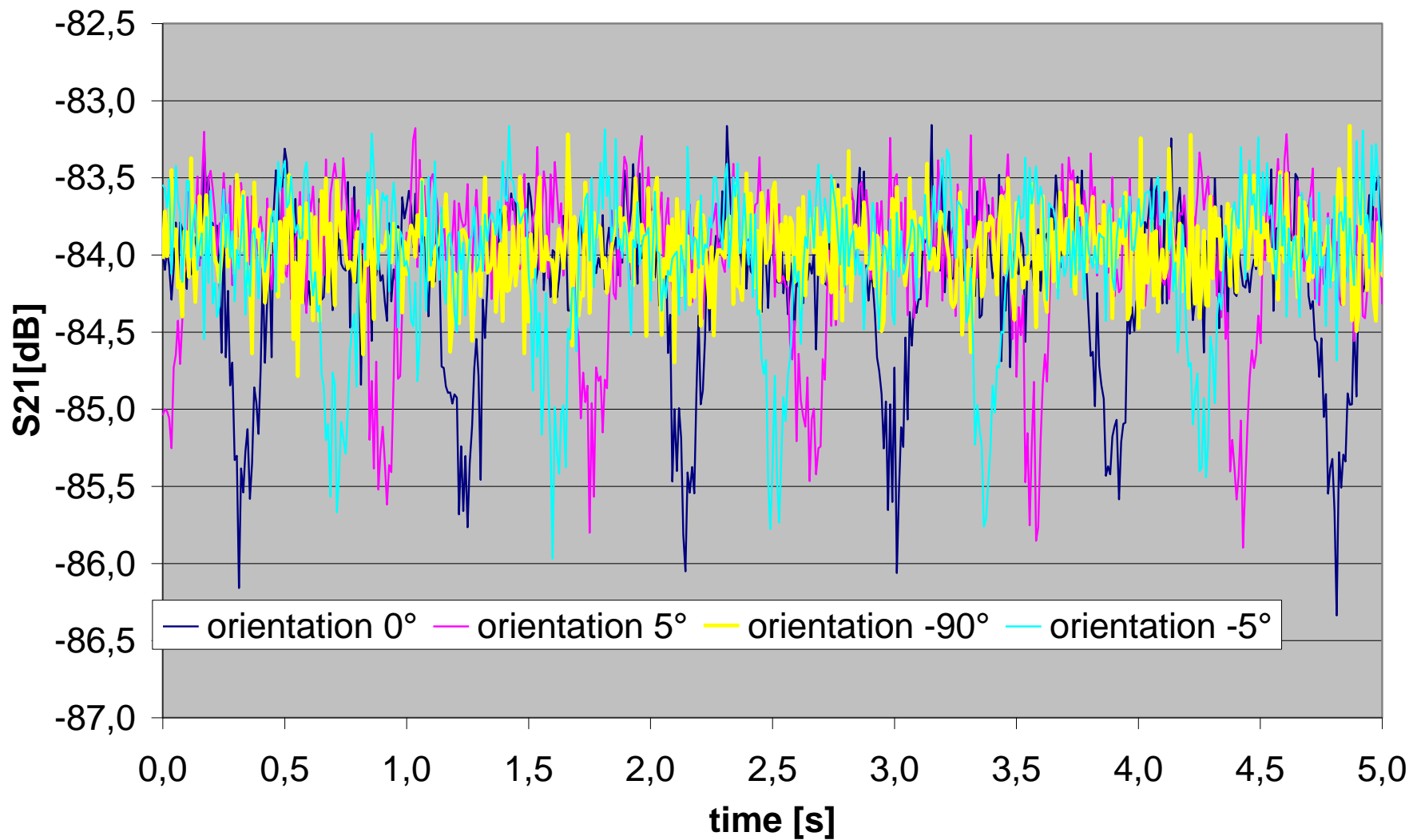
# VOR模型の反射測定値 -ピッチ角の影響-

monostatic 16 GHz, horizontal polarization, orientation 45°,

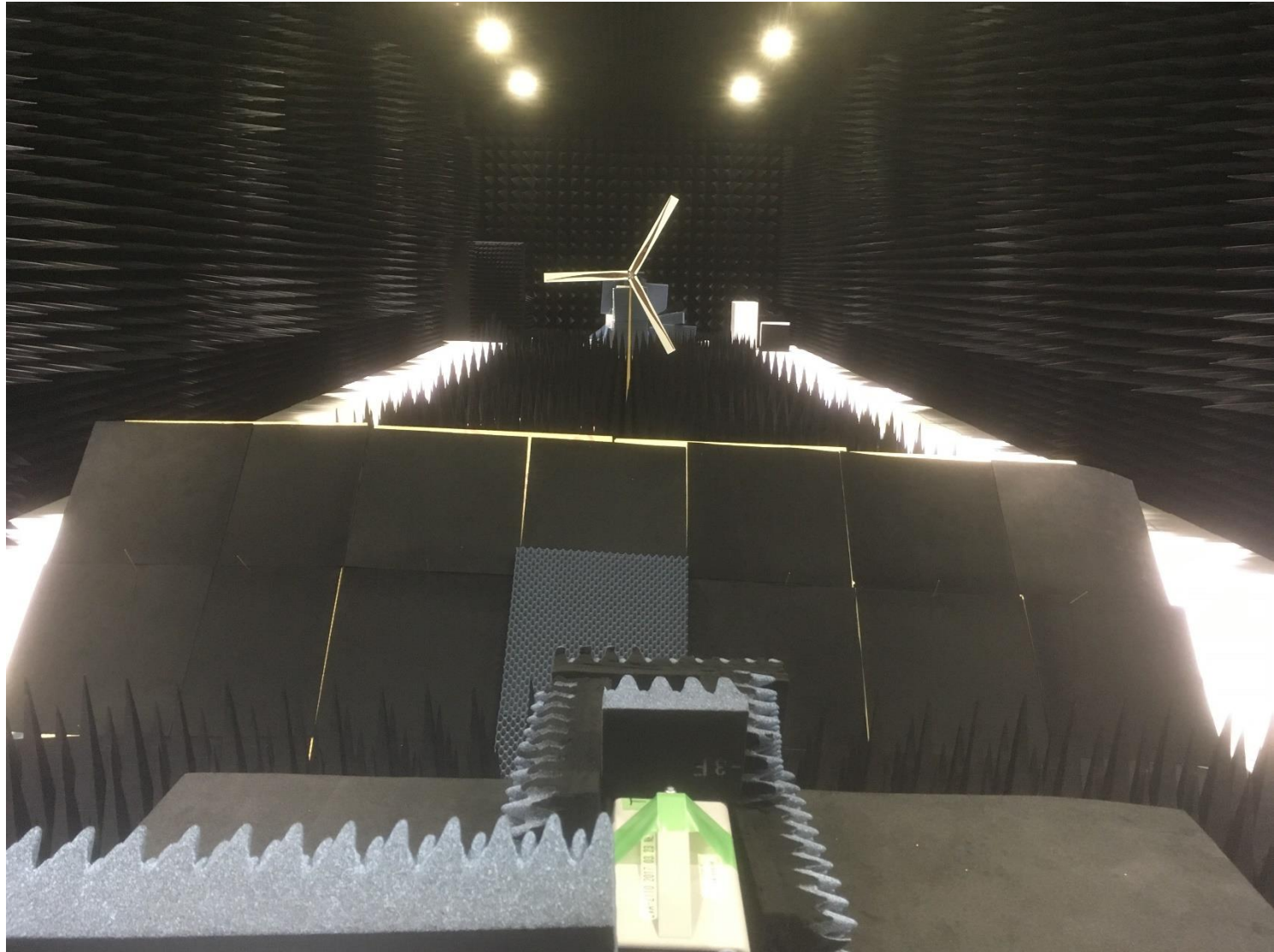


羽根のピッチ角の影響は少ない

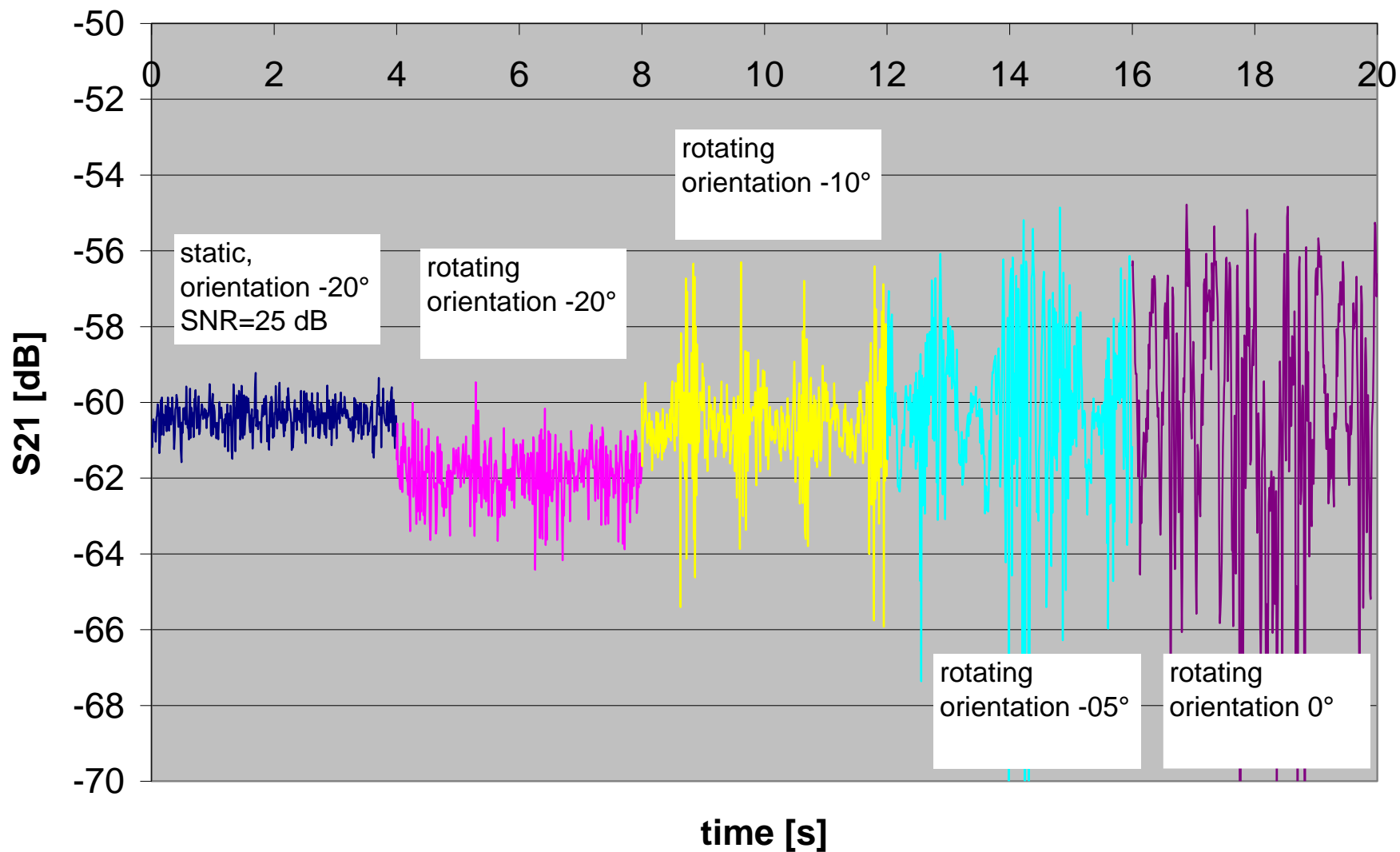
# VOR模型の透過測定値



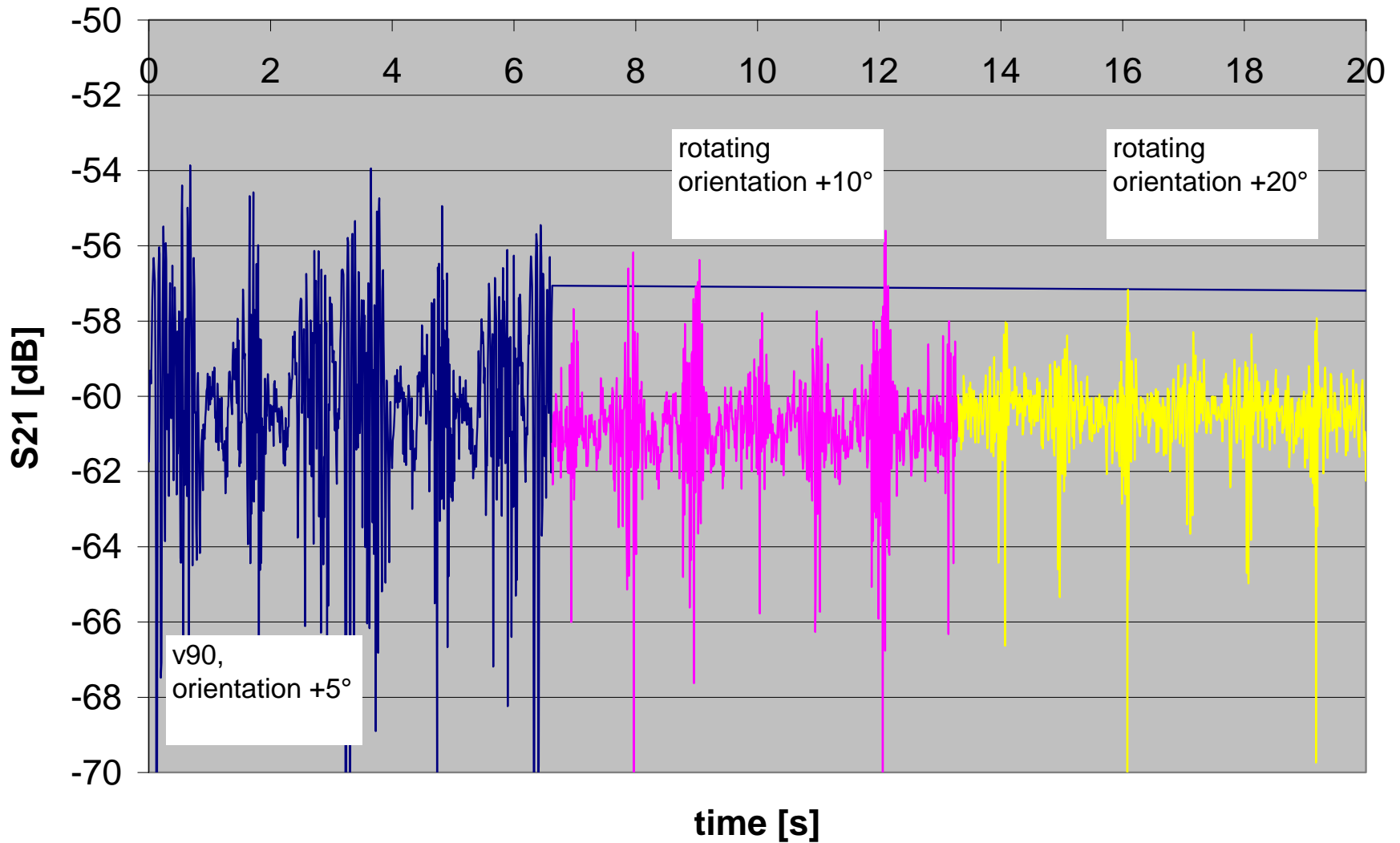
# 2次元模型による高域周波数帯測定



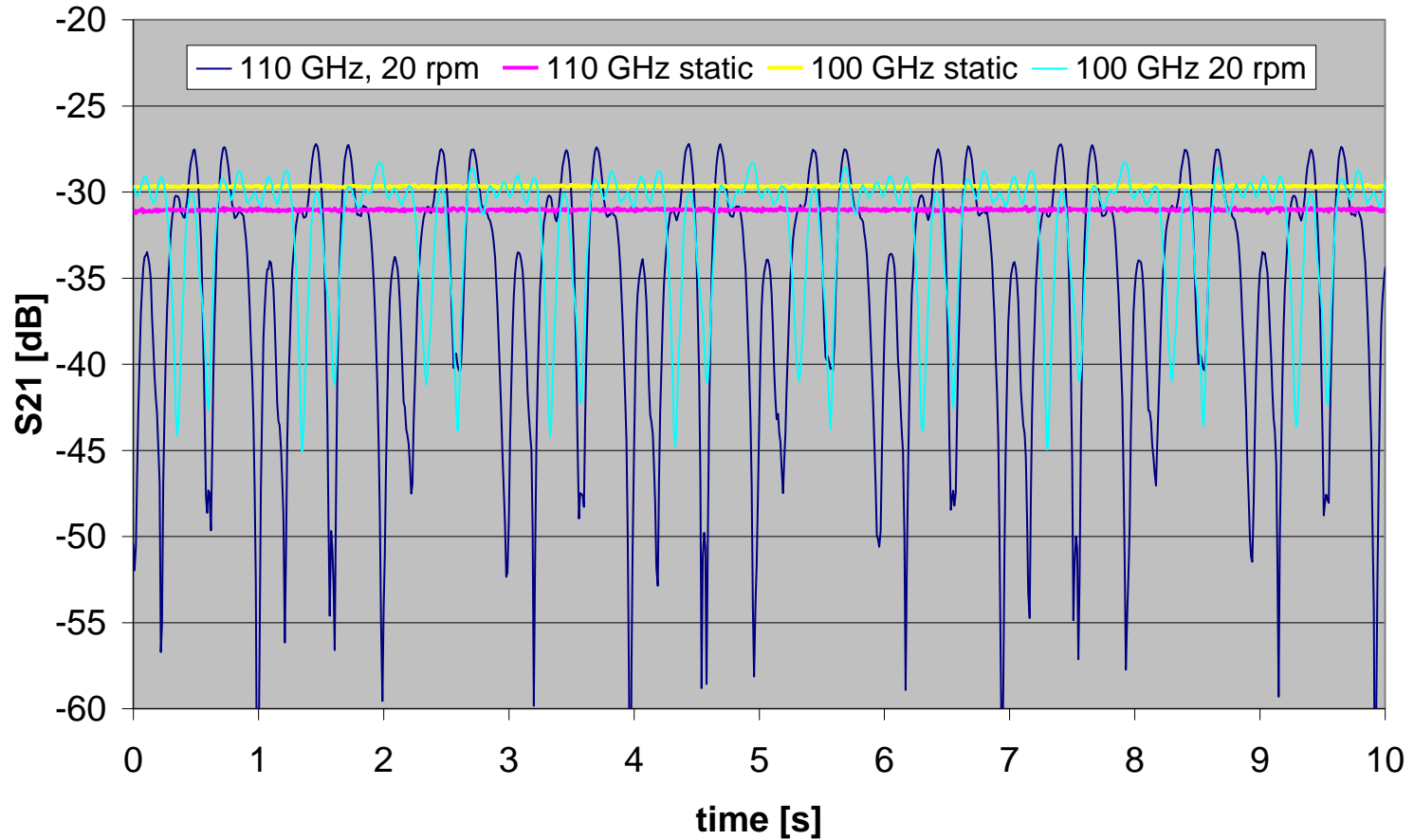
# 風車の向きの違いによる散乱特性 at 110GHz



# 風車の向きの違いによる散乱特性at 110GHz(続き)



# 2次元模型の透過測定



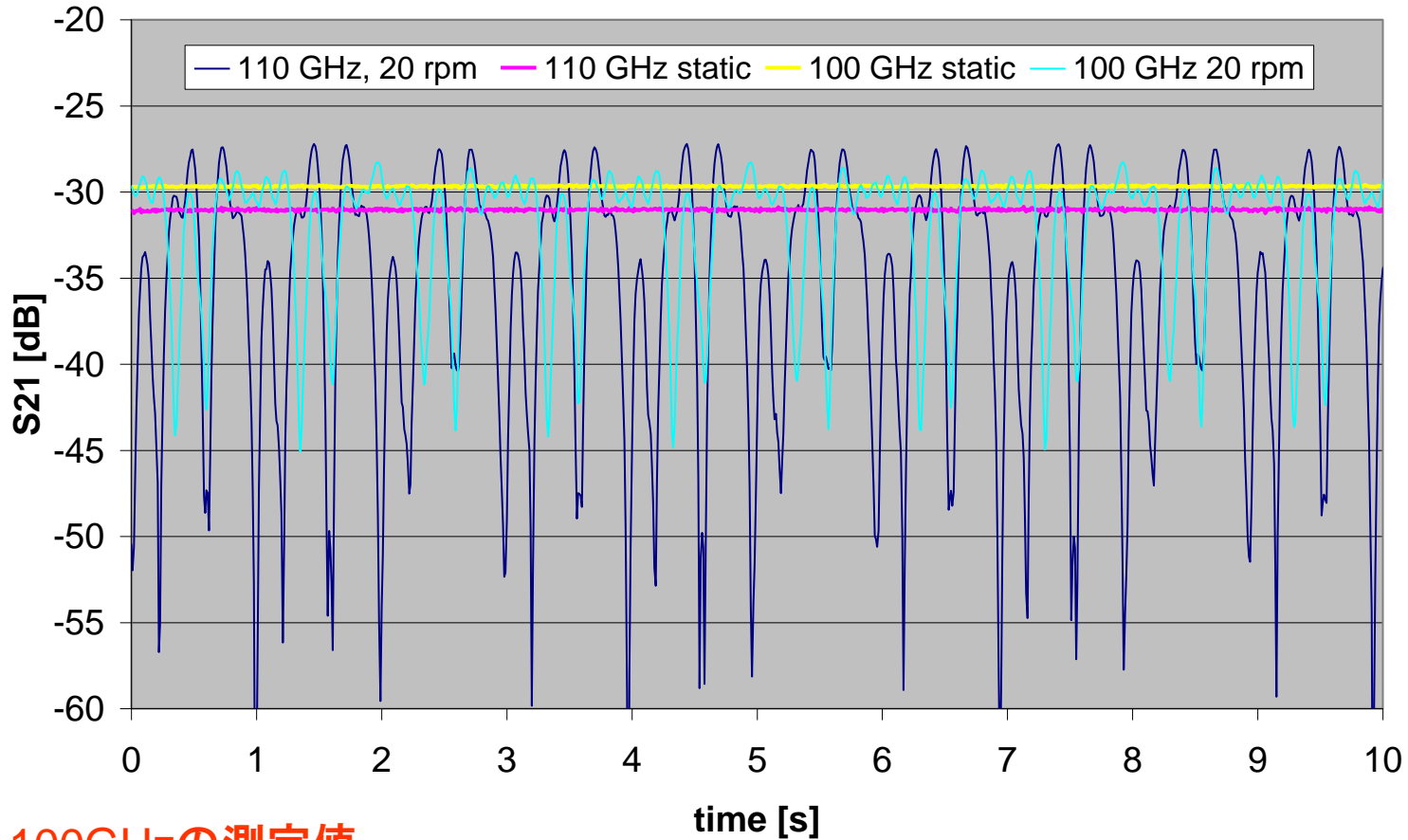




# 風車解析結果



# 元データ



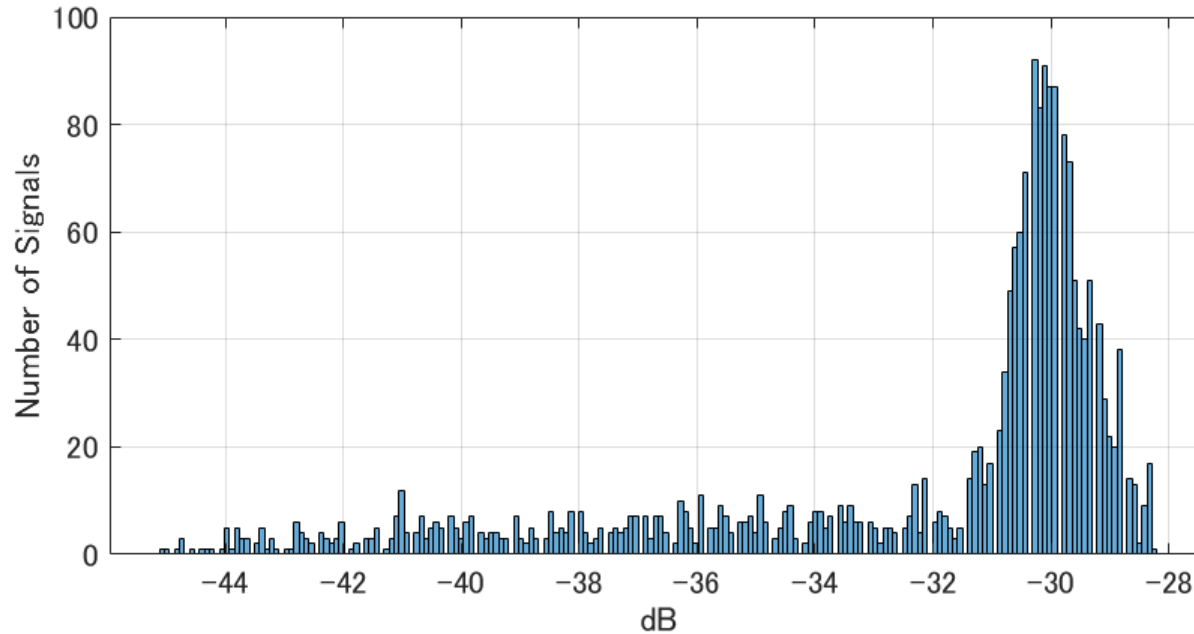
## 100GHzの測定値

静止時の平均値： -29.7dB

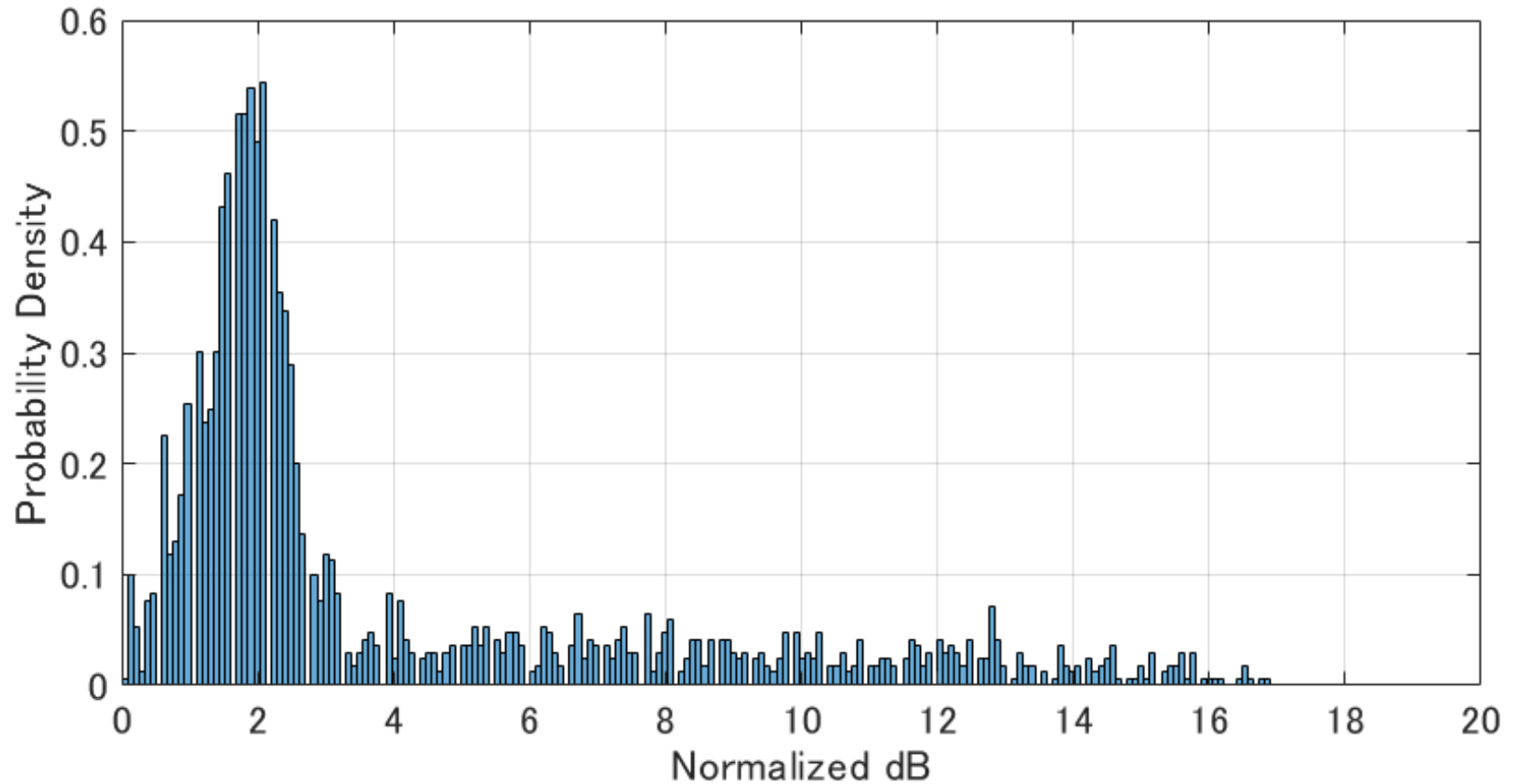
回転時の値： (最大値)-28.2dB → +1.5dB

(最小値)-45.1dB → -15.3dB

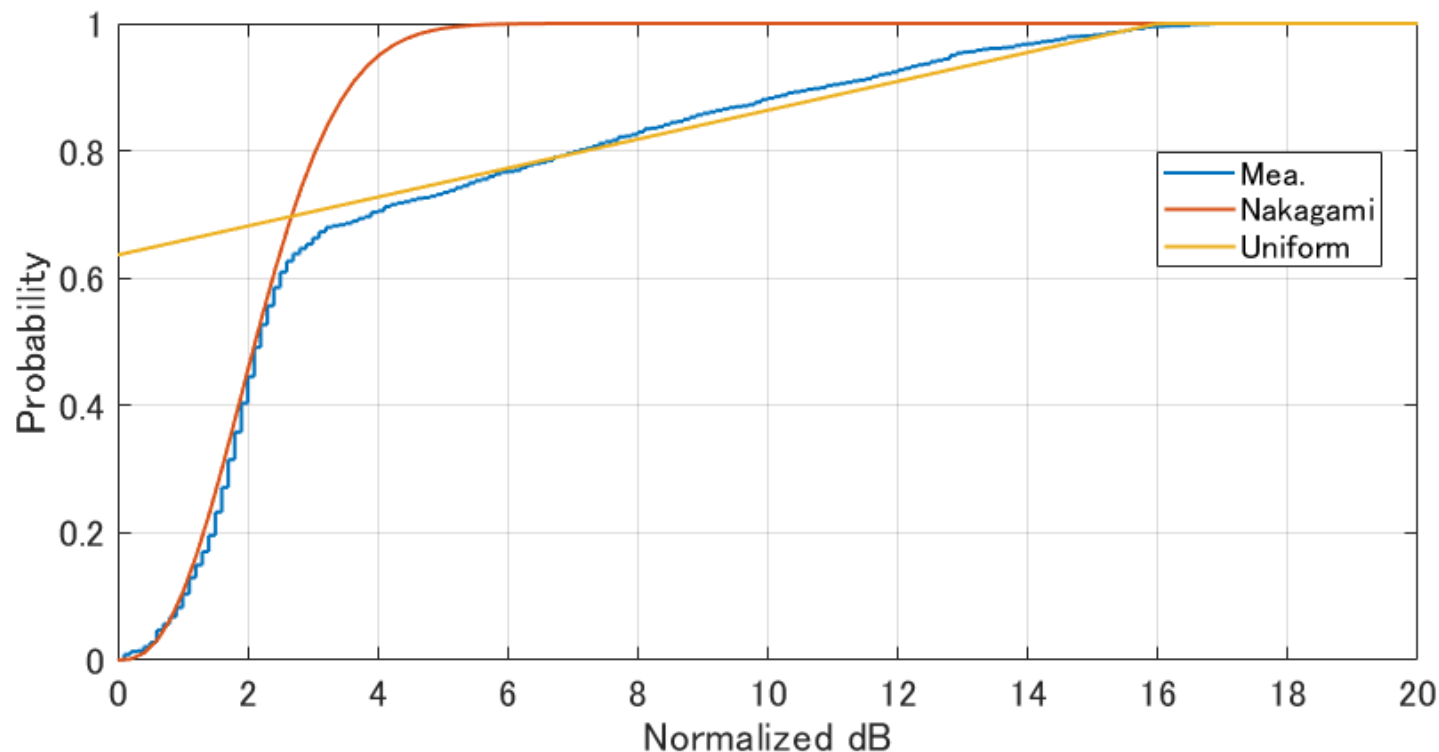
# 風車を通る電波散乱の度数分布



# 最大値で正規化した確率密度関数



# 正規化した電波散乱の累積分布関数 (仲上・ライス及び一様分布との比較)



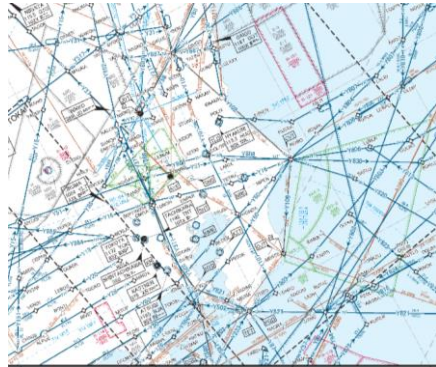
レイリー分布＋定常成分＋一様分布



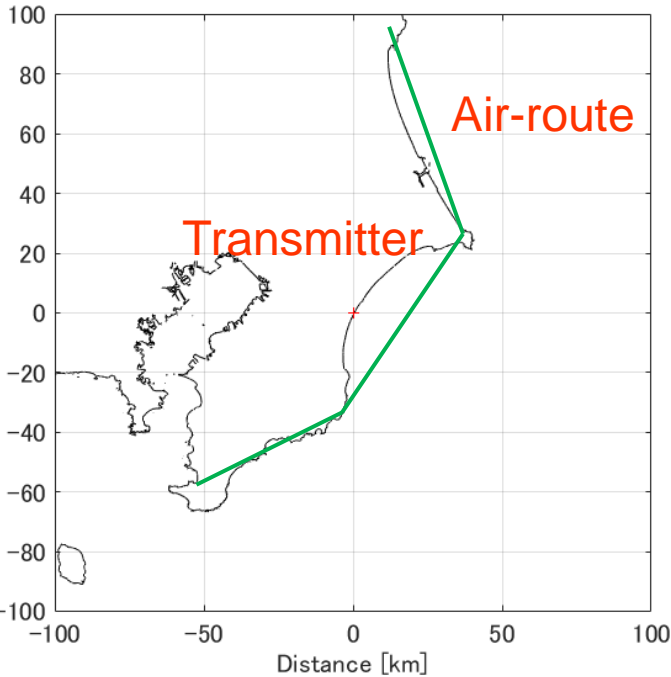
# 風車設置シミュレーション



# 想定した設置シナリオ

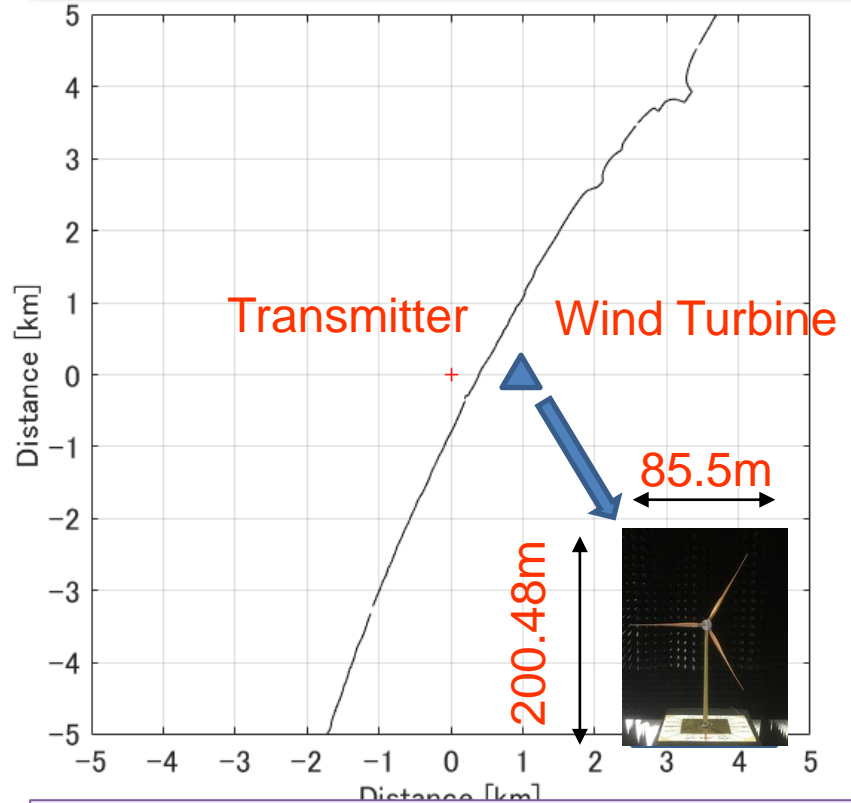


航空路



仮想的な2次監視レーダー配置

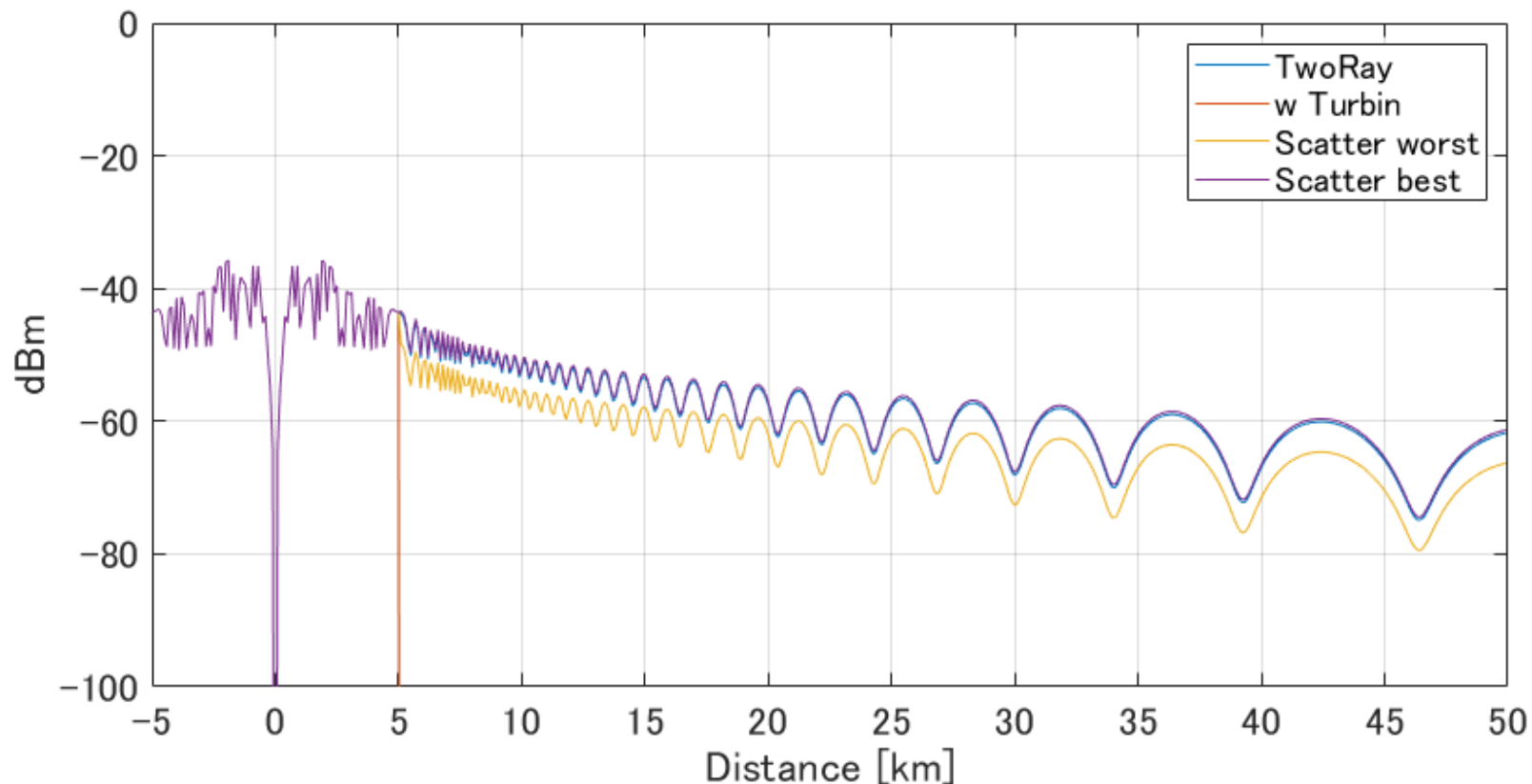
送信点  
九十九里の海岸に高さ30mの送信局  
があると仮定



風車：  
送信局の東1kmに正対していると仮定

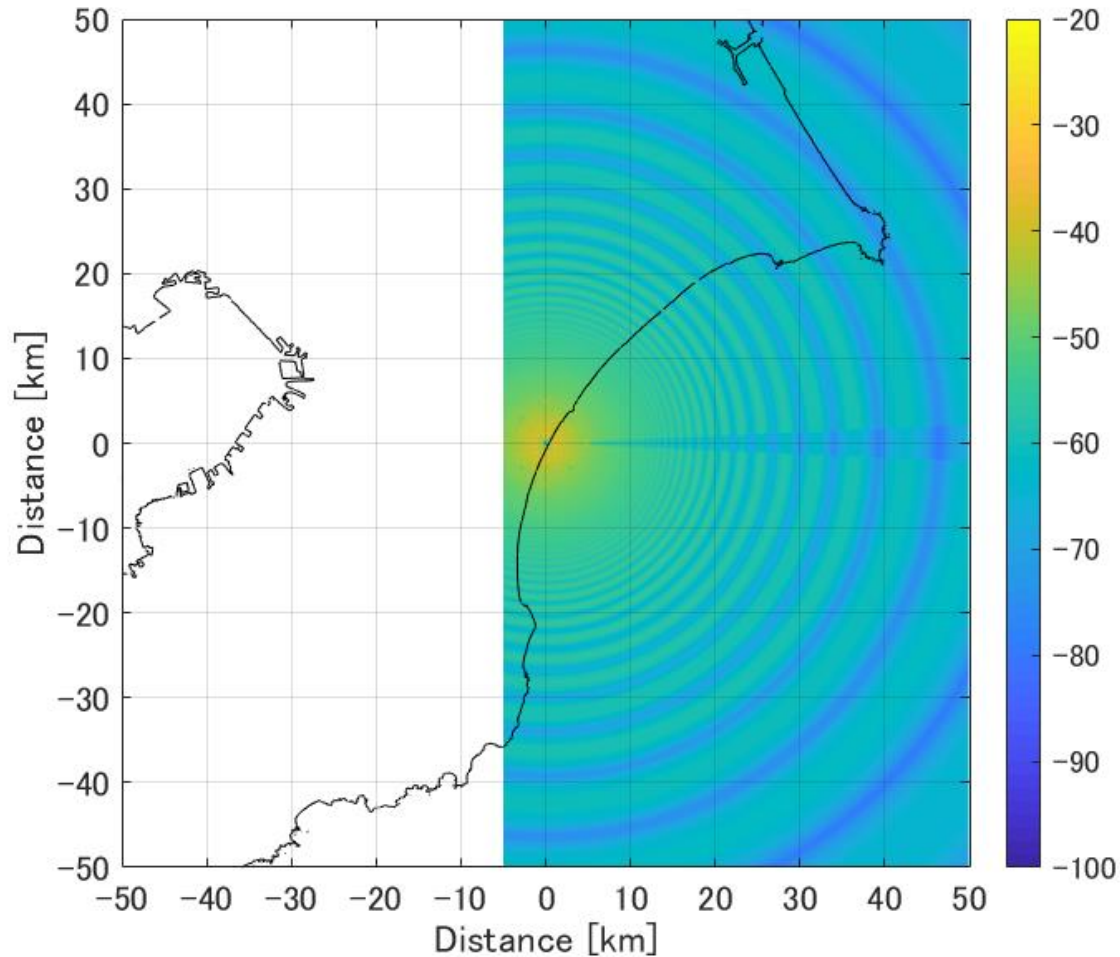


# 風車方向における上空3000ftの受信電力の変化



Best scenarioでは通常の減衰とほぼ同じ

# 上空3000ftの受信電力の強度分布



Worst scenarioでは風車の背後の受信電力が低下

# 欧州におけるアセスメントの必要性

## ・ 1次レーダーの場合

Zone	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
詳細	0-500m	500m-15kmでかつレーダーの <b>見通し内</b>	15km以上最大覆域以内で、かつレーダーの <b>見通し内</b>	最大覆域以内だがレーダーの <b>見通し外</b> 、あるいは最大覆域より外
アセスメントの必要性	保護領域	詳細なアセスメント	簡単なアセスメント	<b>アセスメント不要</b>

## ・ 2次レーダーの場合

Zone	Zone1	Zone2	Zone3
詳細	0-500m	500m-16kmで、かつレーダーの <b>見通し内</b>	16km以上、あるいはレーダーの <b>見通し外</b>
アセスメントの必要性	保護領域	詳細なアセスメント	<b>アセスメント不要</b>

# まとめ

風力発電設備が航空無線システムに与える影響を評価する手法を検討

スケールモデル実験にて、風車の電波散乱を計測

回転する風車の散乱の頻度から、最大値、最小値を抽出

仮想的な風車と無線局の位置関係から影響のある範囲の特定

航法装置に対する風車の影響を評価する手法の確立

見通し外であれば評価不要、見通し内の場合は離隔距離に合わせて評価