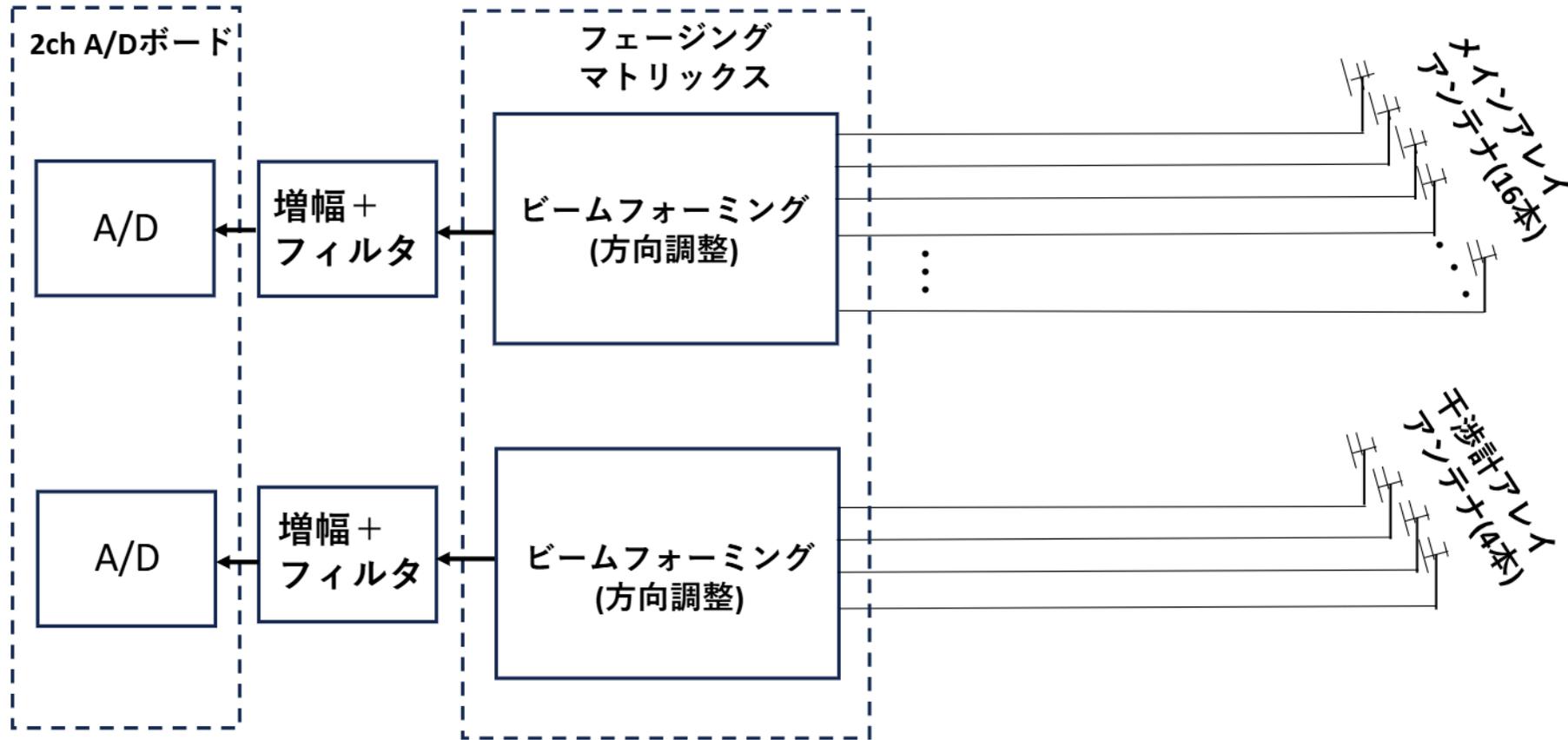


A photograph of an HF radar antenna array. Several tall, lattice-structured towers are spaced out across a grassy field. Each tower has a horizontal cross-arm with multiple thin antenna elements. The background shows a line of trees and a clear blue sky with some light clouds. Two yellow text boxes are overlaid on the image.

# HFレーダーにおけるイメージング受信機の開発

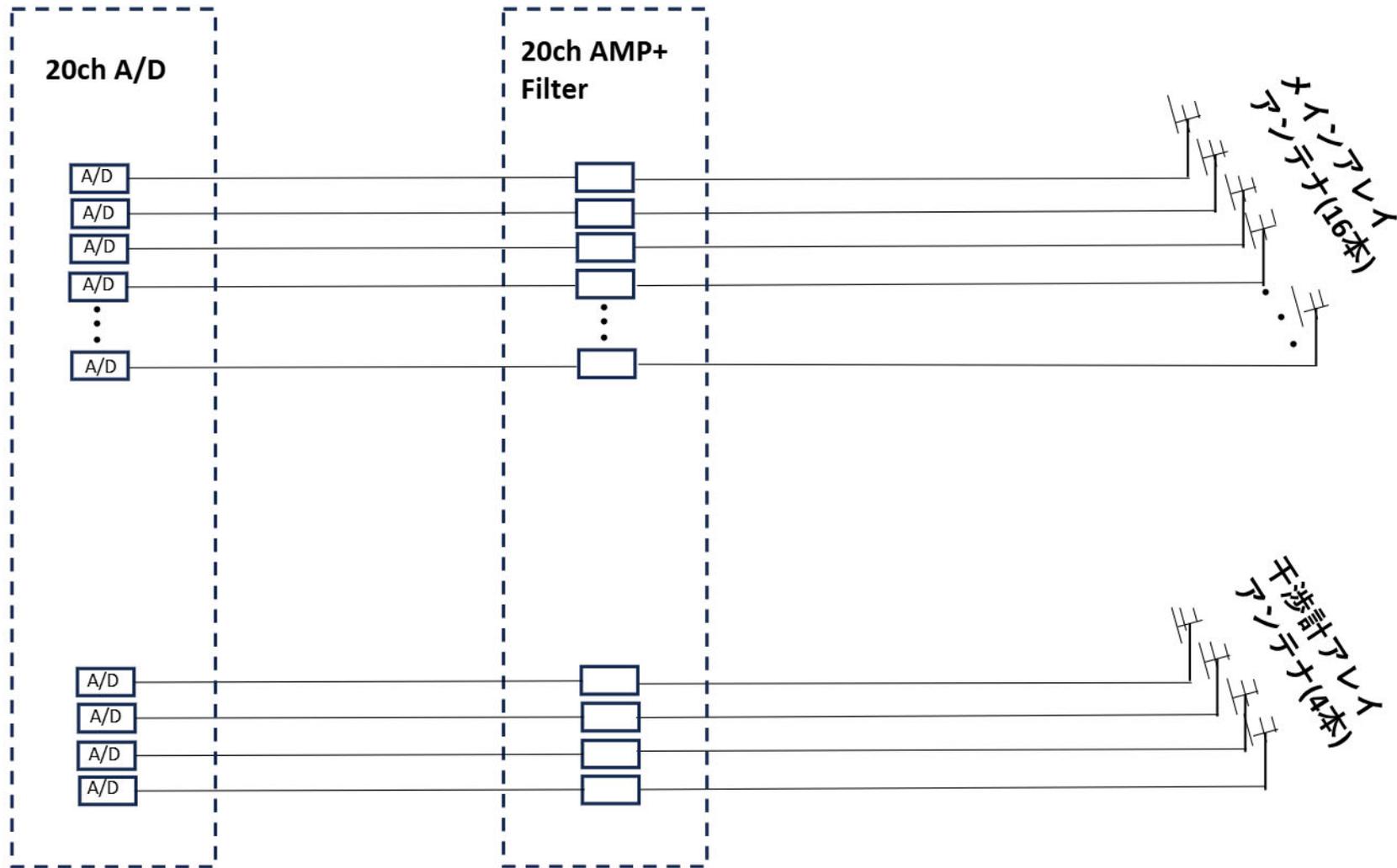
名古屋大学 宇宙地球環境研究所  
濱口佳之 西谷望

## 従来型HFレーダーの受信系統図



※メインアレイ群と干渉計アレイ群の受信信号をフェージングマトリックスでビームフォーミング（方向調整）し、2chのA/DボードでI/Qデータ化している。

# イメージング受信機の受信系統図



※メインアレイ群と干渉計アレイ群の20ch受信信号を全てA/DでI/Qデータ化。  
ビームフォーミング(=イメージング処理)は、データの後処理で行う。

## イメージング受信機のメリット・デメリット

### ・メリット

従来型のHFレーダーは、ビーム掃引にフェーシングマトリックスのハードウェアを用いており、全ビーム方向(50度)を掃引するのに約1分かかる。

→イメージング受信機なら、データ処理でビーム掃引するので、感度を考慮しなければ、最短1パルスシーケンス(=100ms)でも全方向マッピングが可能。

### ・デメリット

従来型のHFレーダーは、 $3.3\text{kSample/s} \times 2\text{ch}$ のI/Qデータを取得している。

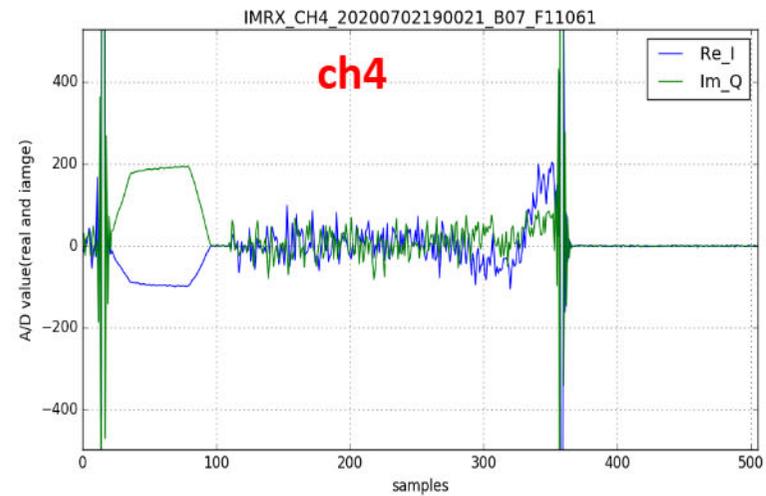
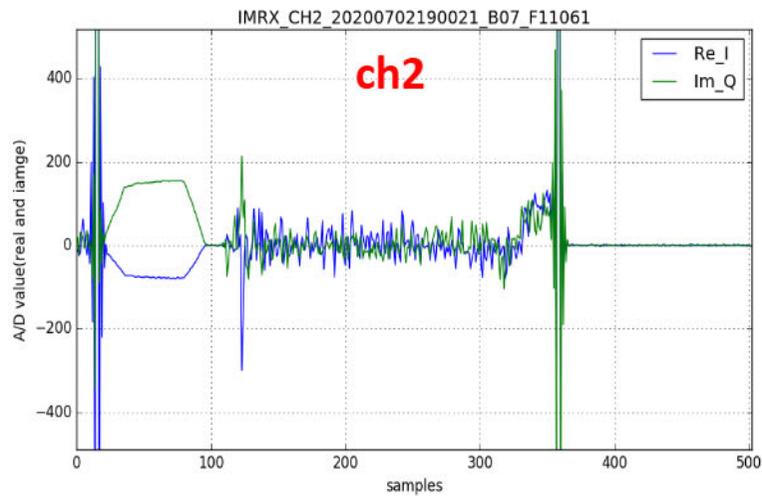
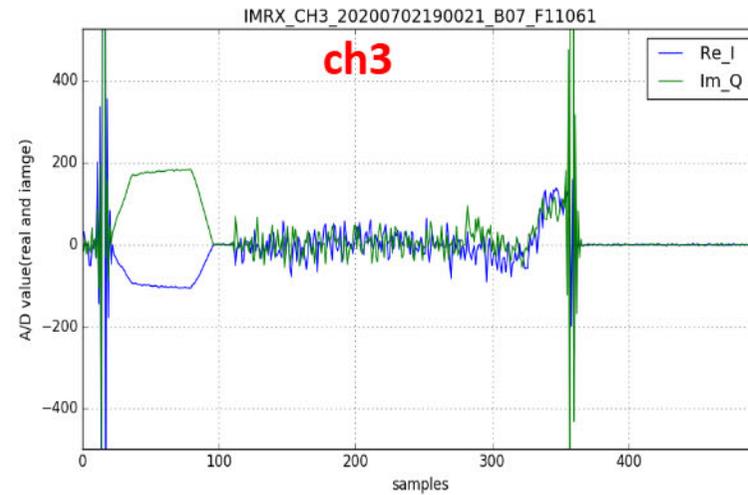
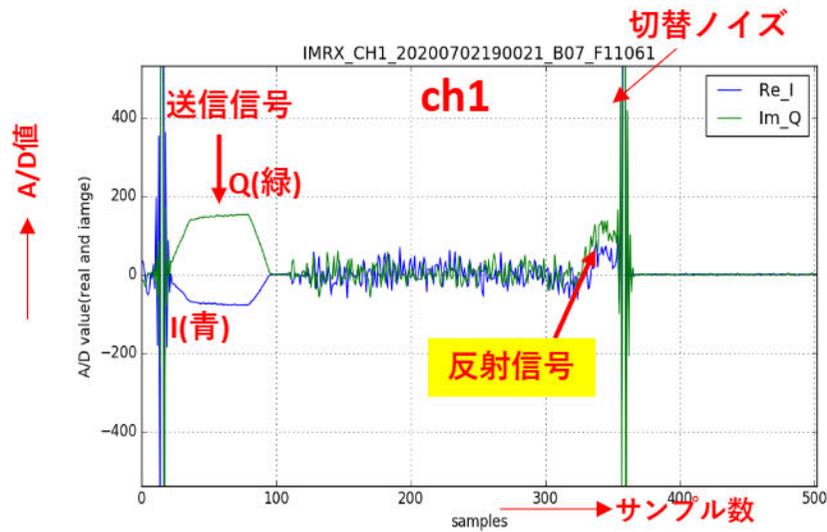
→イメージング受信機は、 $200\text{kSample/s} \times 20\text{ch}$ のI/Qデータを取得するので、膨大なデータ量が発生する。この膨大なデータをリアルタイム処理できるかどうかの問題。

## 4chイメージング受信機の現地試験

まずは、4chイメージング受信機を試作したので、試作機を第1HFレーダーに接続し現地試験を実施。

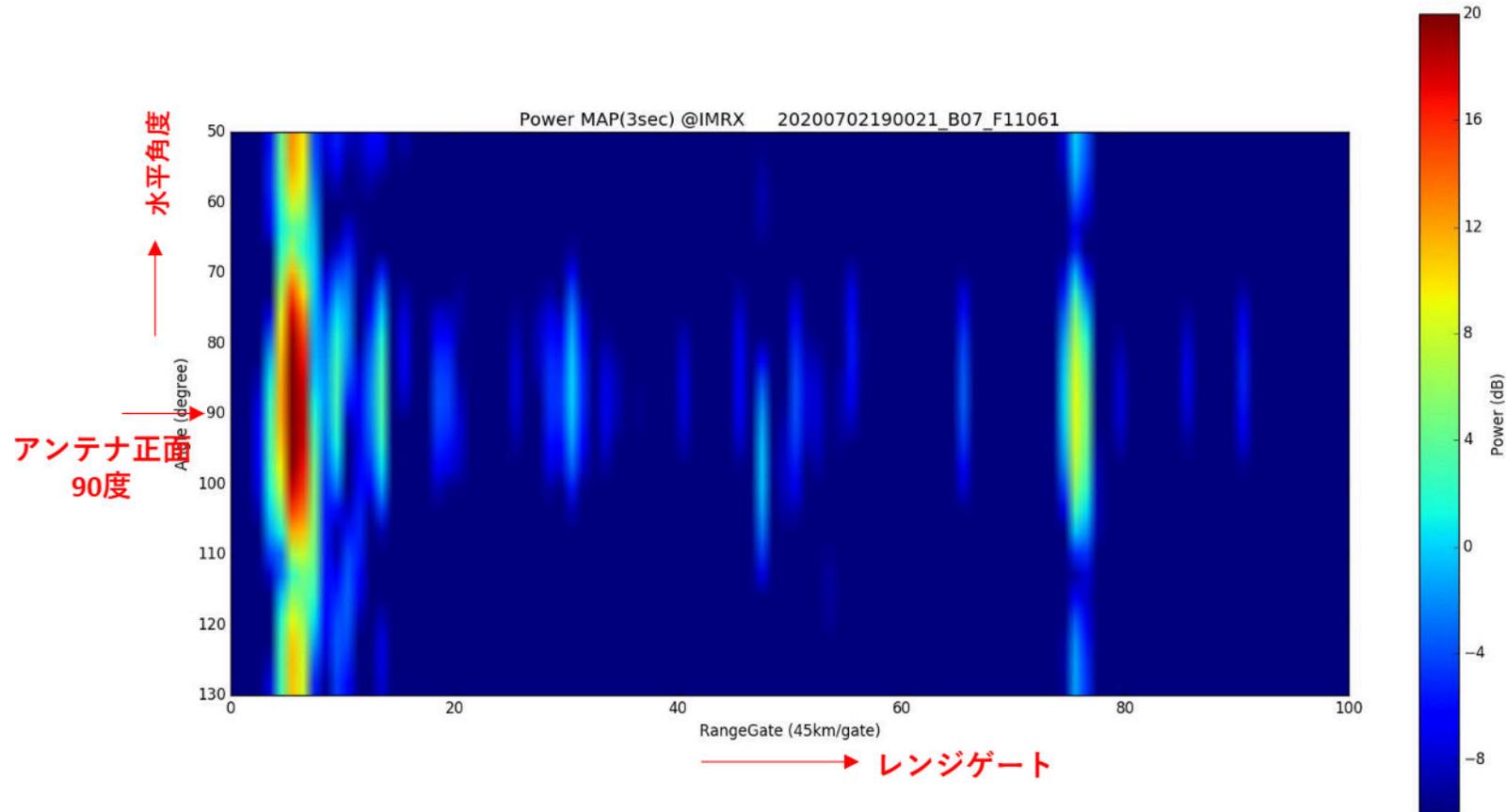
(HFレーダーは、11.07MHz\_normalscan運用)

# 実際に取得した4ch\_I/Qデータ波形例(200kSamples/s)



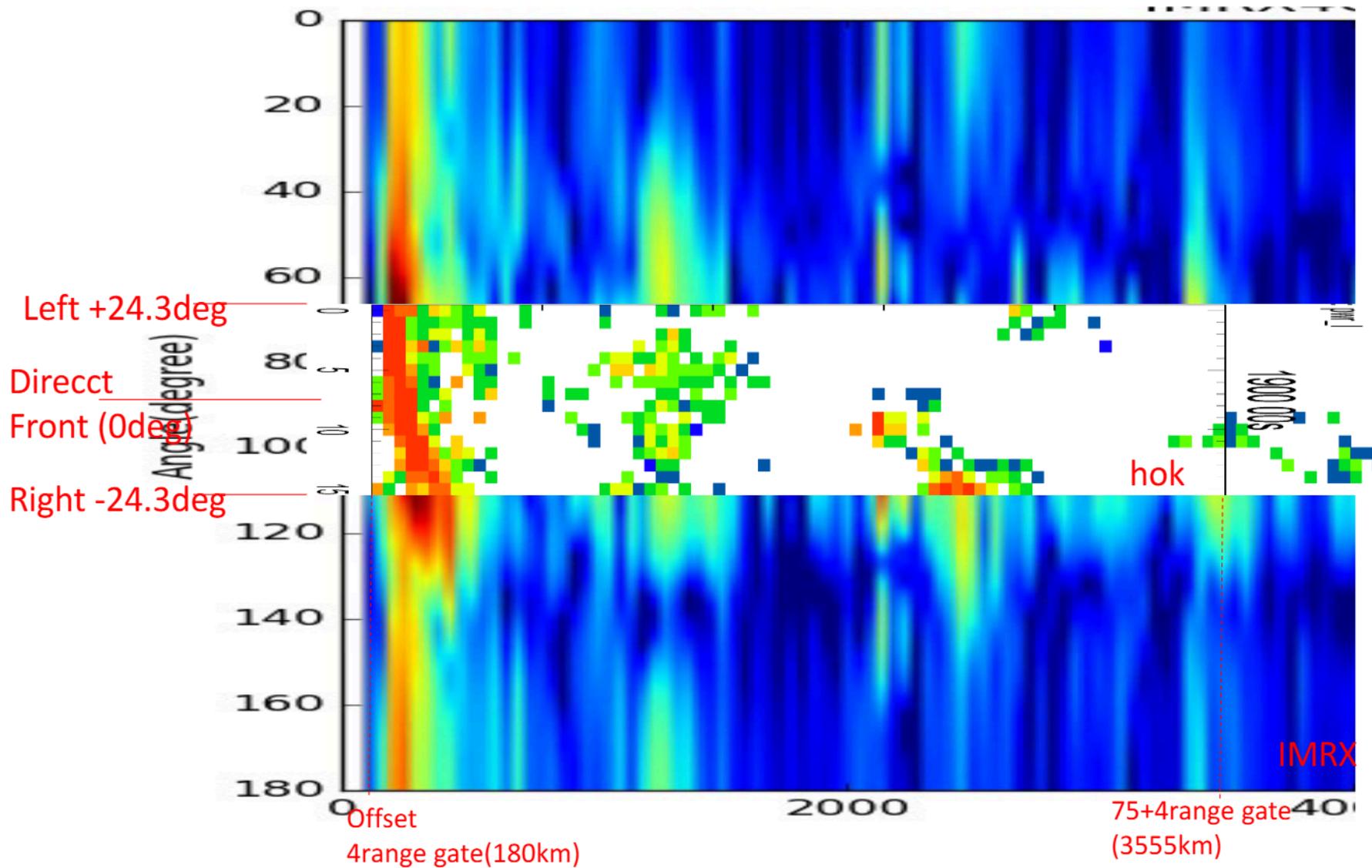
※3秒1ファイルのうち、最初の500サンプルを抽出した図

取得した3秒間の受信データにイメージング処理して、パワーマップにした図  
( Beam7 (90度方向)送信時)



※90度方向に、強力な反射信号がある。つまり受信機動作とイメージング処理  
(=方向マッピング処理)はうまく行っている。

Beam0~Beam15送信時の受信データを合成しパワーマップ図にして、HFレーダーのプロット図と比較(2020/7/2 19:00(UT)の1分間データ)



※4chイメージング受信機が正常に動作し、HFレーダー本体に影響を与えていない。

## 20chイメージング受信機の開発へ

4chイメージング受信機がうまくいったので、  
2022年から本格的に20chイメージング受信機の開発を始めた。  
目標は20本すべてのアンテナに受信機を接続しI/Qデータ取得をすること。

開発にあたって、予想される以下の壁があった。

- 10台のUSRPから20ch\_I/Qデータ(=16Mbyte/sec)を安定して収集できるのか？
- 収集したデータをリアルタイムでイメージング処理できるのか？
- 高周波アンプなど安定したハードウェアを製作できるのか？

## 開発にあたって予想された問題点について

### 問題点はほぼ解決した。

- USRPから20ch\_I/Qデータを安定して収集できるのか？  
→問題なくできた。
- 収集したI/Qデータをリアルタイム処理できるのか？  
→処理プログラムを工夫することで解決できた。  
(具体的には処理角度範囲を絞る。角度ステップを大きくする。  
マルチプロセス処理を入れるなど。)
- 高周波アンプなど安定したハードウェアを製作できるのか？  
→苦労したが、試作を繰り返し何とか安定した。

## 現地試験

20chイメージング受信機が概ね出来たので、昨年11月、第1HFレーダーに接続して現地試験を実施。

(HFレーダーは、10.81MHz\_normalscan運用)

- ・今回は以下の3つの送信モードで20chイメージング受信機を動した。
  - ①通常のnormalscanモードで、1分毎に送信をBeam15~Beam0に振る。
  - ②normalscanモードであるが、送信方向を正面(Beam7)に固定 (PM設定変更) 。
  - ③normalscanモードであるが、広角度送信ビームに固定 (PM設定変更) 。

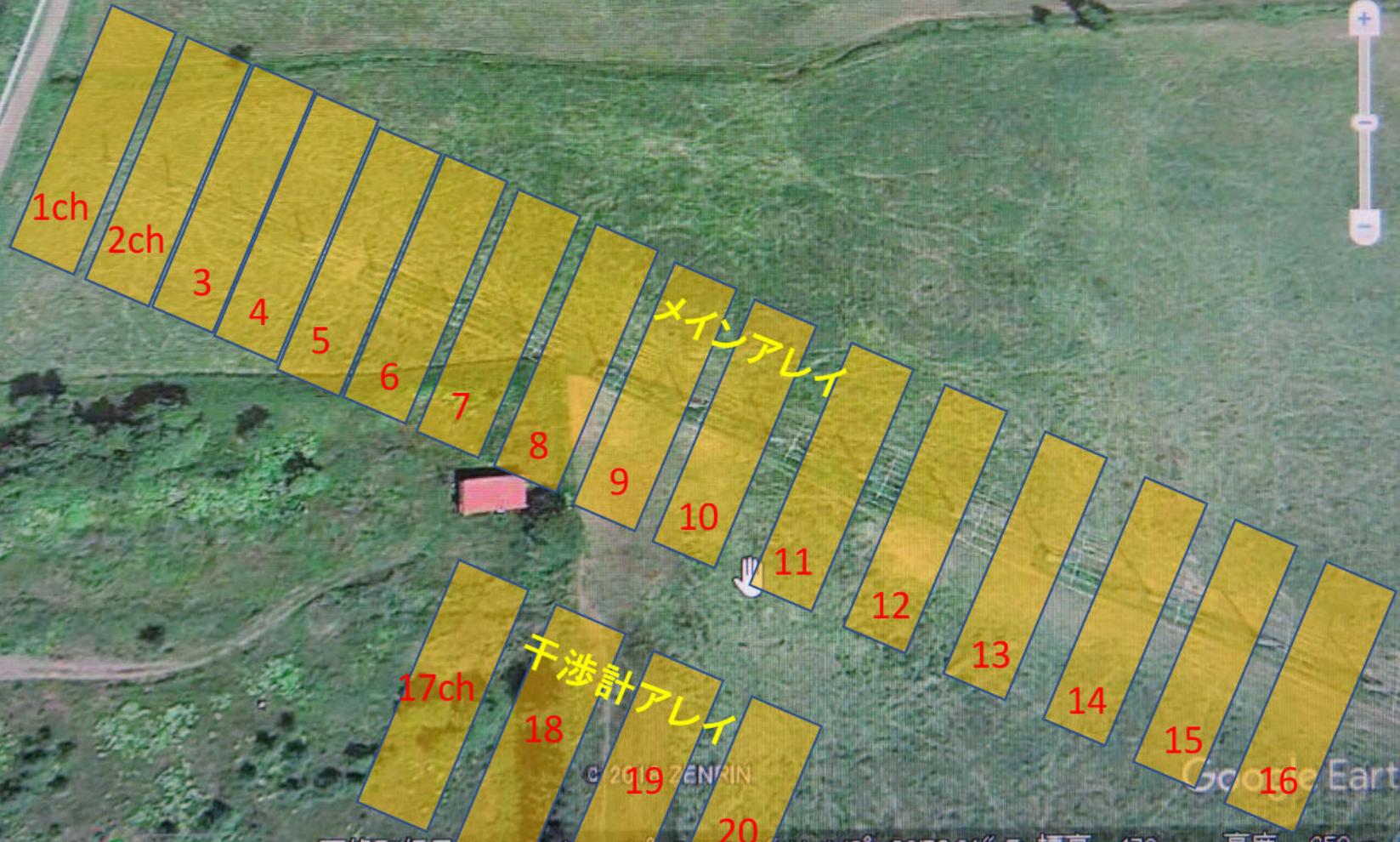
※いろいろ条件を変えて送信をする理由は、どれが最適な送信条件なのかを検証するため。

# アンテナと受信ch番号の関係

(第1レーダー上空写真)

北

西



## 20chイメージング受信機の動作は概ね良好だった

※3つの送信モードの観測時間帯は以下となる。

①通常のnormalscanモードで、1分毎に送信をBeam15~Beam0に振る。

→2025/11/28 10:15:31(UT)～ 2025/11/29 03:47:46(UT)

②通常のnormalscanモードであるが、フェーディングマトリックスの設定を変更し、送信方向をBeam7に固定。

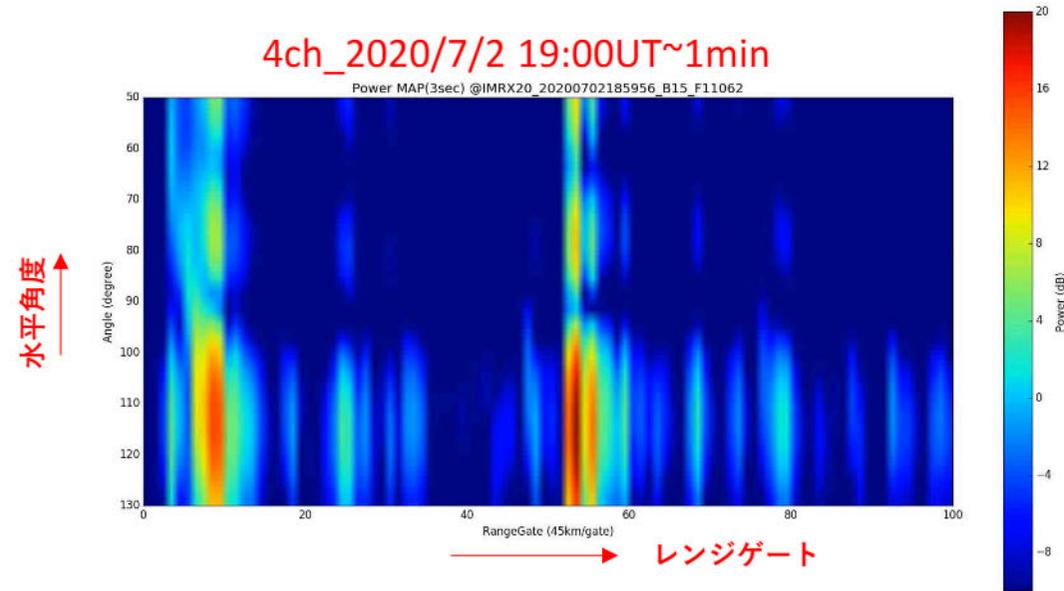
→2025/11/29 05:39:09(UT)～ 2025/11/30 00:37:46(UT)

③通常のnormalscanモードであるが、フェーディングマトリックスの設定を変更し、広角度送信になるようにする。

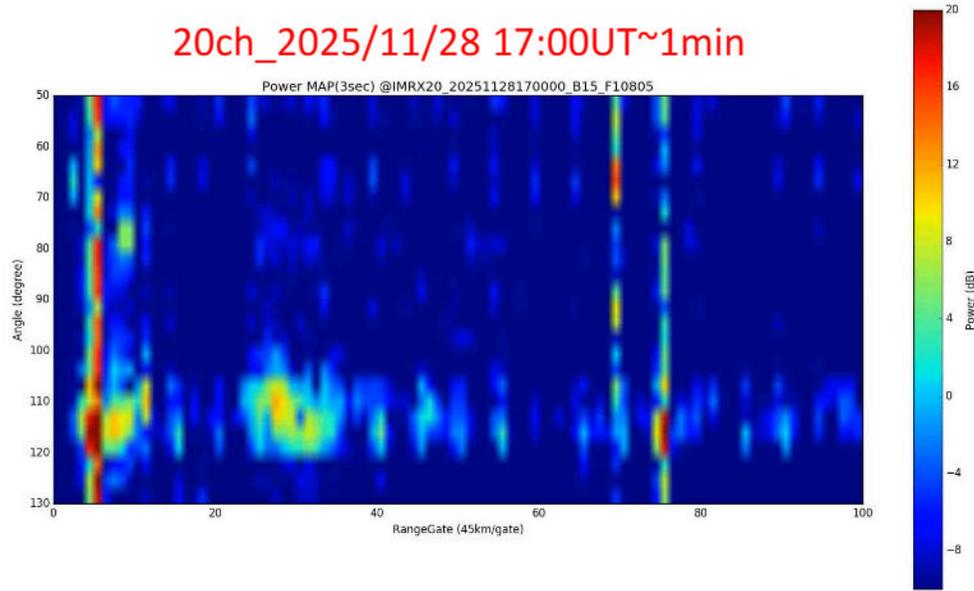
→2025/11/30 01:35:00(UT)～ 2025/12/1 23:06:46(UT)

## 20chイメージング受信機の実データ処理例

# 送信ビームを振った時の 4chと20chのパワーマップを 比較



※20chの方が角度分解能  
が向上している。

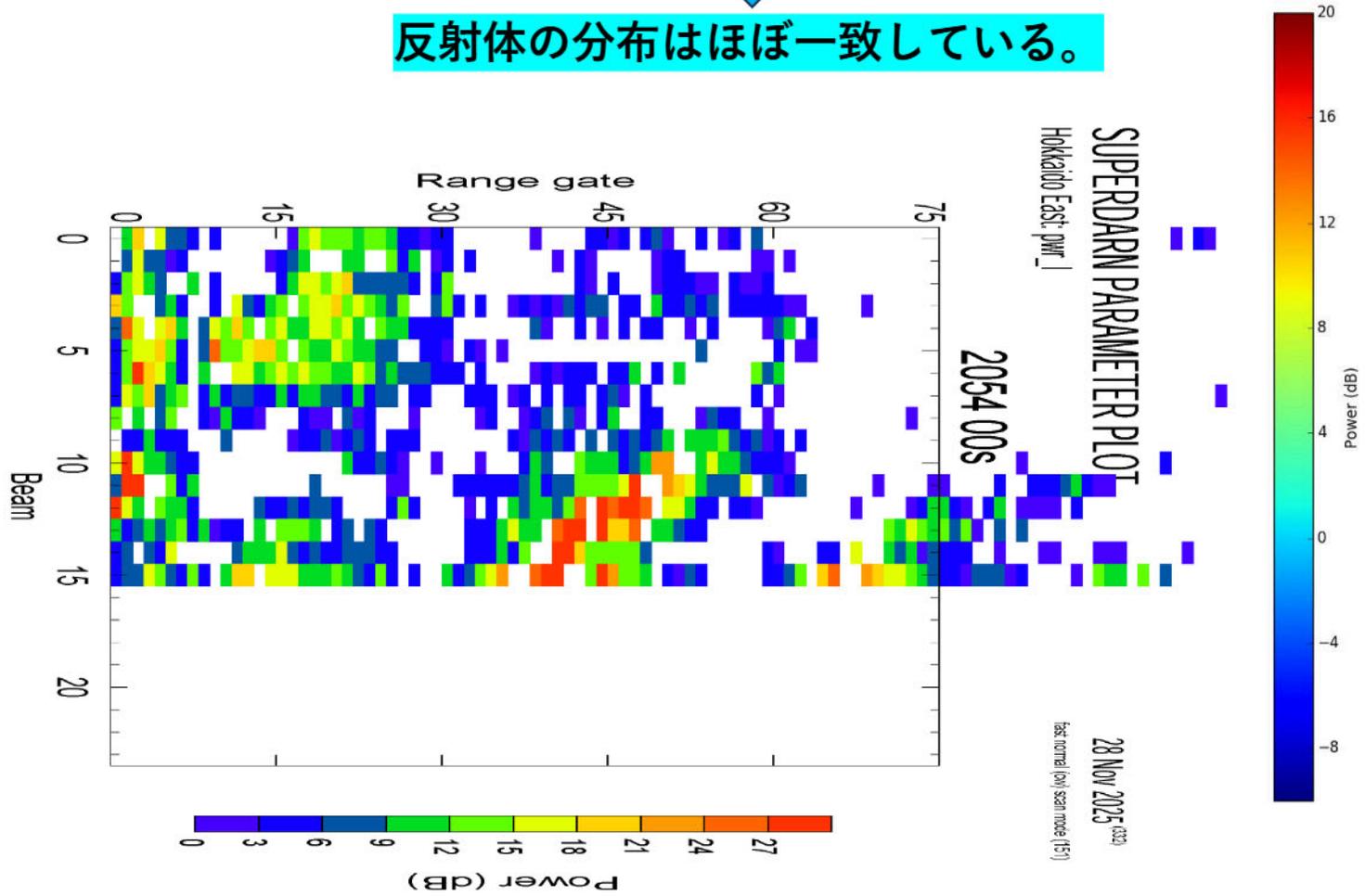


(両図とも 3 秒積分)

20ch\_IMRXのパワーマップ(Beam7送信/3秒積分)とレーダープロット(1分間)を比較



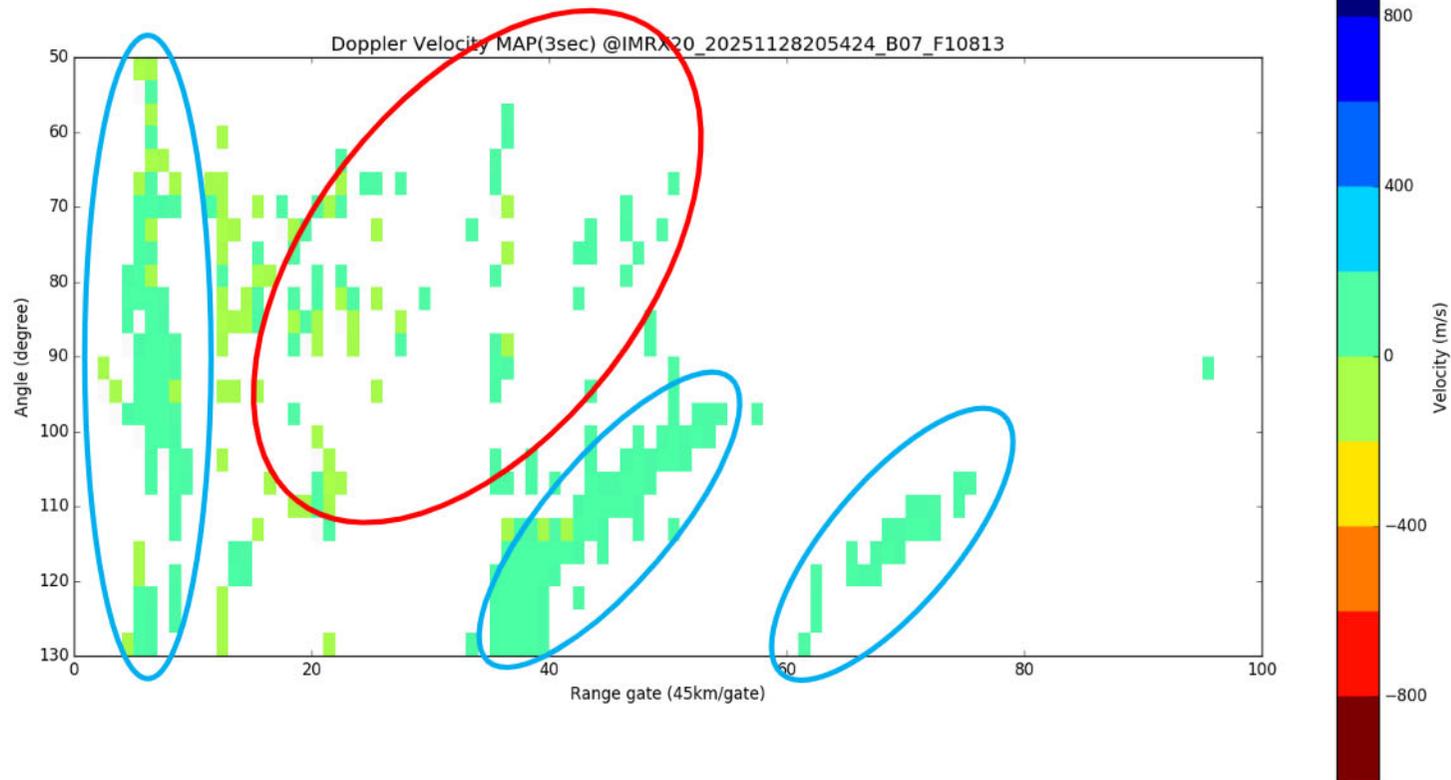
反射体の分布はほぼ一致している。



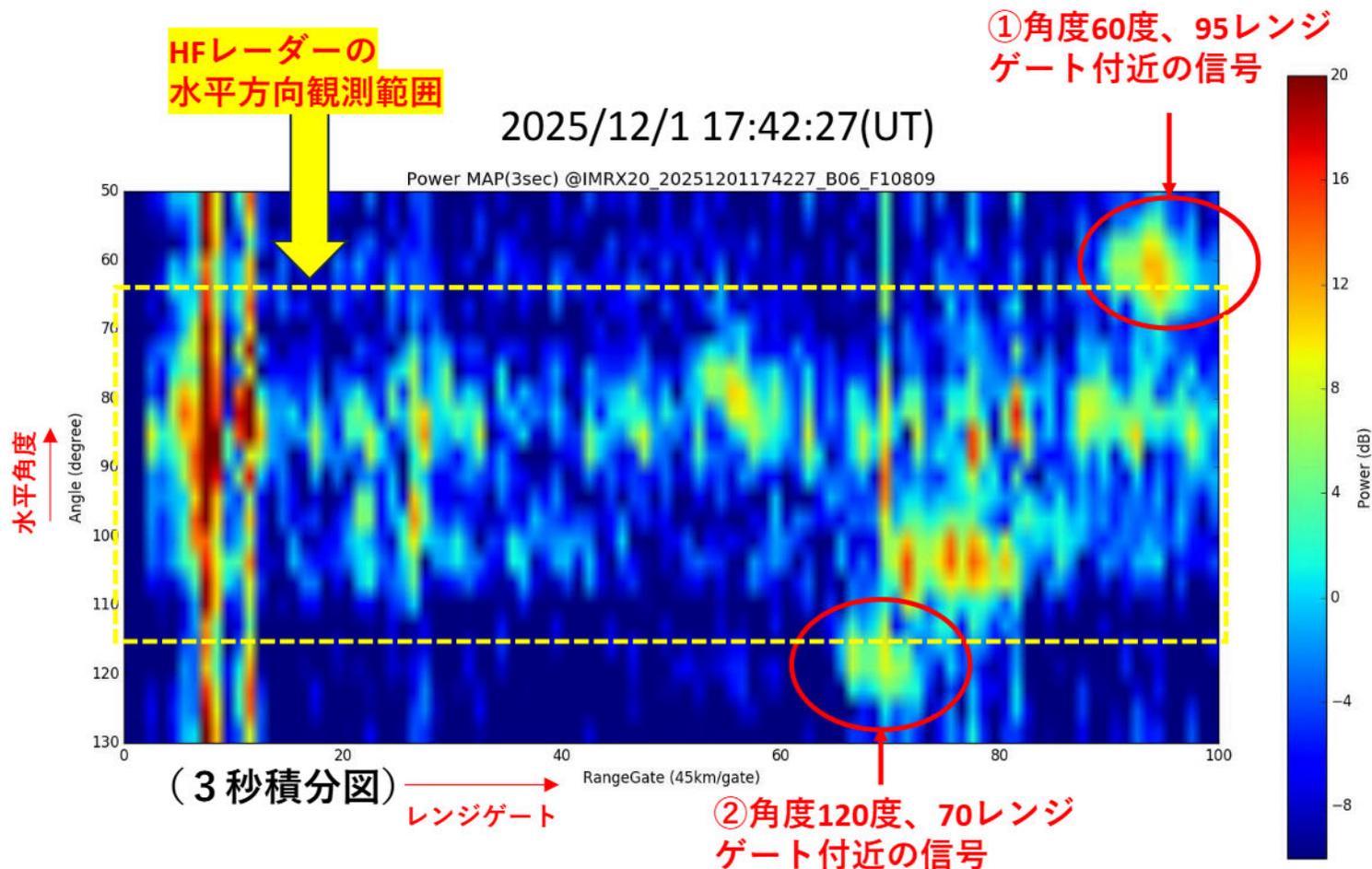
同条件(3秒積分)で20ch\_IMRXのドップラー速度も求めてみる

青部分は一致しているように見えるが、赤部分は計算できていない。

積分時間が足りない？



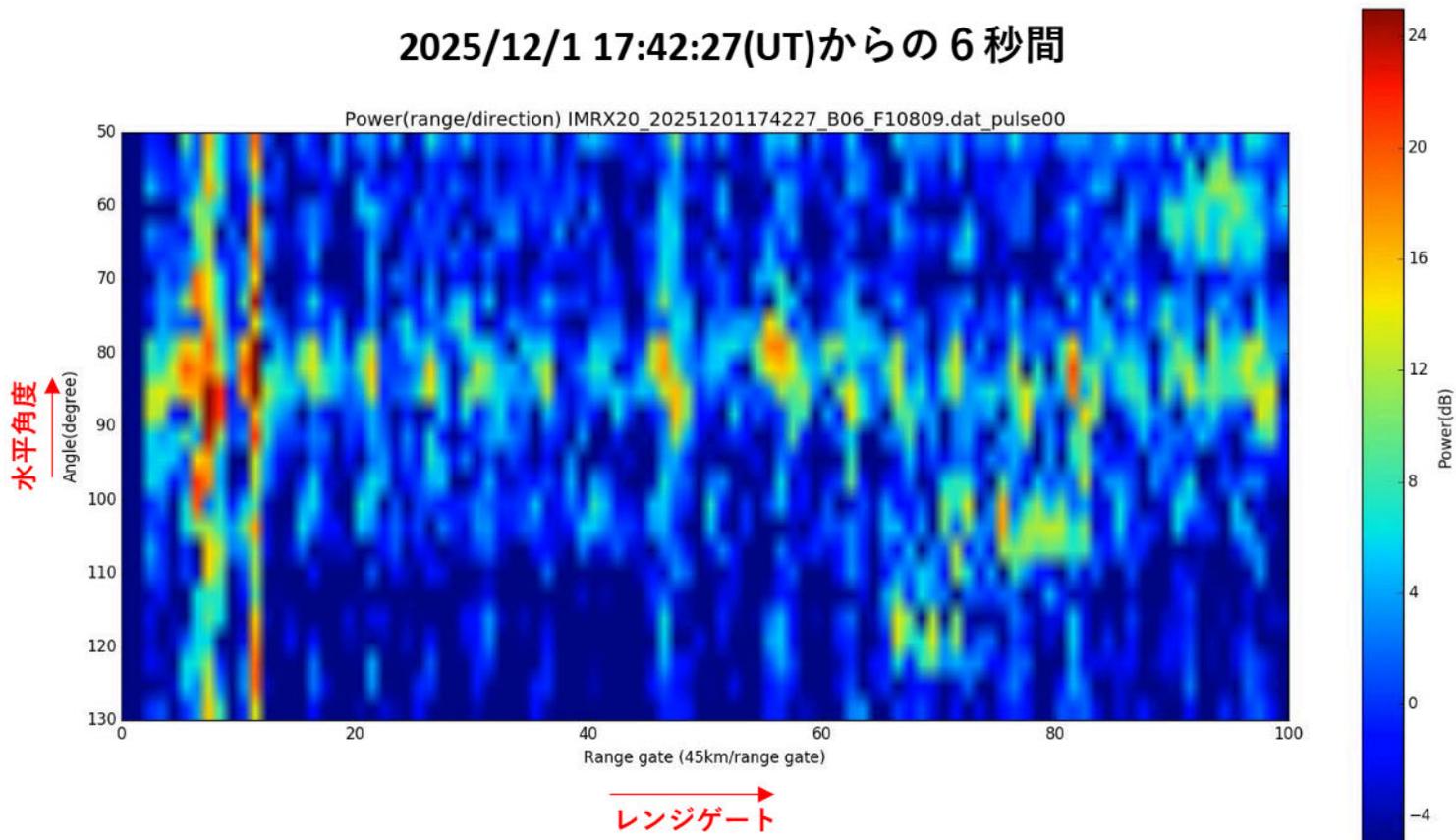
# 広角度送信時のパワーマップ図



※反射強度が強い場合、この図のように角度60度95レンジゲート(4275km)や、  
角度120度70レンジゲート(3150km)の反射波が見える場合がある。

広角度送信の方が水平角方向に観測範囲が広がるかもしれない。

1 パルスシーケンス毎(100ms毎)に処理したパワーマップ図を動画にしてみる。

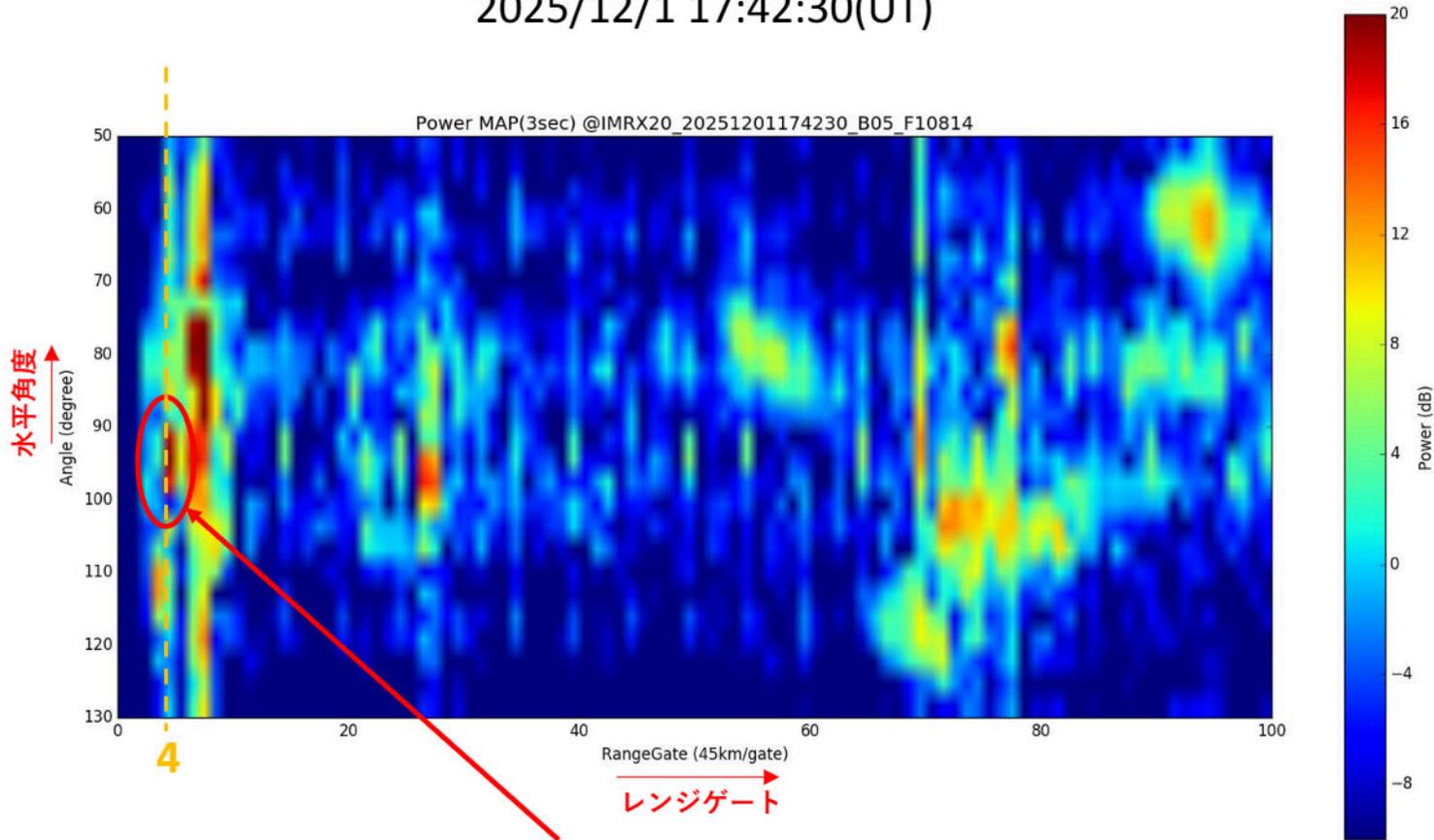


100msの時間分解能では、S/Nは悪くなるが、ある程度強い信号の存在は確認できる。

## 仰角方向処理（例1）

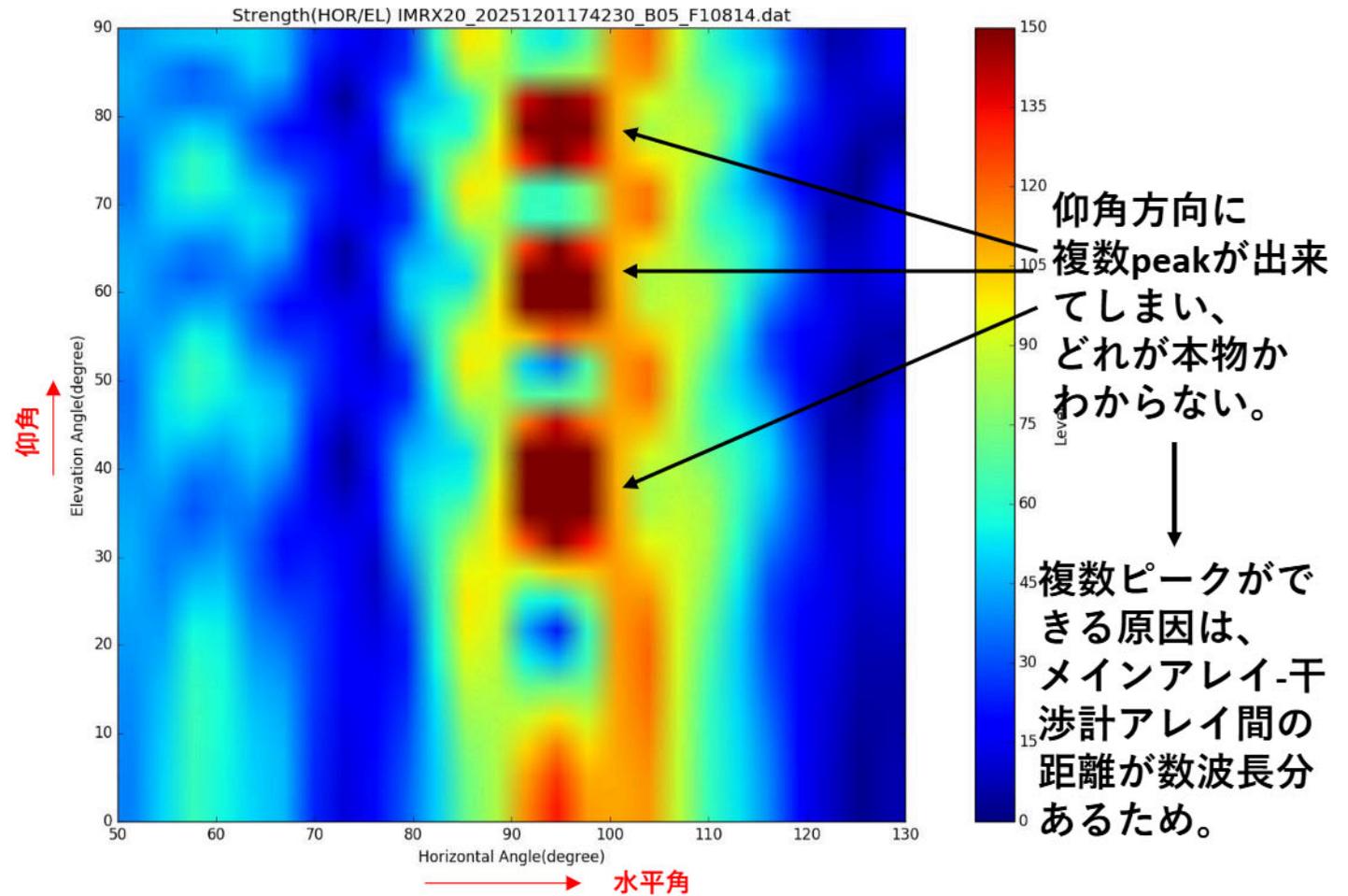
※メインレーダーと干渉計レーダーを使って、仰角方向のマッピング図を作ってみる。

2025/12/1 17:42:30(UT)



この信号をレンジゲート4で切り出して、水平角/仰角マッピング処理をする。

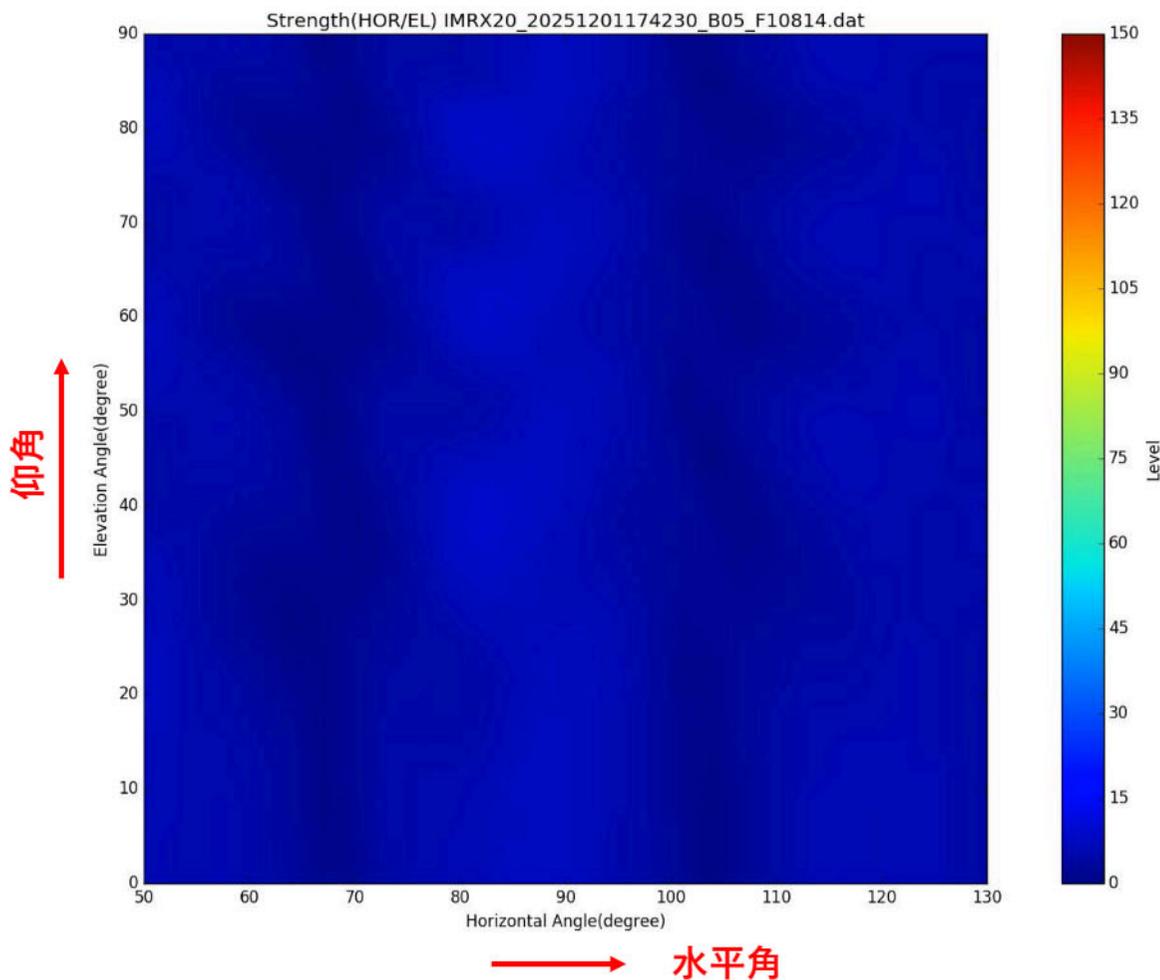
# 仰角方向処理例（例1）



## 仰角方向処理（例1）

※水平角/仰角マッピングを1パルスシーケンス毎(100ms毎)に処理して動画にする。2025/12/1 17:42:30(UT) レンジゲート4 3秒間

短時間の出現で  
しかも反射範囲が  
狭いので、おそらく  
流れ星だろう。



## 【まとめ】

- ・ HFレーダー連動型20chイメージング受信機を開発した。
- ・ 現地でレーダー本体と接続し、概ね良好なデータ取得ができた。
- ・ 20chイメージング受信機データとレーダーデータのパワー分布を比較し、概ねの一致を確認した。
- ・ 20chイメージング受信機では、最速100msの時間分解能が可能であることを確認した。

## 【今後の課題】

- 若干、動作に不安定さが残るので、その原因と対策。
- データ処理時の積分時間の最適化。
- ドップラー速度の処理方法の改善。
- 現在のHFレーダーデータとの整合性をどうするか。  
→変換プログラムを作成？
- 広角度送信ビーム用の送信信号もUSRPで生成する？  
(HFレーダーを完全に置き換える)
- 大量に生成されるデータ収集をどうするか→5Gを利用？

以上です。