

衛星通信用サイトダイバーシティ 技術における気象データの活用

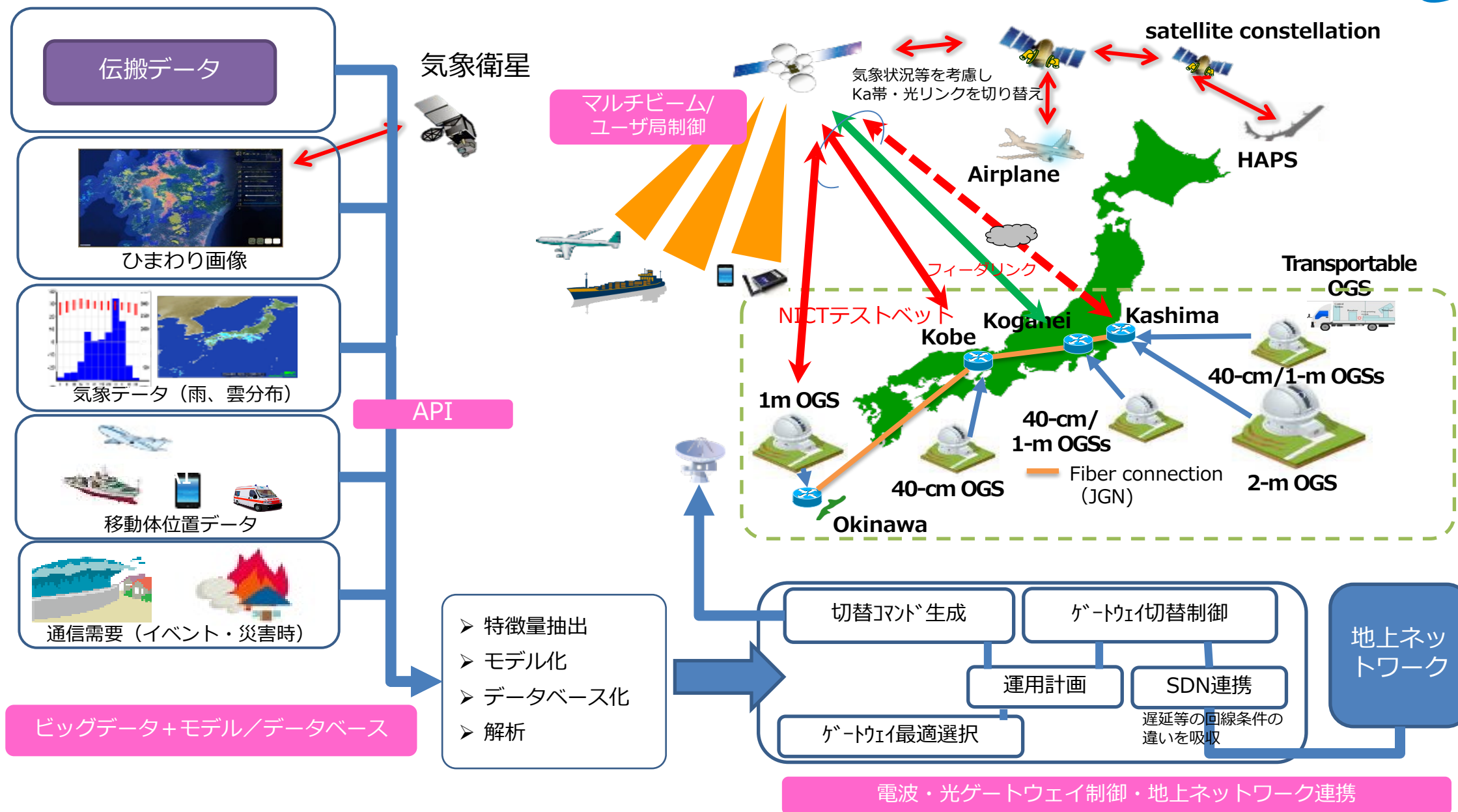
2025年7月29日

国立研究開発法人情報通信研究機構
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
辻 宏之

発表項目

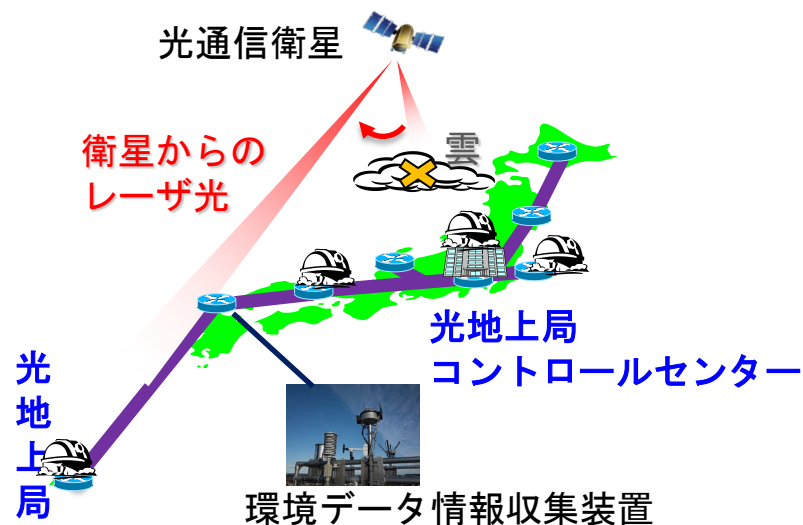
1. ビッグデータを活用したNTN統合制御システム
2. 光地上局テストベッド「HICALI-GATE」の整備
3. ひまわりデータと電波減衰量・光通信可能性に関する相関分析の実施
4. まとめ

ビッグデータを活用したNTN統合制御システム

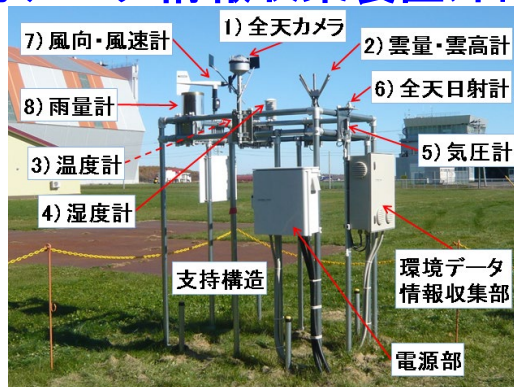


光衛星通信におけるサイトダイバーシティ技術

サイトダイバーシティの概念図



環境データ情報収集装置外観図

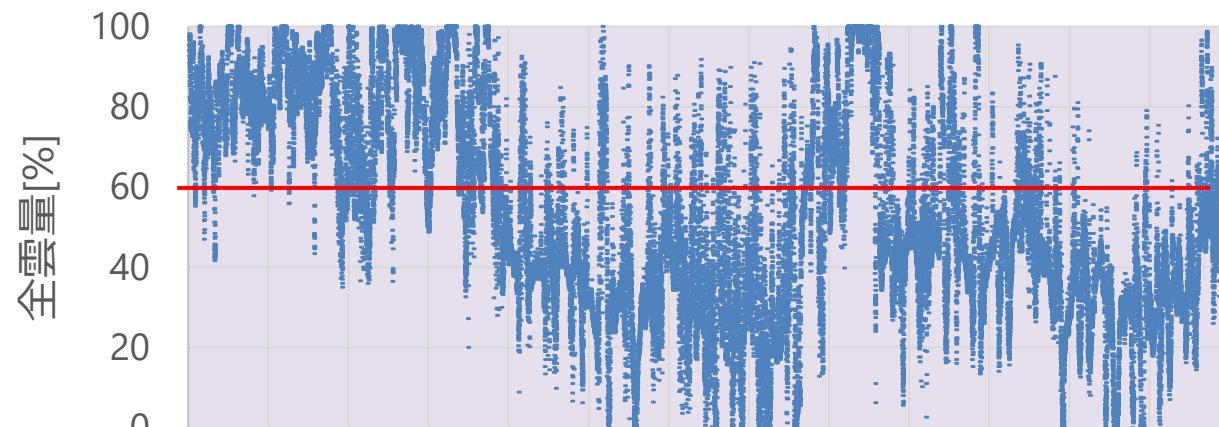


全国5局に環境データ情報収集装置を設置



光地上局を複数組み合わせることにより、ほぼ100%の衛星一地上光通信が可能

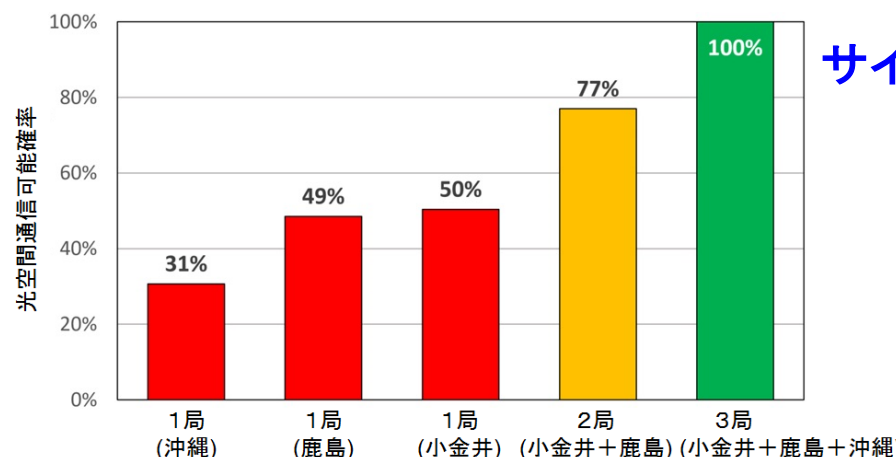
梅雨時の全雲量の変化例(沖縄観測点、2020年6月8日～7月17日)



2020年6月8日

7月17日

全雲量が60%以下であれば光衛星通信が可能と仮定した場合、65%の確立で沖縄単独で光衛星通信が可能

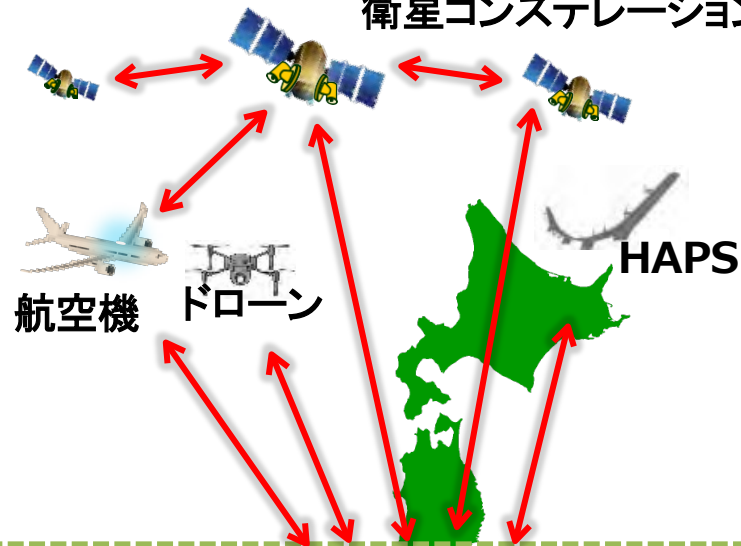


サイトダイバーシティ効果

2016年雨季
(2016.6/5～7/18) においてSOTAとのリンクが可能な確率の見積り例

光地上局テストベッド「HICALI-GATE」の整備

衛星コンステレーション



概要:

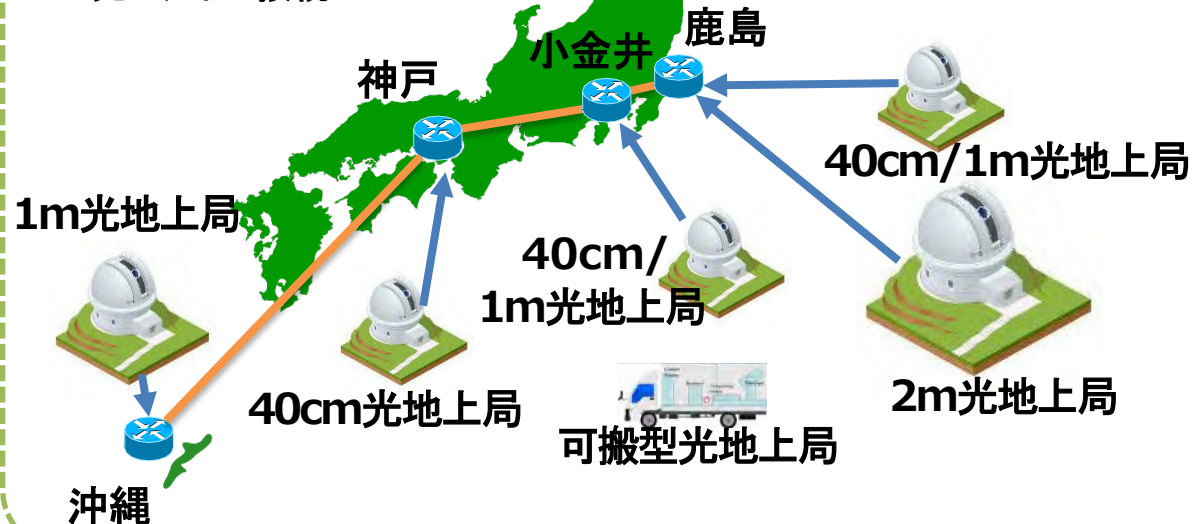
- NICTでは、民間事業者の宇宙ビジネス参入のための協創や衛星関連機器の開発等を共業しながら進められるように望遠鏡から構成される光地上局テストベッドを整備
- 地上から衛星搭載光学機器の評価や宇宙空間に存在する物体等の観測などに利用できる

宇宙関連ビジネスの創出、
新しい技術の創出、コミュニティの拡大

ユースケース:

- 様々な飛翔体への通信のテストベッド
- 衛星地上間QKDの実証
- LEOコンステレーション等のビジネスへの活用
- 新デバイスの試験・実証環境
- サイトダイバーシティの技術実証

— 光ファイバ接続



NICT光地上局ネットワークテストベッド

準備出来次第、潜在ユーザに対して利用開始予定

光地上局テストベッド『HICALI-GATE』の3つの特徴

- ①様々なユースケースに対応可能な光地上局
- ②光地上局間は10Gbps級高速ネットワークで接続
- ③光地上局は遠隔操作や集中制御が可能

2m光地上局

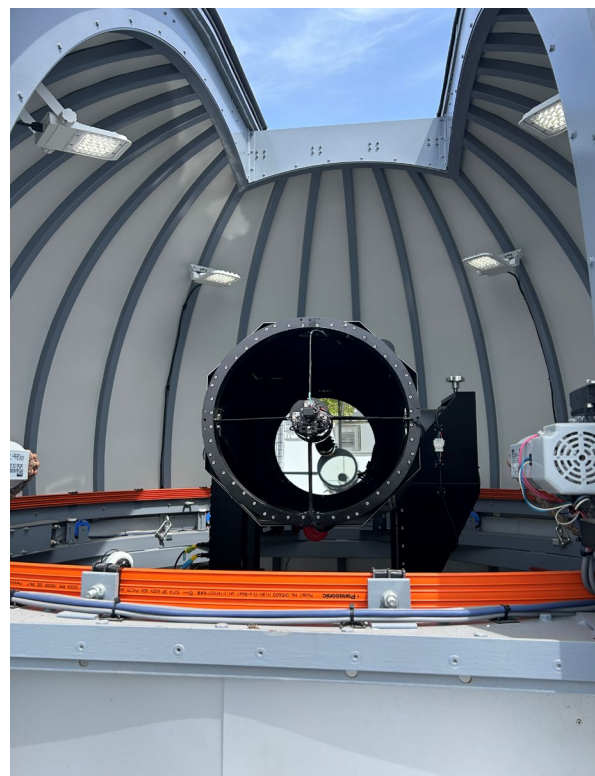
(2m望遠鏡@鹿島)



- 2m望遠鏡＋補償光学系
- 深宇宙通信への活用
- 100Gbps級光通信の実現のための技術開発

40cm光地上局

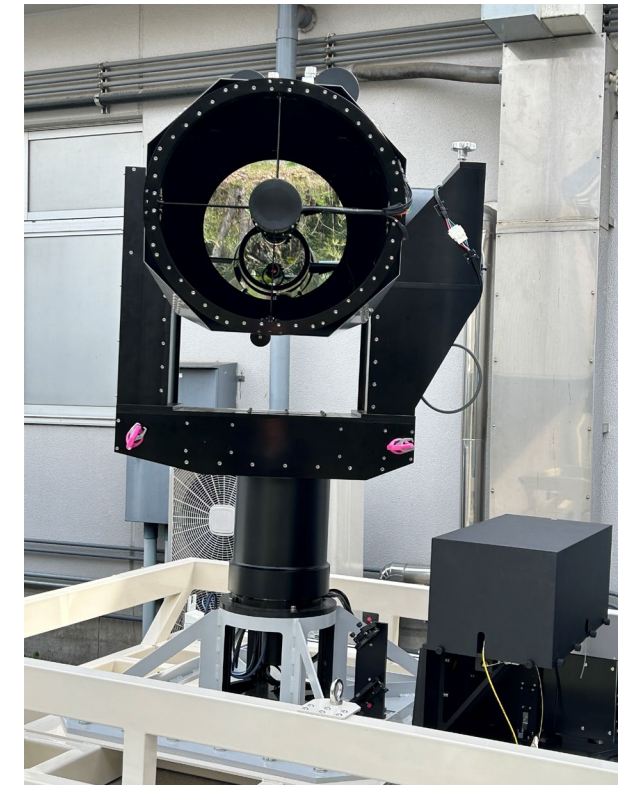
(40cm望遠鏡@小金井、鹿島、神戸)



- 自動追尾・自動捕捉機構
- ユーザの精追尾系や受信機の設置可能

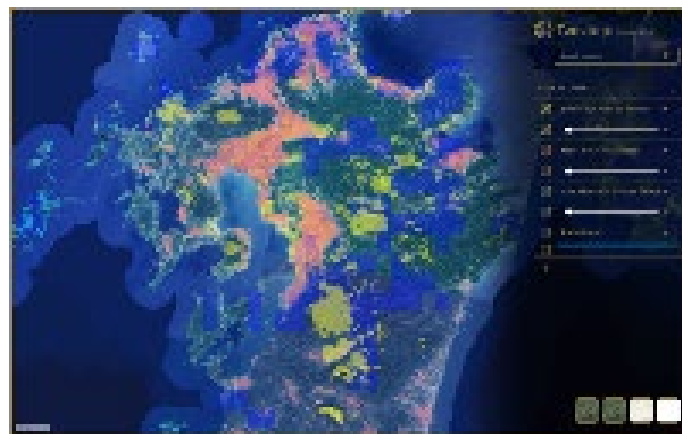
可搬型光地上局

(40cm望遠鏡@小金井)

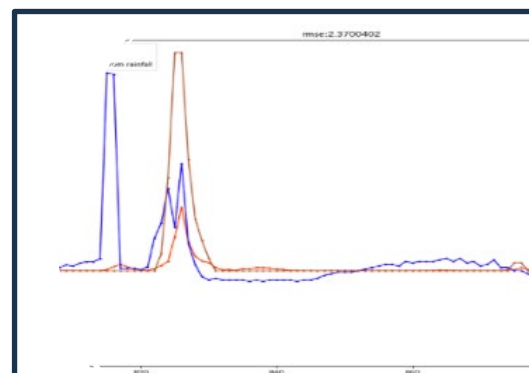


- 40cm望遠鏡＋精追尾系
- フレキシブルな設置が可能
- トラック2台で望遠鏡と制御系を整備

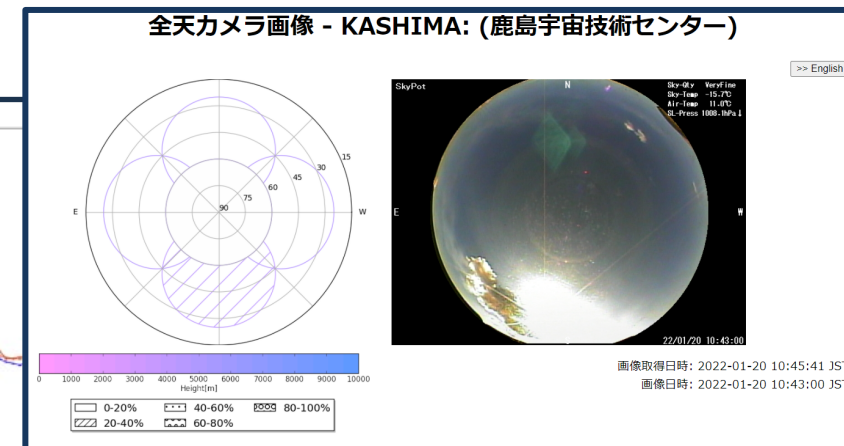
目的：衛星画像からKa帯電波減衰・光通信伝搬の予測



ひまわり衛星からの画像データ



Ka帯降雨減衰時系列データ@鹿島

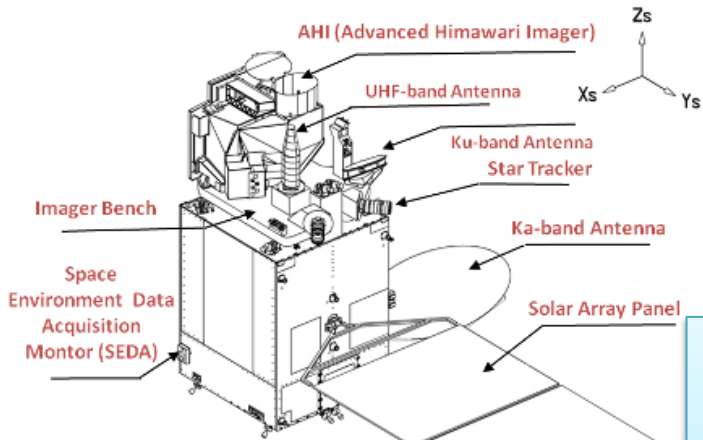


ひまわり画像情報と電波減衰・光空間通信との相関性・時系列予測

NTN通信のためのサイトダイバーシティ技術への情報

ひまわり8号・9号と放射計

- 静止気象衛星ひまわり8, 9号は, 標準データと呼ばれる画像データを一般に公開
- 最先端の観測技術を有する放射計である可視赤外放射計 AHI (Advanced Himawari Imager) と呼ぶ観測センサーを搭載



ひまわり8号・9号の外観
(概略図)



ひまわり衛星からの画像データ

https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/spsg_spacecraft.html

ひまわり9号の観測範囲と観測時間間隔とバンドごとの波長, 分解能, 用途

種別	観測領域	おおよその大きさ	観測間隔[分]
フルディスク観測	衛星から見える地球全体	衛星から見える地球全体	10
日本域観測(領域1)	北東日本	東西 2000km×南北 1000km	約2.5
日本域観測(領域2)	南西日本	東西 2000km×南北 1000km	約2.5
機動観測(領域3)	可変	東西 1000km×南北 1000km	約2.5

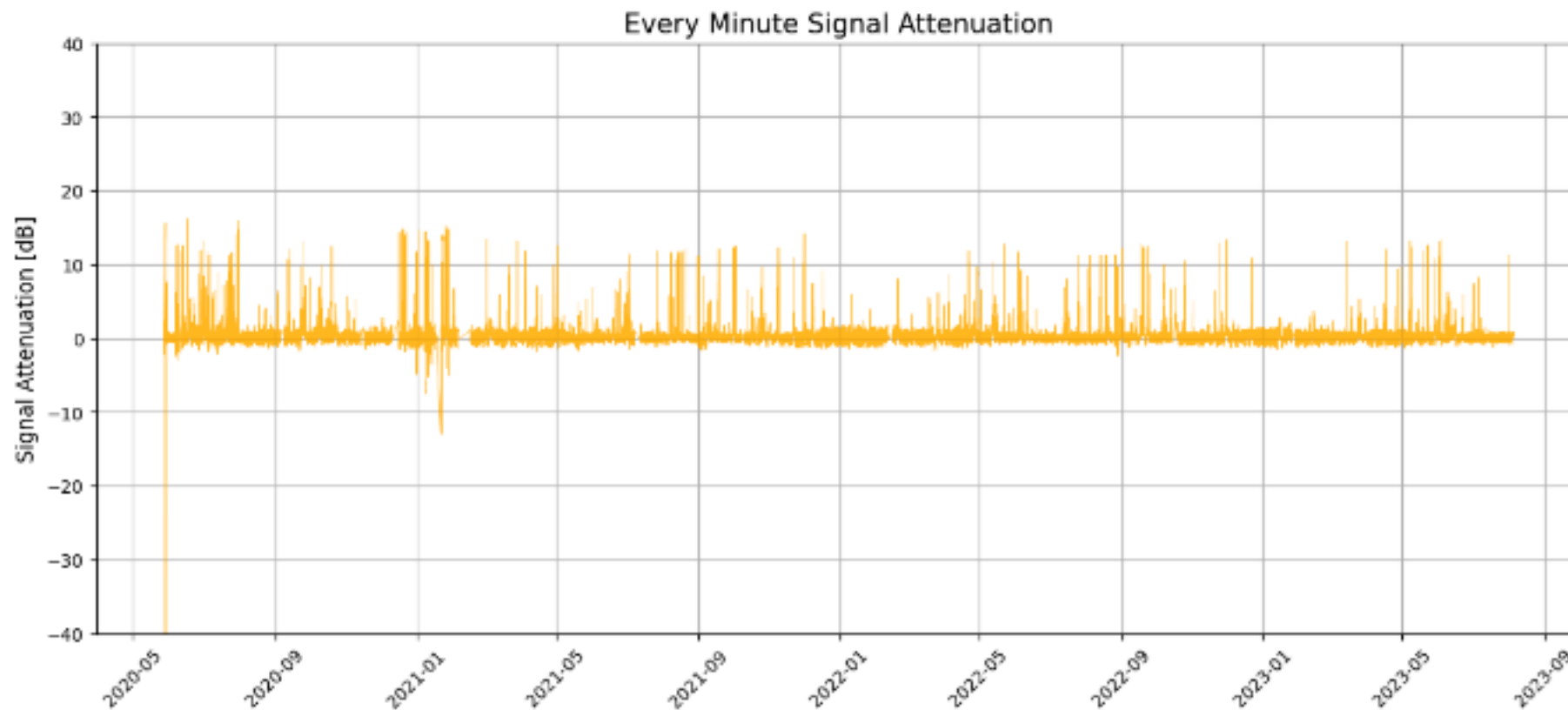
	バンド番号	中心波長(μm)	水平画素[km]	想定される用途の一例
可視	1	0.47	1	植生, エーロゾル, カラー合成画像
	2	0.51	0.5	植生, エーロゾル, カラー合成画像
	3	0.64	1	植生, 下層雲・霧, カラー合成画像
近赤外	4	0.86	1	植生, エーロゾル
	5	1.6	2	雲相判別
	6	2.3	2	雲粒有効半径
赤外	7	3.9	2	下層雲・霧, 自然火災
	8	6.2	2	上層水蒸気
	9	6.9	2	上中層水蒸気
	10	7.3	2	中層水蒸気
	11	8.6	2	雲相判別, SO ₂
	12	9.6	2	オゾン全量
	13	10.4	2	雲画像, 雲頂情報
	14	11.2	2	雲画像, 海面水温
	15	12.4	2	雲画像, 海面水温
	16	13.3	2	雲頂高度

電波減衰量データとひまわりデータ相関分析と使用データ

- **位置**：アンテナの位置 (35.956186, 140.662959) @NICT鹿島局
- **周波数**：Ka帯
- **期間**：2020-05-27 ~ 2023-08-04
- **ひまわり全バンド（計16バンド）データ**：1時間毎データ
- **前処理**：電波減衰量データをひまわりの時間分解能1時間毎に合わせて平均化

バンド	中心波長 (μm)	解像度 衛星直下点 (km)	想定される用途
1	0.46	1	植生、エアロゾル、B
2	0.51		植生、エアロゾル、G
3	0.64		下層雲・霧、R
4	0.86	1	植生、エアロゾル
5	1.6	2	雲相判別
6	2.3		雲有効半径
7	3.9	2	下層雲・霧、自然火災
8	6.2		上・中層水蒸気量
9	7.0		中層水蒸気量
10	7.3		中・下層水蒸気量
11	8.6		雲相判別、SO ₂
12	9.6		オゾン全量
13	10.4		雲滴径、雲頂情報
14	11.2		雲滴径、海面水温
15	12.3		雲滴径、海面水温
16	13.3		雲頂高度

図：ひまわりFLDK格納データ



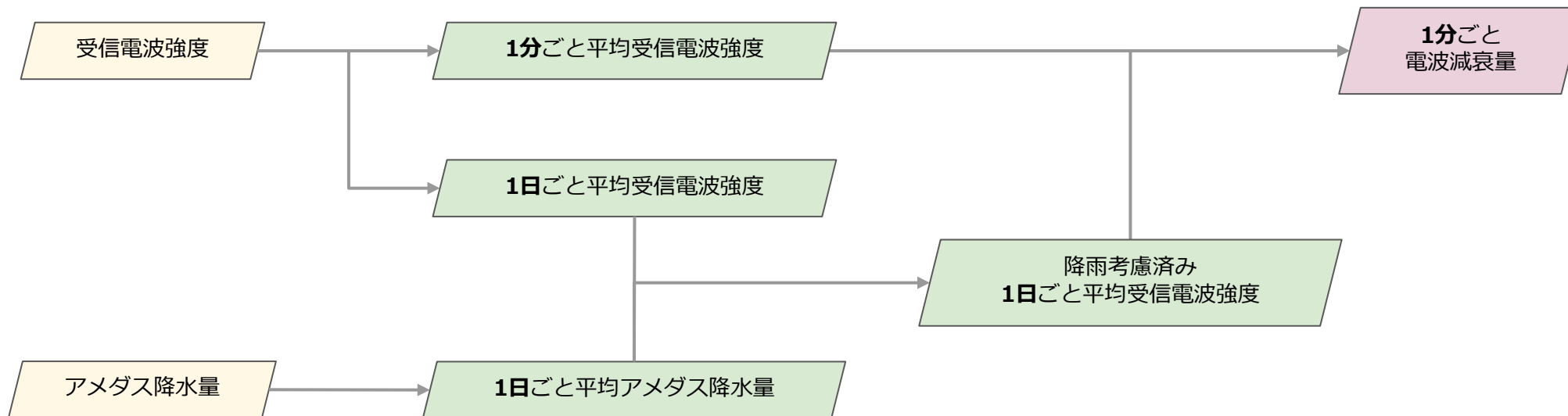
図：1分ごとの電波減衰量

電波減衰量の算出方法と算出手順

データ取得

前処理

電波減衰量算出



<受信電波強度>

- 受信電力データの構成：年/月/日/時/分/秒/受信電力（単位：dBm）
- 期間：2020-05-27 16:51 ~ 2023-08-04 16:15
- 内訳：全体：1,676,124 / 欠損：75,375 (4.5%)
- 位置：35.956186, 140.662959

<降雨データ>

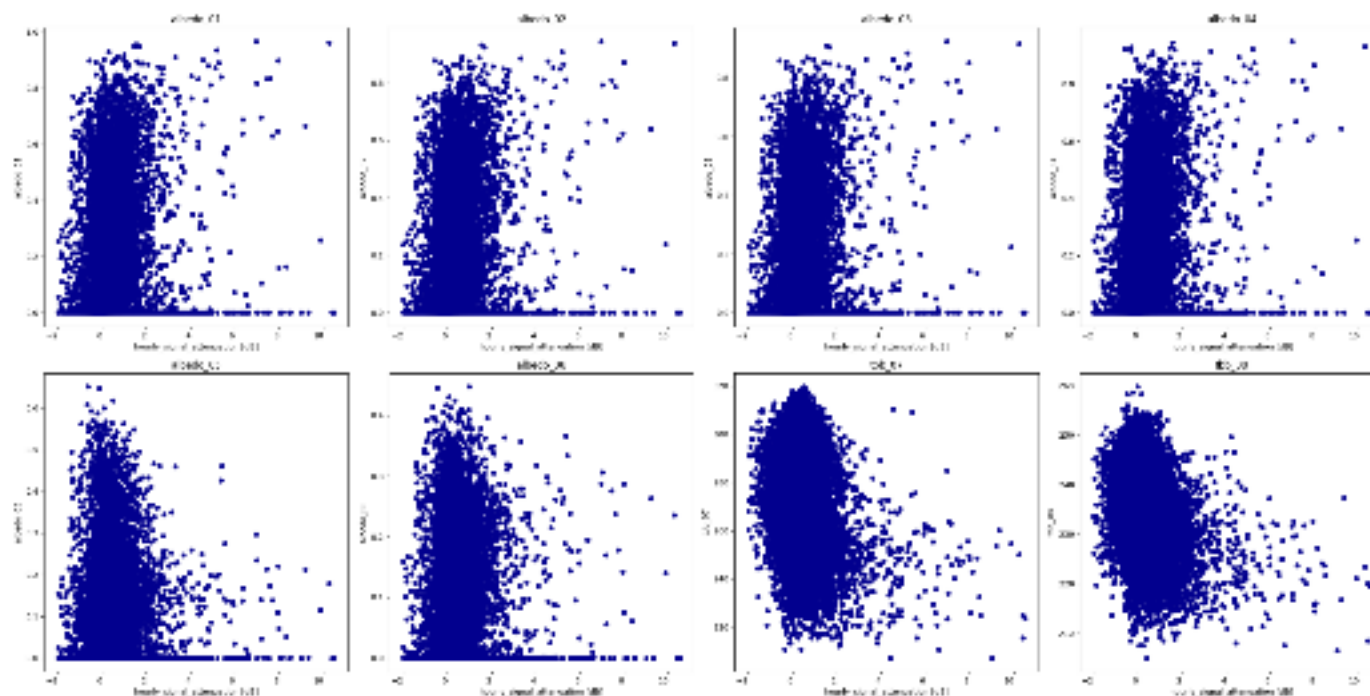
- アメダス
- 期間：左記同様（10秒ごと）
- 位置：アメダス鹿嶋（40406）
35.963, 140.622

電波減衰量データとひまわりデータの相関分析結果 (バンド1～8)

- 全体的に相関係数の絶対値は増加
- Band10（中・下水蒸気量）が絶対値として最大の相関係数

表：各バンドと電波減衰量の相関

バンド名	想定用途	相関係数	カット前 相関係数
albedo_01	植生/エアロゾル/B	0.263	0.179
albedo_02	植生/エアロゾル/G	0.259	0.177
albedo_03	下層雲・霧/R	0.255	0.176
albedo_04	植生/エアロゾル	0.262	0.177
albedo_05	雲相判別	0.201	0.136
albedo_06	雲有効半径	0.231	0.154
tbb_07	下層雲・霧/自然火災	-0.187	-0.140
tbb_08	上・中層水蒸気量	-0.260	-0.173



図：各バンド値と電波減衰量の1対1プロット

電波減衰量データとひまわりデータの相関分析結果 (バンド9～16)

- 全体的に相関係数の絶対値は増加
- Band10(中・下水蒸気量)が絶対値として最大の相関係数

表: 各バンドと電波減衰量の相関

バンド名	想定用途	相関係数	カット前 相関係数
tbb_09	中層水蒸気量	-0.295	-0.198
tbb_10	中・下水蒸気量	-0.317	-0.214
tbb_11	雲相判別/SO2	-0.276	-0.194
tbb_12	オゾン全量	-0.242	-0.171
tbb_13	雲画像/雲頂情報	-0.273	-0.192
tbb_14	雲画像/海面水温	-0.275	-0.192
tbb_15	雲画像/海面水温	-0.280	-0.195
tbb_16	雲頂高度	-0.287	-0.195

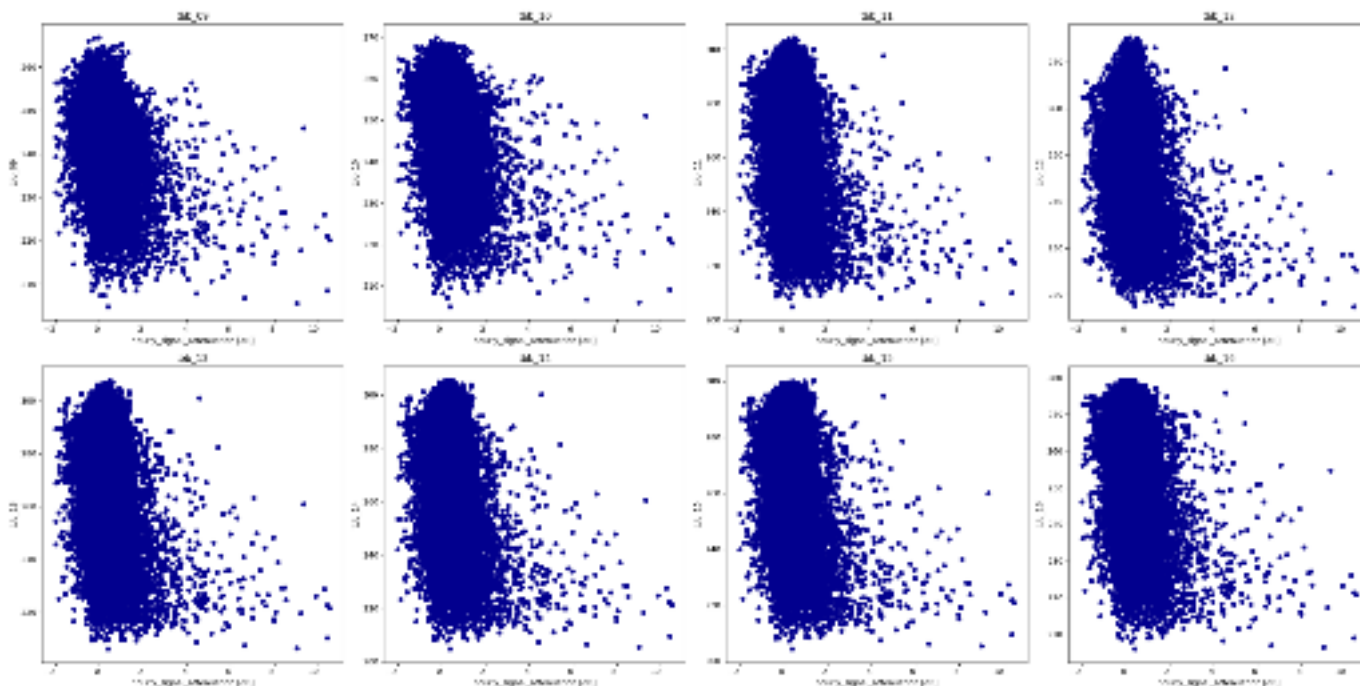


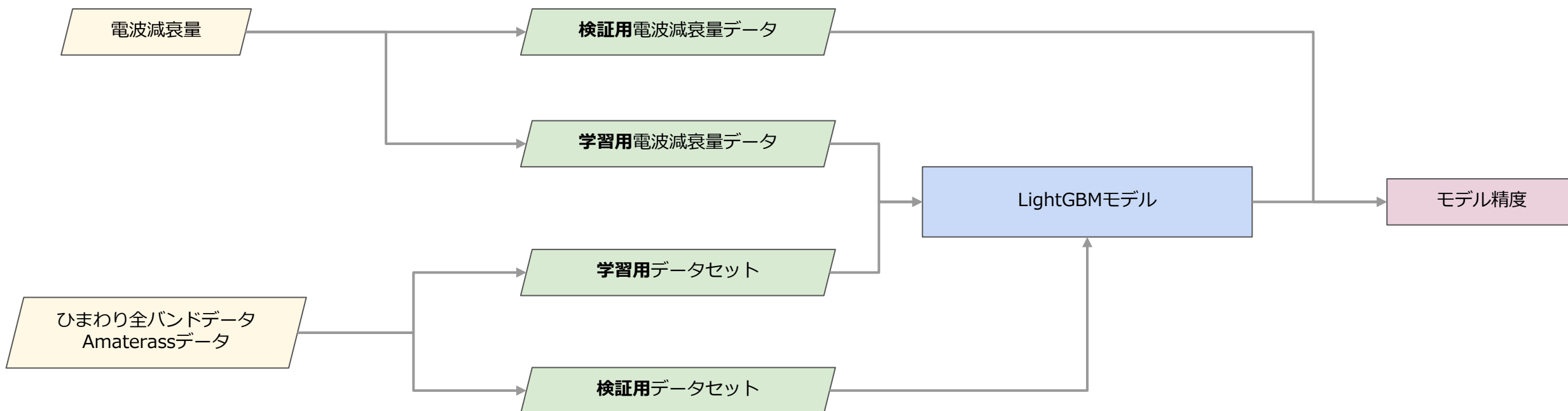
図: 各バンド値と電波減衰量の1対1プロット

LightGBM の概要と使用データ

- LightGBMを用いて、ひまわり+Amaterassデータによって電波減衰量を再現できるか検討
- 全データ（カットオフ済15,290時間分）を1時間おきに成形
- 学習データ：2020年～2022年のデータ 75.1 [%]（11,484時間分）
- 検証データ：2023年の8月までのデータ 24.9 [%]（3,806時間分）

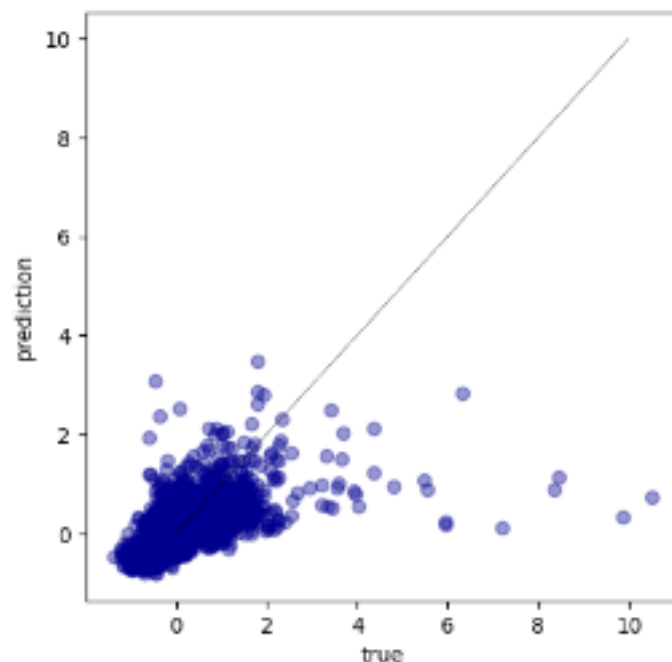
LightGBM, Light Gradient Boosting Machine

- ・機械学習における分析アルゴリズム
- ・与えられたデータから、目的となる変数を表現する「教師あり学習」の1つ

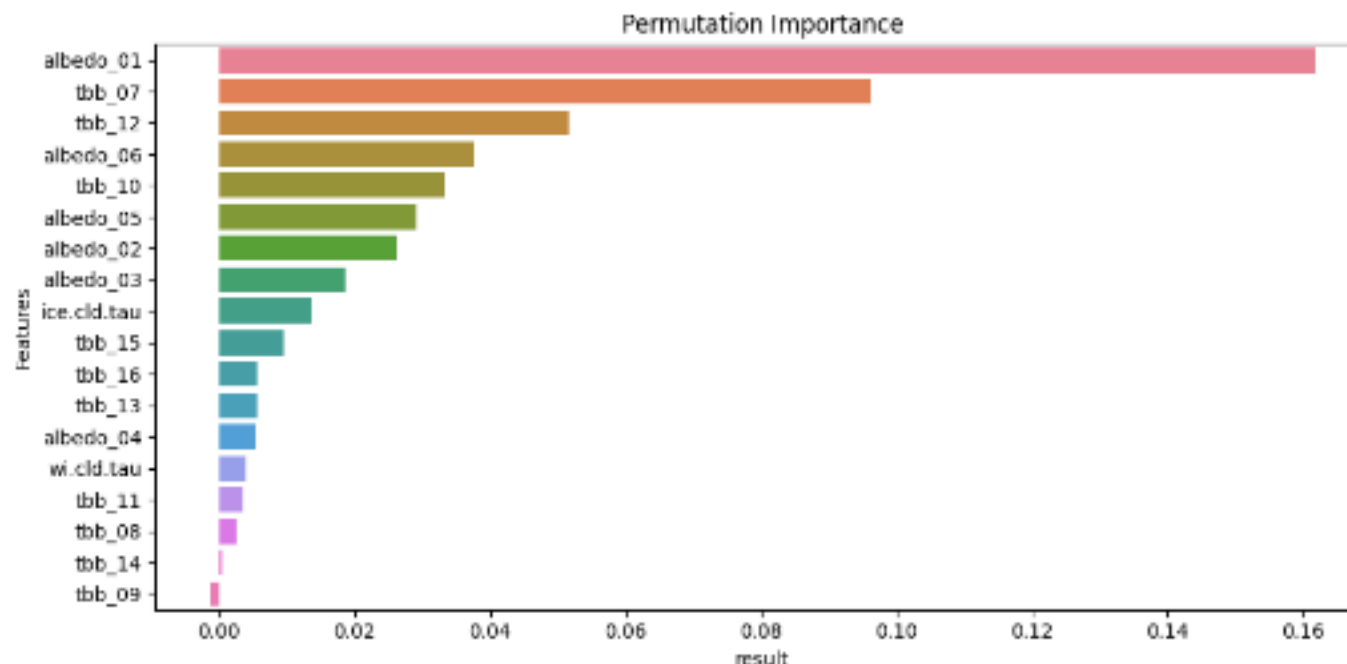


LightGBM | 分析結果

- LightGBMを用いて、ひまわり+Amaterassデータによって電波減衰量を再現できるか検討
- R2 Score: 0.33 | Root Mean Squared Error (RMSE): 0.60
 - 決定係数は0.33であり、予測精度が高いとはいえない



図：電波減衰量の実測値と予測値の1対1プロット



図：電波減衰量の予測における各パラメータの寄与度

光通信可能性とひまわりデータ相関分析と使用データ

- **位置** : (26.4989, 127.846)@NICT沖縄局
- **ひまわり全バンド（計16バンド）データ** : 1時間毎データ
- **Amaterassデータ** : 千葉大サーバからFTPで取得した1時間毎データ
 - 試験的に雲厚さ関連の2種と「水仮定の雲の光学的厚さ」と「水仮定の雲粒有効半径」を使用（10:00～17:00のデータが欠損）
- **前処理** : 光通信関連データをひまわりの時間分解能1時間毎に合わせて平均化

バンド	中心波長 (μm)	解像度 衛星直下点 (km)	想定される用途
1	0.46	1	植生、エアロゾル、R
2	0.51		植生、エアロゾル、R
3	0.64	0.5	下層雲・霧、R
4	0.86	1	植生、エアロゾル
5	1.6	2	雲相判別
6	2.3		雲有効半径
7	3.9	2	下層雲・霧、自然火災
8	6.2		上・中層水蒸気量
9	7.0		中層水蒸気量
10	7.3		中・下層水蒸気量
11	8.6		雲相判別、SO ₂
12	9.6		オゾン全量
13	10.4		雲画像、雲頂情報
14	11.2		雲画像、海面水温
15	12.3		雲画像、海面水温
16	13.3		雲頂高度

図 : ひまわりFLDK格納データ

要素
地表面下向き日射量
地表面直達日射量
地表面散乱日射量
PV出力解析値
風速
チャンネル輝度温度差（不要）
大気上端下向き日射量
ピクセルごとのスキャン時間（不要）
水仮定の雲の光学的厚さ
Nominal Operating Cell Temperature（公称作動セル温度）

地表面相対湿度
地表面気温
相仮定の雲の光学的厚さ
地表面南北方向風
地表面東西方向風
cloud top height
cloud top pressure
cloud top temperature
liquid water path
water cloud tau

図 : Amaterass格納データ

● NICTの光通信関連環境データの概要

項目	内容
観測時刻	2022/5 (1分間隔) * 4
観測場所	NICT沖縄局 位置座標 : (26.4989, 127.846)
観測データ	ドーム内温度、内部温度、電源電圧、上空温度、赤外放射温度(北側、東側、南側、西側、天頂)、雲量(北側、東側、南側、西側、天頂)、雲高(北側、東側、南側、西側、天頂)、温度、相対湿度、気圧、全天日射量、風速、方向、雨量、 全雲量 * 1
環境推定データ 判定データ	光通信可能性 * 2 、前1時間日照率、 大気透過率 * 2 、晴天判定、 光通信可能判定 * 3 、1時間後光通信可能判定

* 1 全雲量は雲量(北側、東側、南側、西側、天頂)を平均した値

* 2 観測データを用いて計算したもの。光通信可能性と大気透過率は同じ値である。

* 3 **大気透過率が60%以下で光通信可能と判定している。**

* 4 ひまわりデータの時間間隔(1時間間隔)と合わせるため、データを間引いて使用する。

相関分析 | 光通信可能性データの特徴

- 光通信可能性[%]は雲量と高い相関を示した

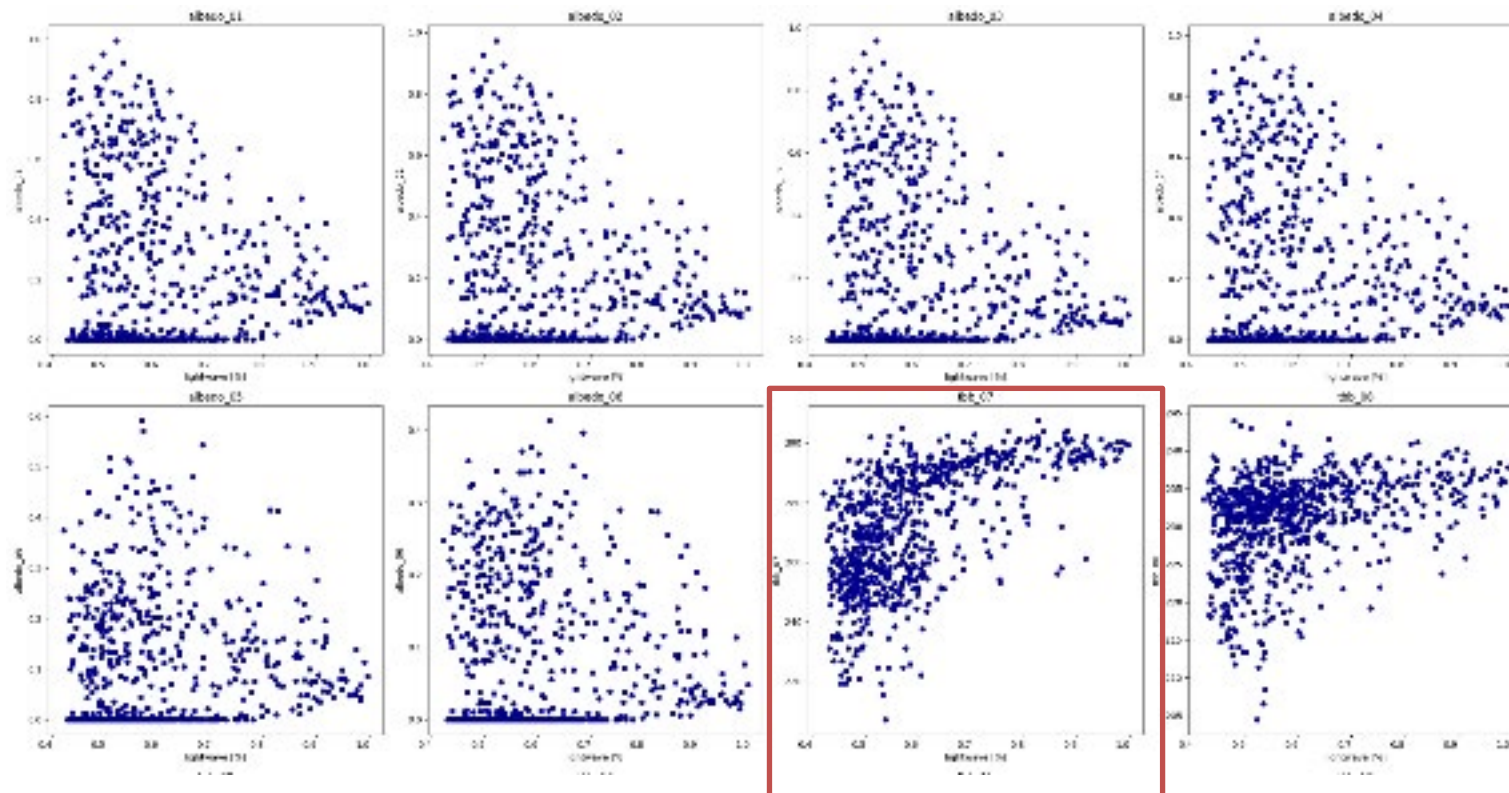
観測データ	相関係数	観測データ	相関係数	観測データ	相関係数	推定データ	相関係数
ドーム内温度(°C)	0.739	雲量(北側)(%)	-0.827	雲高(天頂)(m)	0.818	全雲量(%)	-0.845
内部温度(°C)	0.738	雲量(東側)(%)	-0.822	温度(°C)	0.523	光通信可能性(%)	1.000
電源電圧(V)	-0.422	雲量(南側)(%)	-0.854	相対湿度(%)	-0.810	前1時間日照率(%)	0.584
上空温度(°C)	-0.394	雲量(西側)(%)	-0.860	気圧(hPa)	0.035	大気透過率(%)	1.000
赤外放射温度(北側)(°C)	-0.273	雲量(天頂)(%)	-0.822	全天日射量(W/m ²)	0.700	晴天判定	0.672
赤外放射温度(東側)(°C)	-0.215	雲量(北側)(m)	0.823	風速(m/s)	0.167	光通信可能判定	0.753
赤外放射温度(南側)(°C)	-0.286	雲量(東側)(m)	0.820	風向(°)	0.076	1時間後光通信可能判定	0.749
赤外放射温度(西側)(°C)	-0.305	雲量(南側)(m)	0.851	雨量(mm)	-0.240		
赤外放射温度(天頂)(°C)	-0.201	雲量(西側)(m)	0.856				

相関分析 | 結果

- 電波減衰量と光通信可能性で比較すると、光通信可能性のほうが絶対値の相関係数は大きい
- Band7（下層雲・霧/自然火災）が絶対値として最大の相関係数

表：各バンドと光通信可能性の相関

バンド名	想定用途	相関係数
albedo_01	植生/エアロゾル/B	-0.053
albedo_02	植生/エアロゾル/G	-0.068
albedo_03	下層雲・霧/R	-0.093
albedo_04	植生/エアロゾル	-0.062
albedo_05	雲相判別	0.071
albedo_06	雲有効半径	0.006
tbb_07	下層雲・霧/自然火災	0.592
tbb_08	上・中層水蒸気量	0.328



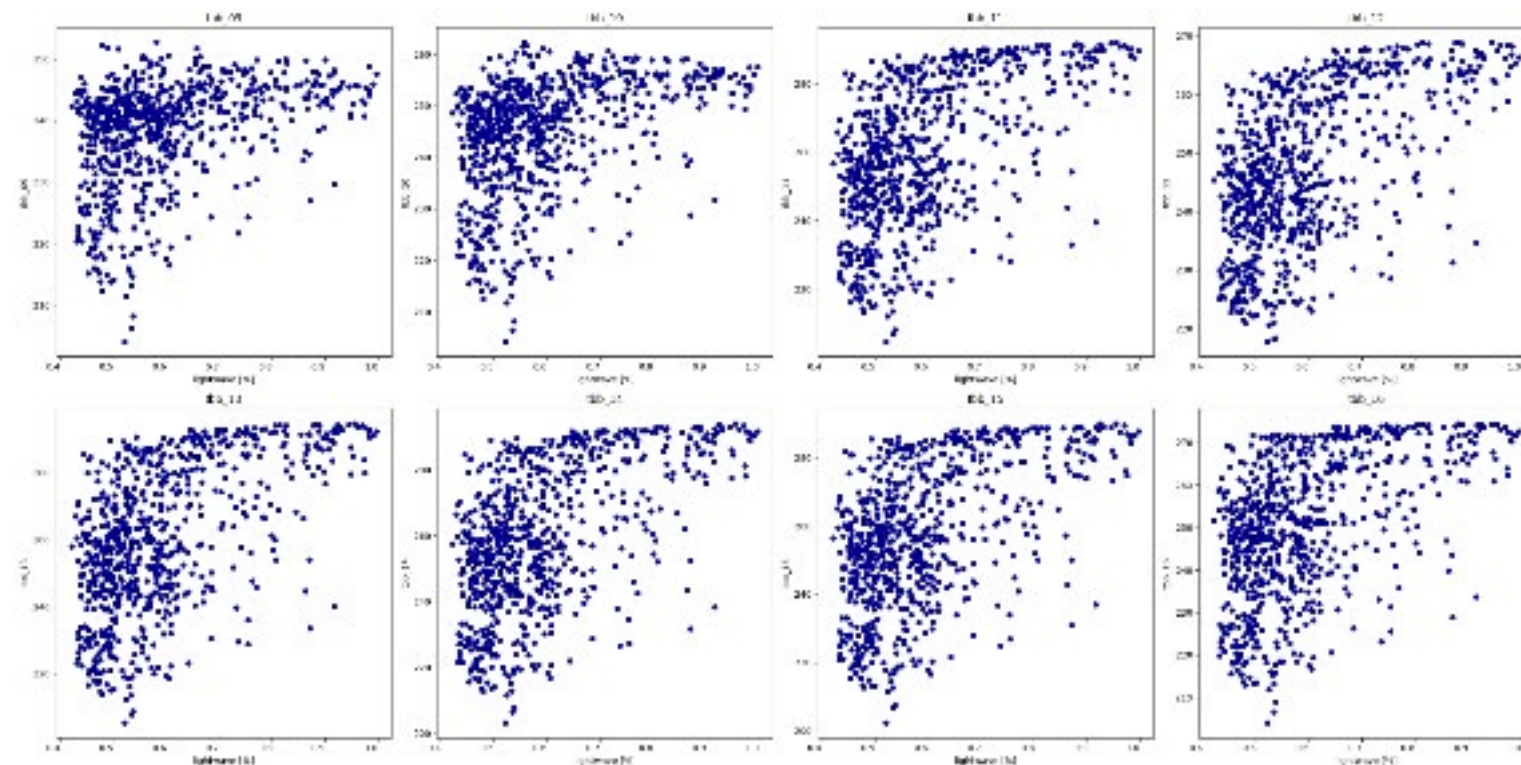
図：各バンド値と光通信可能性の1対1プロット

相関分析 | 結果

- 電波減衰量と光通信可能性で比較すると、光通信可能性のほうが絶対値の相関係数は大きい
- Band7（下層雲・霧/自然火災）が絶対値として最大の相関係数

表：各バンドと光通信可能性の相関

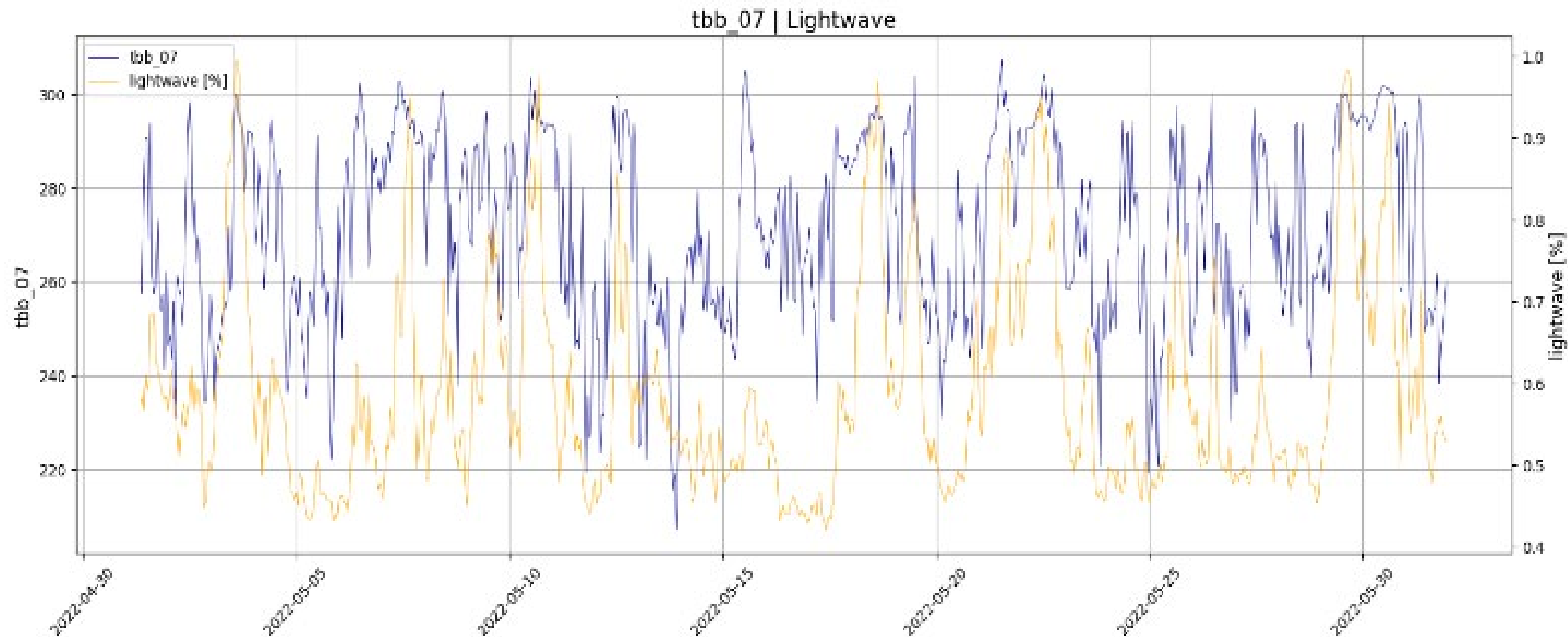
バンド名	想定用途	相関係数
tbb_09	中層水蒸気量	0.358
tbb_10	中・下水蒸気量	0.409
tbb_11	雲相判別/SO2	0.546
tbb_12	オゾン全量	0.555
tbb_13	雲画像/雲頂情報	0.547
tbb_14	雲画像/海面水温	0.542
tbb_15	雲画像/海面水温	0.530
tbb_16	雲頂高度	0.497



図：各バンド値と光通信可能性の1対1プロット

相関分析 | 結果

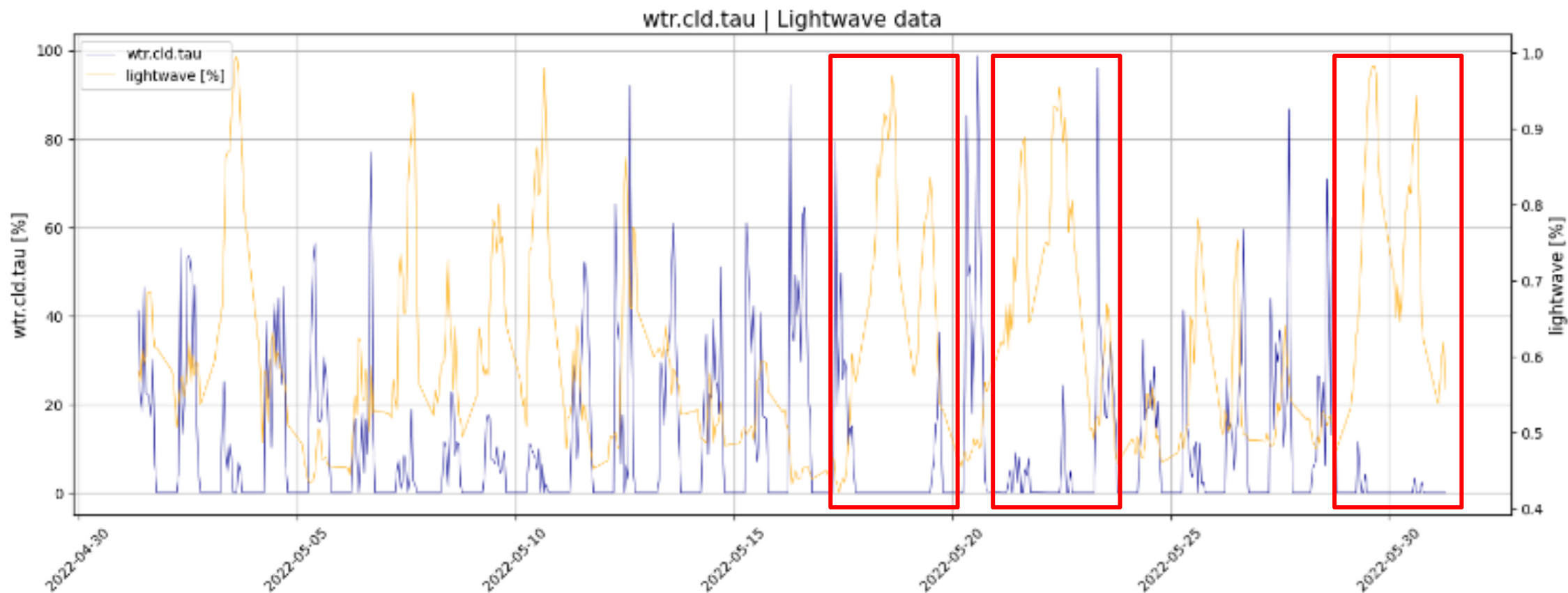
- ひまわり全バンドデータの中で最も相関係数の高かったtbb_7（下層雲・霧/自然火災）を光通信可能性とともに描画



図：ひまわりtbb-7と光通信可能性の時系列プロット（1か月分）

相関分析 | 結果

- Amaterassデータ群の中で最も相関係数の高かった水仮定の雲の光学的厚さを光通信可能性とともに描画
- 光通信可能性のピークと水仮定の雲の光学的厚さの低い値を取る領域の一致が見られる



図：Amaterass（水仮定の雲の光学的厚さ）と光通信可能性の時系列プロット（1か月分）

まとめ

- NTN通信のためのサイトダイバーシティ技術への情報として、ひまわり衛星の画像の利用を検討
- Ka帯電波減衰量とひまわりデータの全バンド（計16バンド）データの相関分析を実施
 - ✓ 全体では相関が低い結果となった（最大で約0.3）
 - ✓ Ka帯電波減衰量の予測には、降雨を適切に観測したデータ（例：アメダス等の地上降雨量、GSMaP等の降雨レーダ）が有効と考えられるため、これらデータを利用した降雨予測モデルからの電波減衰量算出が望ましい。
- 光通信可能性とひまわり全バンド（計16バンド）データ並びにAmaterassデータ（特に雲の光学的厚さの指標）の相関分析を実施したところ、電波減衰量よりも相関係数の絶対値は大きい傾向となった。
- ひまわりデータは、光通信における伝搬と関係していることが予想
 - ✓ 今後は光通信の可能性と、NICTの環境データ情報収集装置で得られる雲量パラメータの関連性および光通信の可能性とひまわりデータとの直接の適用を行う予定