

# インドネシア多島海での衛星海面高度計による有義波高計測の精度検討

新原, 光  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4060789>

---

出版情報 : 九州大学, 2019, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :

平成31年度

九州大学大学院総合理工学府

大気海洋環境システム学専攻修士論文

インドネシア多島海での

衛星海面高度計による有義波高計測の精度検討

氏名 新原光

指導教員 市川香 准教授

# 目次

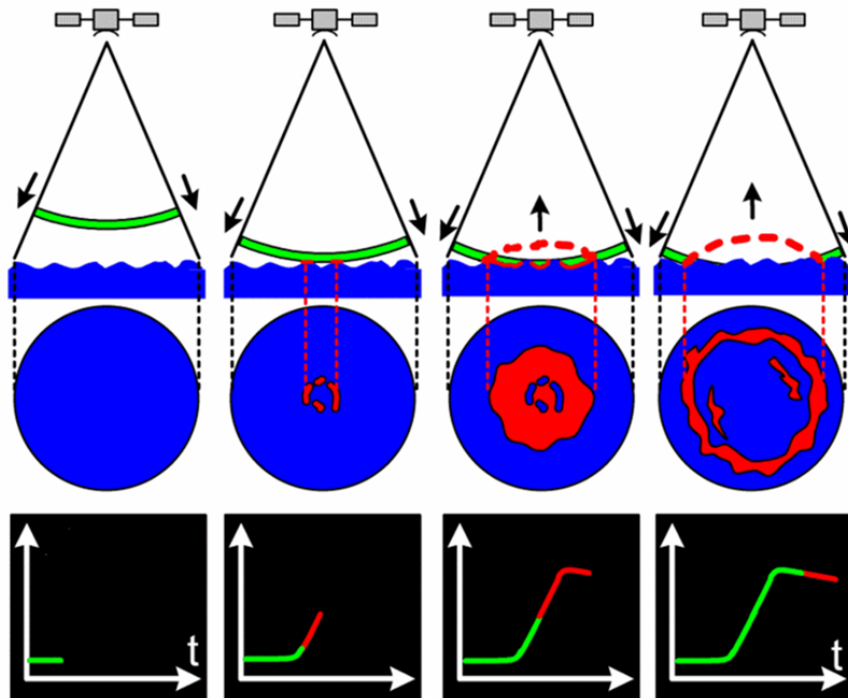
第1章	はじめに.....	3
第2章	データ.....	5
	2.1 Jason-2 データ.....	5
	2.2 高度計のアルゴリズムの説明.....	9
	2.3 WAVEWATCH3 の説明.....	9
	2.4 比較手法.....	9
第3章	手法.....	14
	3.1 軌道沿いの SWH の分布.....	14
	参考文献.....	38
	謝辞.....	39

# 第1章 はじめに

安全な船舶の航行のため、有義波高の分布を知る必要がある。どの海域にどの程度の波があるかを予測できていれば、船舶のルートを安全な航路に変更することが可能である。予報には、風速から波浪の成長を予測する数値モデルなどが使われるが、精度を上げるには現実の観測値を取り込む必要がある。人間が生活する陸域から離れた外洋域では、特に波浪の観測手段は必要とされている。外洋域での波浪計測に、目視による観測、ブイによる観測、人工衛星海面高度計が使われている。ここではこれらの特徴について述べる。

船舶通報による波の目視データは、広い海域における観測値としてデータ数および即時性の観点からの利用価値は高い。熟練した計測者により行われる洋上船舶からの目視計測は、海面の特徴をよくとらえており、その計測精度は信頼できるものであることがよく知られている。しかしながら、波周期は航行する船舶から計測するため、出会い周期の影響を受けやすい。

次に、ブイにより計測された波浪情報も重要なデータソースとなっている。ブイでは、上下加速度を計測して変位を算出することで有義波高と波周期を求めている。外洋における波浪を長期的に計測することができる方法の一つであるといえるが、設置あるいは漂流した位置における定点のデータを使用するので、面としての情報を得ることはできない。



CNES AVISO webpage

図 1.1 海面高度計計測概念図(市川 2013)

これらの手法は時間的には連続されたデータが得られるものの、空間的にはごく限られた地点の情報しか得ることができない。全球的な波浪の情報を与えるのが、人工衛星海面高度計である。人工衛星海面高度計は、ある時刻における計測面内の空間平均の波浪を計測している。この海面高度計は衛星直下に向けてパルス電波を打ち、そのパルスが照射する範囲 (**footprint**) 内で反射された電波の強度を時系列で計測する (図 1.1)。衛星直下付近の海面の波の山部で反射された電波が最初にアンテナに到達し、やや遅れて波の谷部で反射した電波、そして同心円状に広がる照射領域で反射された電波が続いて受信される。衛星に搭載された高度計は、受信した反射電波強度の時系列 (**waveform**) から、反射強度の立ち上がり部分の時刻と時間変化率を決定し、衛星と海面間の距離と有義波高をそれぞれ推定している。外洋の有義波高は衛星とブイで計測された値はよく一致していて精度が高いことが知られている (Ribal & Young 2019)。

ところが、半径数 km ほどの **footprint** の中に陸地や流氷など海面以外の物体があると、それらからの反射電波の影響を受けて **waveform** が想定から大きく変わってしまうため、単純なアルゴリズムでは **waveform** の立ち上がり部分の形状を特定できなくなる。

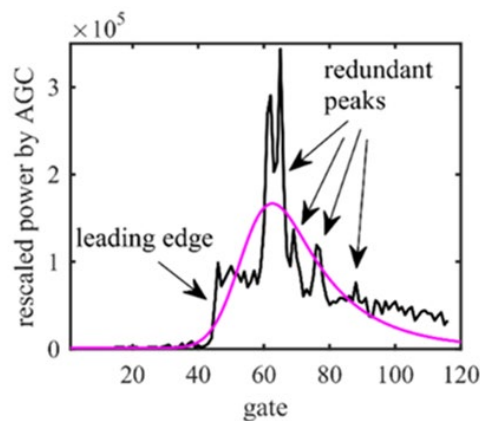


図 1.2 異常値を含んだ waveform (Wang & Ichikawa 2017)

このため、これまでの海面高度計では、海面以外の物体が **footprint** 内に入ってしまう沿岸域と極域を主な観測対象から外してきた。しかし、特に沿岸域は人間活動への影響を考える上で最も重要な海域であるため、近年になって衛星海面高度計のセンサーデータを再処理する手法 (アルゴリズム) を改良して沿岸域における利用ができるようになった。

そこで本研究では、新しく開発されたアルゴリズムについて、多島海域であるインドネシアのセレベス海の有義波高の精度検討を行う。セレベス海は、多島海であり陸地が多く、さらに陸地が **footprint** に入らない外洋でもスリックと呼ばれる異常値が計測される箇所がみられる。改良アルゴリズムについては第 2 章で述べる。また、第 3 章ではアルゴリズム間の比較結果について述べた後、改良アルゴリズムと WW3 波浪モデルとの比較を第 4 章で述べて第 5 章で議論を行う。

## 第2章 データと手法

2章では使用したデータと解析手法について述べる。2.1節では衛星海面高度計 Jason-2 データの説明をし、2.2節では、使用したデータのアルゴリズム毎の説明、2.3節では参照に使用した WAVEWATCHIII 波浪モデルの紹介、またそれらの特徴について述べる。2.4節で、各アルゴリズムで得られたデータと WAVEWATCHIII 波浪モデルを用いた解析について説明する。

### 2.1 Jason-2 データ

2008年6月、フランスの CNES(Le Centre national d'études spatiales)と、アメリカの NASA(National Aeronautics and Space Administration)によって打ち上げられた衛星(図 2.1.1)。同じく CNES と NASA によって打ち上げられた、Topex/Poseidon、Jason-1 の後継機であり、2~3cm 程度の測定精度で海面高度を測定することが可能である。



図 2.1.1 Jason-2 画像

(画像引用:<http://www.avisioceanobs.com/en/newsstand/gallery/multimedia-file-search/index.html>)

衛星には 13.575GHz(Ku-band)と 5.3GHz(C-band)の 2 種類周波数を持つ、2 周波レーダー高度計 Poseidon3 や、マイクロ波放射計 AMR(Advanced Microwave Radiometer)などが搭載されており、単に海面高度を計測するだけでなく、海面温度なども同時に計測することが可能となっている。軌道高度は約 1300km で 254 種類のパス上をほぼ 10 日周期で周回している。パスは全球場をメッシュ状に覆っており、パス同士が作る格子の距離は、一辺が約 300km 程度となっている。

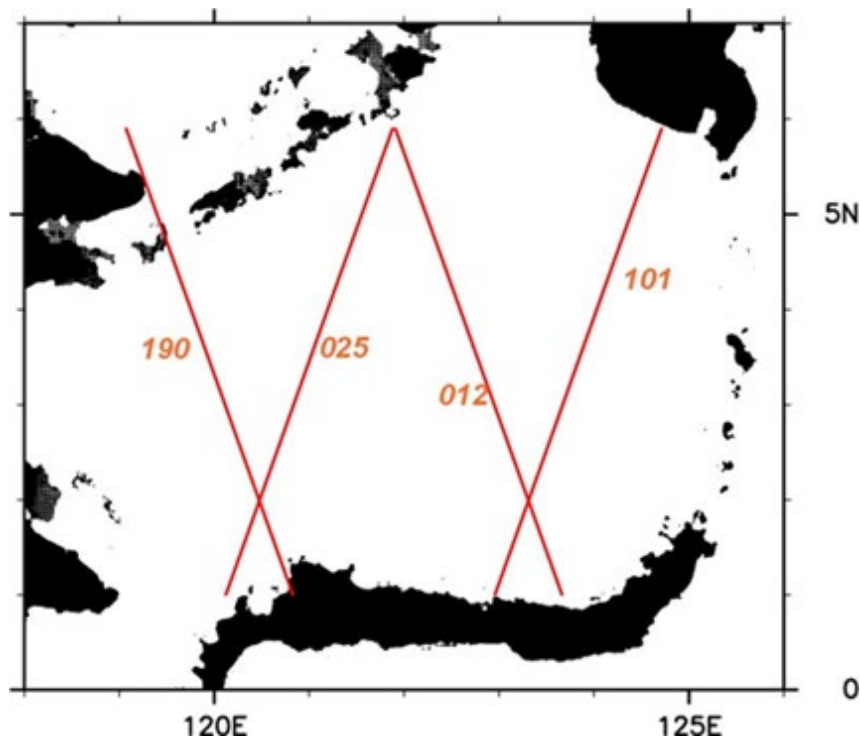


図 2.1.2 セレベス海の Jason-2 の軌道

本研究で注目したセレベス海域では合計 4 本の Jason-2 の軌道がある(図 2.1.2)。衛星が地球を一周するのに約 90 分かかり、一周にたいして 2 つの軌道番号がつけられるため、012 と 025 は約半日、025 と 101 は約 3 日、101 と 190 は約 3.3 日、190 と 012 で約 3 日の間隔が開いている。今回使用したのは、AVISO の公開する 20Hz のデータである。衛星は 1 秒間で約 7km 進むので、測点の間隔は約 350m である(Wang et al. 2019)

## 2.2 高度計のアルゴリズムの説明

まず、1つ目のアルゴリズムは、**Senser GDR(SGDR)**である。これは、再処理されていない waveform の生データから SWH を推定したものである。外洋域では図 1.1 に示したように明確な waveform の立ち上がり (leading edge) があるが、陸に近い沿岸域では waveform がノイズの影響を受ける (Wang & Ichikawa 2019)。例として、対馬の南岸を通る Jason-2 軌道 を挙げる (図 2.2.1)。陸地や湾の影響で静穏な海面であってもスパイク状の強い反射が確認できる。この waveform を fit させようとする と、異常な海面高度になってしまう。図 1.2 で見られた waveform 内の大きなピークは図 2.2.1 の小さな湾での静穏な海面からの強い反射が原因である。

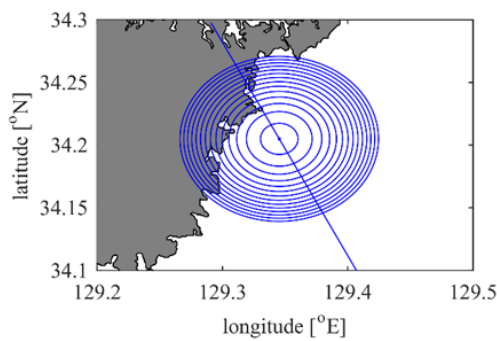


図 2.2.1 対馬南岸の Jason-2 軌道 (Wang & Ichikawa, 2017)

そこで、この SGDR を再処理するために使われたアルゴリズムが **Adaptive Leading Subwaveform (ALES) Reracker** である。ALES は生の waveform の内、 waveform の立ち上がり部分のみを計測として使っている。図 2.2.2 は、図 1.2 で示した異常値を含む waveform のうち、ALES が解析に使用する立ち上がり部分を示したものである。この青枠内は異常値の影響を受けにくくなったため、不適域が岸から 3~5km 程度まで減少した。

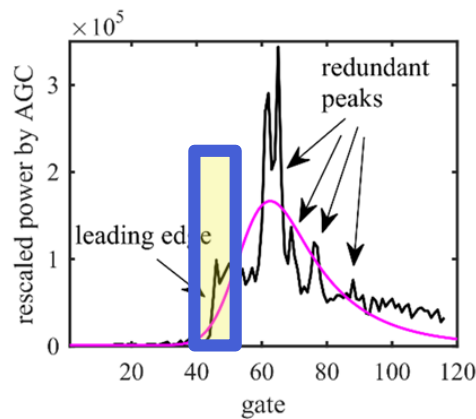


図 2.2.2 ALES の再処理。青枠の waveform を計測に使用 (Wang & Ichikawa 2017)



3つ目のアルゴリズムは、衛星のオンボード処理ではなく陸上での再処理のみを前提として、軌道沿いの waveform の分布を参照するアルゴリズム(Wang)である(Wang & Ichikawa et al. 2017)。Waveform を緯度毎に並べた echigram を導入し、echogram の中で放物線になる waveform を選び保護する。それを fit させると異常値の影響を受けなくなる。さらに拡張したのは、異常値が生じるのが点源ではなく広い範囲であるとして、放物線内に囲まれた echogram の三角形の部分に異常値がないか確認し、一様な反射強度の最大の footprint 半径を求める(Wang et al. 2019)。

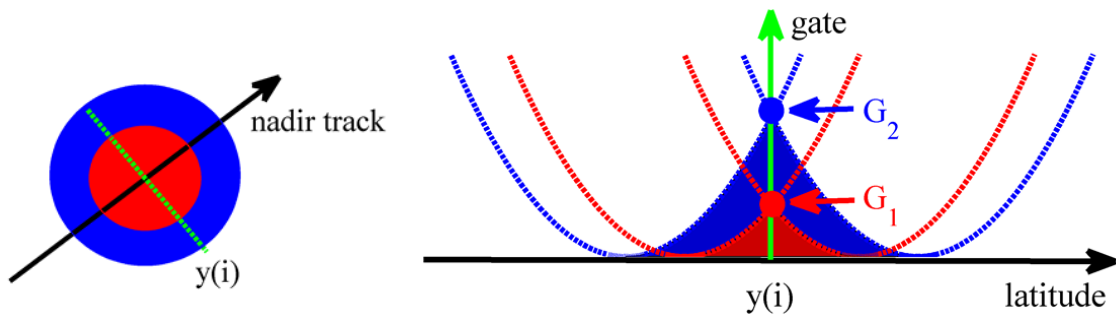


図 2.2.3 Wang アルゴリズム (Wang et al. 2019)

## 2.3 WAVEWATCH3 の説明

次に、参照用として使用した WW3 波浪モデルの多島海の波浪モデル(1/12 格子)について説明する。WW3(Tolman 2002)は、NOAA/NCEP で開発された波浪のエネルギー平衡方程式を基礎式としている波浪推算モデルである。水深、波浪の屈折、変形特性などが考慮されており、ソース項は全て波浪の方向スペクトル密度に依存し、移流項とのバランスで方向スペクトル密度が決定される。この波浪モデルの結果は、港湾空港技術研究所の田村仁博士から提供していただいた。期間は 2014/1/1~2014/5/18 まで 1 時間毎。計測範囲は、緯度  $97.5^{\circ} E$ ~ $128.999^{\circ} E$ 、経度  $-9^{\circ} N$ ~ $14.999^{\circ} N$  であり、波浪スペクトルの解像度は  $0.041\text{Hz}$ ~ $0.65\text{Hz}$  である。

4 章で海面高度計と比較する際には、モデルの 1 時間おき  $0.0833^{\circ}$  格子のデータから、高度計の軌道が通過する時刻と測点位置の SWH の値を線形内装で抽出した。

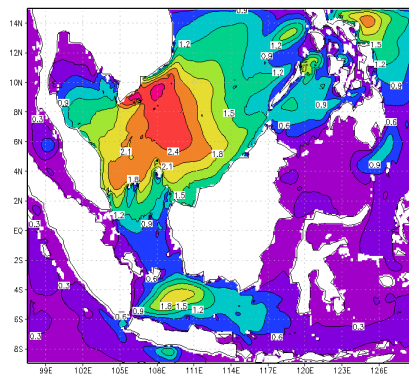


図 2.1.4 WW3 波浪モデル 2014/01/05 23:00 における計測海域のコンター図

## 2.4 比較手法

2.2 節で挙げた 3 つのアルゴリズム(SGDR、ALES、Wang)に関して、アルゴリズム間で、軌道ごとにある時刻における有義波高の比較を行った。また、特定の軌道に対するアルゴリズム毎のヒストグラム分布を平均値と標準偏差から評価し、Wang に対して ALES と SGDR の散布図を用いて、軌道間の違いを検討する。また、緯度毎での違いを評価するためにアルゴリズム間の SWH の差が緯度に対してどのように分布するかを調べた。さらに、改善がなされている 2 つのアルゴリズム ALES と Wang に対して、WW3 波浪モデルとの比較を行った。評価手順は、アルゴリズム間での比較と同じだが、SGDR はノイズがひどく比較するに値しないため除外し、評価検討する。

### 第3章 アルゴリズム間比較結果

まず具体例として、3.1節で特定のサイクル(cycle203)における軌道沿いにおけるアルゴリズム別のSWHの分布をみる。次に、3.2節で各アルゴリズムの2008/07~2015/04までの約7年間分の全データからヒストグラム分布を求め、分布の違いを調べる。さらに、3.3節でALESとWangのアルゴリズムに対して、散布図と緯度毎のSWHの差の分布から比較を行う。

#### 3.1 軌道沿いのSWHの分布

P012(1° N~6° N, 121.9084° E~123.6629° E)におけるcycle203の観測時刻は2014/1/05/11:06:44である。3° N以北において波高1m以内に収まっている。しかし、陸地に近い1° N付近だけでなく3° N以南ではSGDR、ALESの波高は1.5mを超えている。この範囲ではWangも多少値にばらつきがあるが、ALESより異常値が確認されず改善されていることがわかる。

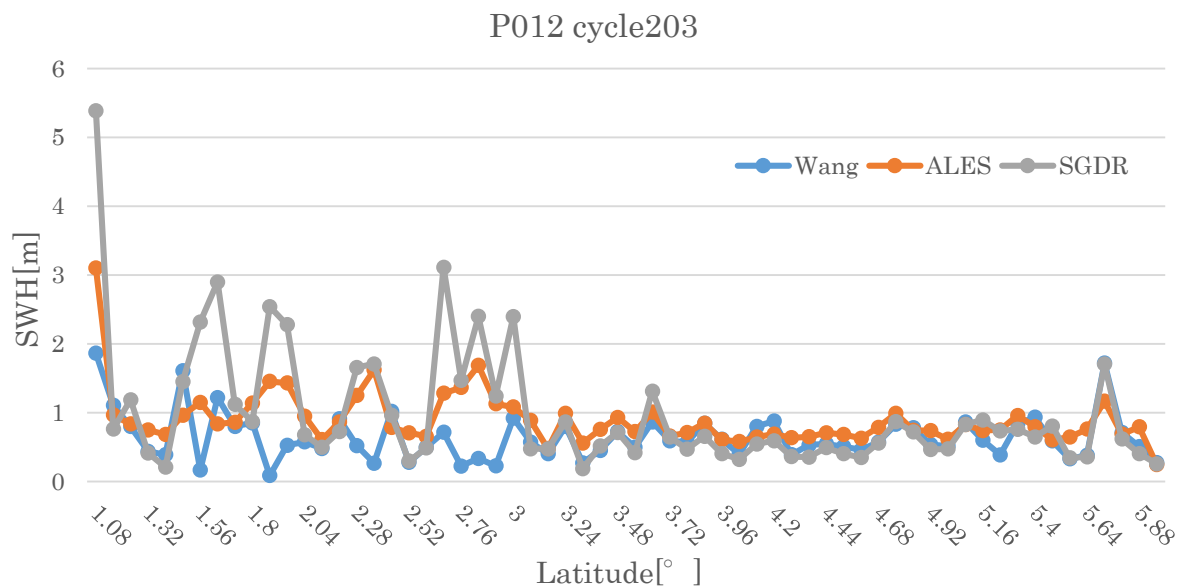


図 3.1(a): P012 において 2014/1/05 11:06 に観測された各アルゴリズムの有義波高を 0.08° N 毎に平滑化したグラフ

P025(1° N~6° N,120.1233° E~121.878° E)における cycle203 の観測時刻は 2014/1/05/ 23:19:53 である。全体的に 4.44° N 付近まで大きな差はないが、4.44° N 以北でアルゴリズム間に大きな差があることが確認できる。P012 と同様に、Wang が波高の値のばらつきが一番小さいことがわかる。6° N 付近の P012 の観測点と p025 の観測点は 0.1° E 程しか変わらないが、p012 では 3 つのアルゴリズム間にばらつきがないのに対し、p025 ではばらつきが確認できる。

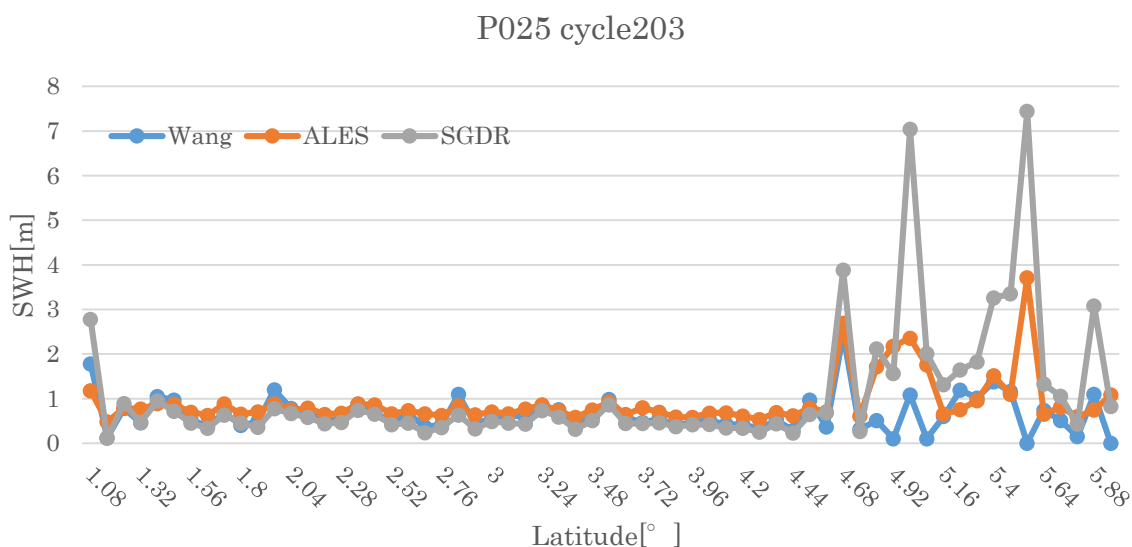


図 3-1(b): P025 において 2014/1/05 23:19 に観測された各アルゴリズムの有義波高を 0.08° N 毎に平滑化したグラフ

P101(1° N~6° N,122.95778° E~124.71161° E)における cycle203 の観測時刻は 2014/1/08/ 22:32:12 である。3つのアルゴリズムに大きな差はないが、SGDR が一番大きな異常値を出している。場所によっては、SGDR より ALES や Wang が大きな値となっている。

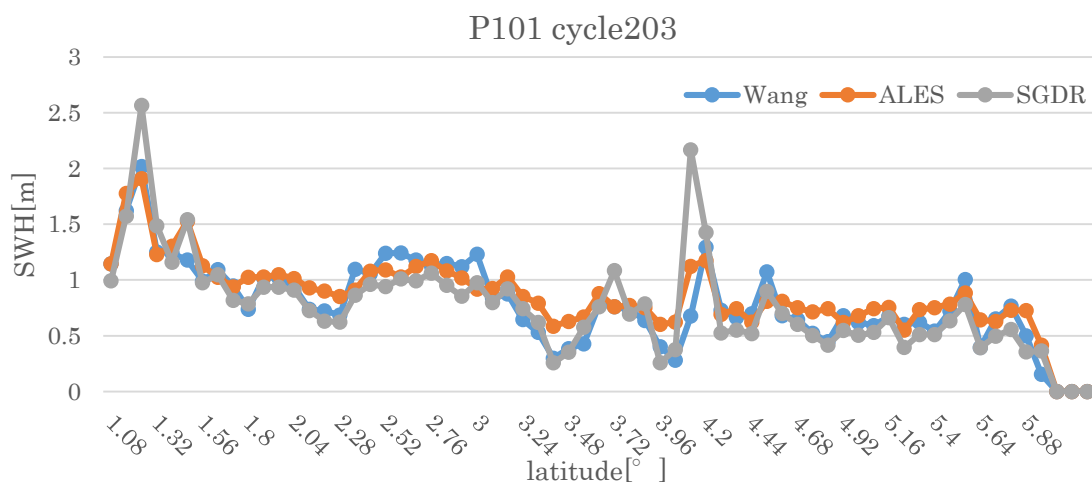


図 3-1(c): P101 において 2014/1/08 22:32 に観測された各アルゴリズムの有義波高を 0.08° N 毎に平滑化したグラフ

P190(1~6,119.0732~120.8278)における cycle203 の観測時刻は 2014/1/12/ 9:52:57 である。全体的に 3 つのアルゴリズムの有義波高の値は大きいですが、その中でも SGDR の値が最も小さい。陸地が近い 4.44° N 以北では異常値によるデータの欠損が多い。

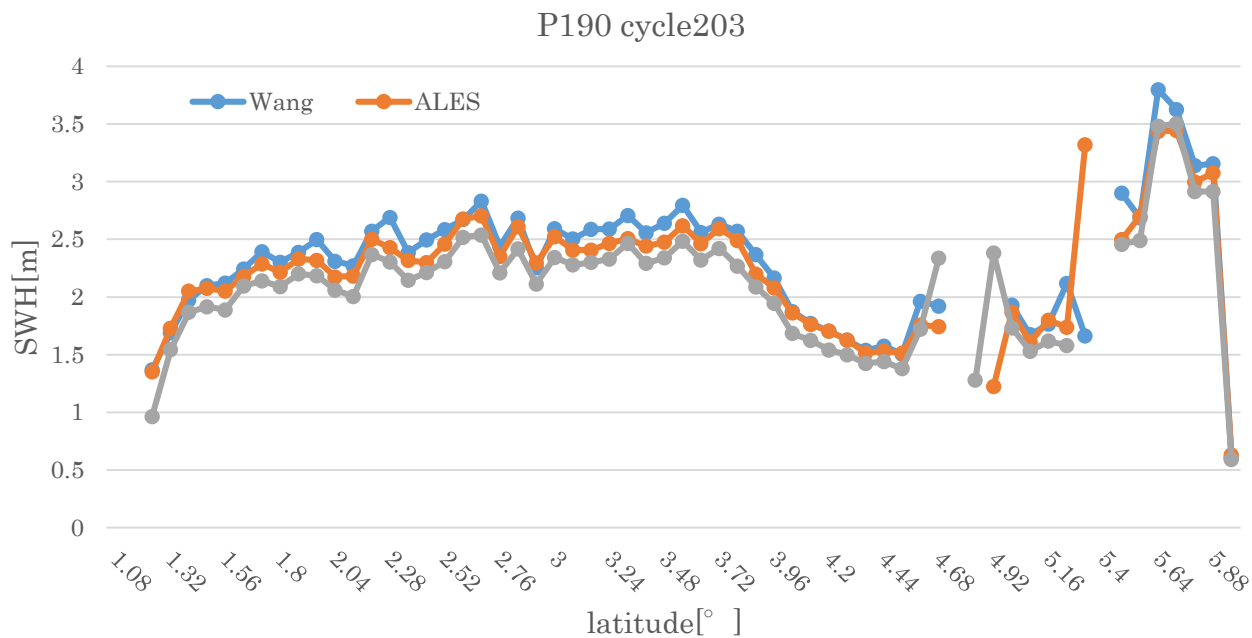


図 3-1(d): P012 において 2014/1/12 9:52 に観測された各アルゴリズムの有義波高を 0.08° N 毎に平滑化したグラフ

### 3.2 ヒストグラム分布による比較

各軌道で、アルゴリズム毎に有義波高のヒストグラムを計算してみた。データの区分は 0.5m 感覚とした(図 3.2)。表の 3.1 に、平均 SWH と標準偏差を示す。

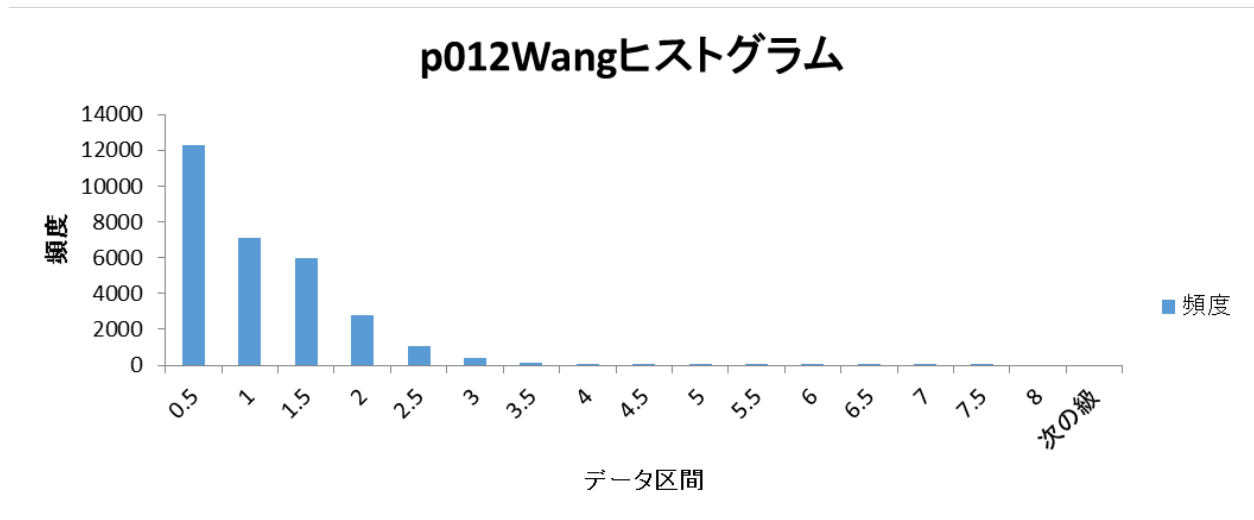


図 3.2(a) p012 における Wang の SWH ヒストグラム分布

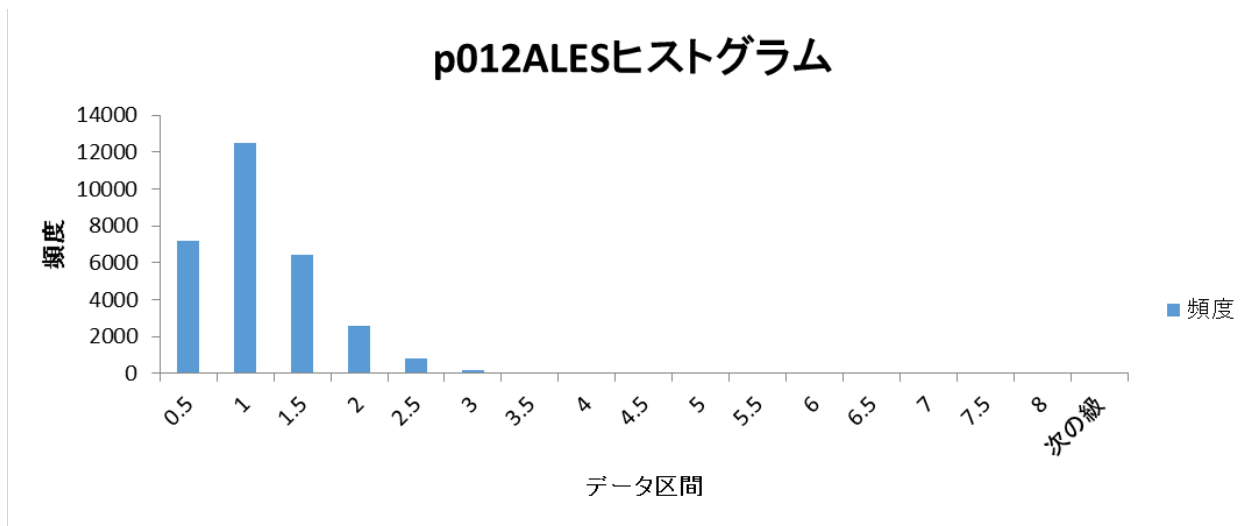


図 3.2(b) p012 における ALES の SWH ヒストグラム分布

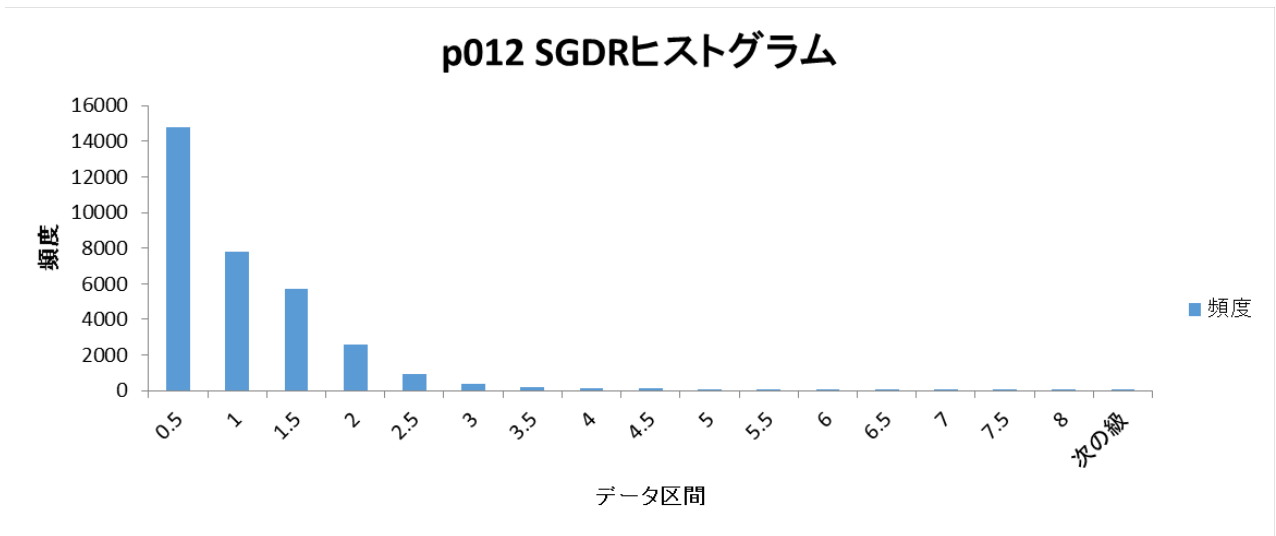


図 3.2(c) p012 における SGDR の SWH ヒストグラム分布

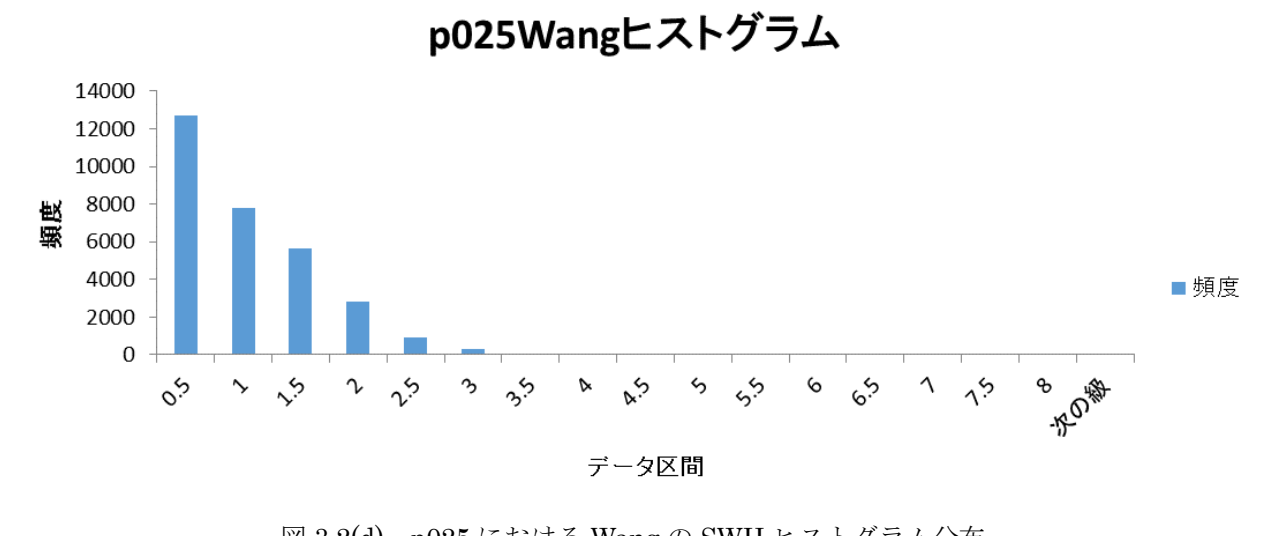


図 3.2(d) p025 における Wang の SWH ヒストグラム分布

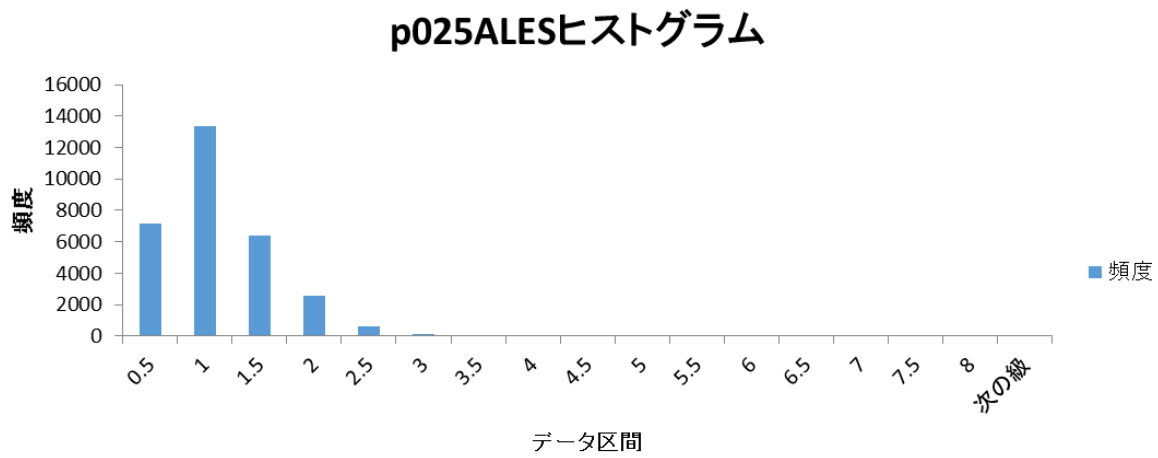


図 3.2(e) p025 における ALES の SWH ヒストグラム分布

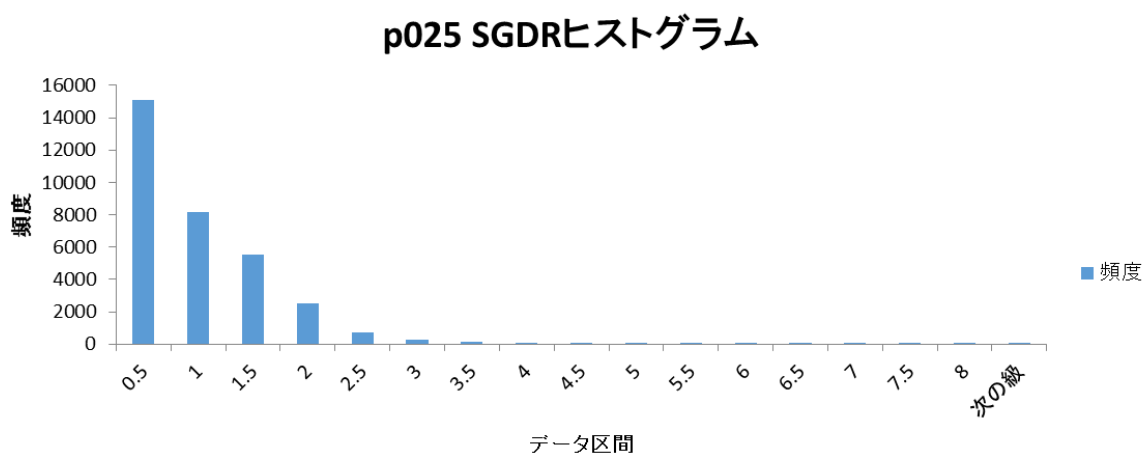


図 3.2(f) p025 における SGDR の SWH ヒストグラム分布

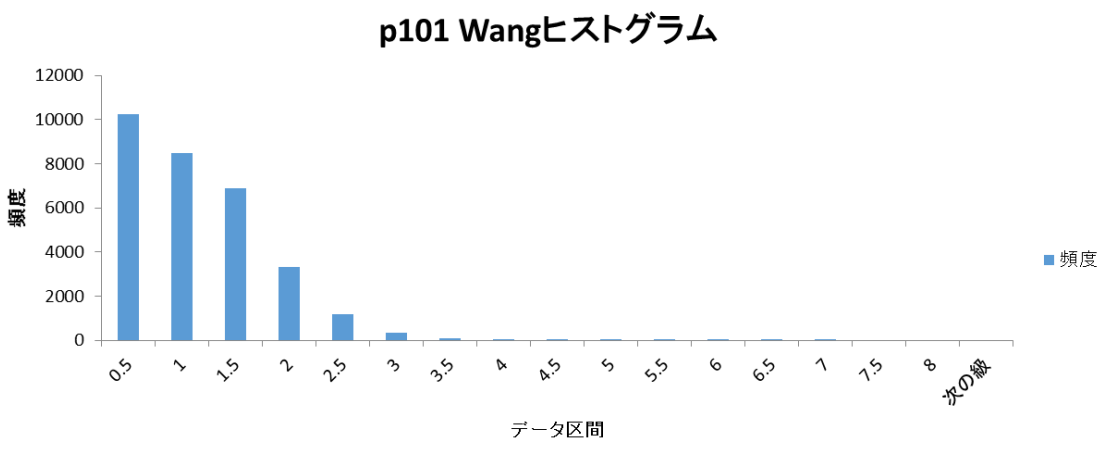


図 3.2(g) p101 における Wang の SWH ヒストグラム分布



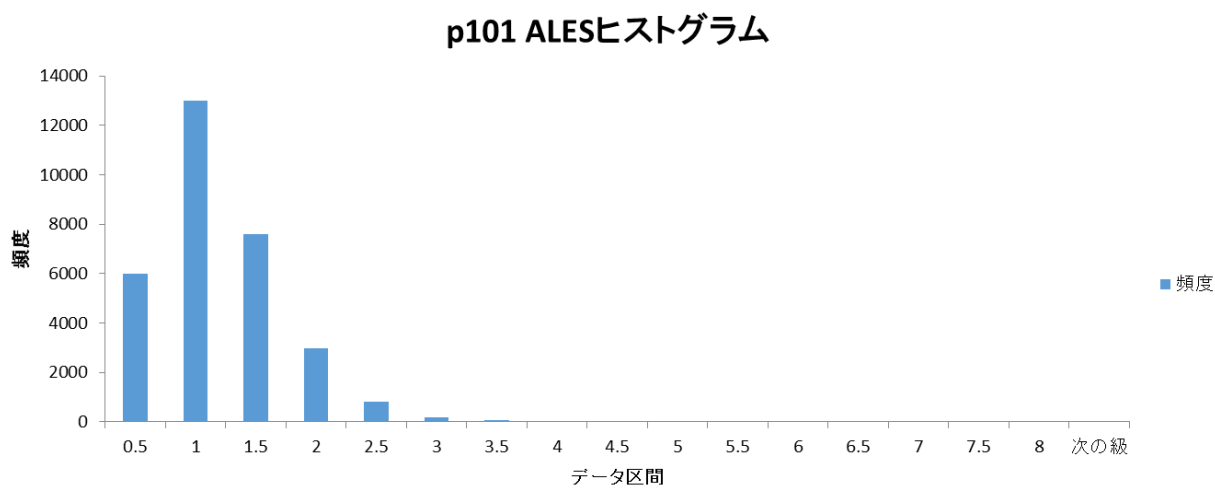


図 3.2(h) p101 における ALES の SWH ヒストグラム分布

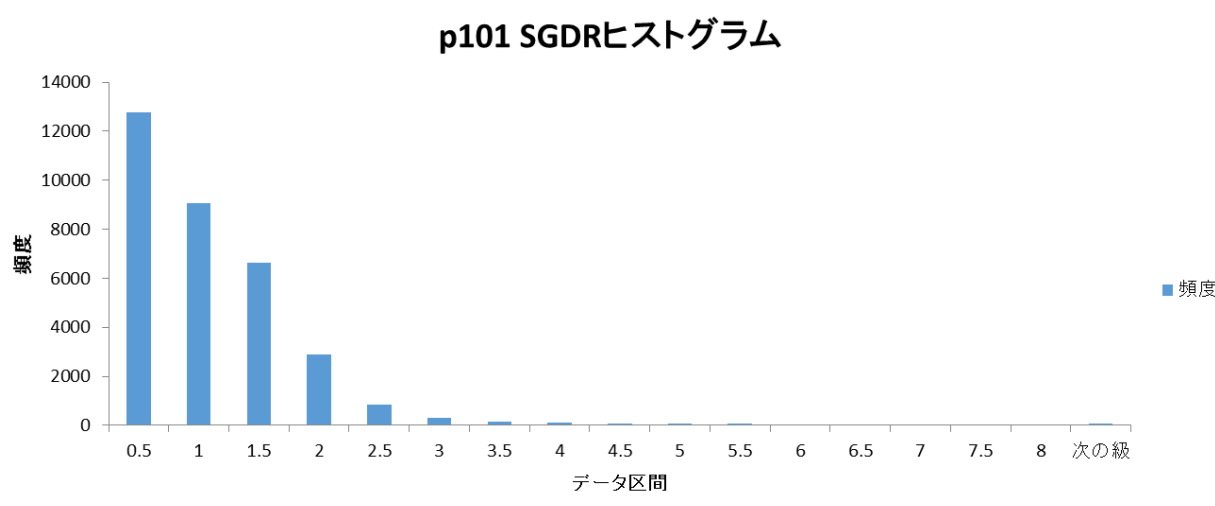


図 3.2(i) p101 における SGDR の SWH ヒストグラム分布

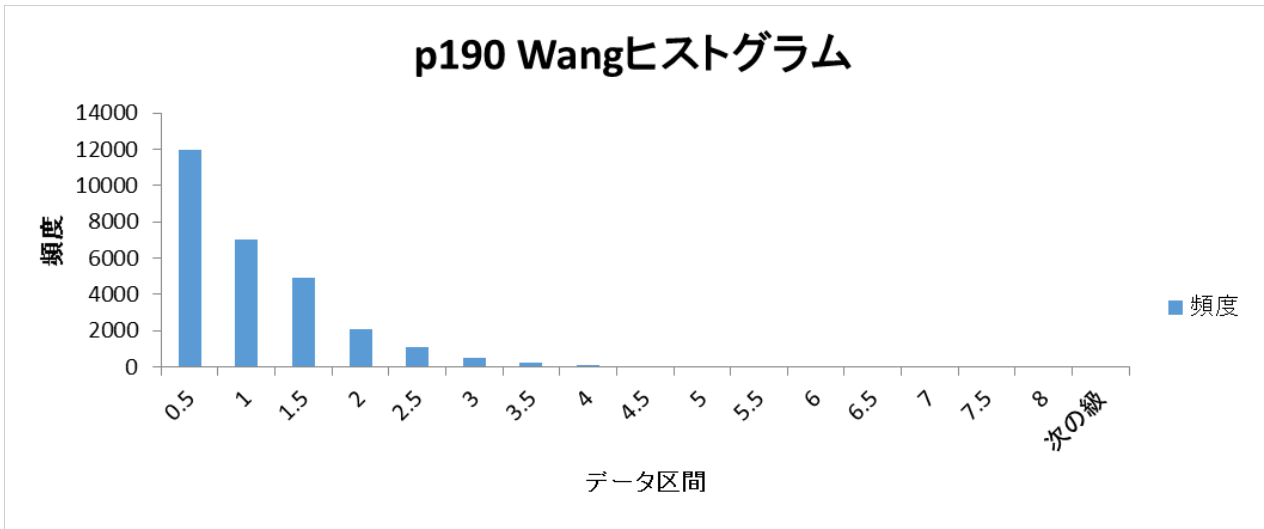


図 3.2(j) p190 における Wang の SWH ヒストグラム分布

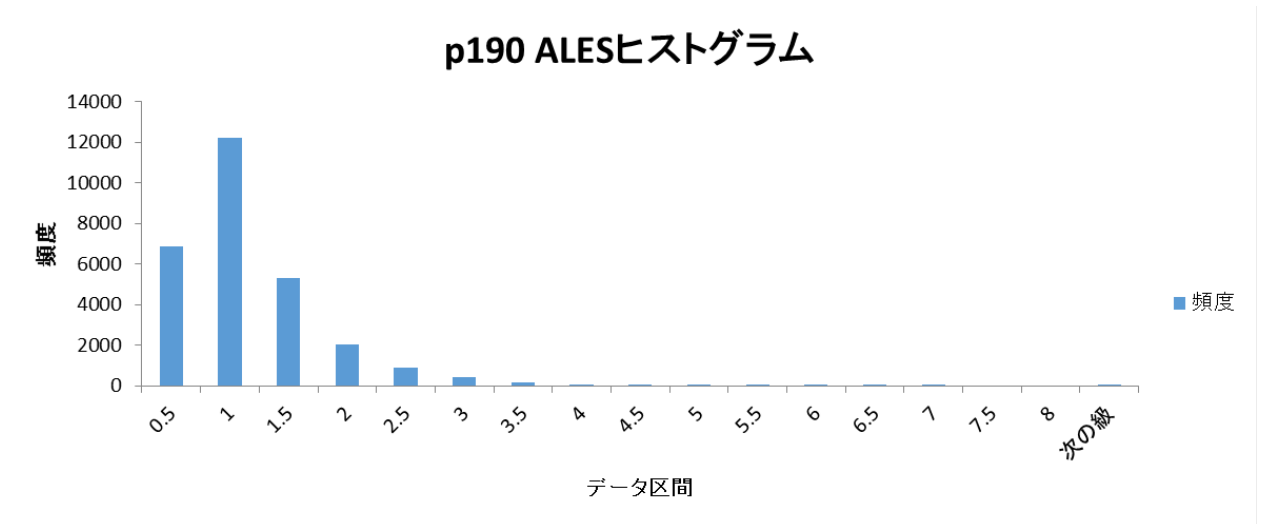


図 3.2(k) p190 における ALES の SWH ヒストグラム分布

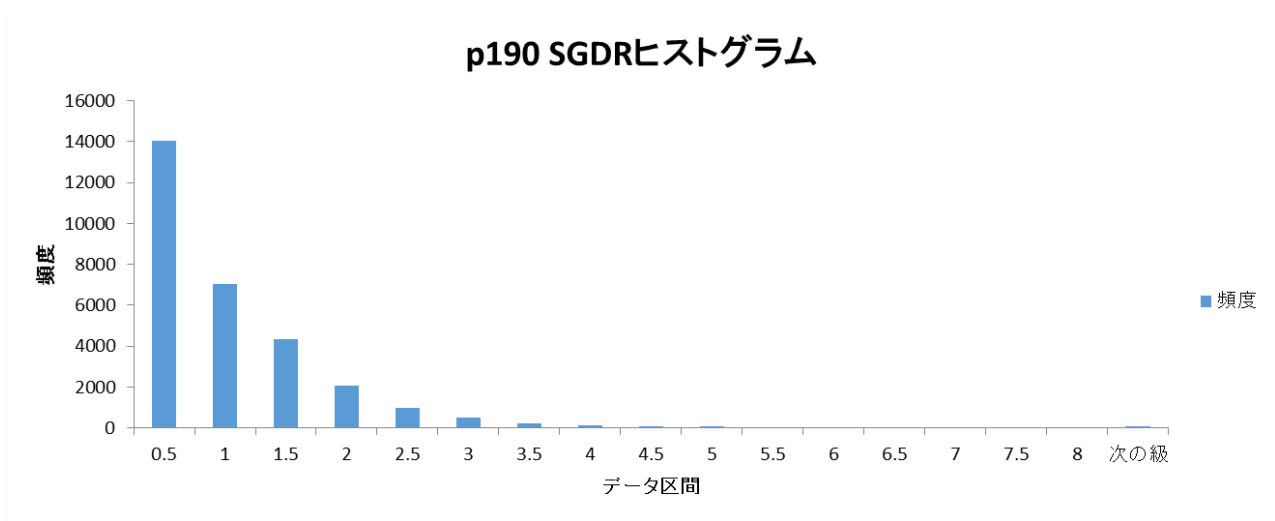


図 3.2(l) p190 における SGDR の SWH ヒストグラム分布

どの軌道においても、Wang について平均 SWH は低い値だがばらつきが大きく、ALES について平均 SWH は SGDR よりも高いがばらつきが小さい分布になっている。軌道にかかわらず、Wang と SGDR は波高とともに頻度が減少するが、ALES は 1m の区間が最も頻度が高い分布をとって明らかに違う分布になっている。ヒストグラム分布パターンの似ている Wang と SGDR だが、標準偏差に大きな差があるのは 3.1 節でみてきたように異常に大きな値がしばしば含まれるためだと考えられる。以下、軌道とアルゴリズムごとのヒストグラムのグラフと、平均 SWH と標準偏差の表を示す。

P012	Wang	ALES	SGDR
平均 SWH(m)	0.720082	0.870988	0.758308
標準偏差	0.717313	0.806961	1.040436

P025	Wang	ALES	SGDR
平均 SWH(m)	0.70954	0.924805	0.731045
標準偏差	0.719386	3.44266	1.004366

P101	Wang	ALES	SGDR
平均 SWH(m)	0.790599	0.912638	0.81236
標準偏差	0.733472	0.677071	1.020194

P190	Wang	ALES	SGDR
平均 SWH(m)	0.72103	0.770206	0.783803
標準偏差	0.718612	0.700615	1.146039

表 3.1 軌道ごとの Wang、ALES、SGDR の平均 SWH と標準偏差

### 3.3 ALES と Wang の散布図による比較

3.2 節でヒストグラムのパターンが異なっていた(図 3.3)。ALES と Wang に関して、散布図で比較をした。全体的に、正の相関があり、相関係数もやや高い。ALES は一番平均値が大きい標準偏差が小さいため値のばらつきが小さい。Wang は逆に一番平均値は小さい標準偏差が大きいため値のばらつきが見て取れる。

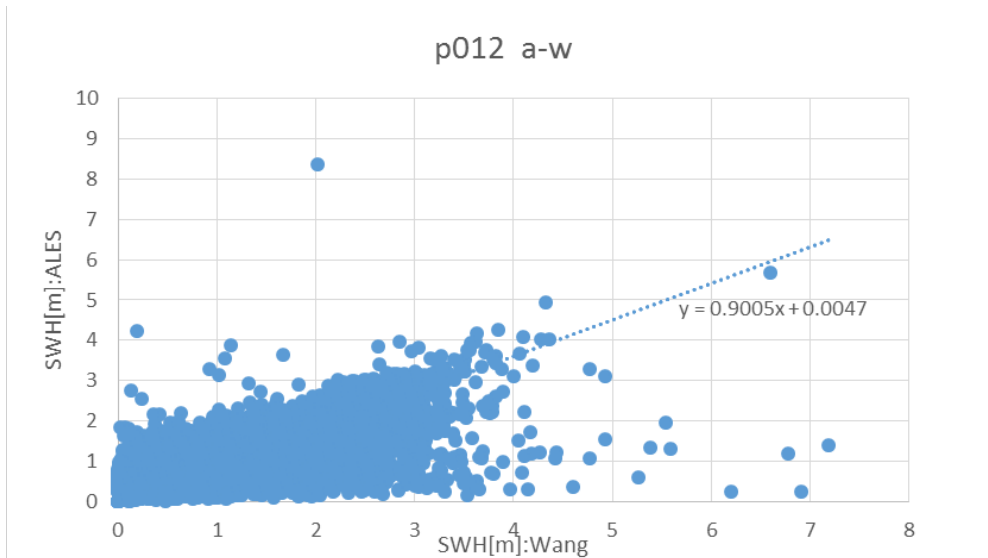


図 3.3(a) p012 における全データの散布図

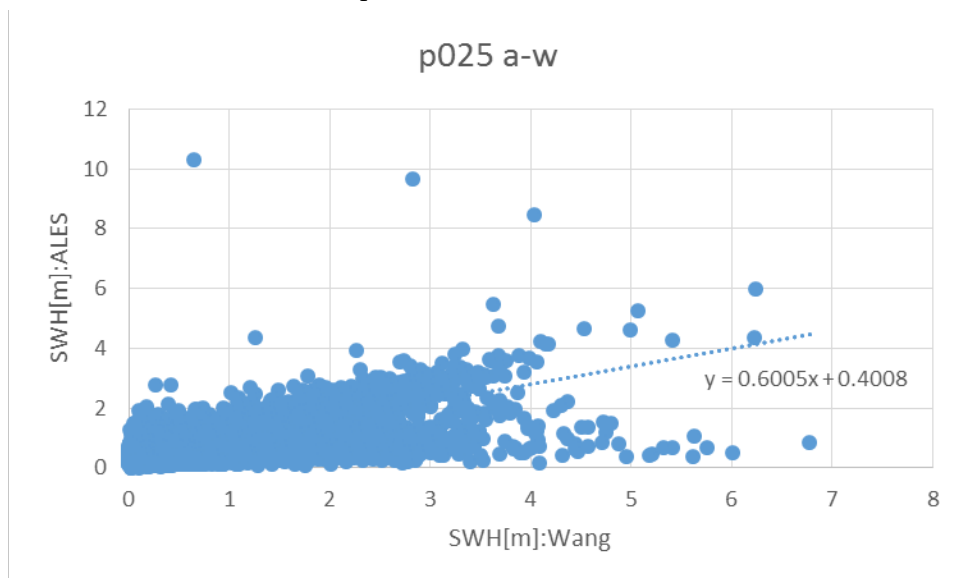


図 3.3(b) p025 における全データの散布図

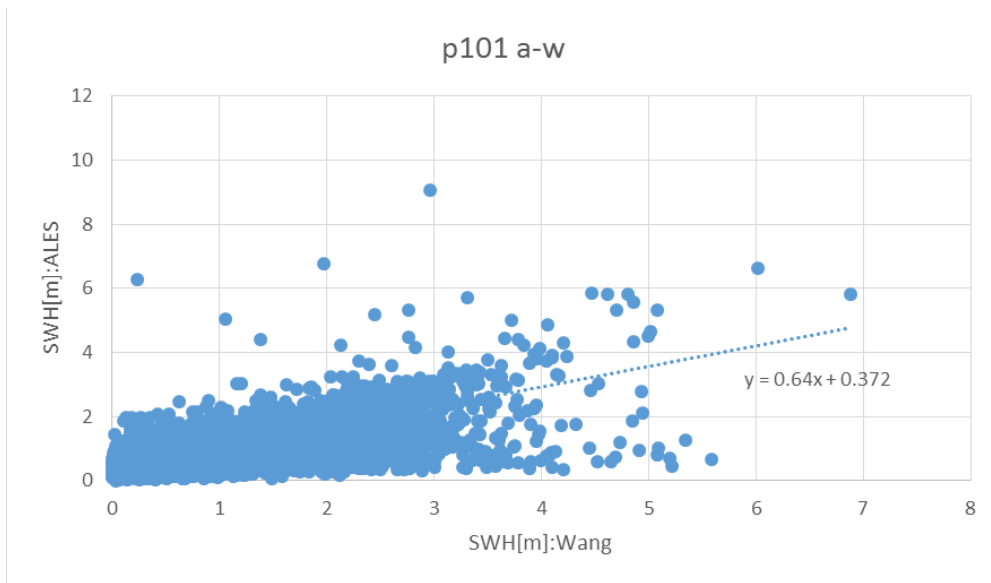


図 3.3(c) p101 における全データの散布図

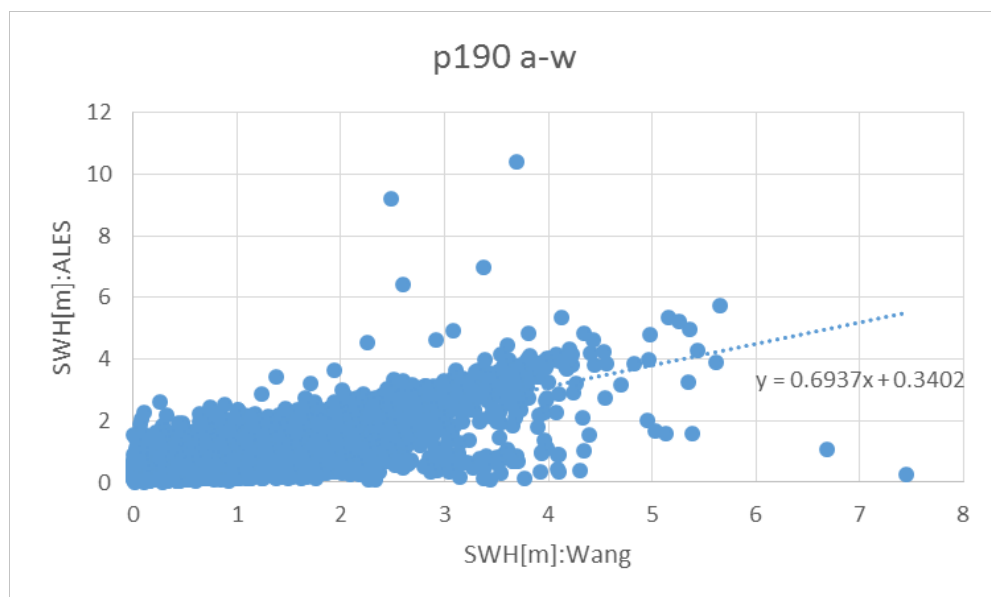


図 3.3(d) p190 における全データの散布図

次に、ALES と Wang の比較を行うため、SWH の差を取り、緯度との相関をみる。負の値になるのは Wang の方が ALES よりも大きな値となる場合である。どの軌道も緯度による明確な違いは見当たらないものの、低緯度ほど正值、高緯度ほど負値となる傾向がある。特にロンボク海峡に差し掛かる p025 にてその傾向が見うけられるようだ。

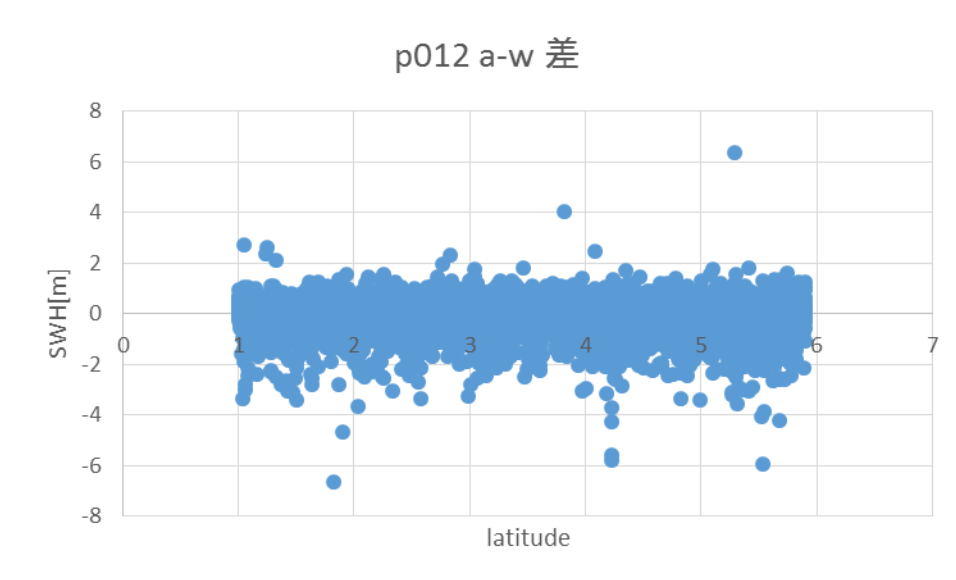


図 3.3(e) p012 における ALES と Wang の差の分布

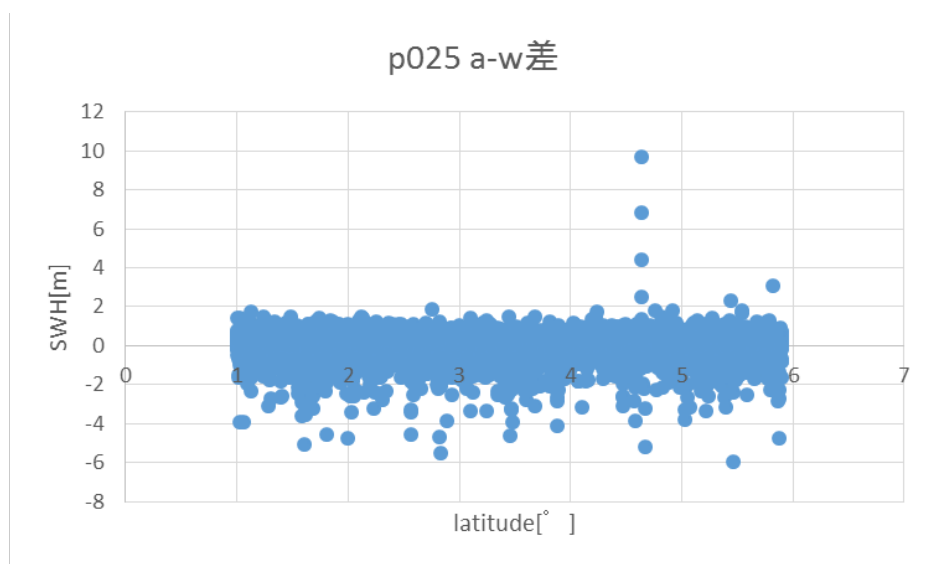


図 3.3(f) p025 における ALES と Wang の差の分布

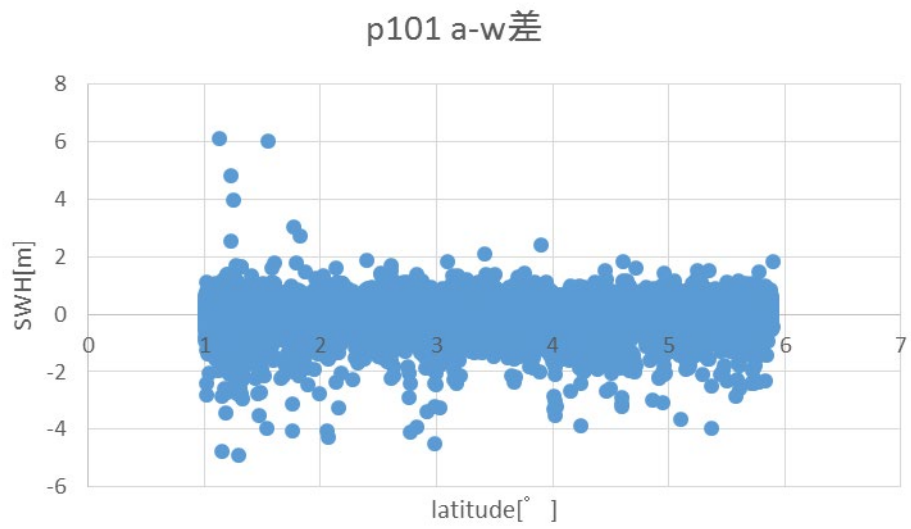


図 3.3(g) p101 における ALES と Wang の差の分布

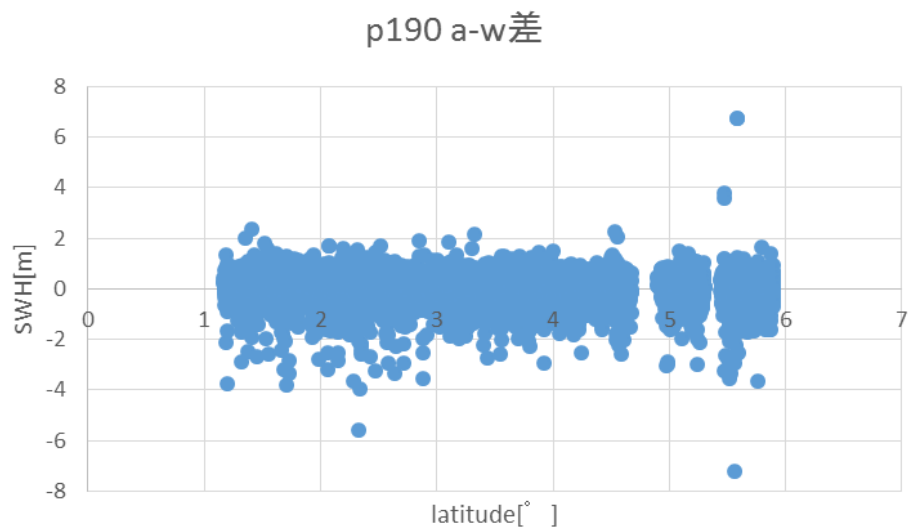


図 3.3(h) p190 における ALES と Wang の差の分布

## 第4章 モデル比較結果

この章では、WW3 波浪モデルと高度計の観測とを比較する。3 章と同様に、まず 4.1 節で特定のサイクル(cycle203)における軌道沿いの ALES と Wang、WW3 波浪モデルの SWH の分布をみる。次に、4.2 節で ALES と Wang のアルゴリズムに対して、それぞれ WW3 波浪モデルの 2014/01~2014/05 の約 5 か月分の全データからヒストグラム分布を求め、分布の違いを調べる。さらに 4.3 節で ALES と Wang のアルゴリズムそれぞれに対して WW3 波浪モデルとの散布図と緯度毎の SWH の差の分布から比較を行う。

### 4.1 軌道沿いの SWH : モデルとの比較

図 4.1 は各軌道における cycle203 の SWH の比較である。少なくともこの cycle では全ての軌道に関して、全体的に WW3 波浪モデルの SWH が低い傾向にある。ただし、p012 の 3° 以南、p025 の 5° 付近、p101 の 3° ~4°、p190 の 4° 付近など、場所によっては Wang が WW3 の値よりも低い値になっていることが確認できた。また、モデルの SWH は空間スケールが高度計よりも大きく。狭い距離で大きく変化する変動は p190 の 5.88° N 以外では見られなかった。この場所は、地形境界付近なのでモデルの推定における例外であると考えられる。

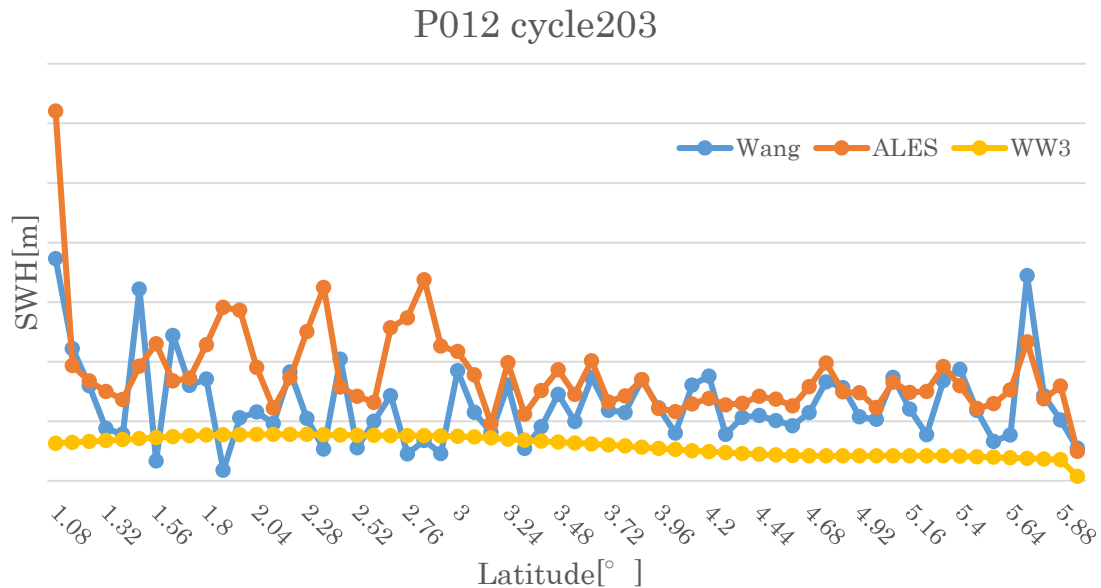


図 4.1(a) P012 において 2014/1/05 11:00 のモデルとその時刻付近で観測された各アルゴリズムの有義波高を 0.08° N 毎に平滑化したグラフ



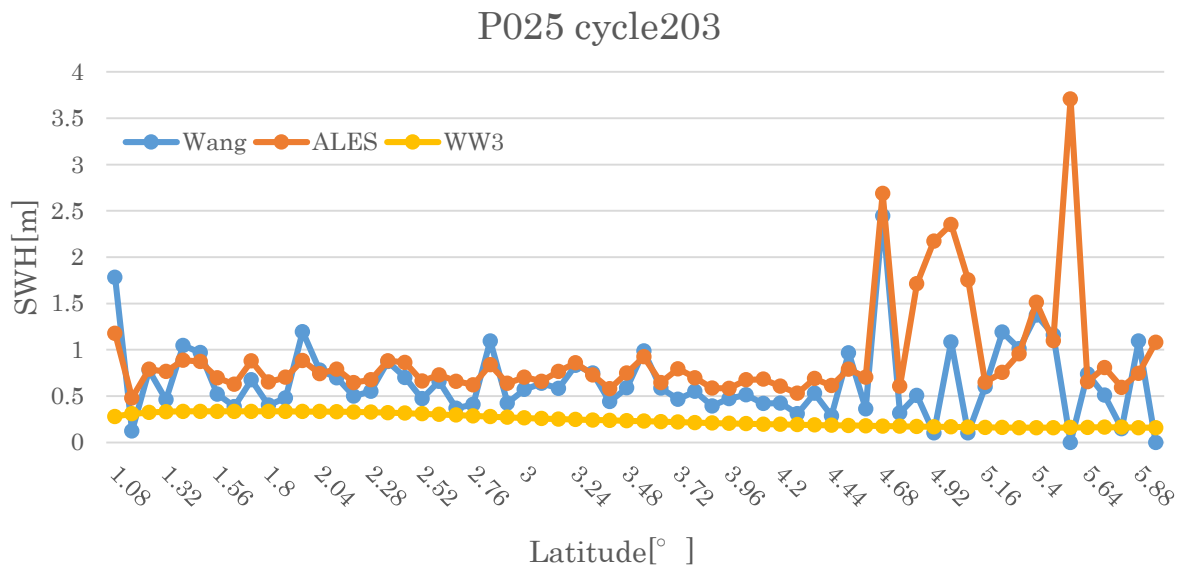


図 4.1(b) P025 において 2014/1/05 23:00 のモデルとその時刻付近で観測された各アルゴリズムの有義波高を  $0.08^\circ$  N 毎に平滑化したグラフ

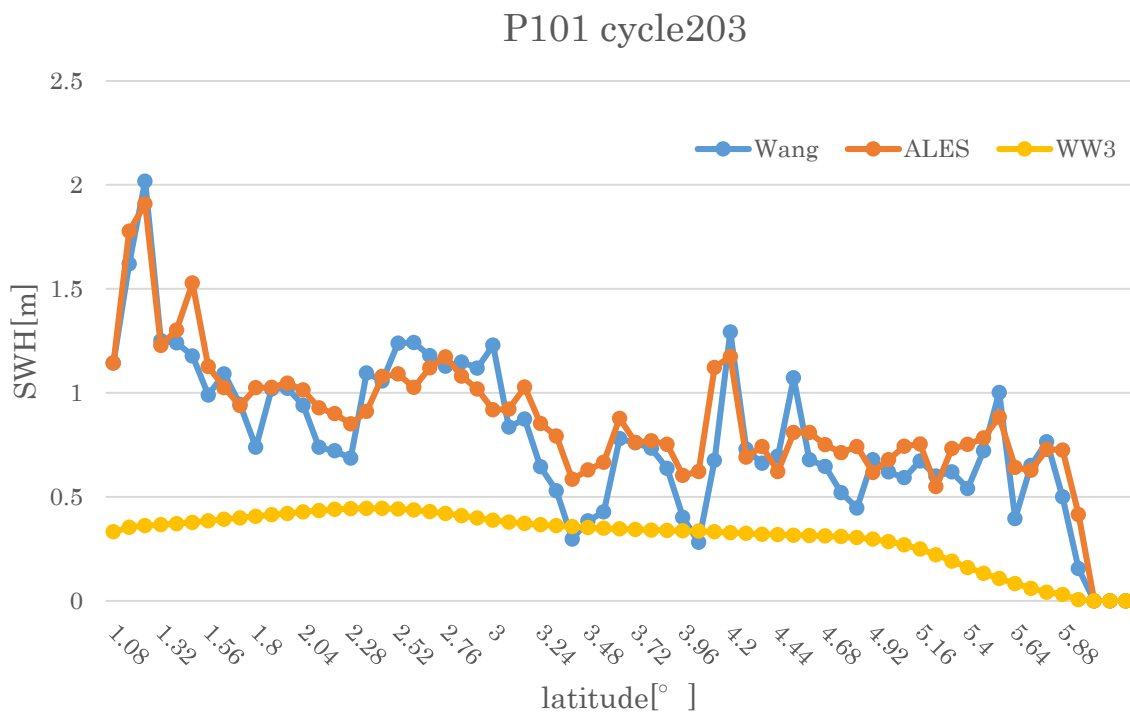


図 4.1(c) P101 において 2014/1/08 22:00 のモデルとその時刻付近で観測された各アルゴリズムの有義波高を  $0.08^\circ$  N 毎に平滑化したグラフ

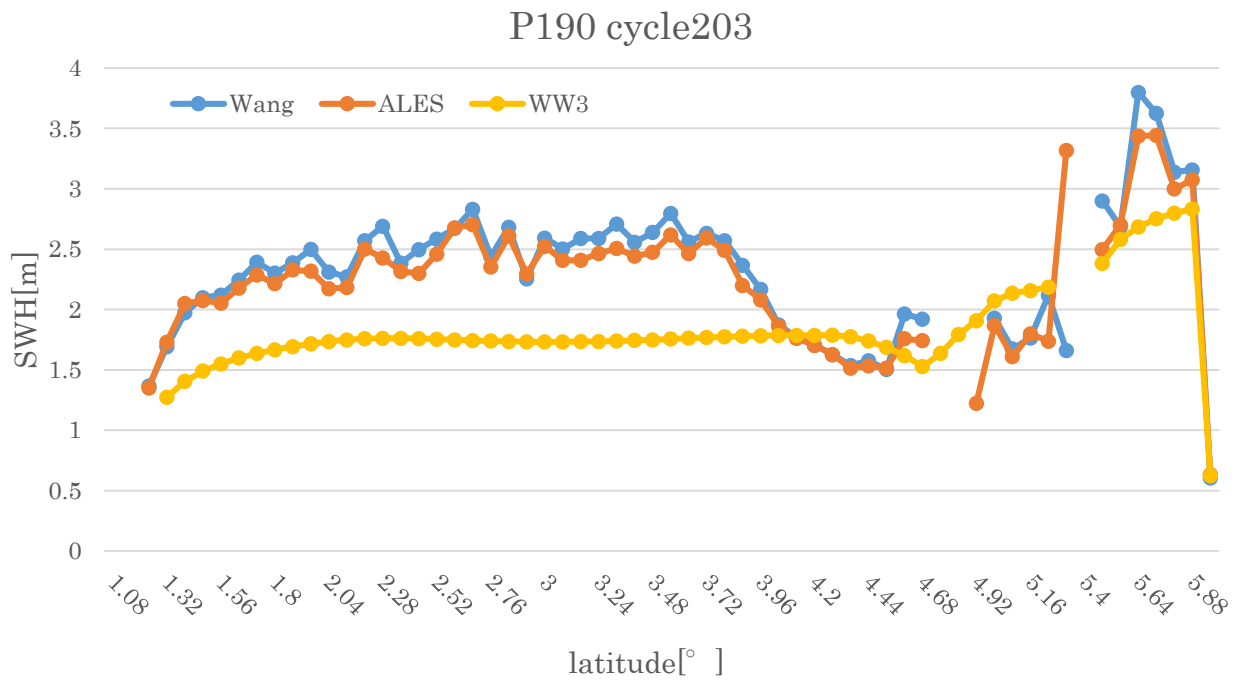


図 4.1(d) P190 において 2014/1/12 10:00 のモデルとその時刻付近で観測された各アルゴリズムの有義波高を  $0.08^\circ$  N 毎に平滑化したグラフ

## 4.2 ヒストグラム分布によるモデルとの比較

各軌道の WW3 モデルのヒストグラムを図 4.2 に示す。比較する ALES、Wang のヒストグラムは 3.2 節を参照。WW3 のヒストグラムは最も SWH の小さな 0.5m にピークが来ており、Wang や SGDR の分布パターンと似ていた。どの軌道にも、ALES でみられるような 1m 付近の最頻値は見られなかった。

図 4.2(a)~(d) : 各軌道の WW3 のヒストグラム分布

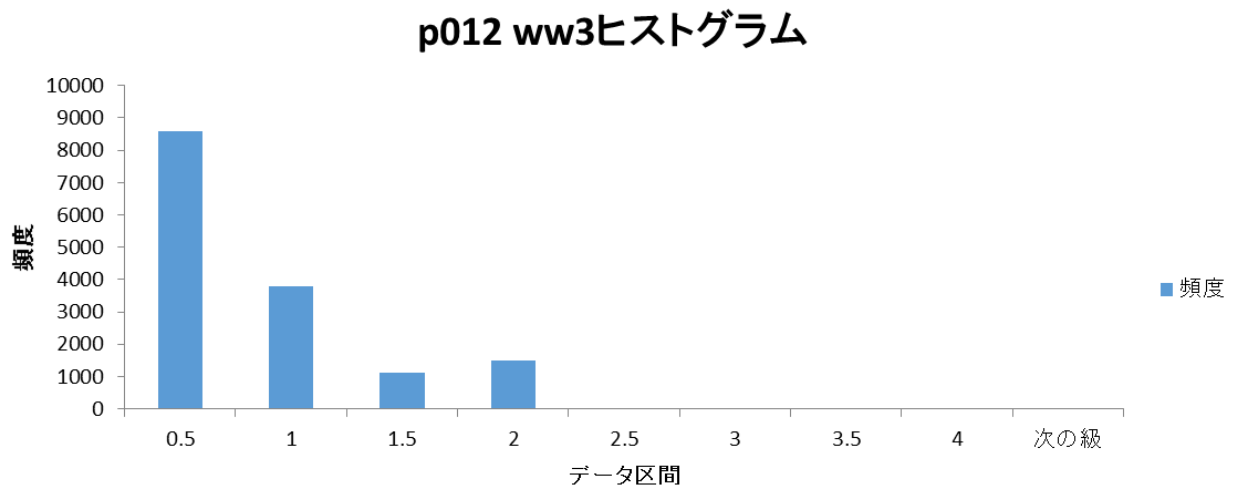


図 4.2(a)

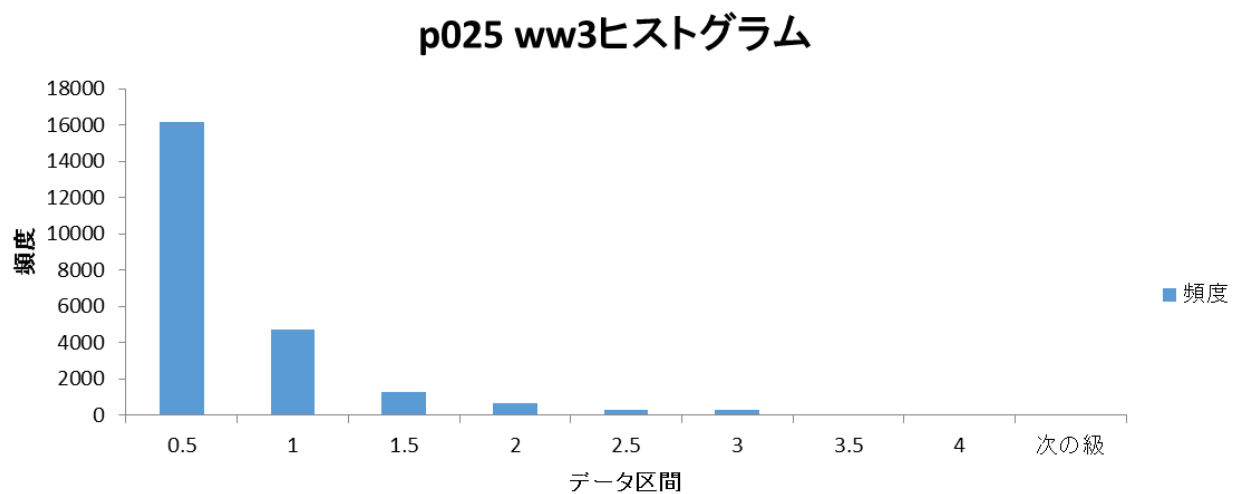


図 4.2(b)

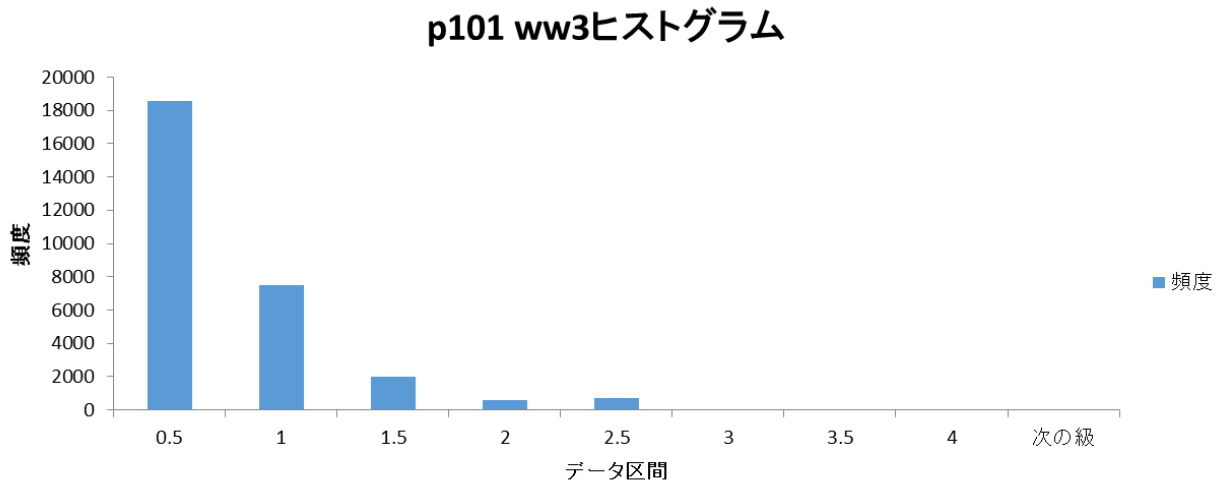


図 4.2(c)

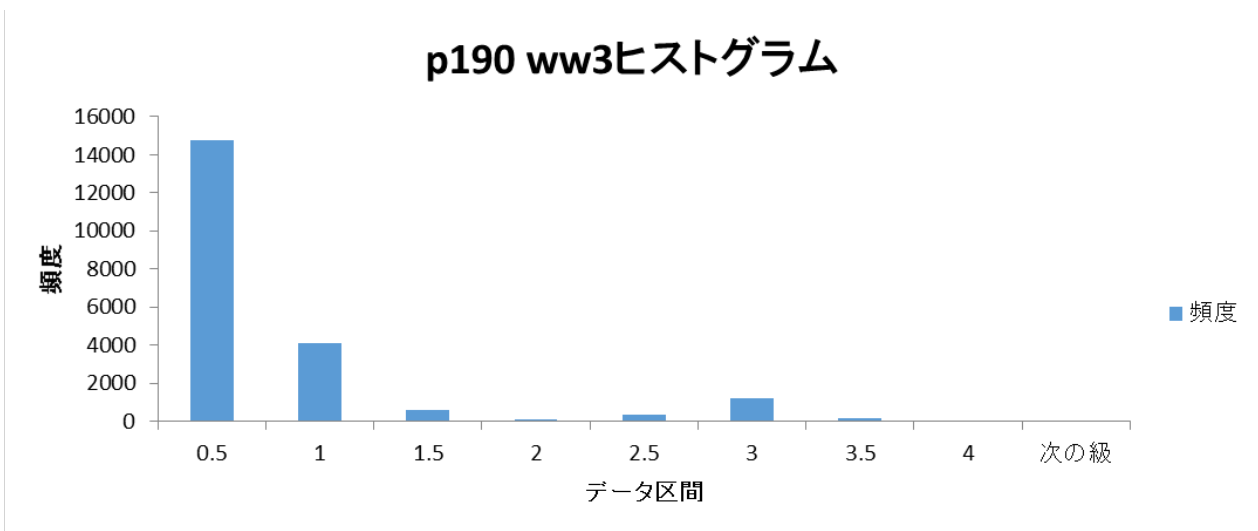


図 4.2(d)

次に、各軌道における5か月間の全期間の統計値を比較してみると、SWHの平均値はWW3が顕著に小さかった(表4.1)。一方、標準偏差に関しては、WW3とALESが比較的近い値となり、Wangが大きかった。ただし、複雑な地形を通るp190に関してはその差は大きくなかった。

P012	Wang	ALES	WW3
平均 SWH(m)	0.800326	0.885005	0.557523
標準偏差	0.459517	0.268126	0.25171

P025	Wang	ALES	WW3
平均 SWH(m)	0.775436	0.866453	0.459555
標準偏差	0.425011	0.244054	0.242675

P101	Wang	ALES	WW3
平均 SWH(m)	0.877813	0.933741	0.54315
標準偏差	0.430431	0.264475	0.187443

P190	Wang	ALES	WW3
平均 SWH(m)	0.799582	0.894886	0.547321
標準偏差	0.521454	0.340143	0.460592

表 4.1 軌道沿いの Wang、ALES、WW3 の平均 SWH と標準偏差

### 4.3 軌道毎の散布図

図 4.3.1 は、p190 における Wang と WW3 の SWH の散布図である。図では横軸方向に線状の構造が顕著に見てとれる。これは、Wang の推定値にノイズ状の信号が入っているために横軸方向に幅広がっていると考えた。4.1 節で見たようなモデルと高度計の空間スケールの違いが原因だと考え、そこで、ここではアルゴリズムの結果を軌道沿いに 50 点の平滑化を施したうえで比較を行った。

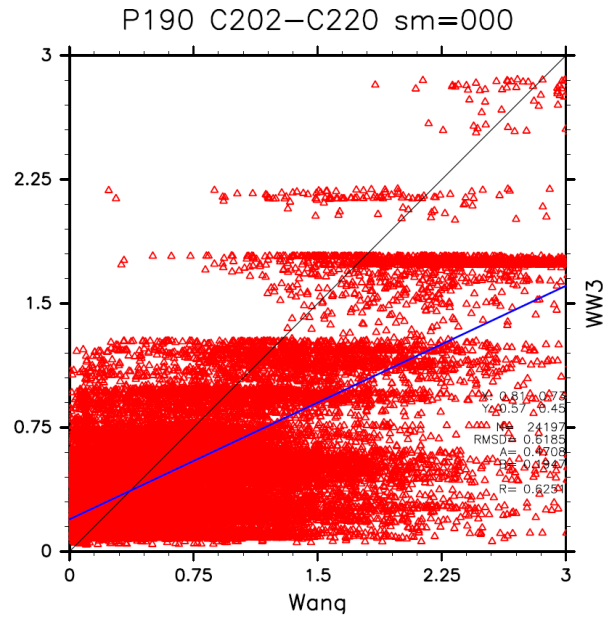


図 4.3.1 Wang とモデルの p190 沿いの散布図

図 4.3(a)~(d)より、ALES も Wang もともに 0.6~0.8 の正の相関が出ている。近似直線の傾きも 0.8~1.2 と 1 に近い。ただし、切片は負の値となっており、WW3 がバイアス的に 0.2~0.8m 程度 SWH が小さい値であること、または高度計の SWH の値が大きい値になっていることがわかる。

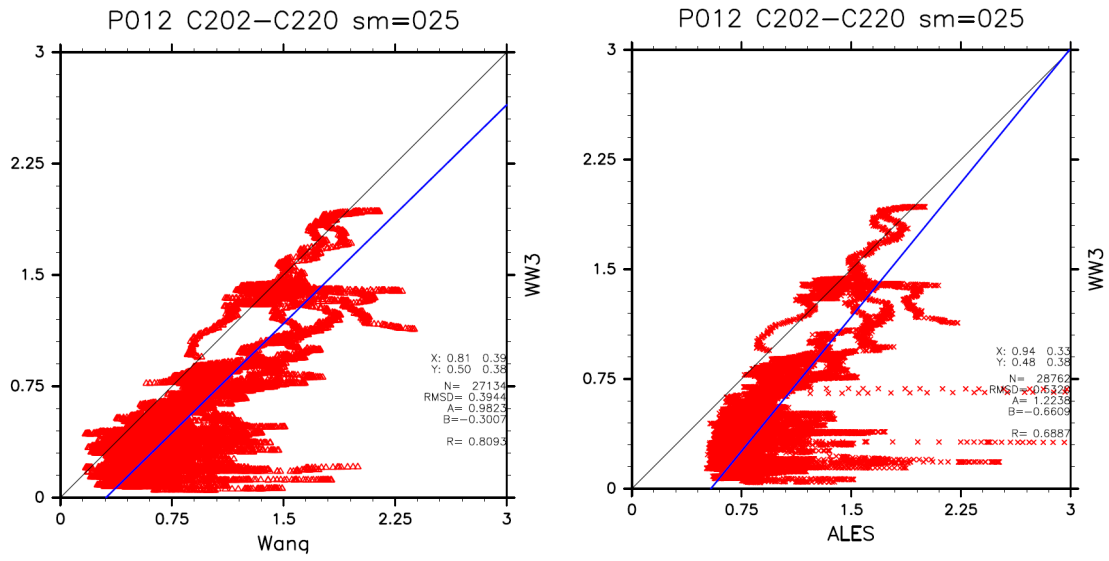


図 4.3.2(a) p012 沿いにおける WW3 と Wang(左)、ALES(右)の散布図

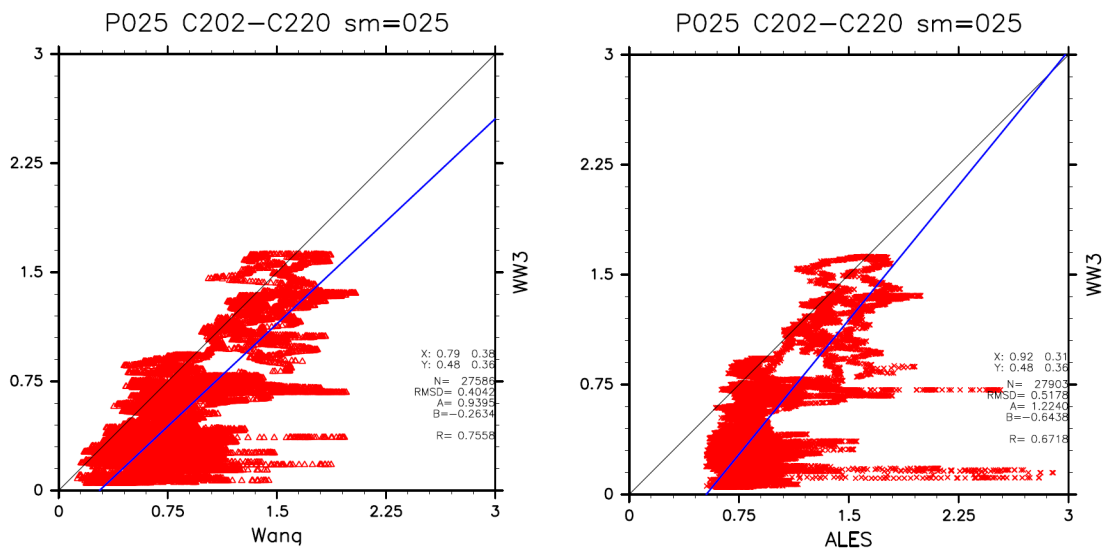


図 4.3.2(b) p025 沿いにおける WW3 と Wang(左)、ALES(右)の散布図

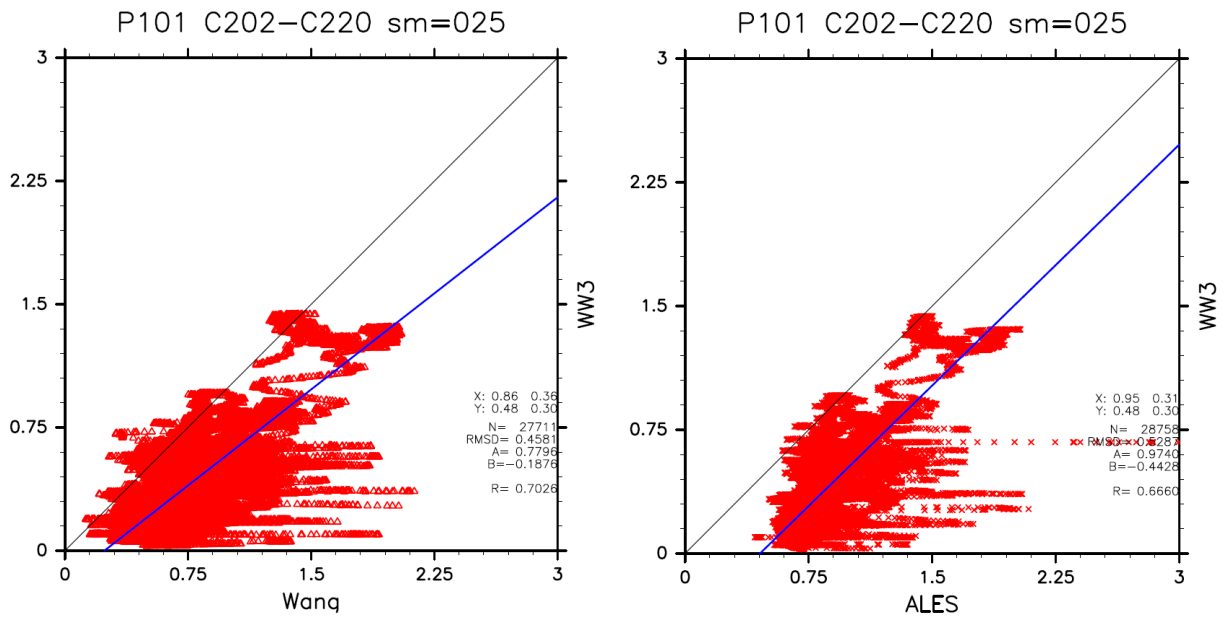


図 4.3.2(c) p101 沿いにおける WW3 と Wang(左)、ALES(右)の散布図

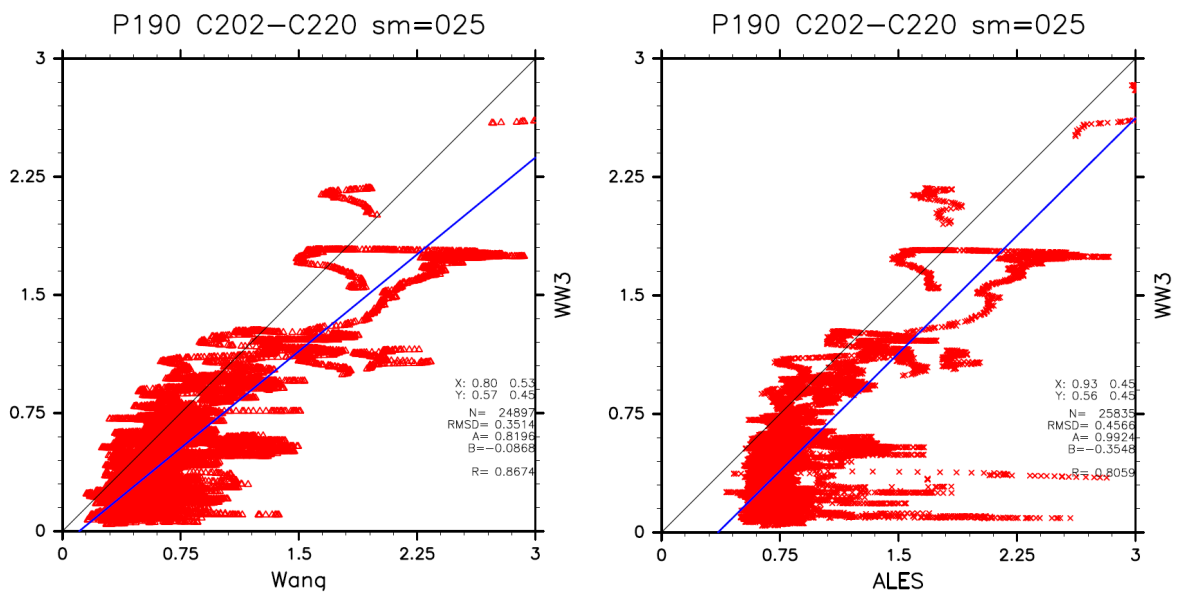


図 4.3.2(d) p190 沿いにおける WW3 と Wang(左)、ALES(右)の散布図



## 第5章 議論

3.2 節で述べたヒストグラムの分布をみると、Wang と SGDR は有義波高とともに頻度が減少していたが ALES のアルゴリズムのみが 1m 付近でピークを持っていた。4.2 節で WW3 モデルのヒストグラムを調べると、Wang や SGDR と同じ変化を示していた。これらの結果から、ALES の有義波高の 0~1m の出現頻度が少なすぎるのではないかと推測される。Wang et al. (2019)では、waveform 中の leading edge の推定例として図 5.1 のようなケースを示している。

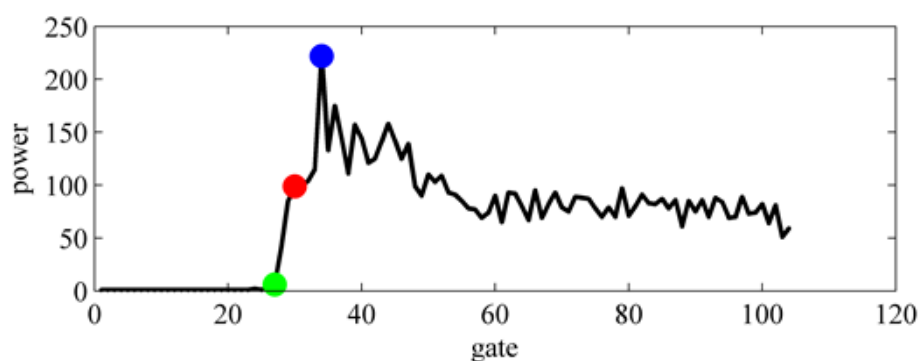


図 5.1 スロープが 2 ヶ所ある waveform(Wang et al. 2019)緑点:立ち上がりの始点、赤点:1 目目のスロープの頂点、青点:2 目目のスロープの頂点

この例では、waveform の立ち上がり付近の傾斜において Leading edge が推定できるスロープが 2 ヶ所ある。Wang は緑点から赤点までを leading edge として fit させているため傾きが大きくなりやすく、小さな SWH の値を計測することができる。しかし、ALES は leading edge を定めるため緑点から青点までを fit させるので傾きは緩くなり、低い SWH の値がとりにくくなっている。

一方、Wang と WW3 モデルを比較した 4.3 節では、散布図の近似直線が 1 に近く、モデルと高度計が似たような変動傾向を示すものの、切片が負値でモデルの有義波高の方が高度計よりも小さいという結果が得られた。前述した leading edge の推定手法の決定方法により、高度計のアルゴリズムでは leading edge の傾きを  $\infty$  にすることはできないため、推定できる有義波高の下限がある。このため、モデルの有義波高が 0 に近い場合には高度計の推定値が過大評価される可能性がある。

ただし、有義波高が 1m 近く有意に大きな値をとる場合でも、4.3 節の近似直線はモデルの推定値が小さいという結果を示しており、これは、高度計の有義波高の下限值だけでは説明できない。つまりモデルの推定値が過小である可能性もある。実際、今回使用したモデルでは、計算範囲外からの外洋のうねりを含んでいないため、セレベス海内部に太平洋からうねりが入る場合には、モデルの推定値が過小評価されている可能性がある。より広域の波浪を含んだモデルと比較することで、うねりの効果は評価することが可能なので、これらは今後の課題である。

## 第6章 まとめ

人工衛星海面高度計は、広域の波浪を繰り返し観測できる唯一の手法として有用だが、沿岸域など、電波の反射強度が不均一な場所では推定精度が下がることが知られていた。近年、沿岸域の海面高度推定に特化して開発された人工衛星海面高度計の新しいアルゴリズムに対して、インドネシア多島海における有義波高がどれだけ改善されたかを確認し、さらにアルゴリズム間の比較を行った。

Jason-2 の約 7 年間の軌道沿いの有義波高に関しては、SGDR(旧アルゴリズム)では異常値が多かったが、ALES と Wang の新型アルゴリズムでは改善されていた。また、ヒストグラムを調べると、ALES は 0.5~1m で有義波高が最頻値をとることに対して、SGDR と Wang は 0~0.5m で最頻値をとっており、各アルゴリズムの分布の特徴の違いを確認した。

さらに、5 か月間ではあるが WW3 数値モデルの計算結果と比較すると、WW3 におけるヒストグラムは Wang と同様なパターンで分布しており、ALES のような特徴ではなかった。これは、ALES のアルゴリズム測定原理に原因があり、leading edge の傾きを小さく決めてしまうので低い SWH の値が出にくくなっているためであると考えた。また、Wang と WW3 の散布図では、近似直線の傾きは 1 に近かったが、切片が負の値を示していた。これは、ALES 同様 SWH の最小値が限られているため、モデルより SWH が高くなったともいえるが、今回使用したモデルには計算領域外からの外洋のうねりを含んでいないため、モデルの SWH が過小推定されている可能性がある。今後は、広域の波浪を含んだモデルとの比較を行うことでうねりの影響を評価する予定である。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、九州大学応用力学研究所の市川香准教授には、研究の全体的な方向性、研究の進め方、論文の書き方など、ひとかたならぬご指導とご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

今回、大連海洋大学の王喜風博士に、スラベス海の Jason-2 データの SGDR、ALES、Wang のアルゴリズムの結果を提供して頂きました。また、港湾空港技術研究所の田村仁博士に、多島海の WW3 波浪モデルの結果を提供して頂きました。

同研究室の時長宏樹教授には、研究を進めるにあたり、様々なご助言を頂きました。研究室の秘書の高田典子氏には、日常生活の様々なことでお世話をして頂きました。

同研究室の王釧氷君には、研究や勉強、または日々の生活のことで沢山相談にのって頂き、大学院生としての学校生活を充実にして頂きました。

私がお世話になった皆様全員に対し、厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1]市川香, 21 世紀初頭の衛星海面高度計(2013)
- [2] Marcello Passaro, Paolo Cipollini, Stefano Vignudelli, Graham D. Quartly, Helen M. Snaith, () “ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry”
- [3] Agustinus Ribal & Ian R. Young,() “33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations”
- [4] Xifeng Wang, and Kaoru Ichikawa,(2017) “Coastal waveform retracking for Jason-2 altimeter data based on along-track echograms around the Tsushima Islands in Japan”
- [5] Xifeng Wang, Kaoru Ichikawa, and Dongni Wei,(2019) “Coastal Waveform Retracking in the Slick-Rich Sulawesi Sea of Indonesia, Based on Variable Footprint Size with Homogeneous Sea Surface Roughness”
- [6] Environmental Modeling Center  
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- [7]Sharing Earth Observation Resources  
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jason-2>