

海面ブラッグ反射の フルウェーブ電磁界シミュレーション



東京農工大学^{*1}

琉球大学^{*2}

小林 寛希^{*1} 宇野 亨^{*1} 藤井 智史^{*2} 有馬 卓司^{*1}

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手順

計算結果

まとめ

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手順

計算結果

まとめ

背景・目的

特定の条件下でドップラースpekトルのピーク位置が
計算によって求まる位置と異なって計測される



シミュレーションを用いて
海面で起きている現象を明らかにする

代表的な電磁界解析手法

- ・FDTD法・・・複雑な形状の解析も出来る
- ・FEM　　・・・複雑な形状の解析に適しているが大規模な解析には向いていない
- ・MoM　　・・・誘電体などの解析には向いていない

MR-FDTD法

波源と散乱体が離れている場合、その間を省いて計算することが出来る



効率的な解析が可能

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- FDTD法
- MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手順

計算結果

まとめ

FDTD法

マクスウェルの方程式を時間、および空間について差分化をして電磁界を解析する



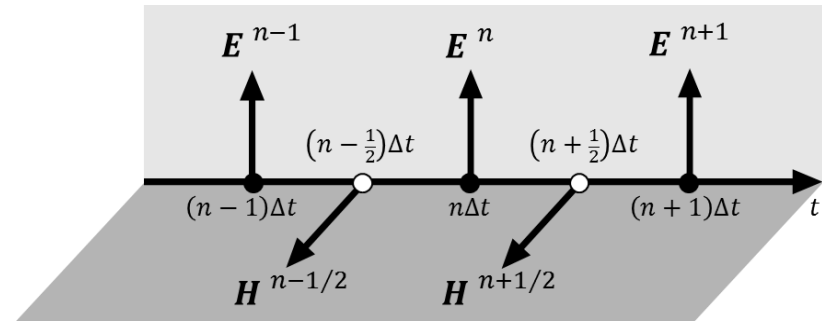
$$\mathbf{E}^n = \frac{1 - \sigma\Delta t/2\varepsilon}{1 + \sigma\Delta t/2\varepsilon} \mathbf{E}^{n-1} + \frac{\Delta t/\varepsilon}{1 + \sigma\Delta t/2\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$$
$$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n$$

あるセルの電界値の計算

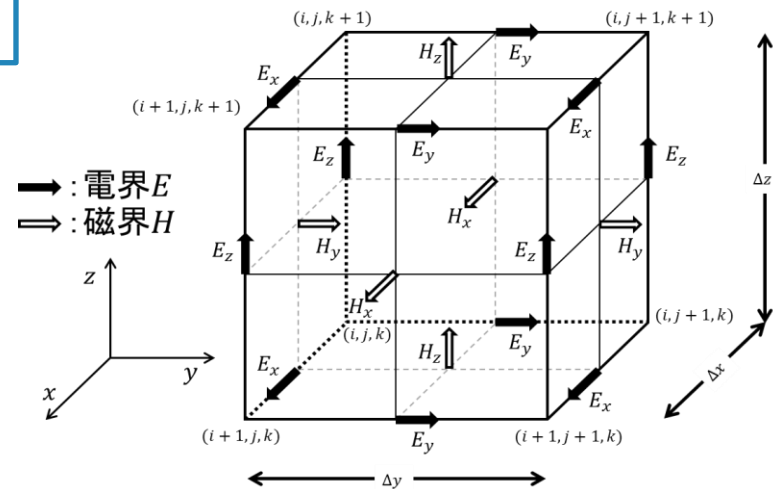
➡ 1タイムステップ前の電界、その場所の磁界のローテーション

あるセルの磁界の計算

➡ 1タイムステップ前の磁界、その場所の電界のローテーション



電磁界の時間配置



電磁界の空間配置

MR-FDTD法

海洋レーダは数十キロメートル先まで
海流の速度を計算することが出来る

通常のFDTD法でシミュレーションを行
うと、計算コストが膨大になる

MR-FDTD法を用いて計算コストを削減

計算手順

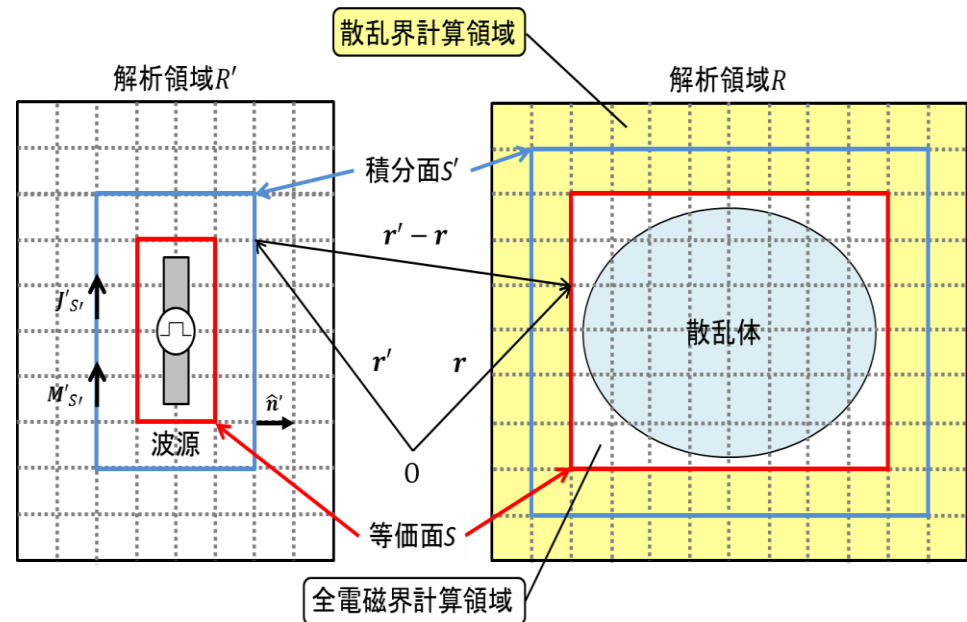
領域 R' の遠方界から、領域 R' の等価面の電界を計算



領域 R' の等価面に求めた電界を入力し、領域 R' の遠方界から
領域 R の等価面の電界を計算



領域 R の等価面に求めた電界を入力し、アンテナの受信電圧
を計算



目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手法

計算結果

まとめ

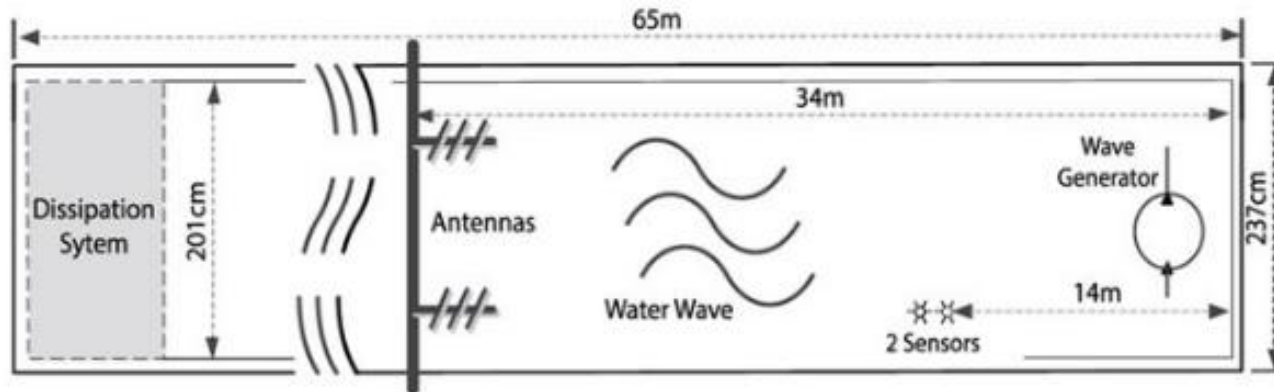
特異なスペクトルが生じる条件

ブラッグ散乱は電波の半波長の海上の波から生じる

➡ その海上の波の整数倍からの波からも強い散乱が生じる

整数倍の海面波からドップラースペクトルを計算する実験

*340[MHz]の電波を用い、水槽内に発生させた波からの散乱波を測定



*Biyang Wen, Ke Li “Frequency shift of the Bragg and Non-Bragg backscattering from periodic water wave” , Scientific Reports Vol.6, 2016

実験による測定結果

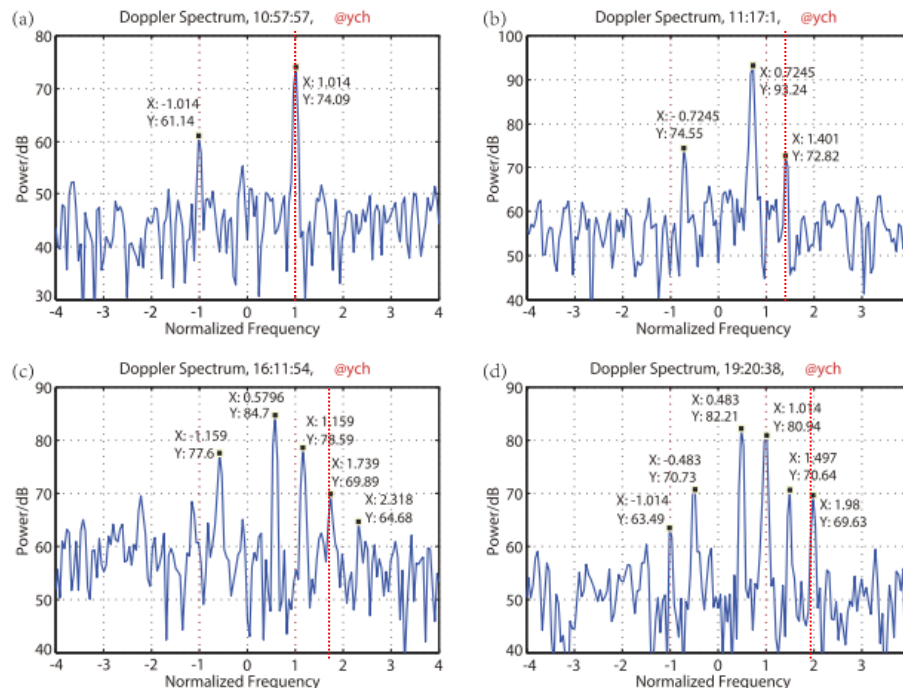
電波の波長を $2\lambda_B$, このときの
ドップラー周波数を f_B としたとき

海面の波長

(a) λ_B , (b) $2\lambda_B$, (c) $3\lambda_B$, (d) $4\lambda_B$



本来生じない周波数でピークが表
れている



波長 λ_B	λ_B	$2\lambda_B$	$3\lambda_B$	$4\lambda_B$
計算で求まる ドップラー周波数 f_D	$1.00f_B$	$1.41f_B$	$1.73f_B$	$1.99f_B$
計算値と一致する ドップラー周波数	$1.014f_B$	$1.401f_B$	$1.739f_B$	$1.98f_B$
その他の ドップラー周波数		$0.7245f_B$	$0.5796f_B$ $1.159f_B$ $2.318f_B$	$0.483f_B$ $1.014f_B$ $1.497f_B$

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手法

計算結果

まとめ

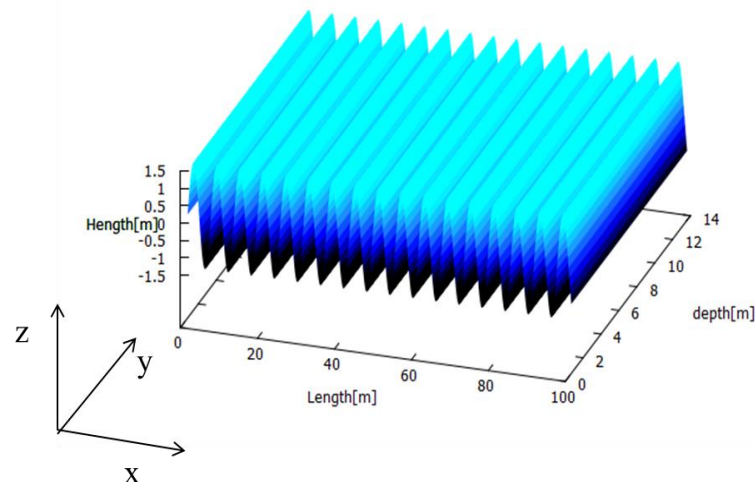
海面モデルの作成

海の波は波動方程式に従って動く

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) = c \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t)$$

差分化し、書き換えると

$$U_j^{n+1} = 2U_j^n - U_j^{n-1} + c \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 (U_{j+1}^n - 2U_j^n + U_{j-1}^n)$$



24.5MHzの電波を用いると、ブラッグ散乱を起こす波の波長 $\lambda_B=6.21\text{m}$, 位相速度 $c=3.07\text{m/s}$

海面の波長を整数倍し, 位相速度を求め4種類の海面のデータを作成

波長	λ_B	$2\lambda_B$	$3\lambda_B$	$4\lambda_B$
振幅[m]	1.0	2.0	3.0	4.0
位相速度 $c[\text{m/s}]$	3.07	4.36	5.33	6.16
ドップラー周波数 $f_B[\text{Hz}]$	0.52	0.71	0.87	1.01

シミュレーションの手順

海面の速度と電磁波の速度が大きく異なる



シミュレーション上で海の動きを再現することが困難

電波の送受信の間は海面は動かないと設定

計算手順

海面のデータをシミュレーションに組み込む



電波の送受信を行い、海面からの散乱波の計算



FFT

距離毎の信号強度を計算



海面のデータを0.25秒間進める



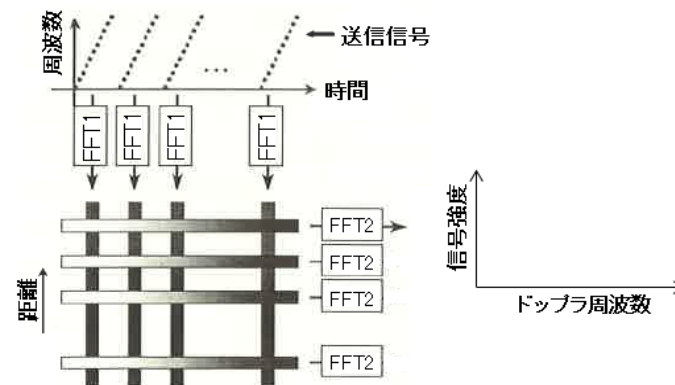
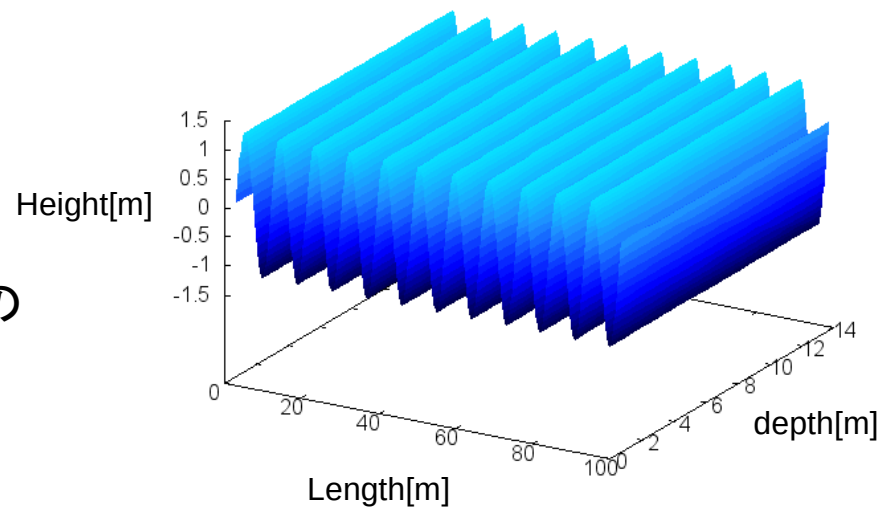
距離毎の信号強度の時系列



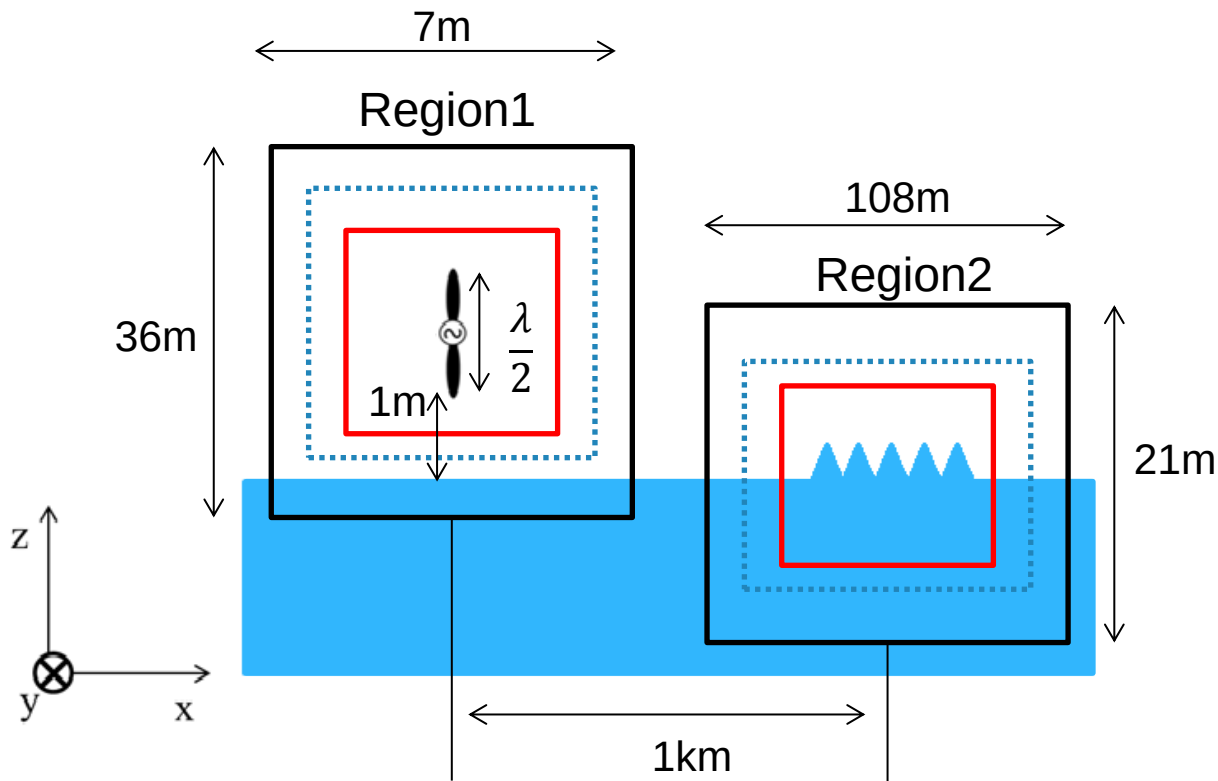
並び替え,FFT

ドップラスペクトルの計算

64
回
繰
り
返
し



シミュレーションモデル



セルサイズ[mm]	0.18 × 0.18 × 0.18
解析領域(Region1)[cell]	41 × 41 × 201
解析領域(Region2)[cell]	601 × 101 × 121
ダイポール長[m]	6.3
タイムステップ[ns]	0.76
タイムステップ数	8300
掃引周波数[MHz]	3
周波数掃引時間(ステップ数)	3000
周波数[MHz]	24.5

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

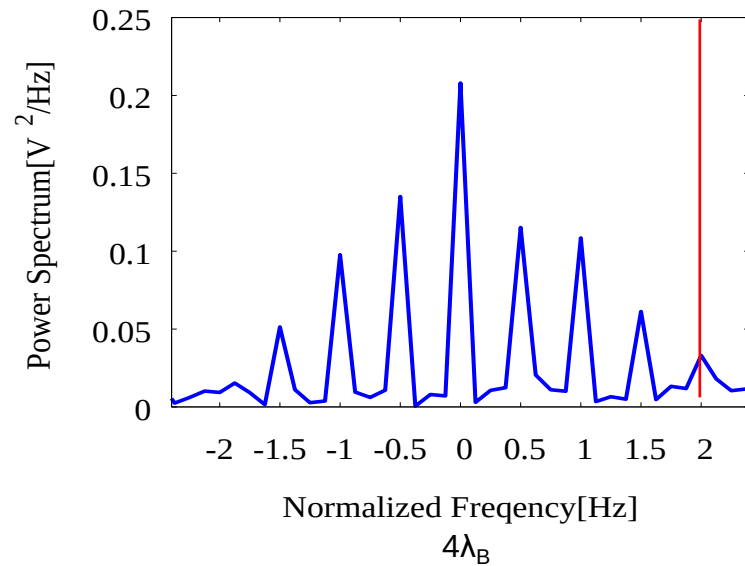
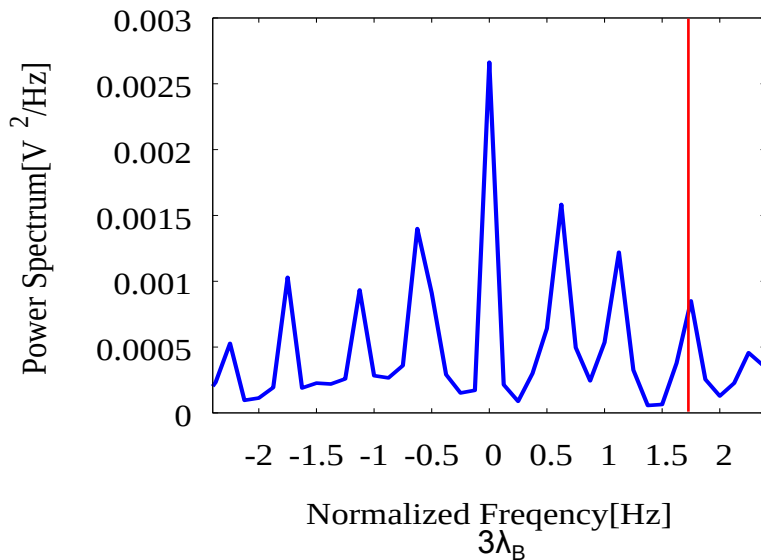
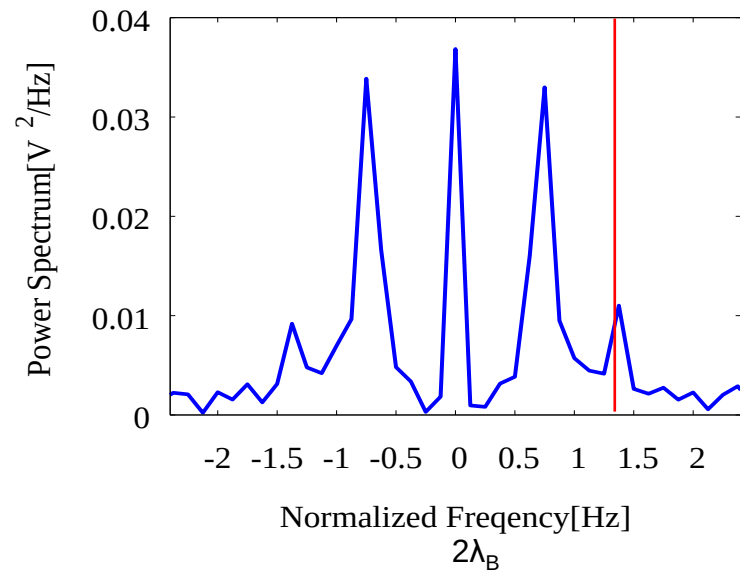
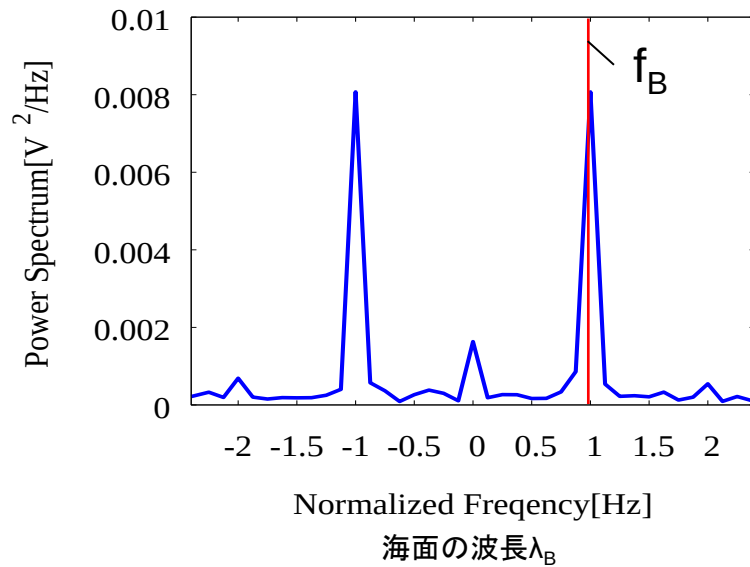
特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手法

計算結果

まとめ

ドップラースペクトルの計算結果

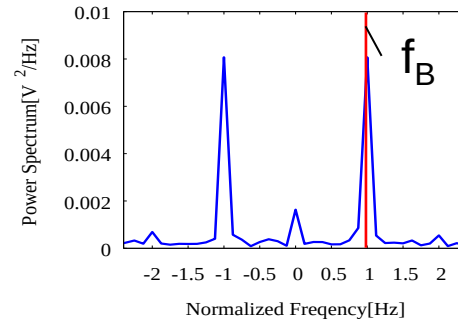


ドップラースペクトルの計算結果

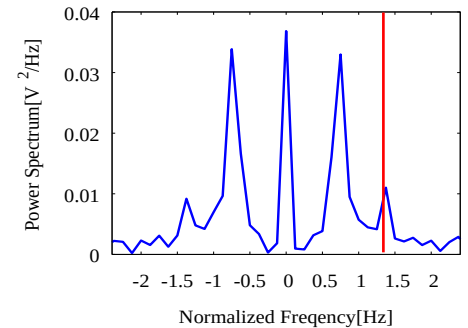
ピークが計算値以外の周波数でも表れる



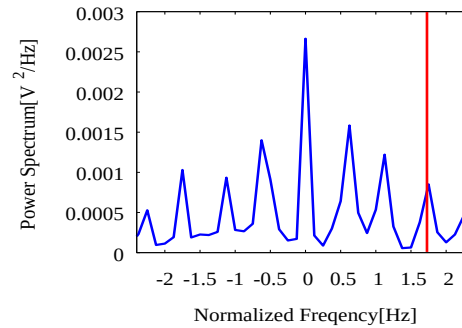
ピークが表れる周波数が実験とシミュレーションで一致している



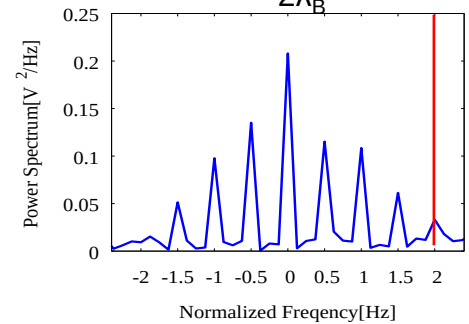
海面の波長 λ_B



$2\lambda_B$



$3\lambda_B$



$4\lambda_B$

海上の波の波長	λ_B	$2\lambda_B$	$3\lambda_B$	$4\lambda_B$
ドップラー周波数の計算値	$1.00f_B$	$1.41f_B$	$1.73f_B$	$1.99f_B$
計算値と一致するドップラー周波数	$1.00f_B$	$1.38f_B$	$1.75f_B$	$2.00f_B$
その他のドップラー周波数		$0.75f_B$	$0.63f_B$ $1.13f_B$ $2.25f_B$	$0.50f_B$ $1.00f_B$ $1.50f_B$

電流値の計算

なぜドップラースペクトルの位置が計算値とずれるのか



シミュレーションで海面表面の電流から考察

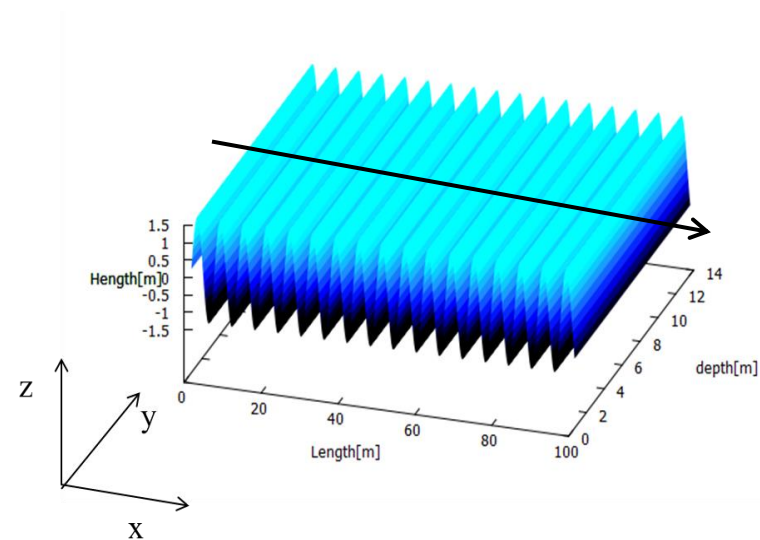
海面表面の電流値は、海面の表面に一番近いセルの電界値を用いて

$$J = \sigma E + j\omega(\epsilon_r - 1)E$$

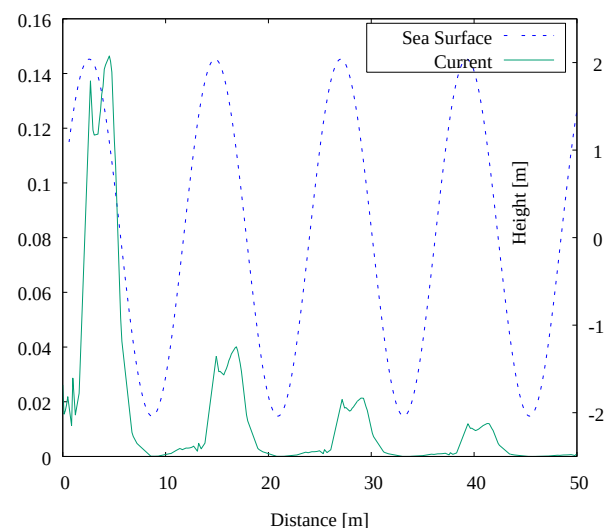
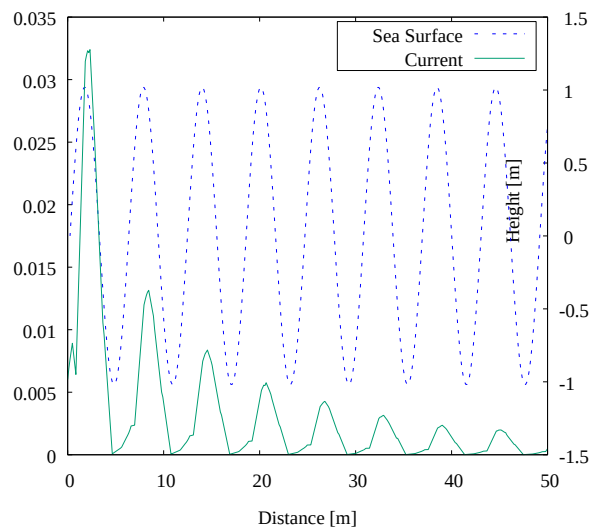
x軸方向に海上の波に沿うように
各地点の電流の実効値を計算



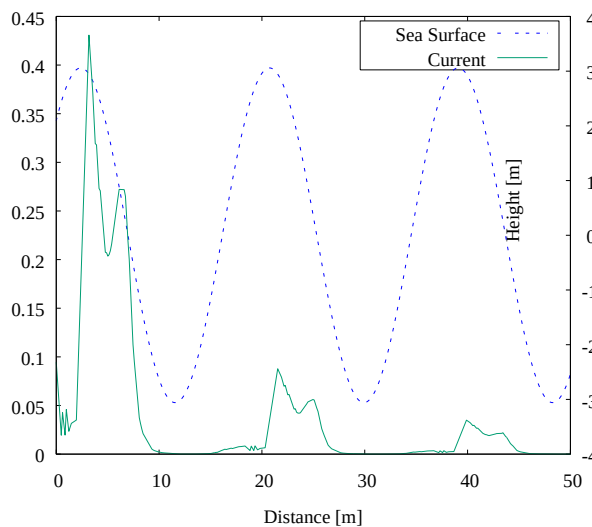
海面の高さと比較



海表面の電流値

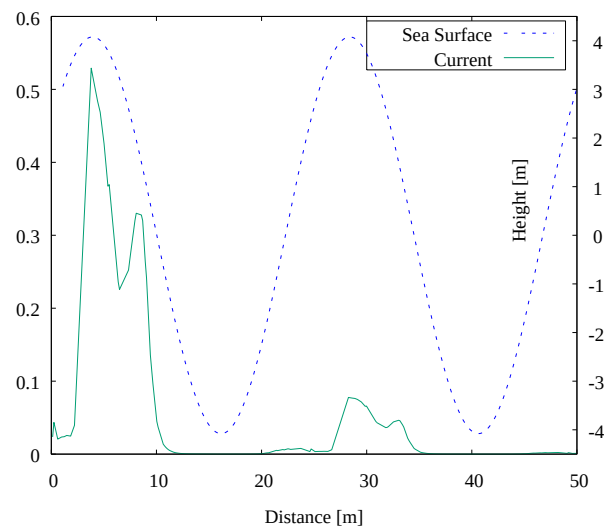


海面の波長 λ_B



$3\lambda_B$

$2\lambda_B$



$4\lambda_B$

海表面の電流値

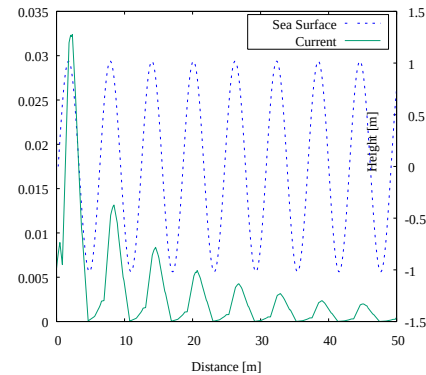
- ・海上の波に従って値が変化
- ・波のピークの位置で電流値がピークとなっている



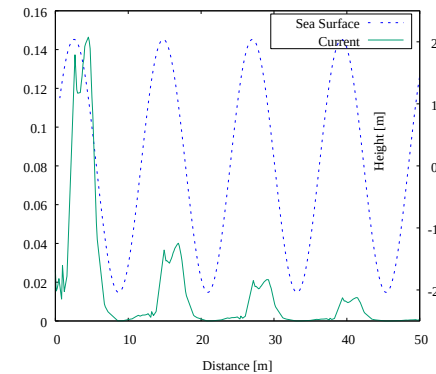
海上の波が電波の半波長の整数倍
その他の位置でピークが生じる



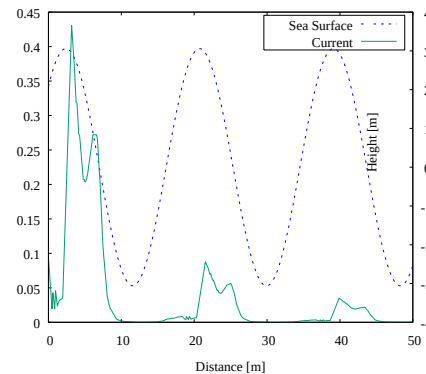
- ・一周期の海上の波の場合このようなピークは発生しない
- ・奥側の波からの影響



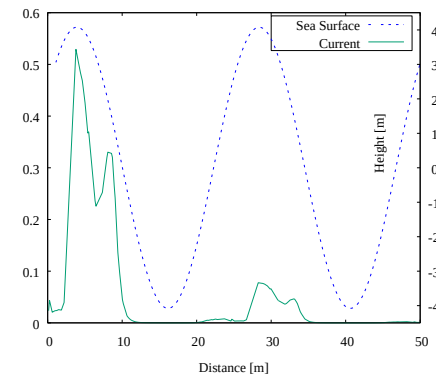
海面の波長 λ_B



$2\lambda_B$



$3\lambda_B$



$4\lambda_B$

電流の時系列データの計算

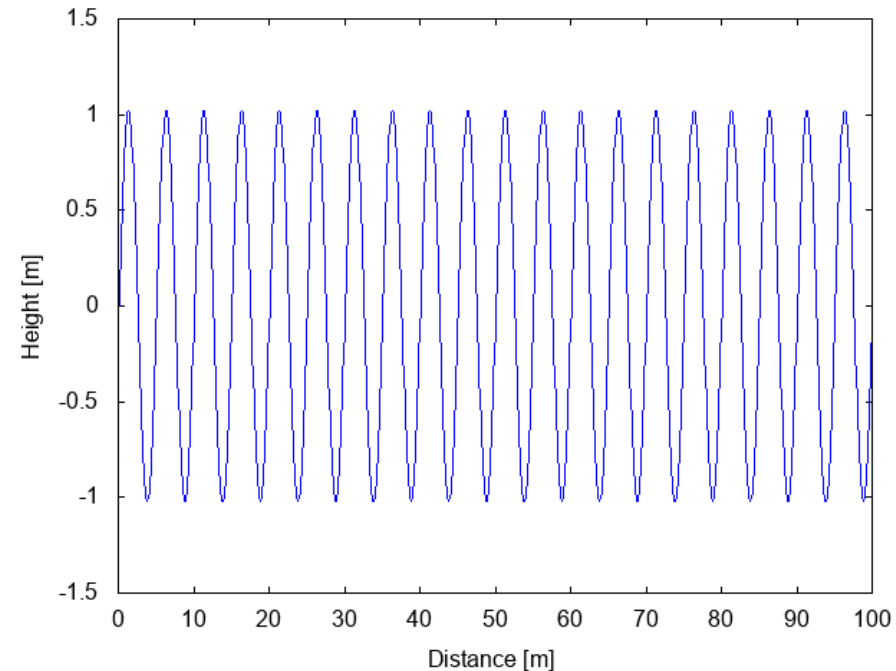
海上の波の山の部分の実効値を計算



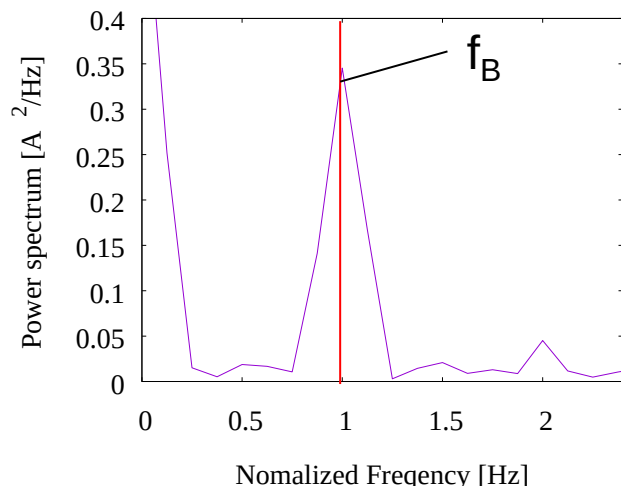
64回繰り返し計算を行い、時系列データを計算



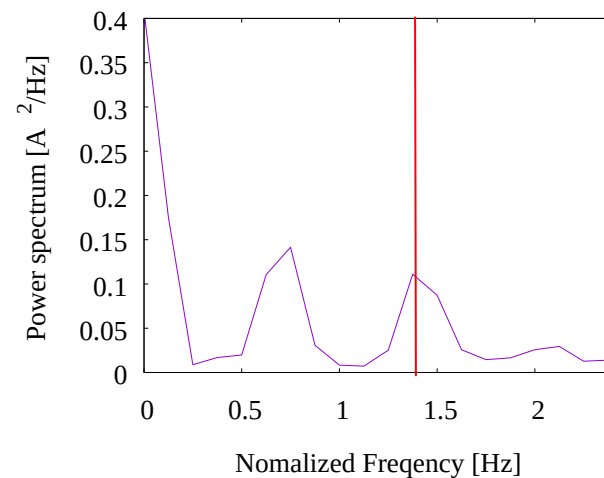
フーリエ変換し、電流の実効値の周波数スペクトルを計算



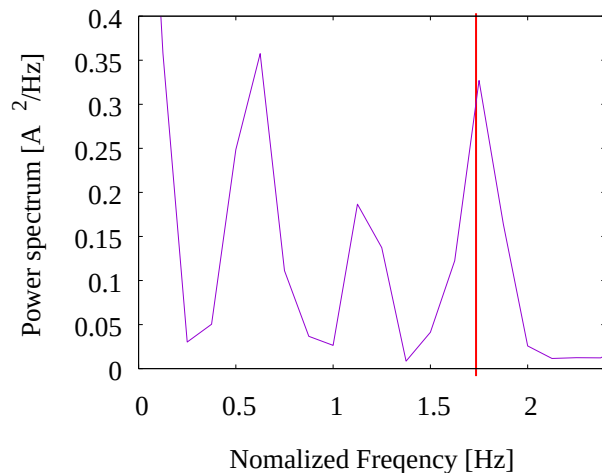
電流値の周波数スペクトル



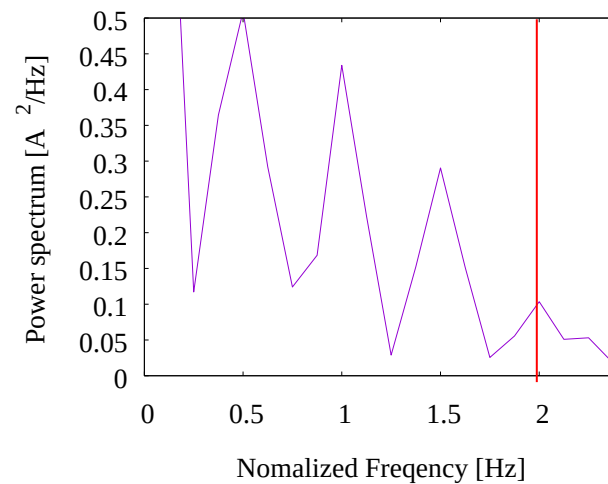
海面の波長 λ_B



$2\lambda_B$



$3\lambda_B$



$4\lambda_B$

電流値の周波数スペクトル

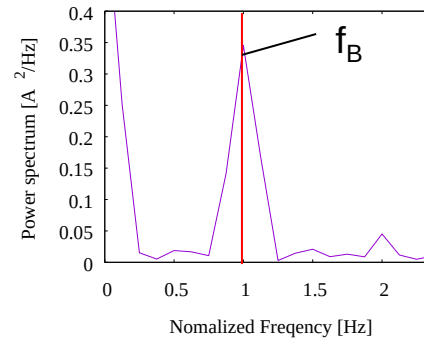
ドップラースペクトルのピークと一致する周波数でピークが表れている



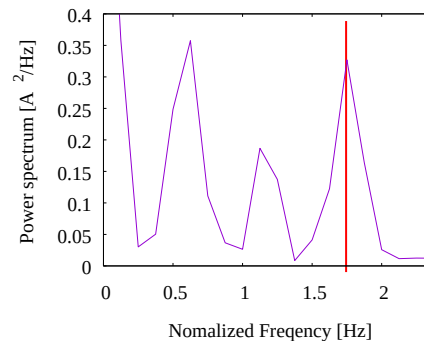
- ・海上の波の波長が電波の半波長の場合、計算値のドップラー周波数と一致する周波数成分
- ・整数倍した場合、それ以外の周波数成分が表れる



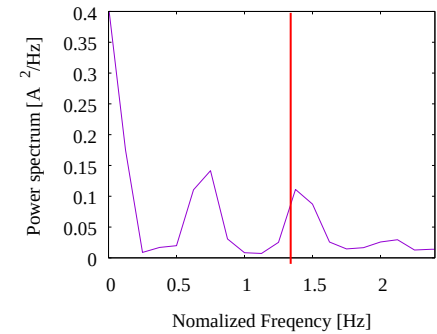
- ・奥の波からの後方散乱、波と波の間に生じる多重反射の影響



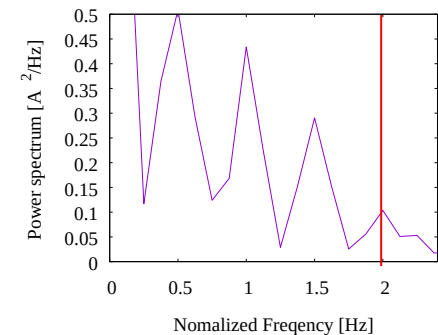
海面の波長 λ_B



$3\lambda_B$



$2\lambda_B$



$4\lambda_B$

目次

背景・目的

電磁界解析手法

- ・FDTD法

- ・MR-FDTD法

特異なスペクトルが生じる条件

シミュレーションモデル・手法

計算結果

まとめ

まとめ

- ・MR-FDTD法を用いて、海上の波が電波の半波長の整数倍の場合のドップラースペクトルの計算を行った
- ・実験の結果と同様に、スペクトルのピークが計算値とずれた周波数で検出された



- ・原因の考察のため、海面表面の電流値を計算
- ・海上の波の波長を整数倍すると、電流値のピークが海面のピーク以外でも表れる
- ・電流値が計算値のドップラー周波数以外の周波数を含む
- ・電流値の周波数スペクトルのピークがドップラースペクトルのピーク周波数と一致



海上の波からの後方散乱、波と波の間で生じる多重反射の影響