

マイクロ波船用レーダーによる 波浪面計測と 予測数値シミュレーション

平山次清(横国大工学研究院)

デニス. H. ノミヤマ(横国大大学院博士課程)

西村浩二(横国大大学院博士課程)

研究目的と経緯

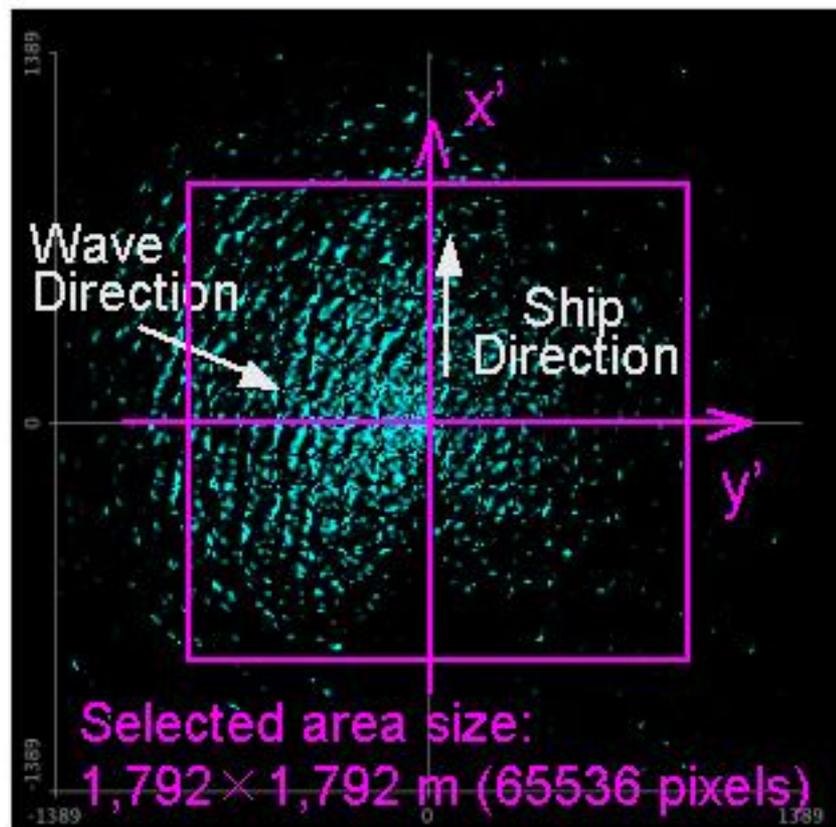
今までは船用レーダーで波スペクトルの計測法を検討してきたが、更に歩を進めて、

波浪の平均特性(有義波高, 平均周期, 波向)を捉えるだけでなく, 凹凸を面的にリアルタイムに捉え, 短時間先(数十秒から数分)の凹凸状態を推定する(移動船舶上で実施).

当該船舶が出会う波浪を直前予測することにより安全操船に寄与する(避波操船システム)

波浪レーダーの概要(報告済)

■ PPI画面の解析範囲



Sample of selected area on PPI image

■ 3次元フーリエ変換

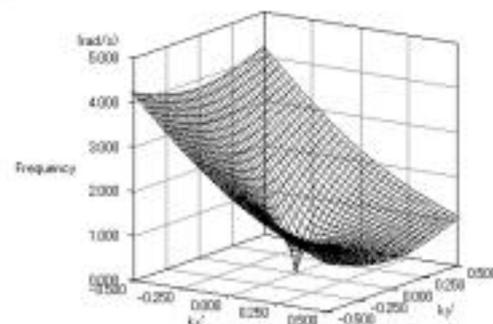
$$F_{k\omega}(k_x', k_y', \omega) = \iiint_{-\infty}^{\infty} I_R(x', y', t) \cdot e^{-i(k_x'x' + k_y'y' + \omega t)} dx' dy' dt$$

$I_R(x', y', t)$: レーダー波反射強度

■ 進行波成分の抽出

$$F_{\vec{k}}(k_x', k_y') = F_{k\omega}(k_x', k_y', \omega_e) d\omega$$

$$\omega_e = \sqrt{gk} + \vec{k} \cdot \vec{U}$$



Dispersion shell with the Doppler effect ($u=6kt$)

波浪レーダーの解析条件等

▶ 解析エリアの位置・大きさ等

船体位置を図心とする1辺1,792mの正方形解析窓→周期7秒横波・速力11ktの場合170秒後に遭遇する波の位相情報を含む、距離減衰の問題、低周波ノイズの問題

PPIイメージ32画面を1セットとして解析を行なった

▶ 周波数及び方向分割数

得られるパワースペクトルの周波数成分80分割、方向成分64分割とした

▶ 波高の推定

PPI画面の陰影比を使う推定法、陰影比から得られた波高を船体運動により補正する方法も提案している ※本研究では一定の補正值を使用

▶ レーダー諸元

周波数: 9.41Ghz, アンテナ回転数: 21rpm, アンテナ装備高さ: 6m

Experimental Results

- Radar System is based on the conventional marine radar system installed on Takamaru research ship of National Research Institute of Fisheries Engineering.



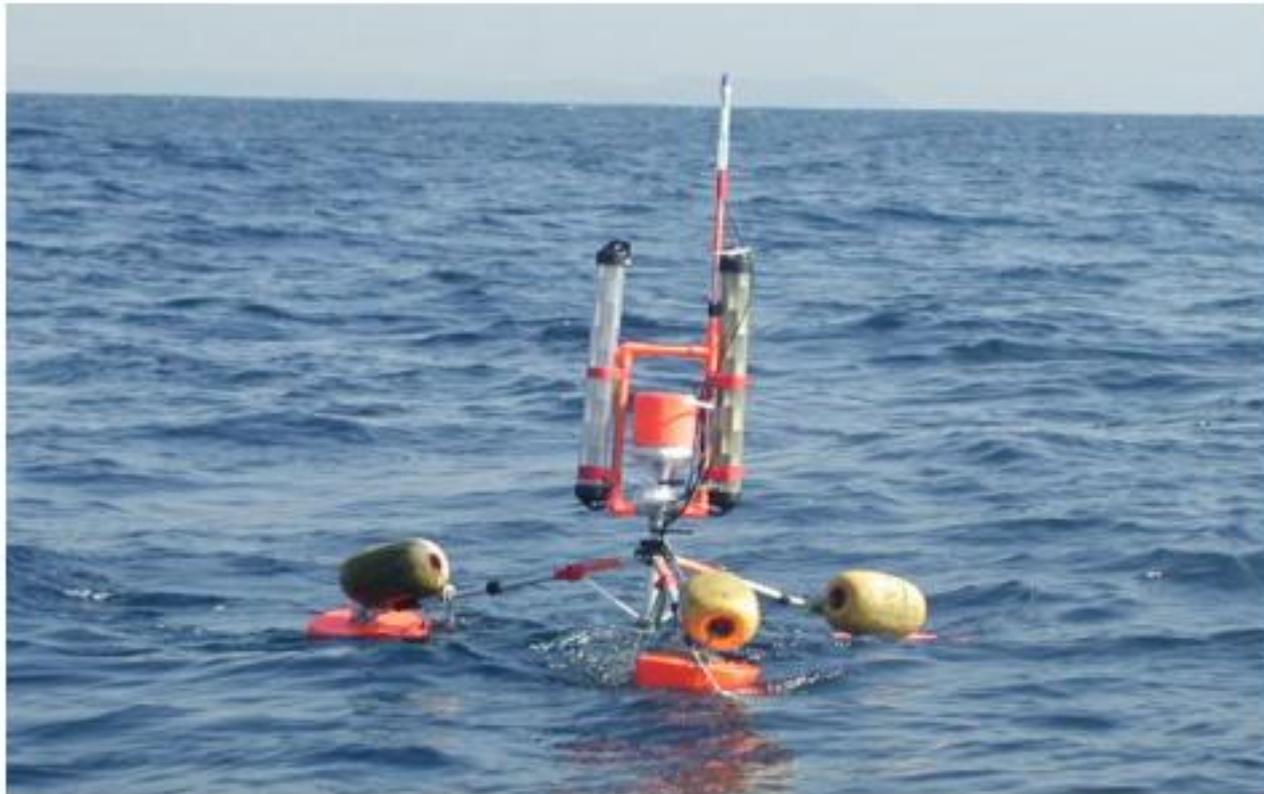
- Ship used for field test.

$$L_{pp} = 25\text{m.}$$



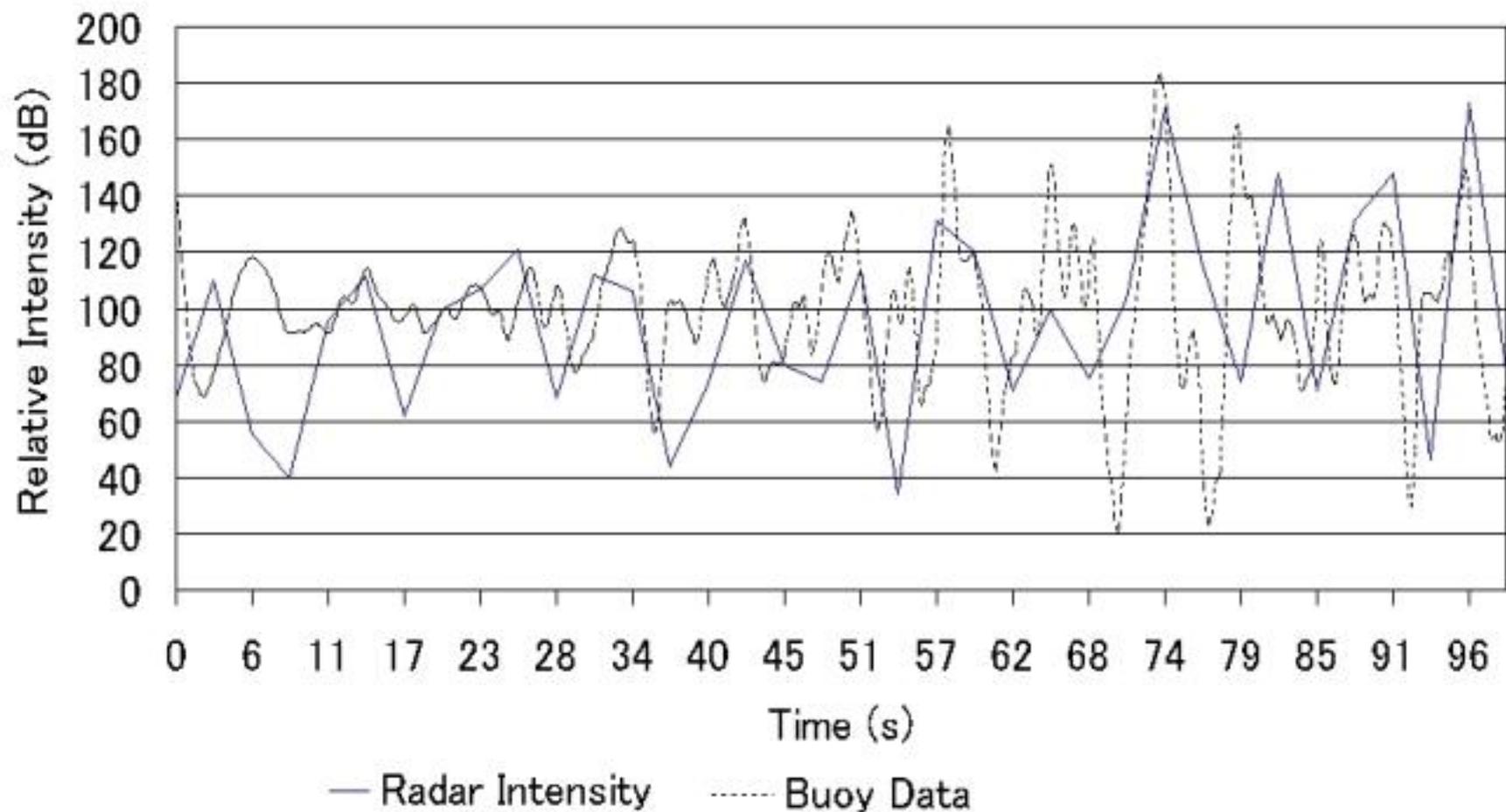
Marine Radar Antenna.
Antenna height \cong 6m.

- *Comparison Between Radar and Buoy Data*
 - Directional Wave Buoy



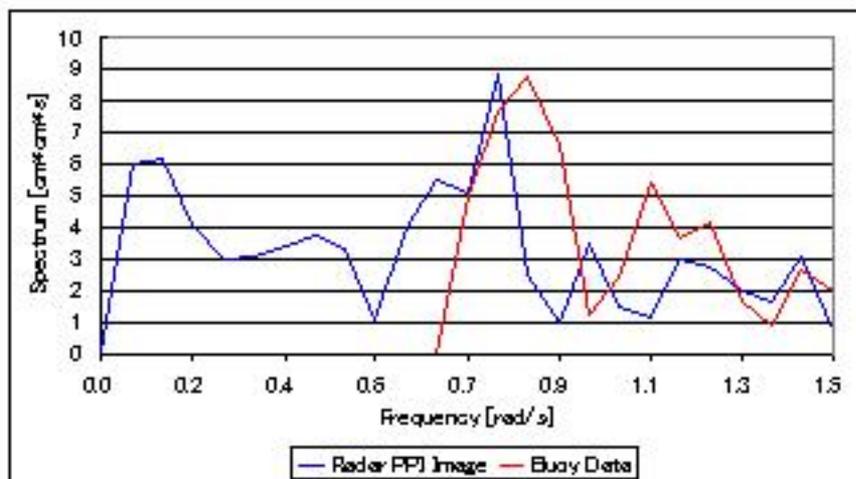
- Field Experiment at Boso Peninsula Japan on October 30, 2003.

時系列比較(レーダーとブイ)2003年

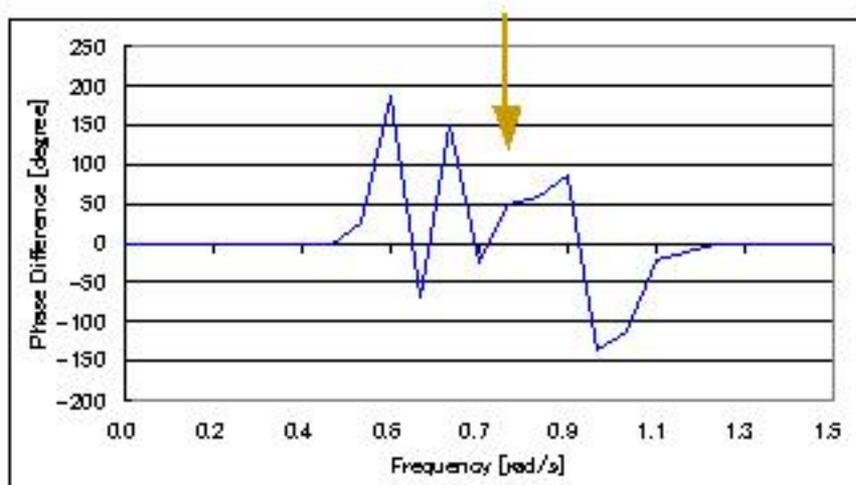


• Comparison Between Radar and Buoy Data

• フーリエスペクトルの比較



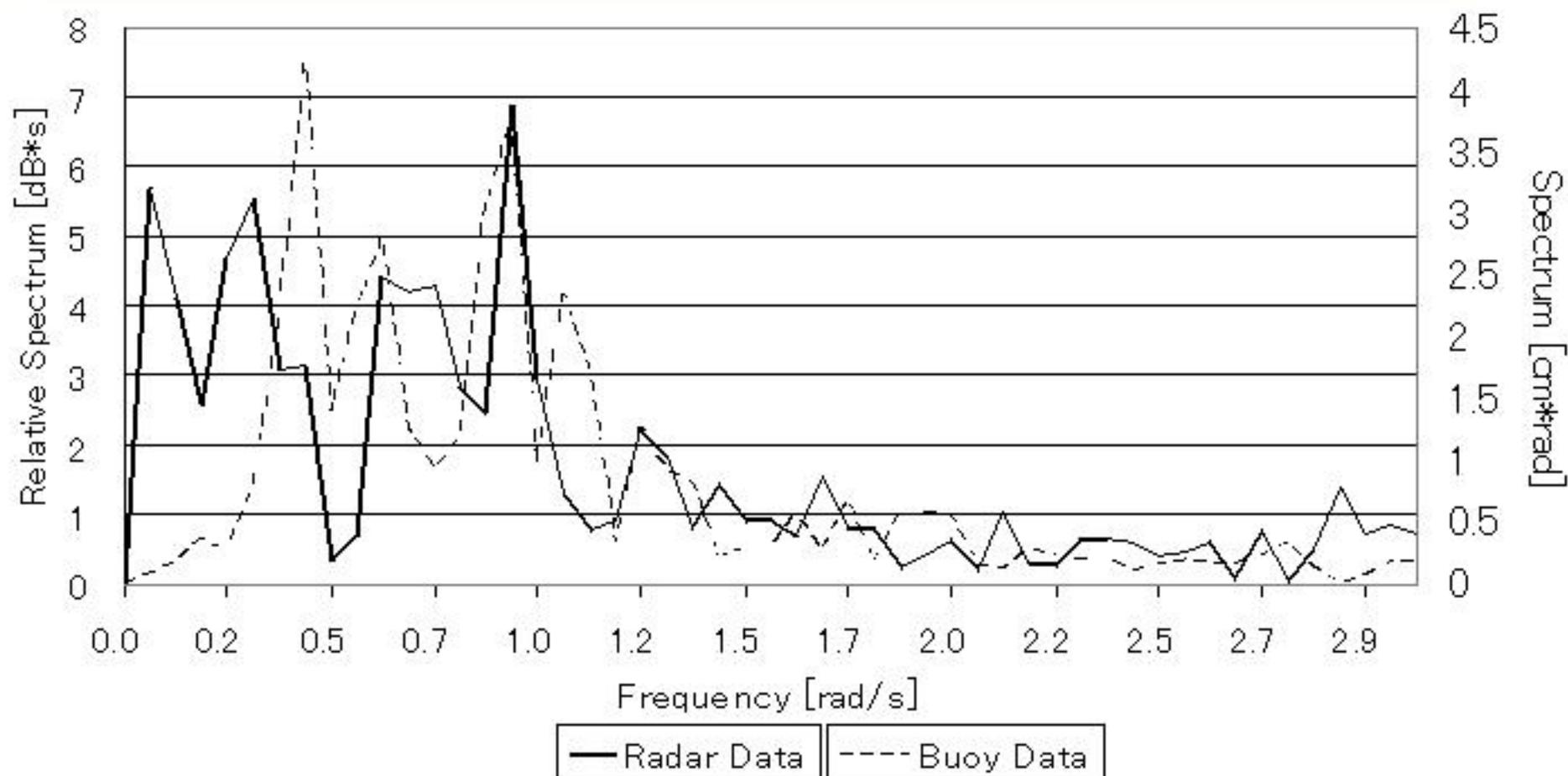
- Fourier spectrums (amplitude) from time histories of buoy and PPI images.



- Phase difference in Fourier spectrum.

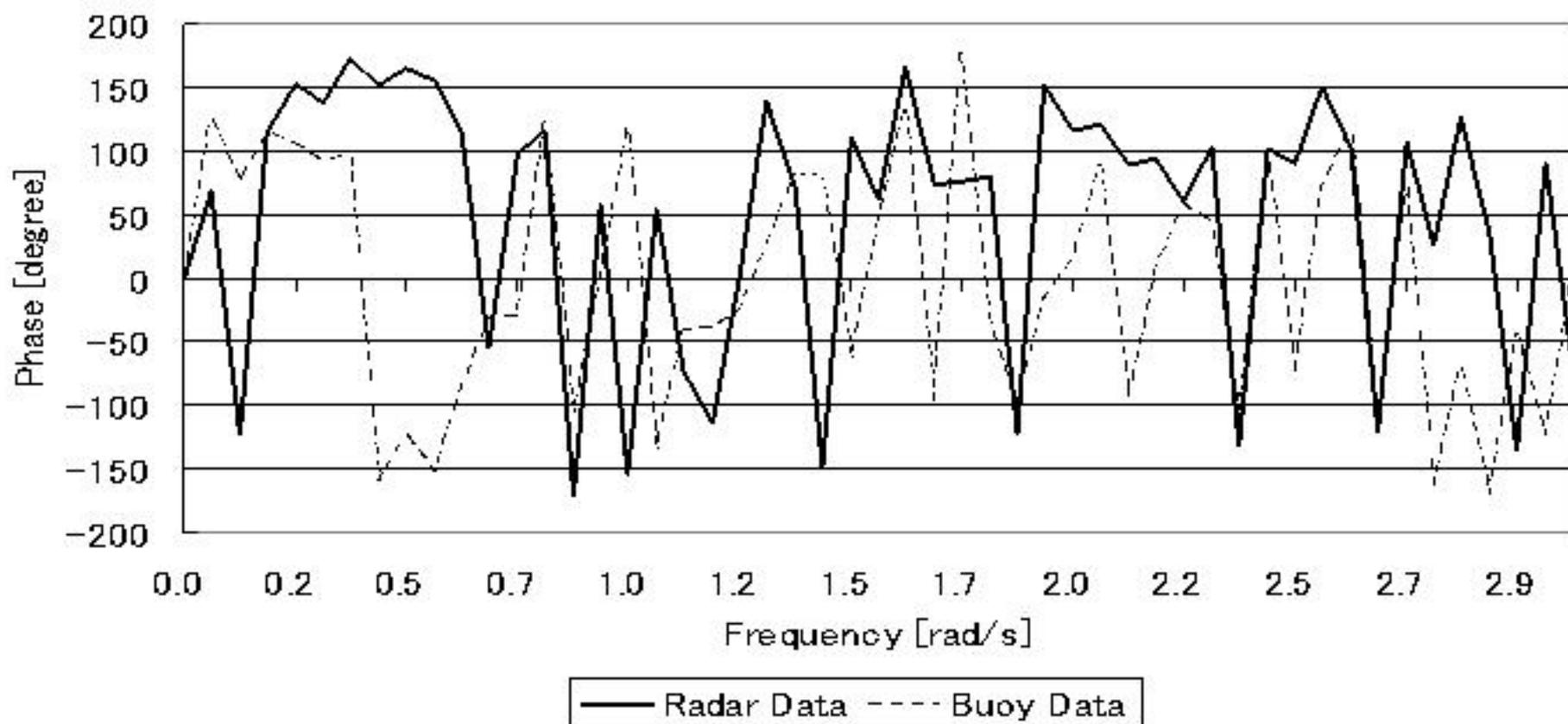
フーリエスペクトル（振幅）比較（レーダーとブイ）

Experiment TK_D402. (2004年)



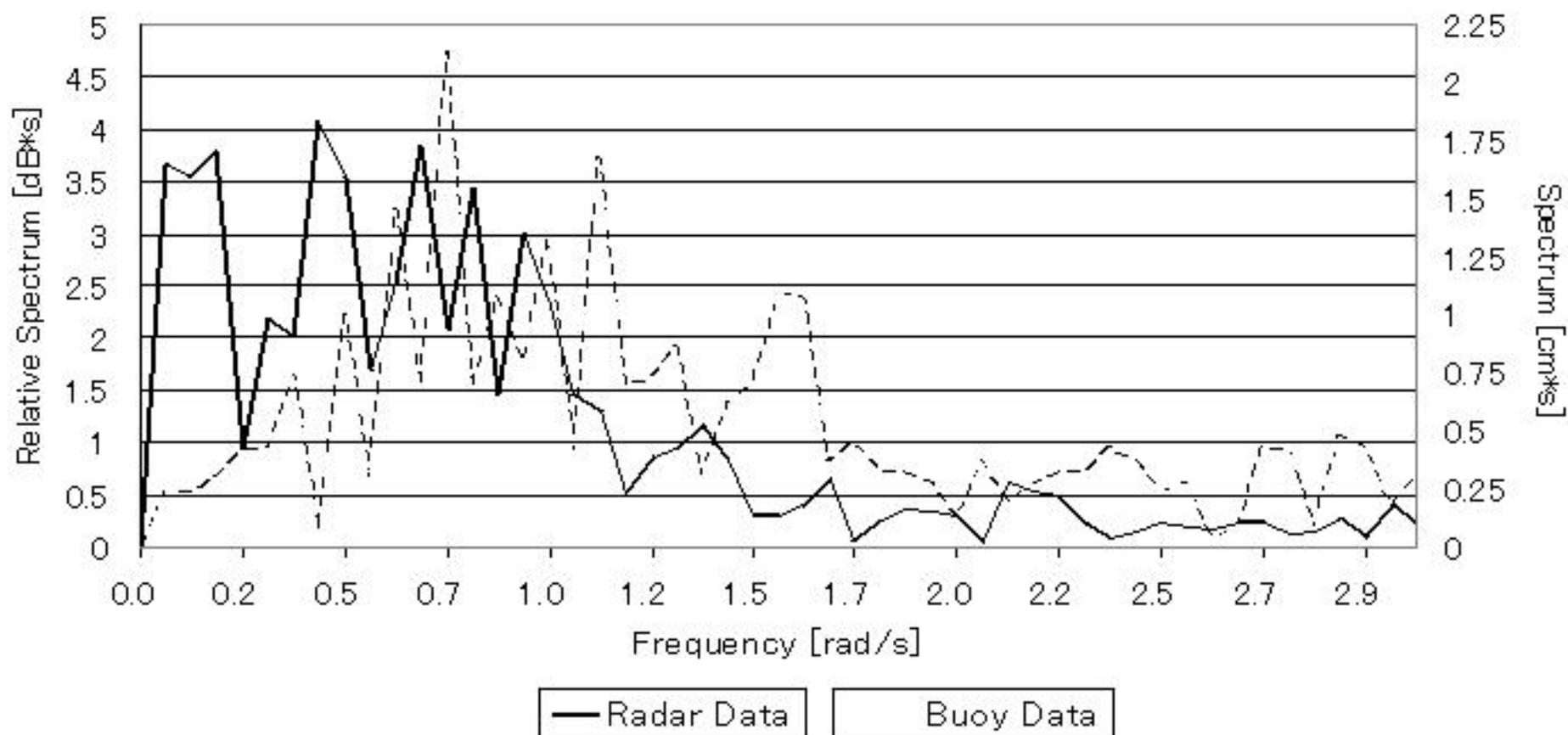
フーリエスペクトル (位相) 比較 (レーダーとブイ)

Experiment TK_D402. (2004年)



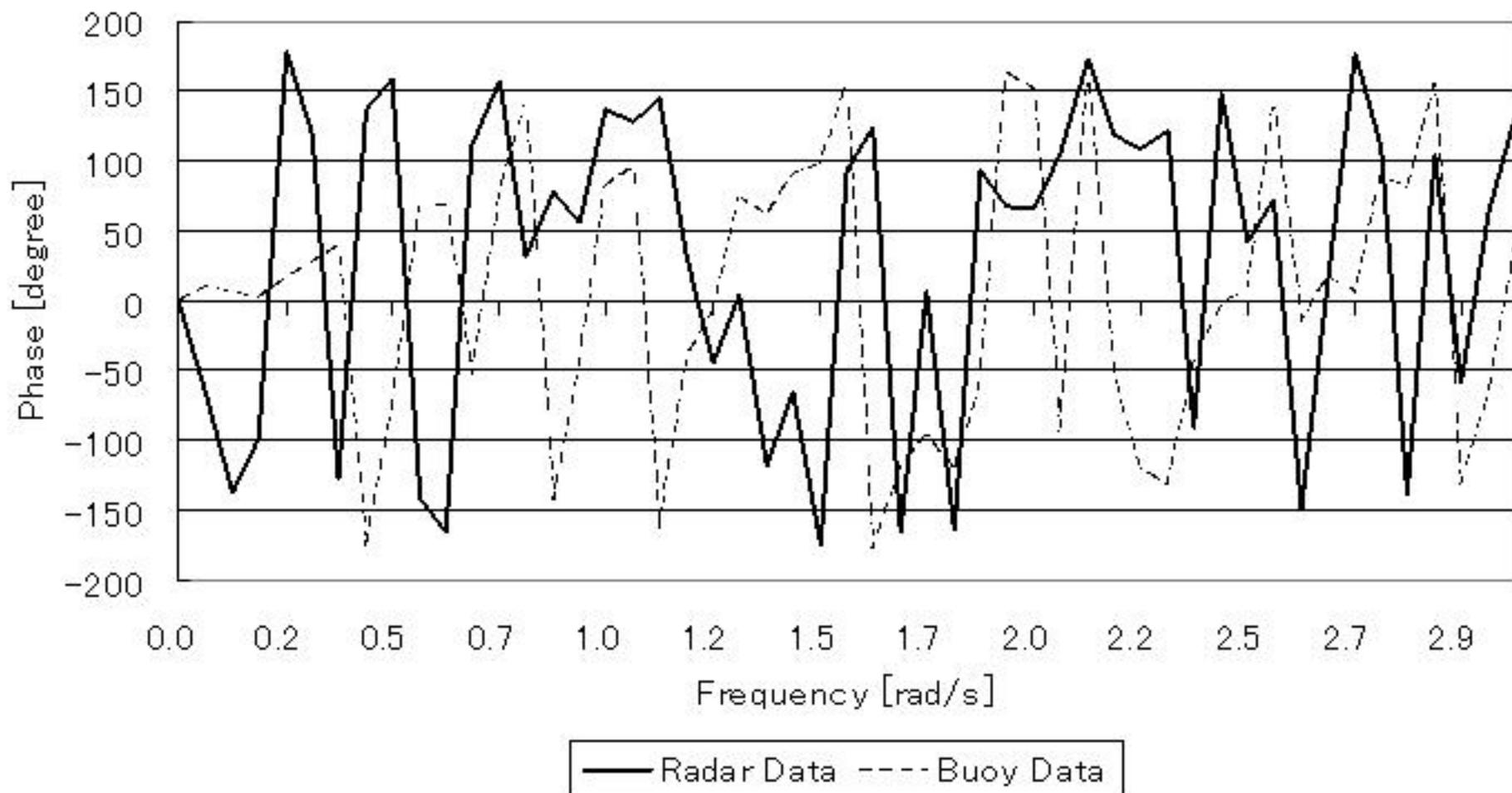
フーリエスペクトル（振幅）比較（レーダーとブイ）

Experiment TK_D404. (2004年)

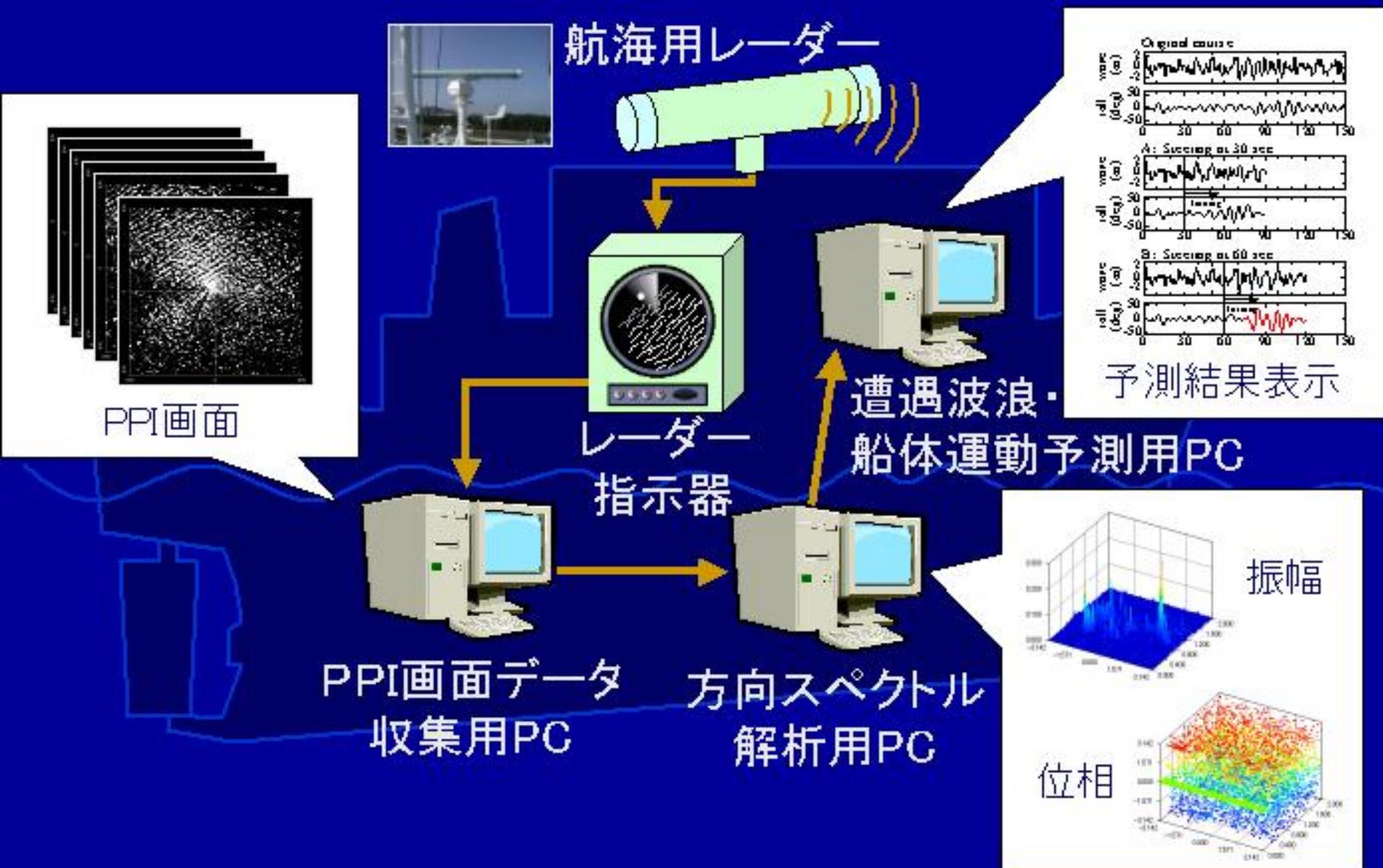


フーリエスペクトル (位相) 比較 (レーダーとブイ)

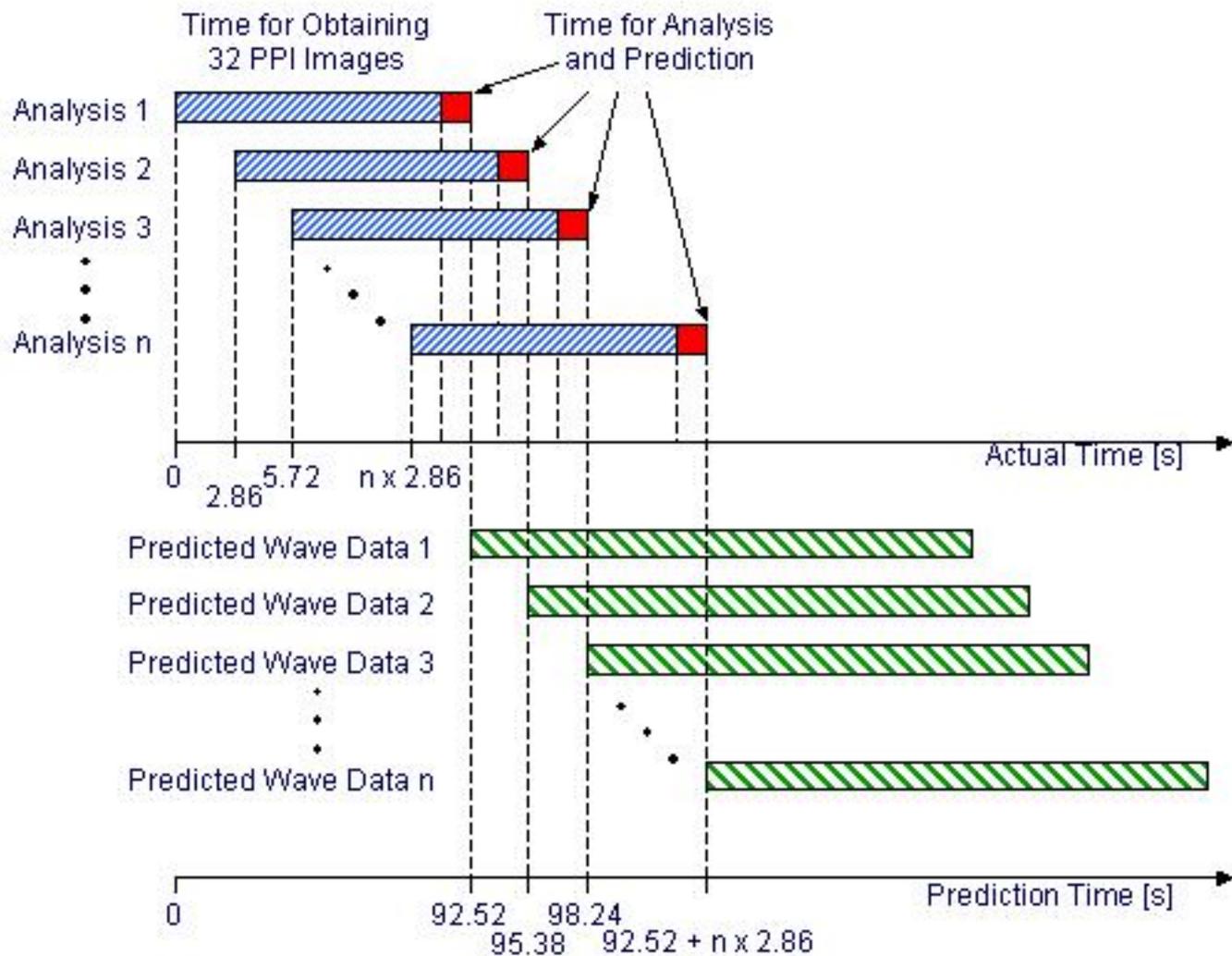
Experiment TK_D404. (2004年)



避波操船支援システムの概要

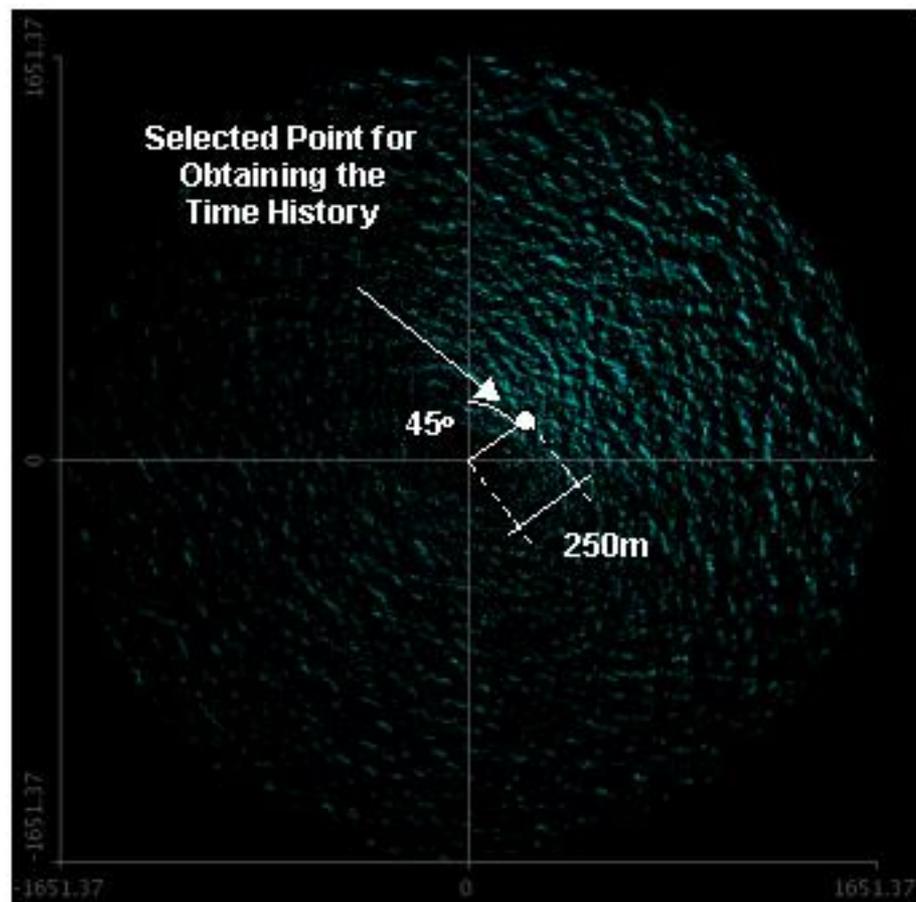


連続直前予測



- *Comparison between Simulated and Predicted Map*

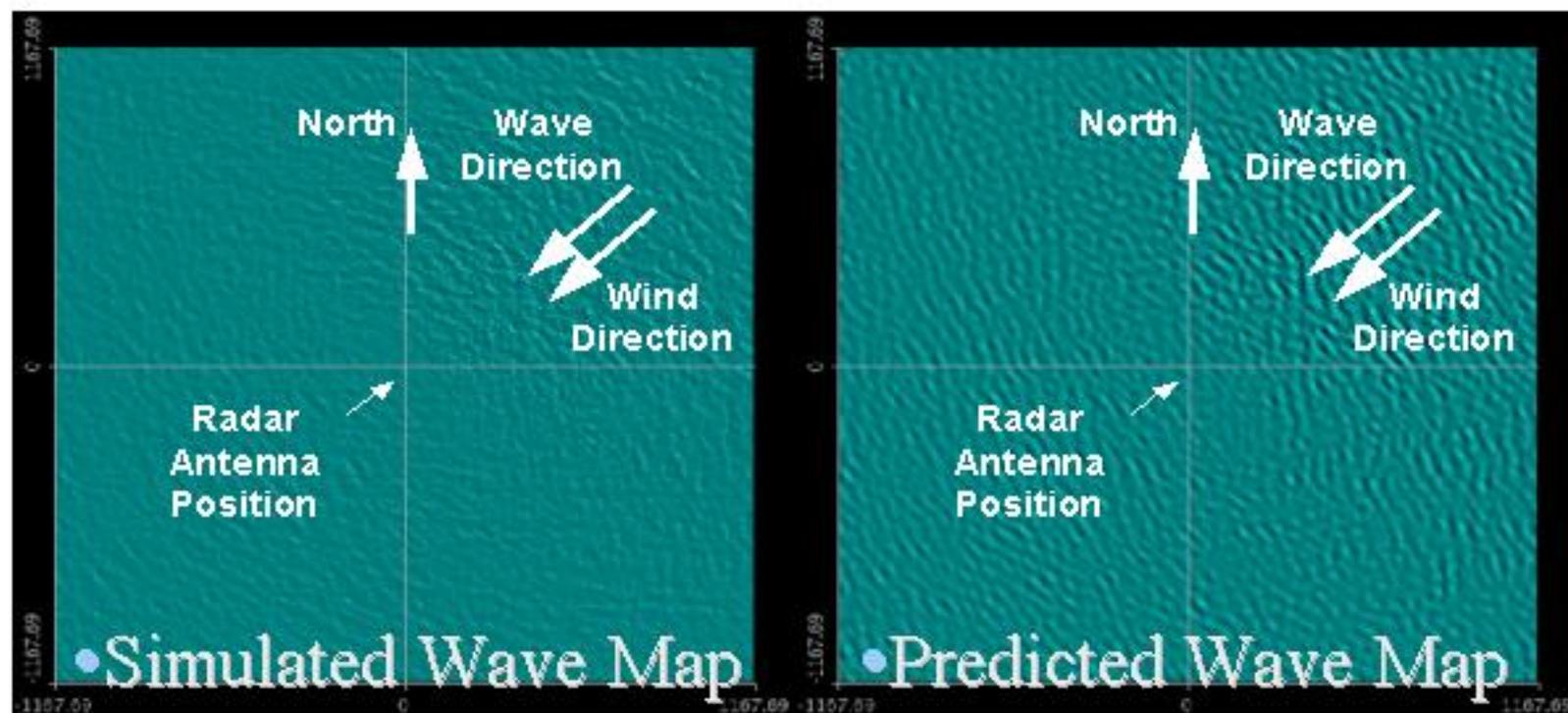
Simulation Results



Point in the Simulated PPI Image
Used for Obtaining the Wave Height.

• *Prediction of Incoming Waves*

• Using Retrieved Spectrum



Prediction Time 0.00s

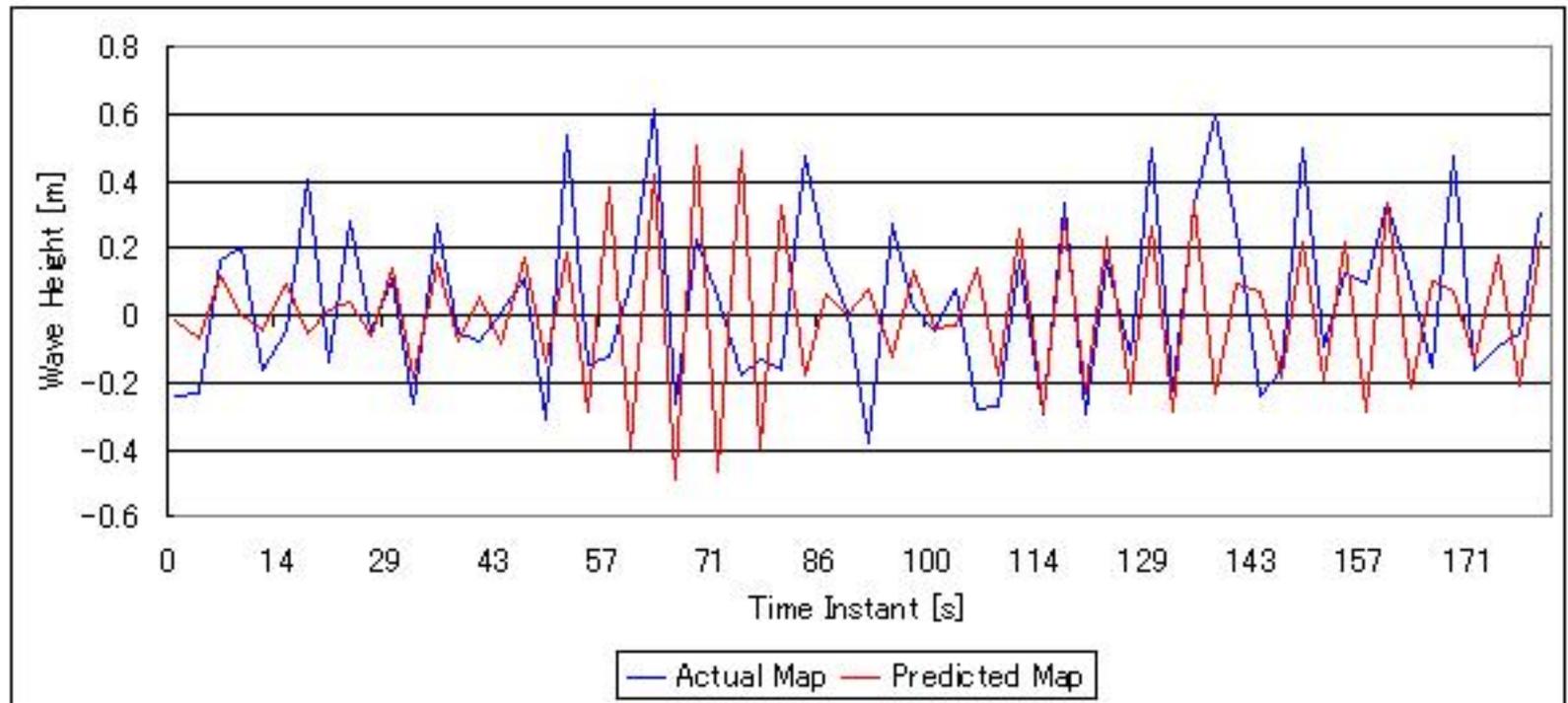
Prediction performed in consecutive periods of 2.8s.

Animation is accelerated for better visualization. Image refreshed each 1.0s.

Area of 2335m by 2335m.

- *Comparison between Simulated and Predicted Map*

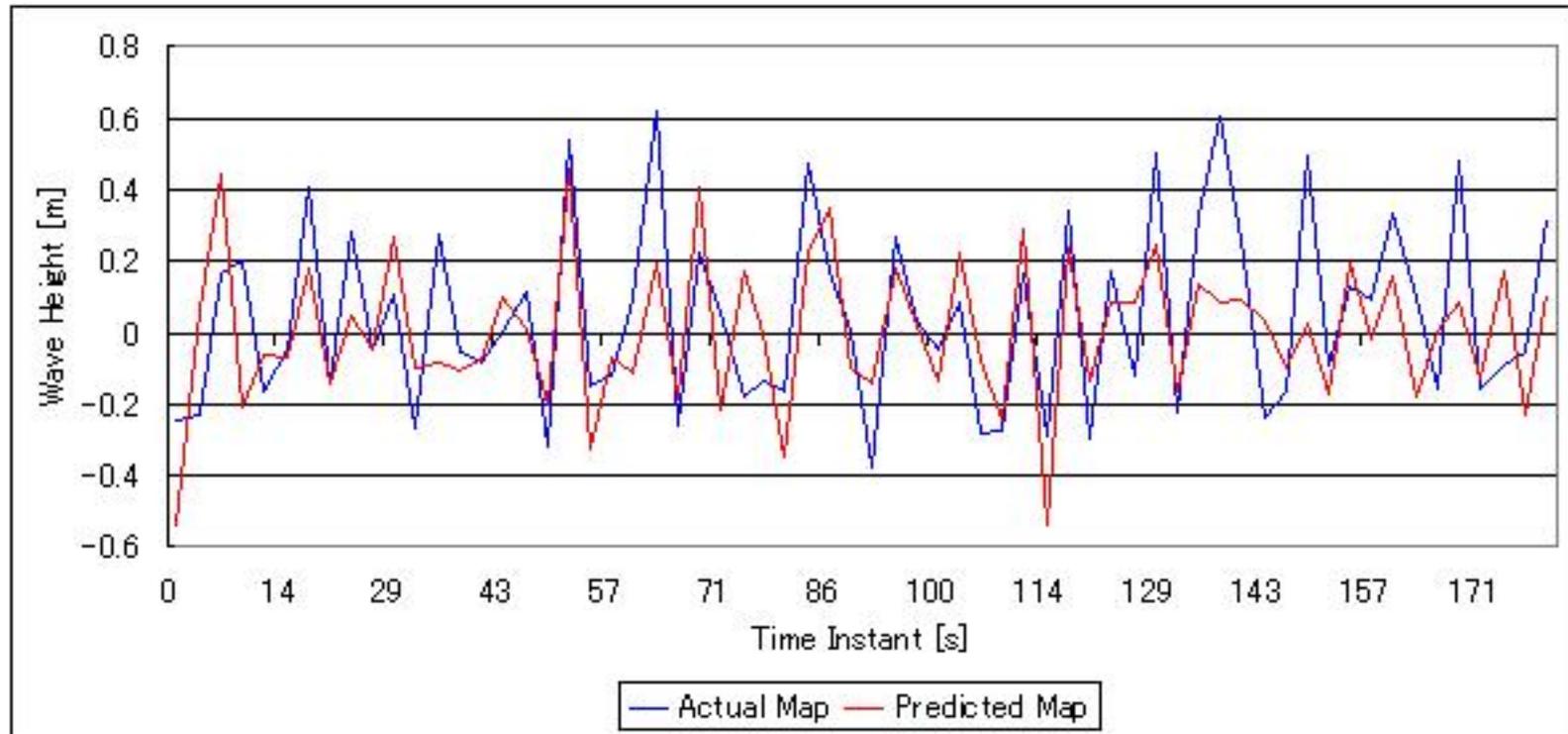
- Using Retrieved Spectrum



Comparison of Wave Height between Simulated and Predicted Wave Surface Maps. Prediction Using Retrieved Spectrum.

Comparison between Simulated and Predicted Map

- Using Generated Spectrum

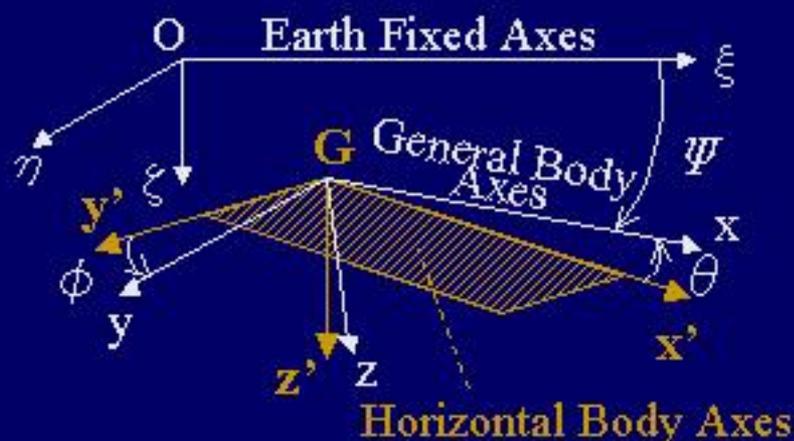


Comparison of Wave Height between Simulated and Predicted Ocean Wave Maps. Prediction Using Generated Wave Spectrum Based on Recovered Wave Parameters.

船体運動の数値シミュレーション

運動の自由度	<ul style="list-style-type: none"> 6自由度 ※'Horizaontal Body Axes System'に基づく 	
想定波	<ul style="list-style-type: none"> 規則波 長波頂及び短波頂不規則波（任意スペクトル）※深海波と仮定 	
波浪外力	<ul style="list-style-type: none"> フルードクリロフ力のみ 船体の3次元形状及び喫水線変化を考慮 	
風圧力	<ul style="list-style-type: none"> 上下運動以外5自由度運動に対する風圧力影響を考慮 喫水変化、横傾斜による風圧面積変化は考慮しない 	
復原力を有する運動	付加質量成分	<ul style="list-style-type: none"> ストリップ法から得られる固有周期近傍の値 横揺れは模型固有周期から推定
	減衰力成分	<ul style="list-style-type: none"> 波面との相対運動に基づいて計算（波粒子の円軌道運動を考慮） 縦運動はストリップ法から得られる各運動固有周期近傍の値 横揺れは模型停船時自由動揺試験からの推定値を速度修正
	復原力成分	<ul style="list-style-type: none"> 波面と運動による喫水線変化を考慮
操縦運動	付加質量成分	<ul style="list-style-type: none"> 静水中の推定値
	その他の流体力係数	<ul style="list-style-type: none"> 静水中の推定法を用いた x, y方向の抵抗、斜航時のモーメントは模型実験から推定（波粒子の円軌道運動を考慮）
舵及び推進器	<ul style="list-style-type: none"> 静水中の性能曲線に基づく 粒子の円軌道運動による相対流速変化を考慮 	

座標系と船体運動方程式



Translational Motion

$$(m + m_x)\dot{U} - mV\dot{\psi} - m_yV_k\dot{\psi} + m_xz_G\ddot{\theta} + X_{V\psi}V\dot{\psi} = T(J) - R(u) + X'_{F.K} + X'_{RUD} + X'_{AIR}$$

$$(m + m_y)\dot{V} + mU\dot{\psi} + m_xU_k\dot{\psi} + m_yx_G\ddot{\psi} - m_yz_G\ddot{\phi} + Y_VV_k + Y_{VV}V_k|V_k| - Y_{\psi}\dot{\psi} = Y'_{F.K} + Y'_{RUD} + Y'_{AIR}$$

$$(m + m_z)\dot{W} + Z_WW_k + Z_{\theta}\ddot{\theta} + Z_{\phi}\dot{\phi} = Z'_{F.K} + Z'_{RUD} + mg$$

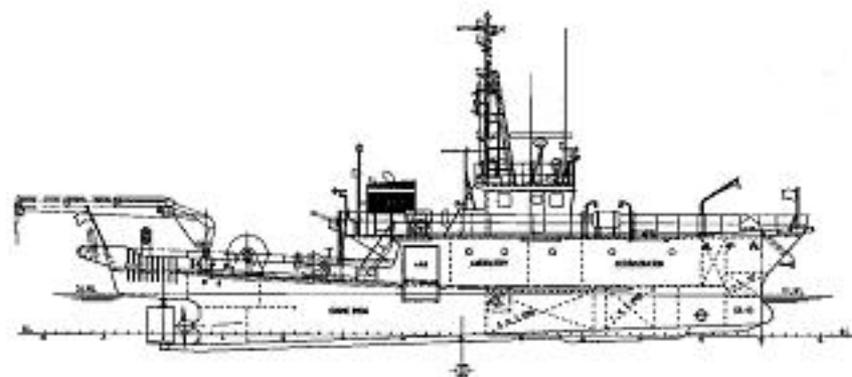
Rotational Motion

$$(I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi} - m_yz_G\dot{V}_k - m_xz_GU_k\dot{\psi} + K_{\phi}\dot{\phi} + K_{\dot{\psi}}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - Y_{\psi}z_G = K'_{F.K} + K'_{RUD} + K'_{AIR}$$

$$(I_{yy} + J_{yy})\ddot{\theta} + m_xz_G\dot{U}_k + m_zx_GU_k\dot{\theta} + M_{\theta}\dot{\theta} + M_W\dot{W}_k + M_WW_k = M'_{F.K} + M'_{RUD} + M'_{AIR}$$

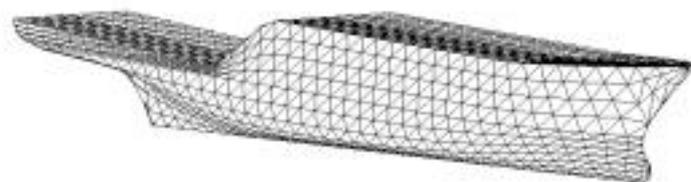
$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{\psi} + m_yx_G\dot{V}_k + m_yx_GU_k\dot{\psi} - m_yz_GU_k\dot{\phi} + N_VV_k + N_{VV}V_k|V_k| + N_{\psi}\dot{\psi} = N'_{F.K} + N'_{RUD} + N'_{AIR}$$

- 検討対象船と計算モデル

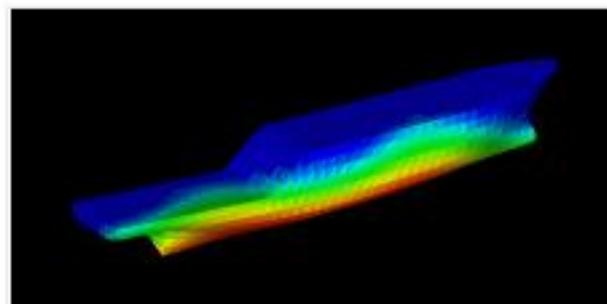


General arrangement

L_{pp}	(m)	25.00
B	(m)	5.20
D	(m)	2.00
Draft (mean)	(m)	1.70
Volume	(m^3)	127.7

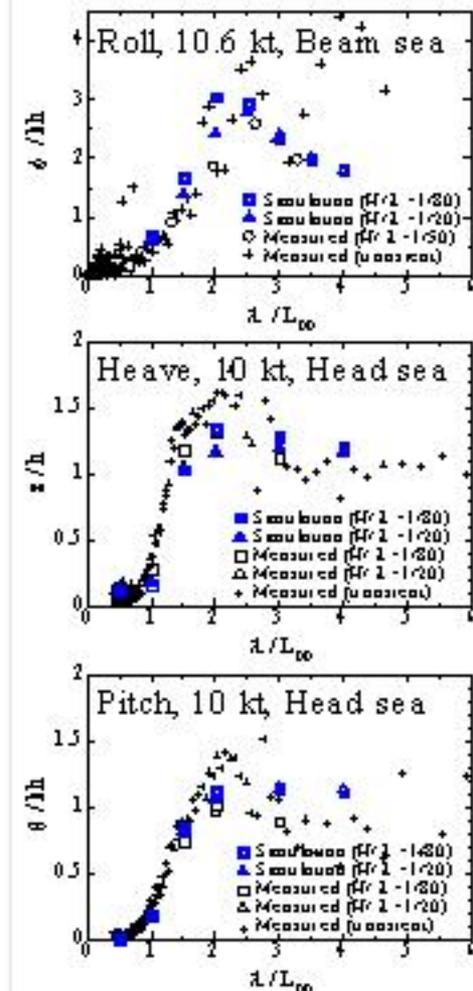


3D mesh model (2580 panels)

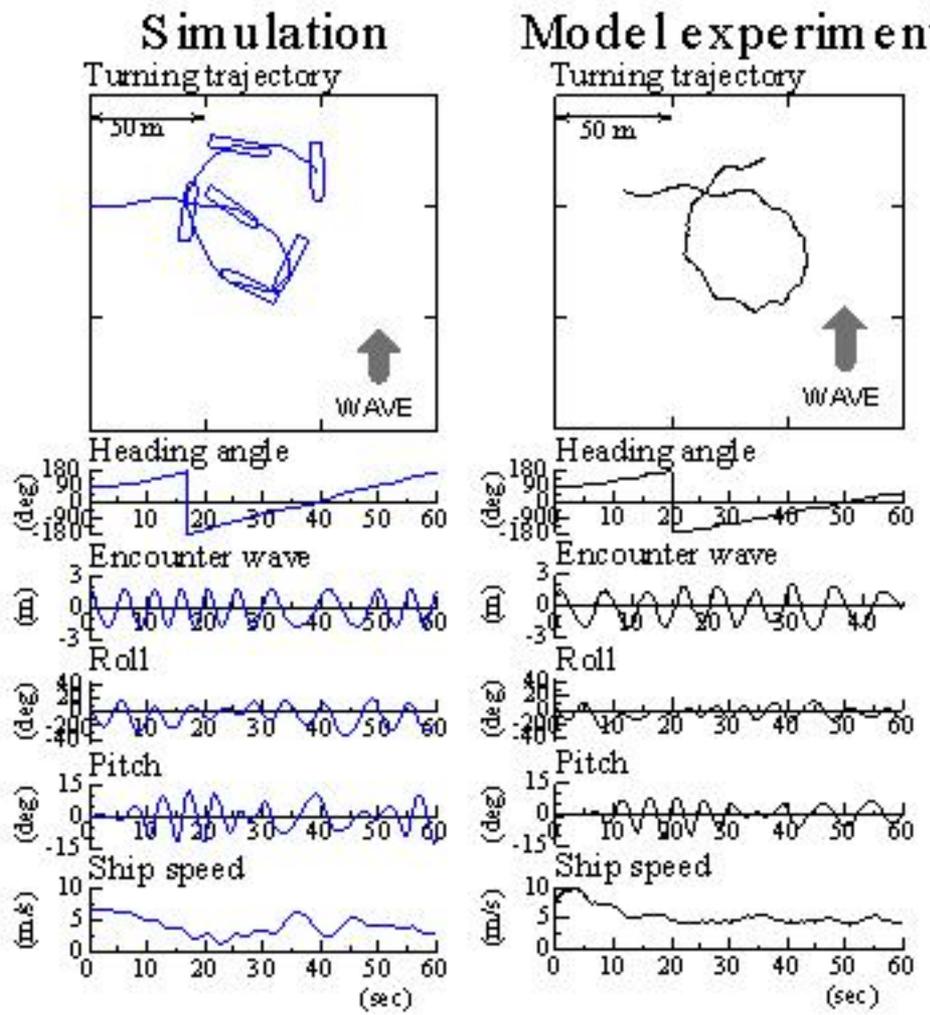


Wave pressure act on hull surface

● 模型実験結果との比較



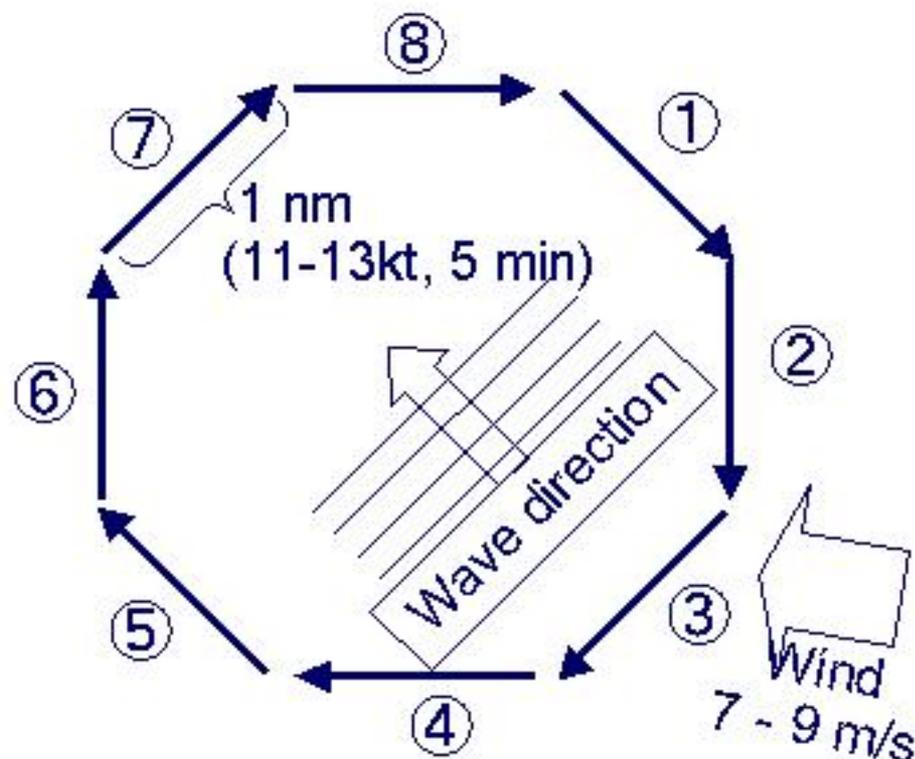
(約10kt)



規則波中旋回時の重心軌跡と船体運動
 (舵角: 35deg, $\lambda/L=2$, $H/\lambda=1/15$)

実海域試験の概要

- 船体運動及び波浪計測(八角形航走)



計測項目

航海用レーダー

➤ レーダーPPI画面

船体搭載センサー

➤ 6自由度運動センサー

➤ GPS

➤ 舵角

➤ 風向・風速

その他

➤ 波浪観測(ブイ、目視)

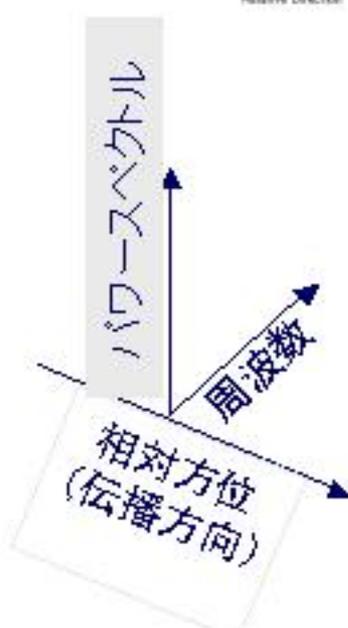
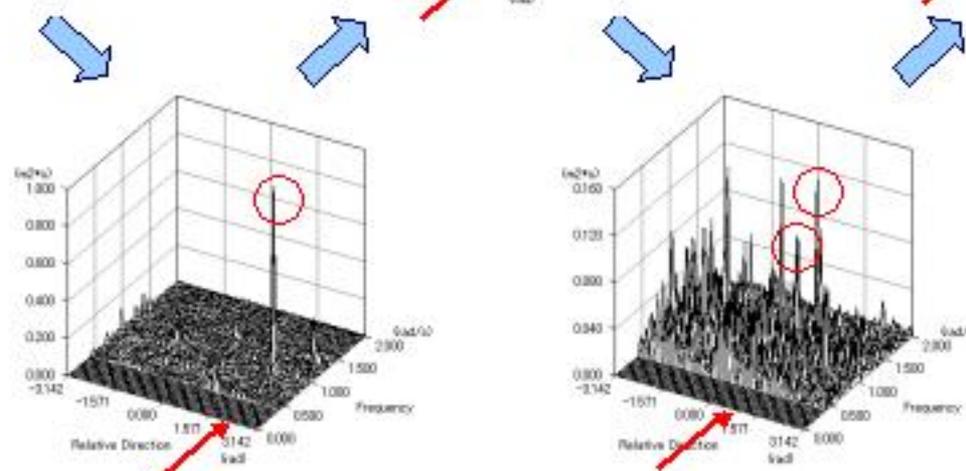
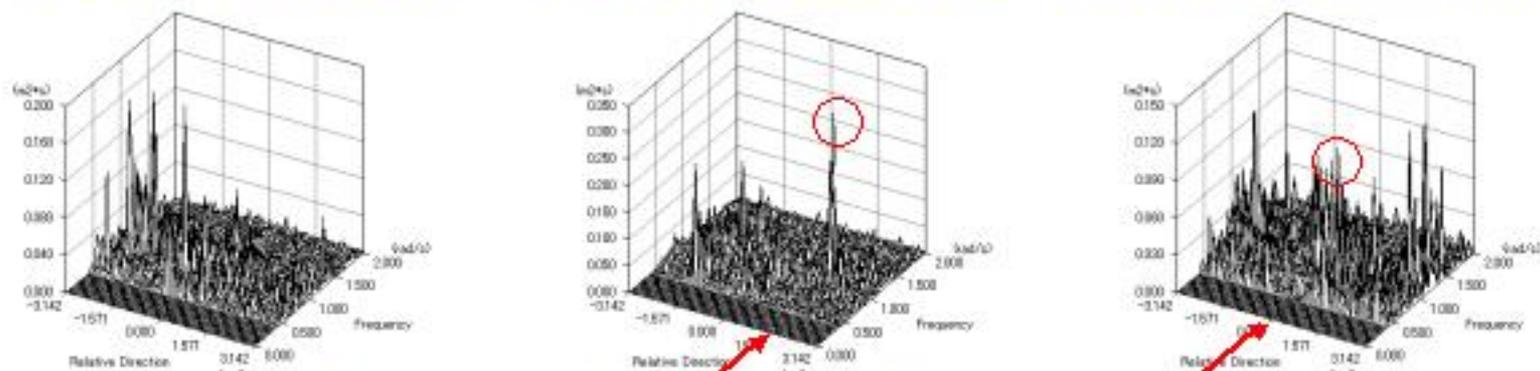
Wave condition by visual observation:

$T=5_{\text{sec}}$ ($\lambda/L=1.5$), $H=1.0\sim 1.5_{\text{m}}$ ($H/\lambda=1/30$)

試験海域: 千葉県房総半島布良鼻灯台沖7nm

船体運動の予測

- 波浪レーダーで計測した方向スペクトル(八角形航走)
 第1方位 Head sea 第3方位 Beam sea 第5方位 Following sea



第2方位 Bow sea 第4方位 Quartering sea

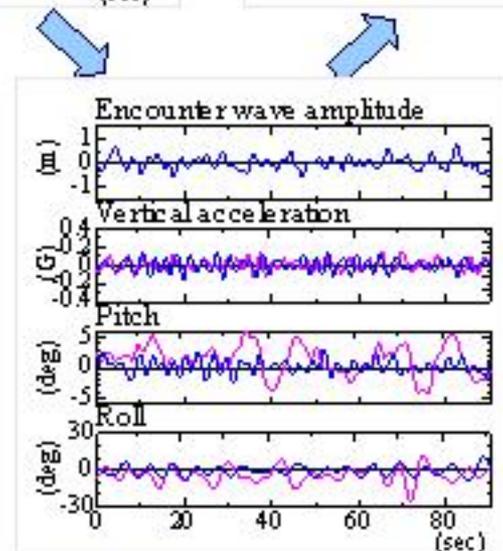
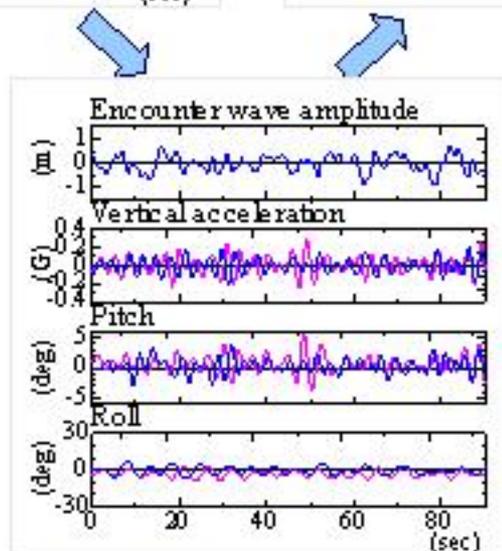
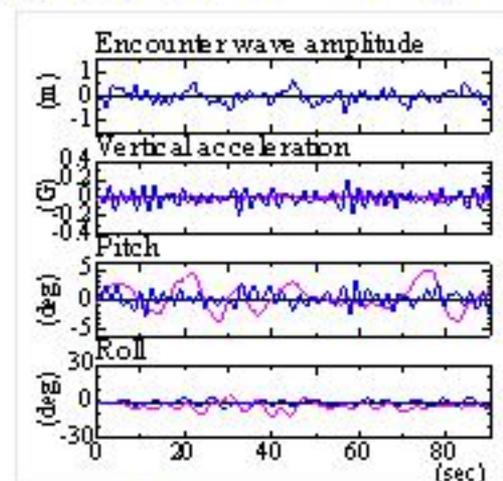
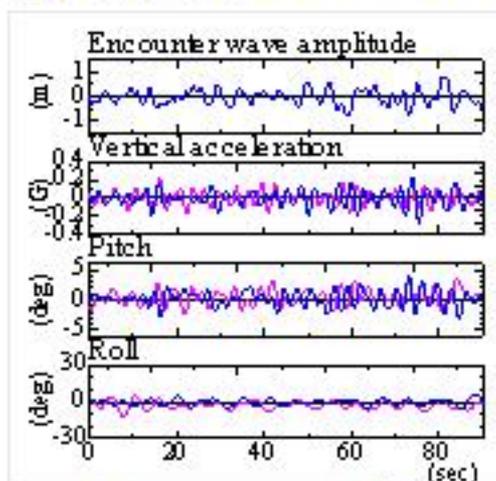
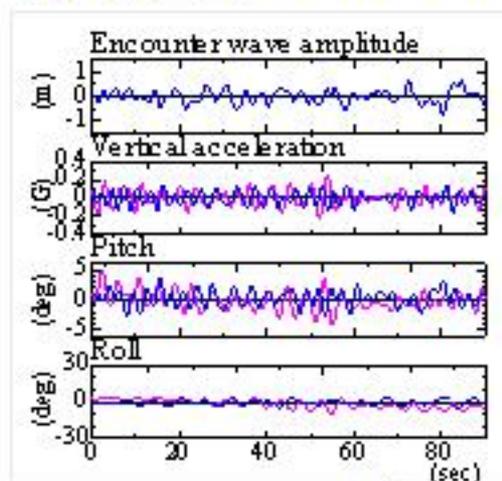
- ▶ 波の方向は追い波方向を0とする
- ▶ 低周波ノイズは解析時に処理
- ▶ 追い波のノイズ

八角形航走中の船体運動(予測と計測値の比較)

第1方位 Head sea

第3方位 Beam sea

第5方位 Following sea



Simulation

Field test

第2方位 Bow sea

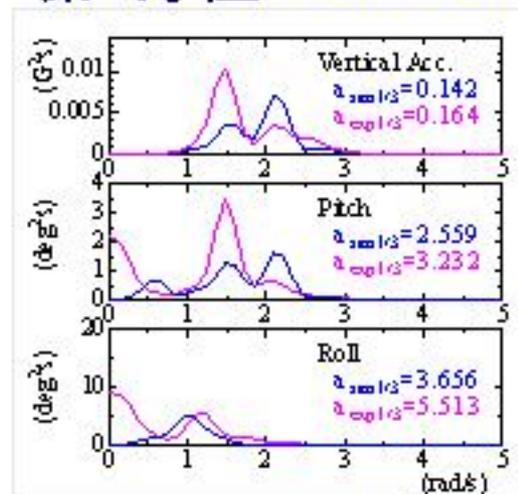
第4方位 Quartering sea

➤ 追い波の長周期の出会い波を捉えきれない

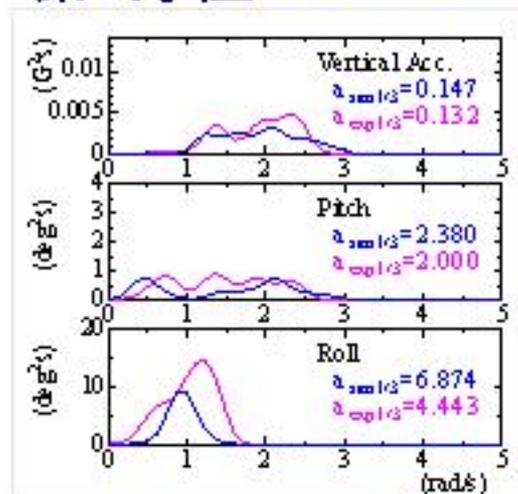
➤ 第2方位など大きな個別波を捉えられないケースがある

八角形航走中の船体運動(パワースペクトル)

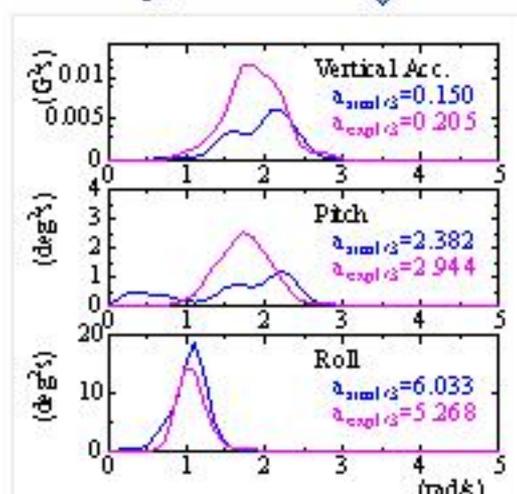
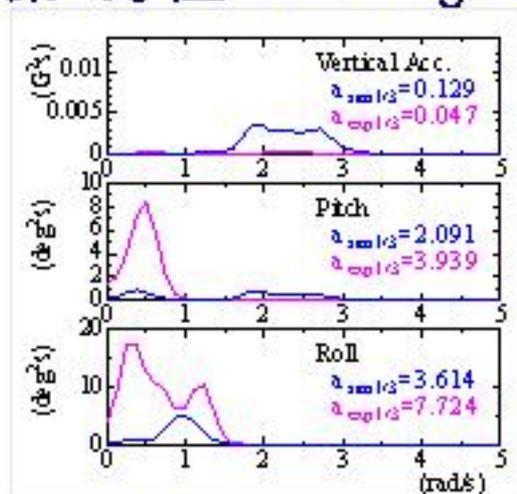
第1方位 Head sea



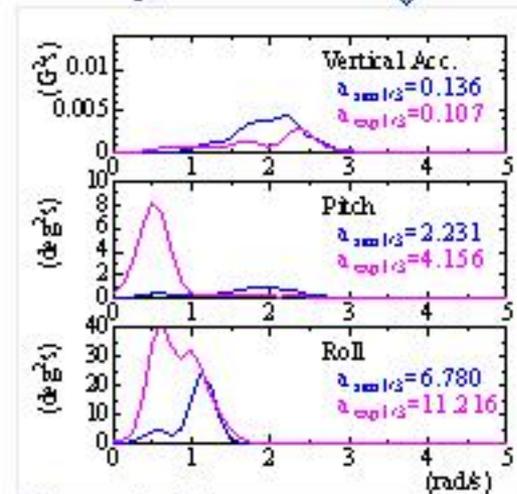
第3方位 Beam sea



第5方位 Following sea



第2方位 Bow sea



第4方位 Quartering sea

Simulation

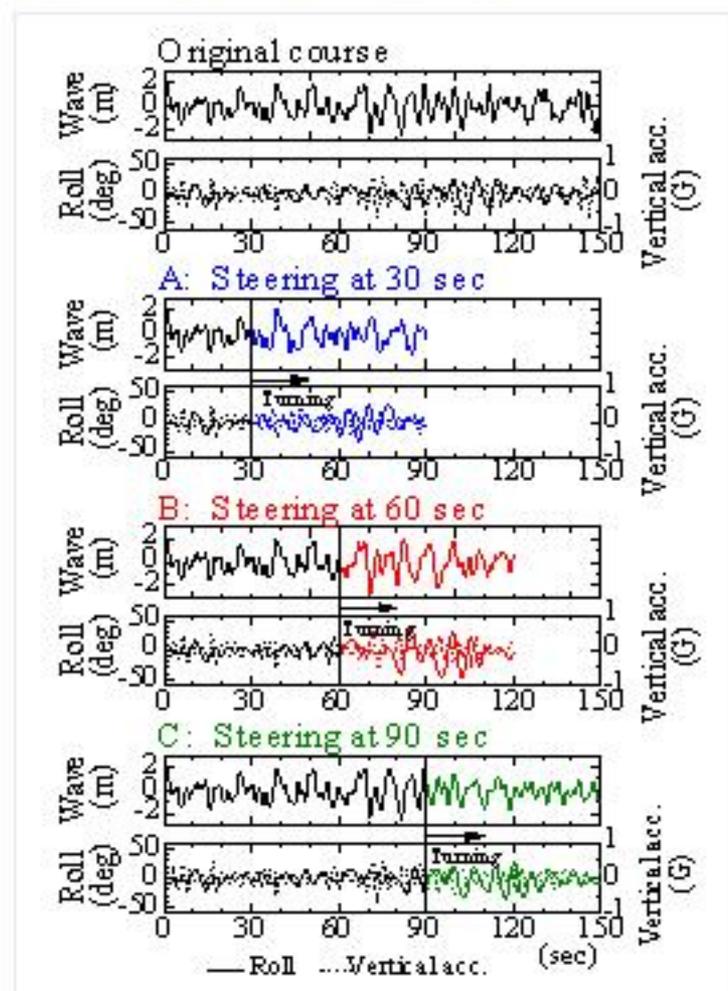
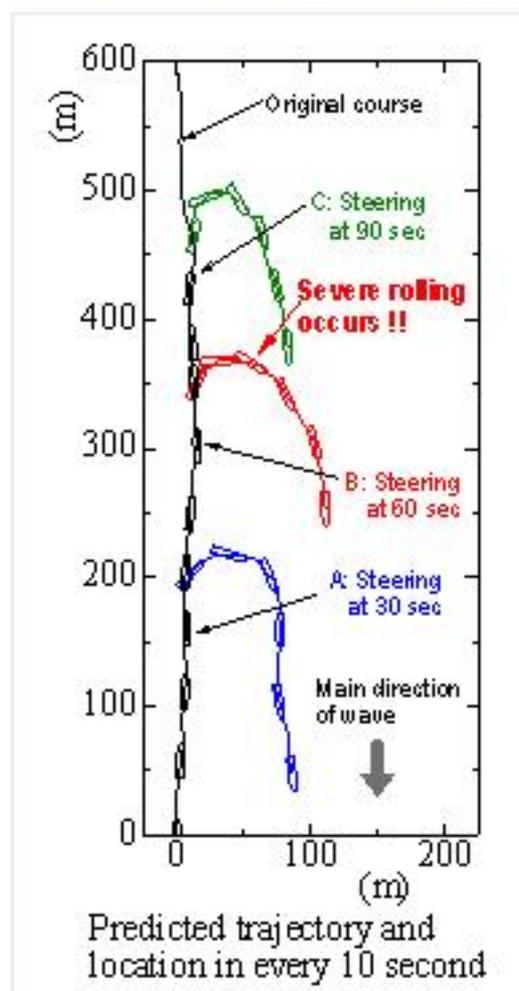
Field test

➤ 追い波中の低周波領域の誤差

➤ それ以外は周波数帯域や有義値の大小の傾向などほぼ一致

旋回中横揺れ回避への応用

- 荒天避航のための大角度変針



まとめ

- 波浪レーダーと船体運動の数値シミュレーション技術を組み合わせた船体運動予測システムを構築し、実海域試験との比較により実用的な予測精度をもつことを確認した。
- 本システムを用いることで非定常な旋回中横揺れについても操船者が事前に予測することが可能になり、適切な操船を支援できるものと思われる。

今後の課題

- 船体運動のリアルタイム予測のため、さらに計算時間を短縮する必要がある。
- 波浪レーダーの改良、特に個別波識別能力の向上は重要である。
- 予測結果の表示法など操船者とのインターフェイスを新たに考える必要がある。

参考文献（年号順）および [コメント]

- 1) 岡部金次郎：マグネトロンに依る不減衰超短波長電波の発生、電気学会雑誌、pp575-582、(1927) [分割陽極マグネトロンの発明]
- 2) 岡村総吾他共訳：極超短波工学、無線従事者教育協会、(1952) [Theory and Application of Microwaves by A. B. BRONWELL 他(1947)の翻訳]
- 3) 宇都宮敏男他共訳：実用レーダー工学、近代科学社、(1956) [H. E. PENROSE 他による Principles and Practice of RADAR(1949年初版)の和訳]
- 4) 落合徳臣、茂在寅男：レーダーの理論と実際、海文堂、(1959) [565頁の大著、レーダの歴史にも触れている]
- 5) 萩野芳造他共訳：レーダー工学、近代科学社、(1959) [J. F. ReintjesらによるMITレーダースクールの教科書、Principles of Radar(1944年9月初版)の和訳]
- 6) H. C. Adamson, "Halsey's Typhoon" USA. (1968) [船上レーダーで初めて台風を捉えた話あり]
- 7) 遠藤敬二他：アンテナ工学、日刊工業新聞社 (1969)
- 8) 第132研究部会：実船搭載用波浪計に関する研究、日本造船研究協会報告書 (1975) [レーダのPPI画像で、波向き方向からの反射パルス数が多くなることから波向き解析を実施]
- 9) 平山次清他：ステレオ写真による波浪の方向スペクトル解析、日本国土海洋総合診断委員会気象海洋部会報告、JAFSA RS REPORT—793003 (1979) [2機の小型航空機によるステレオ写真撮影および解析]
- 10) 江村富男他：航海用 X バンドレーダーの波向観測への応用、海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTECR 5, (1980) [砕波帯域の波浪、車載システム]
- 11) 井上篤次郎、加藤雅司：船用レーダを利用した波浪解析の一方法、日本航海学会論文集、67号、pp127-135、(1982) [これだけでは波高情報は無理との結論]
- 12) 萩野芳造：波高測定のレーダー考察、(1983)
- 13) 松野達夫、高山仁、清水紀雄、萩野芳造、古賀真綱：船用レーダによる波浪観測—I、日本航海学会論文集、69号、pp107-120、(1983)、[波高推定も試みている]
- 14) SRD11 特別委員会：船舶用波浪観測レーダの研究開発、日本造船研究協会、[小山健夫委員長、平山次清 他 1983. 6-1985. 3]
- 15) 吉田孝監修：レーダ技術、(社) 電子情報通信学会編、(1984)
- 16) 平山次清、萩野芳造、松野達夫、渡辺憲司：航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定、関西造船協会誌、第198号、pp17-29、(1985) [レーダのPPI連続2画面の相関より方向決定]
- 17) Dennis Holliday: A radar imaging model for small to moderate incident angle, (1986) [散乱断面積]
- 18) 古濱洋治他：マイクロ波リモートセンシング、電子情報通信学会 (1986) [水滴の後方散乱、水面の後方散乱等]
- 19) 平山次清：航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定 (その2)、関西造船協会誌、第204号、pp21-27、(1987)
- 20) D. Holliday et. al: Comparison of a new radar ocean imaging model with SARSEX internal wave image data, (1987) [内部波による散乱断面積の変動]
- 21) 平口博丸：船用 X バンドレーダーによる波向き観測、(1989)、[海岸近くの建物屋上に設置]
- 22) 平口博丸：Wave Direction Measurement Using Marine X-Band Radar, (1990) [前者と大体同じだがより詳しい]
- 23) M. S. Longuet-Higgins: The generation of capillary waves by steep gravity waves, Fluid. Mech. Vol. 16, 11, (1962)
- 24) 横田良夫他：海上気象観測装置—船用気象レーダーとマイクロ波式波浪計—、測候時報 52. 2、(1990) [レーダ例は回転数 4rpm、周波数 5.3GHz、ビーム幅 2度、船体運動影響修正あり]
- 25) Nathanson F. E.: Radar Design Principles, (1990)
- 26) SkopR. A.: Modification of Directional Wave Number Spectra by Currents in the Wake of a Surface Ship, (1990), [L-band 合成開口レーダー]
- 27) Schleher D. C.: MTI and Pulsed Doppler Radar, (1991)
- 28) K. Hasselmann et. al.: On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectra Into a Synthetic Aperture Radar Image Spectrum and Its Inversion, (1991),
- 29) M. Maron et. al.: Energy Density Directional Spectrum of a Near shore Wave Field Measured by Interferometric Synthetic Aperture Radar, (1991)
- 30) C. L. Rafenachet. al: Comparison of Aircraft Synthetic Aperture Radar and Buoy Spectra During the Norwegian Continental Shelf Experiment of 1988, (1991)
- 31) Mognard N. M et. al: Simultaneous Observation of Ocean Surface Winds and Waves by GEOSAT Radar Altimeter and Airborne Synthetic Aperture Radar During the 1988 Norwegian Continental Shelf Experiment, (1991)
- 32) Johnson H. et. al: Azimuth Smearing in Synthetic Aperture Radar Ocean Image Spectra from the Norwegian Continental Shelf Experiment of 1988, (1991)
- 33) D. P. KASILINGAM et. al.: The Validity of the composite surface model and its applications to the modulation of radar backscatter, Int. J. Remote Sensing, Vol. 13, No. 11, pp2079-2104, (1992) [入射角 θ は 30 から 60 度近辺]
- 34) F. C. Jackson et. al: Sea Surface Mean Square Slope from

- Ku-Band Back Scatter Data, (1992) [風速依存]
- 35) M. R. Keller et. al: A Wave Tank Study of the Dependence of X-Band Cross Section on Wind Speed and Water Temperature, (1992) [フェッチ 16. 3m, θ は 10, 28, 48, 68]
- 36) 石田廣史、井上篤次郎、前田智城、細田龍介: 船用レーダーによる波浪解析とその海面反射シミュレーション画像、日本航海学会論文集 87 号、pp217-225、(1992)、[実験結果をもとにした散乱断面積 σ の近似式使用]
- 37) Hoosoda R., Inoue T., Ishida H., et al: Application of Marine Radar for Real-Time Data Acquisition of Sea Condition Around Ships and Marine Structures, Techno-Oceans' 92, pp693-699, (1992)
- 38) 石田廣他: Wave Observation Apparatus by Marine Radar and Evaluation of Its Analytical Results, Techno-Ocean' 94, pp469-474(1994)、[波長と方向のみ]
- 39) 後藤真太郎他: シミュレーション画像を用いた船用レーダーによる 2 次元波浪パラメータの観測手法に関する研究、(1995) [波高については触れず、ガウス分布スペクトルのフーリエ逆変換]
- 40) 平山次清、南清和、平松真紀子: 方向波スペクトルのハイブリッド型船上計測法開発(その 1 と 2)、日本造船学会論文集、第 180 号、pp295-309、(1996)、第 182 号、pp217-229、(1997)
- 41) 吉田孝監修: 改訂レーダ技術、(社) 電子情報通信学会編、(1996)
- 42) Romeiser R: An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface 1. Theory of the model and optimization /validation by scatterometer data, (1997) [2 次元波面傾斜に対する正規化散乱断面積 (NRCS) のテイラー展開]
- 43) 平山次清: プイによる波浪の計測、日本造船学会誌、第 831 号、pp594-605、(1998)
- 44) 波浪評価検討専門委員会報告: 船舶海洋工学における波浪情報の諸問題、日本造船学会運動性能研究委員会 (1998)
- 45) Nieto Borge J.C. et al: Overcome the Nyquist Limit in Frequency in Nautical Radar Measurement of Wave Field, 17th OMAE, (1998)
- 46) 石田廣他: Marine Radar Wave Observation system, Selected Paper, 日本航海学会 (1999)
- 47) MIROS 社: Marine Wave Extractor (WAVEX)、取り扱い説明書、(1999)
- 48) Fabio K. Takase, T. Hirayama: Evaluation of Marine Wave Radar (Part I and II), 日本造船学会論文集、第 187 号、pp85-92、第 188 号、pp225-237、(2000)
- 49) 高瀬ファビオ・カワオカ、平山次清: 波浪レーダーの数値シミュレーションによる基礎的検討、第 15 回海洋工学シンポジウム、pp289-296、(2000)
- 50) 平山次清、朴承根、高瀬ファビオ・カワオカ、宮川 清、高山武彦: 船用レーダーの波面計化と実測例、第 16 回海洋工学シンポジウム、pp35-38、(2001)
- 51) 平山次清、朴承根、ファビオ・カワオカ高瀬、宮川 清、高山武彦: 船用レーダーを利用した現況波浪情報取得法について、日本水産工学会学術講演会、(2001)
- 52) 平山次清、朴承根、平川嘉昭、高山武彦: 船用レーダーの波浪計化—ロバストな新システムの提案・試行—、日本造船学会論文集、第 191 号、pp51-56、(2002)
- 53) Hirayama T., Park S.G., Takase F.K., Hirakawa Y. and Takayama T: Directional Ocean Wave Spectra from Marine Radar, ISOPE, pp119-123 (2002)
- 54) 吉田文雄: レーダ水文学、森北出版株式会社、(2002) [球形粒子の散乱断面積の紹介]
- 55) 海洋環境リモートセンシング専門委員会: 海洋工学におけるリモートセンシングの現状と諸問題、海洋環境リモートセンシング専門委員会成果報告書、日本造船学会、(2003)
- 56) 第 244 研究部会: 実海域対応の船舶性能設計システムの研究、日本造船研究協会、平成 14 年度報告書、(2003)
- 57) 馬寧、平山次清: 漁船安全確保支援技術 (最近の漁船海難と転覆防止技術 (馬)、船用レーダーを用いた荒天波浪中の安全支援システムの可能性 (平山))、日本水産工学会春季シンポジウム (2003)
- 58) D. ノミヤマ、平山次清: Numerical Simulation Applied to Real-Time Ocean Wave Analysis, 日本造船学会春季講演会論文集、pp5-6 (2003)
- 59) D. ノミヤマ、平山次清: Retrieval of Ocean Wave Parameters Through Real Time Radar Image Analysis, 海洋工学シンポジウム、pp91-96、(2003)
- 60) 小嶋貞二、山田智貴、細田龍介: マリンレーダーを用いた波浪モニターシステムの開発 (第一報) —数値シミュレーションによるレーダー信号の作成と解析—、関西造船協会春季講演会 (2003)
- 61) 林昌奎、小林豪毅、山西一臣: 風波面において散乱するマイクロ波のドップラースペクトル特性、日本造船学会春季講演会論文集、pp 7-8 (2003)
- 62) Nomiyama, D.H. & Hirayama, T: Evaluation of marine radar As an ocean-wave-field detector through full numerical simulation, J. Mar. Sci and Technol, Vol. 8, 88-98 (2003)