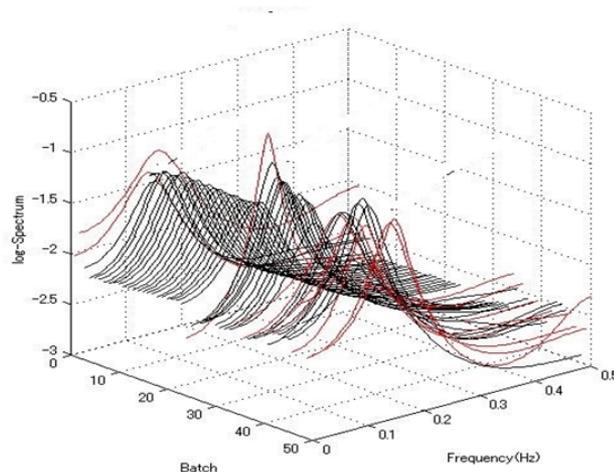


日本海事協会 業界要望による共同研究
平成25.10 ~ 27.9.30

「船体運動を考慮した 機関・船体情報統合型船載モニタリング システムの開発」 報告書 1



一般社団法人 日本船舶機関士協会
株式会社大津海事研究所、日本無線株式会社、
JRCS株式会社、インテグレーションテクノロジー株式会社

本プロジェクトの目的(契約書(写し))

(目的) 本研究の目的は、このような先行研究の成果を踏まえ、下記のようなシステムを実機開発し、もって船体・推進機関の安全・環境負荷低減運航を実現することを目的とする。(図1)

① 実時間船体、機関性能監視予測機能の開発

船上で記録される船体・機関の時系列に関する統計モデルを実時間で構築し、船体・機関運動の船体運動が与える機関運動への影響に関する最新の情報、トレンド、短期予測に関する信頼できる情報を運航者に分かりやすい表現で提供する統計モデルを活用した実時間船載型モデルベースモニタリングシステム（以下「モニター」と呼ぶ）を開発する。

② 中長期状態監視データベースの構築と会話型プログラムパッケージの開発

船体・推進性能に関するデータベース作成機能とそれらの解析を行い船舶の中長期性能の予測を会話型で行うプログラムパッケージを開発する。

共同研究における役割分担

総括・機関運航法の開発

(一財)日本海事協会 (一社)日本船舶機関士協会



企画・解析

株式会社 大津海事研究所

船内情報処理システムの構築 モニタリング装置(船体部)の構築

日本無線株式会社

モニタリング装置(機関部)の構築

JRCS株式会社

船載型モニタリングシステムプロトタイプ作成 インテグレーションテクノロジー(株)

協力

川崎汽船(株)、新日本海フェリー(株)、
今治造船(株)、宇部興産海運(株)、
宇津木計器(株)

目的1 実時間船体・機関性能監視予測機能の開発

開発方針1: 実船実験結果をもとに設計方針を検討する。

開発方針2: 開発方針1に基づき、航海・機関データを統合した船内LANの確立、実機プロトタイプを作成する。

目的2 中長期状態監視データベースの構築と 会話型プログラムパッケージの開発

開発方針1: 船載システム内に20分、1時間、4時間、1日、全航海のデータおよび統計モデルのデータベースを作る

開発方針2: 船と陸上を結ぶ船陸間通信システムを確立する

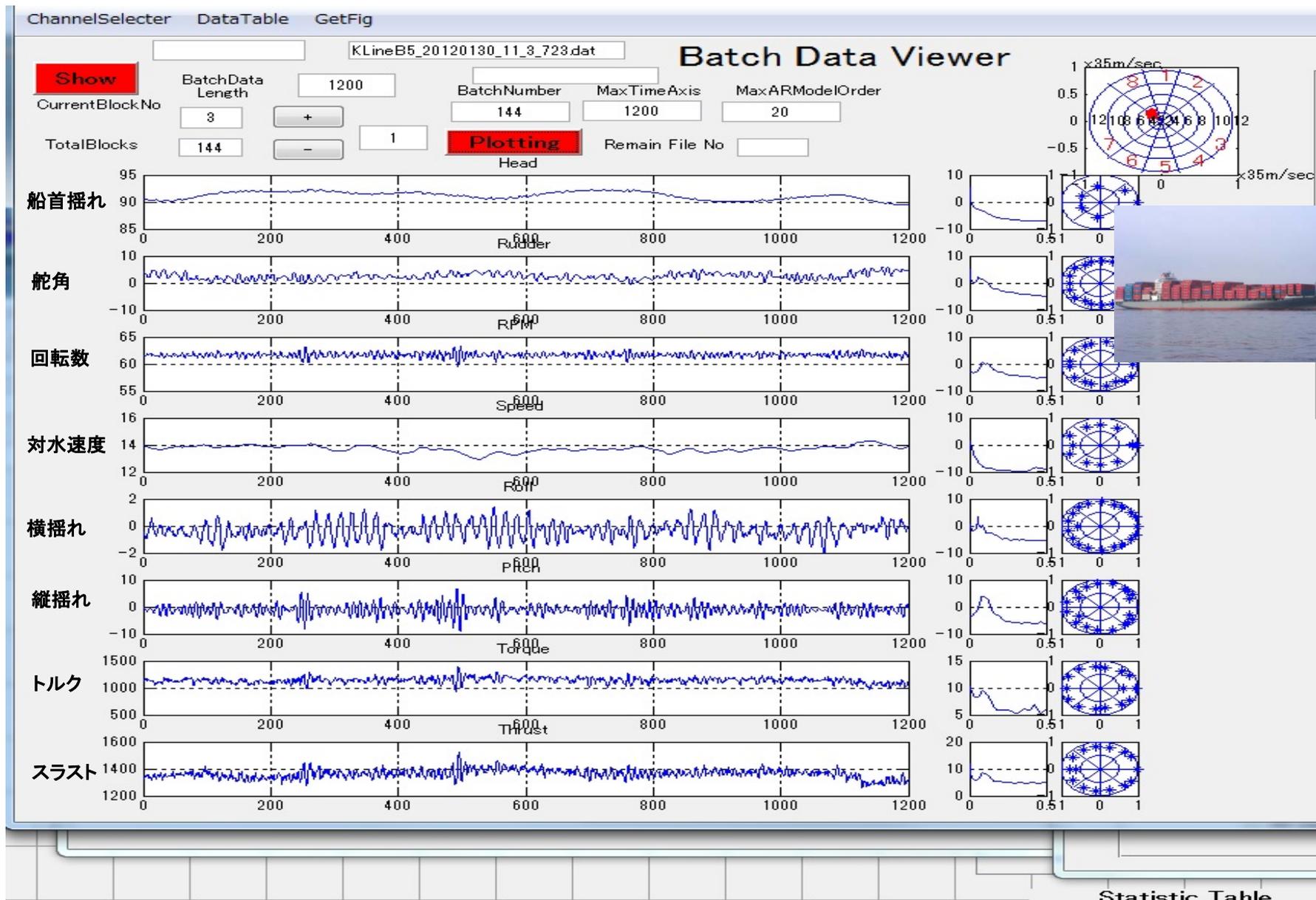
開発方針3: MATLAB言語を駆使して会話型統計処理パッケージを構築
作成する

目的1 実時間船体・機関性能監視予測機能の開発

開発方針1: 実船実験結果をもとに設計方針を検討する。

開発方針2: 開発方針1に基づき、航海・機関データを統合した船内LANの確立、実機プロトタイプを作成する。

ブルックリンブリッジ号で観測されたデータの例



基本時系列 統計モデル自己回帰モデル

Auto Regressive Model (AR)

モデルの決定
AIC最小法



$$y(s) = a(1)y(s-1) + a(2)y(s-2) + \dots + a(M)y(s-M) + v(s)$$

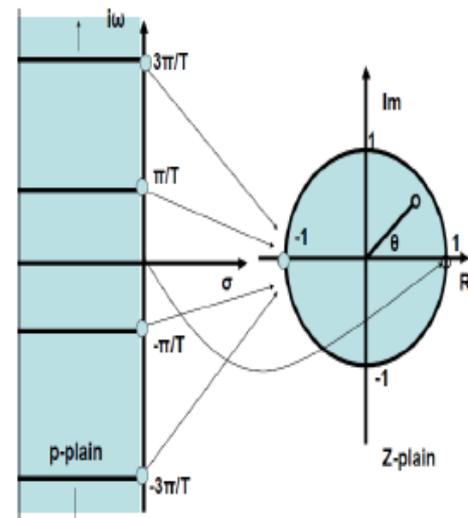
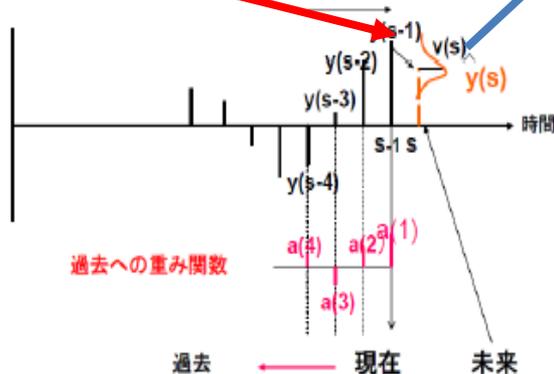
$$= \sum_{m=1}^M a(m)y(s-m) + v(s)$$

予測の誤差
を表す部分

次に何が
起きるかを
表す部分

$$\varphi(s) = 1 - a(1)s - a(2)s^2 - \dots - a(M)s^M = 0 \text{ の根 (特性根)}$$

自己回帰モデル



特性根の
分布

スペクトラムピークと固有根の関係

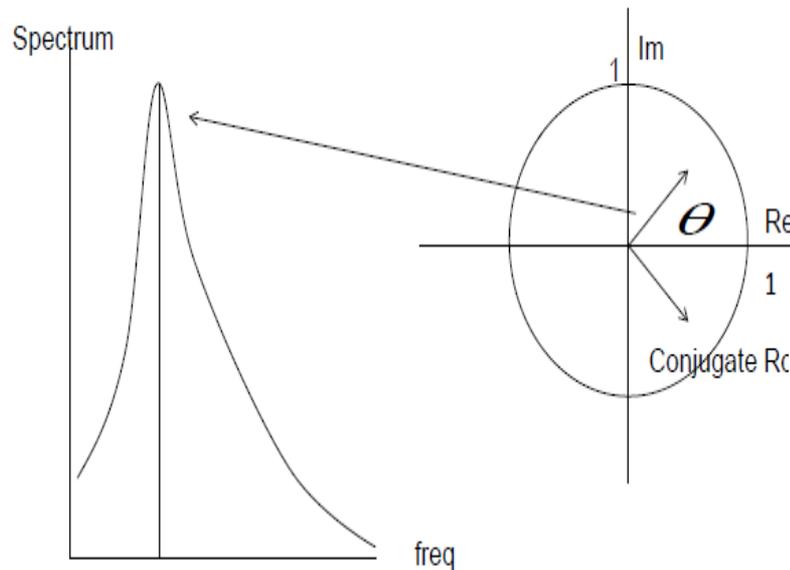
スペクトラム

$$P_{yy}(f) = \frac{\sigma_v^2}{|1 - \sum_{m=1}^M a(m) \exp\{-i2\pi fm\}|^2}, \quad |f| \leq \frac{1}{2}$$

ポイント : スペクトラムのピークの周期が分かる

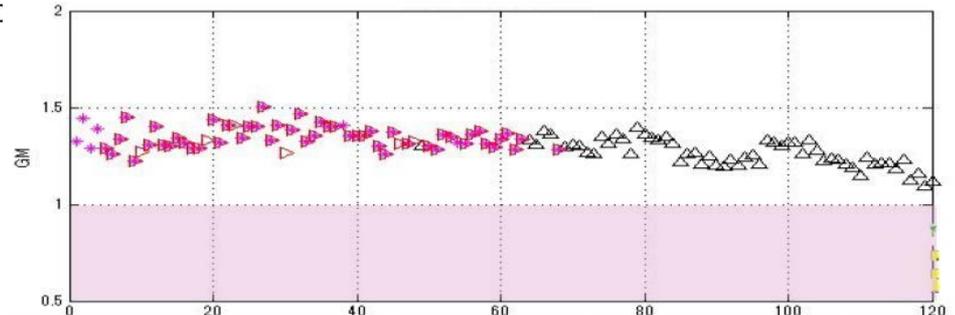
最大の絶対値 主要根 主要周期

$$T = \frac{2\pi\kappa}{\sqrt{GM \square g}}$$



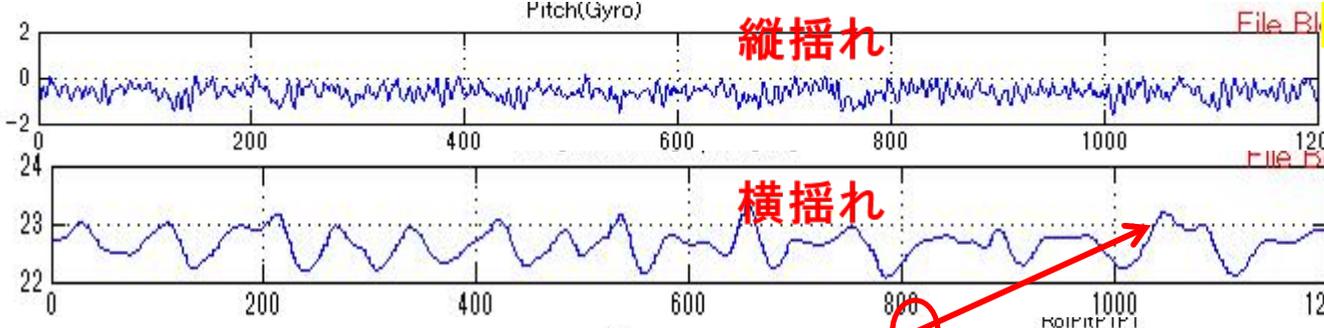
$$f = \frac{\theta}{2\pi}$$

周波数と位相角の関係



横揺れ主要周期からGMの推定が可能

実船実験結果をもとに設計方針を検討する。



縦揺れ

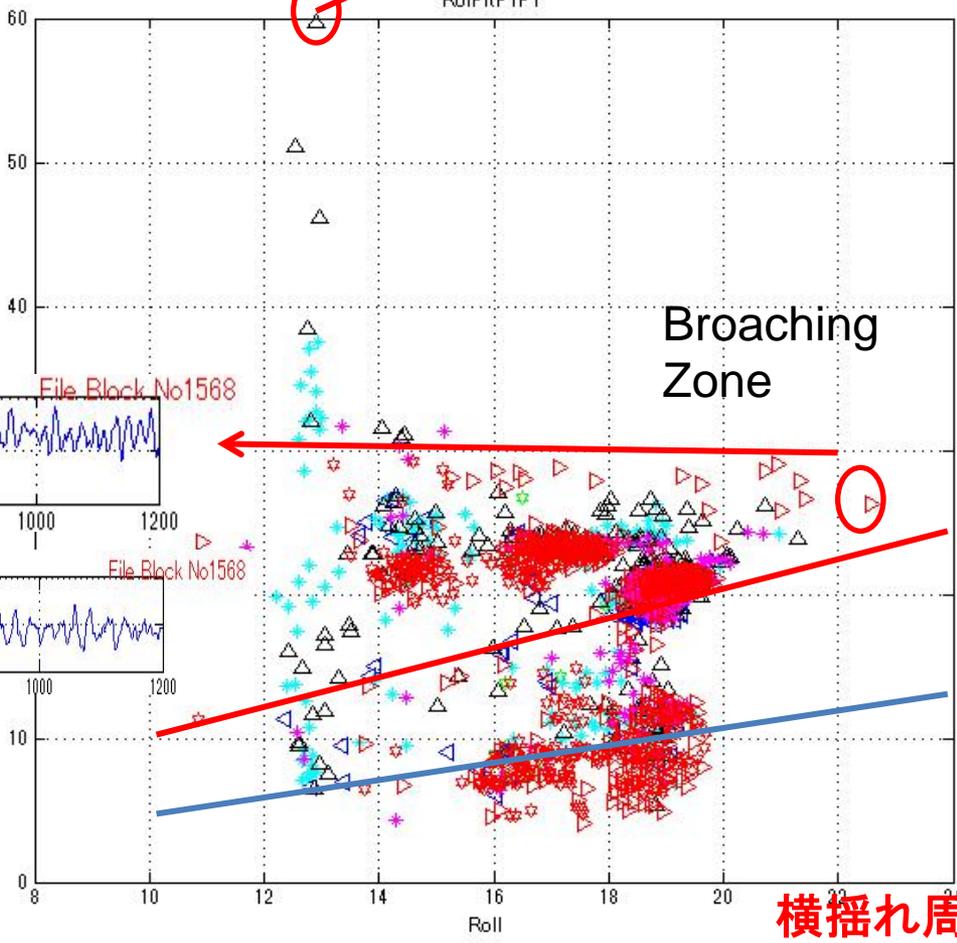
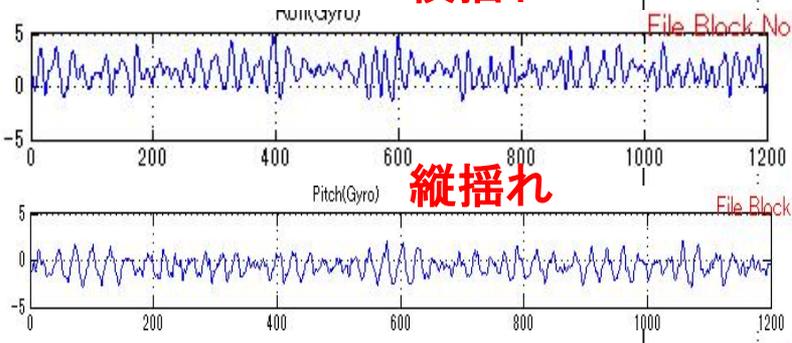
速力変動



縦揺れ周期と横揺れ周期の関係と運動の特徴

縦揺れ周期

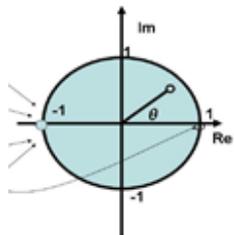
横揺れ



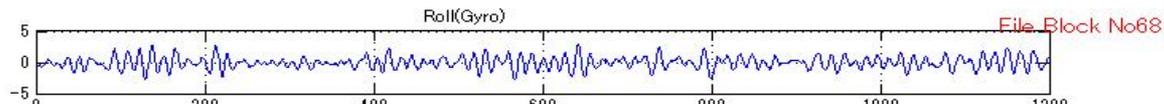
- ▽ Head
- ☆ S.Ob.Fore
- △ S.Beam
- ☆ S.Ob.Aft
- △ Follow
- ☆ P.Ob.Aft
- ▽ P.Beam
- ☆ P.Ob.Fore

成果: 不規則な運動の動揺周期が正確にわかるようになり安全運航の指標を得た

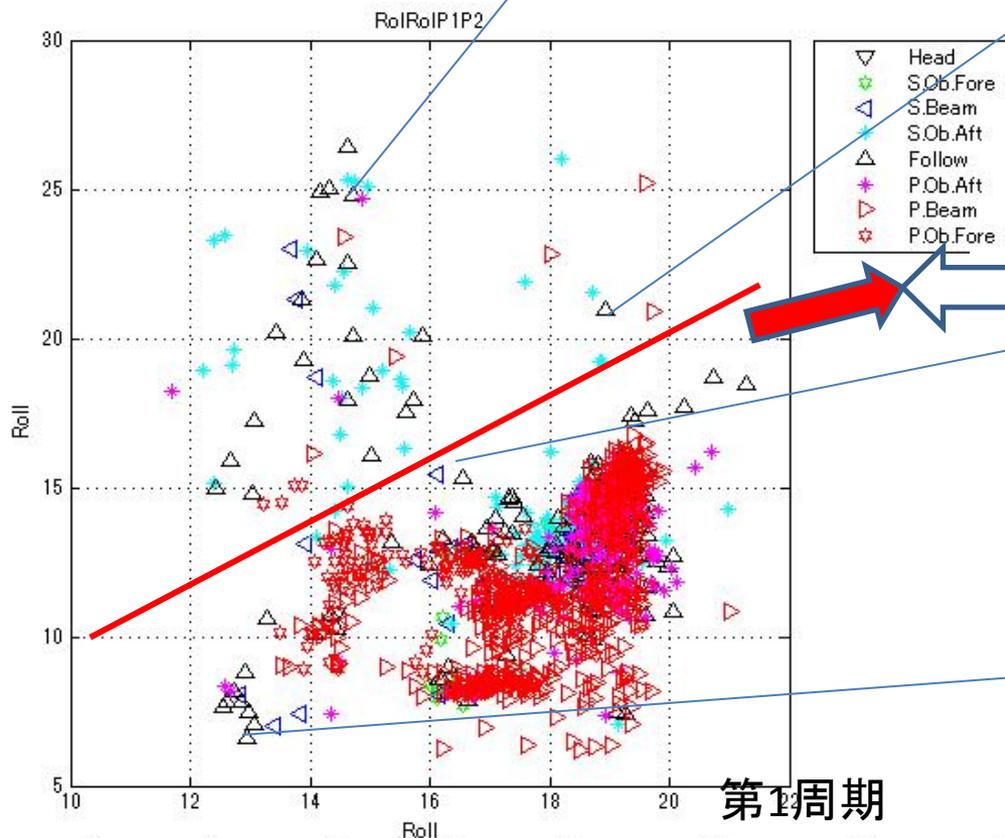
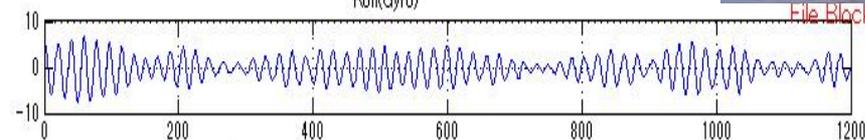
横揺れの主要周期と副周期から見る横揺れの特徴



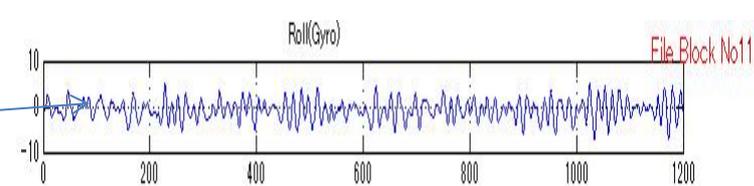
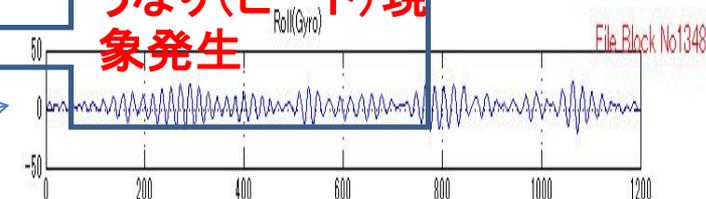
第2周期



File_Block No1666



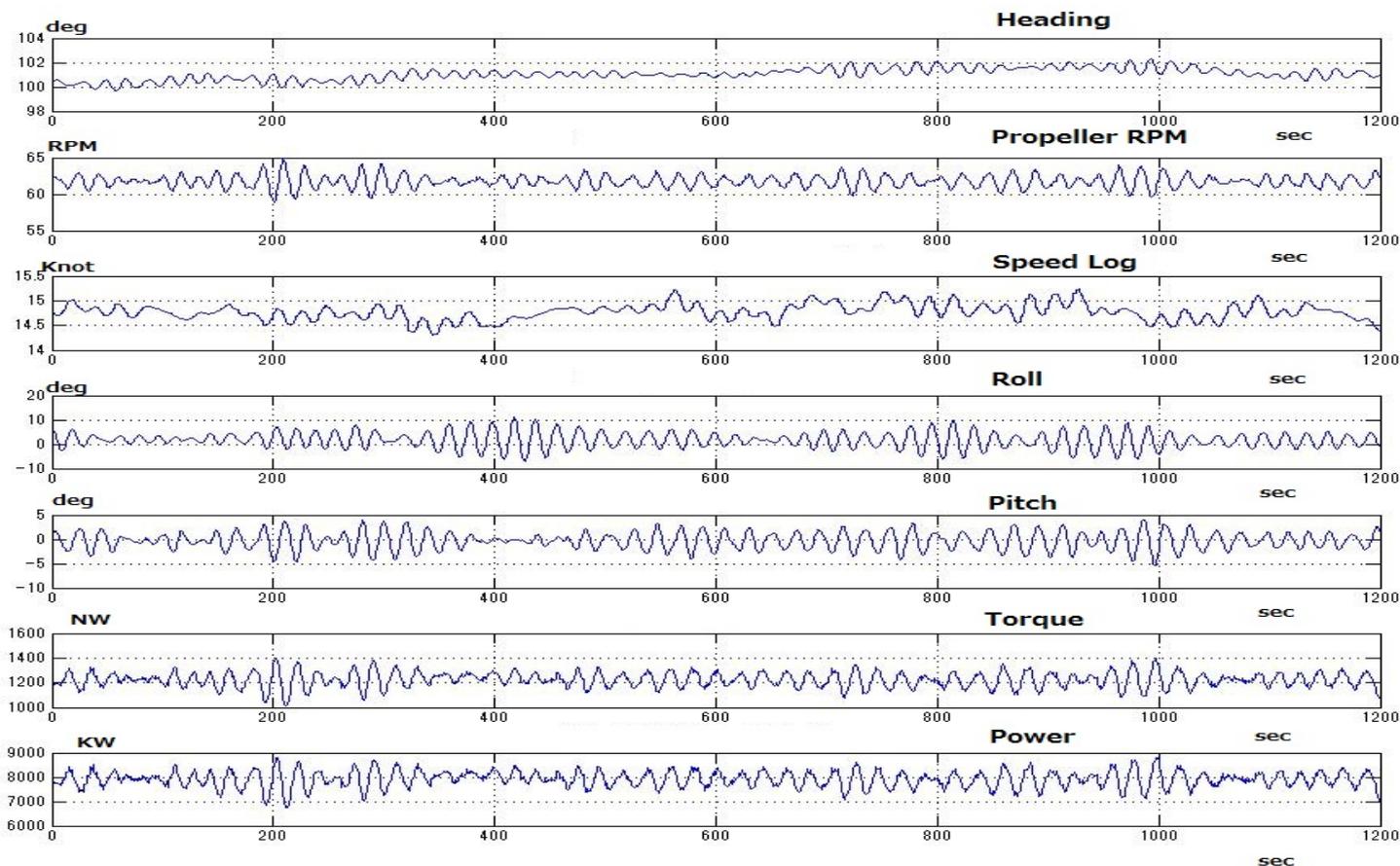
うなり(ビート)現象発生



全ての船体・機関運動ビート起こしエネルギーロス、危険リスク増大する条件が判明した

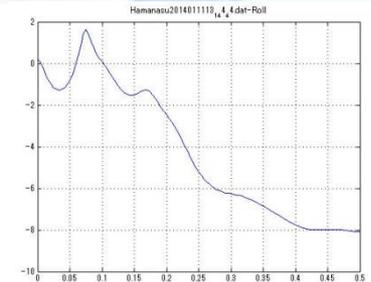
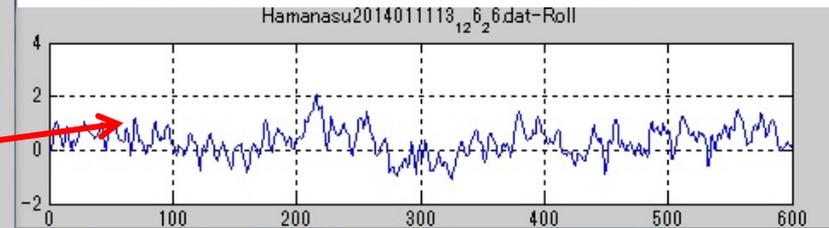
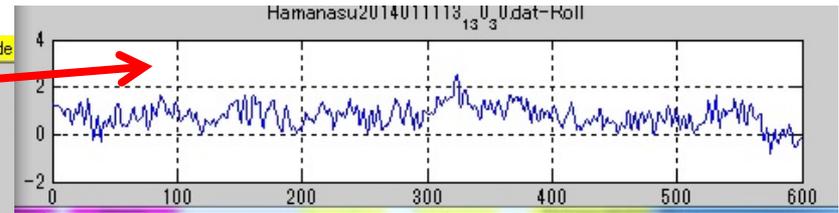
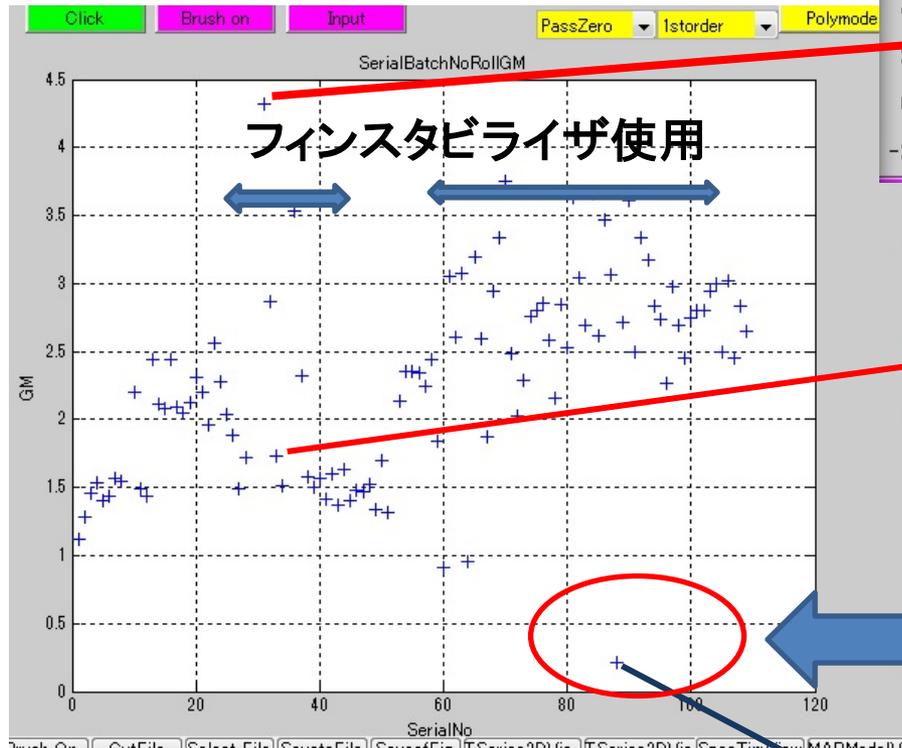
条件1 縦揺れ、横揺れが同調する

条件2 横揺れ主周期、副周期が近接する



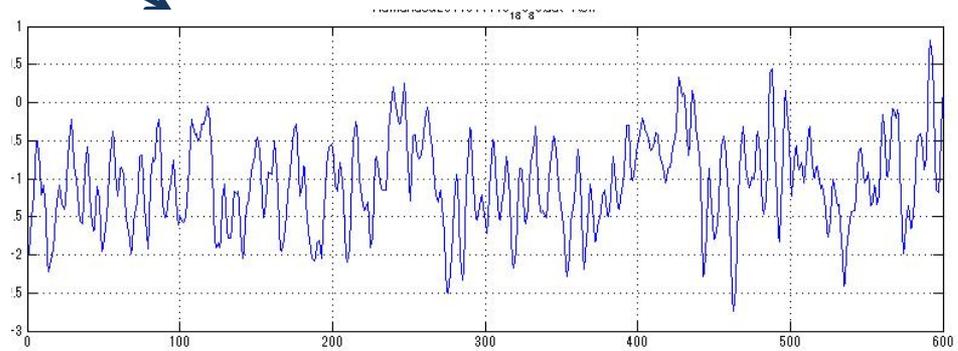
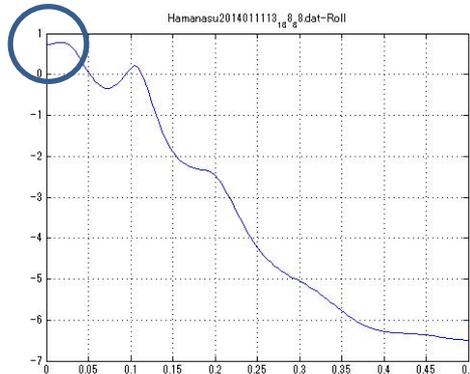
船体・機関運動がうなり状態となる時系列例

高速フェリーの横揺れ安定性



長周期横揺れ発生
ブローチング

冬季
ブローチング等
の予防が可能

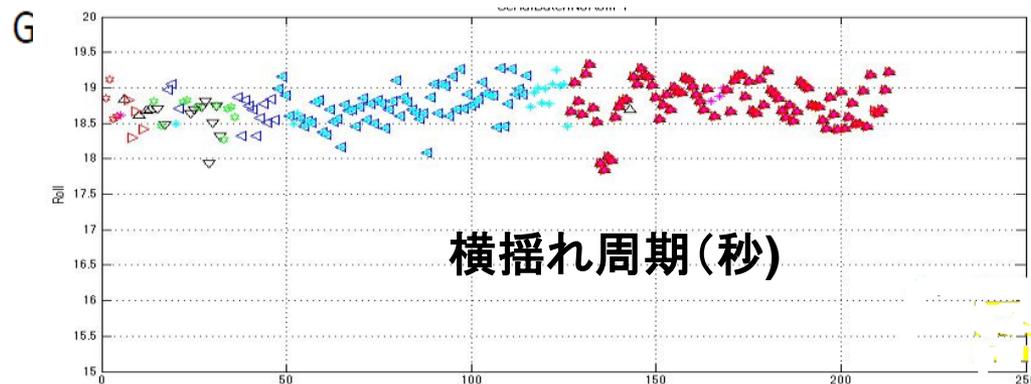
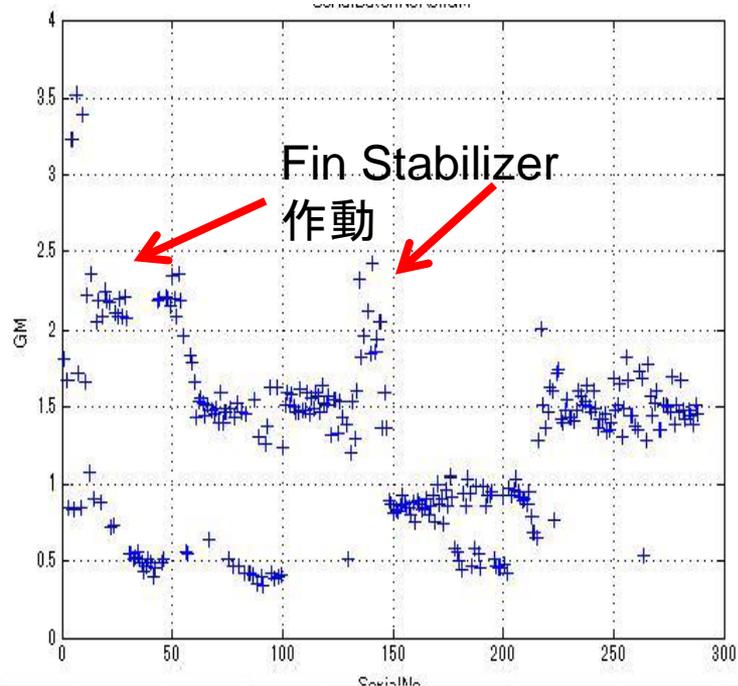


GMの変動を監視する 2例

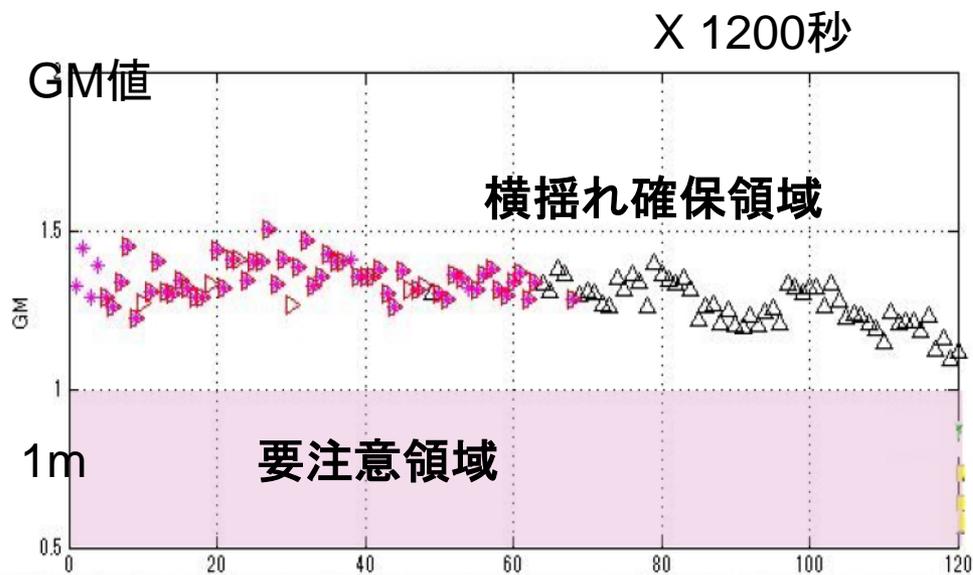


内航コンテナ船

外航コンテナ船



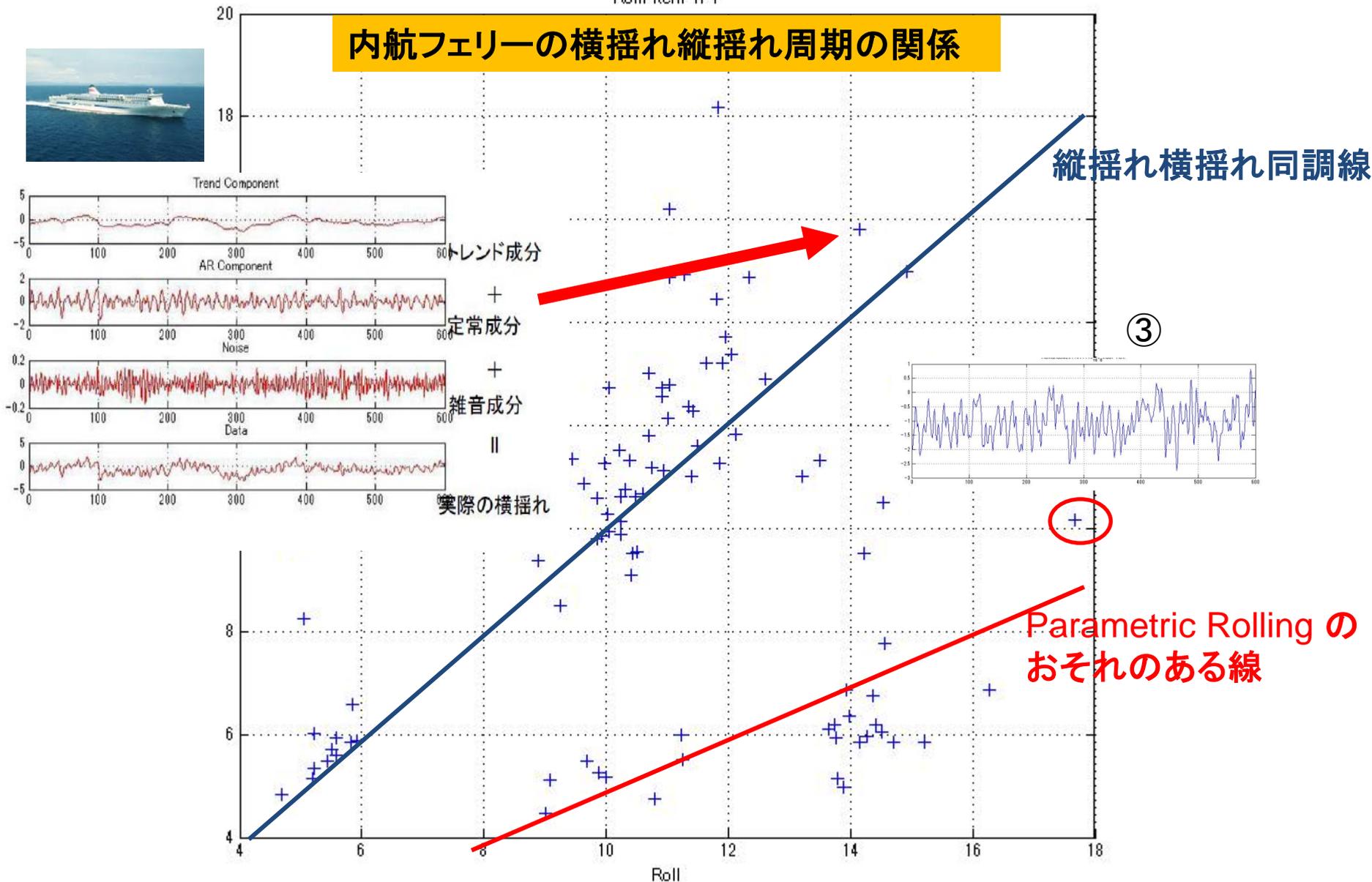
GMの初期値
出航前積み付け計算機と
一致させておくと精度向上



X 1200秒

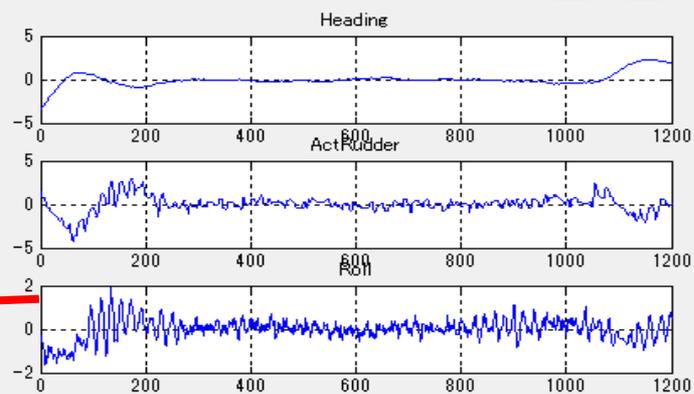
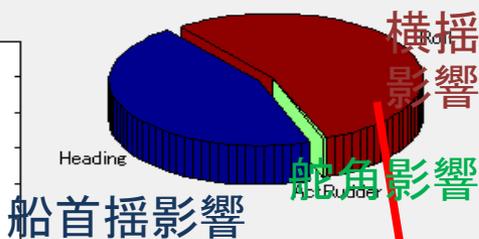
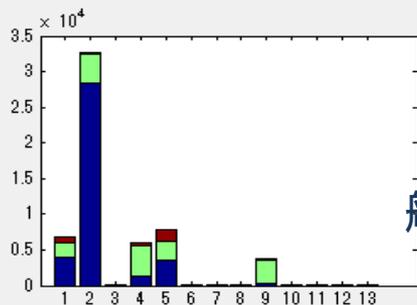
RollPitchP1P1

内航フェリーの横揺れ縦揺れ周期の関係



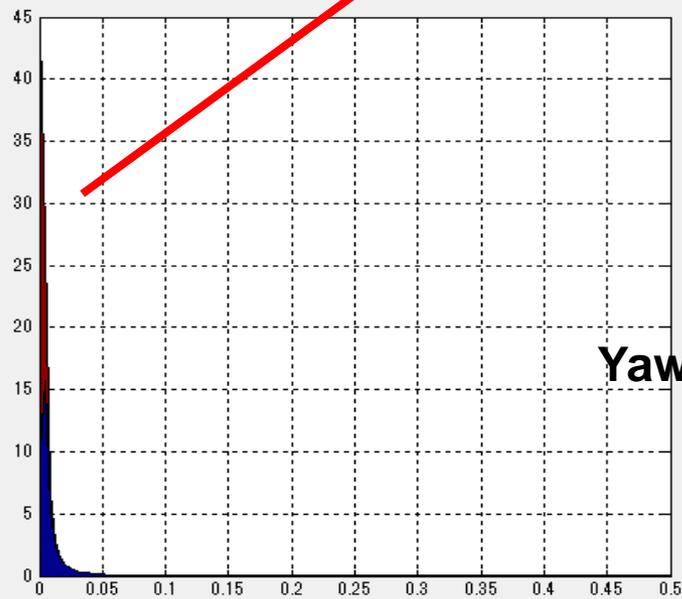
横揺れの及ぼす船首揺れへの影響 Yaw-Heel Effect

成果: 高速コンテナ船等に多い激しい横揺れが操縦性(船首揺れ)に大きな影響を及ぼす現象が監視可能となった。
(多次元自己回帰モデルの利用)



横揺れからの影響

横揺れへの影響度



Yaw-Heel Effect

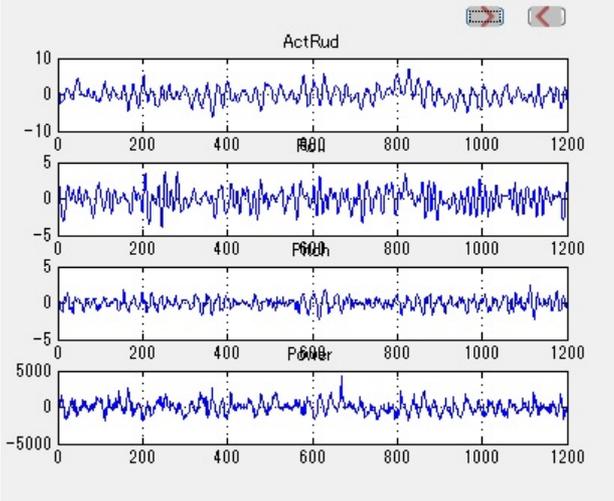
周波数

追波中の横揺れリスクの回避

機関出力への船体運動の影響 (多次元自己回帰モデルの利用)

Latest Time History

Contribution to Engine Power

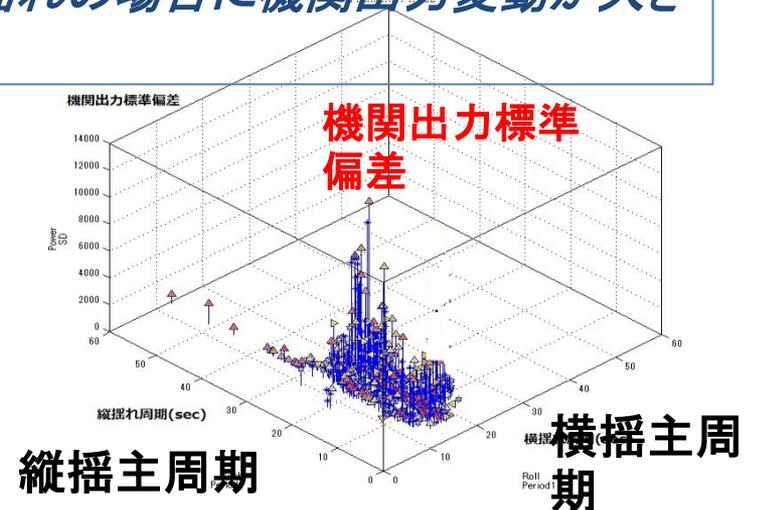
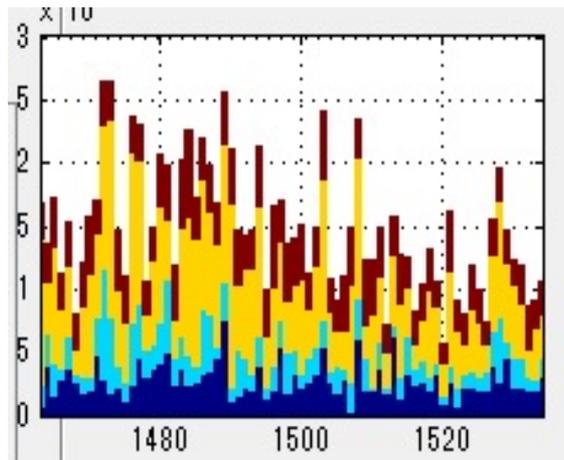


成果; 機関出力に与える船体運動の影響が監視できるようになった

省エネルギーポイント

成果: 縦揺・横揺周期同調付近ならびにそれより長周期縦揺れの場合に機関出力変動が大きくなる

History of Contribution to Power



縦揺れ運動は機関出力の変動を誘起する

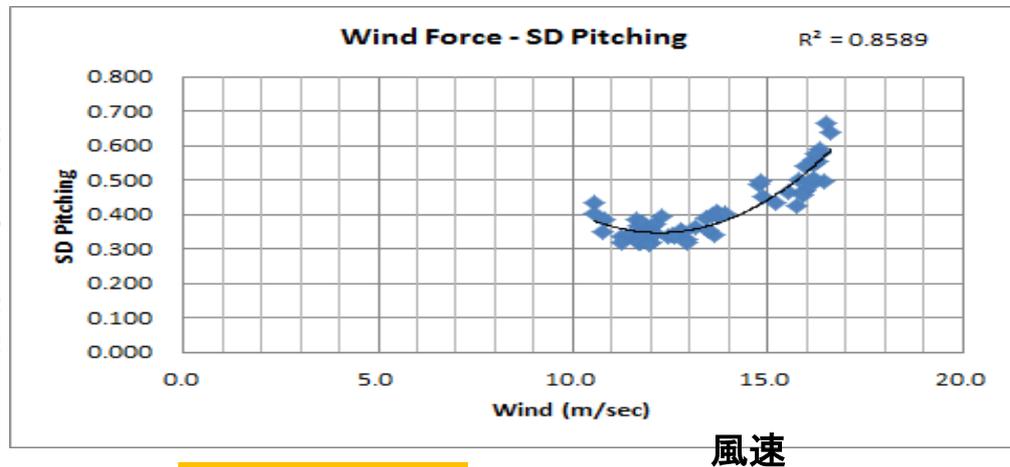
風速と縦揺れの関係

①外乱(風、波)が縦揺れを誘起する。

②縦揺れが回転数変動を誘起する



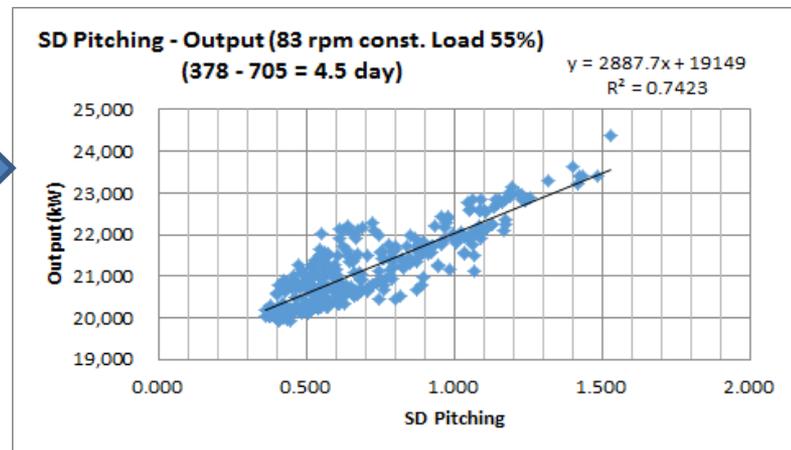
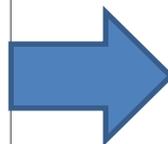
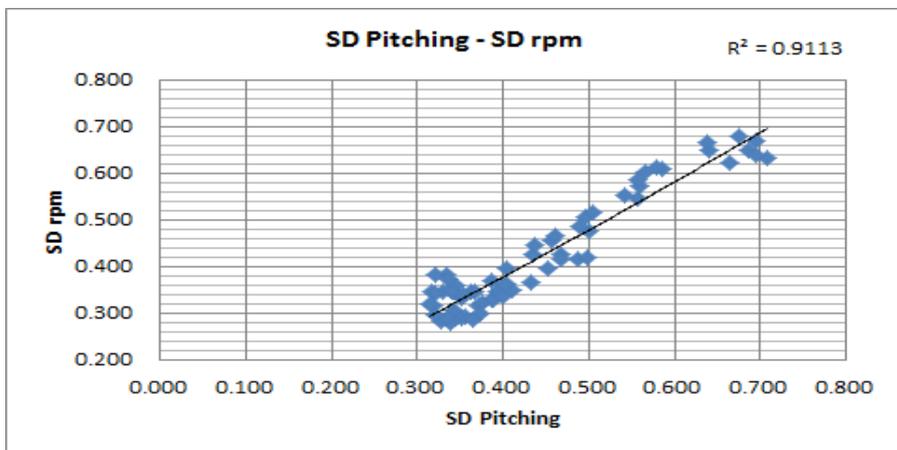
縦揺れ標準偏差



③回転数の変動が機関出力を誘起する

縦揺れと回転数変動の関係

縦揺れと機関出力の関係



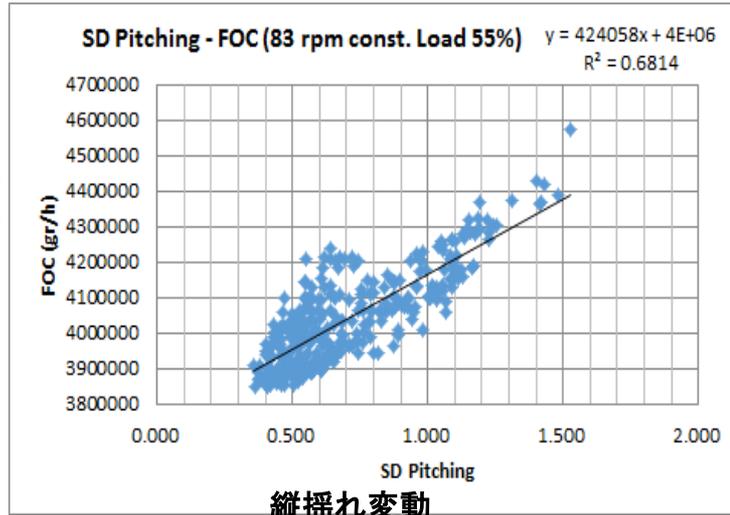
縦揺れは燃料消費増加の原因である

省エネのキーポイント

縦揺れを波高計とみなし、その変動を抑制は、燃料消費量の減少を促す

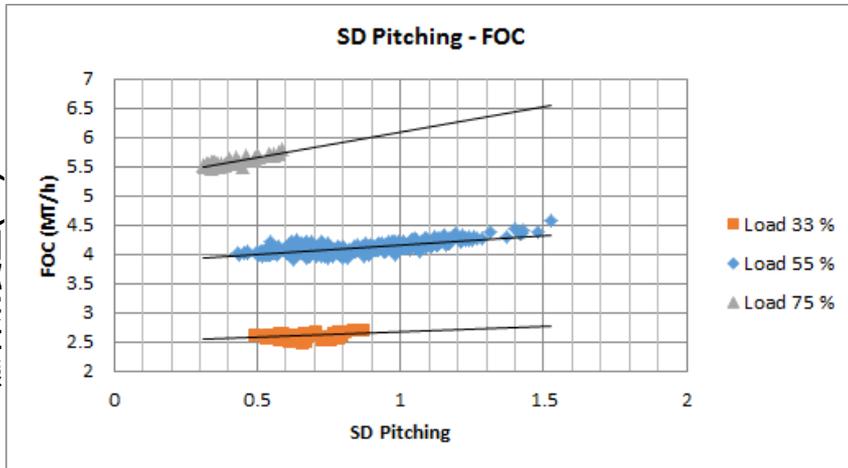
縦揺れと燃料消費量の関係

燃料消費量(1h)



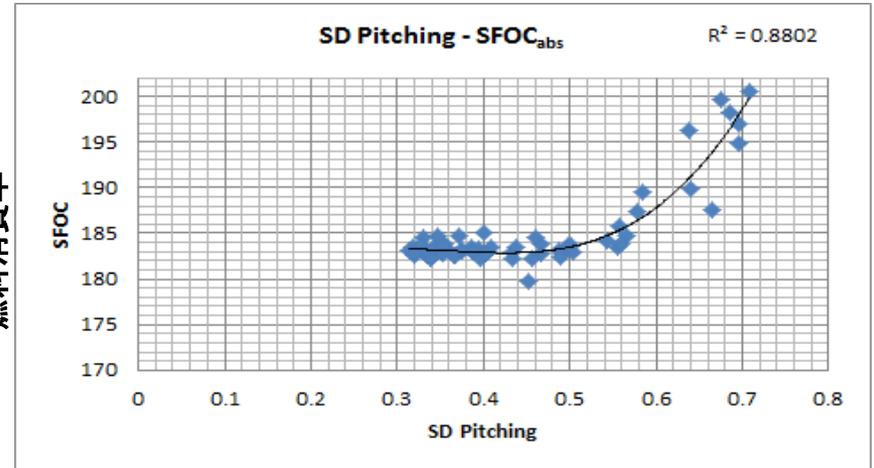
機関負荷別燃料消費量と縦揺れ変動の関係

燃料消費量(1h)



縦揺れと燃料消費率の関係

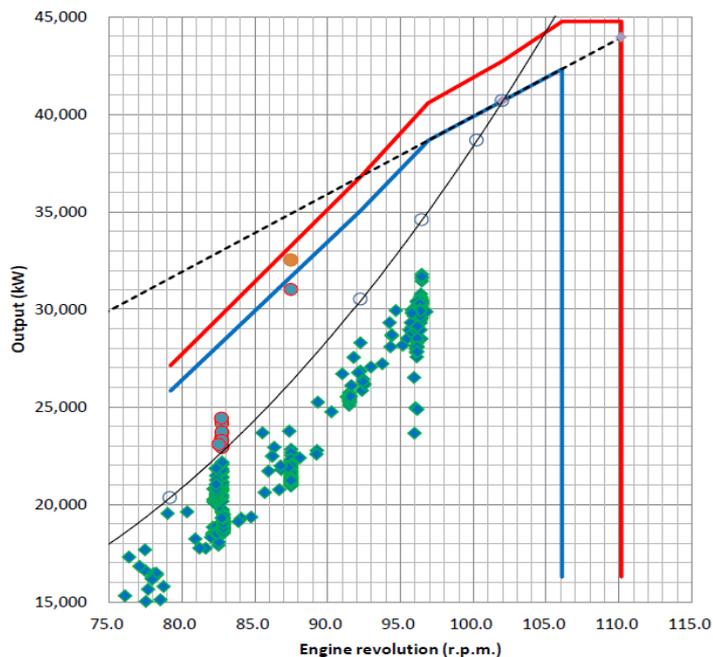
燃料消費率



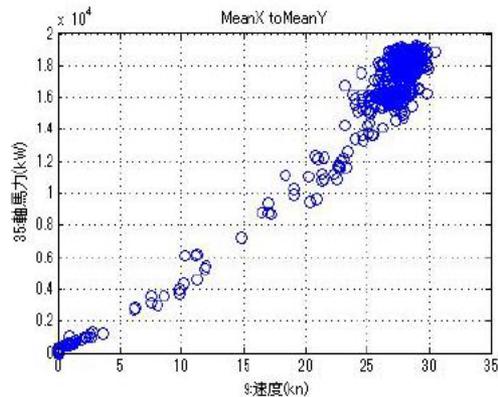
機関回転数・機関出力曲線の比較



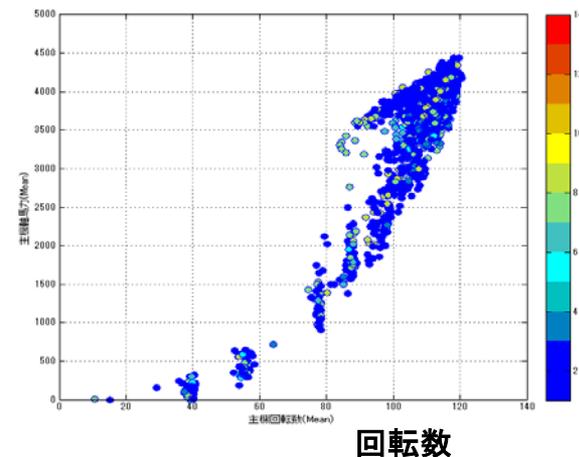
Load Program



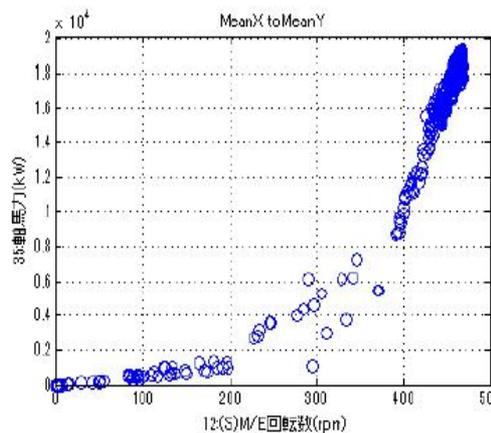
速度対軸馬力の関係



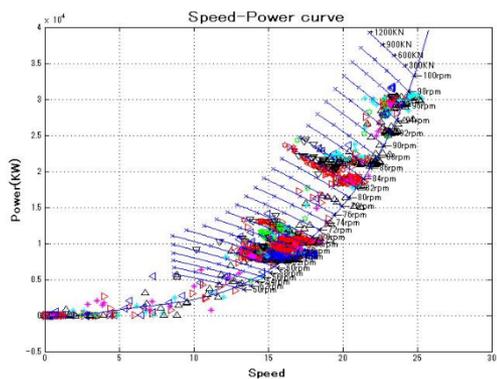
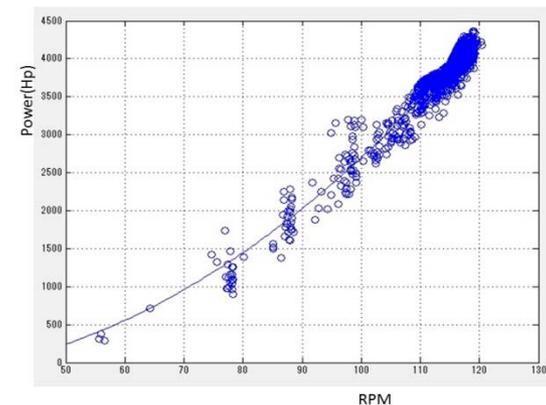
主機出力



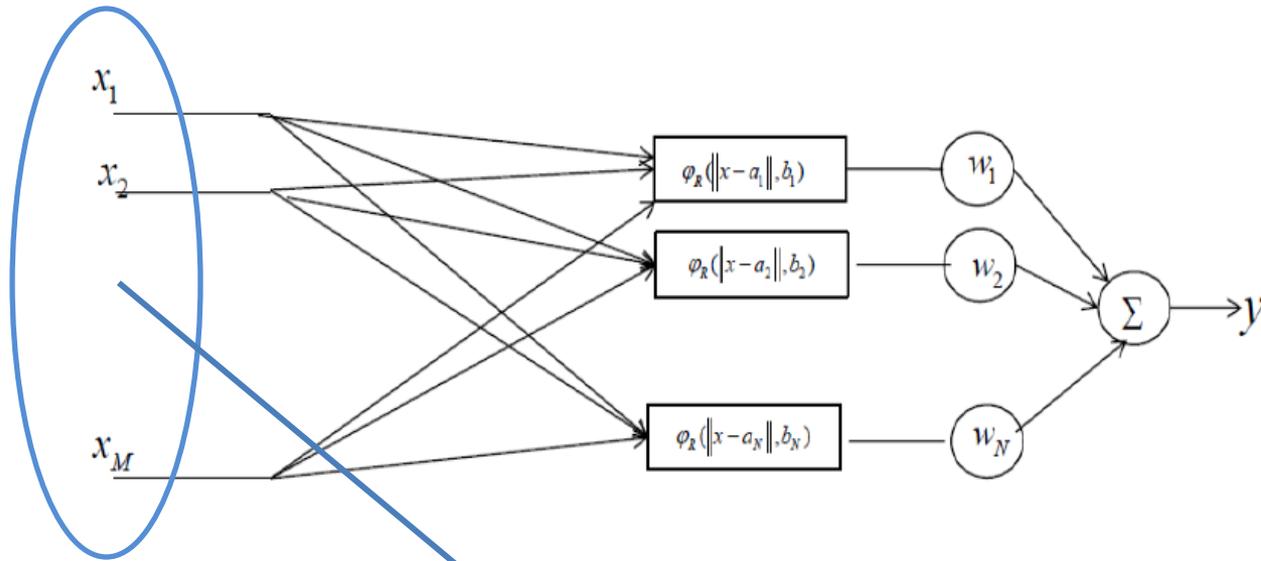
右主機回転数対軸馬力の関係



平水中特性



RBF-ARx Model (Radial Base Function ARx Model) の導入



$$y_n = a_0(S_{n-1}) + \sum_{i=1}^M a_i(S_{n-1})y_{n-i} + \sum_{i=1}^L b_i(S_{n-1})u_{n-i} + \varepsilon_n$$

次の時刻のトルク変動

過去のトルク変動

回転数変動

ここで、

$$a_i(S_{n-1}) = c_{i,0}^a + \sum_{k=1}^m c_{i,k}^a \exp(-\lambda_k^a \|S_{n-1} - Z_k^a\|_2^2) \quad \text{ガウス核}$$

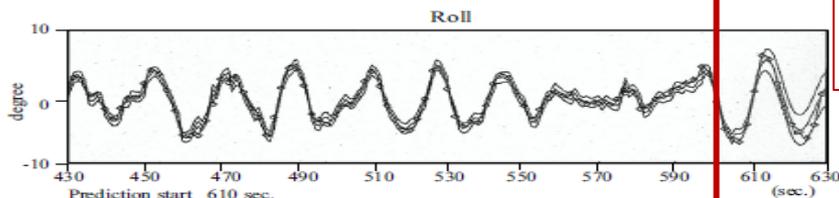
重み

縦揺れ、横揺れ、風力影響等非線形項

成果：機関出力、燃料消費量等の20分予測が可能となった

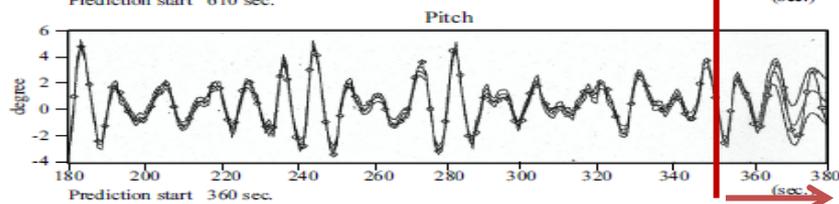
横揺・縦揺の30秒間予測

横揺

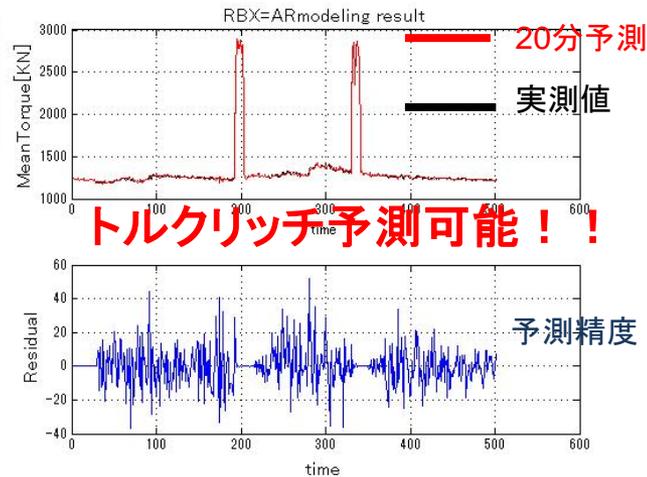


30秒
先測

縦揺

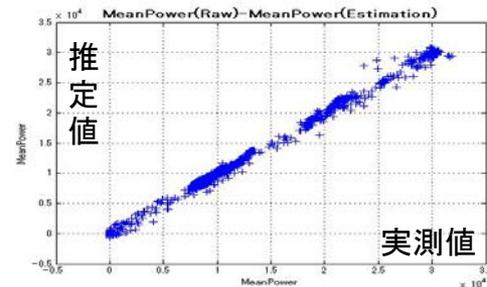
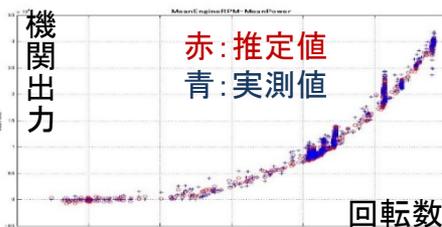
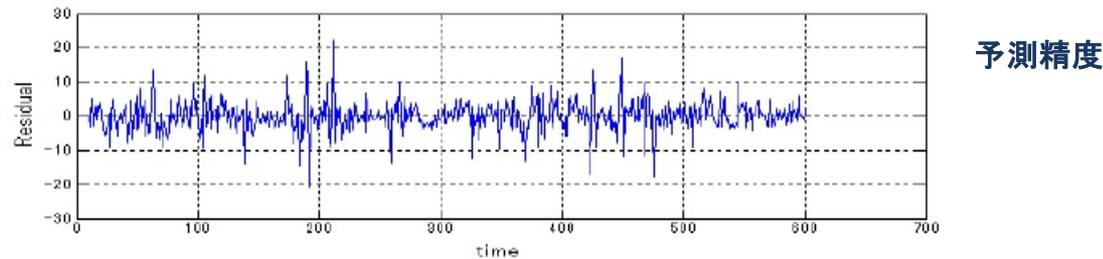
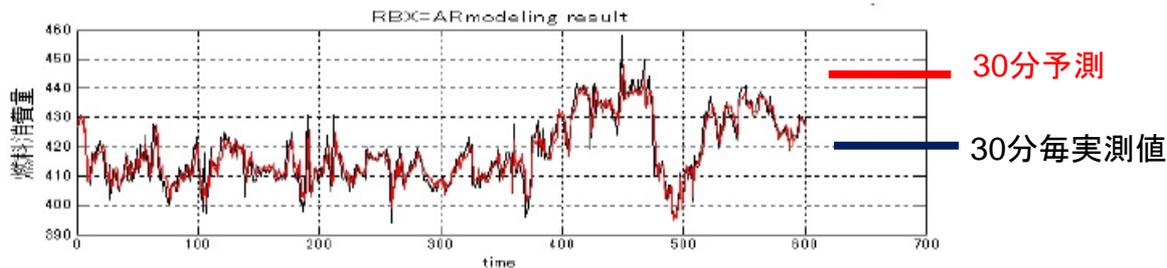


トルクの20分先予測



燃料消費量の30分先予測

機関出力曲線の多変数推定



**開発方針2: 開発方針1に基づき、航海・機関データを統合した
船内LANの確立、実機プロトタイプを作成する。**

(別資料)

**船体運動を考慮した機関・船体情報統合型
船載モニタリングシステムの開発**

(2) モニタリングシステムプロトタイプ

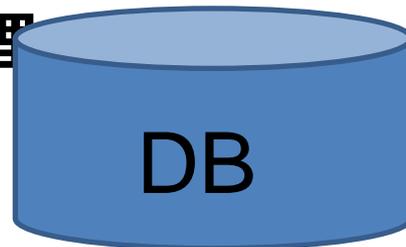
目的2 中長期状態監視データベースの構築と 会話型プログラムパッケージの開発

開発方針1: 船載システム内に20分、1時間、4時間、1日、全航海のデータ
および統計モデルのデータベースを作る

開発方針2: 船と陸上を結ぶデータハイウェイを構築する

開発方針3: MATLAB言語を駆使して
会話型統計処理パッケージを構築作成する

クラスタリング手法を応用したデータベース管理



成果: 船体運動によって分類して統計モデルを保存できる (検索の高速化)

	20分前				1時間前			
	BatchMean	BatchSD	BatchMax	BatchMin	HourMean	HourSD	HourMax	HourMin
Latitude(deg)	55.2199	0	0	0	55.2199	0	0	0
Longitude(deg)	-175.1919	0	0	0	-175.1919	0	0	0
LogSpeed(knots)	21.6538	0	0	0	21.6538	0.1106	0	0
OGSpeed(knots)	22.1140	0	0	0	22.0863	0	0	0
Running Distance(miles)	6.3178	0	0	0	18.9448	0	0	0
Drift Distance(miles)	-0.8829	0	0	0	-0.8915	0	0	0
Pitching(deg)	-0.4969	0.3167	0	0	-0.4312	0.3198	0	0
Rolling(deg)	-0.8814	1.2384	0	0	2.7925e+03	318.1994	0	0
HeadingCcl(deg)	91.1050	0.8608	0	0	90.3800	0.3203	0	0
ActualRudder(deg)	91.9599	1.8630	0	0	2.4812	1.4343	0	0
Torque(kNm)	3.0592e+03	43.2443	0	0	3.0597e+03	44.9133	0	0
Thrust(kN)	18.1090	6.1050	0	0	18.1090	6.1050	0	0
Power(KW)	3.0597e+04	394.6234	0	0	3.0597e+04	43.5119	0	0
PropellerRPM	94.3524	0.3184	0	0	94.3524	0.3184	0	0
Slip	0.1219	0	0	0	0.1235	0	0	0
SeaMargin	53.8790	0	0	0	54.8049	0	0	0
FOConsumption(g)	5.3641e+03	0	0	0	5.3605e+03	0	0	0
Specific FO Consumption(SFOC)	176.3511	0	0	0	175.3867	0	0	0
ShipbestResult	171.7092	0	0	0	171.7100	0	0	0
Difference	4.6418	0	0	0	4.6768	0	0	0
Percent	2.6322	0	0	0	2.6514	0	0	0
Condition(0:good,1:not good)	0	0	0	0	0	0	0	0
FOConsumtion/Mile	2.0364	0	0	0	2.0877	0	0	0
WindDirection(deg)	267.0390	0	0	0	263.9242	0	0	0

航行距離、航路偏差等

スリップ

エンジン

ショップテストと比較し燃料消費率が10%以内ならばエンジンの状態良好

ARmodel ファイルの内容

STATISTICS

```

4 4
1 2
0 0
0.0000000 0.0000000
0.1250084 1.1347700
0.2711434 0.0621910
0.0735187 0.0038677
AR Parameters
2 2
19 12
0.0074461 0.0027605
0.4823616 0.2604390
0.2231099 0.1228305
0.0524469 0.0524241
-0.0564997 -0.0399936
-0.0553931 -0.0521686
    
```

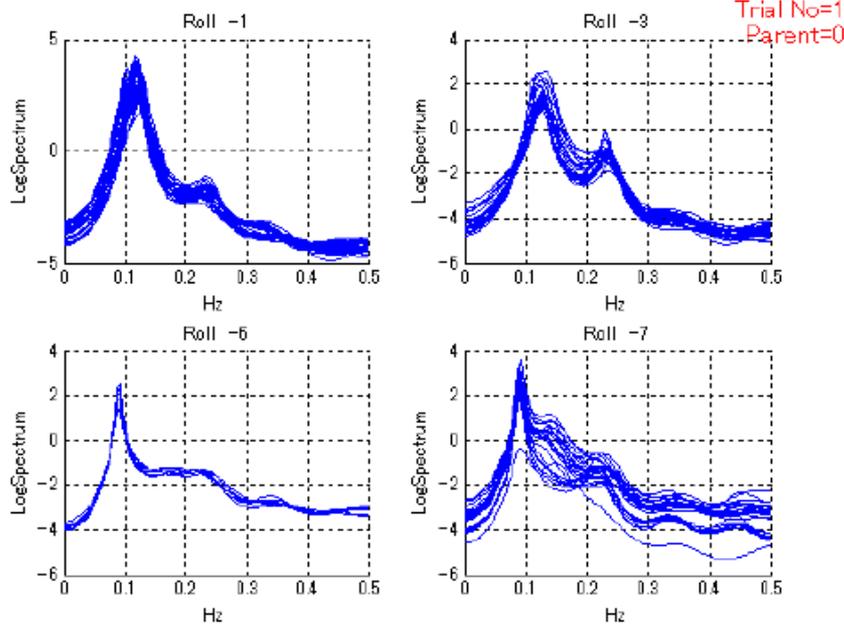
モデル状態
平均値
標準偏差
分散

次数

AR係数

分類保管の例

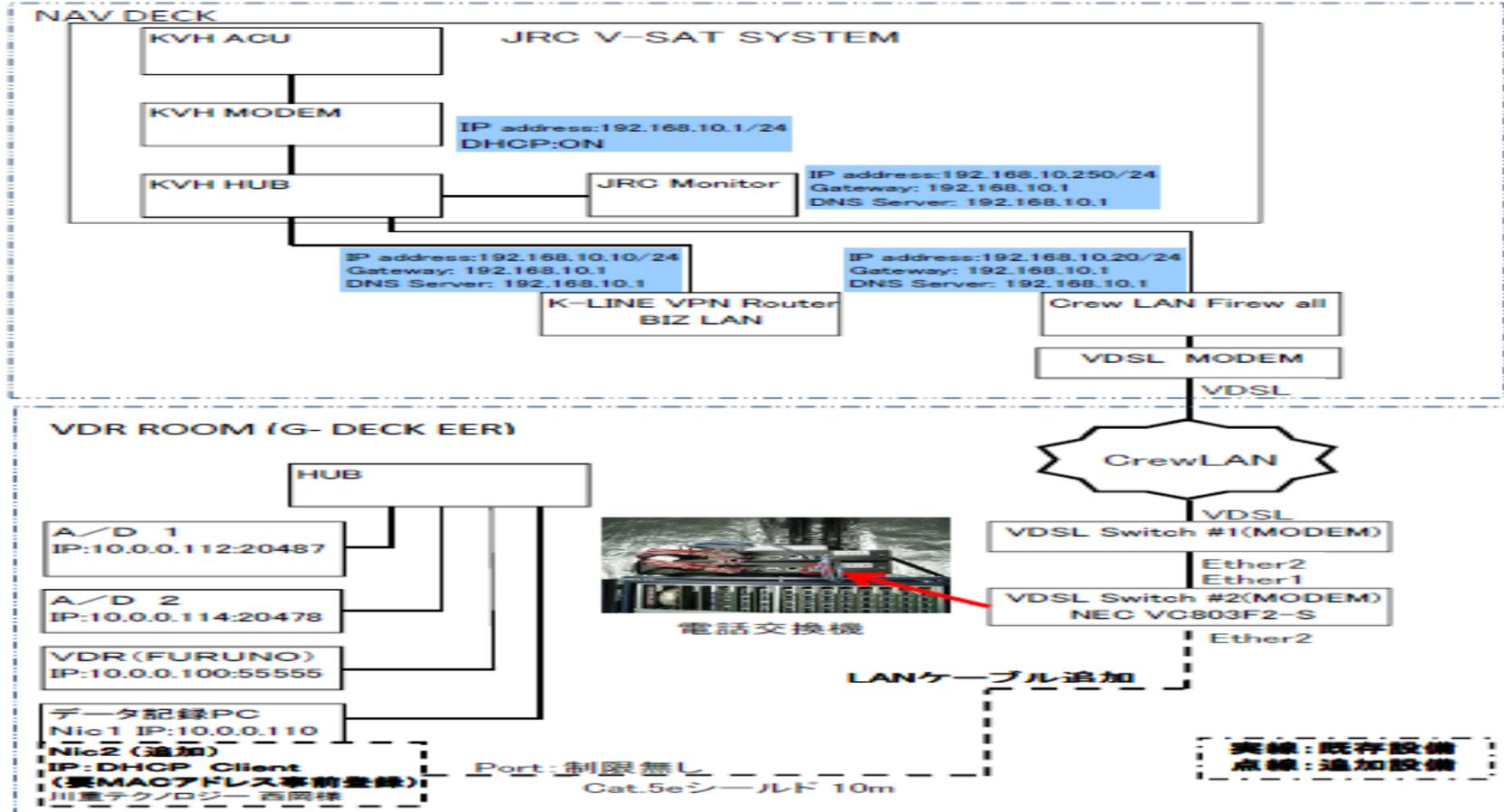
横揺れ時系列の分類 (RoRoShip)



船陸間衛星通信システムの確立

BROOKLYN BRIDGE 船内LAN系統

2013/4/9 Ver.0.4



会話型プログラムパッケージ *Marine Statistica*

Marine Statistica

解析項目選択画面

TimeSeriesAnalysis

Standard Style(fromDataModeISW=1)

Excel Style(fromDataModeISW=2)

Special Analysis

Hamanasu20sec(fromDataModeISW=4)

ModelBase Analysis

Excel Style(fromDataModeSW=3)



ClassificationView

Show Selected ConditionBox

Speed W Force W Direction

13	1	0
14	2	15
15	3	45
16	4	135
17	5	165
18	6	195
19	7	225
20	8	315
21	9	345
22	10	360
23	11	
24	12	
25	13	

Sametime MaxOrder 20

1				
60	KLineB5_20120131_12_6			
61	KLineB5_20120131_12_6			
62	KLineB5_20120131_12_6			
63	KLineB5_20120131_12_6			
64	KLineB5_20120131_12_6			
65	KLineB5_20120131_12_6			
66	KLineB5_20120131_12_6			
67	KLineB5_20120131_12_6			
68	KLineB5_20120131_12_6			

Head Rudder RPM Speed Roll Pitch Torque Thrust

ConditionChannels Headline WindForcer WindDirection Ship's Speed

VarianceAnalysis(Make One Combination and to Variance A...)

MakeSessionDataBase

	ShipSpeed	W.Force(BF)	W.Direc	Sum
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	1	4	4
5	1	1	5	5
6	1	1	6	6
7	1	1	7	7
8	1	1	8	8
9	1	1	9	9
10	1	1	10	10
11	1	2	1	

Class Soee W Force W.Direction

Select SelectClass TotalFileNo 72 XLS filename StatisticsShee MakeXlsheet

Done

DataBaseMake SessionName sessionwork

Statistics

Classification

Next Analysis

ScatteringAnal... ARModel ARfir6

ChRootAnalysis UNoise Analysis

ARmodelView Selected TimeSeriesHandle

MARmodelView

PathName MARfir6.1 ViewerName InputOutputFir

SARClusterView

MARClusterView

Make Session Data Base

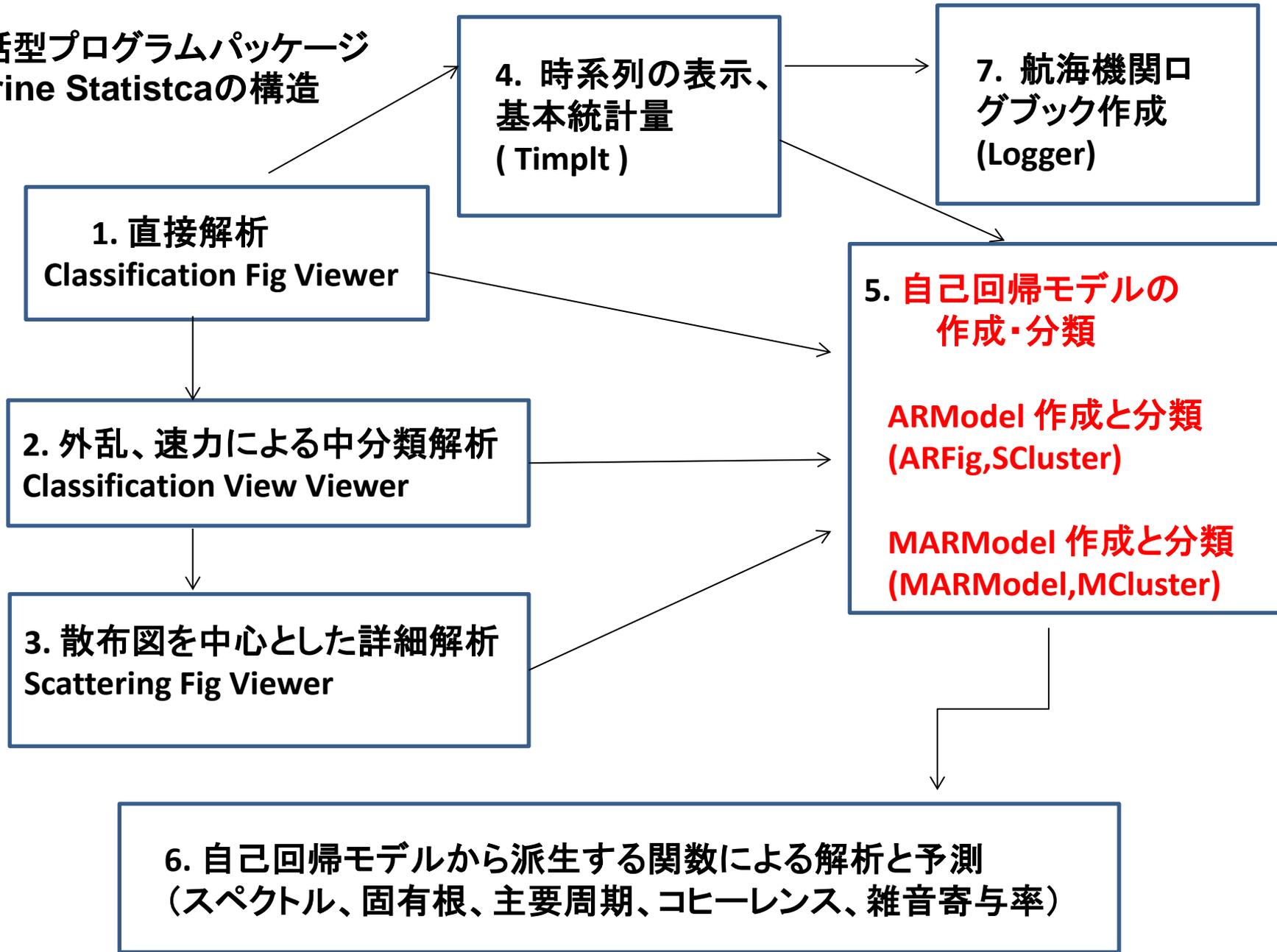
WindKey Combine F... Separate Files

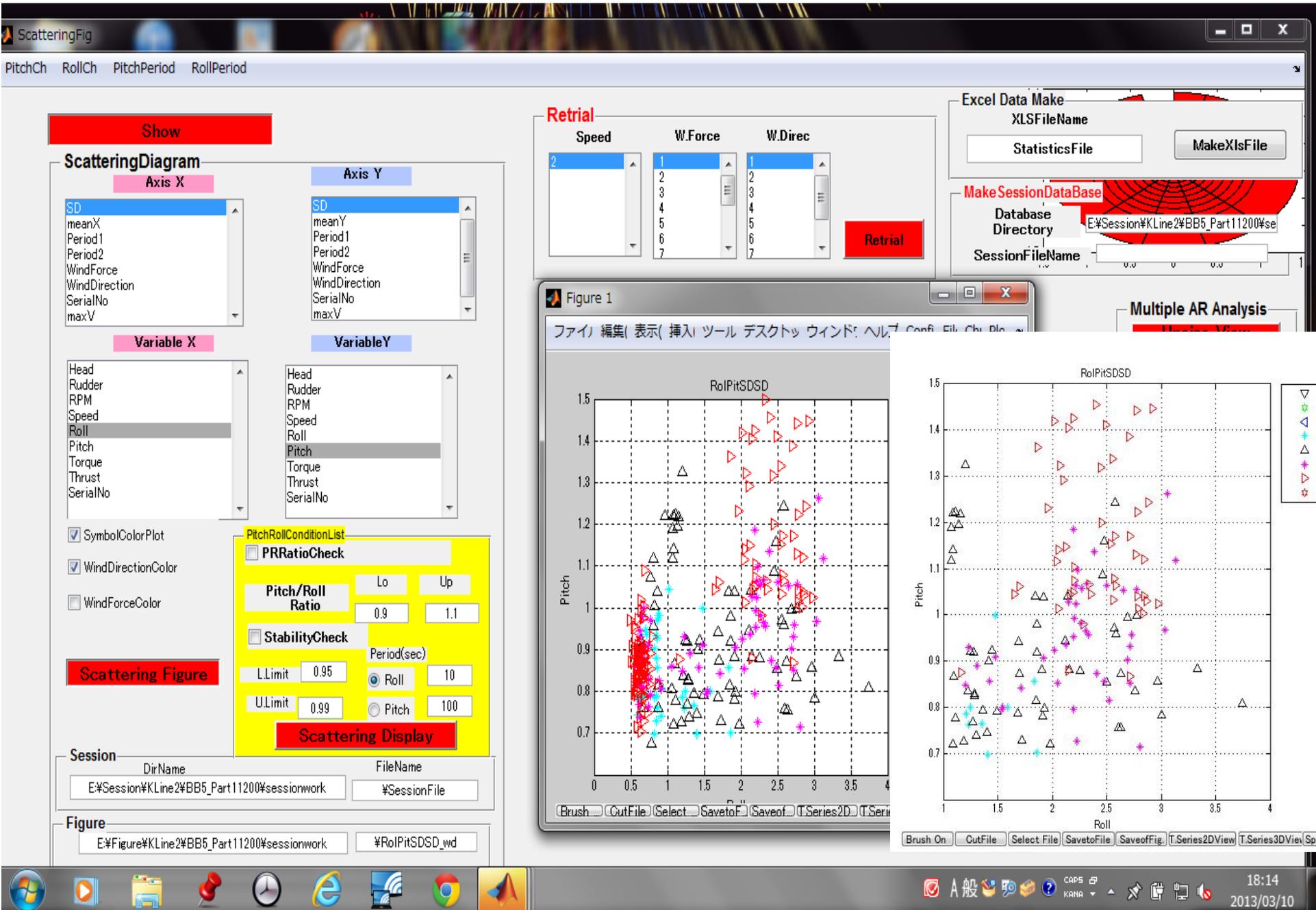
SessionName sessionwork

Count Make Session DataBase

統計モデル同定画面

会話型プログラムパッケージ Marine Statistcaの構造





Show

ScatteringDiagram

Axis X

- SD
- meanX
- Period1
- Period2
- WindForce
- WindDirection
- SerialNo
- maxV

Axis Y

- SD
- meanY
- Period1
- Period2
- WindForce
- WindDirection
- SerialNo
- maxV

Variable X

- Head
- Rudder
- RPM
- Speed
- Roll
- Pitch
- Torque
- Thrust
- SerialNo

Variable Y

- Head
- Rudder
- RPM
- Speed
- Roll
- Pitch
- Torque
- Thrust
- SerialNo

SymbolColorPlot

WindDirectionColor

WindForceColor

Scattering Figure

PitchRollConditionList

PRRatioCheck

Pitch/Roll Ratio

Lo

Up

0.9

1.1

StabilityCheck

Period(sec)

LLimit

0.95

Roll

10

ULimit

0.99

Pitch

100

Scattering Display

Session

DirName

E:\Session\KLine2\BB5_Part11200\sessionwork

FileName

%SessionFile

Figure

E:\Figure\KLine2\BB5_Part11200\sessionwork

%RoIPitSDSD_wd

Retrial

Speed

- 2

W.Force

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

W.Direc

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Retrial

Excel Data Make

XLSFileName

StatisticsFile

MakeXlsFile

MakeSessionDataBase

Database Directory

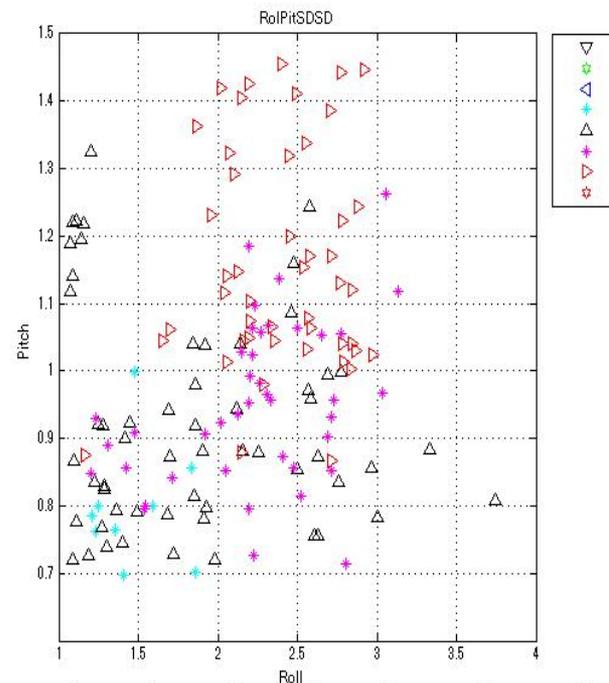
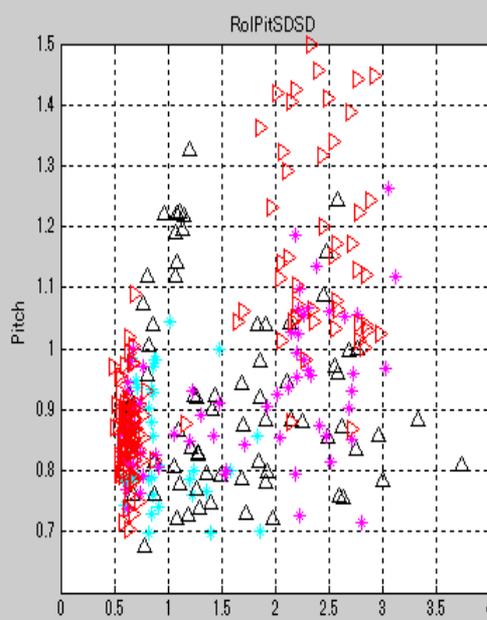
SessionFileName

E:\Session\KLine2\BB5_Part11200\se

Multiple AR Analysis

Figure 1

ファイル 編集 表示 挿入 ツール デスクトップ ウィンドウ ヘルプ Config File Chg Pl...



Brush On CutFile Select File SavetoFile Saveoffig T.Series2DView T.Series3DView Spee

Show

ScatteringDiagram

Axis X

- SD
- meanX
- Period1
- Period2
- WindForce
- WindDirection
- SerialNo
- maxV

Axis Y

- SD
- meanY
- Period1
- Period2
- WindForce
- WindDirection
- SerialNo
- maxV

Variable X

- Head
- Rudder
- RPM
- Speed
- Roll
- Pitch
- Torque
- Thrust
- SerialNo

Variable Y

- Head
- Rudder
- RPM
- Speed
- Roll
- Pitch
- Torque
- Thrust
- SerialNo

SymbolColorPlot

WindDirectionColor

WindForceColor

Scattering Figure

PitchRollConditionList

PRRatioCheck

Pitch/Roll Ratio: Lo 0.9 Up 1.1

StabilityCheck

Period(sec): Roll 10 Pitch 100

LLimit 0.95 ULimit 0.99

Scattering Display

Session

DirName

F:\Session\KLine2\BB5_Part11200\sessionwork

FileName

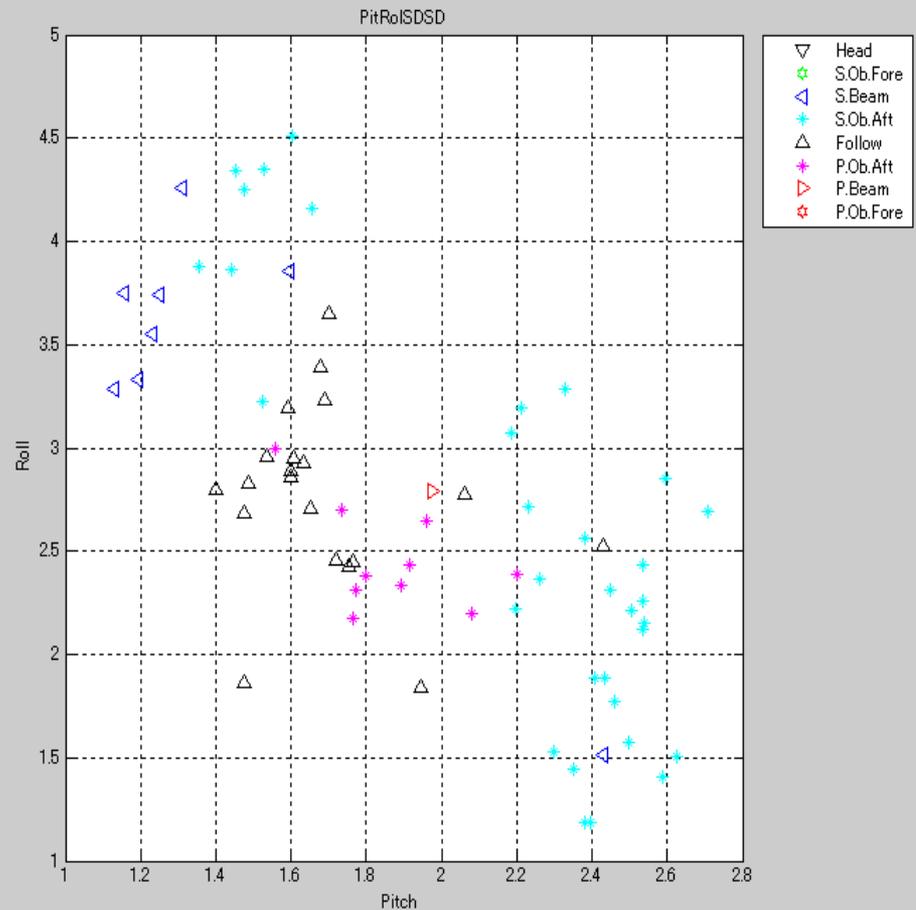
%SessionFile

Figure

F:\Figure\KLine2\BB5_Part11200\sessionwork\SD

%PitRoISDSD_wd

Figure 1



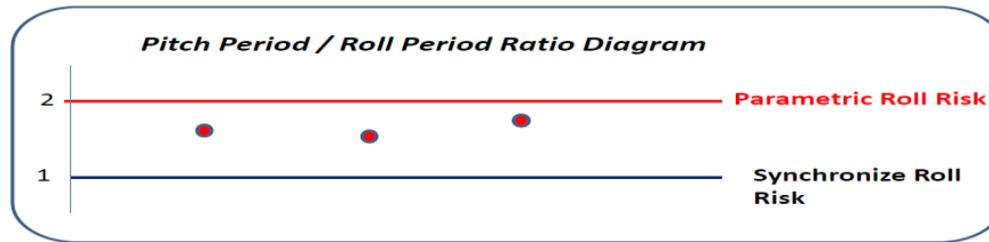
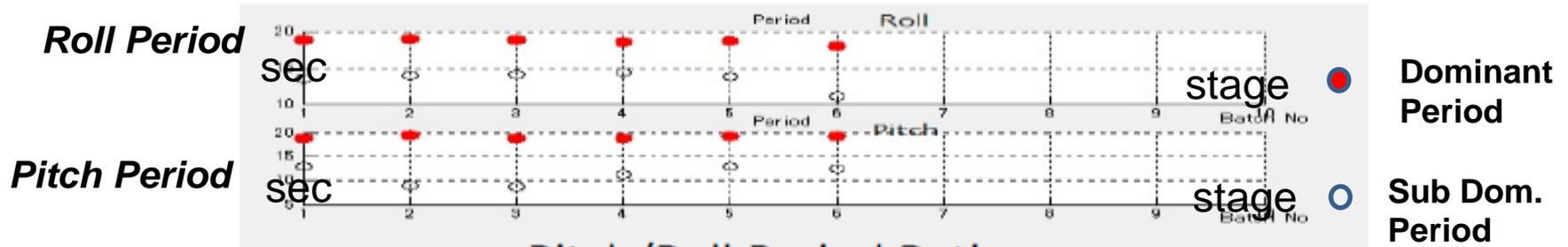
Program Package **Marine Statistica**

The screenshot shows the 'ClassificationFig' software interface with the following components and callouts:

- 1**: Points to the **Initial Set** panel, which includes options for 'OriginalDataInput', 'BatchDataInput', 'DataFormat', and 'Volume'.
- 2**: Points to the **DataBaseDirectory** and **DataBaseSelection** panels, which allow for selecting data files and databases.
- 3**: Points to the **Original Data Input** panel, which includes fields for 'Start Time(sec)', 'End Time(sec)', 'New Samp.Rate(sec)', 'Total Data Length', and 'Batch Data Length'.
- 4**: Points to the **BatchData Input** panel, which includes fields for 'New Samp.Rate(sec)', 'Batch Data Length(pts)', and 'Session Name'.
- 5**: Points to the **Model Input Cotroller** panel, which includes 'Total File Nr', 'SampleT', and options for file selection like 'AllFiles' and 'Random Choice'.
- 6**: Points to the **Functions** panel, specifically the **Dataviewer** section with buttons for 'LongDataViewer', 'BatchData Viewer', and 'TotalModels&Figures Maker'.
- 7**: Points to the **Viewers** section, including 'ARmodeView(ARFig6)' and 'MARmodeView(MARFig5.1)'.
- 8**: Points to the 'SARclusterView' and 'MARclusterView' buttons.
- 9**: Points to the **File Information** panel, which displays 'Original' and 'Selected' data statistics such as 'Channel Nr.', 'Original Samp. Rate', 'Total Data', and 'Total Time Length'.
- 10**: Points to the **ClassificationViewer** button at the bottom of the interface.

Marine Statisticaの出力例

横揺:縦揺リスク

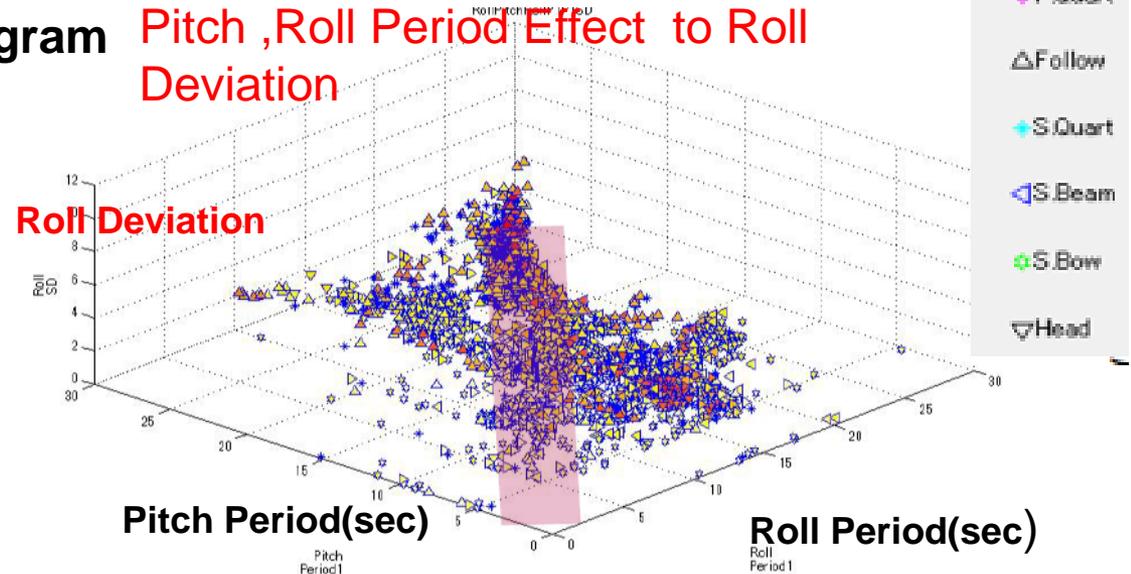
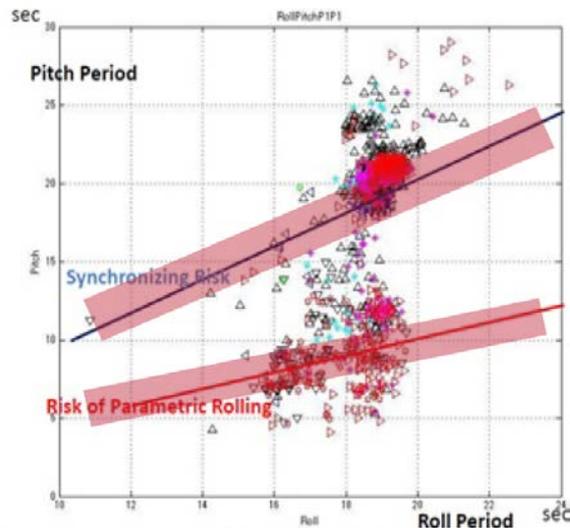


Wind Direction

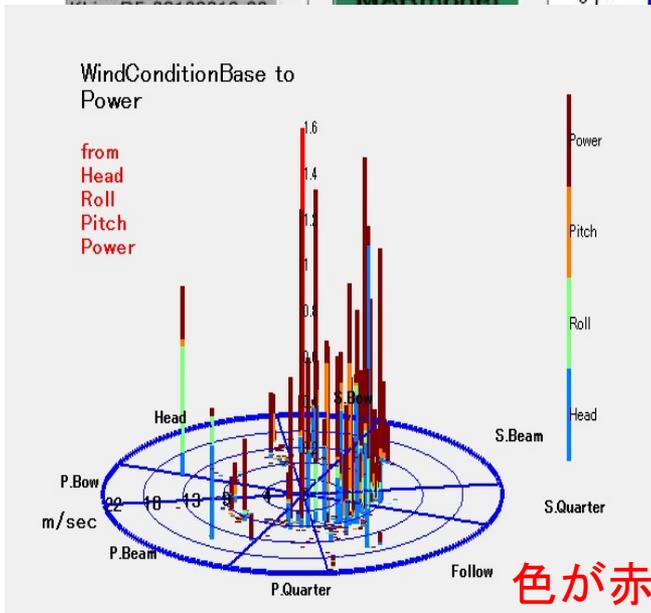
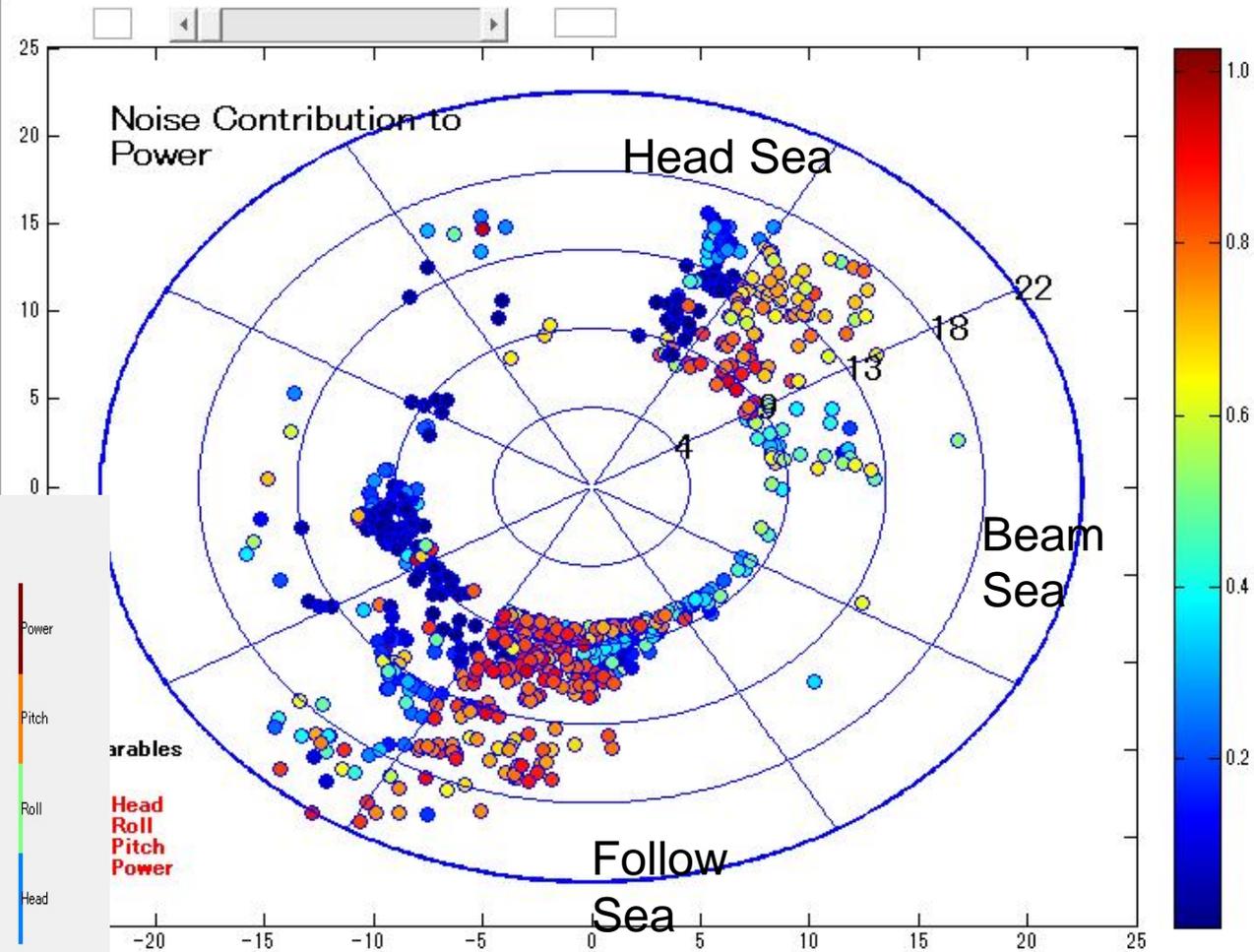
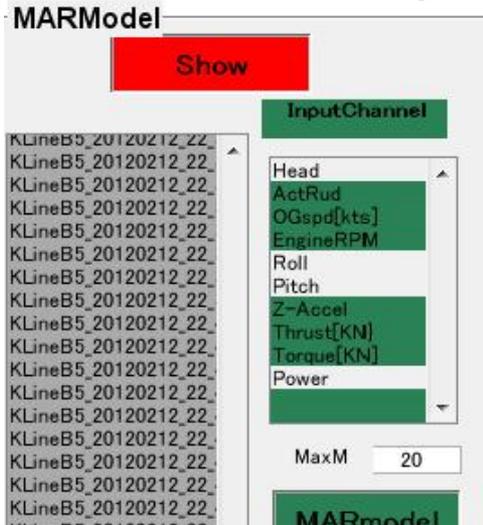
- ⊗ P.Bow
- ▷ P.Beam
- ⊕ P.Quart
- △ Follow
- ⊕ S.Quart
- ◁ S.Beam
- ⊕ S.Bow
- ▽ Head

Roll ,Pitch Period Scattering Diagram

Pitch ,Roll Period Effect to Roll Deviation



Marine Statisticaの出力例： 風向による機関出力への他の運動からの影響表示



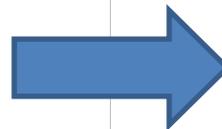
色が赤に近づくほど他の運動影響が強い

追い波、斜め船首波において機関出力は船体運動の影響を大きく受ける

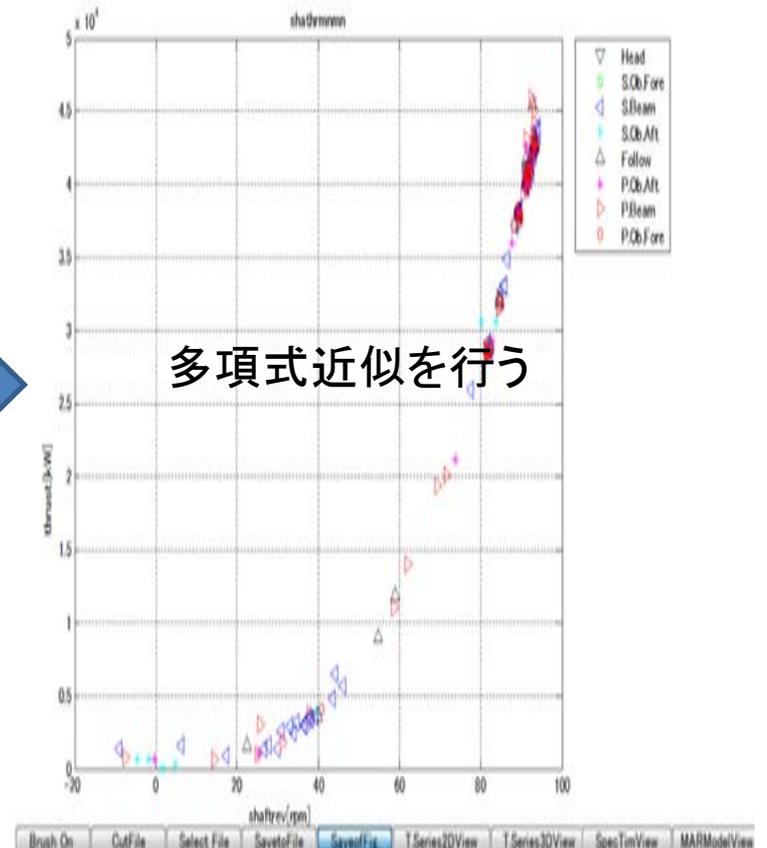
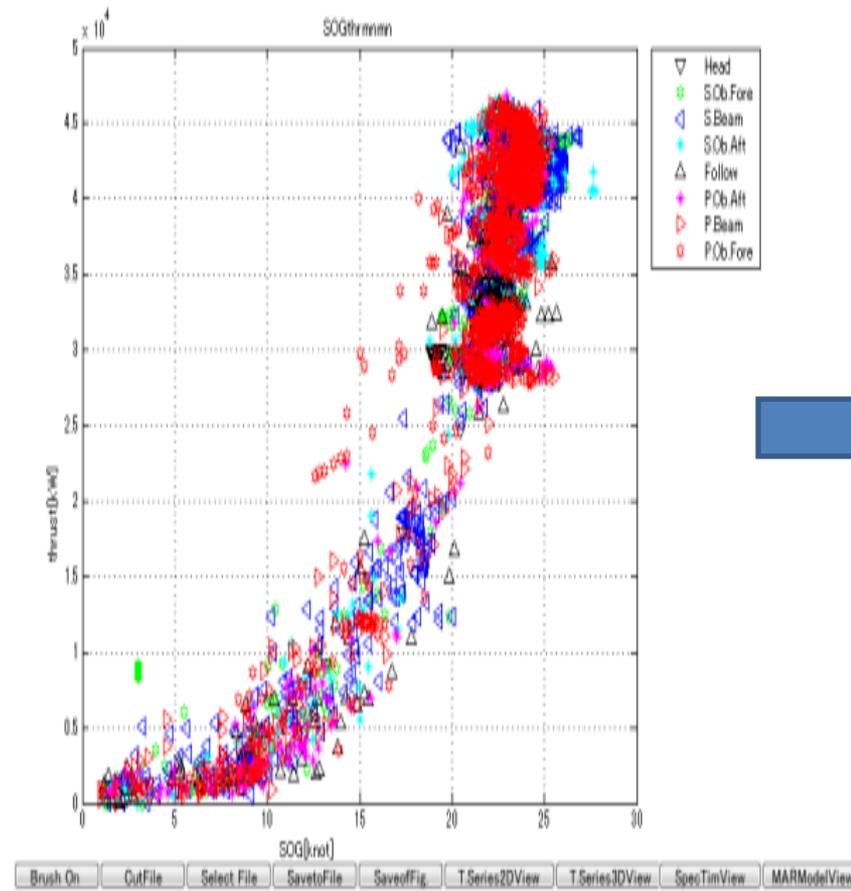
平水中の性能曲線を得る方法

全データ

平水中



多項式近似を行う



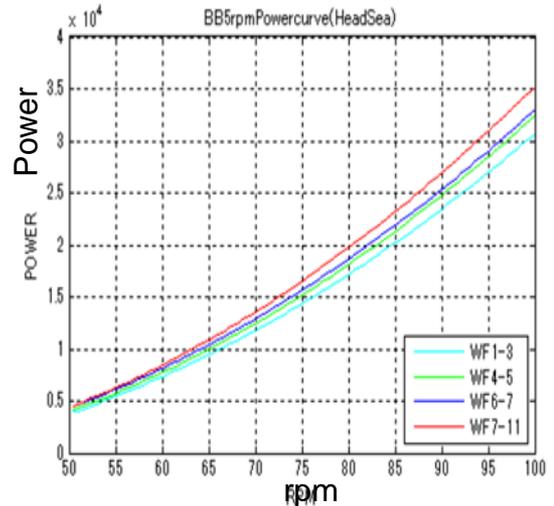
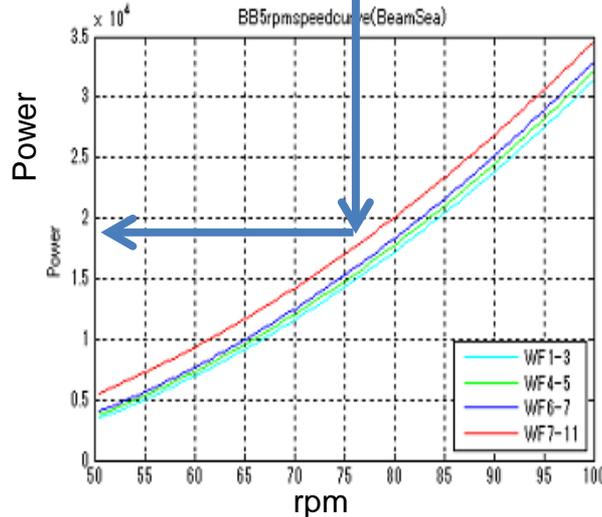
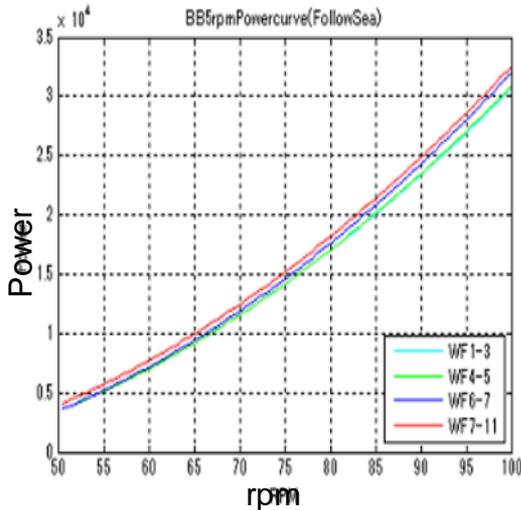
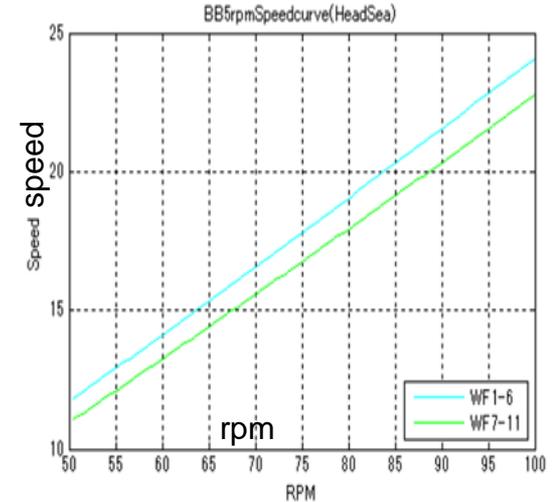
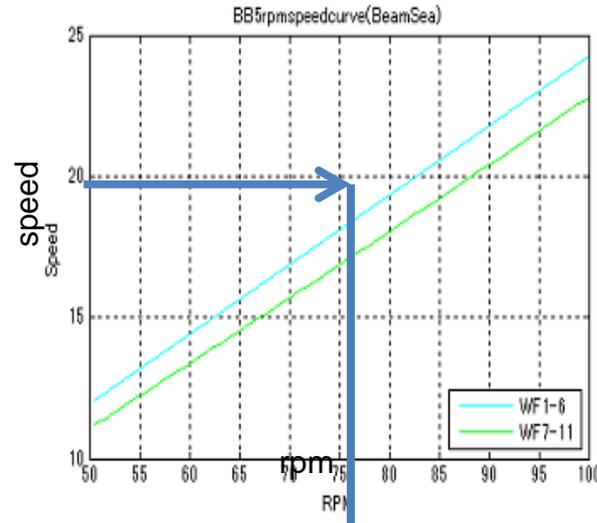
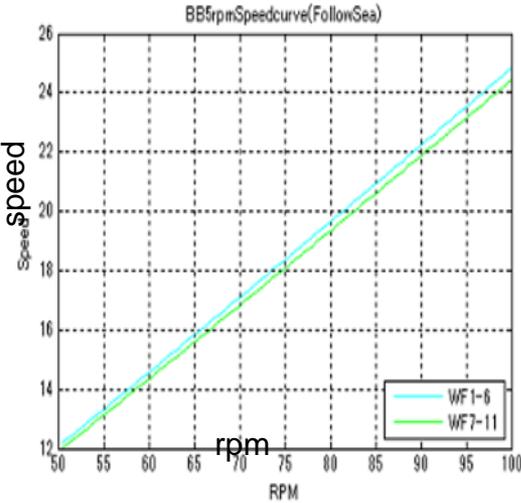
Marine Statisticalによる Speed – RPM – Engine Power Curve の作成例

成果: 希望する速力に対応する回転数を風向別に求めることが可能

Follow Sea

Beam Sea

Head Sea

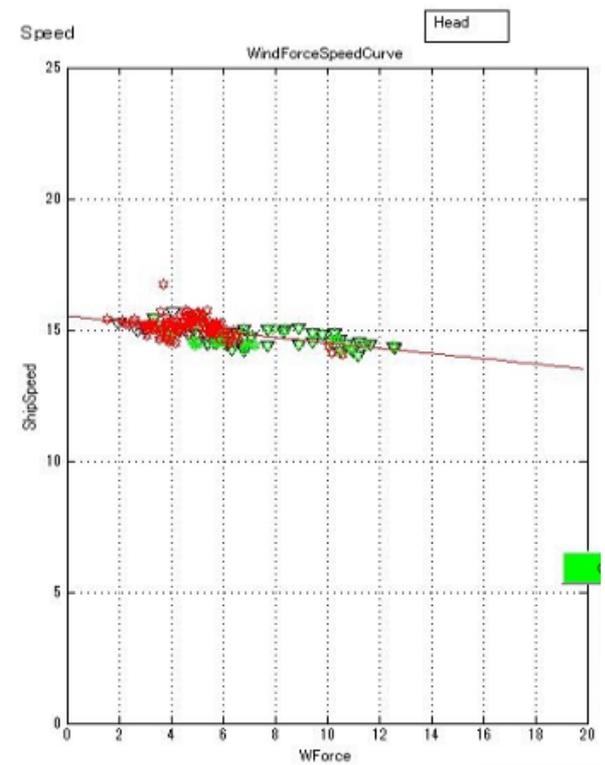
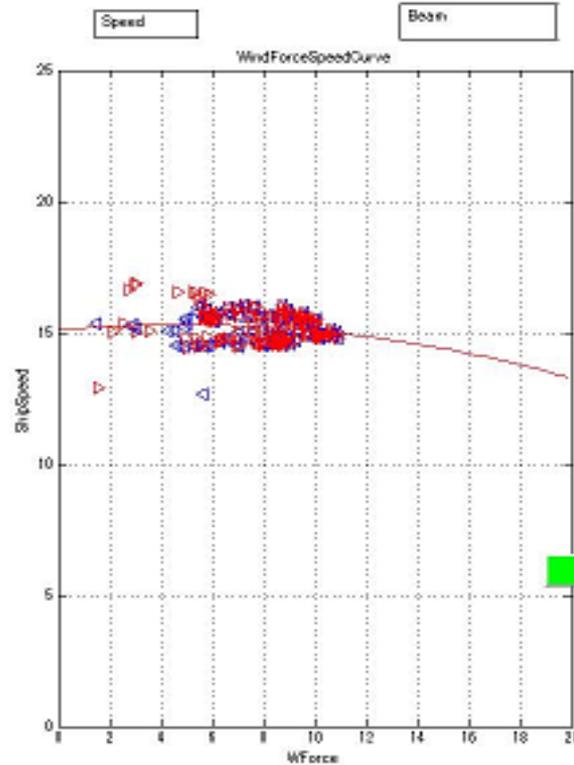
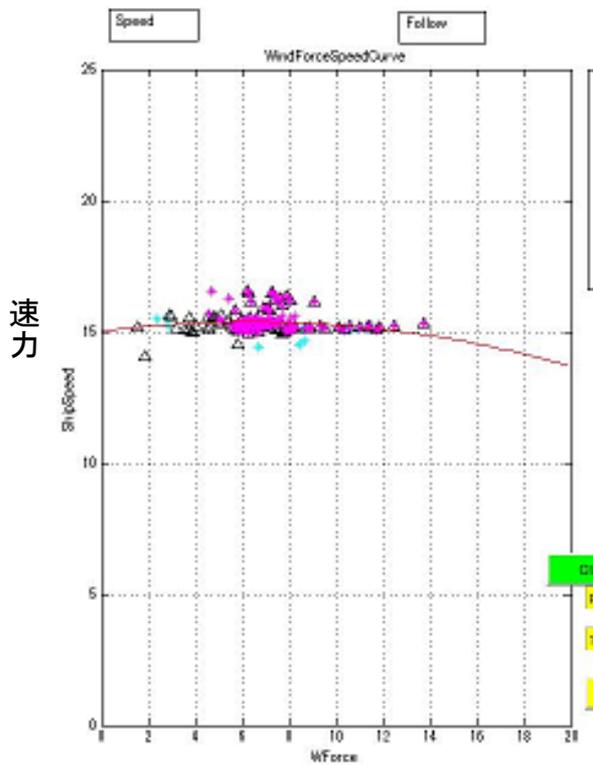


風力、風向と速力低下

Follow Sea

Beam Sea

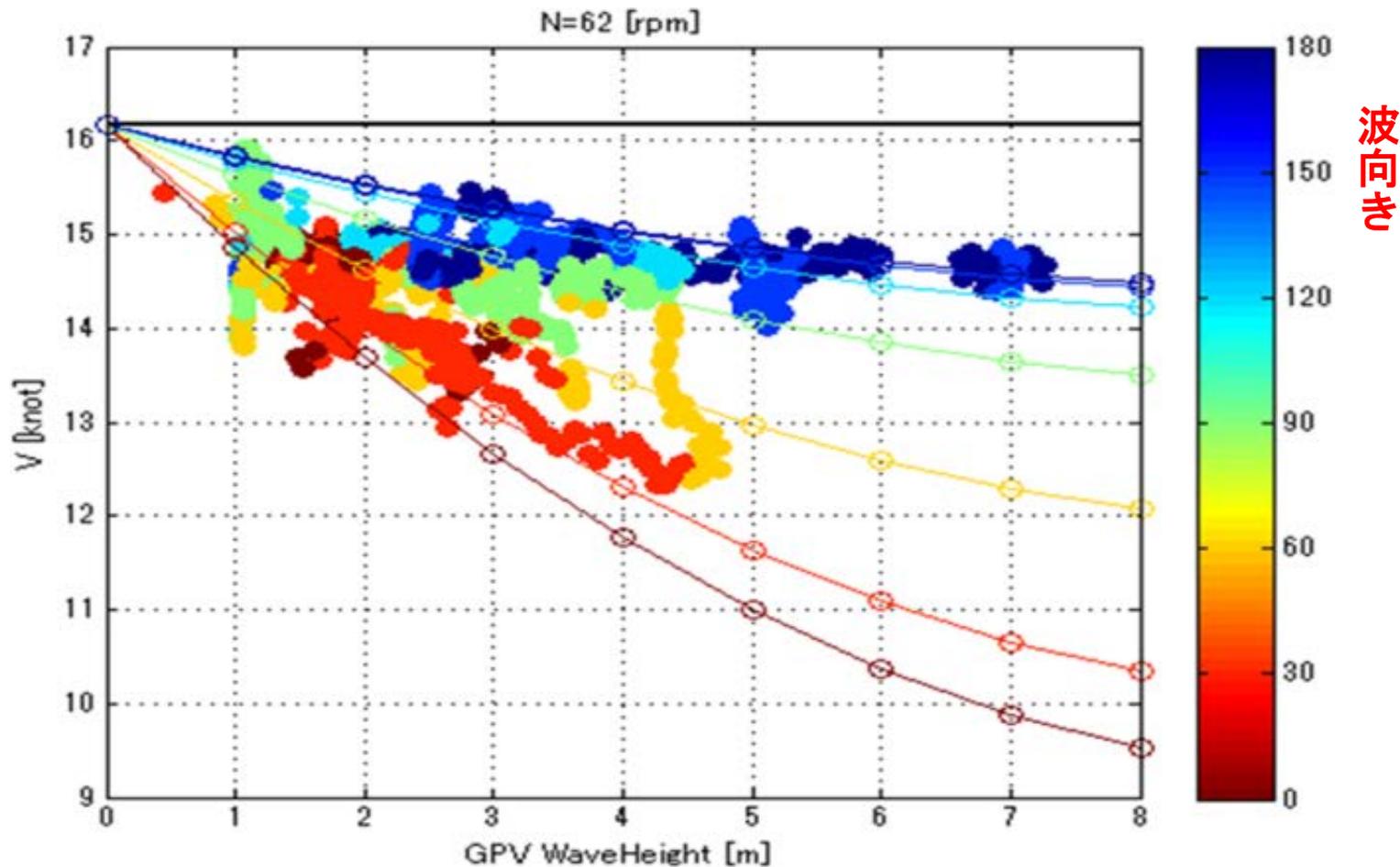
Head Sea



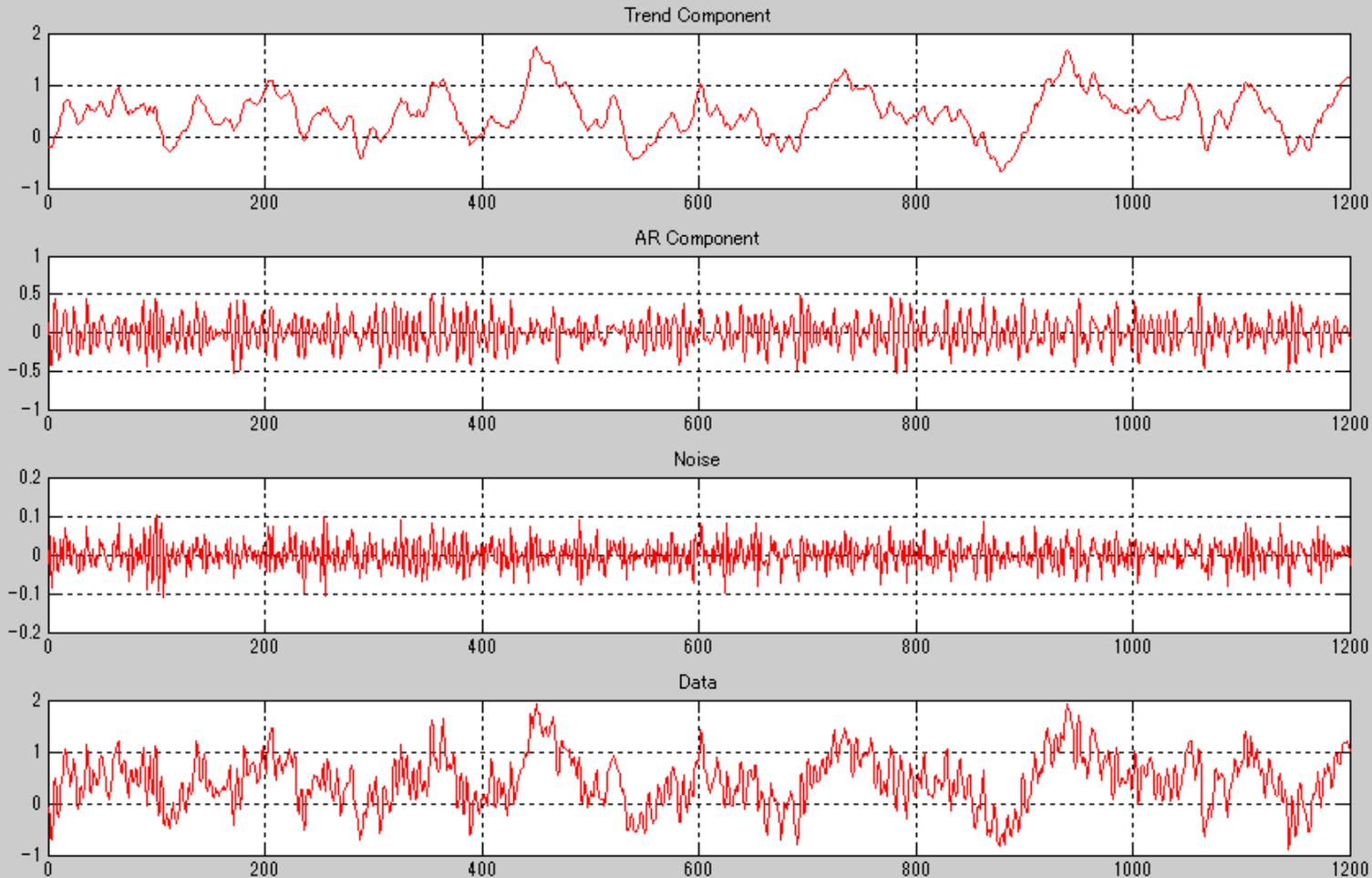
風力

波高と速力の関係

Weather Routing への応用



横揺のトレンド、定常成分分解



トレンド成分

+

定常成分

+

雑音成分



実際の横揺れ

まとめ

目的1 実時間船体・機関性能監視予測機能の開発

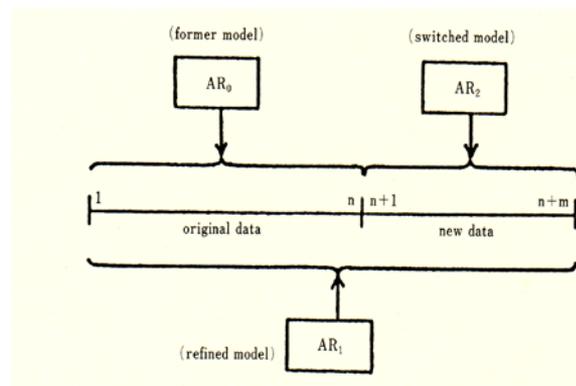
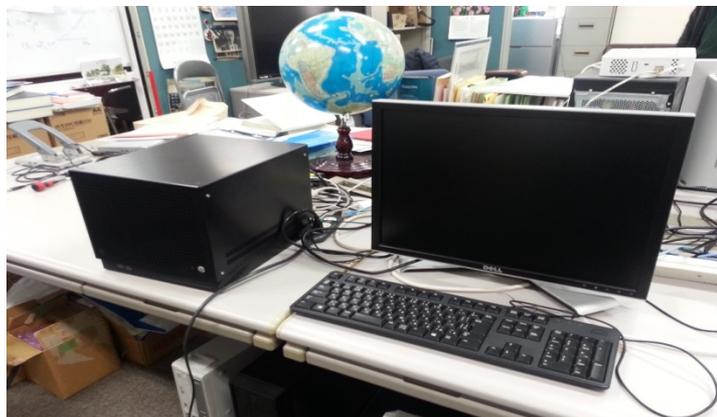
開発方針1 : 実船実験結果をもとに設計方針を検討する。

結果 : ブルックリンブリッジ(B号)号、今治造船バルカー、高速内航フェリー、内航コンテナ船のデータ他を用い、ヒアリング、解析等を行い表示項目を決定した

開発方針2 : 開発方針1に基づき実機プロトタイプを作成する。

結果1 : 写真のような外観のプロトタイプを作成しB号にて試験を行った。

結果2 : 今治造船建造の**2隻のバルカーに搭載試験が決まった。**



まとめ

目的2 中長期状態監視データベースの構築と 会話型プログラムパッケージの開発

開発方針1 : 船載システム内に20分、1時間、4時間、1日、全航海のデータ および統計モデルのデータベースを作る

結果 : 船載システム内に保存し表形式で表示する機能を開発した

開発方針2 : 船と陸上を結ぶ船陸間通信システムを確立する

結果 : 船陸間ブロードバンド通信システムを開発し、1日一回のデータ通信を確立した。

開発方針3 : MATLAB言語を駆使して
会話型統計処理パッケージを構築作成する

結果 : 船舶データ解析用会話型プログラムパッケージ「Marine Statistica」を開発した

評価、出版、講演等

代表的評価

ブルックリンブリッジ号：機関長

機関室にて航海中良く見ている。機関曲線上にプロットされ便利で、トルクリッチ等の監視に良い。

同号：船長、一等航海士：特に横揺、縦揺周期の関係でどのような現象があるか知りたい。次航から船橋にて無線LAN経由で表示したい。

川崎汽船シippマネジメント：出力、燃料の20分予測などに興味があり、今治造船と協力して建造中の船舶での追試験を行ってよい。

新日本海フェリー大型フェリー船長：特に冬分のブローチング等による荷崩れ防止などに役立てたい。

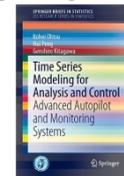
内藤林大阪大学名誉教授、前船舶海洋工学会会長；これまでのモニタリングシステムと違い統計学の成果を駆使した実船データ解析向きの最新のシステムである。

出版

2014年度：「**モデルベースモニタリングシステムと統計的制御**」

船舶海洋工学会出版賞受賞

2015年：ドイツプリンガー社より本プロジェクトの成果を含む、「Time Series Modeling for Analysis and Control, *Advanced Autopilot and Monitoring Systems*」を出版



講演

2015年：船舶海洋工学会運動性能委員会シンポジウムにて本プロジェクト内容講演「**モデルベースモニタリング解析の理論と応用**」