

# 舵効き船速修正と 実船変動トルクの推定

—補助推力装置の活用—

運動性能研究グループ

上野道雄 塚田吉昭 鈴木良介

## ● 曳航試験(拘束試験)

- ・ 所定の船速で模型船を曳航→摩擦修正 **SFC**
- ・ 実船相似の推力となるプロ回転数：**実船自航点 SP(Ship point)**

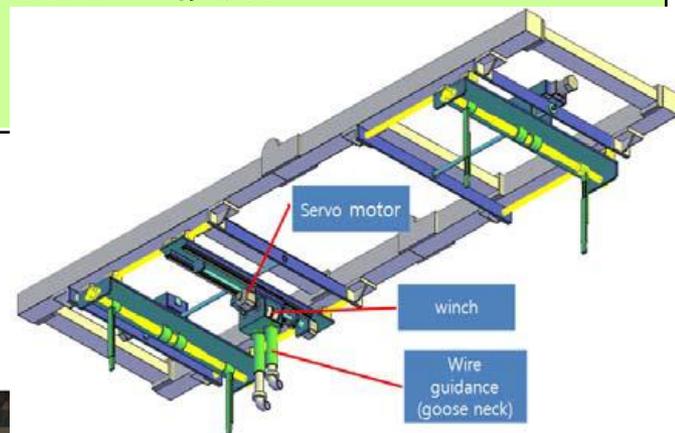
## ● 自由航走試験

- ・ 所定の船速になるプロ回転数：**模型船自航点 MP(Model point)**
- ・ **舵効き**が実船相似にならない  
→ 模型船と実船の**操縦性能**が異なる

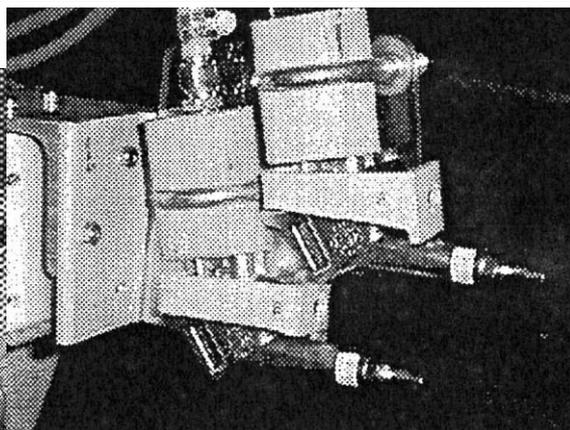
★自由航走模型船にも**補助的な推力**を与えられる方法はないか？

# 「補助推力装置」の例

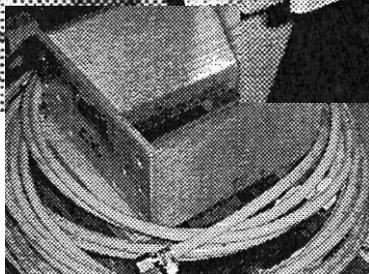
原理	論文著者	問題点？
空中プロペラ	藤井齊(1960)	横風・斜航による空中プロペラ横力発生？
	Crane C.L.他(1989)	
圧縮窒素噴射	小林英一ほか(2000)*	ボンベ大・取扱困難？
XYΨ台車の 計算機制御	Oltmann P.他(1980)	大規模・複雑？
	Son N.S.他(2010)**	



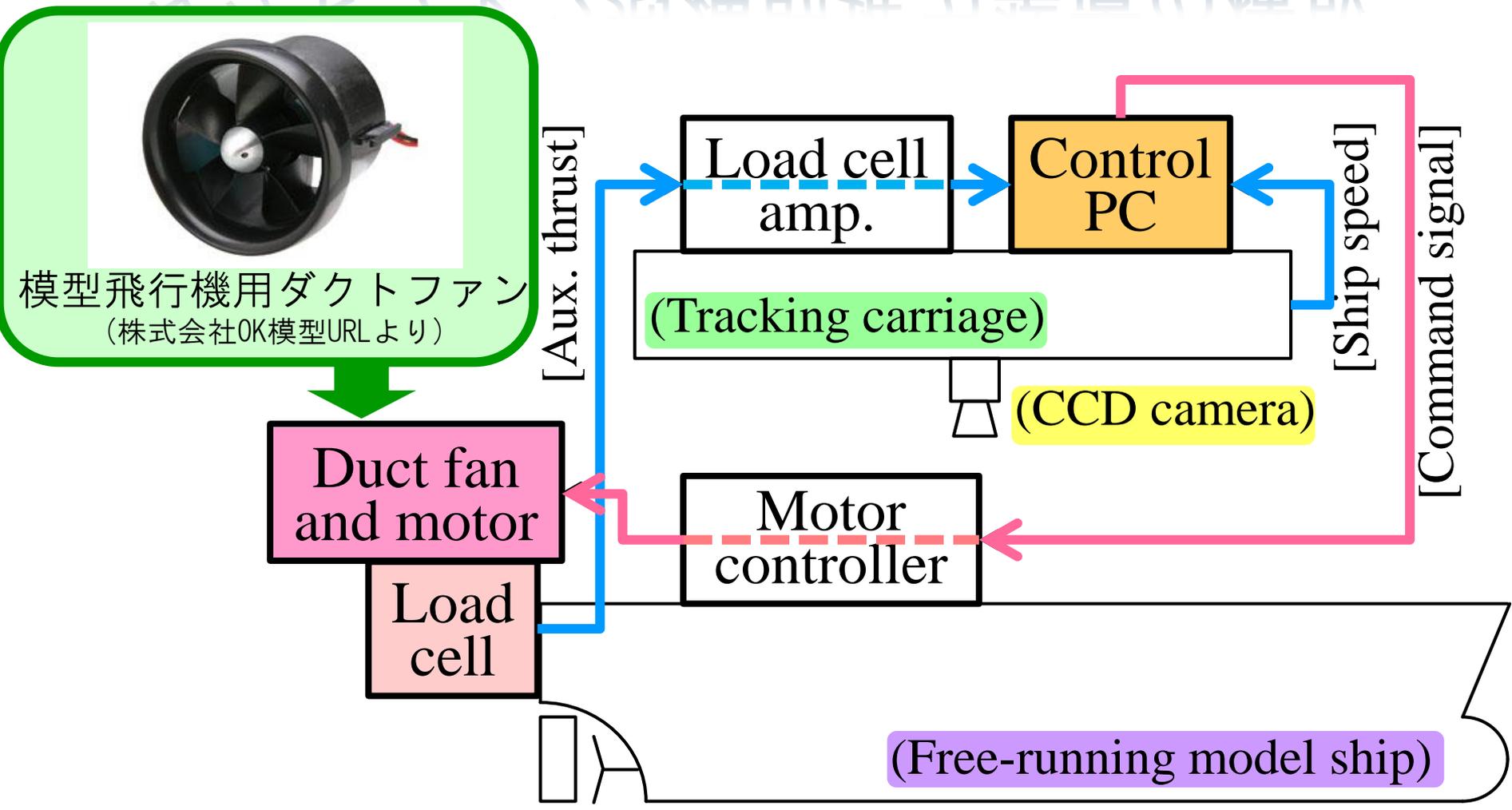
\*\*Son et al. (2010)



\*小林ほか(2000)

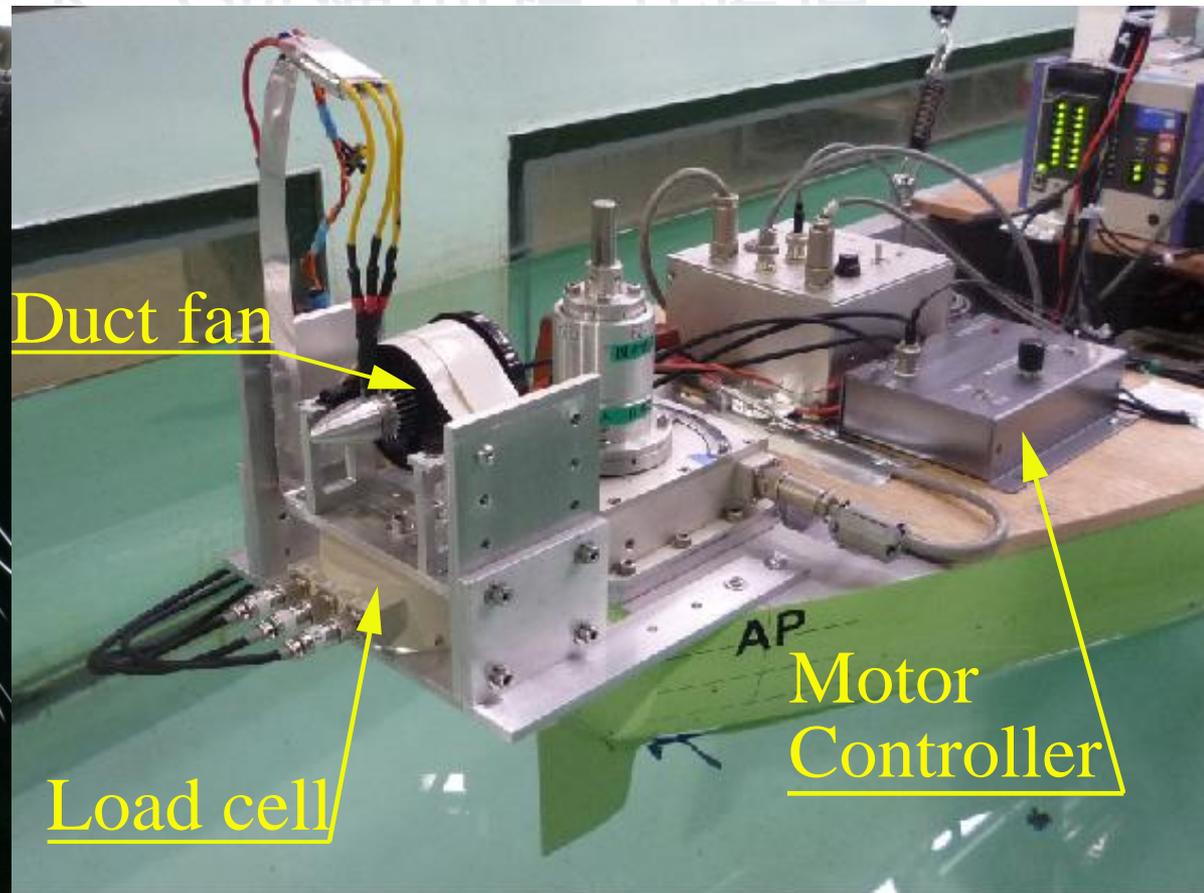
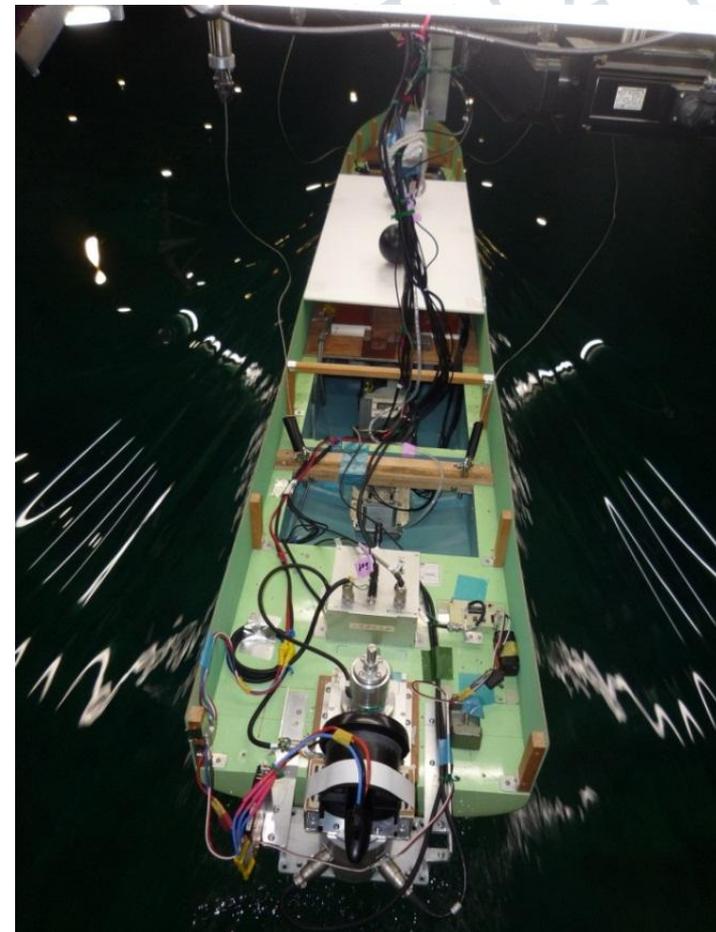


# ダクトファン型補助推力装置の構成



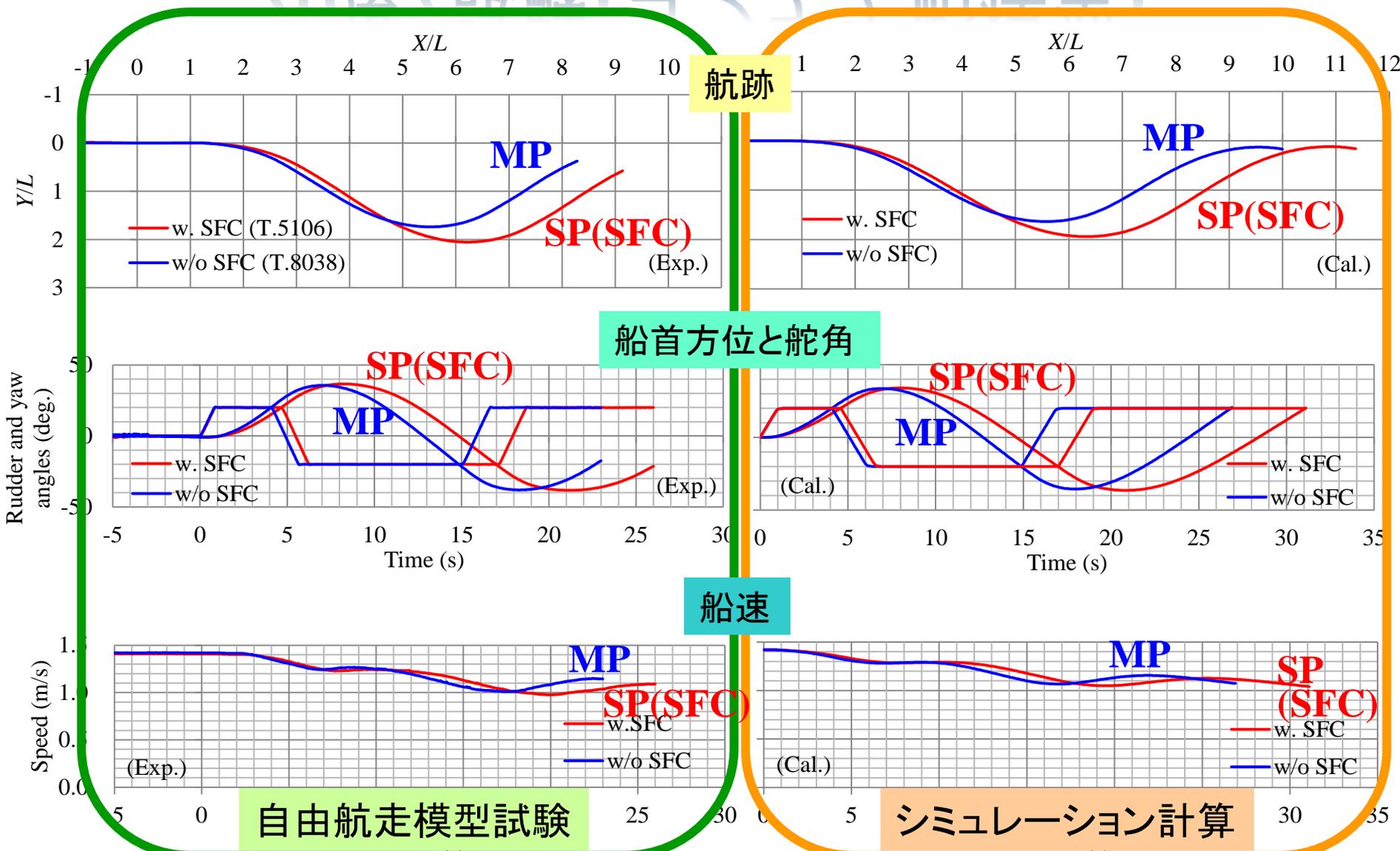
★小型ですべてを模型船上に搭載することも可能  
(船速をフィードバックするには別途検出器が必要)

# ダクトファン型補助推力装置



補助推力装置を搭載した  
模型船（長さ3m）

# 20度Z試験(コンテナ船模型)



— 摩擦修正なし:MP  
 — 摩擦修正あり:SP(SFC)

「プロペラ回転数をこのような値(実船自航点)にしたときの拘束模型船の舵力は実船のそれのほぼ70%程度のものと考えられ実船相当値よりかなり小さい。」

・湯室彰規(1975) IHI技報15-5

“This rate\* need neither coincide with the model self-propulsion point nor with the ship self-propulsion point.”

\* “a propeller rate of revolutions”, “beating scale effects in maneuvering tests in the model tank”

・Oltmann P. et al.(1980)13<sup>th</sup> ONR

摩擦修正では操縦性能は相似にならない!

どうすれば操縦運動を実船相似にできるのか?

# 操縦運動を相似にする条件1

## ● 舵効きを相似にする(舵角 $\delta$ は相似)

1<sup>st</sup>: 舵力( $F_N, F_T$ )で支配的な舵直圧力 $F_N$ を相似にする

2<sup>nd</sup>: 舵有効流入速度 $U_R = (u_R^2 + v_R^2)^{1/2}$ を相似にする

★ 舵有効流入速度の前後成分 $u_R$ を相似にする

$$u_{Rm}' = u_{Rs}' \quad [\text{任意の船速で}]$$

- ・ 無次元で考える。無次元値に'(ダッシュ)を付ける。
- ・ 添字の $m$ で模型船、 $s$ で実船を表す。

$$u_{R*}' = n_*' P' q_* \quad (n_*', \text{プ回転数}; P', \text{プピッチ})$$

$$q_* = \varepsilon_* \sqrt{\eta \left\{ \frac{P'}{D'} J_* (1 - \kappa_*) + \kappa_* \sqrt{\left(\frac{P'}{D'} J_*\right)^2 + \frac{8}{\pi} \left(\frac{P'}{D'}\right)^2 K_{T*}} \right\}^2 + (1 - \eta) \left(\frac{P'}{D'} J_*\right)^2}$$

( $J$ , プ前進率;  $D'$ , プ直径;  $\eta$ , 舵高さ比;  $\varepsilon$ , 舵位置の伴流係数比;  $\kappa$ , プ後流係数)

# 操縦運動を相似にする条件2

## ● 船速応答を相似にする

★ 前後運動方程式の右辺(外力項)を等しくする

$$(1 - t_m)T'_m + T'_A - R'_m = (1 - t_s)T'_s - R'_s$$

( $T$ , プ推力;  $R$ , 抵抗;  $T_A$ , 補助推力)

$$T'_A = f_{TA} T'_{SFC} \quad (f_{TA}; \text{補助推力係数})$$

$$\begin{aligned} T'_{SFC} &= R'_m - R'_s \\ &= \frac{1}{2} S' u'^2 \left\{ (1 + k) \left( C_{F0m}(R_{nm}) \right) - C_{F0s}(R_{ns}) \right\} - \Delta C_F \end{aligned}$$

$$(1 - t_m)T'_m + (1 - f_{TA})T'_{SFC} = (1 - t_s)T'_s$$

[任意の船速で]

$$T'_* = n_*'^2 D'^4 K_{T*}(J_*)$$

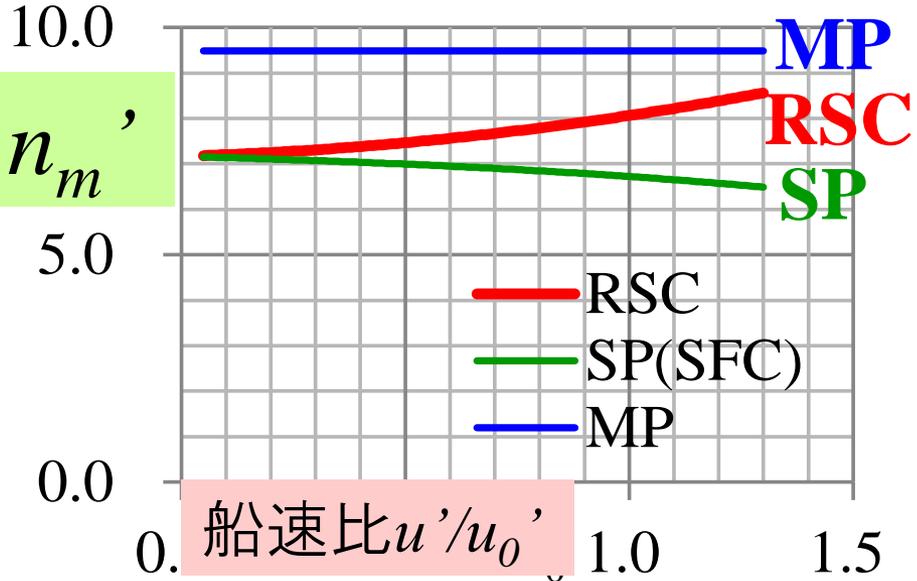
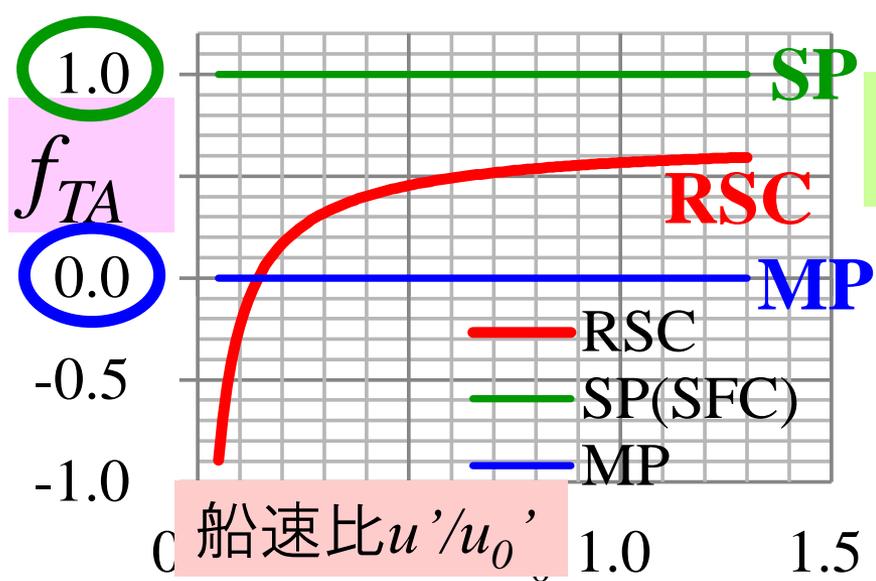
参考： $f_{TA}=1$ は摩擦修正

# 舵効き船速修正(RSC\*)の連立方程式

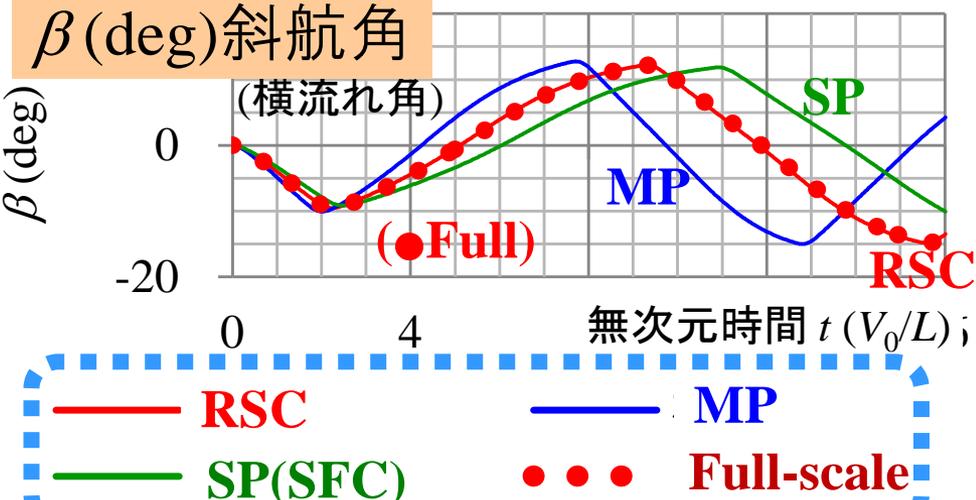
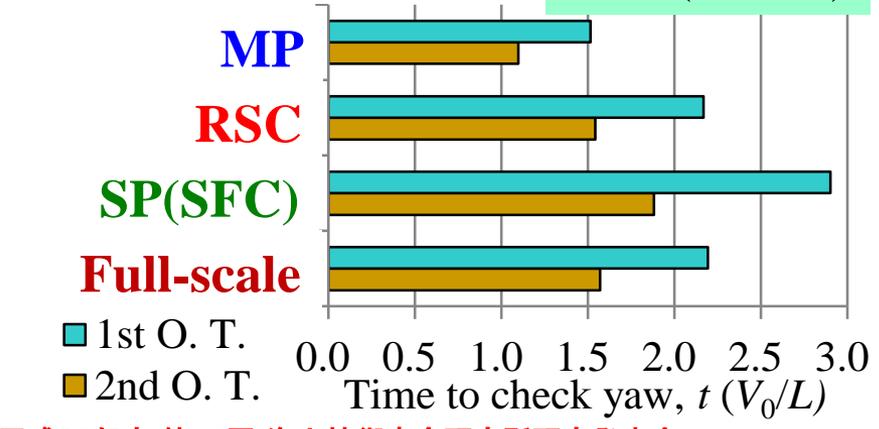
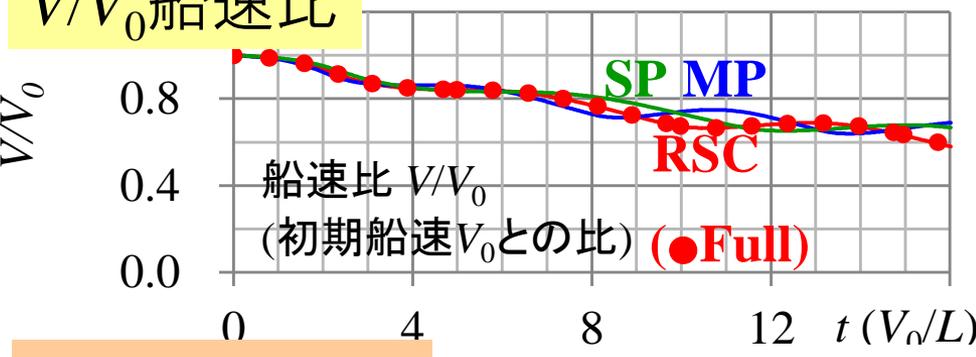
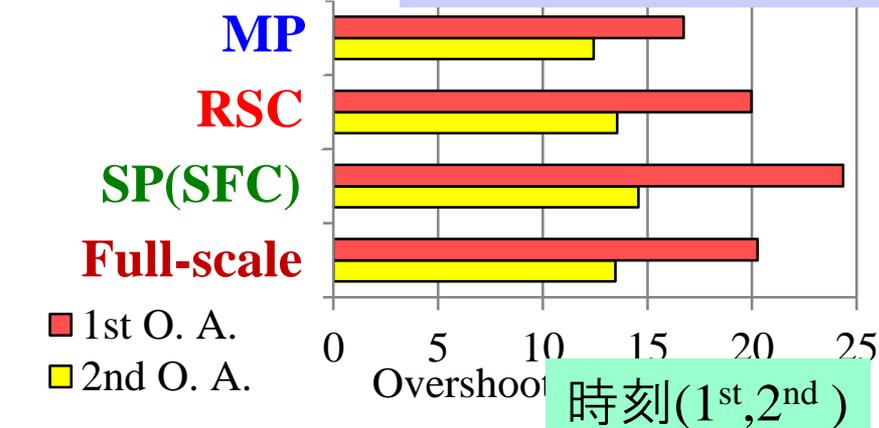
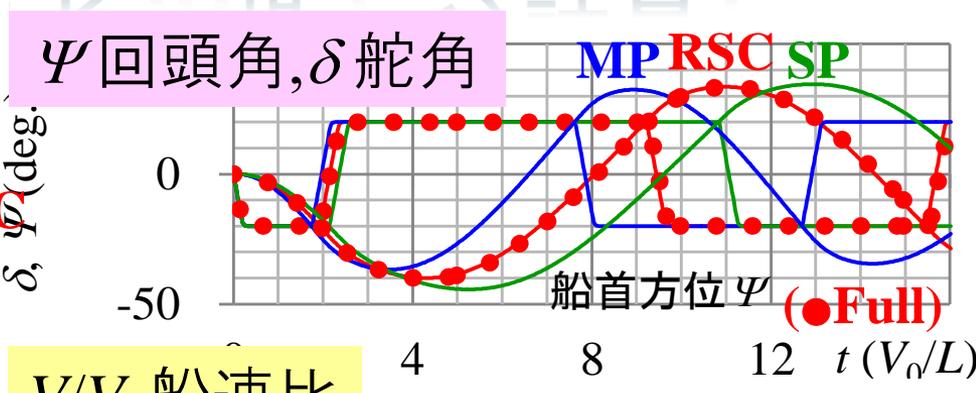
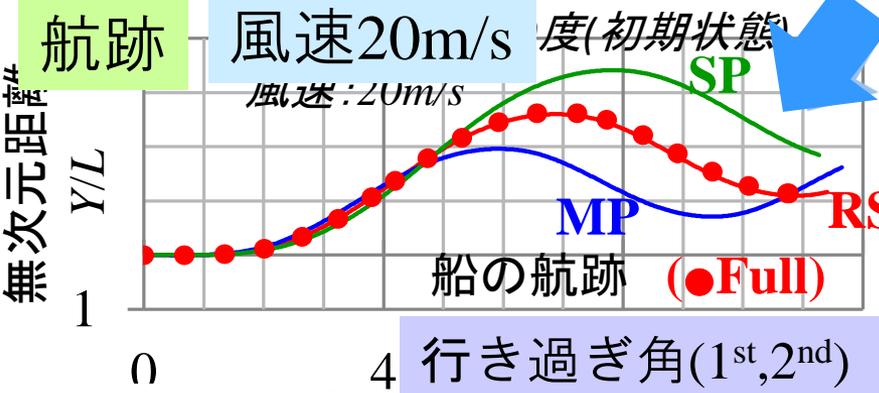
$$\begin{cases} u'_{Rm} = u'_{Rs} & \text{*Rudder-effectiveness and Speed Correction} \\ (1 - t_m)T'_m + (1 - f_{TA})T'_{SFC} = (1 - t_s)T'_s \end{cases}$$

実船条件： $n_s'$ が与えられたとき、  
未知数： $n_m'$ ,  $f_{TA}$ を任意の $u'$ について解

●  $n_s' = 7.16$  ( $u_0 = 15.5kt$ 相当)一定のときの解



# RSCの検証(風圧下20度Z,シ計算)





# 補助推力装置・舵効き船速修正の活用

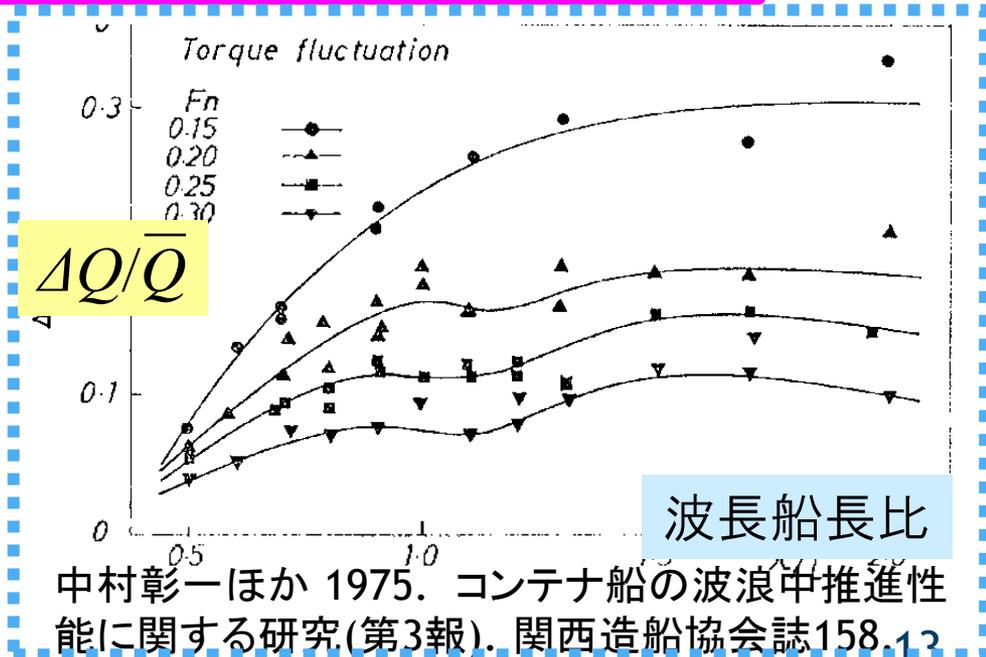
● 舵効き船速修正(RSC)... 舵効きと船速応答の相似  
平水中・外乱下の操縦運動の相似の実現

○ 摩擦修正(SFC)... プロペラ推力(荷重度)の相似  
平水中定常直進時の実船馬力(トルク・推力)の推定

★ 外乱下で 非定常操縦運動中の  
実船の変動トルクを推定できないか？

自由航走試験  
→ 模型船自航点での船体運動  
は実船相似ではない！

曳航・自走試験  
→ 模型船変動トルクなどの計  
測値は実船相似か？



$\tilde{A}'$  : 低周波数成分[上に~]

(船速・斜航角・回頭角速度などのゆっくりした変動)

$\Delta A'$  : 高周波数成分[前に $\Delta$ ](出会波周期で変動)

## ①外乱下での船体運動の相似性確保 舵効き船速修正(RSC)

★仮定：プ回転数の高周波数変動は船体運動に影響しない\*

\*北川泰士ほか：JASNAOE講演会15, 2012.

・ 想定実船のプ回転数と船速の低周波数成分  
( $\tilde{n}_s'$ と $\tilde{u}'$ )に基づく制御 ( $u' = \tilde{u}' + \Delta u'$ )

$$\begin{cases} f_{TA} = \tilde{f}_{TA} \\ n_m' = \tilde{n}_m' \end{cases} \quad \begin{array}{l} \star \text{模型プ回転数と補助推力} \\ \text{は低周波数成分のみで制御} \end{array}$$

## ② 模型プ有効流入速度 $u_{Pm}'$ とその波成分 $\Delta u_w'$

★ 仮定：波浪中でも推力・トルク一致法が有効\*

\*Ueno M. et al, JMST, 18-3, 2013.

$$\begin{cases} Q_m' = K_{Qm} \Big|_{J_m} \tilde{n}_m'^2 D'^5 \\ (1-t_m)T_m' + T_A' - R_m' = (1-t_s)T_s' - R_s' \end{cases}$$

$$\begin{aligned} u_{Pm}' &= \tilde{u}_{Pm}' + \Delta u_{Pm}' \\ &= (1 - w_m)u' + \Delta u_w' \end{aligned}$$

$$(u' = \tilde{u}' + \Delta u')$$

### ● 波成分 $\Delta u_w'$

$$\Delta u_w' = u_{Pm}' - (1 - \tilde{w}_m)u' \quad 1 - \tilde{w}_m = \tilde{u}_{Pm}' / \tilde{u}'$$

$\Delta u_w'$  の推定値は船尾での波の変形影響を含む

## ③実船のプ有効流入速度 $u_{PS}'$ と変動トルク $Q_s'$

★ 仮定：波成分  $\Delta u_w'$  に尺度影響は無い

$$u_{PS}' = (1 - \widetilde{w}_s)u' + \Delta u_w' \quad (u' = \tilde{u}' + \Delta u')$$

- ・  $u'$  は模型船の計測値(実船相似)
- ・  $1-w_s$  は別途推定されているとする

## ●実船変動トルク $Q_s'$

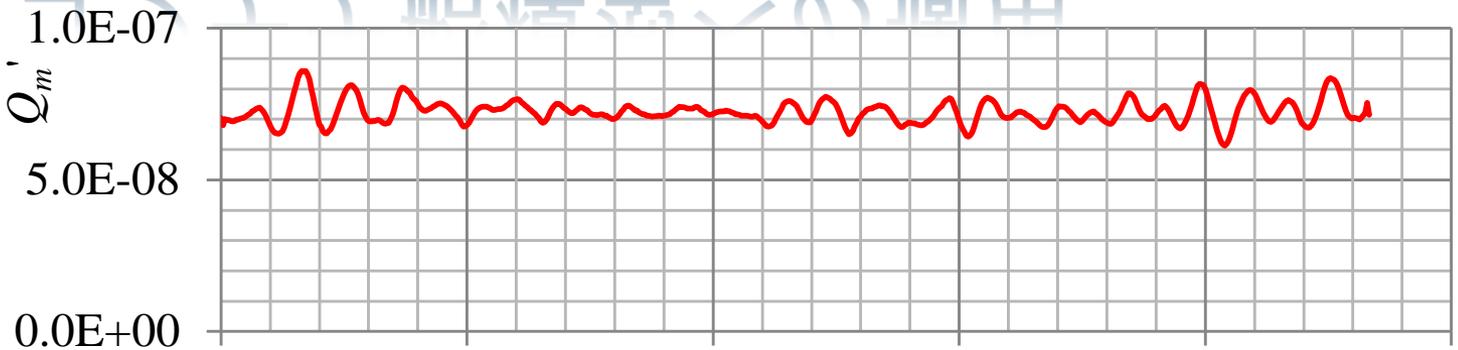
$$J_s = \frac{u_{PS}'}{n_s' D'} \quad n_s' = \widetilde{n}_s' + \Delta n_s \quad \star \text{実船プロペラ回転数 } n_s' \text{ は高周波数成分を含んでよい}$$

$$Q_s' = 2\pi I_a' \dot{n}_s' + K_{Qs} \Big|_{J_s} n_s'^2 D'^5$$

( $I_a'$  : 付加慣性モーメント,  $K_{Qs}$  は別途推定されているとする)

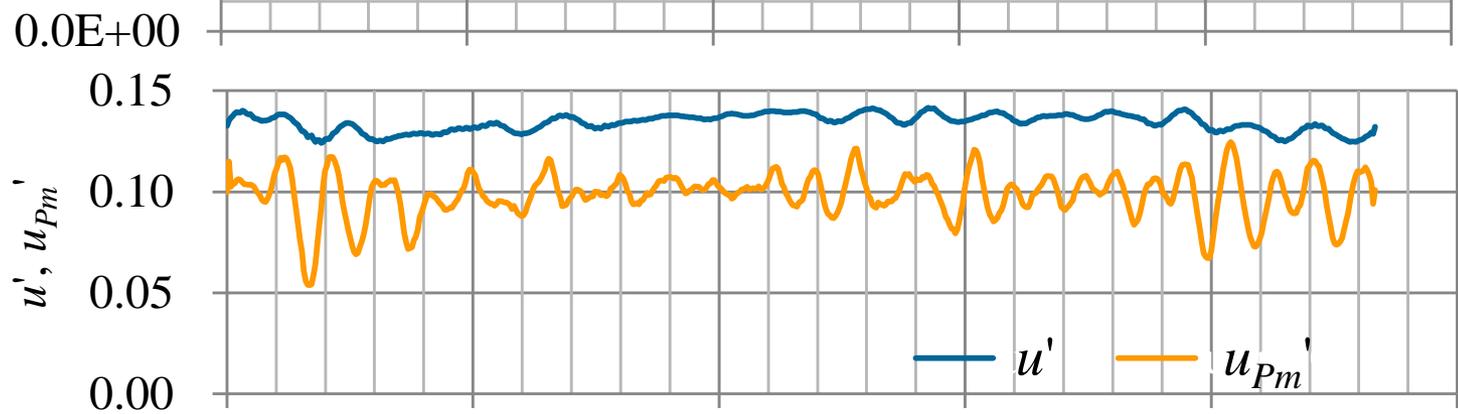
# コンテナ船模型への適用

$Q_m'$  (計測値)



$u'$  (計測値)

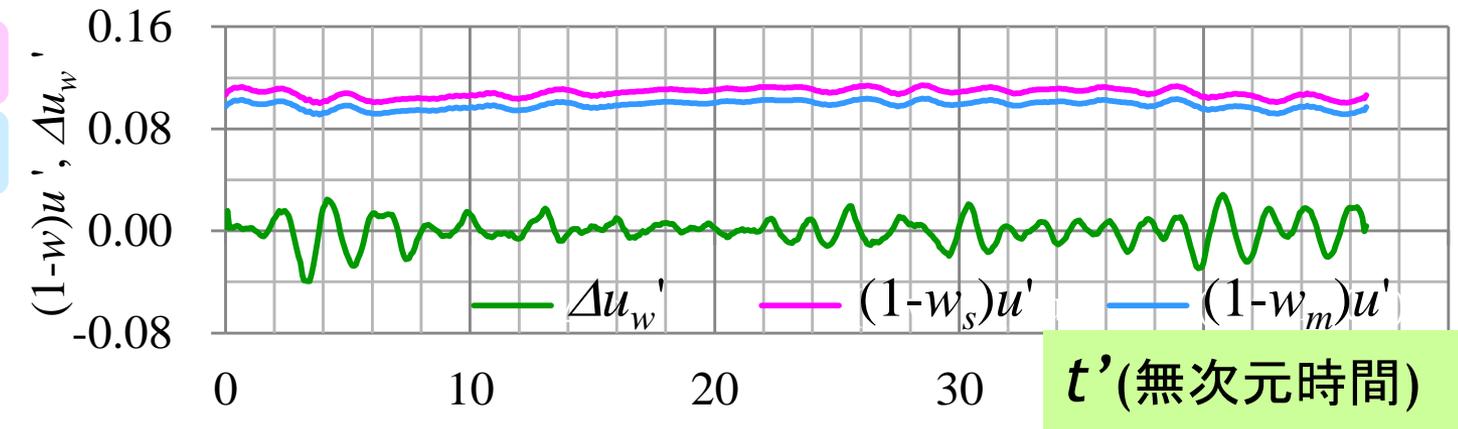
$u_{Pm}'$  (推定値)  
[Q一致法]



$(1-w_s)u'$  (推定値)

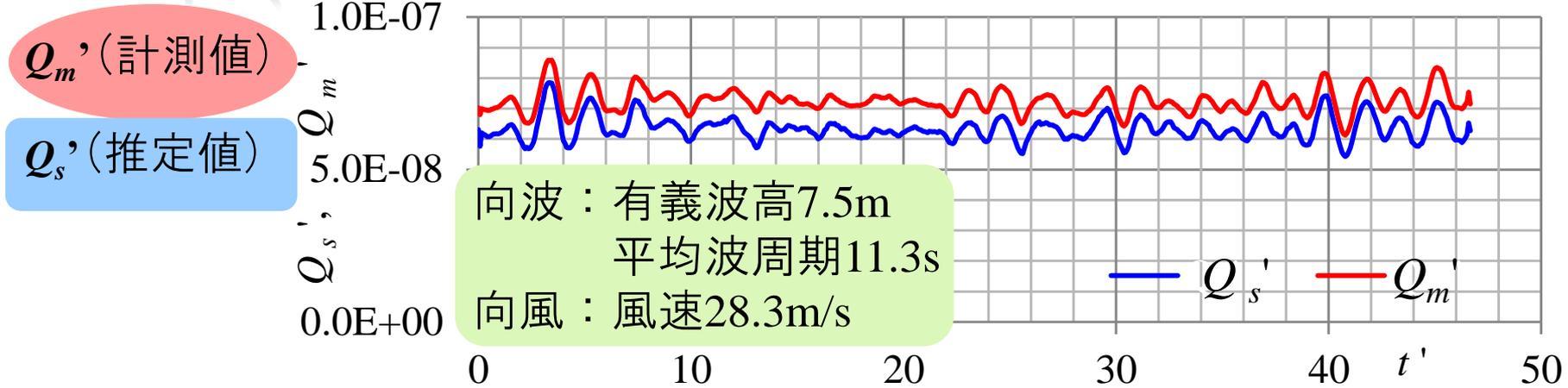
$(1-w_m)u'$  (推定値)

$\Delta u_w'$  (推定値)



不規則正面向波中の実験(補助推力相当の向風を仮想)

# コンテナ船模型への適用( $Q_s'$ の特性)



— 平均値と標準偏差, 実船・模型船比 —

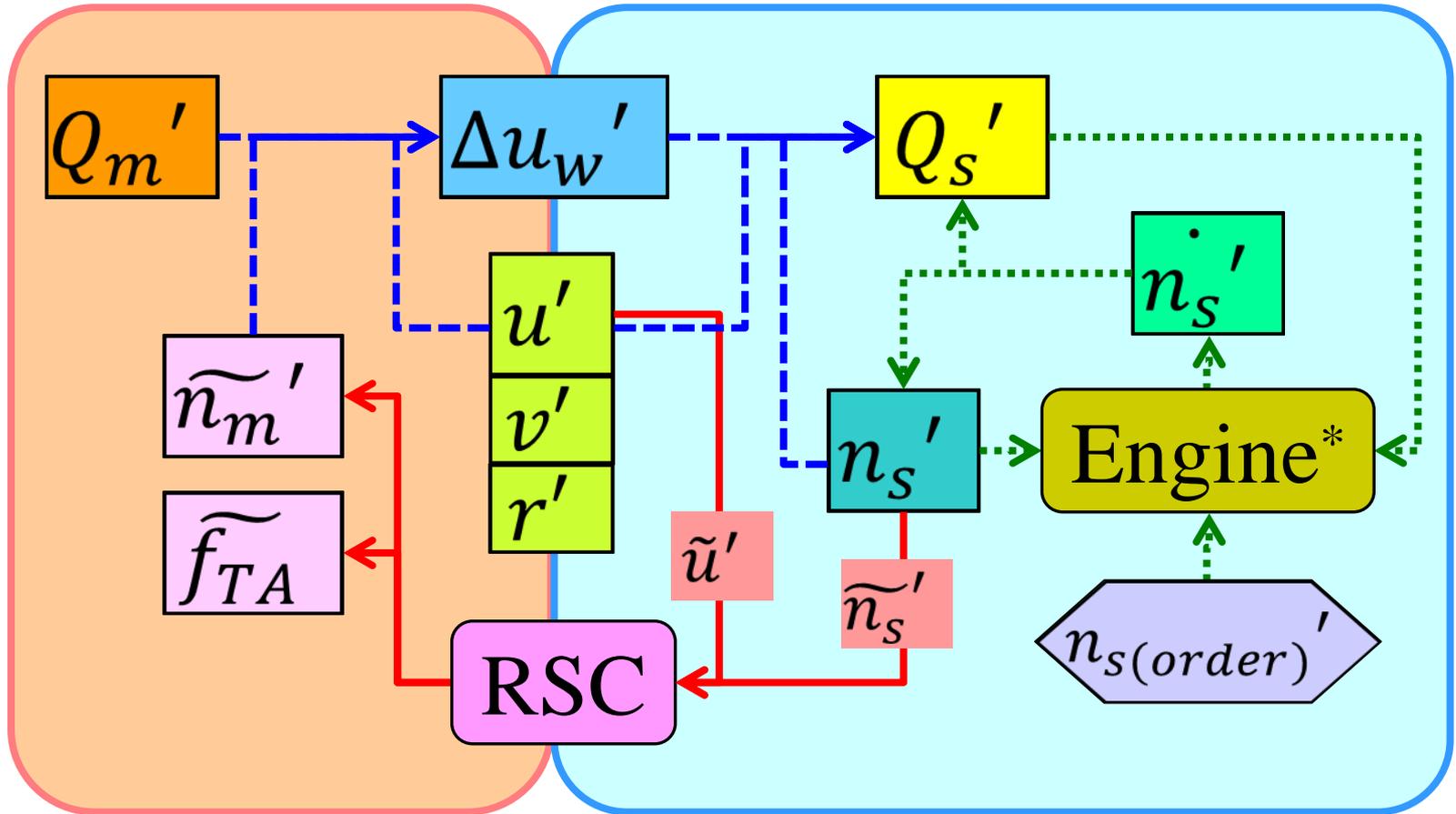
Item	Type	Model	Full-scale	F./M. ratio
1-w	-	0.734	0.806	1.10
$\Delta u_w'$	st. dev.	0.011	-	-
$u_P'$	mean	0.099	0.108	1.10
	st. dev.	0.011	0.011	1.01
$J$	mean	0.432	0.486	1.13
	st. dev.	0.049	0.051	1.04
$Q'$	mean	7.24E-08	6.35E-08	0.88
	st. dev.	3.85E-09	3.93E-09	1.02

注：模型船はRSC適用

# 自由航走試験の方法(機関モデルの導入)

模型船

実船



← RSC 
 ← - - -  $Q_s'$  estimate 
 ← ·····  $n_s'$  update

\*Y. Kitagawa, K. Tanizawa & Y. Tsukada, Development of an Experimental Methodology for Self-Propulsion Test with a Marine Diesel Engine Simulator, Third Report –Auxiliary Thruster System–, Proc. ISOPE 2014.

# まとめ

- ・簡易で実用的な補助推力装置を開発しました。
- ・外乱下の自由航走模型船の運動を実船相似にする舵効き船速修正の方法を提案しました。
- ・自由航走模型試験による外乱下・非定常操縦運動中の実船変動トルク推定法を提案しました。
- ・補助推力装置と舵効き船速修正、実船変動トルク推定法に機関モデルを組み合わせた新しい自由航走模型試験法を提案しました。