

LNG船の安全評価のための タンク強制動揺実験

構造安全評価系 構造解析研究グループ

岡 正義 *

安藤 孝弘

穴井 陽祐

研究統括主幹

田中 義照

川崎重工業株式会社

松原 直哉

1. はじめに
2. MOSS型LNG船のタンク流体力
スロッシング、スワリング
3. 強制動揺実験
装置、球形タンク、計測項目、実験条件 等
4. 実験結果
タンク荷重を中心に報告
規則動揺実験（長期予測、CFDの検証）
不規則動揺実験（最大荷重評価）
5. まとめ

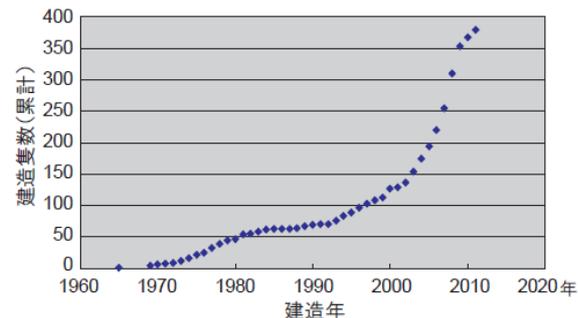


背景

輸送効率の向上
シェールガスの開発

LNG輸送のニーズ拡大

タンクの最適設計
(大型化、最適形状、etc.)



LNG船の建造隻数の推移
出典: JOGMECホームページ

国土交通省において、新形式LNG船の安全評価手法の確立を目的としたプロジェクトを発足 (H25-27)

本研究は、プロジェクトの一環で実施

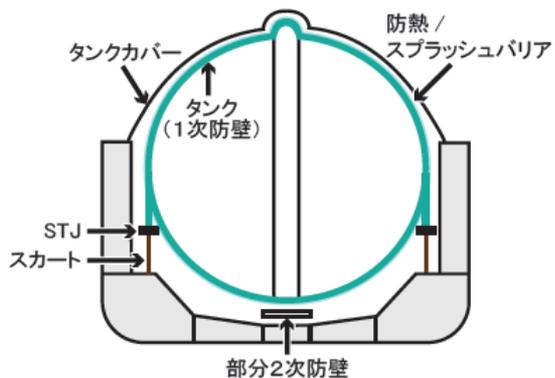
スロッシング現象に対する安全性評価に関する研究成果を報告

本研究の対象

MOSS型



出典: 川崎重工業株式会社

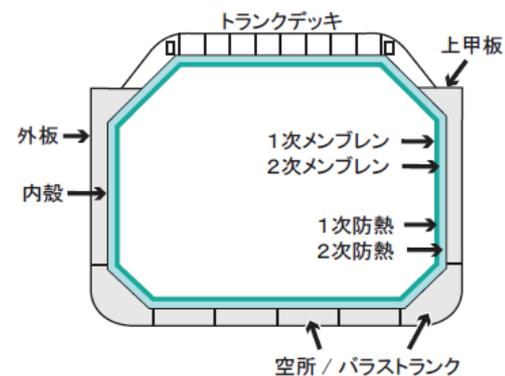


スロッシングによる積付の制限がないことが利点の一つ
今後は流体力に応じた大型化や形状の最適化を図る

メンブレン型



出典: 三菱重工業株式会社



タンク動揺による最大荷重

現状：DNVのガイダンス(1972)に基づく設計荷重

将来：解析的設計法の導入



1. 模型実験による非線形現象の再現

スロッシング、スワリング

2. 数値シミュレーションによる荷重予測

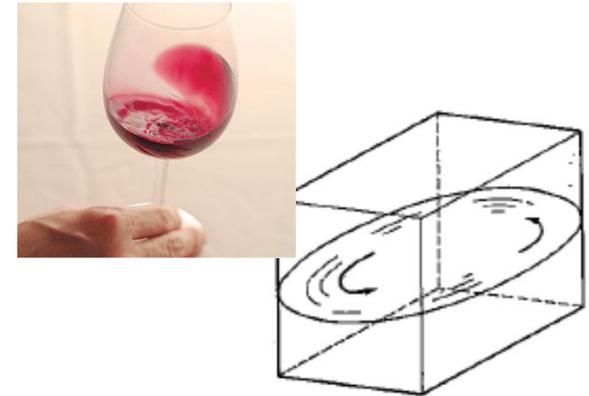
CFDによる3次元流体シミュレーション
模型実験による検証

3. 最大荷重の設定手法の構築

長期予測法
不規則動揺法

今後の取り組み

(4. タンク内圧の空間分布・時刻歴に応じた強度評価)



スワリング



スロッシング
(海上技術安全研究所HP)

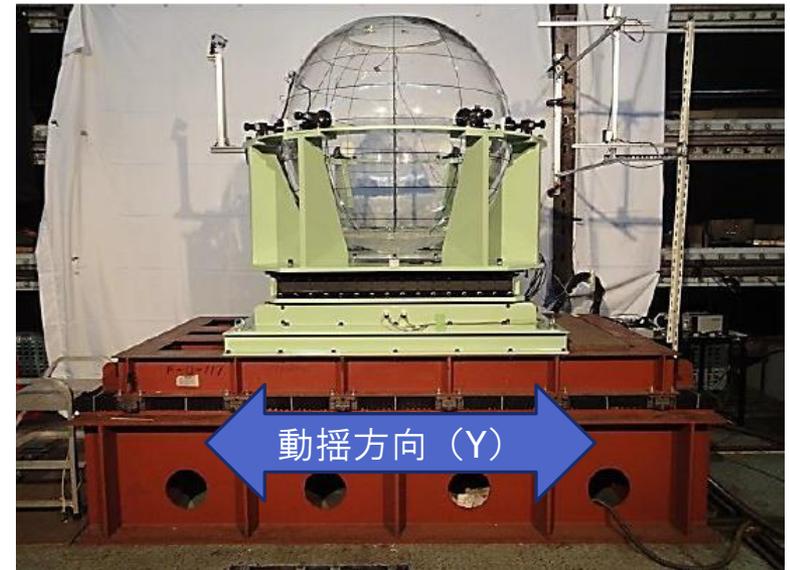
タンク模型、実験設備の概要



出典: 新江ノ島水族館クラゲ
ファンタジーホール



アクリル製球形タンク
(直径1.2m)



動揺試験装置
架台+分力計+タンク = 948kg

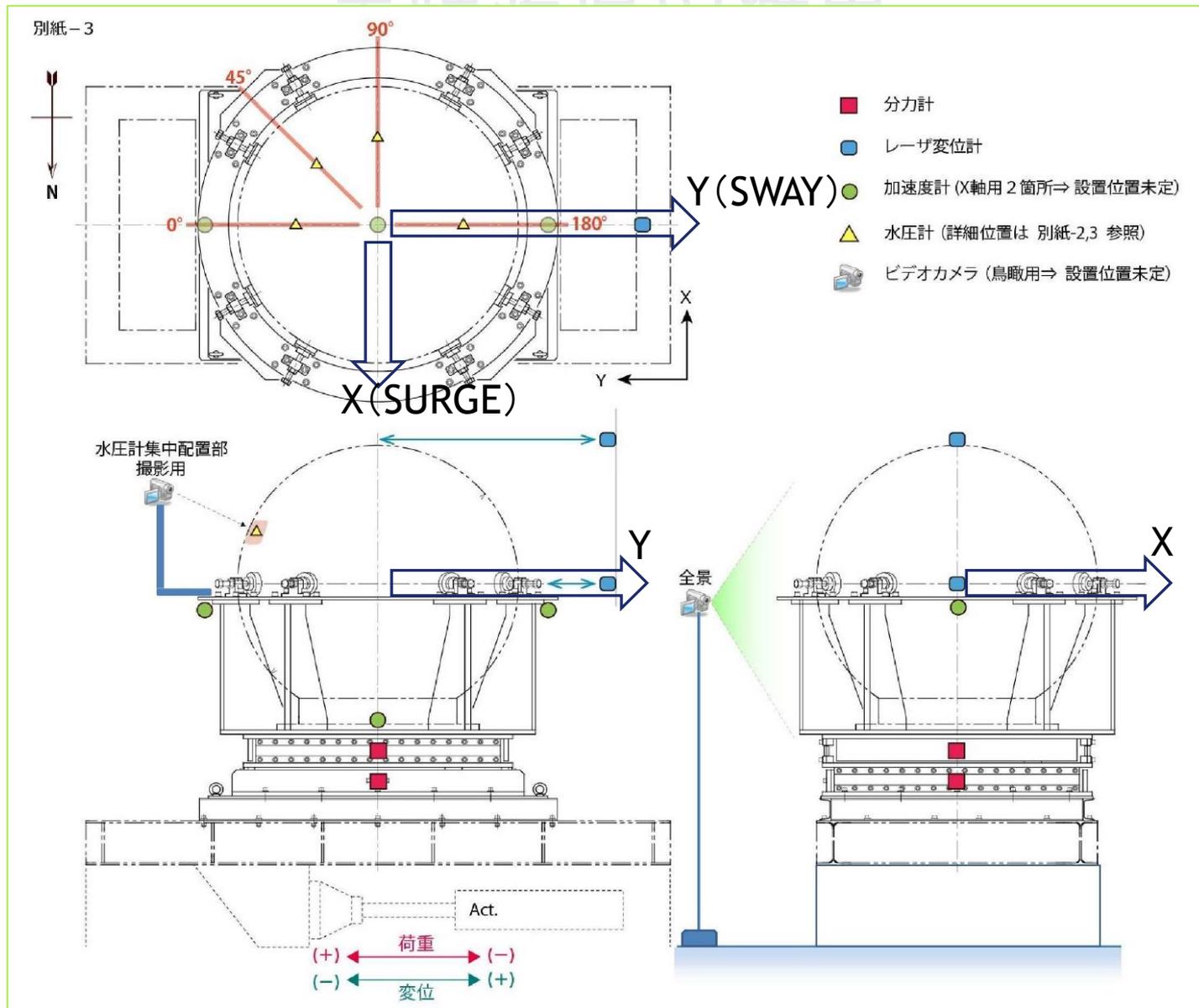


圧力センサ(50箇所)



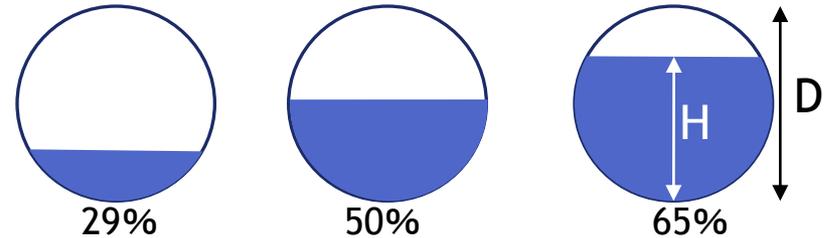
2分力計(容量1.5tonf)

実験装置の概要



実験内容

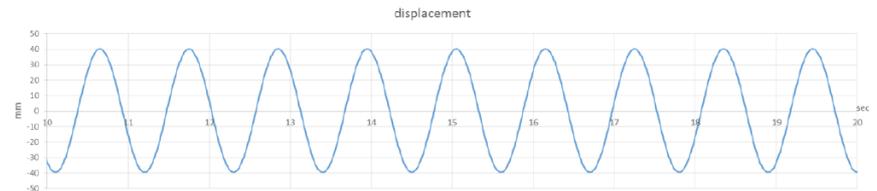
液位： $H/D = 29\%$, 50% , 65%



1. 規則動揺実験

動揺振幅 $A=20, 40, 80\text{mm}$, 周期 $T=0.8\sim 1.6\text{s}$ (同調周期約 1.2s)

目的：非線形現象の把握、周波数応答関数(RAO)の取得



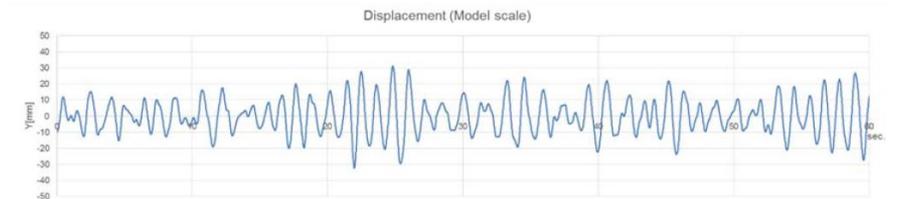
動揺波形の例

2. 不規則動揺実験

実海域でのLNG船のSWAY揺れ

目的：実海域での現象再現

RAOから得られる長期予測結果の検証



動揺波形の例

非線形現象の再現

液位50%、 $A=40\text{mm}$

$T=1.0\text{sec.}$



$T=1.3\text{sec.}$



$T=1.6\text{sec.}$

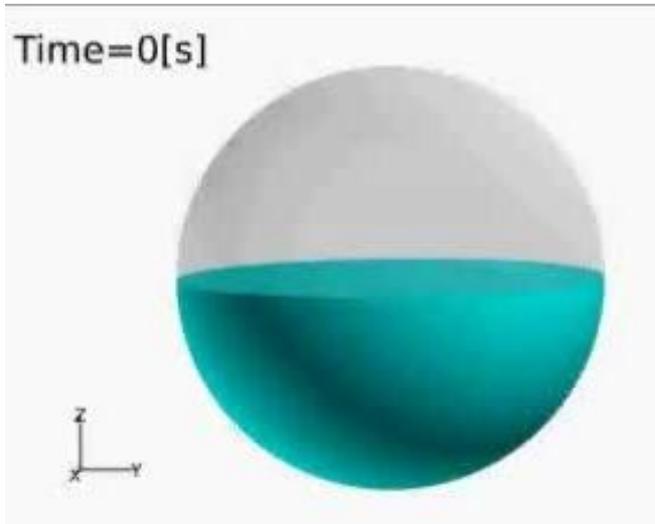


スロッシング+スワリング

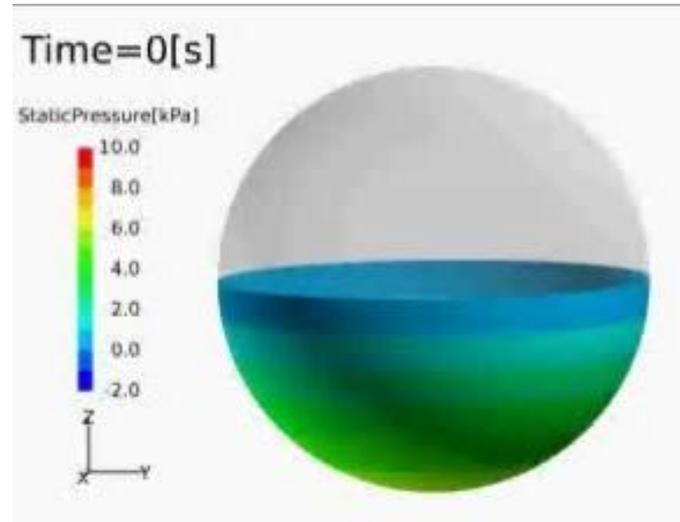
数値シミュレーション

液位50%

A=40mm, T=1.3sec.



流れの様子



タンク表面の圧力

数値解析

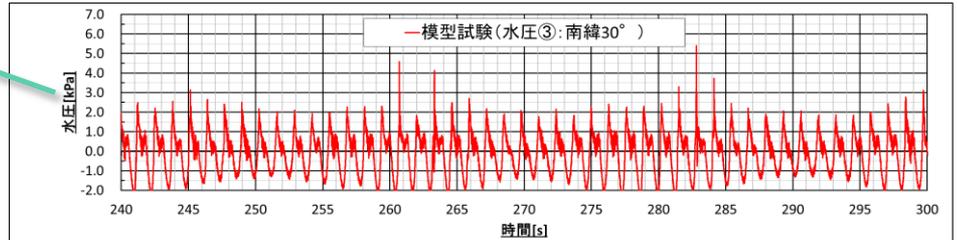
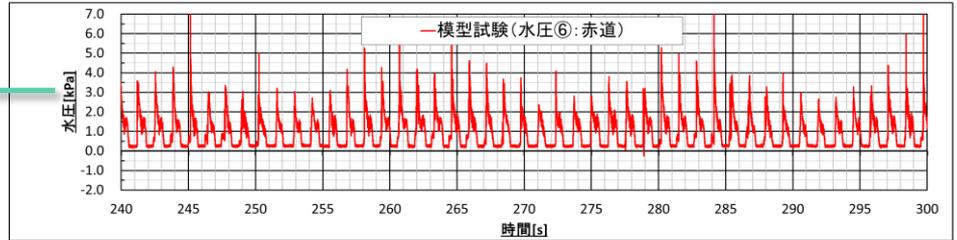
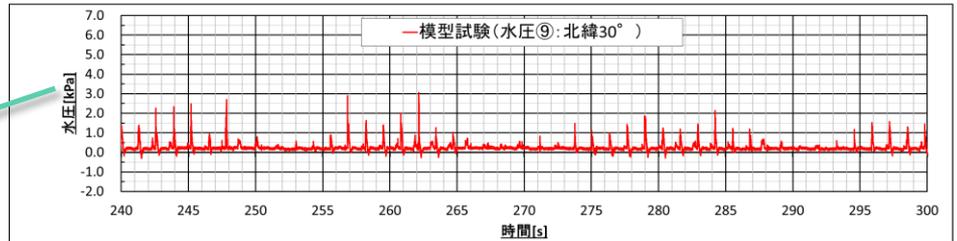
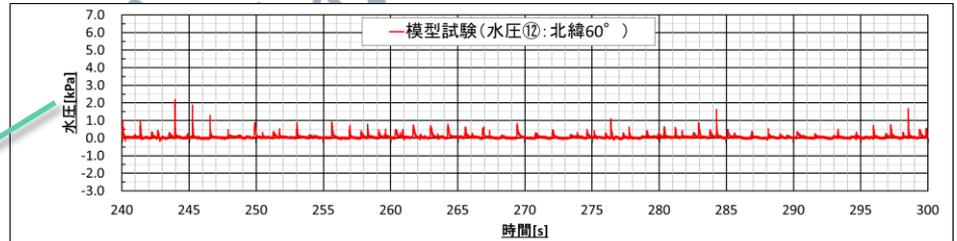
- CFDでスワリングの3次元流れを再現



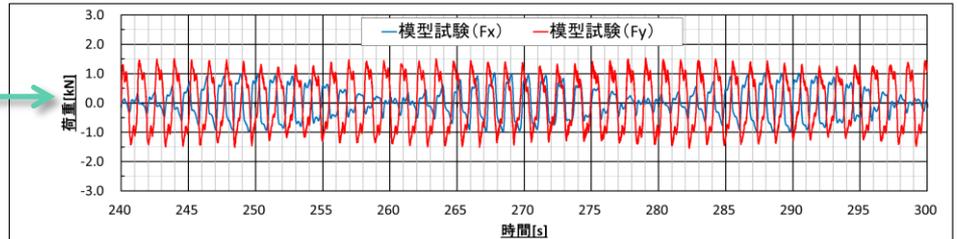
模型実験

計測データの例

真球タンク:
液位50% / 動揺変位40mm / 動揺周期1.3sec.

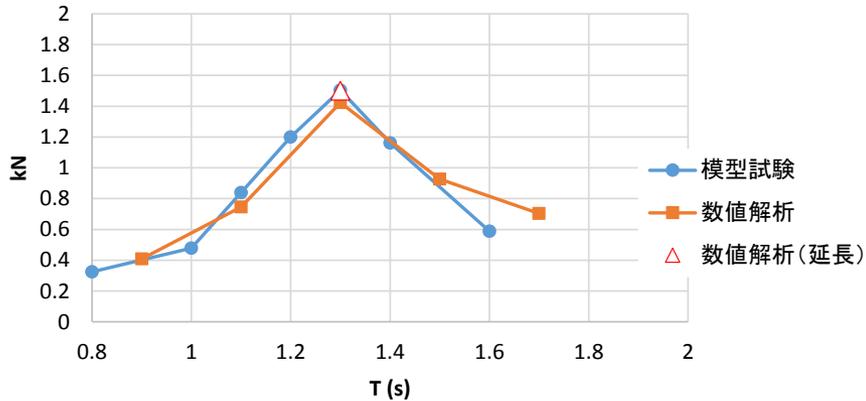


タンクへの作用荷重(F_x, F_y)



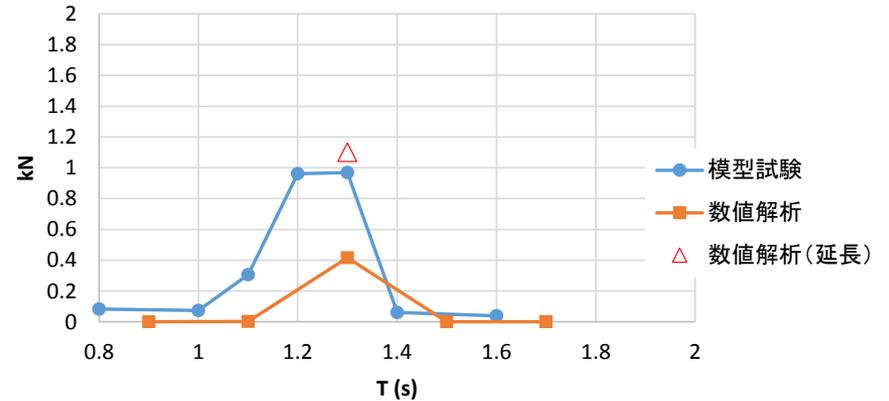
実験結果 (規則動揺)

Fy, H/D=50%



FY(動揺方向の荷重)

Fx, H/D=50%



FX(動揺と直交方向の荷重)

水平動揺に対するタンク荷重RAO

数値解析は10波の解析結果
(延長)は、70波の解析結果

- Fy、FxともにCFDで良好な予測精度を有している。
- Fxについては、スワリングが定常になるまで計算時間を要する。

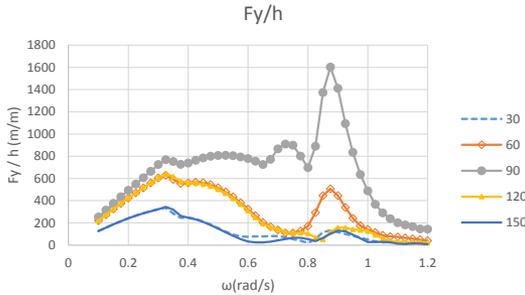
長期予測

解析条件

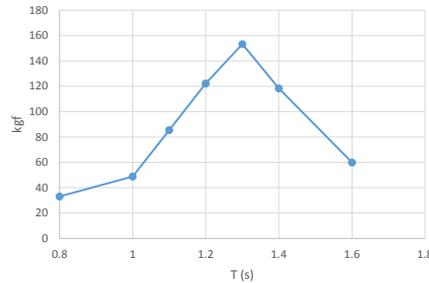
対象船: L=300m級のLNG船
 操船状態: All Headings, V=0knots
 波浪テーブル: 北大西洋
 波スペクトル: ISSC1964スペクトル

① 動揺 (振幅Y) から入射波 (波振幅h) へのRAOの変換

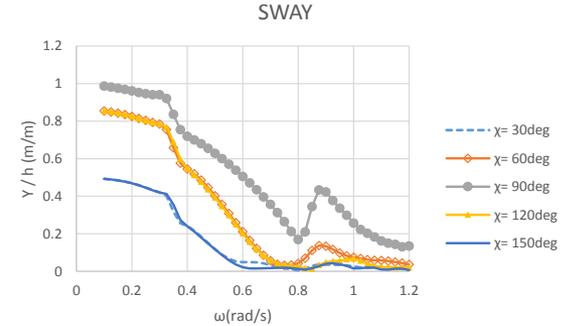
$$\frac{F_y}{h} = \frac{F_y}{Y} \times \frac{Y}{h}$$



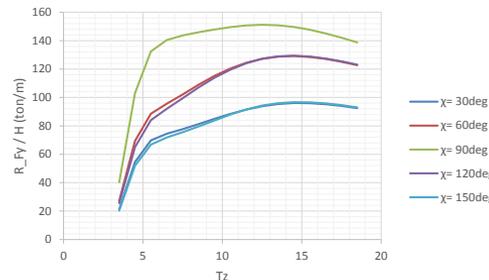
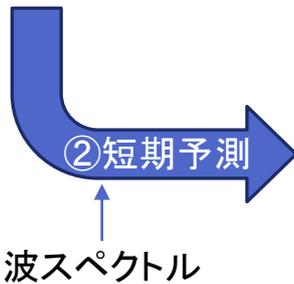
入射波に対する F_y のRAO



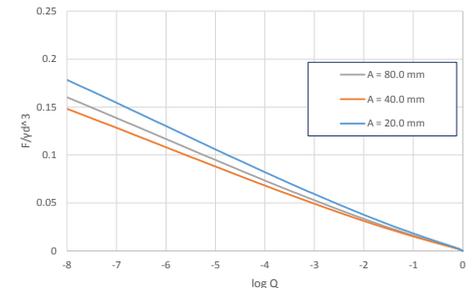
動揺に対する F_y のRAO



入射波に対するSWAY揺のRAO
(パネル法による計算結果)



短期応答関数
(平均波周期に対するFYの標準偏差)



長期確率分布

振幅非線形を考慮した最大荷重修正

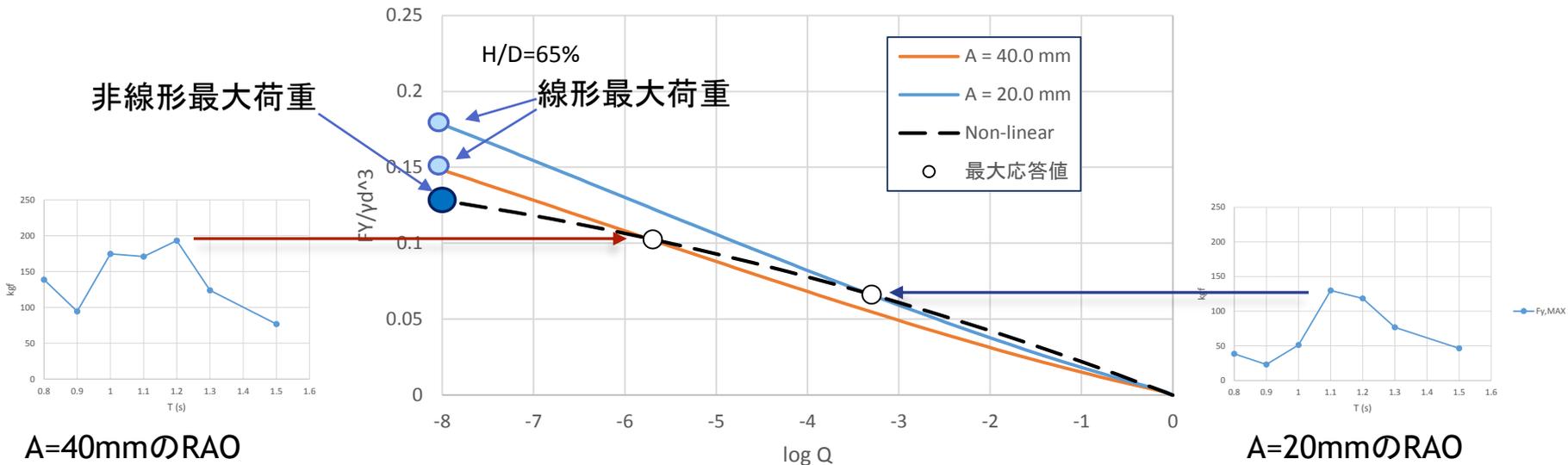
微小振幅のRAOを用いて線形重ね合せを行うと、一般に(超過確率の低い)大波高領域で、過大な予測になる。



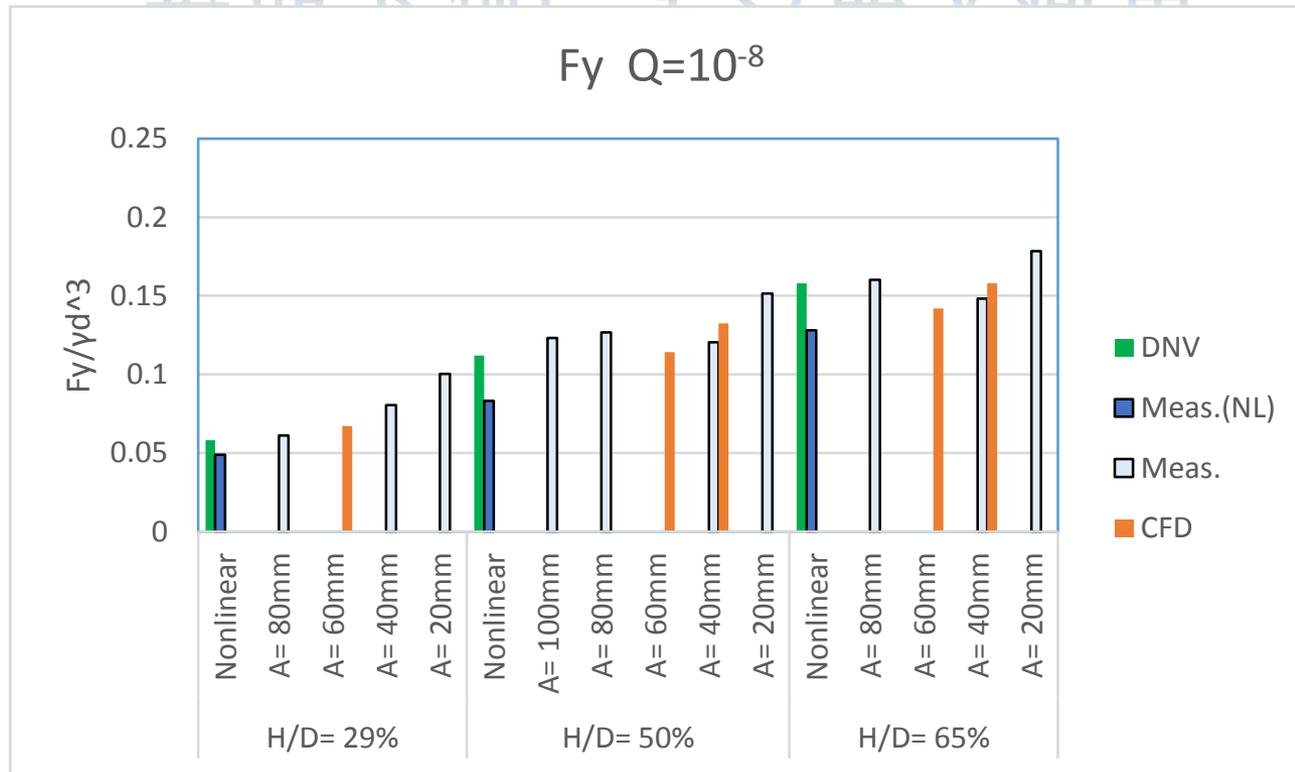
DNVでは、
振幅AのRAOを用いて線形長期予測した最大荷重は、
振幅AのRAOの最大荷重(同調時の荷重)を上回らない
として、振幅の非線形性を考慮している。

ここでは、 $A=20\text{mm}$, $A=40\text{mm}$ のRAOを用いて非線形性を考慮した。

振幅非線形の修正(DNVの方法)



長期予測による最大荷重



長期予測による最大荷重 (γ : タンク液体の密度、 d : タンク直径)

- 微小振幅に近いA=20mmのRAOを用いて線形長期予測を行い求めた最大荷重は、DNVガイダンスよりも大となるが、振幅の非線形を修正すると、DNVガイダンスをやや下回る結果となった。ただし、非線形修正した値は、条件(ここでは、A=20mm, A=40mmのRAOのみを用いたこと)に依存するため、今後、修正法について検討する必要がある。
- CFDで得たRAOを用いた最大荷重は、実験値と整合する結果が得られた。

不規則動揺実験 (条件設定)

最大荷重の予測に資するデータを取得するため、2種類の最悪海象を設定

最悪海象1: SWAY揺の平均周期がタンク固有周期に一致する海象(同調海象)

最悪海象2: 線形予測において最大応答が発生する海象(最大応答海象)

	最悪海象 1	最悪海象 2
H/D=29%	Tz=6.5s, Hs=9.5m	Tz=8.5s, Hs=14.5m※
H/D=50%	Tz=5.5s, Hs=6.5m	Tz=8.5s, Hs=14.5m※
H/D=65%	Tz=5.5s, Hs=6.5m	Tz=8.5s, Hs=14.5m※

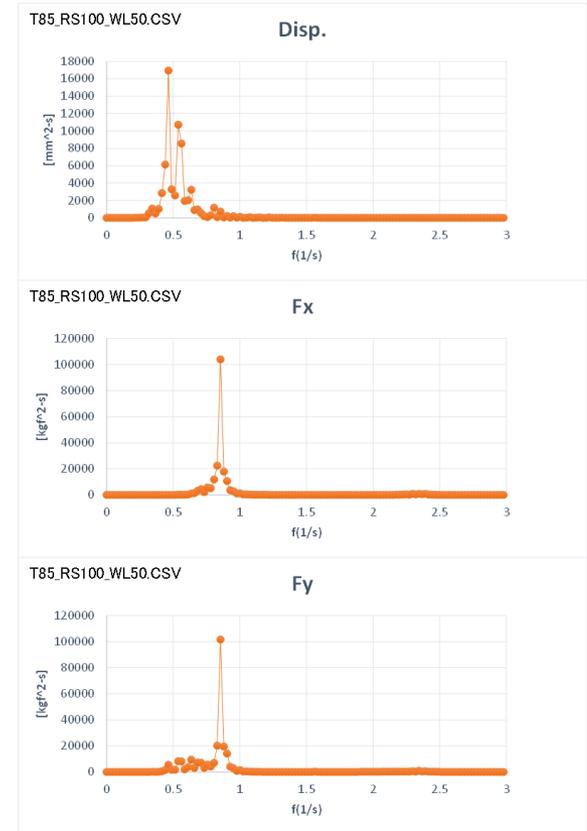
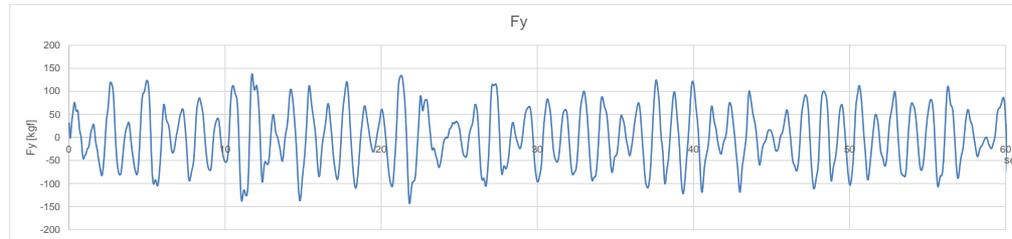
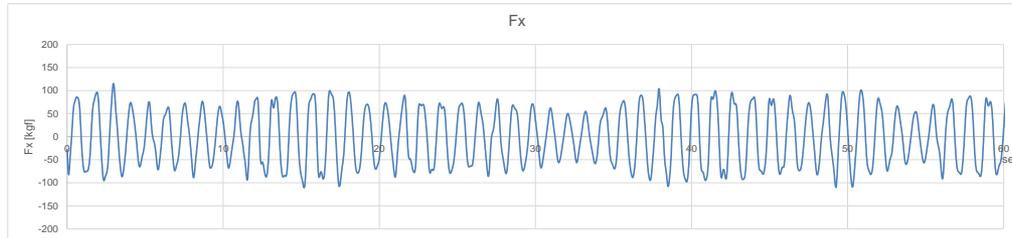
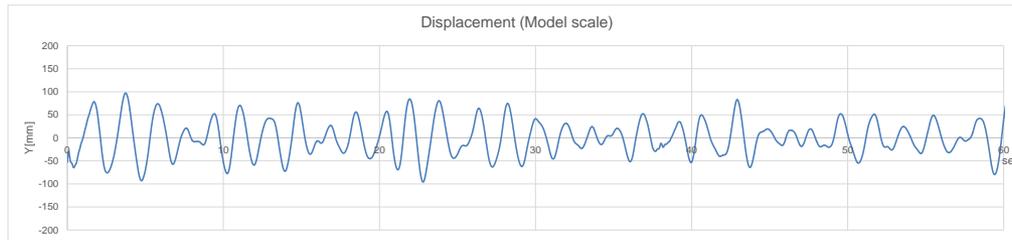
※試験機の制約により、試験はHs=12.5mで行った

北大西洋の波浪テーブル(IACS Recommendation No.34)

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

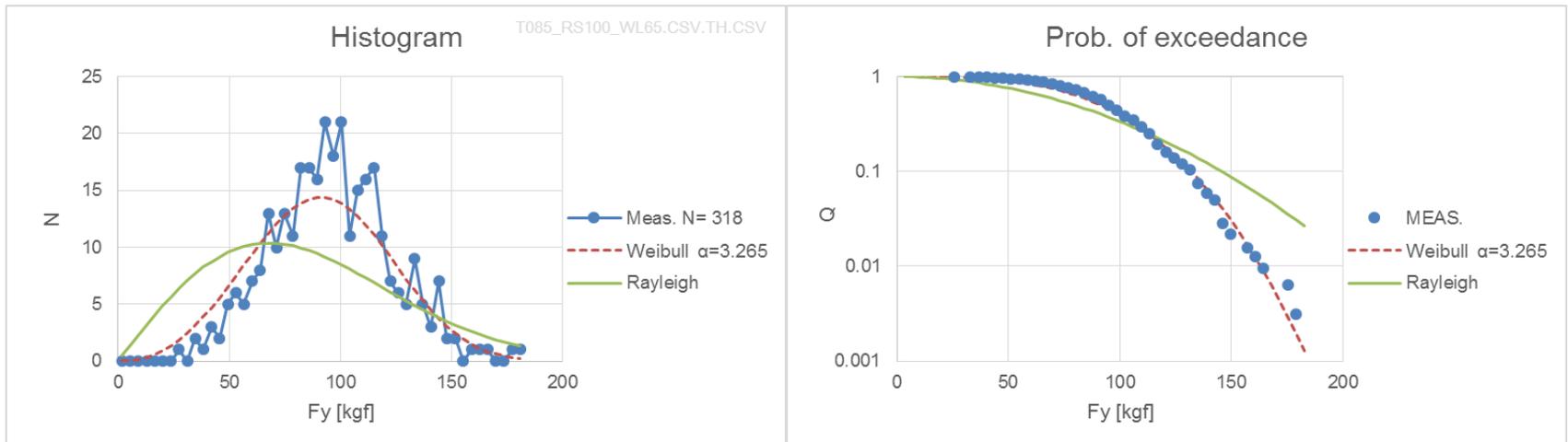
不規則動揺実験（計測波形の例）

H/D=50%, Tz=8.5s, Hs=12.5m



- 動揺のピーク周期が、タンク同調周期と離れている場合でも、Fx, Fyともに、タンク同調周期で高いピークを生じる。
→スワリングが持続

不規則動揺実験 (統計解析)



頻度解析の例

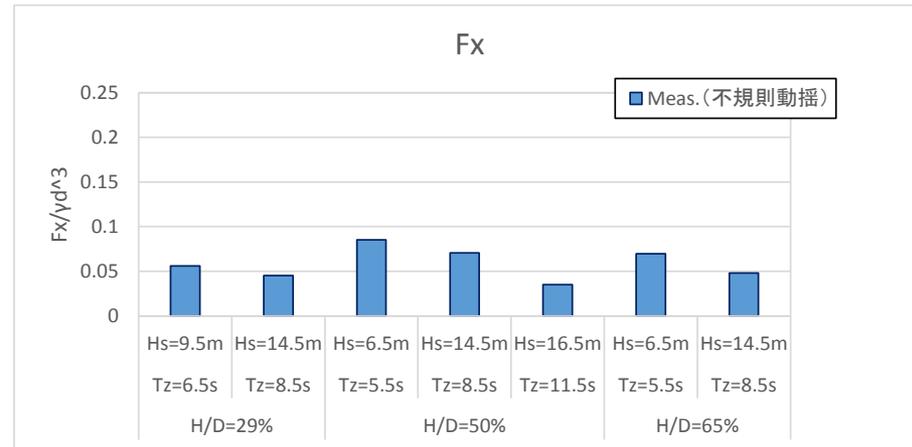
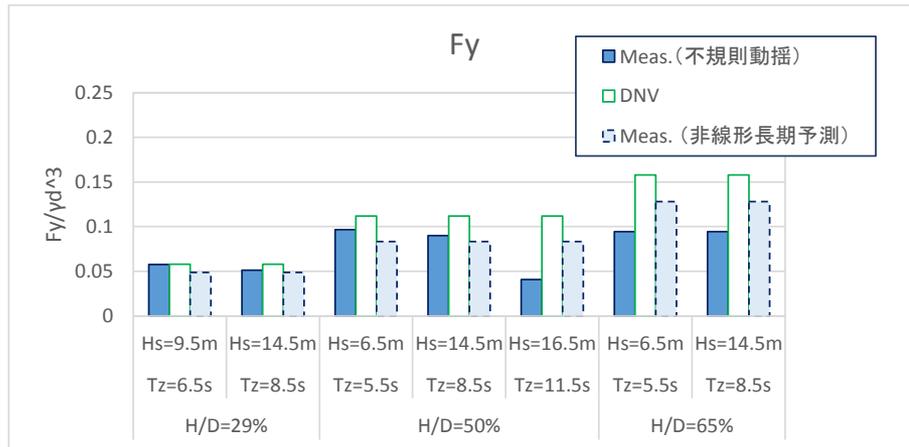
(短期超過確率、Fy, H/D=65%, Tz=8.5s , Hs=12.5m)

ワイブル分布に従い、最悪海象での1/1000最大期待値を求める

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} x^{\alpha-1} \exp(-x^\alpha / \beta)$$

α : 形状パラメータ β : 尺度パラメータ

不規則動揺法による最大荷重



不規則動揺法による最大荷重

- 設定した海象条件のうち、長期最大荷重は広義の同調海象で生じる。
- Fyについては、液位65%では長期予測の方が大きいですが、液位29%及び50%では同調海象において長期予測(非線形)を上回る結果になった。液位が低くなるにつれて、液体の慣性力が小さくなり、全荷重に占めるスワリング荷重の割合が相対的に大きくなったことが原因と考えられる。
- Fxについては、不規則動揺下でスワリングが持続する影響で、不規則動揺法が長期予測法よりも大きくなる。ただし、タンクサポートは現状、X,Y同じ構造であるため、FxがFyを上回らない限り、安全上において問題はないと考えられる。

まとめ

球形LNGタンクの強制動揺実験を行い、今後の安全評価に資するデータを得るとともに、以下の知見を得た。

- CFDでスワリング現象を再現でき、荷重予測の精度向上が可能になることを確認した。
- 動揺方向(Y)の最大荷重は、液位が高いと長期予測法で安全側の予測になるが、低液位では、不規則動揺の周期がタンク同調周期に近い場合、不規則動揺法が長期予測法より大となることがある。
- 動揺方向と直交方向(X)の最大荷重については、スワリングの持続に伴い、不規則動揺法が長期予測法よりも大きくなる傾向にある。

本研究は、国土交通省から受託した『シェールガスの海上輸送体制確立に向けた新形式LNG運搬船の設計強度に係る評価手法の調査』の一環として実施したものであります。また、上記調査に係る評価委員会において、学識経験者及び有識者から貴重な御指摘、及び有益な御助言を頂戴しました。国土交通省関係各位ならびに評価委員会委員等各位に深謝致します。