スロッシング荷重の模型実験

日本海事協会
技術研究所
熊野厚、朱庭耀

１．まえがき

船体構造強度設計あるは構造規則でのスロッシング衝撃荷重を考える場合、常に構造強度の評価の視点のもとに、荷重の特性を理解し、その推定精度を把握することが必要であろう。スロッシング現象では、それに対する構造強度を考える場合、衝撃荷重はごく局所的に大きな圧力が働き、圧力の立ち上がり時間が極めて短いことから、荷重として見る場合には、衝撃圧力の同時作用領域の広さや構造の弾性応答の影響を考慮する必要がある。今回、これらのスロッシング荷重の特性を検討するため模型実験を行い、ここに実験結果および検討結果を報告する。特に本報告では、主に衝撃圧作用領域の広がりを検討した結果を報告する。さらに、スロッシング解析コードの推定精度についても簡単に報告する。

なお、本実験は運輸省船舶技術研究所と幣会との共同実験として行われたものである。

２．実験内容

2.1　概要

模型実験は船舶技術研究所のスロッシング実験装置を使用し実施した。実験に使用した模型タンクはスロッシング衝撃圧に対して剛体とみなせる十分な剛性を有するものとしている。

加振周期は、主に縦揺れ運動中での液体動揺の同調周期近傍とし、4 段階の運動振幅を模型タンクに与え、衝撃圧力および模型動揺の計測を行った。

2.2　模型実験

2.2.1 模型タンク

本実験で使用した模型は、SR215[1]で使用した平滑 2 次元模型（R1 模型）で、上下面および両側面は板厚 15㎜ のアルミニウム合金製であり、前後面は、液体動揺を観察するため板厚 10㎜ の透明アクリル製としている。　使用した模型タンクは、2 次元模型とするため、高さ、幅に対して奥行を十分に小さくし、液体の 3 次元流動、スワーリングの発生などは抑制している。

模型寸法は下記のとおりである。

模型寸法：幅×高さ×奥行き＝1200×600×200 ㎜

なお、この模型は実船の貨物油タンクの約 1/30 から 1/40 の縮尺模型と見ることができる。

2.2.2　実験装置

スロッシング実験装置の概要を図. 1 に示す。本装置は、2 次元および 3 次元の模型実験が可能であり、縦揺れ、横揺れ、上下揺れ、水平運動を単独あるいは組み合わせての実験が可能な装置である。

本実験では、主に模型タンクを縦揺れさせ衝撃圧を計測する。

2.2.3 計測項目

スロッシング衝撃圧は、それに対する構造強度を考える場合、衝撃荷重は局所的に大きな圧力

が働き、圧力の立ち上がり時間が極めて短いことから、荷重として見る場合には、衝撃圧力の同時作用領域の広さや構造の弾性応答の影響を考慮する必要がある。

ここでは、水圧計により衝撃水圧を計測し、さらにパネルセンサにより衝撃荷重を計測する。本実験に使用した水圧計の受部圧部の計は 6.2mm である。スロッシング荷重のパネルセンサは、帯板で中央部にひずみゲージを 4 枚添付して板の曲げひずみ成分を検出し、パネルセンサに働く荷重を等価静水圧に換算して計測することにした。さらに、タンクの運動はポテンショメータおよび加速度計で計測し、液面動揺の状況をビデオに記録した。

パネルセンサ１	8 点	昭和測器社製（パネルセンサ２は 12 点）
水圧計	14 点	昭和測器社製 MPA-1（受圧直径 6.2mm，1kgf/cm^2，100kPa)、センサーの上限応答周波数は 15kHZ
運動振幅	1 点	ポテンショメータ
加速度	2 点	容量 2g
ビデオ	1 台	

模型の概略および水圧計およびパネルセンサの計測点配置を図.2 に示す。パネルセンサ１では、パネルセンサ PNL01-PNL08 は、水圧計の P0５-P１２にそれぞれ対応する位置に設置している。

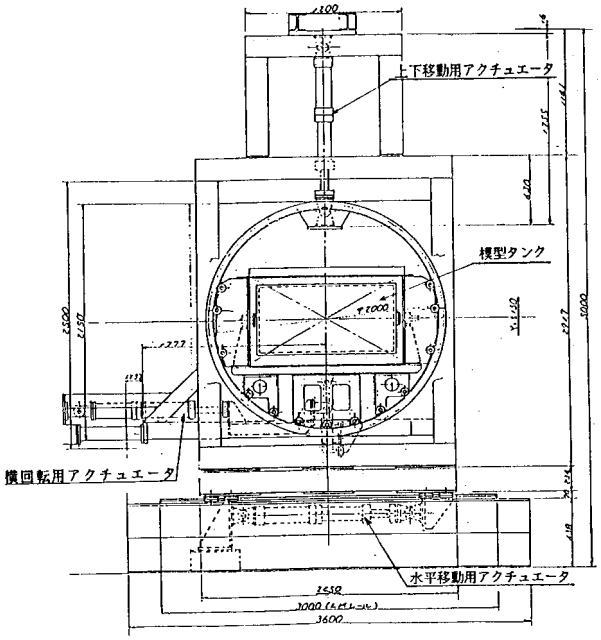


図.1　スロッシング実験装置

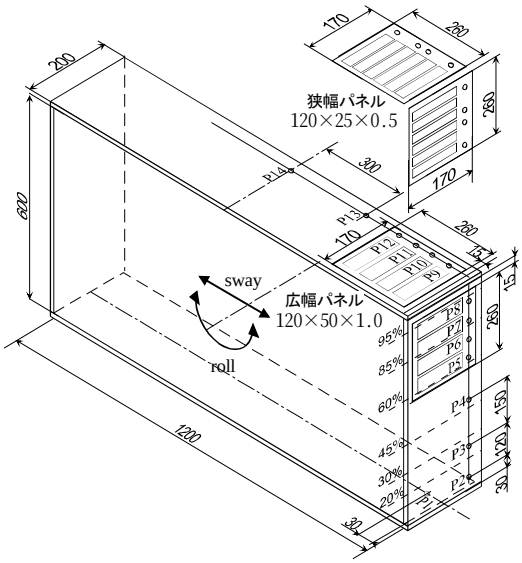


図.２計測点配置

2.2.4　計測方法

(1) 計測装置

圧力および加速度の出力電圧は増幅器を介し、A/D 変換を行いパソコンにデジタルデータとして集録した。ここで計測系の周波数特性は 10kHZ 以上を確保している。

(2)　実験条件および計測方法

実験条件として、液位および運動振幅の以下のケースについて実験を行った。

・ 液位：20，30，45，60，85，95%の５種類
・ pitch 片振幅：4deg，6deg，8deg，10 deg（タンク中心周りの pitch）
　さらに、sway についても下表に示す実験条件で実験を行った。

実験条件の一覧表を表.１に示す。

本実験ではパソコンのメモリの制約から、計測時間を１分間とし、下記の基礎実験および高速サンプリング実験の２段階に分けて実験を行うこととした。計測された衝撃圧にはばらつきがあるため、ここでは統計処理を行い、衝撃圧のピーク値の 1/10 最大平均値で整理している。

表.1　実験条件

運動	液位	振幅		運動中心
	%	deg	mm	
pitching	20	4,6,8,10		タンク中心
	30	4,6,8,10		
	45	4,6,8,10		
	60	4,6,8,10		
	85	4,6,8,10		
	95	4,6,8,10		
swaying	20		60	
	60		15	

・ 基礎実験：
　衝撃水圧および衝撃荷重の周波数応答を調査するため、矩形タンクにおける定常波の最低次同調周期近傍で 0.01sec 刻みで周期を変化させ計測した。
　この計測では全計測項目を計測している、ただし計測項目数が多数になるため、サンプリング周期は１ msec としている。
・ 高速サンプリング実験：
　上記基礎実験において模型天板コーナー部の水圧計 P09 に最大衝撃圧力が発生する周期を選定し、高速サンプリング実験を行った。
　この場合、主に衝撃現象を示すと思われる模型上部コーナ部のセンサを選定し、高速のサンプリング周期（0.1msec）で計測した。
　パネルセンサ１を使用した実験では,P03、P04、P07～P10、PNL03～PNL06 を計測した。
　パネルセンサ２では、P03、P04、P08～P10、PNL05～PNL09 を計測した

３．　実験結果

3.１　同調周期調査のための基礎実験

加振周期を横軸に、計測した圧力のピーク値の 1/10 最大平均値を縦軸にとった圧力の周波数応答を図.3-1 および図.3-2 に示す。ここでは縦揺れ振幅 8 度の場合のみを図示している。実験中の観察結果を以下にまとめて示す。

(1) 低液位（液位 20%、30%）

実験加振周期範囲内で大きな衝撃圧力が発生する時の液体の運動は段波（traveling wave）であった。同調周期は線形理論値より短周期側にあり、また、広い範囲の加振周期で大きな圧力が生じている。しかし、衝撃圧力の発生はまばらであり、ピーク値のばらつきも大きい。

液面に近い側壁下部の水圧計 P03 で最大圧力が発生するが、天板コーナー部の水圧計 P09 にも衝撃圧力が発生している。しかしながら、パネルセンサで計測された衝撃荷重はごく小さいものであった。

(2) 中液位（液位 45%、60%）

中液位では、衝撃圧力発生のパターンが 2 つに分かれる。すなわち、矩形タンクの定常波による最低次同調周期に近い周期で衝撃圧力が発生する現象と、これより周期の長い段波により衝撃圧力が発生する現象である。なお、本実験条件の中では、液位 60%、加振振幅 10deg における pitch

同調時に最も激しいスロッシング現象が発生した。

(3) 高液位（液位 85%、95%）

高液位では同調範囲が狭く、衝撃圧力の発生頻度およびピーク値のばらつきともに小さい。

(4) 同調周期

すべての実験条件について得られた同調周期を表.2 および図.4 に示す。ここで、同調周期は天板コーナー部の水圧計 P09 において最も大きな衝撃圧力が計測された加振周期としている。同調周期は天板の影響および液体の粘性影響により、矩形タンクの線形理論による最低次の同調周期と比較して低液位においては短周期側に、高液位おいては長周期側にずれている。

表.2　同調周期

液位(%)	理論同調周期	pitching(deg)				swaying
		4	6	8	10	
20	2.25	1.84	1.76	1.76	1.85	1.74(60mm)
30	1.87	1.75	1.72	1.75	1.76	—
45	1.59	1.56	1.61	1.63	1.67	—
60	1.45	1.49	1.52	1.58	1.45	1.47(15mm)
85	1.33	1.53	1.55	1.57	1.54	—
95	1.31	1.62	1.57	1.5	1.43	—

unit: sec

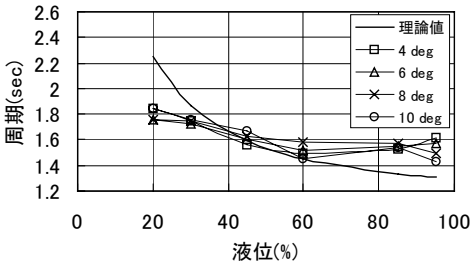


図.4　同調周期

3.2 衝撃圧力の空間分布

上記基礎実験（サンプリング周期 1msec）においては、サンプリングが粗いため衝撃圧のピーク値が精度良く計測されていない可能性があることから、高速サンプリング実験ではサンプリング周期を 0.1msec とした計測を行った。高速サンプリング実験では、基礎実験で模型天板コーナー部の水圧計 P09 に最大衝撃圧力が発生する周期を選定して実験を行った。この場合、主に衝撃現象を示すと思われる模型上部コーナ部のセンサを選定して計測した。本実験において水圧計およびパネルセンサにより計測された水圧分布を図.5 に示す。

本図から天板コーナー部の水圧計 P09 で大きな圧力が発生していることがわかる。しかしながら、対応する位置でのパネルセンサ（PNL05）に発生する圧力はかなり小さな値を示している。

低液位（20%および 30%）においては、天板あるいは側板上部よりも側板下部の静水状態における水面付近（P03）に大きな圧力が生じている。

一方、中液位（45%および 60%）および高液位（85%および 95%）では、天板コーナー部（P09）および側板最上部(P08)に大きな圧力が発生している。

3.3 水圧計とパネルセンサ

図.5 では、すべての液位において天板コーナー部の水圧計 P09 で大きな圧力が発生しているが、対応する位置でのパネルが受ける圧力はかなり小さくなっている。特に低液位でその差が大きい。低液位では側板に沿って液体が極く狭い個所に集中して天板に当たる衝撃であるためこの差が生じたものと思われる。

中液位（45%および 60%）および高液位（85%および 95%）では、天板コーナー部（P09）および側板最上部(P08)に大きな圧力が発生し、パネルセンサとの差も大きい。その他の個所では水圧計とパネルセンサの水圧はほぼ等しい。このことは基礎実験でも確認されている。

本実験で最も激しいスロッシング現象を示した液位 60%でピッチング振幅 10 度の場合での、水圧計とパネルセンサによる水圧の値と持続時間および生波形を図.6 および図.７に示す。ここでいう継続時間は、最大値の 1/2 以上の水圧を示す持続時間としている。

天板では、大きな圧力な生じた P09 では継続時間は数ミリ秒であるが、パネルセンサの継続時間は数十ミリ秒以上であり大きな違いが生じている。パネルセンサの受ける荷重のばらつきは比較的に小さく、水圧計の示す水圧は継続時間が短くそのばらつきが非常に大きい。また、すぐ隣に位置する P10 では激しい衝撃は生じておらず、水圧計とパネルセンサの水圧はほぼ等しい値となっている。これから天板の衝撃荷重は狭い範囲に働いているものと思われる。

一方側板上部に有る P07、P08 では水圧計とパネルセンサ両者に鋭いピーク水圧が観測されている。パネルセンサの水圧の立ち上がりは比較的緩やかで、その最大値近傍で鋭いピークが見られる。この時刻は、天板の水圧計にピークが生じる時点と一致している。これから側板の水圧のピークは、液体が天板に衝突した際に生じる圧力波動が伝わって生じるものと思われる。このため衝撃荷重は比較的広い範囲に同時に働くものと考えられれ、パネルセンサにも鋭いピークが見られるものと推察される。しかしながら、パネルセンサの水圧は水圧計のそれのほぼ 2/３程度であり、その鋭いピークの水圧は比較的緩やかな成分の大きさと同程度に収まっているようである。

次に、パネルサイズの異なるパネルセンサ１（幅 50mm）とパネルセンサ２（幅 25mm）で計測された水圧を図.8 に示す。同図によればサイズの小さいパネル２が受ける平均的な水圧が大きいことが判る。本計測結果も、衝撃圧を荷重で評価する場合、衝撃の同時発生領域を考慮する必要があることを示している。

4　数値解析法の検証

現在、スロッシングの数値解析コードは多く種類が提案されている。当研究所でも横国大　荒井教授が開発された解析コード YNU-SLOSH[2)]を導入し、種々のタンク形状あるいは内構材配置についてシリーズ計算を行い、スロッシングの設計荷重の簡易式を開発すると共に荷重の直接計算手法を開発する計画である。ここでは、その開発に先立って、本解析コードの精度や特色を確認するため、今回実施した実験結果と比較することとした。図.９に水圧の実験結果と計算結果を比較して示す。なお、同図では比較しやすいように時間軸を適当にシフトして示してある。なお、計測値が比較的小さい P03,P04 では計測ノイズが実験値に現れている。

数値解析結果は、定性的には実験値に近い値を示している。側板下部にある P03 や P04 に天井衝突時に圧力変動が現れていることが数値計算にも現れていることが興味深い。

特に衝撃現象でも比較的緩やかな現象では定量的にも実験結果に近く、本解析手法は設計荷重の検討に十分使用できると思われる。しかし天板に激しく衝突する際に生じるごく短い持続時間のピークは定性的には再現されているが、定量的には異なる結果を示している。この鋭い水圧のピークの推定法は、前述したように同時作用領域や構造の剛性影響と共に今後の検討課題であろう。

５ まとめ

スロッシング水圧および荷重計測実験を行った結果、

・　スロッシングでは、まず船体運動とタンク内液体の動揺が同調しないようにすることが重要

である。この場合、同調周期の正確な推定が必要であるが、今回の実験では、タンクの同調周期としては、矩形タンクの定常波による最低次固有周期に対して 3 割程度の幅を持たせる必要があることが判った。

・　パネルセンサによるスロッシング衝撃荷重計測により、衝撃荷重の時間的・空間的変化の様子が確認された。また、水圧計による水圧計測結果との比較から、衝撃荷重の同時作用領域が特に天板ではごく小さいことがわかった。

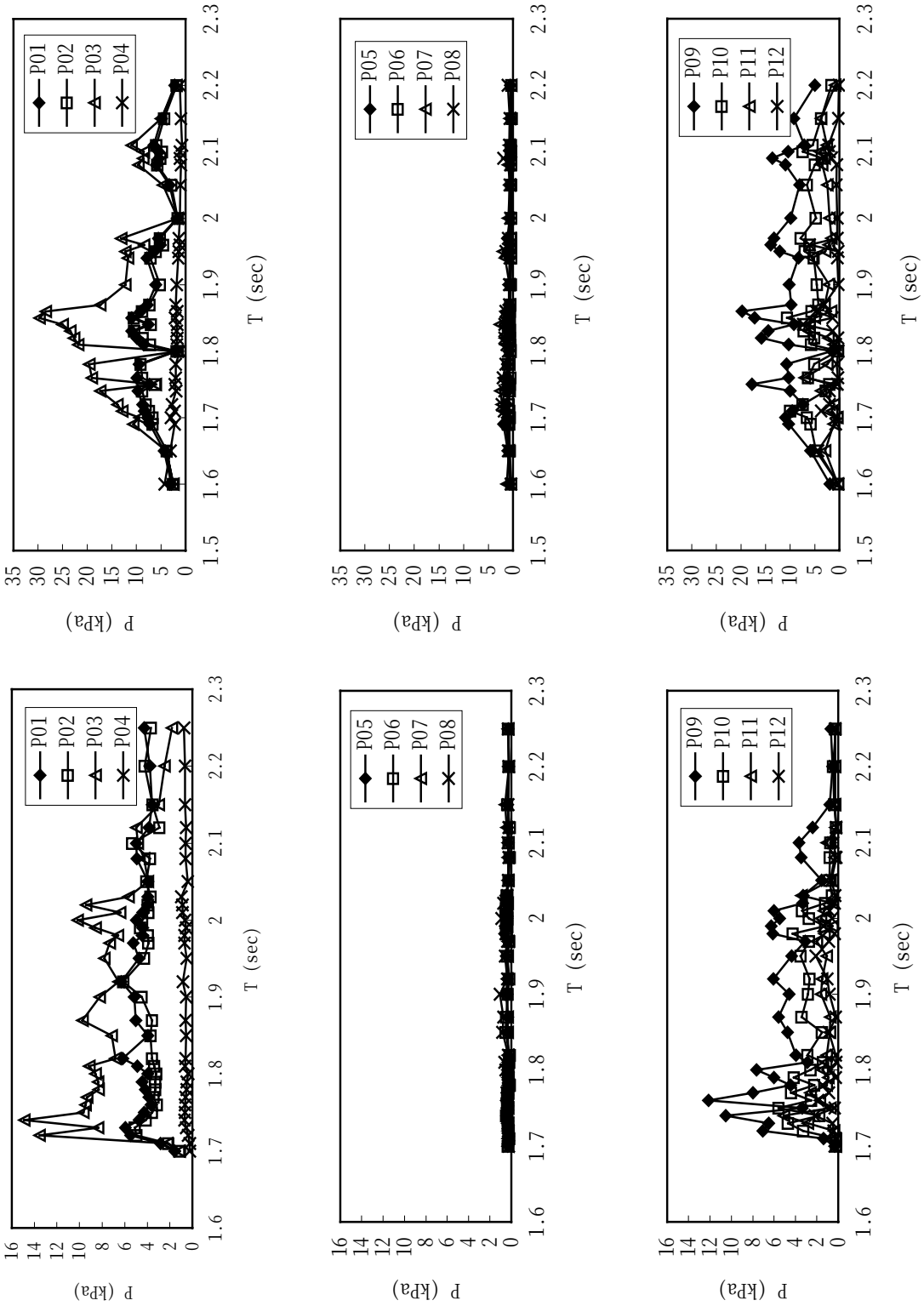
・　スロッシング解析コード YNU-SLOSH は、天板に激しく衝突する現象を除外すれば、設計荷重の設定に十分使用できることがわかった。

本実験は、運輸省船舶技術研究所との共同研究として実験したものであり、特別研究官宮本氏、構造強度部田中氏、安藤氏に謝意を表します。また、実験計画および実験結果の検討において種々の貴重なご意見を頂いた横国大　荒井教授に謝意を表します。

参考文献

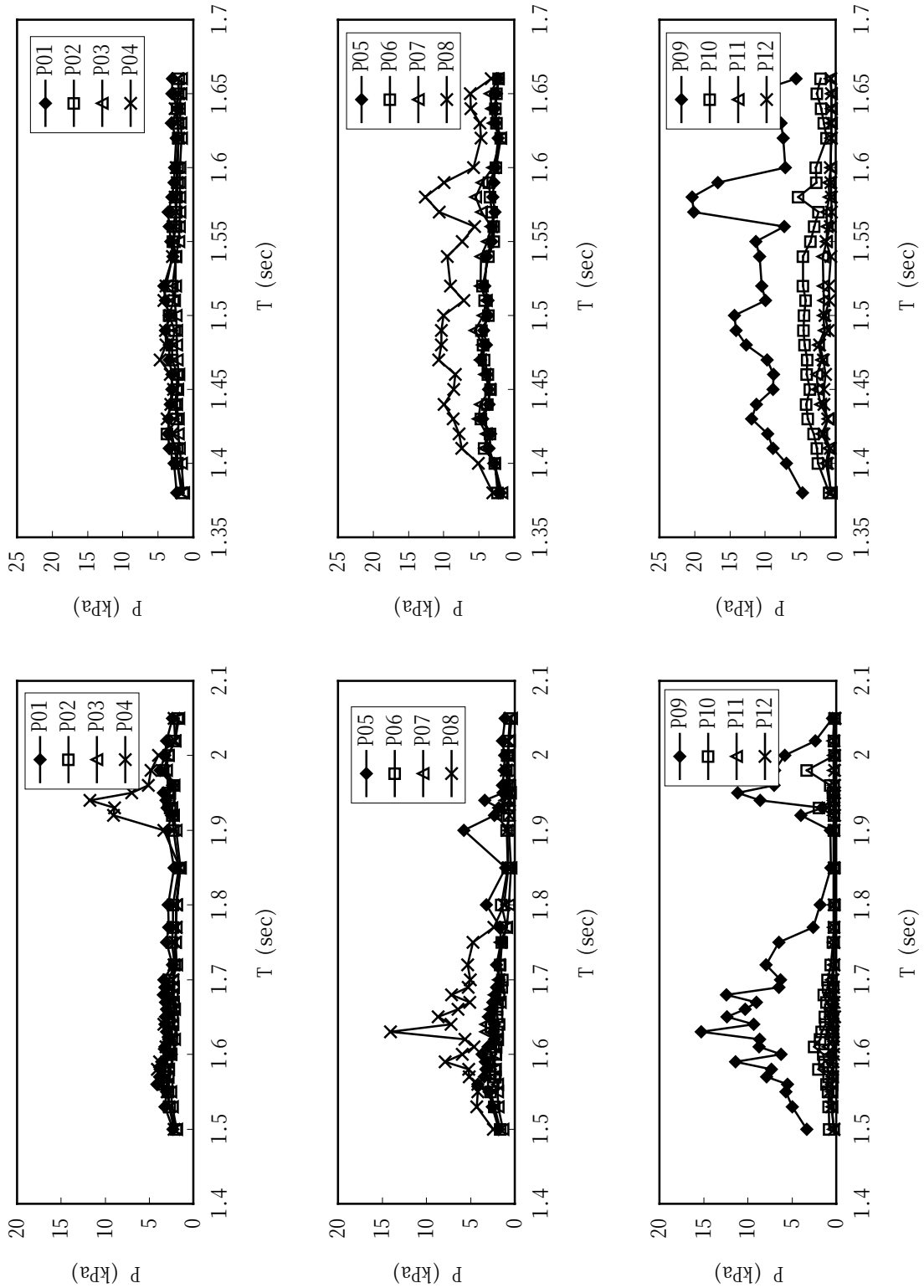
１）日本造船研究協会第 215 研究部会：二重船殻中型タンカーの荷重・応力に関する研究報告書(第 2 分冊)（1994）.

２）荒井　誠：液体貨物のスロッシング圧の実験と数値解析、造船学会論文集第 155 号 昭和 59 年 5 月



液位　２０％　　液位　３０％

図.3-1　圧力の周波数応答（振幅 8deg）



液位　４５％液位　６０％

図.3-2　圧力の周波数応答（振幅 8deg）

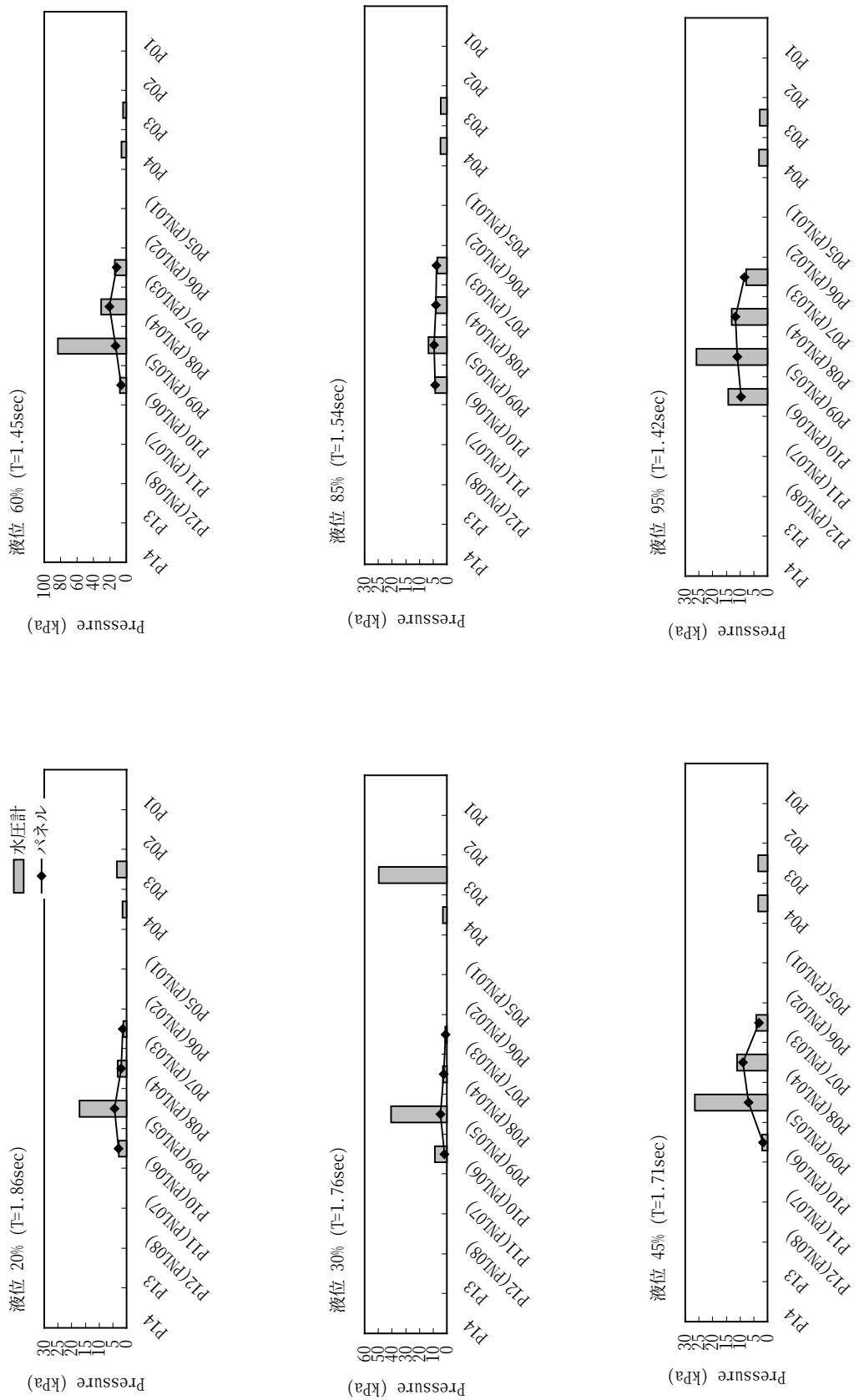
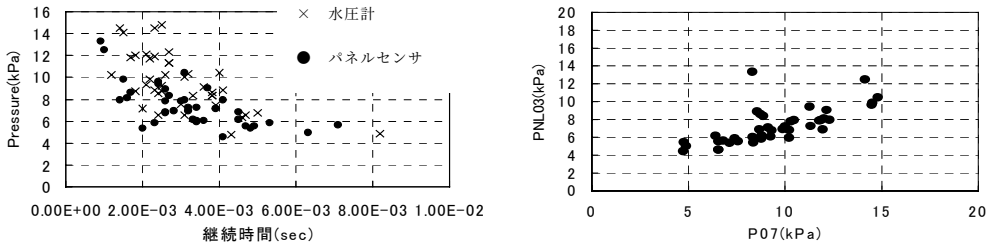
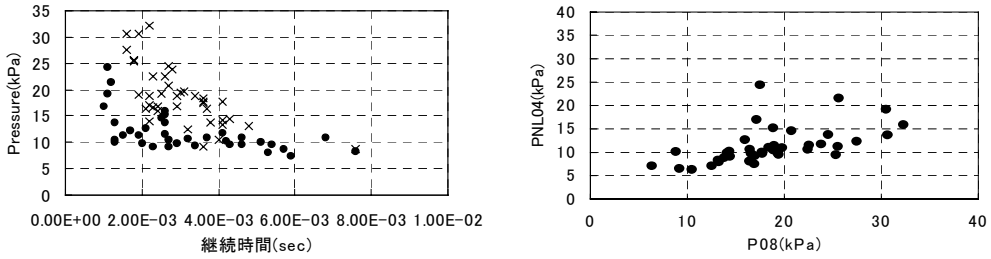


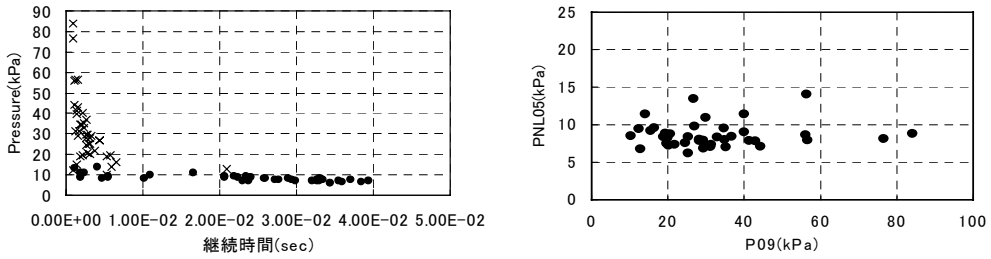
図.5 スロッシング圧力 の分布



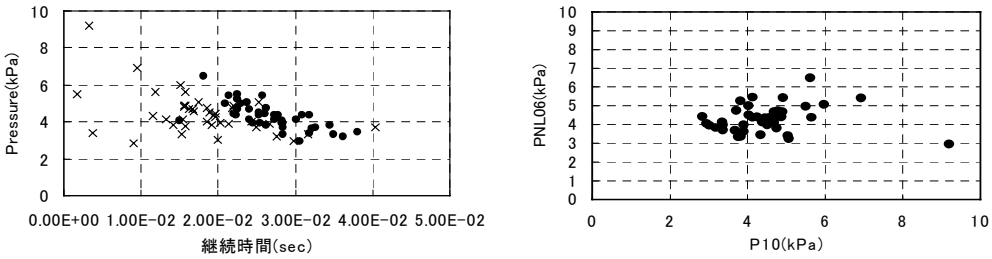
P07,PNL03



P08,PNL04

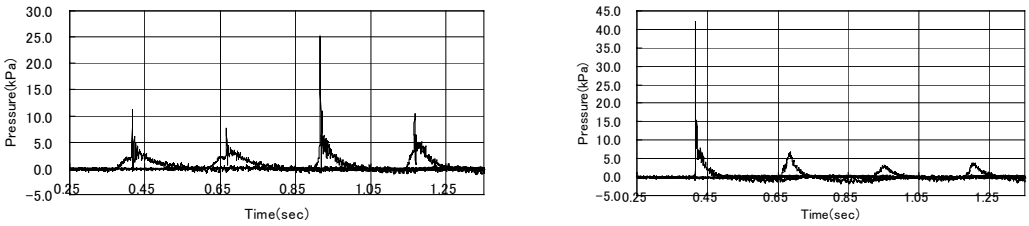


P09,PNL05



P10,PNL06

図.6　水圧計とパネルセンサ



P07　PNL03　P08　PNL04　　P09　PNL05　P10　PNL06

図.7　衝撃圧の生波形（各波形は 0.25sec シフトしている）

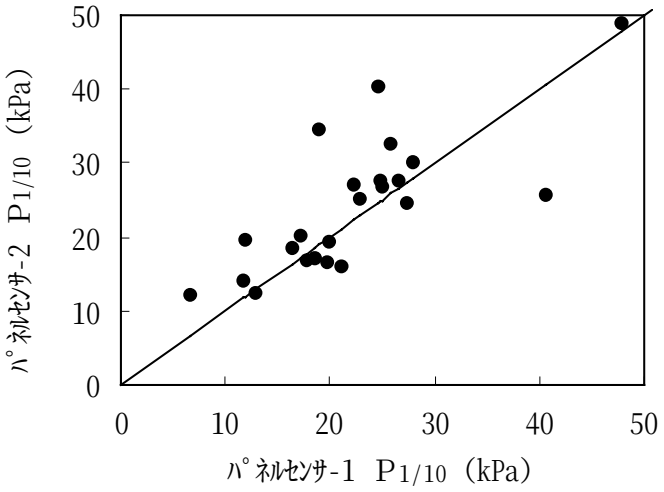


図.8　パネルセンサ１と２の比較

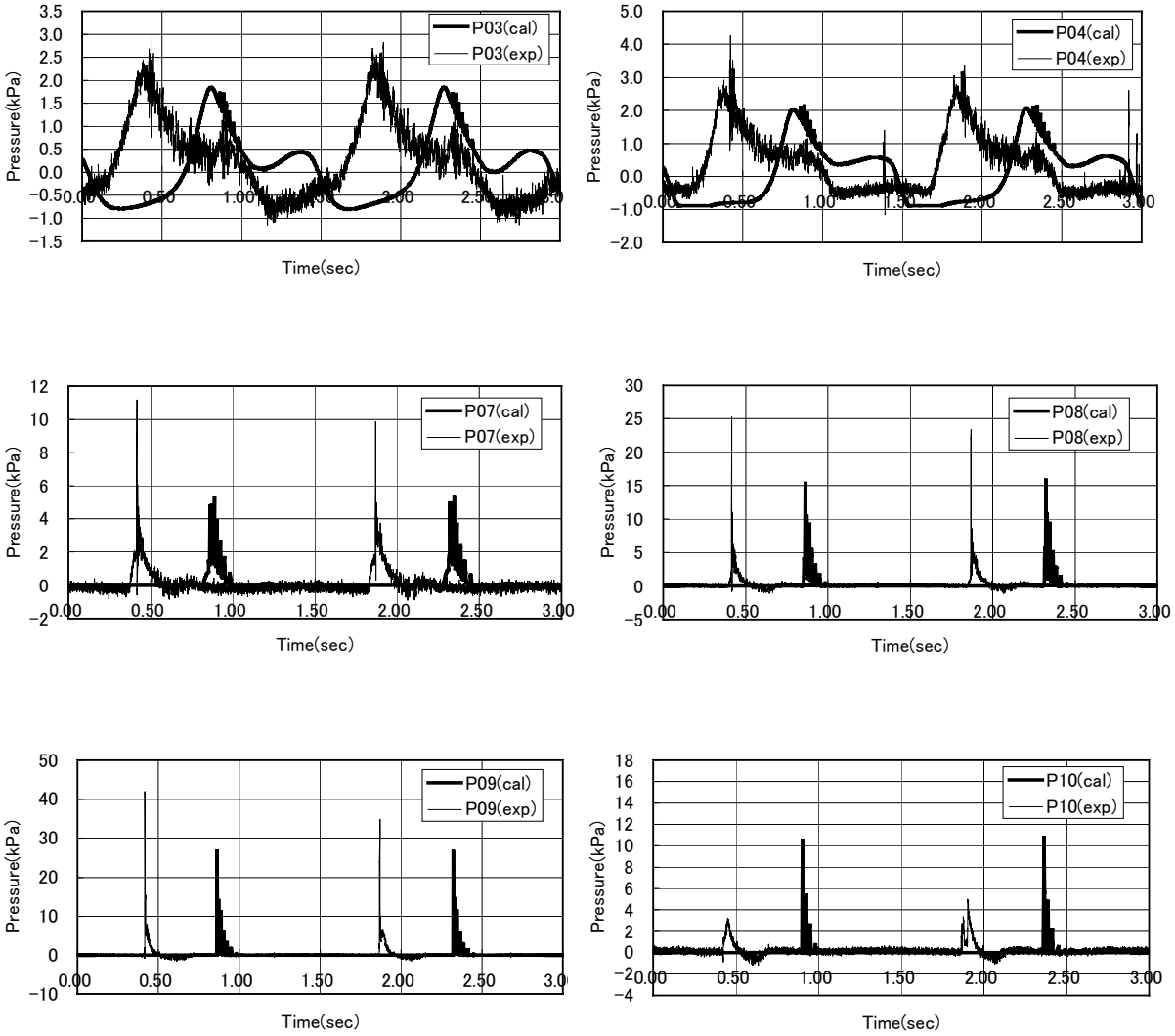


図.9　計測波形と数値解析結果