

船舶の衝突に係る研究開発

— 被衝突船の等価付加質量係数に関する一考察*1 —

塩満 大祐*, 石代 宗之**, 福井 努***

1. 緒言

IACS（国際船級協会連合）の共通構造規則では、船舶の衝突・座礁等に伴う構造強度の喪失を考慮した事故限界状態に対する残存強度要件を定めている。これにより、衝突・座礁時において波浪や内部荷重に耐える十分な船体強度を持つことが求められる。また、水素やアンモニアといった新燃料を搭載した新コンセプト船の検討・実用化には、確率論的リスク評価が必要であり、これに応じてタンクや船体構造の耐衝突・座礁性能評価が重要となる¹⁾²⁾。適切な耐衝突・座礁性能評価ができれば、浸水・沈没のリスクや燃料の漏洩リスクを考慮しつつ、より合理的な船体構造設計やタンクの柔軟な配置が可能となる。また、船舶同士が衝突する場合、衝突に伴う各船体運動に応じて、衝突船の船首部や被衝突船の船体の損傷規模が変化する。したがって、この現象を評価するためには、衝突に伴う船体運動（External dynamics）と船体構造の吸収エネルギー（Internal mechanics）の連成評価が重要となる。

その評価方法として、いくつかの種類があるが、近年の計算機の発展に伴い、非線形有限要素解析（以降、NLFEAと表記）が一般的に用いられる³⁾。しかしながら、External dynamicsにおける船体運動に伴う流体力影響（付加質量等）は、解析コスト低減のため一般的に無視されるか、簡略化されることが多い。簡略化する方法の1つとして、CAM法（Constant Added Mass Method）がある。これは、一定の付加質量を船体の排水質量に付与し、全船衝突・座礁解析を実施する方法である。Minorsky⁴⁾は、衝突時の被衝突船のSway運動の付加質量係数として0.4を提案している。元良ら⁵⁾は、被衝突船の等価付加質量係数（造波減衰力の影響を含む）が、衝突時間が長くなるにつれて0.4より大きくなることを報告している。しかしながら、被衝突船の流体力影響を適切に評価可能な等価付加質量係数の合理的かつ具体的な値については、未だ報告されておら

ず明らかになっていない。

そこで本研究では、満載状態の二重船殻VLCC同士の衝突を対象に、被衝突船のSway運動を解析することで、流体力影響を適切に評価可能な等価付加質量係数について検討する。被衝突船の適切な等価付加質量係数を導出することができれば、より簡易かつ合理的な耐衝突性能評価が可能となる。なお、本検討には、商用のNLFEAプログラムLS-DYNAに実装されている流体構造連成解析方法のMCOLおよびS-ALE（Structured Arbitrary Lagrangian and Eulerian）を使用する。

2. 衝突解析における流体構造連成方法の概要

2.1 MCOL

MCOLは、LS-DYNAの衝突解析における流体力影響を効率的に考慮することができるサブプログラムである⁶⁾。具体的には、付加質量、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力を考慮した衝突解析を実施することができる。付加質量や造波減衰係数は、別途ポテンシャル理論に基づく解析プログラム等を用いて算出する必要がある。

MCOLは、船体を1質点6自由度の剛体と仮定して次の運動方程式を解く⁷⁾。

$$\begin{aligned} [M + M_A][\ddot{x}] + [G][\dot{x}] \\ = [F_W(\dot{x})] + [F_H(x)] + [F_V(\dot{x})] + [F_C] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 M と M_A はそれぞれ、船体の排水質量／慣性マトリックスと周波数無限大時の付加質量／慣性マトリックス、 G はジャイロマトリックス、 F_W 、 F_H 、 F_V 、および F_C はそれぞれ、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力、および接触力を表す。 F_W において、次式に示すメモリー影響を計算する。

$$F_W = - \int_0^t [G(\tau)][\dot{x}(t - \tau) - \dot{x}(0)]d\tau \quad (2)$$

*1 本論文は、著者らが執筆した日本船舶海洋工学会講演会論文集 第34号 449-455頁の転載（一部改変）であり、公益社団法人日本船舶海洋工学会から許可を頂いたものである。

* 技術研究所

** 坂出支部（研究当時：技術研究所）

*** 次世代環境船舶開発センター（研究当時：技術研究所）

ここで,

$$G(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [C(\omega)] \cos(\omega\tau) d\omega$$

$C(\omega)$ は造波減衰係数マトリックスを表す。本研究では、3次元グリーン関数法プログラムを用いて、周波数無限大時の付加質量/慣性マトリックスおよび周波数0.02~2.38rad/sの範囲(0.04rad/s刻み)の造波減衰係数マトリックス $C(\omega)$ を算出した。また、粘性力項において抗力係数 C_D の値を指定する必要があるが、本研究ではVLCCを取り扱うため $C_D = 0.8$ (Sway方向)と仮定した⁸⁾。

2.2 S-ALE

ALE法は、流体構造連成解析方法の1つであり、衝突解析等の複雑な非線形現象に適用することができる。LS-DYNAに実装されているALEは、これまでに船舶の衝突に関する研究に使用されてきた実績がある⁹⁻¹¹⁾。最近では、このALEを高効率化したS-ALEと呼ばれる機能が利用可能である。S-ALEは、並列化効率の向上により、従来のALEより高速化されている。本研究では、このS-ALEを使用する。S-ALEは従来のALEと同様に、構造体をLagrangian要素、流体をEulerian要素でモデル化する。

本研究で利用したモデルをFig. 1に示す。流体として海水と空気をモデル化し、文献¹²⁾を参考に決定した物性値(MAT)および状態方程式(EOS)の値をTable 1に示す。また、流体の全表面にアンビエント要素を配置し、無限領域場を模擬した。

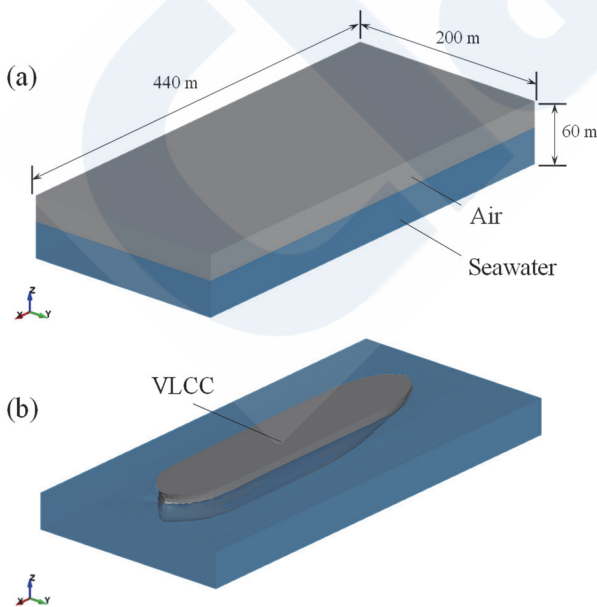


Fig. 1 FE-model for S-ALE: (a) dimensions of fluid domain; (b) VLCC which floats on fluid domain.

Table 1 Material properties for seawater and air.

Seawater		
*MAT NULL	Density, ρ (kg/m ³)	1025
	Pressure cutoff, P_c (Pa)	-100
	Viscosity coefficient, μ (Pa·s)	1.075×10 ⁻³
*EOS GRUNEISEN	Nominal sound speed, C (m/s)	1500
	S1, S2, S3, GAMAO, A, E0	0.0
	V0 (-)	1.0
Air		
*MAT NULL	Density, ρ (kg/m ³)	1.1845
	Pressure cutoff, P_c (Pa)	-10
	Viscosity coefficient, μ (Pa·s)	1.850×10 ⁻⁵
*EOS LINEAR POLYNOMIAL	C0, C1, C2, C3, C6	0.0
	C4, C5 (-)	0.4
	E0 (Pa)	2.533×10 ⁵
	V0 (-)	1.0

2.3 MCOLと従来のALEとの違い

Rudanら¹¹⁾は、MCOLと従来のALEを用いて、衝突時の接触力を模擬した荷重をLPG船に与えることでSway速度について解析し、両者の比較を実施した。結果として、MCOLから得られたSway速度の方が、従来のALEから得られたSway速度より大きくなるということを報告している。LS-DYNAのALEでは、流体解析において抗力計算を実施できないが、一方でMCOLでは簡易的に抗力を考慮することが可能である。その点において両者で違いが存在する。しかしながら、MCOLとALEで差異が生じる具体的な理由について詳細は判明していない。そこで本研究では、各流体力影響評価方法(MCOL, S-ALE, CAM法)を用いて、VLCCに対するSway速度、接触力、吸収エネルギーを解析し、比較検証を実施する。

3. 全船衝突解析

3.1 衝突シナリオ

危険な衝突シナリオとして、衝突船のサイズが被

衝突船と同等以上で、衝突船の運動エネルギーが大きいシナリオが一般的に考えられる。そこで本研究では、衝突船および被衝突船は同一船で、共に満載状態と仮定した。対象船（二重船殻VLCC）の主要目をTable 2に示す。また、Fig. 2に示すように、衝突船の中心線が被衝突船の重心位置に対して直角に衝突すると仮定し、被衝突船がSway運動するように設定した。衝突船の船速は3, 6, 9ktの3種類とし、被衝突船は停止状態とした。

Table 2 Principal particulars of VLCC.

Dimensions	Value
Length, L_{oa} (m)	333
Length, L_{pp} (m)	324
Breadth, B (m)	60
Draft, d (m)	20.5
Displacement, Δ (ton)	3.418×10^5

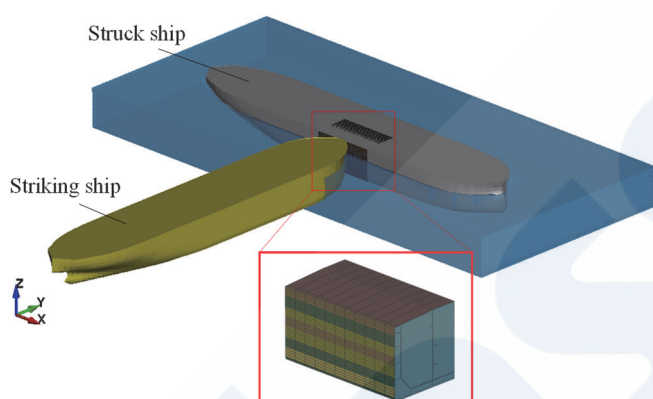


Fig. 2 FE-model for S-ALE between two ships in collision.

3.2 解析モデルおよび解析条件

本研究では、解析にNLFEAプログラムLS-DYNA (ver. mpp d R12.0.0) を使用した。Fig. 2にS-ALEを使用した場合の衝突船と被衝突船のFEモデルを示す。衝突船と被衝突船の全船モデル（船体形状のみ）は、共に剛体（1質点6自由度）とした。また、被衝突船の船体中央部右舷側の船長方向1タンク範囲を弾塑性体で別途モデル化した。その船体中央部右舷側モデルの横隔壁（剛体）を、剛体同士を結合できるLS-DYNAの*CONSTRAINED RIGID BODIESを用いて全船モデル（剛体）に結合した。このように結合した理由は、流体構造連成の解析上の制約である。すなわち、S-ALEを使用するにあたり、構造体要素サイズと流体要素サイズをほぼ等しくする必要があるが、弾塑性体部の要素サイズは非常に細かい（約100mm×100mm）

これと同サイズの流体要素を用いることが解析コストの観点から不可能なためである。したがって、より大きな要素サイズ（約4m×4m）を適用した全船モデルに、船体中央部右舷側モデルを取り付け、全船モデルのみが流体要素と連成することにより、効率的な流体構造連成解析が可能となる。ここで、全船モデルと船体中央部右舷側モデルの要素が重なるものの、衝突船の船首部が被衝突船の船体中央部右舷側モデルのみと接触するよう（全船モデルとは接触しないよう）設定することにより、衝突解析におけるExternal dynamicsとInternal mechanicsの連成評価が可能となる。この方法は、従来研究^{10,11}において用いられている。衝突船と被衝突船の解析条件をまとめた表をTable 3に示す。なお、全船モデルの要素サイズ（約4m×4m）は、S-ALEにおける収束計算を実施した上で決定し、船体中央部右舷側モデルの要素サイズ（約100mm×100mm）は、従来研究¹³を参考に決定した。

船体中央部右舷側モデルの全部材をシェル要素（4節点のBelytschko-Tsay要素）で作成し、要素数は約264万要素となった。真応力-真ひずみ関係に基づく材料定数等をTable 4に示す。材料構成則としてLS-DYNAの*MAT PIECE-WISE LINEAR PLASTICITY (024) を使用し、ひずみ速度依存性をCowper-Symondsモデルを用いて考慮した。また、相当塑性ひずみがTable 4に示す破断ひずみの値に達したとき、要素が削除されることで当該部材の破断を表現した。この破断ひずみの値は、メッシュサイズを勘案しつつ従来研究¹³を参考に決定した。静的/動的摩擦係数は0.3とした。本研究では、各流体力影響評価方法の相対比較および等価付加質量係数の検討を目的とするため、上記の弾塑性体部の材料定数等については簡易的に仮定したことに注意が必要である。

Table 3 Analysis condition.

	Struck ship	Striking ship
Loading condition	Full	Full
Motion	6-DoF	Surge
Velocity (kt)	0.0	3.0, 6.0, 9.0
Hull (including bow)	Rigid	Rigid
Tank	Elasto-plastic	-
Coupling with fluid	Hull	-

Table 4 Material properties for the tank (true stress-strain)¹³⁾.

Steel grade	MS	HT32	HT36
Yield stress, σ_y (MPa)	235	315	355
Ultimate tensile stress, σ_u (MPa)	450	530	560
Critical failure strain, ϵ_{cr} (-)	0.20	0.167	0.15
Density, ρ (kg/m ³)	7850	7850	7850
Young's modulus, E (GPa)	206	206	206
Poisson's ratio, ν (-)	0.3	0.3	0.3
Tangent modulus, E_t (MPa)	1085	1303	1385
Strain rate parameter, C (-)	40.4	3200	3200
Strain rate parameter, P (-)	5.0	5.0	5.0

4. 解析結果

4.1 Sway速度（剛体）

前述したように、LS-DYNAのMCOLと従来のALEで解析したSway速度に差異が生じることが報告されている¹¹⁾。そこで、まず初めに、全船モデル（剛体、1質点6自由度）のみのSway速度について、各流体力影響評価方法（MCOL, S-ALE, CAM法）を用いて解析し、得られた結果を比較した。本研究では、船体重心にFig. 3に示すような衝突時の接触力を模擬した荷重（sin波、作用時間5秒）をSway方向に与えることで対象船を運動させた。この荷重は、衝突船の前進速度が6ktのときの全船衝突解析で得られた接触力を模擬している。

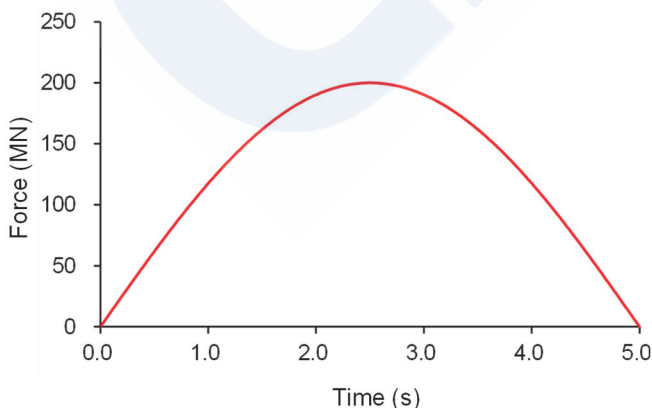


Fig. 3 Force assumed in sine wave similar to contact force during collision.

Fig. 4は、各流体力影響評価方法におけるSway速度の比較結果を示す。まず初めに、MCOLとS-ALEの結果は、良好に一致していることが確認できる。従来研究において、これらは一致しないと報告されていたが、本研究では一致した。この違いが生じた理由の詳細は判明していないが、従来研究と本研究における船種等の違いが一因と推定される。また、前述したとおりLS-DYNAのALE（S-ALEを含む）では抗力計算を実施できないが、MCOLでは簡易的に抗力を考慮することが可能である。ただし、本解析においてS-ALEとMCOLのこの違いがSway速度に与える影響は小さいと考えられる（詳細は後述する）。続いて、CAM法を用いた場合、等価付加質量係数の大きさが大きくなるにつれてSway速度が小さくなることが確認できる。これは等価付加質量係数が大きくなると実質的に排水質量が大きくなるため、当然の結果である。また、等価付加質量係数が0.4のCAM法の結果は、3秒程度までMCOLやS-ALEの結果と一致していることが確認できる。元良ら⁹⁾は、衝突時間が短い場合、等価付加質量係数0.4を用いることで流体力影響を評価することができると報告しているが、それと同様の傾向となった。一方で、時間の経過とともに、MCOLやS-ALEから得られた速度は低下するのに対し、CAM法から得られた速度は、ある一定の値に収束することが確認できる。これは、MCOLやS-ALEでは時間変化する造波減衰力の影響（メモリー影響）を考慮しているのに対し、CAM法では減衰影響を等価付加質量係数に含めた一定値として考慮しているためである。これを裏付ける結果をFig. 5に示す。

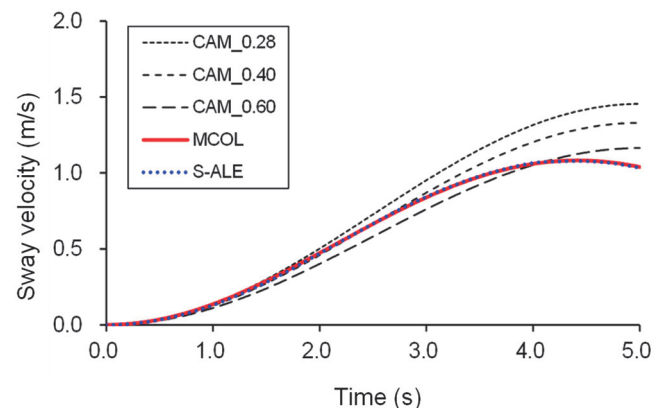


Fig. 4 Sway velocity of VLCC obtained by FEA with MCOL, S-ALE, and CAM. Equivalent added mass coefficients in CAM are 0.28 (infinite frequency), 0.40, and 0.60.

Fig. 5は、MCOLにおける各流体力影響（付加質

量、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力）をすべて考慮した場合と、それぞれ考慮しない場合のSway速度を表している。本解析において、復原力と粘性力（抗力）の影響は、非常に小さいことが確認できる。また、時間の経過とともに造波減衰力の影響（メモリー影響）が大きくなることを確認できる。このため、等価付加質量係数を用いたCAM法は、時間の経過とともにMCOLやS-ALEから得られたSway速度と差異が生じることになる。この差異が、衝突時の被衝突船の吸収エネルギーに、どの程度の影響を与えるのか調査が必要であると考えられる。当該調査結果を次節に示す。

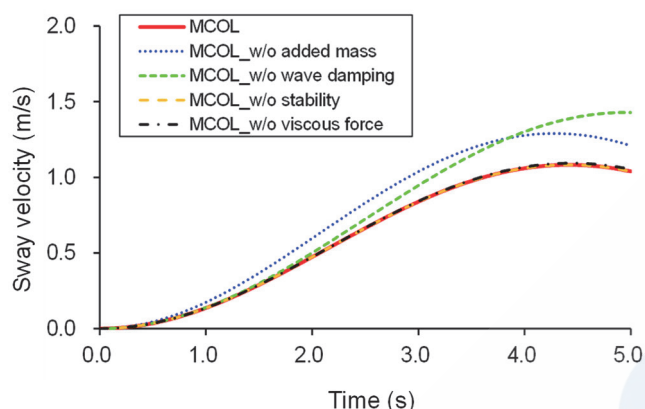


Fig. 5 Hydrodynamics effects on sway velocity of VLCC obtained by FEA with MCOL.

4.2 Sway速度, 接触力, 吸収エネルギー（弾塑性体）

船体中央部右舷側モデル（弾塑性体）を全船モデル（剛体, 1質点6自由度）に取り付け, 各流体力影響評価方法（MCOL, S-ALE, CAM法）を用いて全船衝突解析を実施した。ただし, 本研究では, 被衝突船のみに対して流体力影響を考慮している。衝突船はSurge運動のみ可能であり, 流体との連成は考慮していない。本研究では, 被衝突船の等価付加質量係数の検討に主眼を置いているため, 衝突船の流体力影響の考慮については今後の課題としたい。

まず初めに, Fig. 6に衝突船の前進速度が6ktの場合の, S-ALEにおける解析終了時の様子を示す。図より自由表面が攪乱されている様子が確認できる。

次に, Fig. 7に衝突船の前進速度が3, 6, 9ktの場合の, S-ALEにおける解析終了時の被衝突船の弾塑性体部のダメージの様子（変形および相当塑性ひずみ分布）を示す。衝突船の前進速度が大きくなるにつれて被衝突船の変形が大きくなることを確認できる。本研究では, 衝突船の船首部を剛体としたため, 当該衝突シナリオにおいて被衝突船に発生した変形・ダメージは, 衝突船を弾塑性体でモデル化

した場合に比して過大であることに留意を要する。

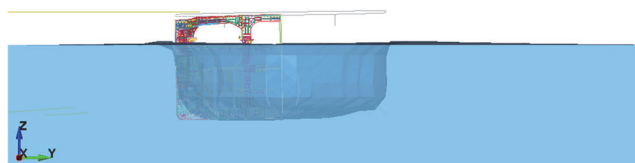


Fig. 6 Sway motion of the struck ship and disturbed fluid surface obtained by NLFEA with S-ALE at final time of simulation. Surge velocity of the striking ship is 6 kt.

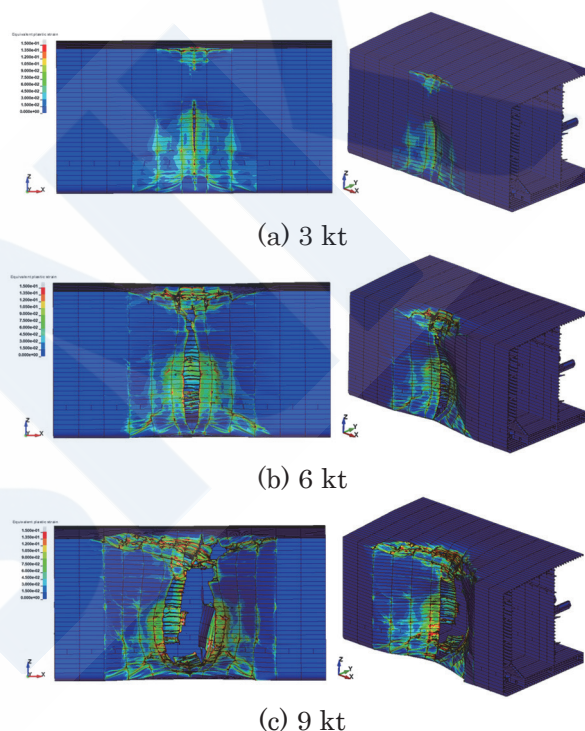
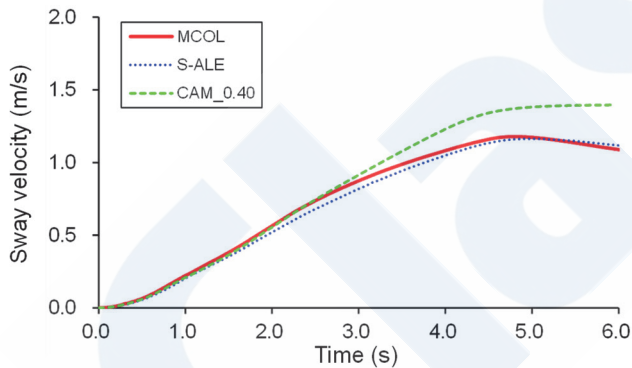


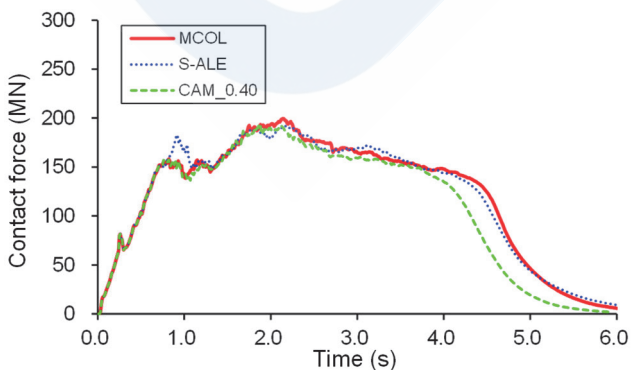
Fig. 7 Structural damage (deformation and equivalent plastic strain) of the struck ship obtained by NLFEA with S-ALE at final time of simulation. Surge velocity of the striking ship: (a) 3 kt; (b) 6 kt; and (c) 9 kt.

続いて, Fig. 8(a)に衝突船の前進速度が6ktの場合の, 各流体力影響評価方法から得られた被衝突船のSway速度の比較を示す。図より, MCOLとS-ALEから得られたSway速度は, 良好に一致していることが確認できる。前述した全船モデルのみの場合と同様に, 弾塑性体を含めた衝突解析においてもMCOLとS-ALEでほぼ等しい結果を得ることが可能であると言える。一方で, CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いた場合, 衝突時間3秒程度までMCOLやS-ALEの速度と等しいが, それ以降は, MCOLやS-ALEの速度より大きくなることを確認できる。これは前述したように, 減衰影響を一定値として考慮していることに起因する。続いて, Fig.

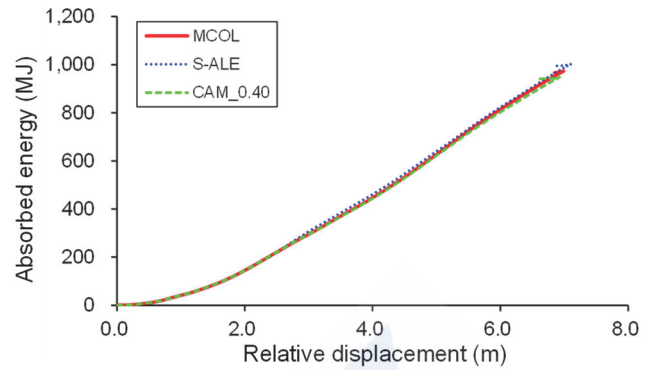
8(b)に接触力の時刻歴を示す。図より、すべての流体力影響評価方法で4秒程度まで、ほぼ等しい接触力履歴となっていることが確認できる。ただし、1秒辺りでS-ALEの傾向が、他の傾向と異なっている。これは、S-ALEのみ重力を考慮した解析を実施しており、この影響により被衝突船が高さ方向にわずかに変位し、衝突船との接触箇所が変化したためである。これを裏付けるために、被衝突船の高さ方向の変位を拘束した解析を別途実施し、接触力履歴が他の流体力影響評価方法（MCOLとCAM法）と一致することを確認した。4秒以降にCAM法のみ接触力が小さくなっているが、これは前述したCAM法での被衝突船のSway速度がMCOLとS-ALEより大きくなるためである。次に、得られた接触力を貫入量（本研究では衝突船と被衝突船の相対変位）で積分することによって算出した吸収エネルギーをFig. 8(c)に示す。結果として、衝突終了時（本研究では衝突船と被衝突船の速度が一致するときと定義）の吸収エネルギーは、CAM法（等価付加質量係数0.4）を1.00として、MCOLが1.02、S-ALEが1.05となった。MCOLとS-ALEの差は3%程度であり、良好に一致している。一方で、CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いると、衝突船の前進速度が6ktの場合、耐衝突性能をわずかながら非安全側に推定してしまうことを確認した。



(a) Sway velocity



(b) Contact force



(c) Absorbed energy

Fig. 8 Sway velocity, contact force, and absorbed energy obtained by NLFEA with MCOL, S-ALE and CAM (Equivalent added mass coefficient is 0.4). Surge velocity of the striking ship is 6 kt.

最後に、上記の各流体力影響評価方法を用いた衝突解析のCPU時間（8CPU, MPP）は、CAM法とMCOLで約110時間、S-ALEで約120時間であった。CAM法とMCOLでは、ほぼ差が無かったため、MCOLは解析コストを増加させることなく流体構造連成解析が可能であると言える。また、S-ALEは、他の方法と比較して10時間程度の増加にとどまっており、解析時間が長くなることがデメリットであると考えられたが、本研究の解析条件においては問題なく使用できることを確認した。

4.3 解析解を用いた等価付加質量係数の算出

MCOLとS-ALEを用いた衝突解析で得られた吸収エネルギーから、等価付加質量係数を評価するために、運動量保存則と運動エネルギー損失 ΔE_k を考える。まず、衝突船が被衝突船の重心位置に直角に衝突すると仮定すると、運動量保存則が次式で表される。

$$m_1(1 + A_1)v_1 = [m_1(1 + A_1) + m_2(1 + A_2)]v_c \quad (3)$$

ここで、 m_1 と m_2 は衝突船と被衝突船の排水質量、 A_1 と A_2 は衝突船と被衝突船の等価付加質量係数、 v_1 は衝突船の前進速度、 v_c は衝突終了時の衝突船と被衝突船の共通速度である。続いて、衝突終了時までの運動エネルギー損失 ΔE_k は、次式で表される。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m_1(1 + A_1)v_1^2 - \frac{1}{2}[m_1(1 + A_1) + m_2(1 + A_2)]v_c^2 \quad (4)$$

式(3)を共通速度 v_c について変形し、式(4)に代入することで次式を導出できる。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \frac{m_1(1+A_1)m_2(1+A_2)}{m_1(1+A_1)+m_2(1+A_2)} v_1^2 \quad (5)$$

式(5)はMinorsky⁴⁾によって導出された。そして、本研究では、衝突船と被衝突船は同型船のため、排水質量は $m_1 = m_2$ 、衝突船の等価付加質量は考慮していないため $A_1 = 0$ となり、それらを代入し、まとめると式(5)は次式となる。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{1+A_2}{2+A_2} \right) m_1 v_1^2 \quad (6)$$

結果として運動エネルギー損失 ΔE_k は、衝突船の初期運動エネルギー $m_1 v_1^2/2$ と被衝突船の等価付加質量係数 A_2 で表される。

まず初めに、式(6)と、CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いたNLFEAから得られた運動エネルギー損失を比較することによって解析精度の検証を実施した。ここで、本研究での運動エネルギー損失は、言い換えると被衝突船の衝突終了時の内部エネルギーや接触（摩擦）エネルギーの吸収エネルギーであるため、衝突終了時のCAM法の吸収エネルギー（Fig. 8(c)における最大値）と式(6)で計算した値を比較した。衝突船の前進速度が6ktの場合、CAM法から得られた吸収エネルギーの値は948MJ、式(6)の値は950MJであり、誤差約0.2%で良好な一致を示した。結果として、本研究での衝突解析結果は妥当であると言える。以降、式(6)から得られる値は、CAM法を用いたNLFEAから得られる値と等しいとする。CAM法を用いたNLFEAは、衝突船の前進速度6ktの場合のみ実施した。Table 5に、衝突船の前進速度を変化させた場合の、MCOLとS-ALEを用いたNLFEAから得られた吸収エネルギーを、式(6)で計算した値（等価付加質量係数0.4）で無次元化した結果を示す。まず初めに、MCOLとS-ALEの結果を比較すると、衝突船の前進速度が変化しても、差が3%程度であり、両者でほぼ等しい結果が得られたことが確認できる。そして、式(6)で計算した値（等価付加質量係数0.4）は、最大で約8%、耐衝突性能を非安全側に推定してしまうことが確認できる。したがって、衝突船の前進速度等の変化に関わらず、等価付加質量係数を0.4一定で取り扱うことは適切でないと言える。

Fig. 9に衝突船の初期運動エネルギー $m_1 v_1^2/2$ に対するMCOLとS-ALEから得られた吸収エネルギーを示す。同図より、初期運動エネルギーと吸収エネルギーは比例関係にあることが確認できる。これは式(6)からも確認できる。そして、MCOLとS-ALE

の結果の近似直線から傾きを取得し、式(6)の右辺の等価付加質量係数項 $(1+A_2)/(2+A_2)$ と等しいとすることで、MCOLとS-ALEの結果から逆算した等価付加質量係数を得ることができる。結果として、MCOLから逆算した等価付加質量係数は0.57、S-ALEは0.68となり、従来使用されてきた等価付加質量係数0.4より大きくなることを確認した。これは、緒言で述べたように元良ら⁹⁾の報告と一致する。ここで、MCOLとS-ALEの等価付加質量係数0.57と0.68で、約20%の差が存在するが、吸収エネルギーは、前述したように両者で約3%の差であるため、等価付加質量係数の変化が吸収エネルギーの変化に与える影響は小さいと考えられる。したがって、本研究での衝突条件等において、対象船の衝突終了時までの吸収エネルギーを評価する場合、等価付加質量係数を例えば0.7とすることで、耐衝突性能を合理的かつ安全側に評価できると考えられる。

Table 5 Energy of the struck ship obtained by NLFEA with MCOL and S-ALE.

Surge velocity of striking ship (kt)	Energy* (MCOL/Eq. (6))	Energy* (S-ALE/Eq. (6))
3.0	0.99	1.04
6.0	1.02	1.05
9.0	1.05	1.08

*Note: Energy represents the value of absorbed energy obtained by NLFEA with MCOL or S-ALE divided by Eq. (6) with equivalent added mass coefficient 0.4.

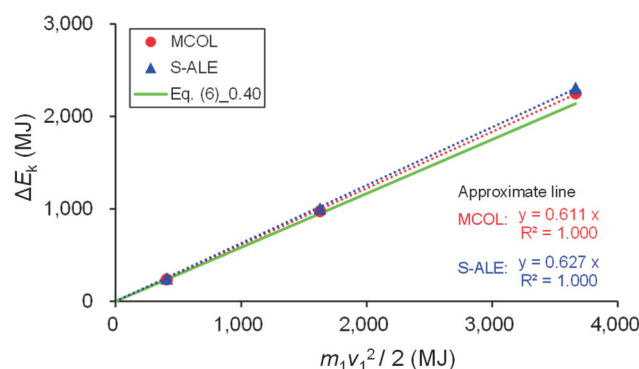


Fig. 9 ΔE_k obtained by NLFEA with MCOL and S-ALE.

5. 結言

本研究では、商用のNLFEAプログラムLS-DYNAを用いて、満載状態の二重船殻VLCC同士の

衝突に対する流体構造連成解析 (MCOLおよびS-ALEを使用) を実施し, 被衝突船のSway運動に対する等価付加質量係数について検討した。被衝突船の適切な等価付加質量係数を導出することで, より簡易かつ合理的な吸収エネルギーの評価が可能となる。得られた知見を以下に示す。

- (1) 被衝突船のSway速度評価において, LS-DYNAで使用できるMCOLとS-ALEで, ほぼ等しい結果を得ることが可能である。
- (2) 従来使用されている等価付加質量係数0.4を用いて被衝突船の衝突終了時の吸収エネルギーを評価すると, 衝突船の前進速度によっては, MCOLやS-ALEから得られた吸収エネルギーより小さく推定してしまい, 耐衝突性能を非安全側に評価する可能性がある。
- (3) 等価付加質量係数の変化が, 吸収エネルギーの変化に与える影響は小さく, 耐衝突性能を合理的かつ安全側に評価するためには, 被衝突船 (二重船殻VLCC) のSway運動の等価付加質量係数を0.7程度に設定することが妥当である。

本研究では, 被衝突船として二重船殻VLCCのみを取り扱ったため, 今後の課題として, 船種等を変更した衝突解析の実施が挙げられる。

参考文献

- 1) DNV: The tank punch test.
<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/The-tank-punch-test.html>, accessed on 21st February 2022.
- 2) Lloyd's Register: Guidance notes for assessment for the location of low-flashpoint fuel tanks, July 2016.
- 3) J. W. Ringsberg et al.: MARSTRUCT benchmark study on nonlinear FE simulation of an experiment of an indenter impact with a ship side-shell structure, *Marine Structures*, Vol 59, pp. 142-157, 2018.
- 4) V. U. Minorsky: An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships, *Journal of Ship Research*, Vol 3 (2), pp. 1-4, 1959.
- 5) 元良誠三ら: 衝突時の等価付加質量について, *日本造船学会論文集*, 第126号, pp. 141-152, 1969.
- 6) 遠藤久芳, 山田安平: 衝突・座礁のCAE, *日本造船学会誌*, 第876号, pp. 763-767, 2003.
- 7) H. L. Sourne et al.: LS-DYNA applications in shipbuilding, 4th European LS-DYNA Users Conference, pp. 1-16, 2003.
- 8) K. G. Oh, K. Hasegawa: Prediction of ship hull hydrodynamic force and moment in low speed, *日本船舶海洋工学会講演会論文集*, 第15号, pp. 201-204, 2012.
- 9) S. G. Lee et al.: Full-scale ship collision, grounding and sinking simulation using highly advanced m&s system of fsi analysis technique, *Procedia Engineering*, Vol 173, pp. 1507-1514, 2017.
- 10) M. Song et al.: Fluid-structure interaction analysis of ship-ship collisions, *Marine Structures*, Vol 55, pp. 121-136, 2017.
- 11) S. Rudan et al.: Numerical study on the consequences of different ship collision modelling techniques, *Ships and Offshore Structures*, Vol 14, pp. 387-400, 2019.
- 12) LS-DYNA AWG: Modeling Guidelines Document, Version 13-1, 2013.
https://www.predictiveengineering.com/sites/default/files/awg_ls-dyna_modeling_guidelings_document_v13-1.pdf, accessed on 26th January 2022.
- 13) O. Ozguc: Numerical assessment of FPSO platform behaviour in ship collision, *Transactions on Maritime Science*, Vol. 9 (2), pp. 161-186, 2020.