桁構造の崩壊挙動を再現するISUM要素の開発と二重底構造の崩壊解析への適用

技術研究所　石橋　公也

1. はじめに

本会では、ホールドに積載された貨物より受ける荷重、荒れた海象に遭遇した時に受ける波浪荷重等に対して船体構造がどこまで耐えることができるか、或いは、どのように崩壊するかを調査する最終強度に関する研究を継続的に取り組んでいる。本研究の目標の一つは、最終強度の観点からの現行の船体構造規則が要求する安全性レベルの検証を行うことであり、これに必要となる基礎的な知見を得るため種々の研究を進めている。現在、IMOでは、GBS(Goal Based Standard)と呼ばれる階層的に構成された船舶の安全性に関する基準を作成している。GBS では、信頼性工学の思想を取り入れられており、船体構造が崩壊する確率を許容できるある一定範囲に抑える等の具体的な目標値（Goal）が GBS の階層構造の上流に規定され、船級協会の船体構造規則がこれを満足するよう策定されることになる。本研究は、このように GBS の上流で設定される目標と具体的な構造寸法が導かれる船級の船体構造規則の間を結ぶ技術を獲得するための研究を進めているとも言える。

現在、最終強度に関する研究として、幾つかのプロジェクトを同時に進めているが、これらは２つに分類できる。一つは、船体構造に対して座屈及び降伏が考慮できる非線形 FEM による崩壊解析を実施して、船体構造の崩壊強度及び挙動を調査するものである。この研究で実施される非線形 FEM による崩壊解析は非常に大規模な計算となる。従来では、規模の大きい研究所や大学のみが所有するような大型コンピュータでない限り解析不可能であったが、最近では、一般的なワークステーションを用いれば、数日間かけて計算ができるようになっており、これまでに知ることができなかった崩壊に関する知見が得られることが期待できる。こちらの研究成果については、来年度以降に公表していく予定である。

もう一方の研究は、本論の主題である ISUM(理想化構造要素法)と呼ばれる効率良く崩壊解析を行える解析ツールの開発に関する研究である。ISUM を開発することで容易に大規模構造体の崩壊解析が行え、設計時での構造体の最終強度の評価を可能としたり、幾通りかの構造設計変更を与えたシリーズ計算により構造体の最終強度に関する貴重な知見を得られたりすることを期待している。以後、ISUM の概要及び研究内容を詳しく紹介する。2 章では、ISUM の基本概念及び利点を述べ、3 章では、桁構造の応答を再現する ISUM 要素の開発に関する研究、4 章では、ISUM による二重底構造の崩壊解析に関する研究を紹介する。

2. ISUM（理想化構造要素法）について

ISUM とは理想化構造要素法（Idealized Structural Unit Method）の略であり、比較的簡便に構造体の降伏及び座屈を伴う崩壊現象を解析できるツールである。ISUM による構造体の崩壊解析では、非線形 FEM と同様に対象構造を要素に分割するが、通常の非線形 FEM と異なる点は、遥かに大きな要素を用いることである。座屈及び降伏により発生する材料的及び幾何学的な非線形性は、ISUM 要素の剛性を表す算式に含められ理想化されている。大きな要素を用いるということは、モデルの節点数が減り、解として求めるべき未知変位数を減らすことを意味し、計算量を大幅に少なくすることができる。

ISUMの利点の一つとして、適用範囲の広さが挙げられる。同様に最終強度を比較的簡易に推定する手法として既に船体構造規則に取り込まれているSmithの手法は、理想的な縦曲げ応答を示す船体横断面を仮定することで解析を可能としており、他の構造に利用することはできない。一方、ISUMの基本理論は、FEMと同一であるため、要素を組み合わせることで様々な構造に適用することができる。これまでに、防撓パネル[1) 2) 3) 4)]、船体横断面[5)]、4 章に示すように二重底構造[6)]に対して適用され良好な結果が得られている。

前章に述べたように、近年では一般的なワークステーションでも大規模構造体の非線形 FEM による崩壊解析が行えるようになってきたが、解析に数日間と非常に長い時間を要する、さらに、座屈或いは降伏後の構造体の複雑で著しい変形を表現できるよう詳細なメッシュ分割をした構造モデルが必要となるため、モデル作成にも相当な工数を要する。したがって、このような非線形 FEM による崩壊解析の用途は、研究や損傷事故解析などに限られる。ISUM は、現在の船体構造規則で要求される直接強度計算で用いる比較的荒いメッシュサイズの構造モデルで崩壊解析が行え、また、非線形 FEM よりも計算時間は遥かに短くなることから、設計段階における最終強度確認を可能とするツールとしても期待ができる。

3. 桁構造の崩壊挙動を再現する ISUM 要素の開発

3.1 非線形 FEM 解析によるシリーズ計算

桁構造の崩壊モードの一つである純曲げ荷重下での矩形パネルの崩壊挙動を調べることを目的に、表 1 に示す板のアスペクト比及び板厚を変化させたモデルを用いてシリーズ計算を実施した。

境界条件は、面外変形に対して 4 辺単純支持とし、両長辺には図 1 に示すように直線保持の条件を与えた上で、支持点 A,B に等大逆向きに強制面内回転角 θ を与えた。また、降伏および座屈のため中性軸が移動した場合にも、軸力を生じさせないため、点 B の x 方向の変位をフリーにしている。

3.2 解析結果及び考察

解析結果の一例として、アスペクト比 2、板厚 15*mm* のパネルが最終強度に達した時点の変形図を図 2 に示す。曲げの圧縮側となっているパネル上部において座屈による面外変形が発達する典型的な曲げ座屈のモードが観察できる。

次に、曲げモーメントを与えた辺における回転角とモーメントの関係を図 3 及び図 4 に示す。回転角とモーメントは、それぞれ初期降伏を起こす回転角とモーメントで無次元化している。板厚が増加すると、座屈強度、最終強度だけでなく、最終強度となる回転角も変化し、増加する。また、最終強度後の耐力低下は、それほど急激ではない。

次に、パネルの面外たわみモードの推移について調査した。図 5, 6 におけるA_{11}、A_{12}、A_{13}、A_{14}は、パネル長辺方向にそれぞれ 1 半波から 4 半波、パネル短辺方向に 1 半波のモードの振幅を表している。

表 1 Model for analysis

Aspect ratio / Thickness	2.0	3.0
10mm	α2t10	α3t10
15mm	α2t15	α3t15
20mm	α2t20	α3t20

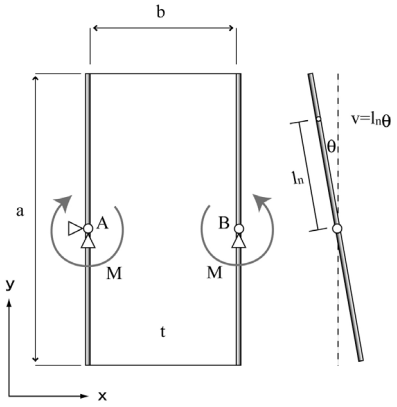


図 1 Panel model

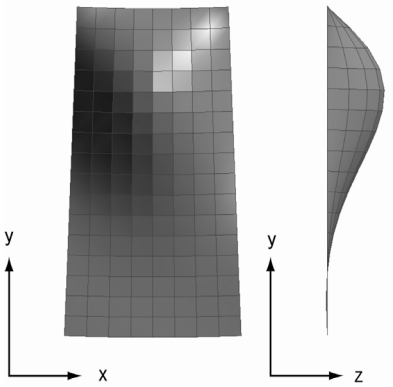


図 2 Deformation of panel under in-plane bending (α2t15)

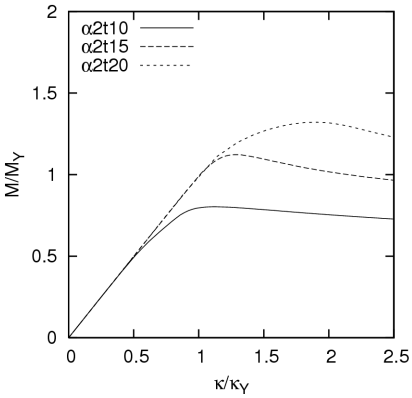


図 3 Moment-curvature relationship (aspect ratio = 2.0)

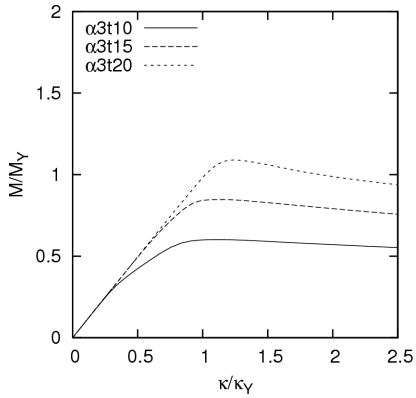


図 4 Moment-curvature relationship (aspect ratio = 3.0)

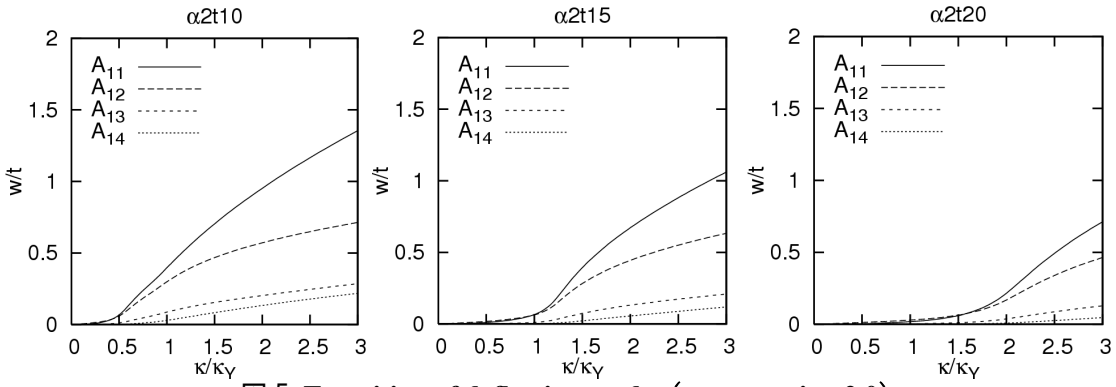


図 5 Transition of deflection mode（aspect ratio =2.0）

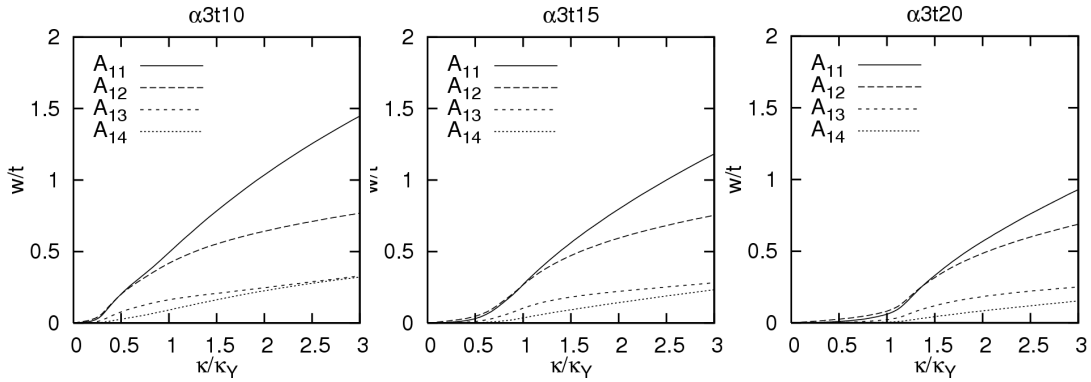


図 6 Transition of deflection mode (aspect ratio = 3)

すべての解析条件において、1 半波モードと 2 半波モードの発達が顕著であることが確認できる。この 2 つのモードが、図 2 のような典型的な曲げ座屈の形状を形づくる。また、3 半波以上のたわみモードの振幅もかなり大きくなるが、ほとんどの場合、発達しはじめるタイミングが最終強度以後であり、主に降伏によるたわみ形状の変化を示しているものと考えられる。

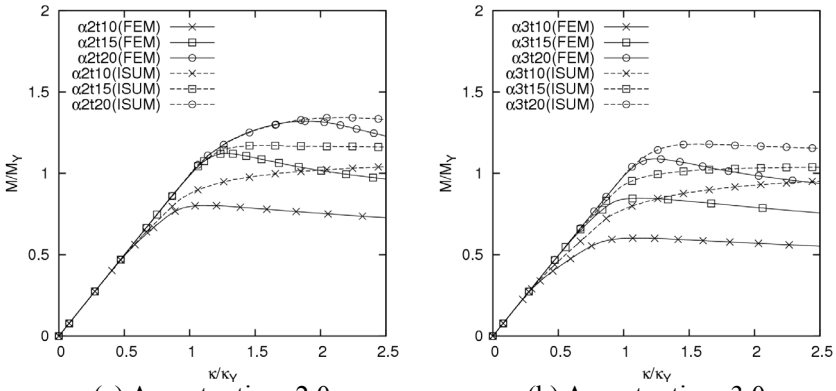
3.3 曲げ座屈を表すたわみ関数

ISUM は、座屈により生ずる板のたわみを関数で表し、たわみの大きさを表すパラメタを節点変位と同様の独立な自由度として扱う。従来の ISUM 要素で考慮していたパネルのたわみ関数は、1 半波、3 半波などの対称成分のみであったのに対し、面内曲げ荷重下のおけるたわみ形状は、2 半波、4 半波の非対称成分も含まれるため、たわみ関数として、多くのたわみモードを考慮しなければならない。そこで、複数のたわみモードを有する形状を一般表記した(1)式をたわみ関数として採用した。

$$u(x,y) = \sum_{i}^{n} A_{1i} \sin\frac{\pi}{a}x \sin\frac{i\pi}{b}y \qquad (1)$$

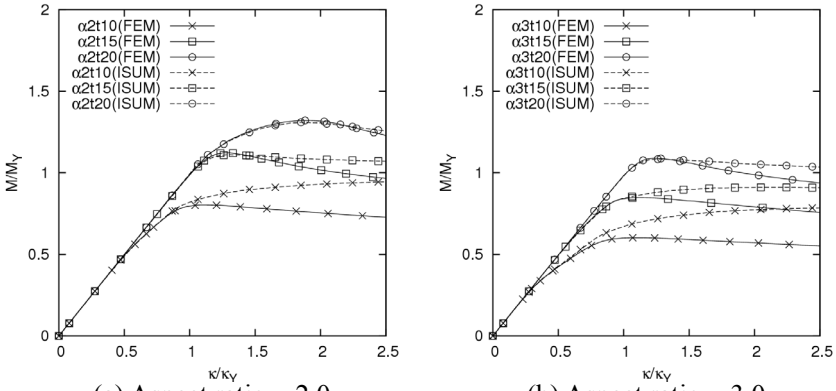
本式を、大たわみを考慮した Airy 関数に代入することにより、たわみ振幅−面内ひずみ関係を定式化しておけば、解析プログラム上で考慮するたわみモードの数を任意に変更することができる。

当該たわみ関数を用いた ISUM 要素を用いて、3.1 に示す解析条件と同一の ISUM 解析を行った。ISUM 要素には、7x21 個の剛性積分点を設け、各積分点で Mises の降伏条件により降伏を判定している。また、後に述べる非適合変位モードを考慮している。図 7 及び図 8 は、それぞれ 2 半波までと 4 半波までを考慮したたわみ関数を用いた ISUM 解析と FEM 解析の回転角–モーメント関係での比較である。



(a) Aspect ratio = 2.0 (b) Aspect ratio = 3.0

図 7 Bending Moment – curvature relationship considering 1 and 2 half waves modes



(a) Aspect ratio = 2.0 (b) Aspect ratio = 3.0

図 8 Bending moment – curvature relationships considering 1 to 4 half waves modes

2 半波までを考慮した場合は、特にアスペクト比が大きく、板厚が薄い場合に FEM との誤差が目立つ。一方、4 半波まで考慮した場合は、誤差がかなり改善されており、最終強度までは、FEM 解と良い一致を見せる。また、5 半波以上を考慮した場合の ISUM 解析も行ったが、有意な精度向上は見られなかった。多くの撓みモードを考慮することは、自由度数の増加につながり、本来の ISUM のメリットを損ねるため、曲げ座屈を表す ISUM 要素として、4 半波までの考慮が適切と考えた。

また、文献 7)に示す開口影響を考慮する方法を今回の要素に取り入れることは可能である。

3.4 非適合変位モードの導入

できるだけ要素を大きくし要素数を減らすという ISUM の基本コンセプトに従い、桁をモデル化する ISUM 要素は、深さ方向に 1 分割にすることを想定している。

そこで、桁深さ方向に 1 分割でモデル化された桁が正しく曲げ変形を再現可能であるか調

査するため、図 9 の片持ち梁モデルを用いて、梁の深さ方向に 10 分割（1 辺 100*mm*）と詳細にメッシュ分割された FEM と比較した。この計算では、面外の初期たわみを与えておらず、座屈が発生しない計算条件とした。両解析においては、updated Lagrange 法を適用し、各荷重増分ステップで座標変換マトリクスを更新している。

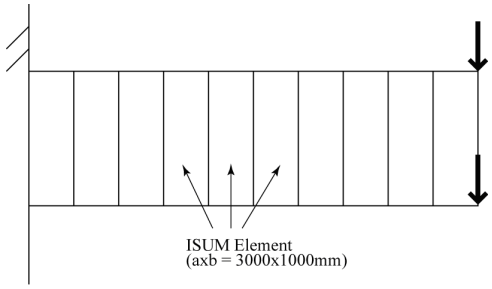


図 9 Cantilever beam model

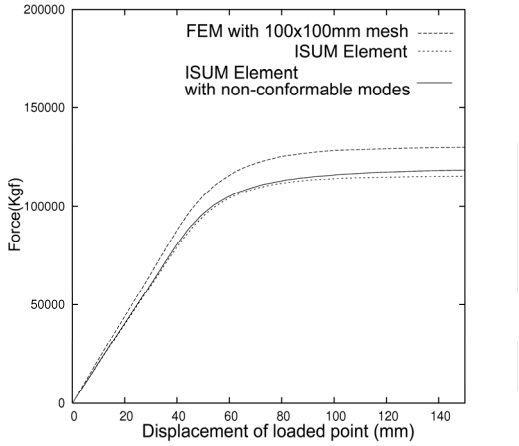


図 10 Force – Displacement relationship

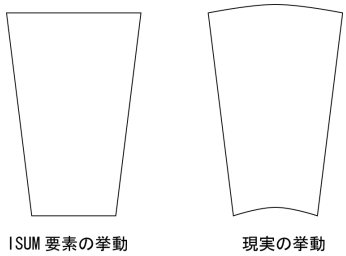


図 11 Comparison between ISUM's deformation and actual one

荷重－変位関係を比較した図を図 10 に示す。詳細メッシュでモデル化された FEM に対して、深さ方向に 1 分割の ISUM は、剛性、最終強度共に高めに推定する結果となった。

この原因は、図 11 に示すように実際の曲げを受ける梁の挙動は、辺が曲がるように変形する。それに対して、通常の 4 節点のシェル要素に用いられる(2)式の変位関数が用いられる ISUM要素では、節点を結ぶ辺が常に直線を保つように変形することで、曲げ剛性が高めに見積もられる。そこで、曲げを受けた場合に辺が曲がるよう(3)式に示す非適合変位モード[8)]を追加する。

$$\left.\begin{array}{ll} N_1 = (1-\xi)(1-\eta) & N_2 = \xi(1-\eta) \\ N_3 = \xi\eta & N_4 = (1-\xi)\eta \end{array}\right\} \quad (2)$$

$$N_5 = (1-\xi^2) \quad N_6 = (1-\eta^2) \quad (3)$$

ここで、ξ、ηは、要素内での位置を表す無次元値のパラメタとする。

非適合変位モードを考慮した ISUM 要素を用いて図 9 の片持ち梁モデルを解析したところ、

図 10 の ISUM Element with non-conformable mode のように著しく精度が改善することが確認できる。

4. 二重底構造の崩壊解析

4.1 試計算の概要

2 章で開発した桁構造用の ISUM 要素の有効性を確かめるため、本要素を二重底構造に適用した崩壊解析を実施し、非線形 FEM による同一モデルの解析結果との比較検証を行う。さらに、ISUM 及び FEM の解析結果より、二重底構造の崩壊メカニズムについて調査を行う。今回の研究では、船体外板に働く水圧のみを荷重として考慮する。

4.2 解析モデル

表 2 に示す要目の二重底構造に関し、対称条件を与えることにより、実構造の 1/4 の範囲のみをモデル化した。ガーダ端部及びフロア端部に図 1 と同様に回転中心を定義し上下方向を支持している。

表 2 Principal dimension of double bottom structure

Length×width (*m*)	Height (*m*)	number of floors	number of girders
28.0×28.0	1.867	13	5
Inner bottom thickness (*mm*)	Bottom thickness (*mm*)	Scantling of Inner bottom and bottom stiffeners (*mm*)	
18	15	250x90x9/12	
Girders & Floors Thickness (*mm*)			
Model 1 10,14	Model 2 20, 28		

表 3 Meshing and number of elements

	FEM	ISUM
Between longi. Stiffeners	6 meshes	1 mesh
Between trans. girders	18 meshes	4 meshes
Floor depth	13 meshes	1 mesh
Stiffener web depth	3 meshes	1 mesh
Number of Elements	47,570	1,720

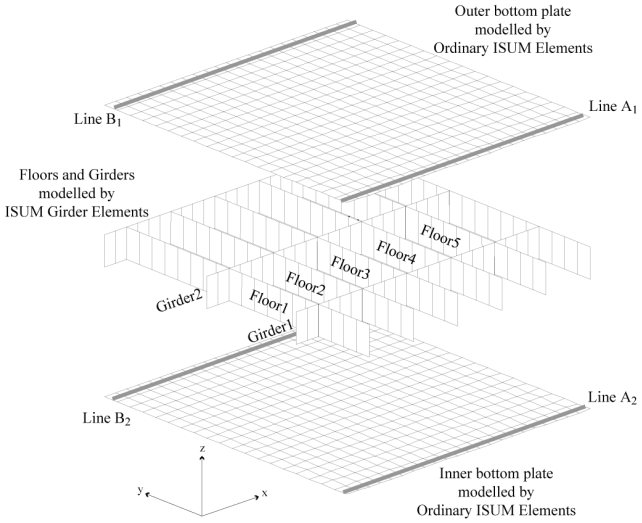


図 12 ISUM model of Double Bottom Structure

ガーダ及びフロアの板厚については、一般的な二重底構造で用いられる板厚のModel 1 に対し、板厚を 2 倍にしたModel 2 を派生させた。ビルジホッパの剛性を考慮するため、$6.45\text{x}10^{16} Nmm^2$の捩り剛性を有する梁要素を用いフロア端部同士を結んだ。その他の解析条件は、3.1 と同様である。FEMモデル及びISUMモデルにおけるメッシュ分割と要素数を表 3 に示す。船底外板及び内底板に用いたISUM要素では、3 半波の座屈モードと船幅方向の圧縮荷重により発生する円筒状のたわみモードの 2 種を考慮したたわみ関数を採用した。フロアには、3.3 に示した 4 半波までを考慮したたわみ関数を用い、ガーダでは、水平防撓材により面外たわみが抑えられる効果を考慮して、3 半波モードのみを考慮したたわみ関数として採用した。防撓材は、梁要素を用いている。FEMについては、フロア付きの垂直防撓材に剛体要素(RBE2)を用いた以外は、すべてシェル要素でモデル化を行った。

4.3 ISUM 解析結果と FEM との比較

(a) Model 1

今回の解析では、荷重制御の Newton-Raphson 法を用いているため、最終強度後の耐力低下の状態まで崩壊挙動を追跡できない。しかしながら、ISUM、FEM 共に剛性が十分に低下したところまで解析を行えており、実質的な構造の最大耐荷力を求めることができたと言える。解析時間は、FEM は約 6 時間、ISUM は約 10 分程度であり、ISUM が十分効率の高い解析法であることが確認できた。

Model 1 について、水頭と二重底中央の上下方向変位の関係において ISUM と FEM を比較した結果を図 13 に示す。ISUM による解析に関しては、表 4 に示す 3 ケースの解析を行っている。すべての面外変形を考慮した ISUM Case 1 と FEM は、あらゆる荷重レベルでほぼ同一の変位を示しており、さらに、非常に精度良く最終強度を求めることができている。ISUM Case 2 については、水頭 5*m* 辺りから発生する船底外板の座屈を考慮できないため、また、ISUM Case 3 については、水頭 15*m* 辺りから発生するフロアの曲げ座屈が考慮できな

いため、解析の中間段階において、FEM と変位に差がでるものの、構造の最終強度に関しては、ほぼ同一の結果を得ている。パネル座屈が構造の最終強度に影響を与えなかったことになる。

二重底中央部の上下方向変位が 100*mm* となった時の ISUM と FEM の変形図をそれぞれ図 14、15 に示す。船底外板における二重底全体曲げにより生ずる圧縮による円筒状の座屈、フロア中央部での曲げ座屈、ガーダ端部の降伏による大きな剪断変形など、FEM と非常によく一致していることが確認できる。次に、二重底構造の応答を代表するような幾つかの位置において応力値を測定し、FEM との比較を行った。

図 16 は、水頭を横軸に取り、ガーダ及びフロアの桁端部における平均剪断応力をプロットした。図 12 に示す Girder1 が降伏することにより荷重再配分が起き、Girder2 及び Floor5 の剪断応力の変化率が増加する非線形な応答を示すが、あらゆる荷重レベルで、ほぼ FEM と解が一致している。

表 4 Conditions of ISUM analysis

Case 1	通常の ISUM 解析（板要素の面外たわみ自由）
Case 2	すべての ISUM 板要素の面外たわみを拘束
Case 3	桁を表す ISUM 板要素の面外たわみを拘束

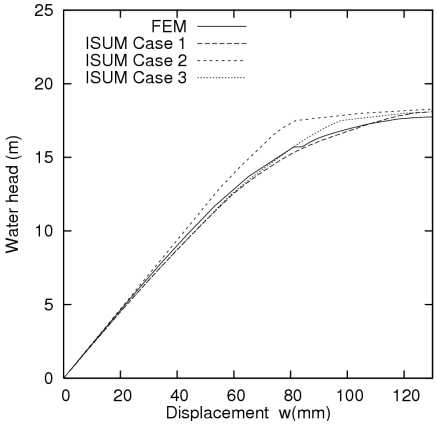


図 13 Comparison of water head – displacement calculated by FEM and ISUM (Model 1)

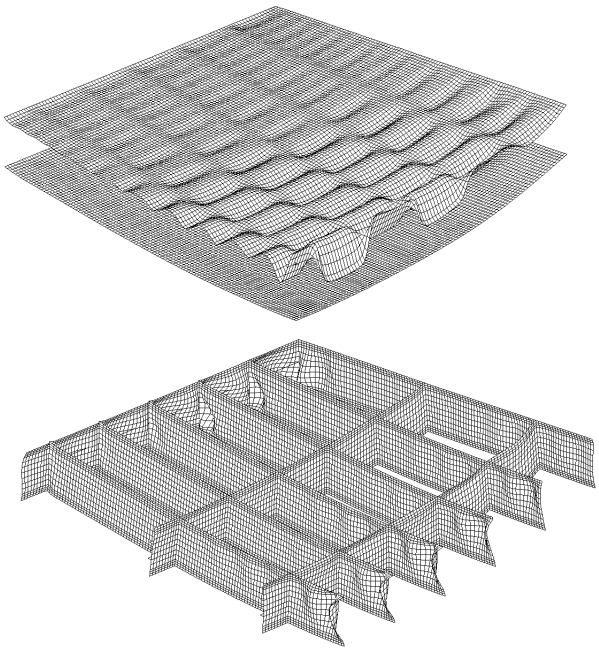


図 14 Deformation calculated by FEM (1/4 region, upside down, Model 1)

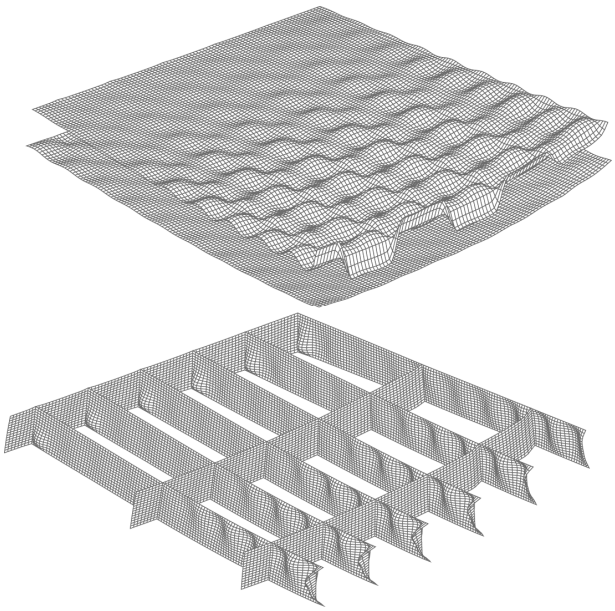
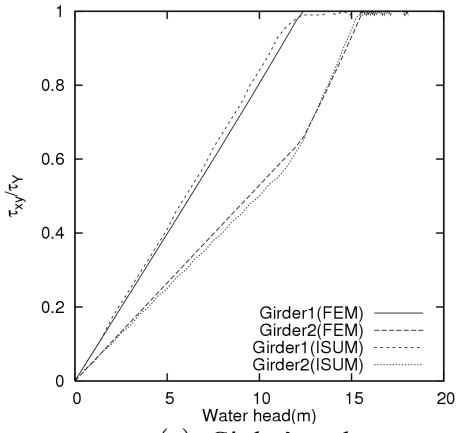
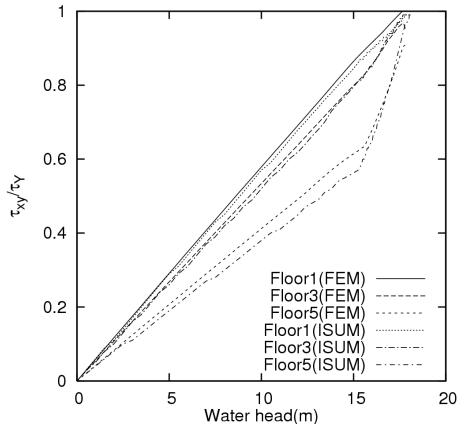


図 15 Deformation of ISUM represented by virtual meshes (1/4 region, upside down, Model1)



(a) Girder's ends



(b) Floor's ends

図 16 Average shear stress (Model 1)

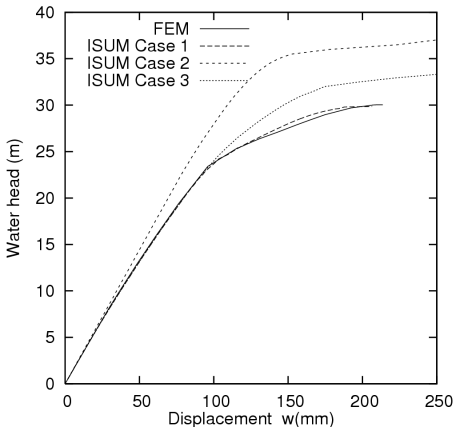
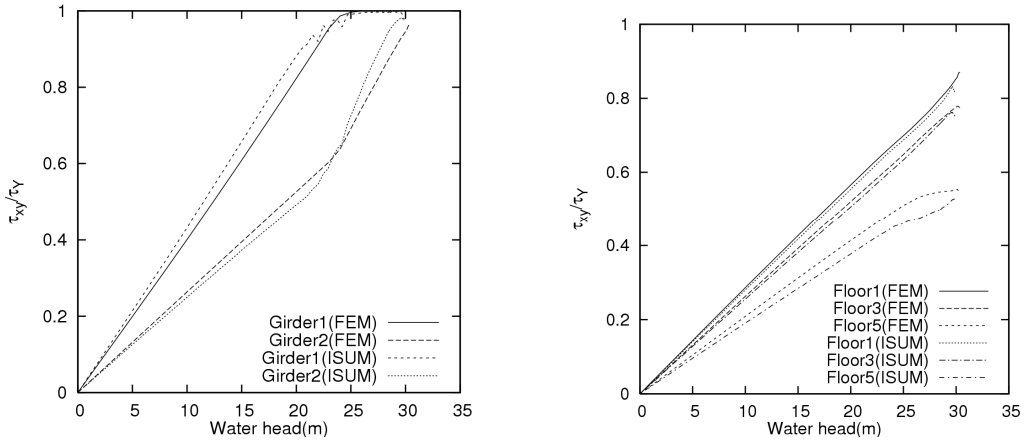


図 17 Comparison of water head – displacement calculated by FEM and ISUM (Model 2)



(a) Girder's ends (b) Floor's ends

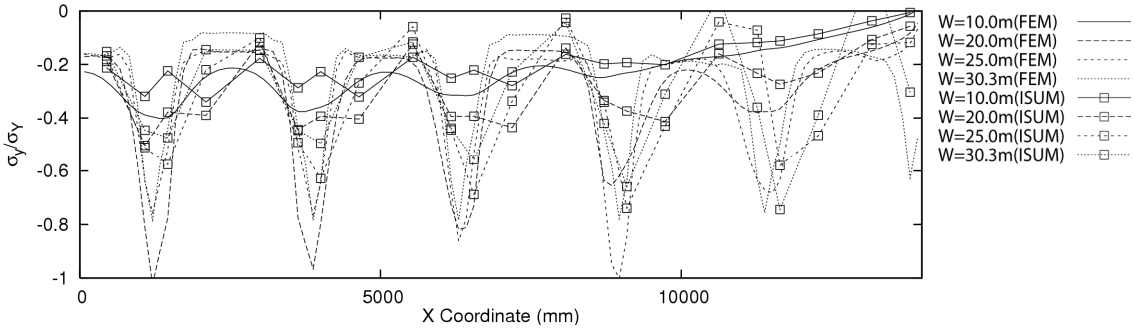
図 18 Average shear stress (Model 2)

(b) Model 2

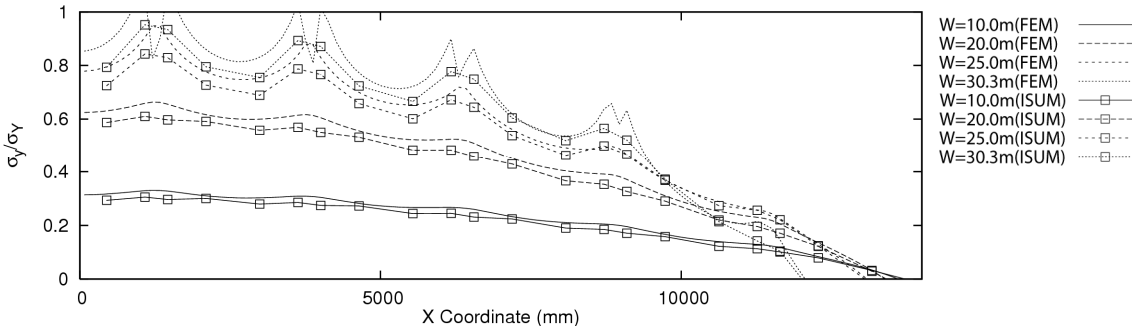
Model 1 のガーダ及びフロアの板厚を 2 倍にした Model 2 を用いて、崩壊解析を実施し、同様に FEM と比較した。

図 17 に水頭―中央部の上下変位関係を示す。ISUM Case 1 と FEM は、共に水頭 30*m* 付近で崩壊しており、ここでも、ほぼ同一の解を得ることができている。これに対して、ISUM Case 2 と ISUM Case 3 は、最終強度を過大に推定している。Model 1 と異なり、船体外板、フロア等のパネル座屈が二重底構造の最終強度に影響を与えており、3.で開発した ISUM 要素が、正しく桁の構造応答を再現していることを示している。図 18 に示すガーダ端部及びフロア端部での平均剪断応力の推移についても FEM とよく一致している。

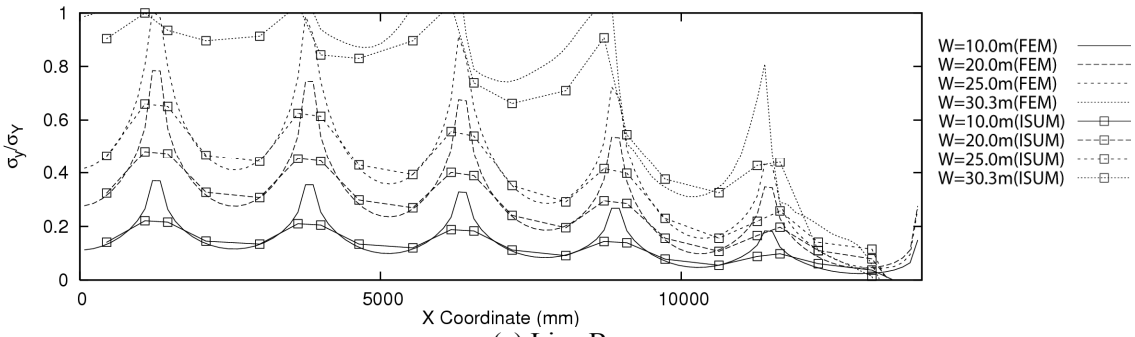
次に、図 19 で、各荷重レベルにおける、図 12 に示すLine A_1～B_2に沿ったフロア方向の応力成分σ_yの分布を比較した。ここでプロットされた応力値は、Model1 の解析結果であり、各要素の平均応力である。従って、要素が大きいISUMでは、より広い範囲の平均応力がプロットされることになる。図 19(a)及び(d)に示す二重底全体曲げによるフロア方向の圧縮を受けるLine A_1及びB_2の応力分布を見ると、水頭が大きくなるに従い、位置による応力の変動が激しくなる。この変動は、座屈の発生を示している。ISUMとFEMの相関については、FEMほど応力のピーク値が高くならず誤差があるが、ISUMがより広い範囲の応力を計測しているためである。一方、二重底全体曲げの引張側となる図 19(b)のLine A_2,は、中心(x=0*mm*)に向かって、比較的なだらかに増加していく。同じく引張側となる図 19(c)のLine B_1では、応力の変動が見られるが、これはフロア端部で上下方向の変位を支持しているために発生している。これらの位置では、FEMとよい相関を示している。



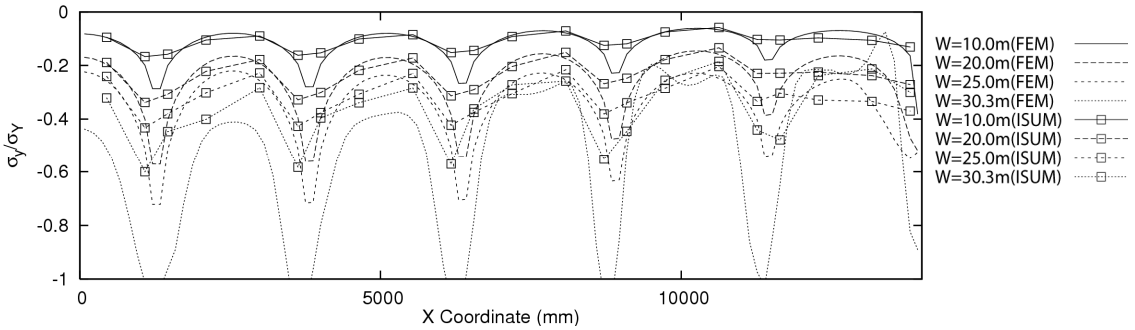
(a) Line A_1



(b) Line A_2



(c) Line B_1



(d) Line B_2

図 19 Distribution of stress σ_y along each line (Model 2)

4.4 上下方向の圧力荷重を受ける二重底構造の崩壊挙動について

4.3 に示した２ケースの構造解析結果から、上下方向の圧力荷重を受ける二重底構造の崩壊メカニズムについて論ずる。まず Model 1 については、図 16 のように構造が崩壊する水頭 18*m* において、すべてのフロアの剪断応力が降伏するレベルに達している。また、ISUM において板要素の面外変形を拘束して、座屈を発生させない条件の解析(ISUM Case2 及び Case 3)から、フランジの構造応答に関係なく最終強度が決まっていることが分かった。これらの解析結果より、Model 1 の崩壊は、ガーダ及びフロアの剪断降伏が要因となっていると考えることができる。

一方、Model 2 では、図 18 に示すように最終強度を迎える水頭 30*m*付近で、全てのガーダは降伏する応力レベルに達しているが、フロアは、まだ余剰の耐力を有している。また、二重底曲げの圧縮側となる図 19(a)及び(d)のLine A_1及びLine B_2の水頭 30.3*m*の応力分布を見ると、フロア交差部に位置する応力のピークが降伏応力に達しており、当該位置のパネルが崩壊していることを示している。また、引張側の図 19(c)及び(d)のLine A2 及びLine B_1では、水頭 30.3*m*において、かなりの範囲が降伏していることが分かる。従って、Line A_1-A_2及びLineB_1-B_2の位置において、面外荷重を受けるパネルに発生する塑性関節線のような状態となり、フロア方向に曲げ崩壊したと考えられる。

これら 2 ケースの構造解析の結果から、ガーダ方向とフロア方向の両方の剛性の喪失が起きた後に二重底構造の崩壊が起き、また、それぞれの方向の剛性喪失については、桁端部の剪断塑性崩壊と、桁中央部と端部に塑性関節が生ずるような曲げ崩壊が要因となることが示された。

また、現実的な二重底構造の寸法は、Model 1 に近く、Model 2 のように桁の板厚が厚い場合はほとんど無い。従って、二重底に働く荷重が上下方向の圧力のみである場合、全ての桁の剪断降伏が崩壊の要因になるものと考えられる。

5. まとめ

本論では、本会における最終強度に関する研究の一つである ISUM に関する研究を紹介した。ISUM の利点として、前述したように比較的簡便に構造体の崩壊解析が行え、最終強度を求めることでできるだけでなく、パネル等の構造的に意味のある単位で要素分割されているため、解析結果から容易に構造体の崩壊挙動を捉えることができること、さらに、面外たわみ振幅の変位を固定することでローカルな座屈を起こさせない等の仮想的な崩壊解析により、構造体の最終強度に何が効くのかを調べることができ、構造体の崩壊挙動の解明にも寄与することが分かってきた。今後も本研究と非線形 FEM 解析による崩壊解析に基づく研究を同時に進めることで、安全性が高く且つ無駄のない船体構造の設計が行える技術を獲得したいと考える。

4 章では、二重底構造に上下方向の圧力荷重が働く場合のみを考慮したが、現実の二重底構造は、同時に船体縦曲げモーメントにより船長方向の引張／圧縮荷重を受け、4 章とは異

なる崩壊挙動を示すことが考えられる。今後の課題として、これら同時に働く荷重を考慮して、より包括的な二重底構造の崩壊挙動を調べることを計画している。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、大阪大学 矢尾 哲也教授、広島大学 藤久保 昌彦教授には多くのご協力、ご助言を頂きましたことをこの場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

1) M.Fujikubo, P.Kaeding and T. Yao : ISUM Rectangular Plate Element with New Shape Function s(1st Report), 日本造船学会論文集, 第 187 号(2000), pp.209-219.

2) M.Fujikubo, P.Kaeding and T. Yao : ISUM Rectangular Plate Element with New Shape Function s(2nd Report), 日本造船学会論文集, 第 188 号(2000), pp.209-219.

3) M.Fujikubo and P.Kaeding : New Simplified Approach to Collapse Analysis of Stiffened Plates, Marine Structures, Vol 15(2002), pp.251-2833

4) P.Kaeding and M.Fujikubo ; Idealized Structural Unit Method for Collapse Analysis of Stiffened Plate Structures, Ship Technology Research, Vol. 50(2003), pp.23-33.

5) 藤久保昌彦, 裴志勇 : 理想化構造要素法による船体の縦曲げ逐次崩壊解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 1 号(2005), pp.187-196.

6) M.Fujikubo, D.Yanagihara, Y.Setoyama and DV.Olaru : ISUM Approach for Collapse Analysis of Double-Bottom Structures in Ships, Int J Offshore and Polar Eng, Vol.13(2003), pp.224-231

7) 石橋公也、藤久保昌彦、矢尾哲也 : 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 3 号(2006), pp.285-292.

8) E.L.Wilson, R.L.Taylor, W.P.Dohery and T.Hhabussi, : incompatible displacement models, Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics, pp.43-57.