マリンエンジニアリングにおける安全管理に対する 計算力学の可能性*

福岡俊道**

Safety Management in Marine Engineering to be Supported by Computational Mechanics

by Toshimichi Fukuoka

The safety management in marine engineering has long been supported with the help of skilled workers. Meanwhile, the lack of such skilled workers is of growing problem in marine engineering field and related areas. Incidentally, Computational Mechanics has attained remarkable progress in this decade, and it is expected to be effective means to solve the problem stated above.

In this paper, the tightening procedure of pipe flange connection is adopted, as an example of its engineering application. The most critical problem concerned is the estimation of scatter in bolt preloads, when tightening bolts one by one. Such complicated problem could now be analyzed by FEM. In addition, a numerical method offering an optimal tightening procedure is presented here, which estimates how much initial bolt preload is needed for each bolt to achieve uniform bolt preloads in the final state. The numerical method proposed here is expected to partly compensate the lack of skilled workers and contribute the safety management in marine engineering.

1. はじめに

マリンエンジニアリングにおける安全管理は、長い間熟練技能者によって支えられてきたといえる。一方、近年熟練技能者の減少が様々な問題を引き起こしている。そのような問題に対応することを目的として、アーク溶接作業における熟練技能者の技術の定量化を試みた研究¹⁾もある。しかしながら、熟練技能者の知識を工学的に解明し、その知識を短期間で若い技能者に伝えることは困難である。その主たる理由は、熟練技能者によって解決されてきた問題の多くが、工学的な観点から見れば極めて非線形性の高い事象であるという点である。すなわち、数式で表現することが困難

な問題をどのように解決すればよいか、熟練技能者は長年の経験によって身につけていると推察される。ところで、この10年ほどの間に「計算力学」と呼ばれる新しい学問分野が飛躍的な発展を遂げている。計算力学は、高性能のコンピュータとソフトウェアを駆使して、工学におけるあらゆる問題を解決しようとする手法の総称である²⁾。現在、計算力学は工学のほとんどの分野をカバーしているように思えるが、熟練技能者の知識を解明して、その結果を実際の工学問題に応用することは残された難しい課題である。

本稿では、マリンエンジニアリング分野の安全管理に関して、計算力学が大いに貢献できると期待される分野の一例として、船舶や舶用関連プラントなどで広く使用されている管フランジの締付けを取り上げる。具体的には、管フランジのボルト締付け時に発生する軸力のばらつきと、最終的

* 原稿受付 平成12年11月20日

** 正会員 神戸商船大学 (神戸市東灘区深江町5-1-1)

にボルト軸力を一様にするための締め付け手順が、計算力学的手法によってかなり精度よく解析できるようになったので紹介する。以上のような問題は、従来現場における作業者の技量に依存してきたところが多い。ここで紹介するような数値解析手法の確立は、熟練技能者の減少への対応策として有望な手段であり、「計算力学」が今後マリンエンジニアリング分野における安全管理に貢献できる可能性を示唆するものである。

2. マリンエンジニアリング分野と自動車産業における設計・生産と安全管理

マリンエンジニアリングにおける安全管理が、熟練技能者に支えられていることは広く認められているところである。ところが、近年そのような熟練技能者の数が減少し続けており、関連分野における安全管理のレベルダウンが大いに懸念されている。しかしながら、熟練技能者の育成には多くの時間とコストを必要とする。そこで、マリンエンジニアリングにおける安全性を維持しさらに高めるためには、熟練技能者の知識を獲得して、その知識を中級技能者や初級技能者に短時間かつ低コストで伝えていく手法の確立が重要となる。また、マリンエンジニアリングにおける安全管理の質を維持するためのもう一つの手段として「計算力学」的手法の導入がある。図1は以上の状況を模式的に示したものである。

つぎに、マリンエンジニアリング分野とわが国の代表的な産業である自動車産業における設計・

生産および安全管理を比較する。ここではマリンエンジニアリングの代表的な分野として、船舶とそれに搭載される機械、関連機器のすべてを含めた広義の造船産業を取り上げて比較することとする。図2は両者の違いを示したものである。いずれの産業分野においても、設計段階では「計算力学」を積極的に導入しているが、製造段階になると様子はかなり異なっている。自動車産業ではいわゆる大量生産に対応して、製造過程を極限まで自動化している。それに対して、船舶は基本的に一隻ずつ製造して組み立てられる。したがって造船分野では、関連するすべての生産活動に対して画一的な製造方式を導入することは極めて困難である。その結果、造船分野における製造過程では、熟練技能者の技量に依存する割合が高くなっている。つぎに、実際に製品が使用状態となった場合の安全管理とメンテナンスについて考えてみると、両者の違いはより顕著になる。つまり、自動車の安全管理とメンテナンスは、通常メーカと密接な関係にある修理工場で実施される。その場合、故障の判断や修理の手順などは、メーカから供給されたマニュアルや指導書にしたがって実施されることが多い。これに対して船舶では、新造船の組立作業、すでに就航している船舶の修理やメンテナンスをはじめとして、現場の作業者の技量に委ねられている部分が多い。

したがって自動車の安全性は、基本的にかなりの部分が中級あるいは初級技能者によって維持で

図1 マリンエンジニアリング分野における安全管理の現状

図2 造船と自動車産業における設計・生産および安全管理システム

きるが、マリンエンジニアリングにおける安全管理は現場作業者の熟練を必要とする場合が多いと考えられる。

3. 熟練技能者の知識と計算力学の役割

計算力学の概念は1980年代にほぼ確立されたが、様々な分野で本格的に設計、製造分野に適用が開始されたのは1990年代に入ってからである。その原動力となったのは、計算機のハードウェアとソフトウェアの急速かつ同時並行的な発展である。その結果、有限要素法に代表される数値解析手法を用いて、三次元解析が比較的簡単に実施できるようになった。以来、設計、製造分野における「計算力学」の役割はますます重要となっている。

一方計算力学は、製品の設計、製造過程への適用に比較して、使用状態に入った場合の安全管理に対する適用例は少ない。それについては、たとえば以下のような理由が考えられる。

- 1) それぞれの製品のライフサイクルの中で、多くの製造業者が設計と製造に重点をおいてきたこと。
- 2) 「計算力学」を安全管理分野へ適用することが困難であったこと。

2番目の理由は、長らくマリンエンジニアリングの安全管理を支えてきた熟練技能者の知識が、数学的には高い非線形性を含んでいることによると考えられる。このことは、熟練技能者の知識を数式あるいは数値で表すことが困難であることを意味する。ところで近年の計算機の高速化と大容量化は、従来ほとんど不可能であった大規模な数値解析の実行を可能にしている。その結果として、高度な非線形問題である安全管理を扱った研究が散見されるようになった。本稿では、マリンエンジニアリング分野で広く使用されている管フランジを取り上げ、その締め付け過程で発生する問題が、どのように計算力学的手法によって解析できるかを紹介する。

4. 計算力学による管フランジ締結体のボルト締め付け過程の解明

4.1 はじめに 管フランジ締結体は、種々のボルト締結体の中で使用頻度が高く、またその力

学的挙動は極めて複雑である。管フランジに要求されるもっとも重要な性能は、接合面におけるシール性能である。阪神淡路大震災における管フランジの破損事故により周辺住民が避難を余儀なくされたこと、タンカーや石油プラントにおける油漏れの問題など、管フランジはわれわれの生活を支えるライフラインを形成するために不可欠な機械要素である。一方、このように広く使われている構造物でありながら未解決な点も多い。管フランジに関連する課題は数多くあるが、最終的には漏れないフランジを設計して、それをどのように組み立てて使用するかという点に集約される。本稿では、「漏れない管フランジ」を目的とした研究のうち管フランジ締結体のボルト締め付けの問題を扱う。

4.2 多数ボルト締め付けにおける軸力のばらつき^{3), 4)} 構造物を締結する場合、1本のボルトで締め付けることはまれで、通常多数のボルトが使用される。その際、油圧テンショナ等を用いてすべてのボルトを同時に締め付ける場合は問題とならないが、ボルトを1本ずつ、あるいは対象となるボルトをいくつかのグループに分けて締め付けると「弾性相互作用」が問題となる。ここでいう弾性相互作用は、あるボルトを締め付けた時にすでに締め付けられているボルトの軸力が変化する現象を指している。図3は、多数のボルトを逐次締め付けた場合に発生する弾性相互作用を、3本のボ

図3 多数ボルト締め付けにおける弾性相互作用

ルトで締め付けられた板を例に、有限要素法による解析結果に基づいて示している。ここで F_b は目標とする軸力であり、 $F_1 \sim F_3$ は各ボルトに最終的に残留する軸力を表している。ボルトをつぎつぎ締め付けていくと、それぞれのボルトの変形が互いに影響し、結果的に3本のボルトの軸力は異なった値となっている。

一般に、複数のボルトを逐次締め付けて、最終的にすべてのボルトに均一な軸力を与えることは極めて困難である。管フランジの締め付けでは、多数のボルトが近接して配置されているので弾性相互作用が大きな問題となる。またそれ以外の構造物でも、多数のボルトで締め付ける場合は程度の差こそあれ問題となることが多い。さらに管フランジ締結体では、ボルトを同心円上に配置しているために生じる問題がある。すなわち、あるボルトを締め付けると、図4に示したように反対側の接触面が開くように変形し、その周辺のボルト軸力に影響を及ぼす。したがって、「弾性相互作用」と「口開き変形」が、一般のボルト締め付けと比較して、管フランジのボルト締め付けを困難にしている原因であると考えられる。

4.3 管フランジ締結体のボルト締め付け^{5)~10)}

管フランジを複数のボルトで逐次締め付ける場合、解決すべき2つの課題がある。

<課題1> ある順序でボルトを締め付けた場合、最終的なボルト軸力のばらつきはどの程度になるか。

<課題2> 最終的に得られるボルト軸力を一様にするためには、各ボルトをいくらの軸力でどのような順序で締め付ければよいか。

いずれも管フランジの締め付けにおいて最も重

要な課題であるにもかかわらず、この問題を扱った研究はほとんど見あたらない。その原因としては、上記の課題が極めて非線形性が強い現象であるために、解析あるいは実験的手法のいずれによっても体系的な評価が困難であったことによる。Bibelらは実験あるいは数値解析により<課題2>の解決を試みているが、実験的手法では個々の管フランジ締結体に対して予備実験を必要とし⁵⁾、FEMによる解析では最終的なボルト軸力のばらつきがかなり大きくなっている⁶⁾。

筆者の研究室では、上記の二つの課題を三次元有限要素法を用いて解析する手法を提案しており、得られた結果は実験値とかなりよく一致している。まず最初に、ガスケットを考慮しない管フランジ締結体の解析モデルを用いて、提案した手法の妥当性を確認している⁷⁾。つぎに、そこで提案した手法を金属ガスケットを用いた場合に拡張している⁸⁾。金属製のガスケットは使用頻度が比較的低く、通常の管フランジ締結体には、より剛性の低いガスケットが使用されることが多い。最近、うず巻き形ガスケットを使用した場合について、上記の2つの課題が解決され、その成果が報告されている⁹⁾。ここでは、管フランジ締結体のボルト締め付け過程を解明するために特化された非線形一次元ガスケット要素を導入している。

図4 管フランジ締結体の「口開き変形」

図5 管フランジ締結体の三次元有限要素モデル

4.4 ボルト軸力のばらつきと最適な締め付け手順

本節では、金属ガスケットあるいはうず巻き形ガスケットを使用した場合の結果を紹介する。JIS B2238の呼び圧力40K、呼び径50のハブ付き一体型フランジを、8本のM16のボルトで締め付ける場合を対象とする。図5は、使用した三次元FEMモデルをボルト締め付け順序とともに示している。解析手法および境界条件等は文献^{7)~9)}に詳述されているので省略する。ボルトの締め付け順序は、図中に示したように広く採用されているスターパターンとし、ボルト番号は締め付け順序と一致させている。

図6は、各ボルトを規定の軸力で逐次締め付けた場合の最終的なボルト軸応力のばらつきを示している。ただし、ここで問題としているのは「弾性相互作用」による軸力のばらつきであり、各ボルトを締め付ける段階において軸力は正確に与えることができると仮定している。すなわち、トルク法を用いてボルトを締め付ける場合に問題となる、接触面摩擦係数のばらつきに起因するボルト

軸力のばらつきはないと仮定している。ボルト締め付けに関する問題については、種々の締め付け方法の特徴と比較も含めて文献4)に詳述している。2つの図は、それぞれ金属ガスケットとうず巻き形ガスケットに対する結果である。たて軸は、各ボルトに残留する軸応力 σ_f を目標とする軸応力 σ_{fb} (=50MPa)で除して無次元化して示している。つまり、両者の比が“1”の時、目標とするボルト軸力が得られたことになる。いずれのガスケットにおいても解析値と実験値はかなりよく一致している。図から、金属ガスケットを使用すると軸力のばらつきは最大15%程度であるが、うず巻き形ガスケットではボルト軸力が零となることがある。実際の締め付け作業は1ターンで完了することではなく、数ターンの締め付けを繰り返す。したがって、これほど大きなばらつきは生じないが、いずれにしても剛性の低いガスケットを使用するとボルト軸力はかなり大きくばらつくといえる。図7は、最初に締め付ける“ボルト1”の軸応力変化を示したものである。金属ガスケットとうず巻き形ガスケッ

(a) 金属ガスケット

(a) 金属ガスケット

(b) 渦巻き形ガスケット

(b) 渦巻き形ガスケット

図6 ボルト軸応力のばらつき

図7 最初に締め付けるボルトの軸応力変化

表1 各ボルトに与える初期軸応力

金属ガスケット								
ボルト番号	1	2	3	4	5	6	7	8
与える軸応力 [MPa]	53.2	53.4	55.5	55.8	48	48.1	49.8	50

渦巻き形ガスケット								
ボルト番号	1	2	3	4	5	6	7	8
与える軸応力 [MPa]	69.1	142	35.3	93.2	47.4	53.0	46.9	50

トとでかなり特性が異なるが，“ボルト1”に隣接する“ボルト5”と“ボルト8”を締め付けたとき，「弾性相互作用」により軸力低下が大きくなっている．“ボルト2”を締め付けたときの“ボルト1”の軸力増加には「口開き変形」が影響している．

表1は，目標ボルト軸応力が50MPaの場合について，1回の締め付けにより最終的に様なボルト軸力を得るために必要な各ボルトの軸応力を示している．うず巻き形ガスケットの場合，ボルトによっては目標値の3倍近い軸力を与えなければならない．図8は，表1の値を用いてボルトを逐次締め付けた場合の実験結果を示しており，金属ガスケットの場合は3%以内，うず巻き形ガスケットを用いた場合でも10数%程度のばらつきとなっている．したがって，ここで紹介した解析手法はガスケットの剛性にかかわらず有効であると考えられる．

4.5 実用的な締め付け手順の提案を目指して
前節では，1回の締め付けで最終的なボルト軸力が一様となるような締め付け手順をFEMにより求めた．しかしながら，現場での作業手順の観点からは以下のような問題がある．

1. 各ボルトの締め付け力がまちまちで，現場の作業者にその手順を周知徹底することはかなり困難である．

2. あるボルトについては，目的とする軸力の3倍近い値で締め付けなければならない，ボルト軸力の目標値が高く設定されている場合，ボルト締結体各部の塑性変形が問題となる可能性がある．

したがって，付加価値の非常に高い管フランジ締結体は別として，実用的には最終的に得られるボルト軸力の均一性が多少損なわれても，より現場作業になじむ手順の確立が望まれる．現在ASMEでは，管フランジのボルト締め付け手順を

(a) 金属ガスケット

(b) 渦巻き形ガスケット

図8 解析手法の妥当性の評価

作成中であり¹¹⁾，筆者の研究室ではその有効性をFEMにより検討している⁹⁾．さらにASMEでは，室温と高温環境別にガスケットの性能を評価するという手順を確立しつつある．

5. おわりに

マリンエンジニアリングにおける安全管理は，長い間熟練技能者によって支えられてきた．本稿では，近年著しい発展を遂げている「計算力学」が，マリンエンジニアリング分野における熟練技能者の減少を補う手段として高い可能性を有していることを紹介した．具体的には，管フランジのボルト締め付け過程を取り上げて，ボルト軸力のばらつきの評価と，最終的に様な軸力を得るために必要な初期軸力の大きさが，三次元有限要素法を用いてかなり高い精度で解析できることを示した．

ここでは「計算力学」がマリンエンジニアリングの安全管理に適用できる可能性の一端を示したに過ぎない．今後，「計算力学」の解析技術と計算機のハードウェアのさらなる発展によって，その役割がますます大きくなることが期待される．

参考文献

- 1) 福岡・中川：アーク溶接におけるエキスパートシステムの構築, 日本船用機関学会誌, 28-5 (1993), 326-333.
- 2) 福岡：「計算力学」に想いを寄せて, 日本船用機関学会誌, 33-4 (1998), 253-254.
- 3) Bickford J.H. and Nassar S. : Handbook of Bolts and Bolted Joints, (1998), 451-477, Dekker.
- 4) 福岡：ボルトの各種締付け方法について, パルカーレビュー, 44-8 (2000), 1-9.
- 5) Bibel, G.D. and Ezell R.M. : An Improved Flange Bolt-Up Procedure Using Experimentally Determined Elastic Interaction Coefficients, Trans. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 114-4 (1992), 439-443.
- 6) Weber E.D. and Bibel, G.D. : Flange Bolt-Up Simulation Using 3-D Finite Element Modeling, Advanced Computer Applications, ASME PVP-Vol.274 (1994), 63-82.
- 7) 福岡・高木：三次元有限要素解析による管フランジのボルト締付け順序の評価, 日本機械学会論文集(A編), 64-627 (1998), 2734-2740.
- 8) Fukuoka, T. and Takaki T. : Evaluations of Bolt-Up Sequence of Pipe Flange Using Three-Dimensional Finite Element Method, Analysis of Bolted Joint, ASME PVP-Vol.382 (1999), 87-93.
- 9) 福岡・高木：有限要素解析による管フランジ締結体のボルト締付け過程の評価（うず巻き形ガスケットを用いた場合）, 日本機械学会論文集(A編), 66-644 (2000), 1834-1840.
- 10) 福岡：管フランジ締結体の三次元有限要素解析, 配管技術, 42-14 (2000-12), 22-27.
- 11) ASME, Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly (draft), ASME PCC-1, (1999)

~~~~~ メッセージ ~~~~~

福岡 俊道

管フランジ締結体を含めて、ボルト・ナットなどのねじ部品によって締め付けられた構造物を、欧米では総括的に Bolted Jointと呼ぶことが多いようです。そういう意味では、Bolted Jointの研究に携わって20年が経過しました。研究を始めた当初は、ねじ谷底の応力集中係数の値を、接触面の摩擦の影響を考慮して実用的な精度で評価することが難しい状況でした。その後、解析手法とコンピュータ技術の飛躍的進歩によって種々の問題が解けるようになりましたが、マリンエンジニアリングも含めて実際の設計にすぐに役立つような結果は、Bolted Jointの中でも特定の分野に限定されていたように思います。すなわち、Bolted Jointに対して計算力学の貢献度が急激に高くなったのは、ここ10年くらいではないかと感じております。ここで紹介した管フランジは、工学的には（非線形+ヒステリシス）ということで材料力学の観点からは解きにくい問題です。今後も微力ではありますが、このように安全管理面で重要な問題を計算力学的手法を用いて解決することにより、マリンエンジニアリング分野に少しでも貢献できるように努力したいと考えております。