

船体構造モニタリングに関する調査研究

岡 正義*, 越智 宏*, 有馬 俊朗**

Research for Hull Stress Monitoring

by

Masayoshi OKA, Hiroshi OCHI, and Toshiro ARIMA

Abstract

This report focuses on the structural safety of ships and introduces the results of our research on structural monitoring which is expected as a risk control option for hull damage and accidents. The needs of ship IoT that accumulate and utilize data obtained by sensing are introduced. The status of development and installation of hull stress monitoring system (HMS) to ships and the status of regulations in the classification societies are researched, and the future trends of HMS are predicted. The specifications required for the sensors used in the system, technical issues and solutions for the widespread and effective use of the HMS are discussed.

* 構造安全評価系, **一般財団法人日本海事協会

原稿受付 2019年4月22日

審査日 2019年6月3日

目 次

1. まえがき	36
2. 船体安全に関する構造モニタリングのニーズ	37
2.1 安全運航支援	37
2.2 運航データの規則／設計へのフィードバック	37
3. 構造モニタリングの研究開発動向	37
3.1 海上技術安全研究所の研究	37
3.2 海上技術安全研究所以外の研究動向	40
3.2.1 構造モニタリングシステムの提供会社と実船適用事例	40
3.2.2 構造モニタリングに関する研究の動向	41
3.2.3 AI, IoTに関する動向	41
4. 計測センサに要求される仕様	42
4.1 船級ガイドラインの要件	42
4.2 船舶特有の課題	42
5. まとめ	44
参考文献	44

1. まえがき

大海原を航行する船舶において緊急事態が発生した場合、陸上からの物理的な援助が迅速に行われることを期待することは難しい。そのため船舶に対しては、人命と貨物を安全に海上輸送し、海洋汚染を防止するための国際的な安全基準が設けられ、船舶はその基準を順守するべく一生を通じて性能や設備を維持し、新基準に対応してきた。

さらに、一旦緊急事態やトラブルが発生した際、状況に応じて迅速かつ適切な対応を実際に行うのは本船の乗組員の方であるため、海技の向上や緊急対応訓練、陸上との情報連携など様々な取り組みが行われている。

船の重大事故の3大要因は衝突、座礁、機関室火災と言われているが、衝突・座礁に対しては、レーダーや電子チャートなどによる周囲の船や地形の情報、火災に対しては火災探知器などの情報を基に乗組員は危険な状況を把握し、適切な防止策、発生後の迅速な対応策を実行することが出来る。

しかし、これらに次ぐ重大事故の要因である船体構造の不具合に起因する折損等による沈没に対して、これにつながる構造損傷（亀裂、座屈等）の発生を航海中に船橋から推定する客観的な情報がなく、乗組員自身によって船が会える波高や波向きを目視し、それに伴う船体の揺れ（運動）、デッキ冠水状況、音等を体感して、船体構造が危険な状態にならないよう経験的に対応している状況にある。

本報告では、この船体構造安全に着目し、事故の予防策として期待される構造モニタリングに関し、センシングにより得られたデータを、インターネットを通じて蓄積し活用するための船のIoT化のニーズを紹介し、構造モニタリングシステムの研究開発動向を紹介した上で、システムに用いられる計測センサに求められる仕様を紹介する。

なお、本研究論文は、海上技術安全研究所（以下、当所）の先導研究「船体構造モニタリングに関する調査研究（平成27年度）」の研究成果を報告するものであり、著者らが平成29年度に一般社団法人次世代センサ協議会会誌「次世代センサ」に寄稿したテキスト¹⁾を、本研究論文投稿時の情報を基に更新し再構成した内容となっていることを付記する。

2. 船体安全に関する構造モニタリングのニーズ

2.1 安全運航支援

近年、輸送効率向上のニーズや新パナマ運河の開通などにより船舶が大型化しており、例えばコンテナ船においては 20,000TEU が実現され、Two-islander 配置など新構造様式が採用されている。これに伴い、船橋にいる乗組員の経験と感覚に基づいた船体構造にとって危険な状態であるかどうかの判断基準が、実際の船の状態と異なるものとなっている可能性がある。

また、定時運航や港湾作業の時短など運航品質向上に対する要求の高まりから、従来の構造モニタリングが対象としていた荒れた海象に遭遇している時のみならず、荷役作業時を含め船の一生にわたって常時構造安全について監視を強化する必要がある。

このような状況において、実運航時の船体の応力をセンシングして船上及び陸上にてデータ解析し、船体構造が受けた応力履歴を把握することが出来れば、客観的なデータを基に、操船判断や損傷推定、検査・保守計画の立案等、安全運航のための支援が可能になる。

2.2 運航データの規則／設計へのフィードバック

船体設計の際、船の区画配置が決定した後、規則で設定された海象にて発生する荷重を基に構造強度解析評価を行い構造寸法が決定されている。その際の評価基準は、合理的な理論計算に加えて過去の損傷の経験などを基に規定されているが、損傷を防止するためには、理論計算のさらなる高精度化に加えて、実船で起きていることを設計や規則にフィードバックすることが重要である。つまり、設計時に考慮した海象と実船が航行した海象の比較、及び設計時の構造強度評価に用いた応力と実船に発生した応力の比較を行うことで、より安全で精度の高い強度評価基準の開発に貢献できる。

それには、実船が遭遇した海象や応力のデータを取得、蓄積し、活用することがキーとなる。また、取得したデータをどう分析して合理的な設計に資するのか、逆に、合理的な設計に資するにはどのようなデータをどの程度のメッシュで集積すればよいのかを明確にすることが重要となる。

3. 構造モニタリングの研究開発動向

このような安全評価の観点からの構造モニタリング、船の IoT 化へのニーズの高まりに加え、センサの信頼性向上により、適用実績が増えており、近年構造モニタリングに関する研究が広く行われている。以下にその動向を示す。

3.1 海上技術安全研究所の研究

当所では、本先導研究での調査結果を受けて、平成 28 年度より 7 か年計画で船体構造モニタリングシステムの開発に関する重点研究を開始した²⁾。概要を図 1 に示す。

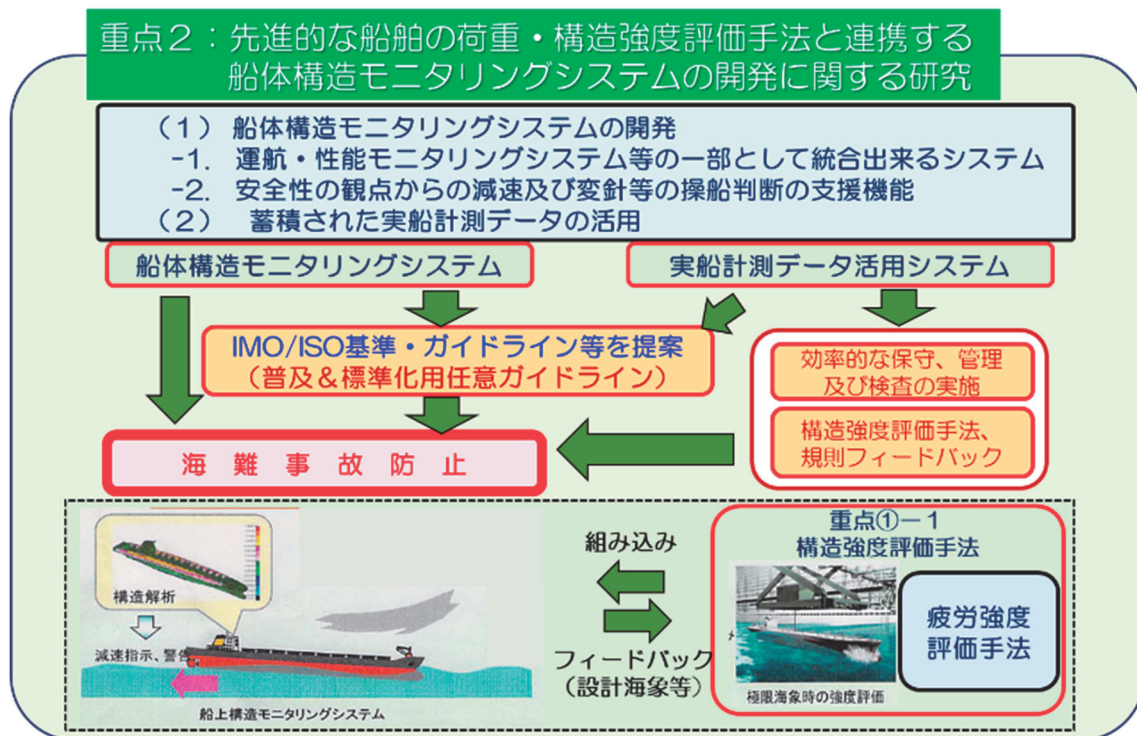


図1 船体構造モニタリングシステムの概要

この重点研究では、重大海難事故防止を目的に、「実海域の波浪及び船舶の状態監視（モニタリング）情報」に「船舶の構造応答特性等」及び船陸間通信等を組合せ、操船者に対して、船速及び針路決定等の操船判断に資するアドバイスを提供するシステムを開発するもので、実船計測データ活用システムを構築すると共に、その成果をガイドラインとして取りまとめ、さらには得られたデータから構造規則にフィードバックすることも想定している。重点研究で想定している構造モニタリングシステムの模式図とモニタリングによって得られるデータを活用した規則作成のイメージを図2に示す。なお、この重点研究は平成30年度より、FEM（有限要素法）解析技術を利用した構造強度評価手法に関する研究と統合して新重点研究「新構造基準作成に資する先進的な荷重・構造強度評価及び船体構造モニタリングシステムの開発」となっており、数値シミュレーション技術によって得られる「船舶の構造応答特性」の利用を図るための研究が加速され、また、船体構造モニタリングによるデータを活用してシミュレーションの精度検証を行うことが明確化された。

Data Driven Regulation (基準)

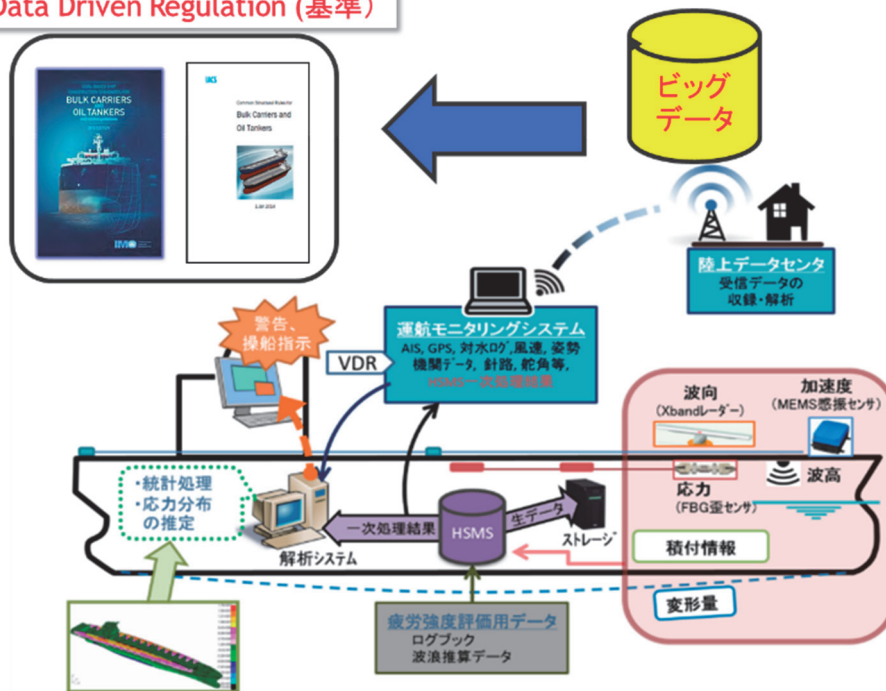


図2 構造モニタリングシステムの模式図

限られた計測項目と図2の左下に示す全船FEM解析の結果を組合せて、全船における構造応答を予測し、さらに船体応力から遭遇中の短期海象（波高、波向き、波スペクトル等）を予測するプログラムを搭載することで、操船判断支援に資する情報を乗組員に提供することが、本システムの特徴のひとつである。

さらに当所では、上記システムの実現に向けて、船の応力状態をリアルタイムでシミュレートして船上及び陸上に表示するデジタルツインのモックアップを作成し、具体的に調査研究を進めている。模式図を図3に示す。

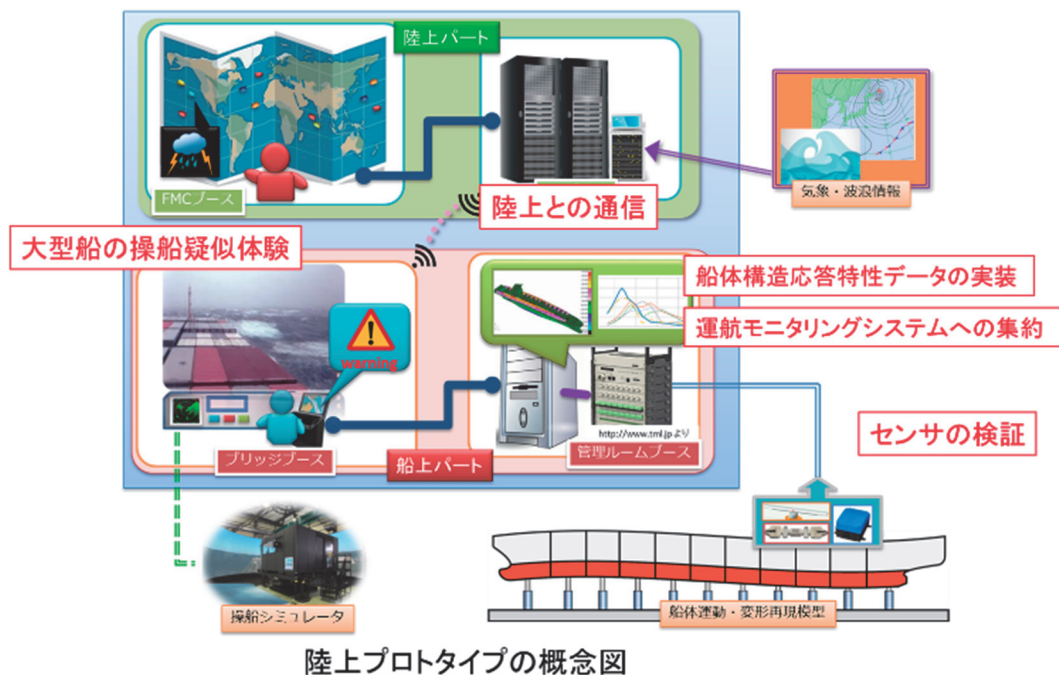


図3 デジタルツインのモックアップ模式図

さらには、実船にて得られたデータと、図3の左下に示す当所が有する操船シミュレータ等を連携して、構造強度上シビアな海象下におけるブリッジでの環境を陸上で体感できるシステムを構築中である。このシステムは、特に超大型コンテナ船等未経験の船の安全操船に役立つと考えられる。

3.2 海上技術安全研究所以外の研究動向

3.2.1 構造モニタリングシステムの提供会社と実船適用事例

歪センサの提供会社は、センサを用いた安全装置のシステム全体をパッケージとして提案し、適用実績を伸ばしている。構造モニタリングシステムの提供会社と適用実績等を表1に示す。参考文献³⁾によると、海外の提供会社が大きく先行して実績を積んでいることが記されているが、国内会社の今後の実績拡大に期待したい。

表1 センサ提供会社と実船適用事例³⁾

System Name	Vendor	Location	Instr olati ons	Approved
HMS Hull Monitoring System	MCA Consultants	Newport Beach, CA, USA		
HULLFIB	Micron Optics, Inc Global Maritime Engineering	Atlanta, GA, USA Busan, Korea		ABS, BV, DNV, LRS, etc
HULLMOS	Rouvari Oy Sirehna HMC	Helsinki, Finland NANTES, France Almere-Stad, Netherlands	20+	LRS, DNV, ABS, BV
Hull Stress Monitoring System	CPE System	Abbotsford, VIC, Australia		DNV
Naviscan HSMS	Korea Marine Technotogy Sea Structue Technology	Ulsan, Korea Daejeon, Korea	40 (2001 - 2008)	DNV, LRS, ABS, KR, B V, NK
Scimar	BMT Scientific Marine	Escondido, CA, USA		ABS
SENSFIB	Light Structure	Oslo, Norway	Over 100	DNV, LRS, BV, ABS, RINA
Ship Advanced Monitoring and Analysis	CETENA	GENOA, Italy		RINA
SMART^STRESS	BMT SeaTech	Southampton, UK		(Allmajor class)
StressAlert	Straininstall	Isle of Wight, UK	Over 100	LRS, DNV, ABS, etc

3.2.2 構造モニタリングに関する研究の動向

光ファイバセンサを用いて構造モニタリングシステムを様々な種類の実船に適用して、実際に得られた船体応答と設計時の想定との差を確認することで、設計時の推定精度を上げる研究が多く行われている。以下にその一例を示す。

Heggelund ら⁴⁾は、8600TEU コンテナ船を対象としてアジアヨーロッパ航路におけるグローバルな縦曲げ応力や船側外板位置での縦通肋骨のローカル応力の計測に基づいた疲労評価を行っている。併せて、ホイッピングやスプリングの弾性振動が疲労寿命に与える影響を確認した結果を紹介して、弾性振動による疲労被害度の増加分を設計時に考慮すべきであると提言している。図4に論文で用いたモニタリングシステムの配置を示す。

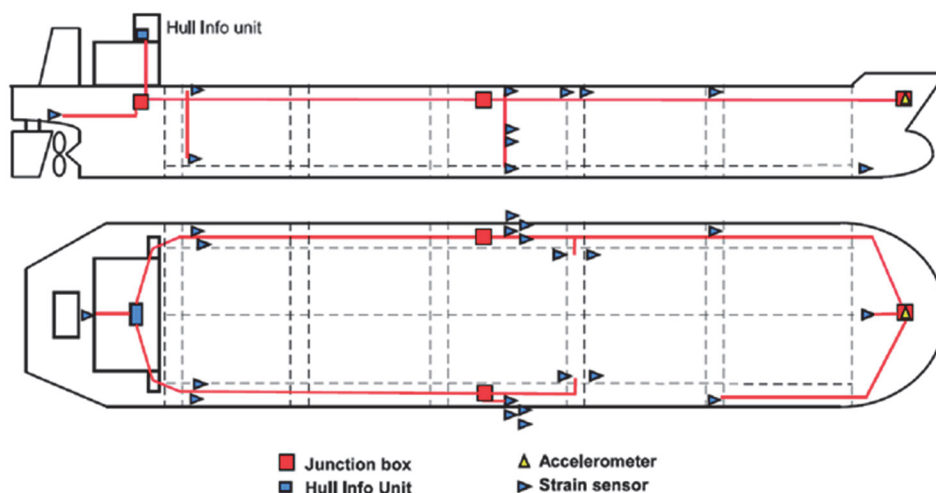


図4 構造モニタリングシステムの全体配置⁴⁾

最近では岡田ら⁵⁾が、日本郵船株式会社が運航する14000TEU大型コンテナ船シリーズ10隻での船体構造ヘルスマニタリングについて紹介している。対象船舶には、光ファイバを用いた歪計測システムを搭載して船体応力計測データを取得するとともに、操船データ、海・気象データ、積付データなども同時に取得している。併せて、船陸間で共有するシステムを構築し、船体発生応力の推定手法の開発、累積疲労損傷度の推定手法の開発及びユーザー視点に立った船体構造モニタリングシステムの開発を行っている。

また、加速度計が長期の耐用に期待がもてるという観点から、陸上のビルや橋梁のメンテナンスに用いられている加速度計を利用した構造モニタリング⁶⁾の船舶への転用が期待されている。実用化のためには船体加速度と船体安全性の相関関係の把握が必要であり、当所とメーカとの共同研究で研究を進めている。

3.2.3 AI, IoTに関する動向

モニタリングにより取得したデータの通信、保存、解析に関する環境の動向として、国土交通省は海事生産性革命(i-Shipping(operation))におけるIoT/ビッグデータを活用した先進的な船舶、運航支援・保守管理サービスの普及に向けた活動を行っており、船体モニタリングによる安全設計に関する研究開発補助を行っている⁷⁾。また、日本船用工業会における新スマートナビゲーションシステム研究会において、スマートナビゲーション（船の状態をモニター診断、最適化を行って運転制御する。その結果環境にやさしいオペレーションを行うもの）実現のためのデータ取得、アクセス（船陸のやり取り）、解析・診断方法を検討し、データの標準化（フォーマットのISO化）、オープンプラットフォームの技術課題に取り組み、実利用に向けた活動を行って、成果を上げている⁸⁾。さらに、日本海事協会（以下、NK）の子会社であるシップデータセンター（ShipDC）は船舶のビッグデータの基盤として運航データを収集、蓄積し、利用者にデータ提供するデータセンターの運営を行っている。データ収集保管プロセスをオープンプラットフォーム化し、各関係者がそれぞれの得意分野に特化することで、サービスの競争、データの利活用を目指す「Internet of Ships Open platform」構想が推し進められている⁹⁾。

このように、技術面に加え、法務面、国際データ標準化などの観点から、先に述べたニーズが実現できる環境が整いつつある。

4. 計測センサに要求される仕様

4.1 船級ガイドラインの要件

現在、各国船級（ABS, 2015, ABS, 2011, BV, 2017, DNVGL, 2017, KR, 2017, LR, 2012, NK, 2017）が HMS の Notation に対する要求事項を規定している（表 2）。また、現状日本製の HMS は市販品として入手できる状況にないが、海外ではセンサを用いた安全装置のシステム全体をパッケージ（HMS）として提案し、適用実績を伸ばしている。

例えば、NK の船体監視システム規則¹⁰⁾において、計測の対象はハルガーダ（船体構造）に働く応力及び船体運動による加速度に関するリアルタイムの情報であり、歪センサ、加速度計、表示機能及びディスプレイ並びにデータ記憶装置等に要件があり、年次検査において良好に作動することを確認しなければならない。

4.2 船舶特有の課題

陸上のいわゆる土木建築分野等における構造モニタリングへの適用実績が充分にあるセンサやそのシステムであっても、船舶への適用の際には、船舶特有の要求を満足する必要がある。以下に、過去の構造モニタリング実績から得られた船舶固有の課題、問題点を記載する。

まず、応力値の信頼性が挙げられる。構造部材に作用している応力に関して、現状では絶対量を計測することは難しく、基準状態からの差分を計測することになる。差分に基づく絶対量の推定では、船を出来るだけシンプルな積付状態（ライトシップコンディション）にして、その積付状態での静的荷重を積付計算機で計算して得られた設置場所の歪／応力値を基準値として、計測値との差分から絶対量を推定している。しかし、ライトシップコンディションであっても正確な重量分布を推定することは困難で、さらには残留応力等の影響もあって、絶対量として正確な応力が計測できているかどうか分からない。また、センサの種類によっては、長期的なドリフトが生じることもあり、絶対量の計測は永年の課題となっている。

次に、センサ及びそれを含むシステムの耐久性の問題が挙げられる。船舶の構造基準において耐用年数は建造後 25 年が想定されており、モニタリング期間も一生にわたって常に行うことがニーズとしてある。その期間、船におけるセンサ及びシステムは、振動、温湿度変化、腐食などの厳しい環境にさらされ、断線などの可能性もある。ゆえに、船の運航計画に影響が出ない程度の耐久性が要求されるとともに、システムのメンテナンスに十分な時間をかけられるタイミングは、船級の定期的検査の時期を利用した 2.5 年もしくは 5 年に一度である事を考慮した適切な保守計画を立てる必要がある。

また、信頼性の高い操船支援システムであること、及びスムーズなデータ解析を実現するためには、データに含まれる電気ノイズや欠損等を補正したデータの品質確保が必要である。光ファイバセンサによって電気ノイズが無くなり、データ品質は高くなっているものの、システムエラーによるデータ欠損や異常値発生等々の不具合を生じることがある。その要因は、船内振動等によるセンサや機器の異常や接続部の接触不良、鋼船体への帯電や船内電源の不安定など、船舶特有の問題から生じることが多く、情報が少なく再現性がないため要因を特定できないことが多い。さらに構造モニタリングでは、応力だけでなく航海系データや船体運動に関するデータも重要になる。そのため、最適運航を目的とした運航モニタリングシステム¹¹⁾のデータを利用するのが一般であるが、船載装置の簡素化やデータ解析の効率化の観点からシステムの統合が望まれる。しかしながら統合はさほど容易ではなく、例えばシステム間の時刻同期をとるにしても、国際航海による時間帯の統一や長期間でのシステムクロックのずれ、データ項目による収録サンプリングの補間等、クリアすべき課題が多い。

最後に、データの船陸間通信に関しては、衛星通信の発達によってリアルタイムモニタが技術的に可能になっていると考えられるが、航海の安全を維持するため、他通信回線との混線等による不具合を回避しなければならず、そのためには費用をかけて専用回線を確保する必要があり、普及に時間がかかっている。

表 2 各船級の HMS への要求事項

Year	ABS 2015	ABS(ice) 2011	BV 2017	CCS 2015	DNVGL 2017	KR 2017	LR 2012	NK 2017
Notation	HM1 (motion) HM2 (stress) HM3 (Voy. Data)	ILM	MON-HULL	HMS	HMON	HMS	SEA(HSS) SEA(ICE)	HMS
Strain Range Acc range	x x	x x	±2000μ ±2G	x ±2G	±2000μ ±2G	x ±1G	x ±2G	x ±2G
Angle range	x	x	x	-90°~+90°(roll) -45°~+45°(pitch) -180°~+180°(yaw)	-90°~+90°(roll) -45°~+45°(pitch) -180°~+180°(yaw)	x	-30°~+30°(roll) -10°~+10°(pitch)	
Frequency Range (Strain/Acc)	0-5Hz/0-5Hz	0-150Hz	0-1Hz/ 0.2Hz-1Hz	0.01-3Hz(motion) 5-100Hz(slamming) 30-1200Hz(sloshing)	0.01-5Hz(motion) 5-100Hz(slamming) 30-1000Hz(sloshing)	0-5Hz/ 0-5Hz	0-5Hz/ 0-5Hz	0-5Hz/ 0.5HZ (fw.0~100Hz)
Sampling Rate	3 times the maximum F.R.	More than 150Hz	20 times the low-pass filtering freq.	20Hz(motion) 500Hz(slamming) 3000Hz(sloshing)	20Hz(motion) 300Hz(slamming) 2000Hz(sloshing)	3 times max F.R.	4 times max F.R.	x
Accuracy St./Acc/ang. Setting/ Calibration	5μ/±0.01G in a known LC/ annually	1μ/x in a known LC/annually	20μ/x in a known LC/-	x/0.01G/0.5° in a known LC/-	5μ/±0.01G/0.5° in a known LC/annually	20μ/1% in a known LC/annually	5μ/0.02G in a known LC/annually	10μ/0.01G in a known LC/-
UPS	4h	30 min	30 min	10 min	10 min	10min	x	x
VDR	IMO Res.A.861(20)	x	IEC61162	IEC61162	IMO Res.A.861(20) IEC61162	x	IEC61162	x

5. まとめ

船体構造安全の実現のため、船の運航者が主体となって構造モニタリングシステムを実船に搭載し船上データを取得する事例が増えつつあり、また船上データの活用に関連した研究プロジェクトを通じて、船上特有の問題点が洗い出され、関係者の間で共有されている。今後、船舶へのシステムの適用がさらに増えると共に、他分野でも行われているような、多点計測等による詳細なモニタリングが普及することが望まれる。さらに、集積されたビッグデータの有効活用により“実際に船で起きていること”が明らかになることで、安全運航の確実な支援と強度評価基準へのフィードバックに加え、船体構造に関するイノベーションが創出されることのきっかけになることが期待される。

本調査研究で得られた成果は当所の重点研究に引き継がれ、また本研究で調査したハルモニタリングは、当所が長期ビジョンとして掲げた主要研究課題の一つに位置づけられるに至っており、研究を加速して取り組んでいるところである。これと同時に、国や民間において産学官が連携して利活用を図るための研究プロジェクト^{7),12)}が行われ、当所も積極的に参加しプロジェクトを牽引している。本報告で紹介した研究成果は、これらのプロジェクト等の実現に寄与しており、またプロジェクトの成功に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 越智宏, 岡正義: 船体安全の IoT と計測センサ (Hull Structure Monitoring System), 次世代センサ, (一社) 次世代センサ協議会, (2017)
- 2) 有馬俊朗: 構造安全評価と船上モニタリングシステム, 平成 27 年度 (第 15 回) 海上技術安全研究所講演会講演集.
- 3) B. Phelps and B. Morris : Australian Government Department of Defense, Review of Hull Structural Monitoring Systems for Navy Ship (DSTO-TR-2818), (2013) .
- 4) Heggelund S.E. et.al. : Full Scale Measurements of Fatigue and Extreme Loading Including Whipping on an 8600TEU Post Panamax Container Vessel in the Asia to Europe Trade, OMAE2011
- 5) 岡田哲男他: 14000TEU 大型コンテナ船における船体構造ヘルスモニタリングのに関する研究開発の概要, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 24 号 (2017)
- 6) 富士電機(株)ホームページ: 構造ヘルスモニタリング/感振センサ(<http://www.fujielectric.co.jp/products/shm/>)
- 7) 国土交通省: 先進船舶技術の研究開発(i-Shipping Operation), (<http://www.mlit.go.jp/common/001179080.pdf>)
- 8) 安藤英幸: スマートナビゲーションに関する ISO 標準化提案, IoS(船の IoT)オープンプラットフォームに関するフォーラム, (2017.7)
- 9) 永留隆司: 船舶 IoT オープンプラットフォーム構想と ShipDC が担う機能, 船舶 IoT 利活用のためのオープンプラットフォームに関するフォーラム, (2017.4)
- 10) 日本海事協会, 船体監視システム規則, (2017)
- 11) 例えば, 船舶ビッグデータ活用の基盤システム(<https://www.monohakobi.com/ja/service/sims/sims/>)等
- 12) 超高精度船体構造デジタルツインの研究開発, (一社) 日本船舶技術研究協会, 2018 年度成果報告書 (中間報告), (2019.3)