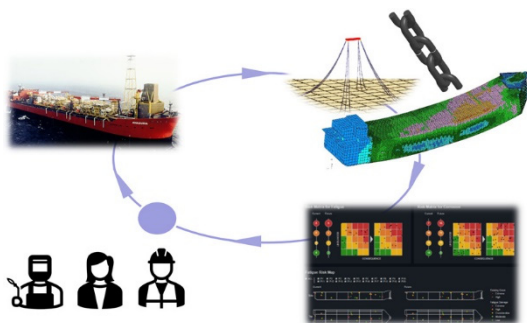


大型浮体構造物のデジタルツインを用いた アセット健全性マネジメントシステムの開発

Development of Asset Integrity Management System
Using Digital Twin for Large Floating Structures



松本 俊作*¹
Shunsaku Matsumoto

杉村 忠士*²
Tadashi Sugimura

寺田 伸*³
Shin Terada

宮崎 智*⁴
Satoshi Miyazaki

石井 秀和*⁵
Hidekazu Ishii

塚原 啓介*⁶
Keisuke Tsukahara

機械学習、情報通信技術、計算機能力、物理計測センサ等の技術進展を背景に、個々の製品やプロセスをデジタル空間に再現し、実世界の設計、製造、制御、保全管理等へ活用する、デジタルツインの実用化が加速している。

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、エネルギーの安定供給や脱炭素社会の実現などの社会要請を踏まえて、浮体式生産貯蔵積出設備(FPSO)などの大型浮体構造物のデジタルツインとアセット健全性マネジメントサービスの開発にも取り組んでいる。本報では、デジタルツイン技術の概要とアセット健全性マネジメントのためのダッシュボードシステムについて述べる。

1. はじめに

デジタルツインは多くの製品で高い関心を集めている重要な技術テーマであり、多くの国際会議や学会誌でその定義や要素技術が議論されている。我が国の国家ビジョンである Society 5.0 では、経済発展と社会課題の解決を両立し、一人一人が快適で活躍できる人間中心社会を目指しており、デジタルツインをその中核コンセプトに位置付けている⁽¹⁾⁽²⁾。

“デジタルツイン”の具体的な定義として、“入手可能な最良な物理モデル、センサ、運転情報を活用する、マルチフィジックス、マルチスケール、確率論を統合したシミュレーション”⁽³⁾や“物理システム、デジタルシステム、更新エンジン、予測エンジン、最適化の 5 要素をシームレスに統合し、ライフサイクル全体の意思決定を支援するモデル”⁽⁴⁾などが提案されている。当社はこれらの定義を参照しながら、当社の中核技術である解析・シミュレーション技術や物理計測技術の高度化に加えて、先端技術を有する大学の共同研究や社内での研究開発を進め、100 万自由度超の大規模解析モデルを縮約する機械学習(サロゲート、次元低減など)、実機計測データで解析モデルを更新する UQ(Uncertainty Quantification)等のデジタルツインの要素技術開発に取り組んできた^{(5)~(11)}。

デジタルツインの応用先として、設備(アセット)の余寿命やリスクを評価し、リスク情報に基づいて運用・保全を効率化するアセット健全性マネジメントが有望視されている。アセット健全性マネジメントでは、センサデータの収集・分析等の基本的な遠隔監視に加えて、アセットの故障物理/故障統計モデルの構築、検査データフォーマットの標準化、部品・材料の在庫と市場入手可能性の監視、アセットの更新・保全対策費など保全工事データの構築など、多様なアセット情報の

*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 強度・構造研究部 技術士(機械部門)

*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員

*3 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 環境技術部 次長

*4 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 環境技術部 主席チーム統括

*5 三菱重工業株式会社 総合研究所 流体研究部 技術士(機械部門)

*6 三菱重工業株式会社 技術戦略推進室 先進デザインセンター 主席研究員

収集と管理が必要となる。収集したアセット情報を用いて、運転・保全メニューに応じた余寿命、リスク、財務指標(正味現在価値、内部収益率 他)を計算することで、設備の管理者はこれらの客観指標に基づいて、運転・保全の意思決定を行うことができる。更に、設備の管理者や運転員、保全員が適切に意思決定を行うには、各ユーザのタスク遂行に必要な情報提示とユーザの認知や処理の負荷を軽減するユーザインタフェースの技術も重要となる。

デジタルツインを用いたアセット健全性マネジメントが強く望まれている設備の一つに、浮体式生産貯蔵積出設備(以下、FPSO: Floating Production Storage and Offloading)などの大型浮体構造物が挙げられる。大型浮体構造物が予期せぬ不具合を起こすと、人員の避難や救助の難易度の高さ、海洋生態系への影響、復旧工事の長期化(アベイラビリティ低下)など、複数の観点で影響が深刻化する。また、浮体構造物は船舶と異なり、設置海域に恒久的に固定されて運用されるため、定期的な入渠による詳細な点検や補修ができず、得られる検査データや補修方法に制約がある。現在、浮体構造物では主に検査によって健全性モニタリングが実施されているが、将来的には検査の負担(実施頻度や範囲)を軽減することが事業者から求められている。

このような背景もあり、海洋分野ではアセットやシステムのデジタルツインの認証と保証に関する RP(Recommended Practice)が発行されている⁽¹²⁾。お客様や第三者機関(例えば船級協会)へ説明可能な形でデジタルツインを構築し、構造部材の損傷状態やリスクを定量化することで、保全・運転の効率化に加えて、関係者の意思決定や合意形成の迅速化に寄与できる。

本報では、大型浮体構造物の安全性・信頼性・アベイラビリティ・保全性を向上する、大型浮体構造物デジタルツインとアセット健全性マネジメントの開発状況を解説する。

2. 大型浮体構造物のデジタルツイン

大型浮体構造物のデジタルツインには、船体/浮体構造、係留設備、ライザーなどの設備が含まれる。本報では、FPSO の船体構造と係留設備を対象に開発した技術を説明する^{(9)~(11)}。

2.1 船体構造デジタルツイン

(1) 船体構造デジタルツインの構想

図1に FPSO 船体構造を例とした大型浮体構造物のデジタルツインとアセット健全性マネジメントのプロセスの構想を纏めた。本プロセスでは、まず、①船体構造の主要損傷モードである疲労と腐食を対象に、関連する実機計測・検査データ(応力、加速度、肉厚計測、目視検査、補修履歴、積付条件等)や海象データ(波高、波向き、波周波数等)を収集する。次に、②全船 FE モデル・構造シミュレーション結果で構成されるデジタルモデルを実機計測、海象データで更新し、更新したモデル(デジタルツイン)で実機の状態予測を行う。その後、③ダッシュボードで現在/将来の各構造部材の余寿命、リスク、リスク最適な運転・保全メニューを提案する。最後に、④FPSO オペレータ(以下、オペレータ)を中心とする人間系で、リスク最適な提案メニューに対して、独自の洞察を踏まえた見直しを行い、実機の運転と保全を計画・遂行する。

本節では、全船 FE モデルによる応力・疲労寿命評価、計測データを用いた応力応答スペクトルの補正、腐食発生時間・腐食量の評価の3点について、概要を説明する。

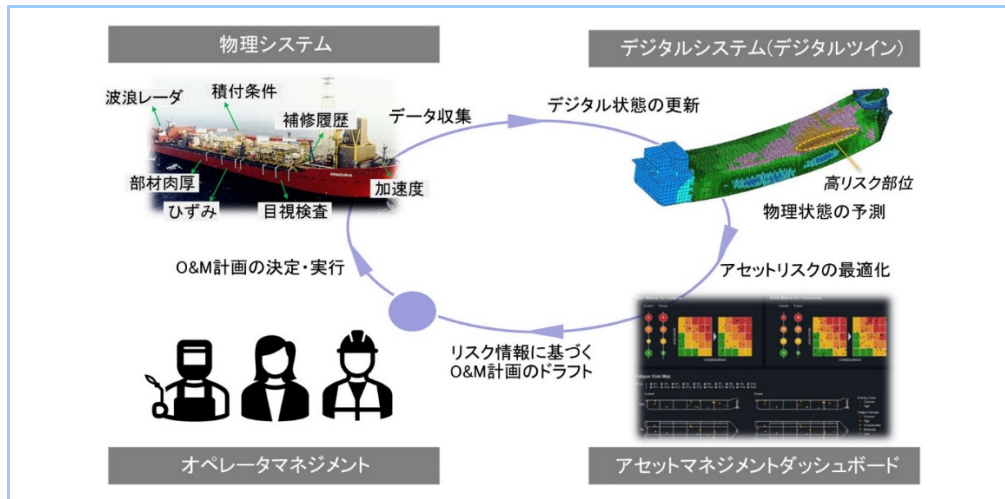


図1 大型浮体構造物デジタルツインとアセット健全性マネジメントの構想 (船体構造の例)

(2) 全船 FE モデルによる応力・疲労寿命の評価

図2に示す通り、全船 FE モデルを作成し、荷重構造一貫解析システム(MHI-DILAM: Direct Loading Analysis Method)による構造シミュレーション⁽¹³⁾を実施し、ダッシュボードで監視する局部構造部位を抽出した。抽出した局部構造部位に対しては、Zooming モデルを構築し、応力応答関数(以下、応力 RAO: Response Amplitude Operator)を算出した。

応力 RAO は、任意の波周波数 ω 、波向き θ 、波振幅 1(m)の規則波に対する応力振幅の発生倍率を表したものであり、本事例では計 2880 ケースの海象条件(波周波数 20 条件、波向き 12 条件、波 1 周期分 12 条件)下での構造解析により求めた。一般に、船舶・海洋構造物分野の応力応答や疲労の評価では、応力 RAO を波スペクトルと合わせて応力応答スペクトルを算出し、そのスペクトル特性から疲労損傷量を算出して、余寿命や破損確率を評価する。

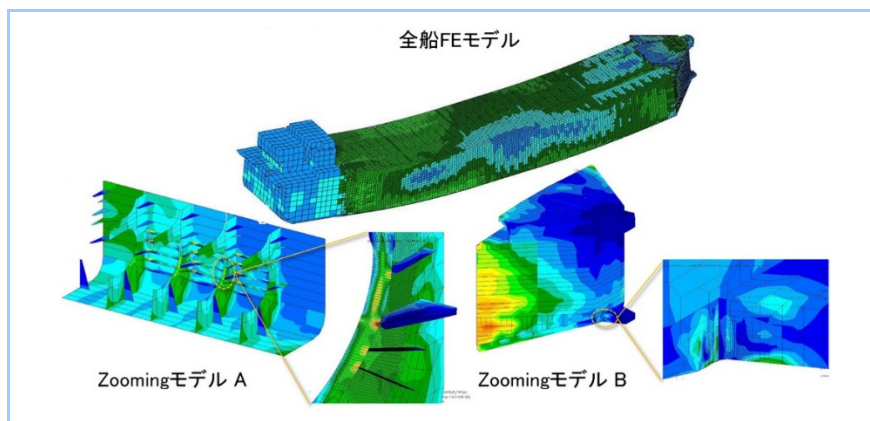


図2 船体構造デジタルモデル:全船 FEM-Zooming モデルと解析結果の例

(3) 計測データを用いた応力応答スペクトルの補正

構造シミュレーションで求めた応力 RAO と実海象の波スペクトルから算出される応力応答スペクトルの推定値は、実際の応力応答挙動の大部分を捉えている。一方で、この推定値には、解析のモデル化誤差(規則波を仮定した応答予測)や離散化誤差(要素サイズ、波向き方向や波周波数の分割幅など)、波の計測誤差などの不確定要因が含まれている。その結果、実機の時刻歴応力計測データから得られる応力応答スペクトルの計測値と推定値の間には、スペクトルのピークの値や位置などに多少の乖離が生じる場合がある。

高リスク部位には、応力計測による高精度な寿命予測が望まれるが、実機では計測点数と計測位置の制約(オイルタンクの内部部材では防爆処理や配線が困難)で、応力計測が不可能な高リスク部位も存在する。

そこで図3に示すように、応力 RAO と波スペクトルから算出した応力応答スペクトルで、応力応答挙動の主要部分を推定し、その推定値と実際の応力応答の間に生じる小程度の乖離を推定することで、応力応答の推定値を補正することを考えた。具体的には、まず比較的計測が容易な上甲板等で計測した数点の応力計測データを用いて、応力応答スペクトルの推定値と計測値の乖離量とその時の波条件(波高、波向き、波周期)の関係を学習したサロゲートを構築する。そして、構築したサロゲートから任意の波条件での乖離量を推定し、未計測部材の応力応答スペクトルの推定値を補正した後、余寿命と破損確率の評価へ反映する。本開発では、予測の不確実性が表現可能で、カーネル関数に応じた柔軟なモデリングが可能なガウス過程回帰モデルをサロゲートとして採用した。

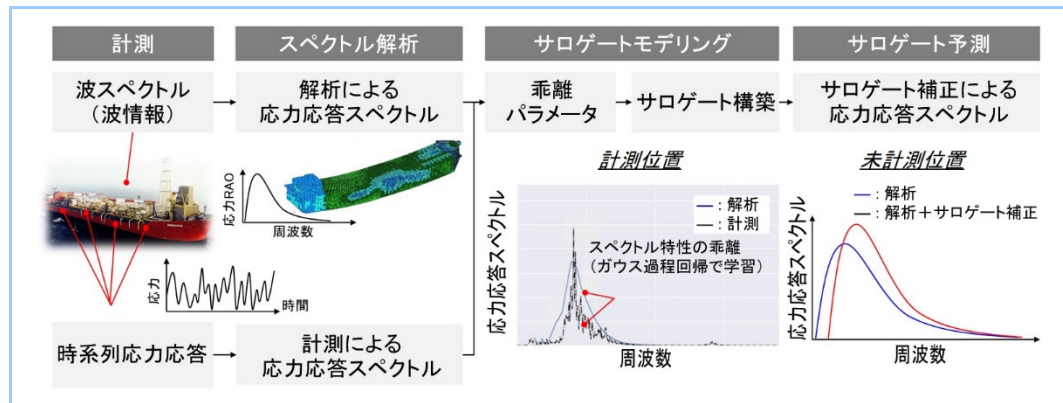


図3 実機/実海象データを用いた応力応答スペクトルの誤差学習と予測

(4) 腐食発生時間・減肉量の評価

腐食の発生と成長は、表面塗装の持続時間、鋼板の特性、温度、湿度、酸素、塩化物、二酸化硫黄など多様な要因に影響される。結果として、タンクの内容物(バラスト水、オイル)、構造部材の種類、部材内位置等によって、腐食の発生時間や減肉量傾向にばらつきが生じる。

現時点で、船体構造の腐食発生時間、減肉量を実用的な精度で長期予測する物理シミュレーションは存在しない。よって本開発では、既存研究^{(14)~(16)}を参照し、多数船で収集された腐食統計と、対象船の腐食計測データを組み合わせたベイズ法による確率モデルを用いる方針とした。ここで、腐食発生寿命は対数正規分布でモデル化し、腐食進展量には指数関数型の支配則を用いた。

図4に乱数で生成した仮想腐食検査データを用いた、腐食発生寿命の推定・更新に関する試算例を示す。まず、評価対象とするタンク種類と構造部材を選択し、対象部材の腐食統計から腐食発生寿命の確率パラメータ(対数平均、対数標準偏差)を抽出して、その確率パラメータの不確かさを確率分布として表現した事前分布を定義する。次に、5年毎の定期検査で得られる腐食発生有無の情報(本試算では300点の目視検査を実施すると仮定)を用いて、事前分布をベイズ更新し、事後分布を得る。そして、得られた事後分布を用いて腐食発生寿命の確率分布を不確かさと共に推定する。

図4に示す通り、5年時点の定期検査データを用いることで、事前分布の不確実性を低減した事後分布が得られた。この事後分布を用いて累積分布関数を推定する場合、特に5年目以降の領域で予測平均値(赤線)と真値(青線)には乖離があり、予測(緑線)のばらつきも大きい。一方、25年間の定期検査で蓄積した検査データでベイズ更新を行うと、事後分布の予測範囲はほぼ1点に収束しており、累積分布関数の予測は全時間領域に渡って真値に漸近し、予測の不確実性が低減することが確認できた。

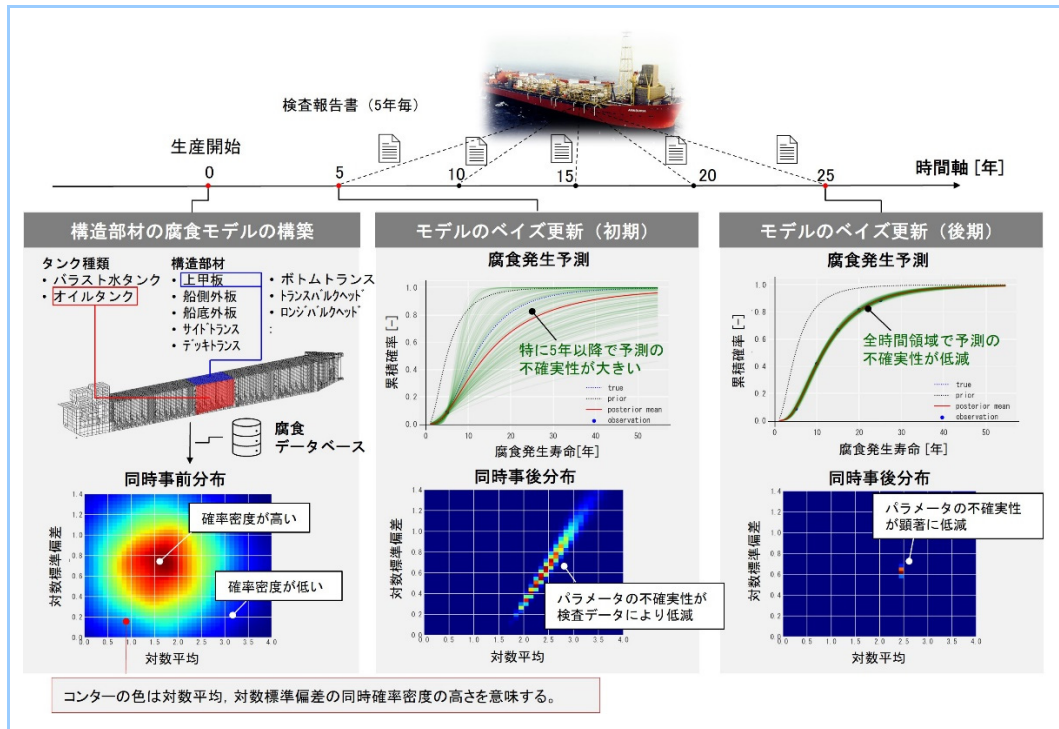


図4 多数船の腐食統計と対象船の検査データを用いた腐食発生寿命の確率的予測の例

2.2 係留設備デジタルツイン

(1) 係留設備デジタルツインの構想

係留設備の事故統計とオペレータとの協議に基づき、特に故障率が高い係留チェーンを主な評価対象とした。また、船級協会、オペレータ、係留設備ベンダらとのワークショップを開催し、検査法、自動化・省力化、健全性マネジメントなどの観点で業界ニーズや技術課題を調査し、デジタルツインの構想と技術開発を進めた。係留設備デジタルツインとアセット健全性マネジメントは、図1の船体構造と同様の構想で開発した。係留設備の業界では、図5に示すとおり、係留解析と構造解析の物理シミュレーションを軸に、マルチスケール(係留ライン:2000m～チェーンの腐食ピット:5mm)で生じる多様な不確定要因と計測データを統合評価することで、余寿命の評価精度を向上し、検査負担の軽減や寿命延伸などライフサイクルコストを低減するニーズが存在する。

本節では、係留解析による係留力予測、標準検査データテンプレートの構築、構造解析による応力予測・寿命評価の3点について、概要を説明する。

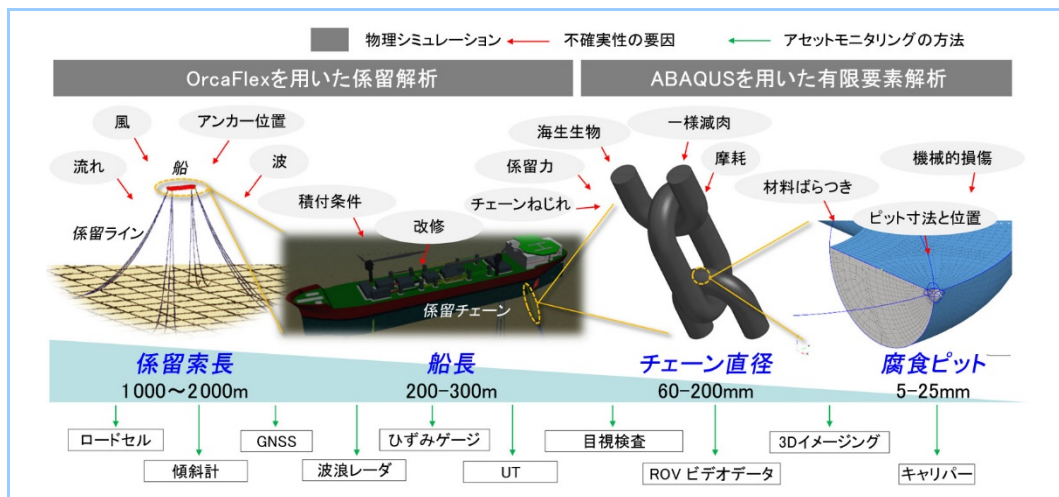


図5 係留チェーンデジタルツインの物理モデル、不確定要因、アセット計測手法の概念図

(2) 係留解析による係留力予測

仮想 FPSO の係留仕様(係留形式:多点係留カテナリー方式, 係留索数:12 本, 水深:1200m)を決定し, 係留解析ソフトウェア OrcaFlex の解析モデルを作成した(図5左部)。

本解析モデルを用いて環境条件(波高, 波向, 風速, 風向, 流速, 流向)をパラメータとした時刻歴応答解析を実施し, 任意の環境条件に対する FPSO 位置, 各係留索の係留力の時系列データ, 統計値を格納した係留力データベースを作成した。係留力予測プロセスに本データベースを組み込むことで, 都度, 時刻歴応答解析を実施することなく, 係留力をリアルタイムで予測することが可能となる。

(3) 標準検査データテンプレートの構築

係留設備デジタルモデルの更新には, デジタルモデルと連携可能な標準検査データテンプレートが必要となる。そこで, 船級協会が有する複数の検査会社の多様な検査報告書から, 健全性マネジメントにおいて特に重要な検査項目を抽出・整理することで, 標準検査データテンプレートを構築した。構築したテンプレートは, オペレータや係留設備ベンダからのフィードバックを踏まえて改良して最終版とした。

本テンプレートでは, チェーンの ID, インターリンク部と直線部などの主要寸法や腐食ピット発生状況を含む計 36 項目の情報により, 実機チェーンの状態を表現する。

(4) 構造解析による応力予測・寿命評価

係留解析で得られた係留力の時刻歴と標準検査データを用いて, 腐食チェーンの余寿命, 静強度成立性, 破損確率を評価する。本開発では, 既往研究のレビューに基づいて腐食チェーンの疲労寿命への主要な影響因子を整理し, チェーン製造時の保証荷重負荷(最小破断荷重の約 70%)により導入された残留応力, 応力範囲, 平均応力, 腐食減肉, 腐食ピットを評価モデルに組み込んだ。

図6に腐食ピットを有する係留チェーンの FE モデルと解析結果の例を示す。ここでは, 半球状の腐食ピットの位置(アウトークラウン, インナーベンド, 直線部)と寸法(深さ:5, 15, 25mm)をパラメータとした。各代表位置において, 腐食ピットの寸法と応力集中係数(最大主応力とサイドバー平均応力の比率)の関係を学習した回帰モデルを構築し, 一様減肉による応力増分と組み合わせることで, 任意の位置・寸法の腐食ピットを有する腐食チェーンの応力を評価し, 静強度成立性や疲労寿命を評価する手法を開発した。

標準検査データテンプレートで得られる腐食ピットの位置情報は, 図6左下で示すように, 8セグメントの内, どの位置であるかであり, これより精緻な情報は得られない。したがって, 例えばセグメント 3 で腐食ピットが観測された場合, 最も発生応力が高いアウトークラウン(チェーン頂部外側)にピットがあると仮定することで, 応力を安全側に評価する。

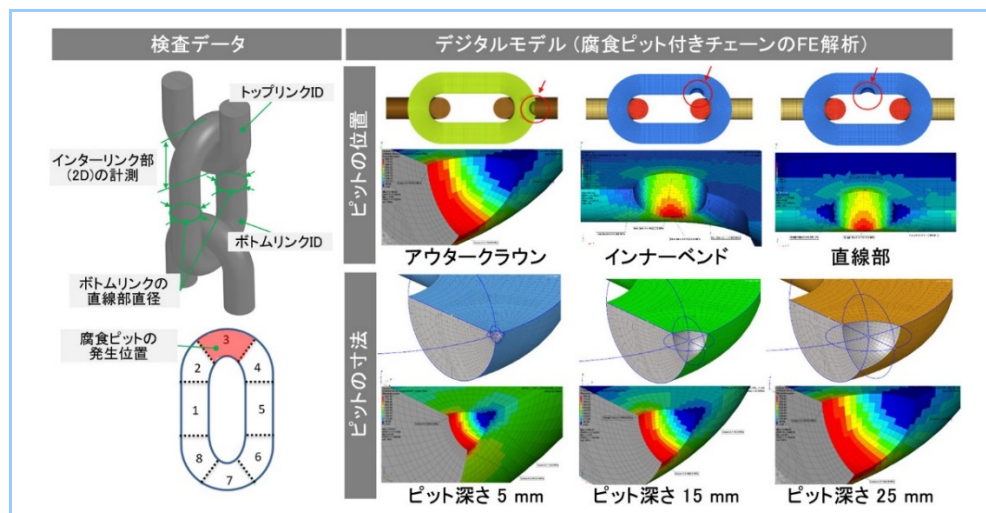


図6 標準検査データテンプレート(左)と腐食チェーンのデジタルモデル(右)

本開発では、仮想 FPSO を所定の海域に設置し、その海域で想定される環境条件(波高、波向、風速、風向、流速、流向)や、各チェーンの腐食状況の時系列データを乱数で生成し、それらを用いて、係留チェーンの荷重-応力-強度の一環評価を実施した。

3. アセット健全性マネジメント ダッシュボード

アセットマネジメントの概要、原則、用語や要求事項、適用指針は、ISO 55000 シリーズとして規格化されており^{(17)~(19)}、老朽インフラ設備を中心とする設備保全管理への適用事例が報告されている。本開発でも、このような国際規格の考え方を背景に、客観的で説明性に優れた、アセット健全性マネジメントを支援するダッシュボードを開発した。

3.1 リスクインフォーム意思決定

アセット健全性マネジメントでは、環境データ(波高、波向き、波周期等)や実機計測データ(応力、加速度、板厚等)などのセンサ情報や、設計仕様や解析モデル、表・文章・画像を含む検査データ、部材の余寿命・破損確率・リスク等の計算結果など、多種多様な属性、フォーマットのアセット情報を効率的に集約・可視化・分析し、オペレータの意思決定を支援する必要がある。本節では、意思決定支援の方法や評価基準の具体例を説明する。

(1) リスクインフォーム意思決定

アセット情報を用いた運転・保全の最適化には、客観的指標であるリスク(=破損確率×破損影響度)最適解にオペレータの洞察に加えたリスクインフォーム意思決定を行う方針とした。リスクのような定量指標を判断基準とすることで、客観性と説明性を保ちながら、システムティックに保全合理化を進めることができる。また、お客様のニーズや事業環境に応じて、柔軟に別の意思決定基準(信頼度など)を採用する方針とした。

(2) 破損影響度

各構造部材に対して、安全性、環境、生産性、事後保全費用の4つの観点で破損影響度の評点付け(1~5 点)を行う。例えばオイルタンク外板部材の破損は、オイルの海洋流出に繋がる懸念があるため、環境面での破損影響度は大きい。リスク評価における破損影響度は、4 つの内、特に懸念している単一指標を用いるか、複数指標の加重平均値を用いて評価する。

3.2 ダッシュボードシステム

ダッシュボードシステムのデザインでは、まず想定されるシステムユースケースでの意思決定に必要な情報を整理し、アセット健全性マネジメントの各種判断に必要な指標や情報を表示するよう、ユーザインタフェースを検討した。

システムユースケースとして、(a)日常運転での波浪・応力・加速度等のデータ取得、船陸通信、余寿命・リスク評価の自動化/省力化、(b)定期検査での追加検査/部材交換の要否判断、デジタルモデルの更新、更新モデルを用いた中長期保全計画の計画、(c)計画外損傷発生時の対応判断支援(即補修か次回検査まで損傷監視するか)、追加点検項目の策定、(d)嵐などの大荷重発生後の高リスク部位の状態評価、き裂進展解析、追加の点検項目策定などを想定した。

また、ユーザ要望に柔軟に対応できるよう、オンプレミス、社外クラウド(Microsoft Azure)の2種類の環境でシステムを実装し、リスク計算や通信など各種機能を検証した。

(1) ダッシュボードの概要

ダッシュボードでは対象アセット(船体、係留、ライザーなど)に応じて、インサイト(Insight)、メンテナンス(Maintenance)、リスク解析(Risk Analysis)、モニタリング(Monitoring)、損傷イベント(Damage Event)、報告書(Report)、情報(Information)の7つのWEB ページでアセット健全性マネジメントに関する情報を管理している。

トップページであるインサイトでは、リスク部材の位置や数量や日々の疲労損傷度の蓄積状況などの KPI を確認し、モニタリングでは、アーカイブされた環境・実機計測データや疲労損傷度の推移などの時系列チャートを確認する。また、リスク解析では、個別部材の現在、将来の

寿命や破損確率の詳細を確認し、詳細を確認したい部材については、報告書で詳細な検査報告書、検査データへアクセスする。メンテナンスでは、元の検査・取替計画とリスク最適な工事計画の確認やレビューを行う。本報では、紙面の都合上、代表ページ(インサイト、リスク解析)の概要を説明する。

(2) 船体構造・係留設備向けダッシュボード画面

図7に船体構造のインサイトとリスク解析のページ画像を示す。インサイトでは、ページトップに、現在-将来における疲労損傷と腐食損傷の管理閾値の超過数などの健全性 KPI を表示する。その他、過去一定期間の海象データ(波向き、波周期、波高)、代表部の疲労損傷の蓄積履歴、疲労損傷や腐食損傷の空間分布、推奨保全アクションリスト等の情報を表示し、アセット健全性に関わる全体状況の把握をサポートする。

サイドメニューからリスク解析へ移動すると、アセット健全性リスクの全体像とともに、個別部材の概要、余寿命、破損確率などの健全性評価の詳細が表示される。概要(Overview)タブでは、現在-将来のリスクパレート図や疲労、腐食損傷に関するリスクマトリクスを表示し、高リスク部材が確認できる。その後、疲労(Fatigue)などの個別の損傷モードタブへ移動すると、個別の評価部材の評価位置、疲労損傷度の時系列予測、破損確率、損傷リスク、推奨アクションなどの項目が確認できる。



図7 船体構造のアセット健全性マネジメントダッシュボードの例

図8に係留設備のリスク解析のページ画像を示す。リスク解析では、概要と個別の係留ラインのタブ(本事例では 1~12)を作成した。概要のタブでは全係留ラインについて、現在-将来の疲労損傷度、静強度成立性の閾値を超過するチェーン数や損傷量の空間分布(縦軸:損傷度、横軸:水深位置)を表示することで、全係留ラインの時間・空間的な損傷状況の理解を支援する。

全体状況を把握した後、詳細確認が必要な係留ラインのタブを選択することで、対象係留ラインの全てのチェーンについて、疲労損傷度の時系列予測、破損確率、損傷リスク、推奨アクションなどの項目を確認できる。また、検査データを取得しているチェーンについては、腐食減肉量に応じた色や腐食ピット位置を2次元マップ上に表示して、損傷状態の理解を促す。



図8 係留設備のアセット健全性マネジメントダッシュボードの例

4. まとめ

本報では、大型浮体構造物のデジタルツインと、デジタルツインを用いたアセット健全性マネジメントを支援するダッシュボードシステムの開発状況を説明した。本開発技術の導入により、計画外停止の防止、老朽設備の寿命延伸、保全需要の抑制、適切な設備更新投資の支援、アセットのライフサイクルコスト低減などの多面的な価値が生まれ、持続可能なエネルギーシステムへ移行する際の経済的負担の軽減が期待できる。

今回開発したデジタルツインの考え方やダッシュボードシステムには汎用性があり、機械・電気部品を含む多くの製品のアセット健全性マネジメントへ応用できる。今後、製品やお客様の事業環境・困りごとに応じて、ロジックやインタフェースを柔軟にカスタマイズしながら、多くのお客様へ開発技術を提供していく。

謝辞:

本研究開発は、日本財団の助成プログラムである、“海洋開発に係る日本-スコットランド連携技術開発助成”，及び，“海洋石油・天然ガス開発に係る日本財団-Deepstar 連携技術開発助成”として実施しました。

特に係留設備デジタルツインの開発は DNV と共同で推進したもので、Deepstar の Shaker Shamshy 氏、Joseph Gomes 氏、Project Champion である Chevron の Aifeng Yao 氏、DNV の Vivek Jaiswal 氏には、有益なご助言を頂きました。

両プロジェクトの関係団体、企業の関係者全員に、この場を借りて改めて感謝の意を示します。

参考文献

- (1) 日本経済団体連合会, Society 5.0 実現による日本再興 ～未来社会創造に向けた行動計画～, (2017)
- (2) 内閣府, Society 5.0, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/ (2024 年2月 24 日アクセス)
- (3) Glaessgen, Edward et al., The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (2012)
- (4) Thelen, Adam et al., A comprehensive review of digital twin - part 1: modeling and twinning enabling technologies, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 65, No. 354, (2022)
- (5) Kapusuzoglu, Berkcan et al., Multi-Level Bayesian Calibration of a Multi-Component Dynamic System Model, ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering 23 (1) (2023)
- (6) Guo, Yulin et al., Investigation of Surrogate Modeling Options with High-Dimensional Input and Output. AIAA Journal 61 (3) (2023)
- (7) Ito, Hiroshi et al., On Virtual Clearance Monitoring of Steam Turbine by Using Model Order Reduction., ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, GT2021-59003 (2021)
- (8) Honjo, Shintaro et al., Maximizing Production with Real-Time Integrity Operating Windows, Offshore Technology Conference 2021, OTC-31030 (2021)
- (9) Matsumoto, Shunsaku et al., Mooring Integrity Management through Digital Twin and Standardized Inspection Data, Offshore Technology Conference 2021, OTC-31036 (2021)
- (10) Matsumoto, Shunsaku et al., Mooring Integrity Management Through Digital Twin and Standardized Inspection Data Phase 2, Offshore Technology Conference 2022, OTC-31717 (2022)
- (11) Sugimura, Tadashi. et al., Hull Condition Monitoring and Lifetime Estimation by the Combination of On-Board Sensing and Digital Twin Technology, Offshore Technology Conference 2021, OTC-30977 (2021)
- (12) DNVGL-RP-A204, Qualification and assurance of digital twins (2020)
- (13) 佐藤 宏一ほか, 最先端構造解析プログラム MHI-DILAM -大型船舶・海洋構造物への適用-, 三菱重工技報, Vol. 47, No.3 (2010)
- (14) Joint Industry Project, Life Cycle Management of Hull Structure, Long-term corrosion prediction model (2014)
- (15) Sone H. et al., Evaluation of thickness diminution in steel plates for the assessment of structural condition of ships in service, Class NK technical bulletin, vol.21 (2003) p.55-71
- (16) 日本造船研究協会, SR242 原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究(2002)
- (17) ISO 55000, Asset Management -Overview, principle and terminology (2014)
- (18) ISO 55001, Asset Management -Management systems: Requirements (2014)
- (19) ISO 55002, Asset Management -Management systems: Guidelines for the application of ISO 55001 (2018)