

システム技術開発調査研究
18-R-10

価値創造型ものづくり力強化に資する 協調型フロントローディング設計支援技術開発 に関する調査研究

報 告 書

－ 要 旨 －

平成 19 年 3 月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 社団法人日本産業機械工業会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。
URL : <http://keirin.jp/>



序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムの調査研究等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長 政策研究院 リサーチフェロー 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「価値創造型ものづくり力強化に資する協調型フロントローディング設計支援技術開発に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人日本産業機械工業会に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成19年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

本報告書は、財団法人機械システム振興協会より、社団法人日本産業機械工業会が平成18年度事業として受託した「価値創造型ものづくり力強化に資する協調型フロントローディング設計支援技術開発に関する調査研究」の成果をまとめたものである。

日本の景気は2002年以来、4年近くにわたって回復傾向を見せている。製造業においては、生産が堅調な伸びを見せるとともに事業の統廃合による設備の集約化等が進み、それらを受けた好調な企業収益を背景に設備投資を伸ばし、さらに収益を伸ばすという好循環が生まれている。

経済成長の牽引力となっている我が国のものづくりの強みは、現場の優秀な技術者、技能者が設計思想を理解し、ものづくり現場情報を設計にフィードバックすることで、高い精度と信頼性を有する製品を作り上げてきた「擦り合わせ型製造業」にあり、ものづくり現場での膨大な知識やノウハウの集積に加えて、シミュレーション、CAD/CAM/CAE、生産管理システム等に代表されるITの利活用によってさらなる効率化、進化を遂げてきた。

今後、IT等の科学技術を取り入れたものづくりで先行している欧米や、個々の要素を組み合わせることによって製品を作る、いわゆる組み合わせ（モジュラー）型ものづくりで急成長している中国に対抗し、部材から巨大機械システムまで含めたものづくりの国際競争力を維持し続けるためには、現場の個々人の優れた管理能力や技量の上に依存せず、日本型ものづくりに適応した科学技術、例えば日本のものづくりプロセスに合わせた設計・製造支援システム等によってさらに日本型ものづくりを強化することが必要である。

一方、発電所、航空機、ロケット等の施設や巨大な機械システムを製造構築していく上でもっとも大切なことは、社会と国民の安全・安心である。これらはその巨大さゆえに試作機等による事前の評価が困難であり、計測、設計、材料、加工、シミュレーション、モニタリング等のあらゆる要素技術をインテグレートし、さらには過去に経験した故障・事故情報や劣化診断報告等のメンテナンス情報の共有化と活用により、構想段階において機械システムの信頼性に関連する要因等を利活用する「フロントローディング設計」を実現することが重要である。

このような社会情勢の中、本調査研究では、「フロントローディング設計」と「擦り合わせ型製造業」の2つをキーワードに、設計品質の向上、安全・安心の確保、価値創造型ものづくり力強化に資する設計を支援する技術開発の動向を調査するとともに、その課題と展望を明らかにするものである。本調査研究の成果が、「強い経済と安心な社会」をもたらす一助となれば幸いである。

平成19年3月

社団法人日本産業機械工業会

目 次

序

はじめに

1 調査研究の目的	1
2 調査研究の実施体制	2
3 調査研究成果の要約	10
3.1 フロントローディング設計支援技術に関する調査研究	10
3.1.1 実機対応試験技術の調査・検討	10
3.1.2 実験評価情報高度利用 CAE の調査・検討	27
3.1.3 情報活用技術の開発に関する調査・検討	61
3.1.4 フロントローディング設計の統合環境に関する開発動向調査	79
3.2 擦り合わせ型製造業における日本型ものづくりや設計高度化のための 設計支援環境に関する調査研究	87
3.2.1 調査の背景	87
3.2.2 標準化 IT 技術の調査・検討	92
3.2.3 現物融合化 IT 技術の調査・検討	96
3.2.4 コラボレーション支援 IT 技術の調査・検討	99
3.2.5 今後の課題および展開	100
4 調査研究の今後の課題および展開	104
4.1 フロントローディング設計支援技術に関する調査研究	104
4.1.1 実機対応試験技術の今後の課題と展望	104
4.1.2 実験評価情報高度利用 CAE の今後の課題と展望	107
4.1.3 情報活用技術の今後の課題および展開	111
4.2 擦り合わせ型製造業における日本型ものづくりや設計高度化のための 設計支援環境に関する調査研究	112
4.3 総括	115

1 調査研究の目的

2005年3月22日第53回総合科学技術会議において策定された分野別推進戦略において、「ものづくり技術」分野は重点推進分野と位置付けられた。その推進のための戦略重点科学技術として、「日本型ものづくり技術をさらに進化させる、科学に立脚したものづくり可視化技術」が第一番目に取り上げられた。この中で、ITや計測分析技術をベースとして、ものづくりに関わる現象や問題を科学的に解明し共有化する技術開発により、新しい材料や加工法を積極的にものづくり現場に導入する等のプロセスイノベーションの創出を加速することが必要とも指摘されている。

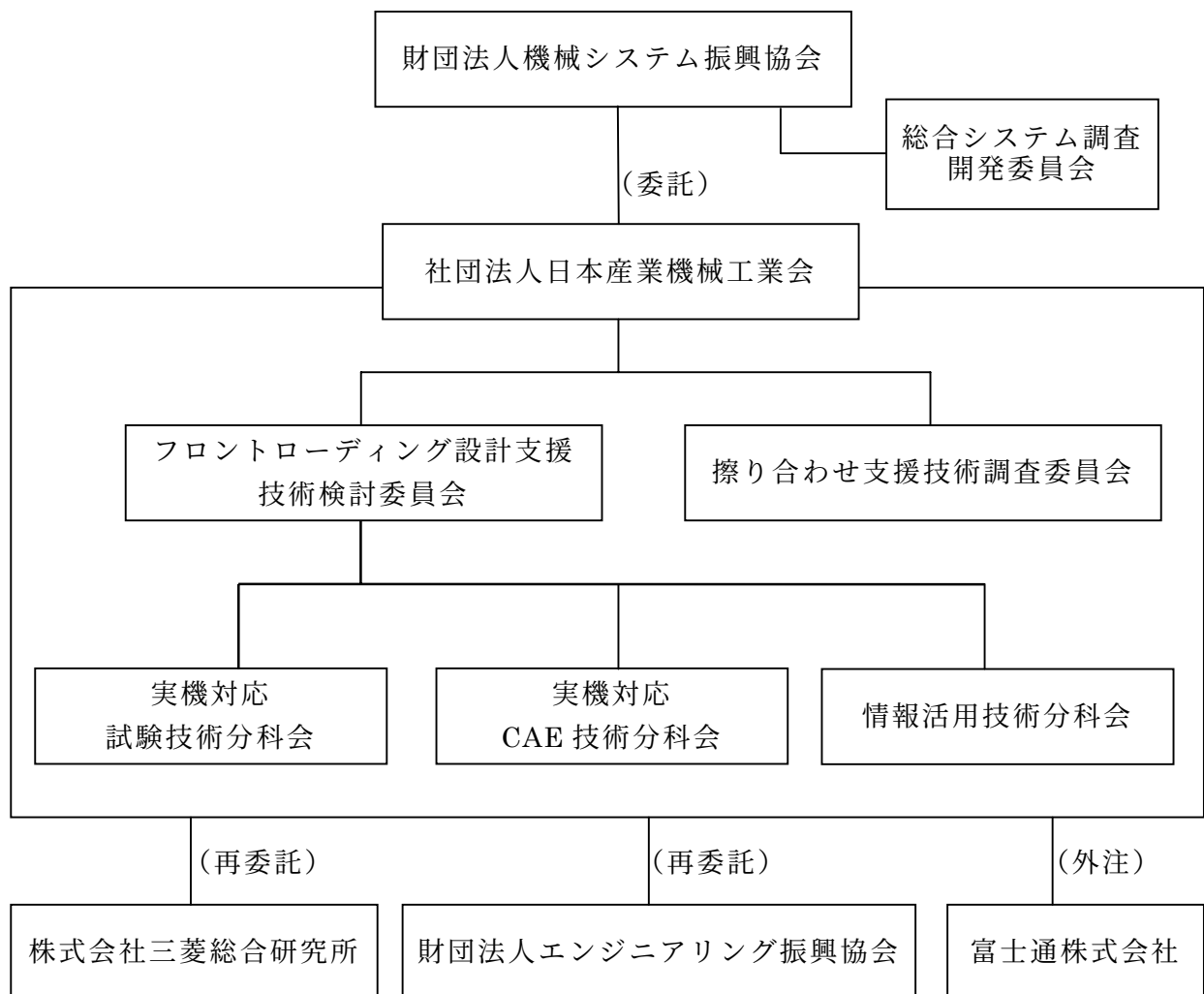
このような背景のもと、本調査研究においては、今後ますます多様化し、先鋭化するニーズを満たす機械システム製品を設計するための技術として、設計に必要な情報やデータを得て、それらを共有し、それらの情報を高度に利活用することが可能な設計支援技術の仕組み・枠組み・要素技術について、技術開発動向を調査するとともに、その実現可能性について調査研究を実施することを目的とする。

すなわち、多種多様なデータ・情報や知識を、そのものづくりに関わる多数の人間が新たな設計（製品設計・プロセス設計）等に利活用する（その際、可能な限り早い段階の設計に前倒しに積み込んで検討する）ためのデータ・情報や知識の共有化・可視化のための技術や、設計支援ツール群に必要な機能等について検討するとともに、新たな材料や加工法等を取り入れた設計を行うために必要となる製品・試作品・部品の特性や挙動等（特に製品の信頼性に直結する、あるいは劣化・不具合・故障等の要因等）の予測・評価技術に関する課題について検討する。これと同時に、ものづくりにおいては、ものの生産過程で生じる現象や問題のみならず、実際のものの利用・運用の過程で生じる現象や問題に関わる情報やデータが必要になること（一方で、情報や知識の交換に基づく協調化が実現すれば製品・プロセス設計のみならず、運用・メンテナンスのフェーズにおいても、それらの計画・設計に活用できるなど、機械システム製品の利用者自身もステークホルダーになり得ること）に鑑み、横（製造者間）の組織だけでなく縦（部材供給者－製造者－メンテナンス者－機器システムの利用者）の関係でも協調的に情報を交換し利活用するためのフレームワーク・ガイドラインについて検討する。

これらを通じて、価値創造型ものづくり力強化に資するものづくり可視化のための協調・統合型設計支援環境を早期に実現するために必要な技術課題を要素技術レベルに分解した具体的な技術開発計画案を提案するとともに、技術の適用範囲、直接・間接の波及効果を明確化することを目的とする。

2 調査研究の実施体制

本調査研究の実施体制として、財団法人日本産業機械工業会内に、プラント、重工・重電システムに関して信頼性の向上を図るための設計支援技術に関する調査を担当する「フロントローディング設計支援技術検討委員会」、擦り合わせ型製造業における日本型ものづくりシステムや設計高度化のための設計支援環境の調査を担当する「擦り合わせ支援技術調査委員会」の 2 委員会を設け実施した。また、「フロントローディング設計支援技術検討委員会」には「実機対応試験技術分科会」、「実機対応 CAE 技術分科会」および「情報活用技術分科会」の 3 分科会を設けて、要素課題について調査した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	政策研究院 リサーチフェロー	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 地域共同研究センター 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 副研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	志 村 洋 文
委 員	東北大学 未来科学技術共同研究センター センター長	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授	大 和 裕 幸

フロントローディング設計支援技術検討委員会 委員名簿

(順不同・敬称略)

	氏 名	所属・役職
委員長	上田 完次	東京大学 人工物工学研究センター センター長 教授
副委員長	高田 祥三	早稲田大学 理工学部経営システム工学科 教授
(分科会長)	志村 努	東京大学 生産技術研究所第一部 教授
(分科会長)	吉村 允孝	京都大学 大学院工学研究科機械工学群航空宇宙工学専攻 教授
(分科会長)	河村 幸二	財団法人エンジニアリング振興協会 FDS Labo (設備データ標準ラボ) 客員研究員
委員	大和 裕幸	東京大学 新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授
委員	藤山 一成	名城大学 理工学部機械システム工学科 教授
委員	本田 智	関西電力株式会社 火力事業本部火力エンジニアリングセンター 所長
委員	青木 満	東京電力株式会社 フェロー
委員	犬飼 隆夫	株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部グループ グループ長
委員	川上 崇	株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主幹
委員	佐々木 直哉	株式会社日立製作所 機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ センタ長
委員	桜井 茂雄	株式会社日立製作所 電力グループ 日立事業所 火力水力事業部 主管技師
委員	石出 孝	三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所 製造技術開発センターものづくり革新推進室 主席研究員
委員	伊藤 俊雄	三菱重工業株式会社 ものづくり革新推進室 室長
委員	志村 洋文	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携推進部門 産学官連携コーディネータ
幹事	綾 信博	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 主任研究員
(幹事)	佐々木 信也	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 副研究部門長
(幹事)	手塚 明	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門数理解析研究グループ 研究グループ長
(幹事)	岡村 潔	財団法人エンジニアリング振興協会 技術部 研究主幹
オブザーバ	土屋 博史	経済産業省 製造産業局産業機械課 課長補佐
オブザーバ	三宅 晃司	経済産業省 製造産業局産業機械課 情報化推進係長

フロントローディング設計支援技術検討委員会
実機対応試験技術分科会 委員名簿

（順不同・敬称略）

	氏 名	所属・役職
分科会長	志村 努	東京大学 生産技術研究所第一部 教授
委員	大和 裕幸	東京大学 新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授
委員	藤山 一成	名城大学 理工学部機械システム工学科 教授
委員	本田 智	関西電力株式会社 火力事業本部火力エンジニアリングセンター 所長
委員	青木 満	東京電力株式会社 フェロー
委員	犬飼 隆夫	株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部グループ グループ長
委員	川上 崇	株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主幹
委員	佐々木 直哉	株式会社日立製作所 機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ センタ長
委員	桜井 茂雄	株式会社日立製作所 電力グループ 日立事業所 火力水力事業部 主管技師
委員	石出 孝	三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所 製造技術開発センターものづくり革新推進室 主席研究員
委員	伊藤 俊雄	三菱重工業株式会社 ものづくり革新推進室 室長
委員	志村 洋文	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携推進部門 産学官連携コーディネータ
委員	綾 信博	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 主任研究員
委員	手塚 明	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門数理解析研究グループ 研究グループ長
幹事	佐々木 信也	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 副研究部門長
オブザーバ	土屋 博史	経済産業省 製造産業局産業機械課 課長補佐
オブザーバ	三宅 晃司	経済産業省 製造産業局産業機械課 情報化推進係長

フロントローディング設計支援技術検討委員会
実機対応 CAE 技術分科会 委員名簿

（順不同・敬称略）

	氏 名	所属・役職
分科会長	吉村 允孝	京都大学 大学院工学研究科機械工学群航空宇宙工学専攻 教授
委員	大和 裕幸	東京大学 新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授
委員	藤山 一成	名城大学 理工学部機械システム工学科 教授
委員	本田 智	関西電力株式会社 火力事業本部火力エンジニアリングセンター 所長
委員	青木 満	東京電力株式会社 フェロー
委員	犬飼 隆夫	株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部グループ グループ長
委員	川上 崇	株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主幹
委員	佐々木 直哉	株式会社日立製作所 機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ センタ長
委員	桜井 茂雄	株式会社日立製作所 電力グループ 日立事業所 火力水力事業部 主管技師
委員	石出 孝	三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所 製造技術開発センターものづくり革新推進室 主席研究員
委員	伊藤 俊雄	三菱重工業株式会社 ものづくり革新推進室 室長
委員	志村 洋文	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携推進部門 産学官連携コーディネータ
委員	綾 信博	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 主任研究員
委員	佐々木 信也	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 副研究部門長
幹事	手塚 明	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門数理解析研究グループ 研究グループ長
オブザーバ	土屋 博史	経済産業省 製造産業局産業機械課 課長補佐
オブザーバ	三宅 晃司	経済産業省 製造産業局産業機械課 情報化推進係長

フロントローディング設計支援技術検討委員会
情報活用技術分科会 委員名簿

（順不同・敬称略）

	氏 名	所属・役職
分科会長	河村 幸二	財団法人エンジニアリング振興協会 FDS Labo（設備データ標準ラボ） 客員研究員
副分科会長	高田 祥三	早稲田大学 理工学部経営システム工学科 教授
委員	加藤 三治	千代田アドバンスト・ソリューションズ株式会社 PS 事業本部 本部長
委員	金氏 眞	鹿島建設株式会社 土木管理本部土木技術部 リニューアルグループ長
委員	河村 泉	株式会社 JIPM ソリューション コンサルティング事業本部 TPM 総研技術主幹
委員	原 俊雄	株式会社荏原製作所 風水力機械カンパニー 国際営業統括部 マネージャー
委員	星野 晃成	富士通株式会社 産業ビジネス本部システム事業部
委員	三ヶ田 康造	コスモエンジニアリング株式会社 事業統括部 担当次長
委員	大和 裕幸	東京大学 新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授
委員	山本 勝美	日揮株式会社 技術開発センター 副センター長
幹事	岡村 潔	財団法人エンジニアリング振興協会 技術部 研究主幹
オブザーバ	新田 渉	経済産業省 製造産業局 産業機械課国際プラント推進室 プラント貿易業務一係長
オブザーバ	綾 信博	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 主任研究員

**フロントローディング設計支援技術検討委員会 および
実機対応試験技術分科会・実機対応 CAE 技術分科会 事務局名簿**

(順不同・敬称略)

氏 名		所属・役職
事務局	庄野 勝彦	社団法人日本産業機械工業会 常務理事
主幹研究員	吉良 雅治	社団法人日本産業機械工業会 技術部 部長代理
主任研究員	岡田 雅規	社団法人日本産業機械工業会 技術部 課長
研究員	大川内さおり	社団法人日本産業機械工業会 技術部
研究員	雨宮 正明	社団法人日本産業機械工業会 技術部
事務局	西村 俊之	株式会社三菱総合研究所 社会情報通信研究本部 本部長
事務局	山本 誠司	株式会社三菱総合研究所 科学技術研究本部 科学技術政策グループリーダー
事務局	村瀬 智子	株式会社三菱総合研究所 社会情報通信研究本部次世代基盤研究グループ
事務局	豊嶋 大輔	株式会社三菱総合研究所 情報通信技術研究本部情報技術研究グループ

**フロントローディング設計支援技術検討委員会
情報活用技術分科会 事務局名簿**

(順不同・敬称略)

氏 名		所属・役職
事務局	吉田 豊	財団法人エンジニアリング振興協会 研究員 〔コスモエンジニアリング(株) 保全技術部担当次長〕
事務局	角田 攻	財団法人エンジニアリング振興協会 研究員 〔日揮プランテック(株) 取締役 設備診断サービス部部長〕
事務局	宮川 秀眞	財団法人エンジニアリング振興協会 常務理事
事務局	大野 宣夫	財団法人エンジニアリング振興協会 技術部 部長
事務局	朝倉 紘治	財団法人エンジニアリング振興協会 研究理事
事務局	根本 俊夫	財団法人エンジニアリング振興協会 技術部 研究主幹

擦り合わせ支援技術調査委員会 委員名簿

(順不同・敬称略)

	氏 名	所属・役職
委員長	鈴木 宏正	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
委員	大富 浩一	株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主幹
委員	小野里 雅彦	北海道大学 大学院情報科学研究科システム情報科学専攻 教授
委員	加瀬 究	独立行政法人理化学研究所 知的財産戦略センター VCAD システム研究プログラム VCAD モデリングチームリーダー
委員	下村 芳樹	首都大学東京 システムデザイン学部 ヒューマンメカトロニクスシステムコース 教授
委員	平岡 弘之	中央大学 理工学部精密機械工学科 教授
委員	藤田 喜久雄	大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻 教授
幹事	松木 則夫	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター センター長
主任研究員	田中 一郎	東京電機大学 工学部機械工学科 教授
オブザーバ	菅原 洋行	経済産業省 製造産業局参事官室 技術係長
オブザーバ	杉浦 宏美	経済産業省 製造産業局参事官室 参事官補佐

擦り合わせ支援技術調査委員会 事務局名簿

(順不同・敬称略)

	氏 名	所属・役職
事務局	庄野 勝彦	社団法人日本産業機械工業会 常務理事
主幹研究員	吉良 雅治	社団法人日本産業機械工業会 技術部 部長代理
主任研究員	岡田 雅規	社団法人日本産業機械工業会 技術部 課長
研究員	大川内さおり	社団法人日本産業機械工業会 技術部
研究員	雨宮 正明	社団法人日本産業機械工業会 技術部

3 調査研究成果の要約

3.1 フロントローディング設計支援技術に関する調査研究

3.1.1 実機対応評価方法の調査・検討

1) 実機対応試験技術の考え方

機械システムの長期的にわたる信頼性確保のためには、実機の長期試験や破壊試験が重要である。しかし、家電品・自動車等と異なり、社会的資本財たる原子力や火力発電設備、宇宙航空機、船舶等、重工・重電システムの実機試験の実施は、実際には極めて困難である。このためこれらの製品では、既往の設計に基づいた既往の製品の長期運転履歴を参照した安全率設計が基本とされてきた。しかし、今後は実際の機器におけるダイナミックな経時変化・劣化を加速評価可能な予測実験手法を開発し、整備する必要がある。

これまでもさまざまな材料や構造の標準試験法が開発・提案されてきているほか、各メーカーにおいて独自の試験法が開発されてきてはいるが、これまでの調査研究の結果、実機における長期間の劣化現象を評価する加速試験、新設計・改良設計に反映するために必要となる材料変更への指針を与えられる試験という観点から見て設計に有効な情報を十分に得られていないことが明らかになっている。

設計上で現在課題となっている経時変化・劣化事象の多くは複雑であり、また、複合的・非線形的な現象や、理論的に未解明あるいは観測不可能な現象が鍵になっていることも多い。従って、理論的に試験装置を構成することは大変に困難であることから、実機の状況を模した装置を構成することになる。しかしながらこうした試験装置においても、試験装置の構成に問題があり実機での現象を十分に再現できていないこと、実機での現象と試験装置での現象を十分に対応づけられていないことが、有効な評価を困難にしている。前者に関連するものとしては例えば、試験機の剛性の問題なども含まれ、また後者には現象を実測可能な分解能でパラメータ等において特徴づける方法の問題がある。

2) 電力プラントにおける主要な劣化事象

現在、我が国では産業の伸びや消費エネルギーの電力への移行などの要因により電力需要が毎年わずかながら伸びを示している。こうした中で、原子力発電は、ベース電源としての安定供給の役割を果たすとともに、地球温暖化防止に資するエネルギー源としての切り札となっている。

一方、火力発電は現在、将来ともに電力供給の中核を占めることが期待されているが、ミドル、ピーク電源用にシフトし、頻繁な起動・停止や負荷変動など運用面でも苛酷な条件下に置かれている。また、近年、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率のコンバインドサイクル発電が急速な発展を見せており、これまでのボイラと蒸気タービンの組み合わせによる汽力発電に代わって各社で導入されている。

事故時の影響がより深刻である原子力発電プラントの場合には、国が建設・運転・検査のさまざまなフェーズでの規制に積極的に関与する中で情報公開の枠組みに基づいた信頼性確保の取り組みがなされてきているが、火力発電プラントの場合には民間の競争原理が

優先されて全く異なった状況にあると言える。

火力発電プラントの場合には、昨今では、電力自由化の中で安全・安定運転とコスト低減を両立させるための電力事業者（プラントユーザ）側の取り組みが盛んになり、定期的なメンテナンスを実施する時間管理保全から状態監視保全への移行が進んでおり、併せて製造者にメンテナンスを依頼しない割合が増加してきている。こうした中で、機器の劣化・損傷の進展についてのデータは、コスト低減のためのノウハウとしてのメンテナンス情報や運用情報と一体であるが故に、個々の電力事業者内で活用される状況にもなっている。

これら機器の中でも蒸気タービンは、原子力および火力発電プラントに共通した重要な機器であるが、①蒸気温度・圧力などの蒸気条件、②毎分回転数、③起動・停止や負荷変動の回数、などの面から、原子力発電プラントの蒸気タービンよりも火力発電プラントのそれの方が、より過酷な運用を強いられており、それら機器・部材の経年劣化・損傷は、厳しいものがある。

本調査研究での具体的な検討対象としては、実機の運転データが豊富にあり、プラントメーカーおよびプラントユーザが協調して詳細に検討可能な、35万kW級の火力発電用蒸気タービン最終段を選定した。

火力発電用のタービンにおいては、「エロージョン・コロージョン」「磨耗」「剥離」「クリープ」「疲労」「腐食」などが主要な劣化要因とされる。（「2.5 その他の劣化事象とその試験・評価技術」に述べる。）このうち、低圧蒸気タービン最終段においては、**図 3.1.1-1**に示すように「フレットイング」および「水滴エロージョン」が損傷事例のうち大きな割合を占めており、また、運用形態の変化により課題が特に深刻化しつつある問題であることが明らかになった。

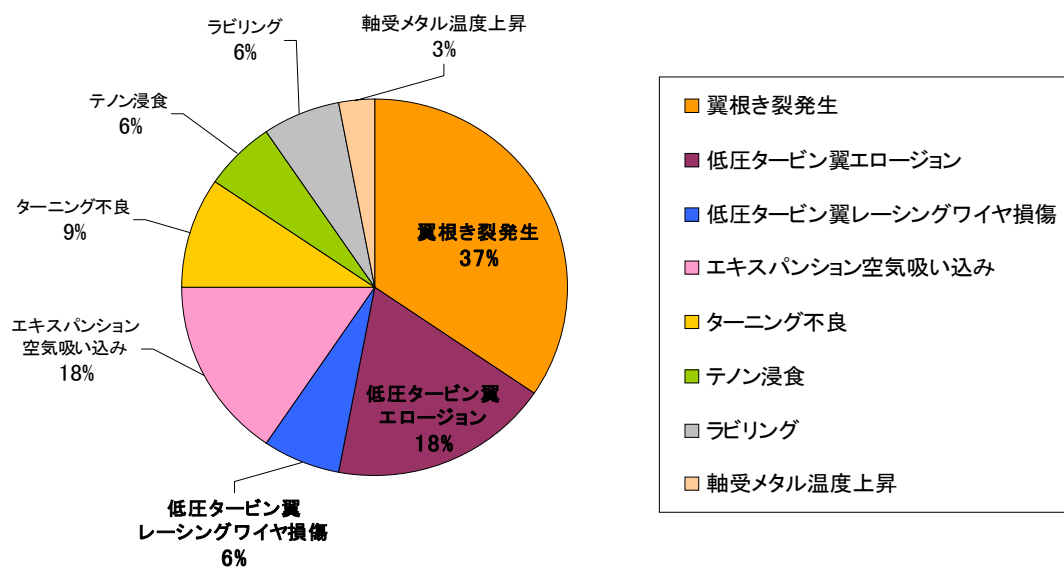


図 3.1.1-1 低圧蒸気タービン設備の損傷事例

予測・評価の観点から見ても、「クリープ」や「熱疲労」については、劣化・損傷の実績データおよび標準試験データがデータベースとして豊富に揃っているのに対して、「フレッ

ティング」および「水滴エロージョン」については取り扱いが困難である。これらは機械システムの動作条件および機器・部材の幾何学的形状とも密接に関連する複合的な劣化現象であり、システム設計の秘密性との関係もあり、データが組織内・企業内にとどまってきたことも十分には対策が進んでいない原因の一つであろう。メーカ個別の取り組みでは試験法とデータの組合せが十分に扱えないことから極めて狭い範囲にしかシステム設計が適用されてこなかったとも考えられる。従って、各メーカとユーザが協調して問題解決に当たる意義が大きいと考えられる。このため以下で重点的に調査を行う対象とした。

3) フレッシングとその試験・評価技術

(1) フレッシング

フレッシング現象は高い面圧で接触している機械構造物間の接触面間において、摩擦力を伴った微小な(数 μm ～50 μm 程度)繰り返しの相対すべりが起こる現象である¹⁾⁴⁾。このフレッシング現象により接触面に生ずる摩耗現象をフレッシング摩耗と言い、摩耗に酸化現象を伴うフレッシング摩耗を特にフレッシングコロージョンと称する場合もある。フレッシングが起きる部材に繰り返し応力が作用し、疲労損傷が発生する現象をフレッシング疲労と言い、部材の疲労強度はフレッシング現象を伴わない場合に比べて大幅に低下することが知られている³⁾。

図 3.1.1-2 はフレッシング疲労き裂発生形態の例を模式的に示したもので、接触面のうち、相対すべりを生じない固着域(この部分が大部分)に加えて、接触端部近傍で相対すべりを生じ金属酸化物の摩耗粉を伴うすべり領域が形成され、このすべり領域表面から疲労き裂が垂直とは異なった角度を持って発生・進展することが一般的である³⁾。

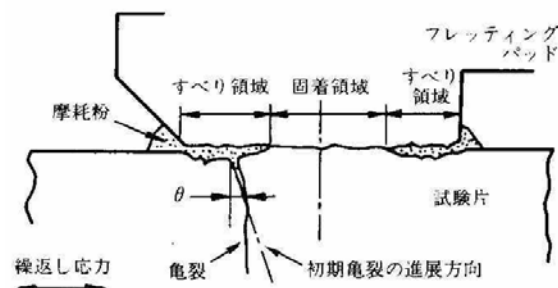


図 3.1.1-2 フレッシング疲労き裂発生形態模式図²⁾

これらのフレッシング疲労破壊の機構は完全に解明されているとは言い難く、現在でも各種因子による疲労強度の影響を求めるため、さまざまな研究機関で研究が進められている。極めて多くの接触構造が存在する複雑な機械構造物の開発段階では、どの部位がフレッシング疲労の危険性が高いかを検討するためには、類似機種がなく運転実績のない機械構造物の場合、実体に近い条件で試験を実施するなど、フレッシング疲労損傷を防止するために多大な時間と労力を要している。

(2) フレッシング対策、実機における評価

フレッシング対策を検討するため、実機のフレッシング損傷の実例として、蒸気タービンの動翼の損傷事例と対策を紹介する。

図 3.1.1-3 は低圧最終段動翼の植込部に生じたフレット疲労き裂の例である。

翼植込部はカーブドエントリー型クリスマスツリー形状であり、き裂は動翼側とロータホイール側両方に発生している。通常翼植込部の点検周期は 8 年ごとに行われ、翼を取り外し、磁粉探傷試験（MT）でき裂の有無を確認する。判定基準は無欠陥となっている。本事例のようなき裂は累積運転時間で 38,000 時間から 160,000 時間、累積起動回数で 500 回から 1,500 回の間で認められている。き裂発生まで長時間を要していることから、フレットによる損傷は定格運転中ではなく起動停止時あるいは部分負荷時の一時期に生じた翼の比較的大きな振動により、接触部に相対すべりが生じて蓄積され、疲労き裂発生に至ったものと考えられる。本損傷を防止するには翼の振動防止とともに植込部の応力集中部位と接触端部を離す、あるいは応力集中を下げる必要がある。

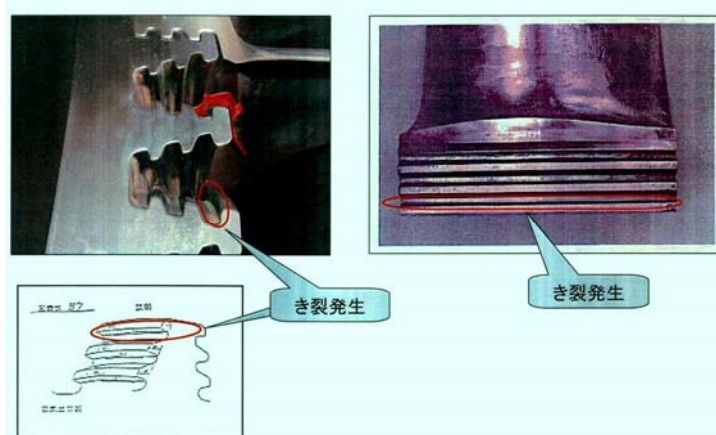


図 3.1.1-3 低圧ロータ 翼根部き裂発生事例

図 3.1.1-4、図 3.1.1-5 は低圧最終段より 1 段前（L-1）の翼長手中間部に翼の振動を抑止することを目的に設置されたタイワイヤ孔部からき裂が発生・進展し、翼が飛散した事例である⁵⁾。運転中に振動の突変が生じ、タービンを停止してケーシングを開放して飛散が確認されたものである。タイワイヤ構造では孔とワイヤに隙間を空けているが、この段落では運転負荷によって作動流体である蒸気の乾き域と湿り域が変わる乾湿交番状態となっており、蒸気中の腐食因子が孔内部の隙間に滞留濃縮した腐食環境による材料の疲労強度低下と、腐食生成物により翼とワイヤが固着して制振機能が低下し、低負荷時の蒸気流の乱れにより翼振動の増加を生じ、ワイヤと翼との接触固着部からき裂が発生したもので、腐食疲労が主要因と考えられる。本対策には蒸気水質管理の他、穴内面の疲労強度向上を図るための表面改質処理、定期的なスケール除去などが必要である。

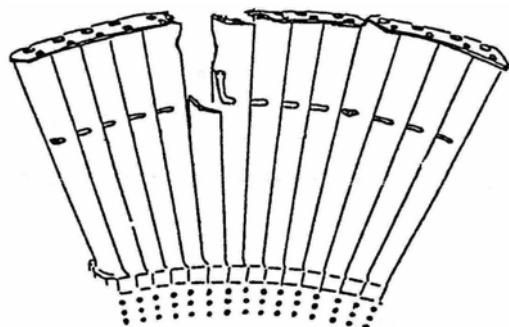


図 3.1.1-4 低圧最終段翼の破損状態

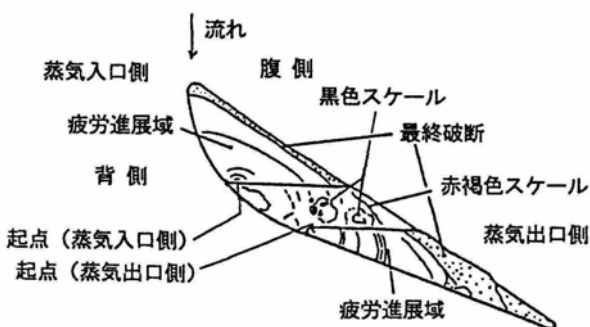


図 3.1.1-5 低圧最終段翼破損部の状況

フレット疲労による損傷は低圧翼や高圧翼など蒸気タービン翼の各所で見られ、定期検査時に発見される場合と、時には運転停止を引き起こすこともある。フレット疲労を防止する一般的な対策としては次の 5 点があげられる¹⁾。

- ① 接触部の相対すべり量の低減
- ② 接触面圧の低減
- ③ 接触面のコーティング
- ④ 応力の緩和
- ⑤ 圧縮残留応力の付与

蒸気タービンの長翼植込部でのフレット疲労においては、面圧、応力が高いのは既定のことであるため、接触部の相対すべりを低減させるために何より翼の振動を防止することが必要であり、特に定格状態を外れた共振点通過時、あるいは低負荷時での蒸気流の乱れの予測と、翼自体の十分な制振構造が必要である。このため、過去の実績がない新たな蒸気タービン開発にあたっては詳細な数値解析とともにスケールモデル、実寸モデルによる各種運転状態での蒸気流の把握、減衰効果の高い翼構造の検討が不可欠である。

(3) フレット疲労の実機対応試験評価とその設計への活用

フレット疲労試験方法については、ASTM での標準化の動き⁷⁾や日本機械学会基準⁸⁾が制定されているが、蒸気タービン機器のフレット疲労の状態を必ずしも 100% 反映できていないと考えられ、この観点から実機対応試験が必要と考えられる。

フレット疲労は磨耗、腐食、疲労の複合現象であるため、フレット疲労に影響する因子も数多いが、主要な因子として下記 8 つに分類することができる⁹⁾。実機対応フレット疲労試験はこれらの因子を制御して実機に近い条件を加速して試験できる機能が必要である。

- ① 相対すべり振幅
- ② 接触面圧の大きさと分布状況
- ③ 平均応力と応力振幅
- ④ フレット疲労繰返し数
- ⑤ 材料・表面状況
- ⑥ 繰返し速度（周波数）
- ⑦ 雰囲気
- ⑧ 温度

実機の翼植込部に近い条件でフレット疲労試験を実施した事例として、1 段フックを有するダブテール植込部のフレット疲労試験装置を図 3.1.1-6 に示す¹³⁾。タービンの回転上昇によるホイール側の翼溝の広がりや翼の遠心力を同時に負荷するために、本試験装置の場合にはホイール側の翼溝広がりを水平方向の油圧アクチュエータで、翼遠心力を垂直方向のアクチュエータを駆動することにより実現している。

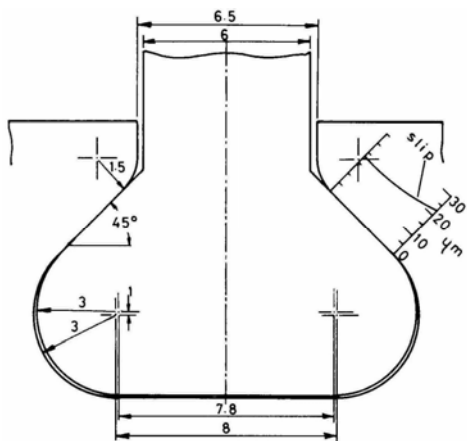


図 3.1.1-6 ダブテール型植込部

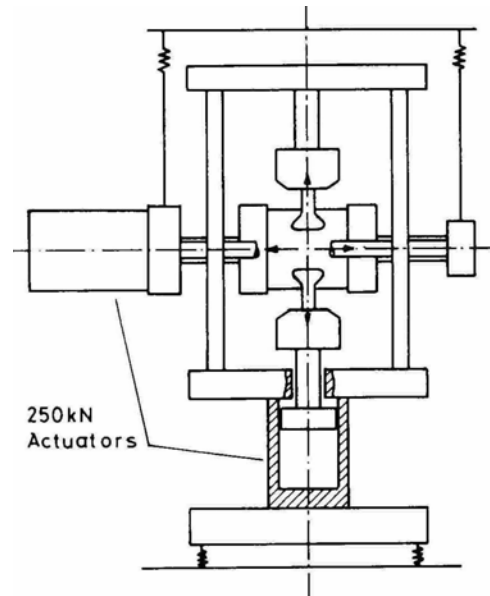


図 3.1.1-7 ダブテール植込部の実機模擬試験装置

これらのフレットング疲労試験を概観して、蒸気タービン長翼における実機対応試験の形態を考えると、実機翼の振動状態は模擬した細かな横方向の振動と、遠心力負荷、ホイールの翼溝の広がりがフレットングの要因にあげられる。そこで、これらの負荷状況を考慮した試験装置としては、植込部の断面形状を持った試験体を図 3.1.1-7 のような 2 軸の大容量の荷重負荷機構に加えて、細かな曲げ振動を負荷させるためのさらにもう 1 軸の加振装置を持った疲労試験装置が望まれる。また、その結果は振動制限値という形で翼の設計へフィードバックされる必要がある。

4) 水滴エロージョンとその試験・評価技術

(1) 水滴エロージョン

蒸気タービンの低圧段では蒸気条件が飽和域に入るため、多量の水滴が発生し、湿り蒸気流れ、すなわち気液二相流状態となって作動する。

このような湿り蒸気流れでは、水滴の発生や成長に伴って熱力学的、流体力学的なエネルギー損失、いわゆる湿り損失が付加され、タービン効率を低下させる。この湿り損失は、水滴の発生に伴って生ずる潜熱移動、壁面上に形成される水膜流や飛散水滴の加速、さらに水滴の衝突による制動力など蒸気タービン特有の損失である。また、高速で回転するタービン動翼に水滴が衝突すると、翼表面がエロージョンを受け易く、信頼性低下につながる恐れが多い。

従って、性能および信頼性の高いタービンを設計、評価するには、湿り蒸気の性質、すなわち発生する水滴の粒径分布や数密度分布、さらに個々の水滴の速度ベクトルなどを把握し、その基本的な二相流としての流動特性を明らかにすることが重要である。

動翼に衝突した粗大水滴や翼表面の水膜は遠心力の影響で半径方向に飛ばされるので、その下流にはほとんど $1\mu\text{m}$ 以下の微小水滴が存在すると言われている。このため、1970 年代頃から光学プローブを用いて蒸気タービン内部の微小水滴の径と数密度分布を計測し、湿り度を求める計測技術が欧州を中心に開発されてきた。その多くは Mie の散乱光原理に

に基づき、散乱光強度分布（Angular Scattering）や光の各波長の透過率分布（Extinction）を測定して水滴径を求める方法である¹³⁾。

なかでも、1970年代に英国の中央電力庁（CEGB）が光の透過率分布から水滴径分布と濃度分布を求める方式の光散乱プローブを開発、実機蒸気タービン内部の詳細な湿り度分布を測定した¹⁴⁾。その結果、タービン効率で1%以内の精度で測定できることを報告している。日本でも、辰野らが前方微小角散乱法を用いた光ファイバー方式の液滴計測プローブを開発、試験タービン内の湿り度分布の計測に成功している¹⁵⁾。本方式は、水滴による前方散乱光強度分布を散乱角ごと検出して水滴分布を求める方式で、水滴径の計測範囲も $0.1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ と幅広い。

最近、米国電力研究所（EPRI）が CEGB と同様に光の減衰率分布を利用した実用的な湿り度計測プローブを開発し、稼働中の実機タービン段落内部の湿り度分布を計測している¹⁶⁾。湿り度計測システムは、**図 3.1.1-8** に示すように、光源部（Xenon Lamp）、光ファイバーを内蔵するプローブ、PC および電源で構成される。プローブ先端部の詳細を**図 3.1.1-9** に示すが、外径 15 mm、12mm のスロット部をはさんで反射鏡が設置されており、この間の光の透過率を測定する方式である。日立製作所においても、この EPRI で開発した湿り度計測プローブを導入、**図 3.1.1-10** に示すように低圧タービン試験装置を用いて段落内部の湿り度分布を計測しており、かなりの精度で計測できることを確認している。

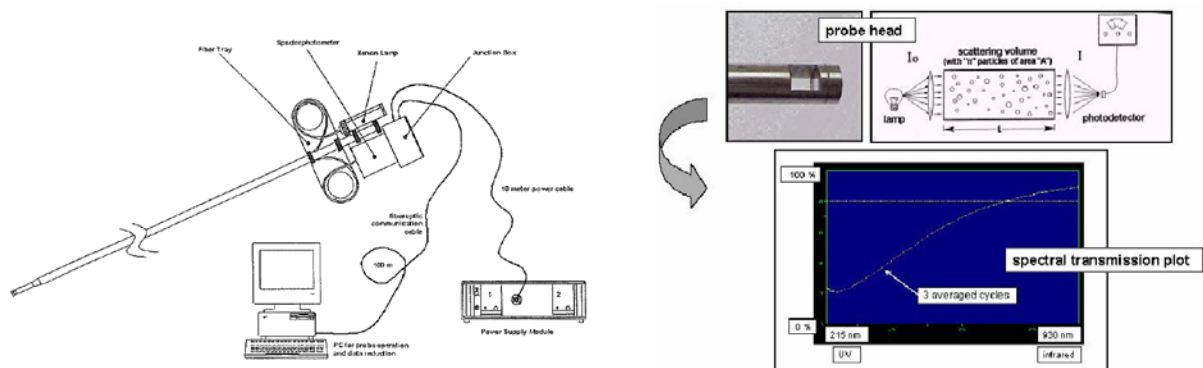


図 3.1.1-8 湿り度計測システム

図 3.1.1-9 プローブ先端部と測定原理概要



図 3.1.1-10 計測中の湿り度計測システム

(2) 水滴エロージョン対策、実機における評価

① 実機における水滴エロージョン対策について

復水式の蒸気タービンでは低圧タービンの最終翼近傍は湿り域に入ることから、水滴によるエロージョンは不可避免的に発生することになる。従って、実機プラントの計画において水滴エロージョンによる翼の浸食は考慮しなければならない項目である。具体的な対策例としては下表に示すとおりであり、直接的な対策と間接的な対策に分けて考えることができる。

表 3.1.1-1 水滴エロージョン対策例

直接的な対策	材料による対応	・翼材料硬度向上 ・保護材の貼り付け ・表面コーティング ・表面硬化処理
	構造による対応	・全周綴り構造
間接的な対策	衝突エネルギーによる対応	・水滴除去 ・衝突速度低減
	運用による対応	・復水器真空度低下
	熱サイクルによる対応	・再熱サイクルの採用 ・再熱圧力の低下 ・再熱温度の上昇
	その他	・エロージョン損傷翼の交換

水滴エロージョンは蒸気流れ中に存在する水滴が回転中の動翼に衝突することによって発生する浸食作用であり、直接的な対策としては材料の硬度を上げることが有効である。ただし、動翼母材そのものの硬度を上げた場合には腐食などその他の劣化事象に対する感受性が増加すること、水滴エロージョンの発生部位は周速が早い動翼入口先端部に集中的に発生することから、部分的に保護材を貼り付けること、あるいはコーティング処理または表面硬化処理を行うことが一般的に用いられている。（図 3.1.1-11 参照）

また、全周綴り構造を採用することで水滴の衝撃力を全周の翼で分担することにより、部分的にエロージョン浸食が激しくなる翼をなくすることができる。

一方、間接的な対策としては、衝突する水滴の絶対量を低減することや、水滴の衝突速度を低減することが一般的に行われている。

具体的にはドレンキャッチャ、ドレン溝による湿分除去、翼間距離増加による動翼への相対流入速度低減、などが実際の設計に用いられている対策としてあげられる。

1) 動翼先端部への保護材適用

2) 湿分除去構造の適用

3) 翼間距離による水滴
エロージョン低減効果

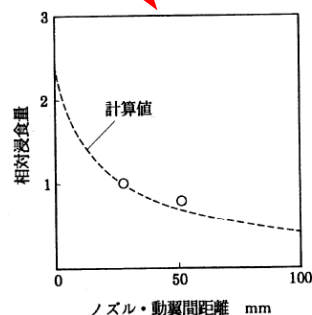


図 3.1.1-11 現状の水滴エロージョン対策

その他の間接的な対策としては、冬季の復水器真空度上昇（圧力低下）に伴う湿り度増加を防止するため、復水器真空度を低下させること（運用による対応）、プラント計画段階にて、再熱サイクル化およびその際の再熱圧力、温度の設定にて、湿り度を低減するように配慮すること（熱サイクルによる対応）などがある。

しかし、これらいずれの対策においても、水滴エロージョンの発生を完全に防止することはできないことから、これらの対策を複合的に組み合わせることによって、水滴エロージョンに対する長寿命化を図っているのが現状である。

② 実機における水滴エロージョンの実態について

蒸気タービンの低圧最終翼は、蒸气流路の最大直径が 4m を越える高速回転機械である。従って、最終翼の蒸気環境は周方向に分布を持つことになり、商業運転されている実機プラントに対して運転中に内部の局所的な状態を経時的に計測、把握することは難しい。

そこで、実機プラント計画に先立って、CAE を用いた予測解析、蒸気モデル試験設備を用いた試験計測を実施することにより、水滴の挙動は把握することを行っている。ただし、蒸気モデル試験はスケール比、試験期間などモデル化の制約があるため、水滴の挙動がエロージョンの進展に対してどの様に寄与しているのかを運転領域全域にわたって試験的に捕らえることは現実的ではない。

一般に水滴エロージョンで浸食された部位には水膜が形成され、その後の浸食を抑制する効果が期待できるとされる。実機ユニットでも経年的に水滴エロージョンの進展が頭打ち傾向を示すが、その度合いはユニットによってさまざまである。また、水滴エロージョン浸食状況は深さ、範囲などで定義することにより経年的な傾向の追跡調査を行っているが、実際には凹凸が大きく計測者による読み取り差を生じ易いという面もある。

こういった実機での運転状態の不均一性、定期点検時の計測上の不確かさなどが積み重なることによって、同一の運転環境である隣接機で異なる場合があるなど定量的な判断をすることは難しいのが実態である。

③ 実機における水滴エロージョンの評価

前述のとおり、水滴の挙動に対しては要素研究によって得られた知見を基に種々評価式が提案され、既設ユニットとの相対的な比較評価として設計段階で用いられるが、絶対的な指標として確立するには至っていない。

実際の設計に際しては、実機の計画運用条件と要素研究によって与えられた評価式を用いて、類似先行ユニットの状況を踏まえて必要な耐エロージョン対策を実施している。

現状は、蒸気タービンプラント寿命期間内に対して、水滴エロージョンに対する保証を行うことは設計的に困難であることから、

- a. エロージョン浸食が大きく信頼性が低下した場合の翼の取替え基準を作成すること
 - b. 定検毎に水滴エロージョン進展率の追跡調査を行うこと
- により、実機ユニットの信頼性確保している。

併せて、実機における水滴エロージョンに関するデータベースを蓄積することにより経験的に評価精度の向上を図っている。

(3) 水滴エロージョンの実機対応試験評価とその設計への活用

前項に示すとおり、水滴エロージョンに対するモデル試験結果は間接的に実機の設計に適用しているにとどまっている段階である。一方、温暖化に代表される環境問題への対応として、蒸気タービンの大容量化、高効率化、すなわち長大翼の開発が必要な状況になっている。最終翼の長大翼化において、水滴エロージョンに対する評価精度の向上は蒸気タービンプラント全体の信頼性を高める上で重要な位置付けを持っている。

水滴エロージョンを試験にて定量的に評価するための課題としては、

- a. 水滴径、水滴量がエロージョンに寄与するため実機スケールでの検証が必要であること
- b. 実機運転では変動パラメータが多く、またそれらのパラメータが単独で変動することがないため影響因子の特定を単一の試験だけに頼ることが難しいことがあげられる。

実際の蒸気タービンでは、運用条件が通年の環境変化、周辺機器の劣化、系統運用によって変化することに加えて、最終翼は標準設計翼であることから、1種類の最終翼がさまざまなプラントのさまざまな運用条件に適用されることになる。従って、蒸気タービン最

終翼の長大翼化設計を行うにあたっては、水滴エロージョン試験結果、あるいは CAE による評価解析結果に設計裕度を加味して実機計画を行う必要がある。

最終的には、従来どおり実機相当のモデルタービンによる検証試験は今後も実施していく必要があると考えられるが、実機スケールの試験は大規模試験設備を必要とすること、あるいは実運転中の実機プラントで計測を行う必要があることなど試験計測を実施できる条件が制限されることから、全ての運転条件を実機大の試験で実施することは困難である。

以上のことを踏まえると、スケールモデル化、あるいは形状、運転条件を簡素化したモデルで実機条件を再現・補間することにより、設計裕度を定量的に評価することが実機対応試験に求められる評価技術と考える。

結果として、蒸気タービン最終翼に対する水滴エロージョンについては、実機そのものを実機対応試験にて評価することにはならないが、表 3.1.1-2 にまとめる設計面での有効性が期待できる。

今後、劣化予測のための試験技術として実機の設計に適用するにあたっては、水滴エロージョン事象自体のさらなる解明を基にした試験技術の考案が必要と判断する。

表 3.1.1-2 実機対応試験による設計に対する有効性

	有効性評価
信頼性向上	・実機相当試験条件を補間することにより、広範囲な運転条件でのエロージョン進展予測が可能となる ・変化パラメータのエロージョンに対する影響感度を定量的に把握することにより、リスク評価が可能となる
設計効率化	・設計初期段階で問題点の把握できることで、設計へのフィードバックが可能となる ・長大翼化等外挿設計に際して、設計留意点の明確化が可能となる ・設計留意点が明確になることで、ピンポイントでの対策が可能となる

5) その他の劣化事象とその試験・評価技術

図 3.1.1-12 に蒸気タービンにおける主な劣化・損傷の特徴を示す^{17,18)}。回転部分には遠心応力と蒸気力および機械的な振動応力が重畳し、高温蒸気通路を構成する配管・弁箱・車室(ケーシング)には、圧力応力と熱応力が重畳する。また、低圧部の水滴によるエロージョンに対し、高温部のエロージョンはボイラ・配管内面の酸化スケールがはく離して飛来するスケールエロージョンであり、これも性能劣化や破損につながる。そのほか、翼とロータの植込部におけるフレット疲労や、ドレンによる腐食・浸食・熱疲労なども生じる。

以上の現象は、材料の高温経年軟化による強度低下に伴って現れることがあり、また、

破壊に対する限界き裂寸法も材料の経年脆化によって減少することがある。従って、高温で使用される機器については、損傷ばかりでなく、材質の経年劣化の影響も十分把握しておく必要がある。

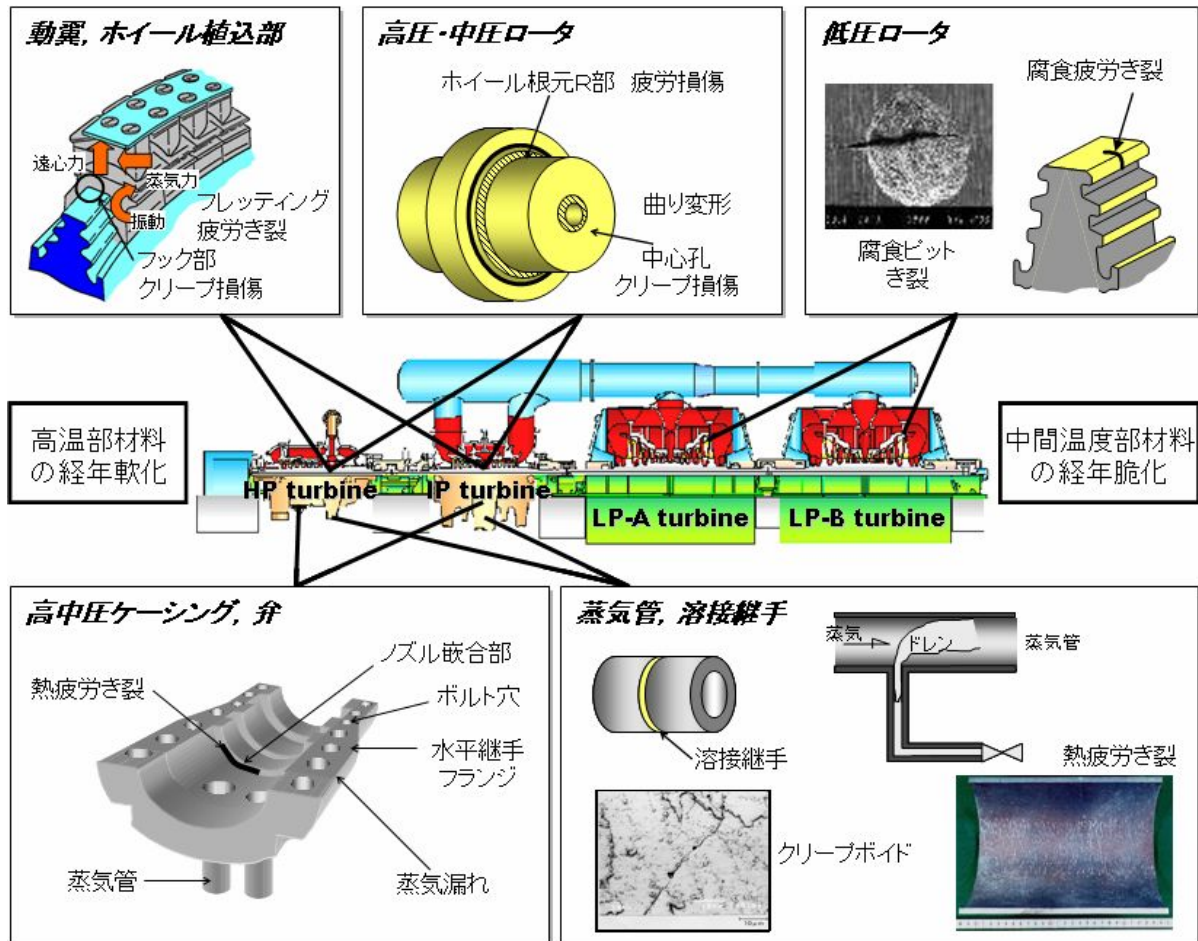


図 3.1.1-12 蒸気タービンにおける劣化・損傷

6) 実機対応試験技術の今後の課題と展望

本章においては、実際の機器におけるダイナミックな経時変化・劣化を加速評価可能な予測実験手法は信頼性の高い設計に不可欠であることから、現状の試験評価法とその課題について調査し、新たな実機対応評価試験法について基本的考え方を整理した。

具体的検討対象としては、蒸気タービンを選定した。中でも、火力発電プラントにおける蒸気タービンは、蒸気温度・圧力、回転数、起動・停止の回数や負荷変動の頻度・大きさなどの点から、原子力プラントにおける蒸気タービンよりも過酷な運用を強いられ、機器・部材の経年劣化・損傷が著しいため、検討対象として適切であると考えた。特に、35万kW級の火力発電プラントは比較的成熟した規模のものであり、実機の運転データが豊富で、プラントメーカーおよびプラントユーザが協調して詳細に検討が可能である。さらにそのプラントの中でも、運用形態の変化により課題が特に深刻化しつつある低圧蒸気タービン最終段動翼を主たる具体的検討対象として選定した。

火力発電用タービンにおいては、摩擦、クリープ、腐食、疲労、など多様な現象により劣化が進むが、低圧蒸気タービン設備の損傷状況について過去の損傷事例等を調査した結果、実機対応試験技術の開発が最も強く求められている課題は、

① フレッチング

② 水滴エロージョン

の二点である、という結論となった。これ以外の現象に関しては、標準試験法が適用可能、あるいは劣化・損傷の実績データ・試験データが豊富であり、実機対応試験技術に対する必要度は相対的に低い。火力発電用のタービンにおいては、水滴による翼の表面のエロージョンや、タービン翼を軸に取り付ける部分のフレッチングによる疲労の問題は、現在のところ信頼性を左右する最も重要な設計上の課題であり、試験法が模索されているところである。

従来、これらは機械システムの動作条件あるいは形状と密接に関連する劣化事象であり、システム設計の秘密性との関係もあり、データは組織内・企業内にとどまっていた。従って、メーカ個別の取り組みでは試験法とデータの組み合わせが十分に扱えないことから極めて狭い範囲にしか適用されていないことも明らかになった。以下、二点のそれぞれについて本調査研究の結果をまとめる。

フレッチング疲労破壊に関しての解明の困難さの一因は、接触構造の数が極めて多く、どの部位がフレッチング疲労の危険度が高いかの判定が難しいことにある。さらにその発生原因が複雑・複合的であるために、構成的に試験法を構成する方法では現象を再現しえないことから満足な評価が行えていない劣化事象であることが再確認された。

調査事例から明らかになったフレッチングの原因、発生要件等の具体例をまとめると、以下に列挙するとおりとなる。これらは、今後開発すべき実機対応試験の具体的方法・装置の持つべき要件そのもの、あるいは重要な関連要件となるであろう。

(1) 起動停止時、負荷変動時に翼に生じる大きな振動

これにより接触部に相対すべりが生じ、フレッチング発生に至る。定格運転中は問題は少ない。

(2) 腐食疲労

湿乾交番状態による腐食因子の孔内部の隙間への滞留濃縮が、腐食による翼とワイヤの固着を引き起こし、制振機能の低下、低負荷時の蒸気流の乱れによる翼振動の増加によりフレッチングが発生する。

【実機対応試験で考慮すべき要件】

① 蒸気水質

② 穴内面の腐食疲労強度

③ スケール除去の頻度

(3) 蒸気流流入方向の変化

ボイラ側から高圧蒸気とともに飛来する多量のスケールのノズルへの衝突による固体粒子エロージョンにより、ノズルの開口面積の増大、蒸気流入角度の変化が起こり、動翼への蒸気の入射部位の変化と加振力の発生から動翼の大きな振動が起こり、フレッチングが発生する。

【実機対応試験で考慮すべき要件】

- ① 材料の疲労強度
- ② ショットピーニング施工の有無
- ③ ノズルの侵食表面加工処理の種類
- (4) 長時間運転により隣接翼との接触面に生じる隙間
- (5) 加工ミス

これらの事例等から総合的に検討した結果、実機対応フレットング試験は、いくつかの主要因子を制御して実機に近い条件を加速して試験できる機能が必要である。その因子は下記のように整理された。

- ① 相対すべり振幅
- ② 接触面圧の大きさと分布状況
- ③ 平均応力と応力振幅
- ④ フレットング疲労繰り返し数
- ⑤ 材料・表面状況
- ⑥ 繰り返し速度（周波数）
- ⑦ 雰囲気
- ⑧ 温度

以上の因子のいくつかを考慮した既存の試験法に関して調査を行い、その効果と問題点について具体的事例に基づき検討した。

水滴エロージョンも、その発生原因が複雑・複合的であるために、構成的に試験法を構成する方法では現象を再現しえないことから満足な評価が行えていない劣化事象である。本調査研究では、水滴エロージョンに関する実機対応試験方法を検討していく上で必要となる要件に関して検討し、それらは下記のようにまとめられた。

- (1) 気液二相流状態の把握
 - ① 発生する水滴の粒径分布・数密度分布
 - ② 個々の水滴の速度ベクトル
- (2) 微小水滴の発生と成長のメカニズム解明
- (3) 水滴の捕集と噴霧過程の解明

また、実機対応試験方法に盛り込むために計測すべきパラメータと、その実機からの計測方法に関して、以下の点について検討を行った。

- ① 湿り度
- ② 微小水滴
- ③ 粗大水滴

さらに、上記に対して有効な計測技術として、既存の光応用計測技術に関するまとめを行い、その精度、適用範囲と限界、長所・短所等に関して検討を行った。

最後に、実機における水滴エロージョンの評価とその対策として、

- ① 実機における水滴エロージョン対策
 - ② 実機における水滴エロージョンの実態把握
- についてまとめた。

以上のように、実プラント機器のデータを参照して適用範囲の広い評価法を見出すために、現象を再現しうる動的試験装置を開発してこれに新たな測定技術や事象評価法を導入する方向が重要であることが明確化し、フレットイングと水滴エロージョンについて、試験装置の方向性が提案された。

今後重要な点は、フレットイングと水滴エロージョンのそれぞれについて、

- ① 発生にかかわる複雑かつ複合的な要因・条件の洗い出し、整理、相互関係の解明をさらに進める
- ② 上記要因・条件に関する諸量を、実機で計測する手法の開発をさらに進める
- ③ 実機よりもはるかに小型・安価・かつ単純でありながら、実機における複雑かつ複合的な劣化現象の評価が可能な実機対応試験装置を開発する

ことである。本調査研究はそのための見通しと方向性、および有効性を示した。

開発する評価装置に基づく予測評価の結果は、共通的な条件における試験結果についてデータベースとして蓄積するとともに、幅広い条件に適した手法を見出して標準的な手順として国内の製造業者間で共有することが重要である。ただし、手順や基準としては、法令に基づく検査規則、JIS 等の規定、自主規格のようなさまざまなフェーズがありうるものの、まず自主的な関連事業者間内のデファクト基準作りを指向して手法の形成に取り組むことが適切であろうと考えられる。この評価情報を、次章で検討される CAE 技術において有効に活用することがポイントであり、これが可能となれば経時変化・劣化を予測評価した機械システムの設計が可能になると考えられる。また評価のための装置や方法は、将来的には実機の長期信頼性に関する検証可能な仕様記述、品質基準や状態監視保全のための要素技術や技術基準としても有効に活用できると考えられ、システムの信頼性を飛躍的に向上させることに大きく寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 要覧編集委員会編、フレットニング摩耗と疲労要覧、工業資料センター(1998)
- 2) 武藤睦治、フレットニング疲労の破壊機構、材料、Vol.46, No.11, pp1233 (1997).
- 3) 火力原子力発電技術協会、火原協会講座 24 発電プラントの腐食とその防止、p41 (1997).
- 4) 平川賢爾、フレットニング疲労の事例と対策、住友金属、Vol.46, No.4, p4 (1994).
- 5) 蒸気タービン信頼性分科会、蒸気タービン信頼性分科会報告、ターボ機械、Vol.25, No.3, pp167 (1997).
- 6) Steam Turbine Blade Reliability Seminar and Workshop, 1986, EPRI CS-5085 (1987).
- 7) Attia M.H. and Waterhouse R.B., Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment, ASTM STP 1159 (1992).
- 8) 日本機械学会基準、JSME S015、フレットニング疲労試験方法
- 9) 佐藤健吉、フレットニング疲労とその研究動向、機誌、Vol.90, No.820, pp259 (1987).
- 10) 佐藤豊一、蒸気タービン用部材の高温フレットニング疲労に関する研究、長岡技術科学大学博士論文 (1990).
- 11) 横山大輔、蒸気タービンロータ動翼植込部のフレットニング疲労、技術開発ニュース、No.100, p13 (2003).
- 12) Endo, T., Kondo, Y. and Kadoya, Y., Establishment of Fatigue Test Method for Turbine Blade Fastener, ASTM STP 1236, pp20 (1995).
- 13) Ruiz C., Wang Z.P. and Webb P.H., Techniques for the Characterization of Fretting Fatigue Damage, ASTM STP 1159, p170 (1992). 11) 例えば Petr, V., et. Al., Development and Design of Extinction Probe for Wet Steam Diagnostics, 10th Annual Conf. On Steam and Gas Turbines for Power and Cogeneration Plants, Czech Republic, (1994)
- 14) Walter, P. T., Wetness and Efficiency Measurements in LP Turbine with an Optical Probe as Aid to Improving Performance, ASME/IEEE IJPGC, (1985)
- 15) Tatsuno, K. and Nagao, S., Water Droplet Size Measurements in an Experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer, Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, 108, (1986), 939
- 16) Hesler, S. H., 他 2 名, Optical Probe for Measurement of Steam Wetness Fraction in LP Turbines, ASME IJPGC, PWR33-2, (1998)
- 17) 藤山一成, 藤原敏洋, 児玉寛嗣, 齊藤和宏, 吉瀬仁志, 岡崎光芳, 材料, Vol.52, No.1, pp.28 (2003).
- 18) 藤山一成, まてりあ, 39, 11(2000), 873.

3.1.2 実験評価情報高度利用 CAE の調査・検討

本項では、プラントおよび重工・重電システムの経年劣化・余寿命の評価のために、実験評価情報を高度に取り込んだ形の CAE（Computer Aided Engineering）に関する調査結果・検討結果について記述する。

経年劣化の多くは現象メカニズムが十分に解明されていないものの、現象因子の特定が一部可能になっており、また、メンテナンス情報に代表される実験情報が取得されてきている。本項では、議論ターゲットとして 35 万 kW 級の火力発電用蒸気タービン最終段、議論ターゲットに関わる主要劣化モードとして水滴エロージョンとフレットィングを選出した上で、そのような実験評価情報がどのような形式であれば CAE に取り込むことが可能であるか、実験評価式を活かす実験評価情報高度利用 CAE の方法論、さらに設計から見た実験評価情報高度利用 CAE についての調査の報告を行う。

1) 実験評価情報高度利用 CAE の考え方

実機に機構を限りなく近づけた試験機を製作し、実機環境を可能な限り再現して、計測装置やセンサーを要所要所に設置して実機データを取る方法をモックアップ試験という。この方法の欠点は費用が掛かることその他、大型で複雑な実機には事実上不可能であること、長期にわたる経年変化の評価ができないこと等があげられる。一方、モックアップ試験なしで CAE（Computer Aided Engineering）のみによる評価も自動車衝突解析等、物理現象が解明され、経年変化が関係しない問題については可能になっている。

実験でより良い条件を求めるには、実験条件を変えて何度もお金と時間の掛かる実験を繰り返す必要があるが、CAE ではモデルが現象を記述できていれば入力データの変更のみで評価が可能である。また、実験機としての製造が不可能な非常に大規模なシステムの挙動解析（例えば、ロケットの挙動解析等）、計測ができないような超高温・超低温・超高速・超低速等の条件下の現象評価（例えば、原子力反応の解析等）、社会的影響が大きく実際に実験が行えない事象検証（例えば、原子力発電所の事故実験等）について、基本的に CAE は非常に強力である。これは、CAE の汎用性の性質から来ている。しかし、現状技術で CAE の汎用性が担保されない問題については適用ができない。現状の CAE 技術の現状について触れる前に、まず、CAE の汎用性とは何かを以下に述べる^{1), 2)}。

図 3.1.2-1 に示すように、CAE は以下の二つの意味での汎用性を持つ。

a 偏微分方程式記述による汎用性

CAE では、現象は基本的に偏微分方程式で表された現象記述方程式と境界・荷重条件および初期条件からなる境界値問題あるいは初期値問題として記述される。偏微分方程式記述は、任意の形状、任意の境界・荷重条件、任意の初期条件に有効であるので、その記述を基とする CAE 手法も任意形状・任意境界・荷重条件、任意初期条件に有効である。

b. 数値解析手法自体の汎用性

有限要素法、差分法、有限体積法、境界要素法、等、CAE 手法の主たるものは、偏微分方程式が異なっても、同一の数値解析アルゴリズムが有効である。

上記の二つの汎用性により、CAE はその守備範囲を拡大し、設計に欠かせないツールと

なってきた。

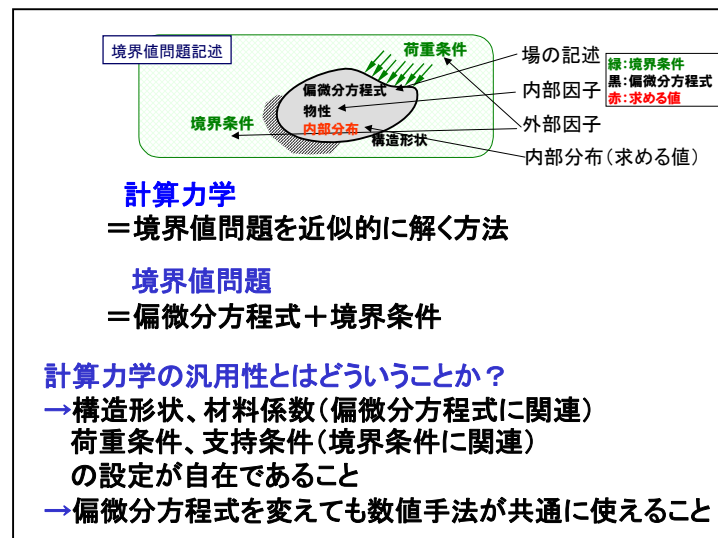


図 3.1.2-1 CAE の汎用性

現在、CAE の守備範囲拡大が求められている問題として、以下の 2 つがあげられる。

- ・ 複数の現象が連成している問題
- ・ 複数の空間スケールの現象が連成している問題

また、連成の仕方は以下 3 つに分類できる。

- ① 支配方程式が連成する場合（複数の支配方程式で変数を共有する場合）
- ② 境界・荷重条件を通して連成する場合
- ③ 物性への影響を通して連成する場合

①は複数の現象の支配方程式を連立させて解くことを意味し、②、③は境界・荷重条件および物質係数が空間・時間のみの関数ではなく、他現象からの因子の関数でもあることを意味する（表 3.1.2-1）。ここでは、取り扱う問題の性質を考え、主に②、③タイプの連成を考えることにする。

表 3.1.2-1 境界・荷重条件および物性記述の違い

	通常の非定常問題	連成した非定常問題
境界・荷重条件	空間・時間の関数	空間・時間・連成現象因子の関数
物性	空間・時間の関数	空間・時間・連成現象因子の関数

表 3.1.2-2 連成形式の例

	複数の現象の連成	複数の空間スケールの連成
支配方程式の連成	流体の支配方程式と移流の支配方程式が連成した二相流解析	ミクロスケールとマクロスケール間で均質化係数を介して数値的材料試験を行う均質化法
境界・荷重条件を介しての連成	熱応力を考慮した構造解析	
物性を介しての連成	粘性の温度依存がある流れの熱流体解析	

表 3.1.2-2 に表 3.1.2-1 の項目に関する例をまとめた。

いずれの場合についても、支配方程式・物質係数が既知の場合には、既存 CAE の複合問題となり、複数の空間スケールの現象が連成している問題はマルチスケール解析、複数の現象が連成している問題はマルチフィジックス解析として、一部、解決されつつある。

ここまで CAE の汎用性を基礎とする CAE 技術の現状ポテンシャルを述べたが、一方、現状の CAE が弱い問題として、以下が指摘されている。

- ・ 接触、摩耗、表面劣化等、表面に関わる問題
- ・ 複数の時間スケールが関係している問題

CAE の汎用性の議論から明らかなように、汎用性の前提条件がない問題については、CAE は非力（CAE の適用が不可能）である。例えば、以下の 3 つがあげられる。

- ・ 支配方程式形式が不明な問題
- ・ 境界・荷重条件が不明な問題
- ・ 支配方程式の係数（時間経過に対する物性変化等）が不明な問題

さて、本報告書で扱う、プラントおよび重工・重電システムと CAE では CAE の弱点問題群、CAE の適用が不可能な条件群が関係する問題が課題とされている。

基本的に複数の現象が関係し、また、設計および運用の双方で、経年変化・余寿命の評価が求められているため、複数現象が連成した非定常を考慮する必要がある。ゆえに、境界・荷重条件および物性の記述は、各種実験関数も取り込んだ形で、一般的には空間座標・時間・複数現象の因子の関数（関係式）で記述されなければならない。（「7）フレッティングと実験評価情報高度利用 CAE 技術」の事例がそれに該当する。）

また、材料が経年変化と共に浸食され脆化して行く問題は未だ現象メカニズムが不明ではあるが、信頼できる実験評価式が時間および現象因子の関数（関係式）で与えられる場合には、CAE を主体にして現象経年変化・余寿命の評価を行うのではなく、その実験評価式で評価を行い、CAE は現象因子とシステム挙動との因果関係を解析する手段として使うという方法も考えられる。（「6）水滴エロージョンと実験評価情報高度利用 CAE 技術」の事例がそれに該当する。）

「資本財の信頼性確保のための実機データ援用型設計・製造支援に関する調査研究報告書」（財団法人 機械システム振興協会）において、実機対応型 CAE は「関わっている因子を可能な限り分解して、分解できたものについては最大限 CAE に載せていき、載せきれないところについては、近い試験状態を作り出してその環境下で得られたデータをベースにして進めていく」手法というように、データという一般名詞を介して、一般的に定義された。

本調査研究では、さらに一歩進み、CAE の汎用性の議論から始めて、実験評価情報高度利用 CAE を、CAE の弱点問題群、および、CAE の適用が不可能な条件に対して、計測やメンテナンス情報を駆使して、境界・荷重条件および物性の関数として入れ込む方法により、CAE の無条件的汎用性は担保されないが、解析対象や解析条件を限定した範囲内の汎用性は保持できるような CAE というように定義することにする。以下の項において、実例を交えた報告を行う。

2) タービン設計における実機対応 CAE 技術

本項では、製造企業におけるタービン設計の従来と現在の設計ワークフローを CAE との関連でまとめた。以下に設計ワークフローにおける CAE の位置付けについて述べる。

(1) 従来の設計

1980 年代初めころの設計は振動強度実証試験や性能実証試験は、さまざまな試験を組み合わせて行っていた。しかし今日では CAE（構造系 FEM、CFD など）により振動や強度が評価できるようになり、複数の試験はそれらに置き換わることで、設計の効率化が図られている。翼形状も最適な形状が自動的に導かれるが、製造性が考慮されていないので、実現可能性については意見の分かれるところである。しかしながら、未だにわからないのは水滴エロージョンとフレットングの問題である。

(2) 現在の設計ワークフロー

現在の新しい設計ワークフローを以下に示す。強度計算と熱設計・空力設計は 1 順目はフローパターン、翼形設計、遠心強度、振動強度という順番となるが、以降は修正に応じてマトリックス的にパラメータを変更しつつ、あるいはループの中で、最終的に翼形を決めることになる。

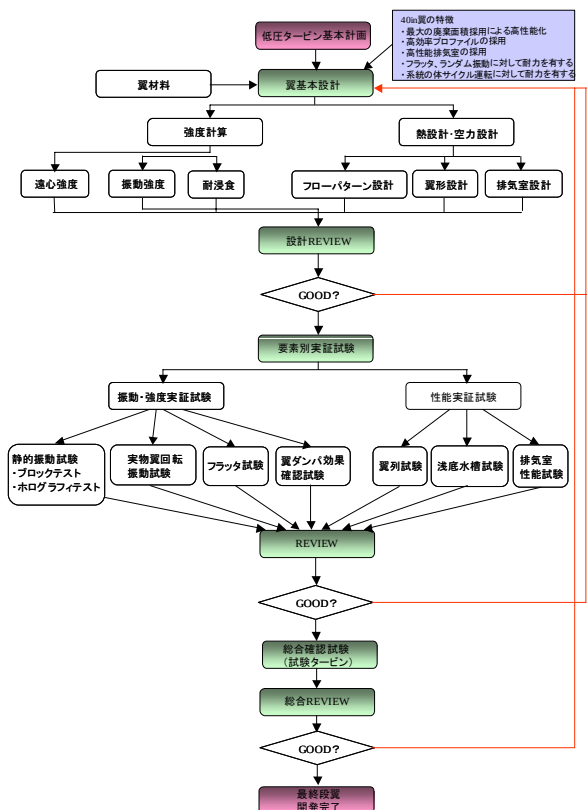


図 3.1.2-2 従来の設計ワークフロー

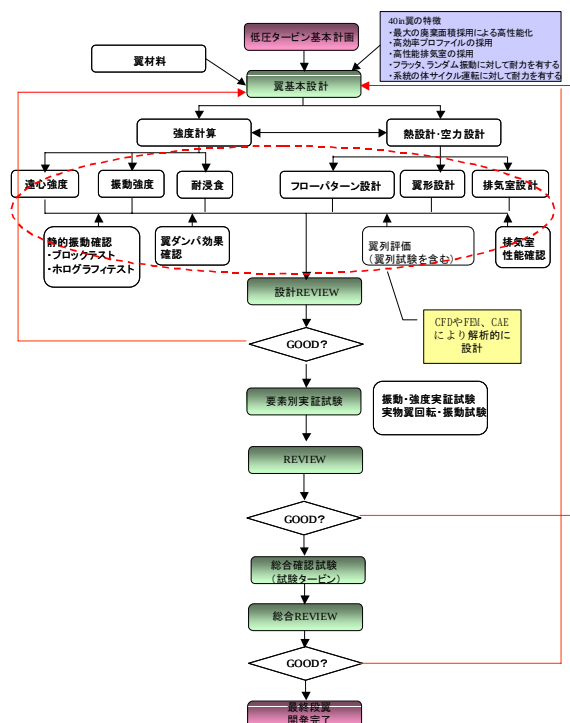


図 3.1.2-3 翼開発設計ワークフロー

(3) 設計要素と CAE (CFD , FEM)

翼の設計の詳細ごとに最新の CAE 手法と、評価項目について以下にまとめる。

表 3.1.2-3 設計要素と CAE

詳細設計項目	CAE 手法、技術	評価
フローパターン設計 (急拡大する壁傾斜、高マッハ数流れによる衝撃波と境界層との干渉、湿り環境下)	・三次元フローパターン最適化 ・流れ解析技術 ・湿り条件、相変化を含む三次元乱流解析 ・CFD (Computational Fluid Dynamics) による三次元多段粘性流動解析による完全三次元流れ設計 ・流れの粘性の影響を直接反映した最終段翼先端部の翼列流れ解析技術 (AFP: アドバンスドフローパターン段落設計) ^{注1}	蒸気流量 段落、各列負荷 損失の予測 流れ場全体の最適化 翼面上の負荷分布 (子午面解析結果)
翼形設計	実験計画法 衝撃波と境界層の干渉等の複雑な流れを高精度で解析する粘性解析	広範囲の流入角に対する損失特性のロバスト性を確保 翼形最適化
排気室設計	三次元粘性流動解析	運動エネルギーの効率的回収 圧力損失を低減する排気室の形状最適化
強度設計 (静的強度)	三次元有限要素法 構造解析、変形解析 剛性変化および接触摩擦を考慮した非線形解析コード	翼プロファイル、翼根、翼溝の背側、腹側、翼ベースからチップまでの応力バランスの最適化 静的な局部応力の低減化 (強度の向上)
強度設計 (振動強度)	振動解析 サイクリックシンメトリ法 非線形応答解析	シュラウド・スタブにおける構造ダンピングを最大限有効とする形状 低次モードでの共振回避 高次モードの振動応力、ランダム振動応力に対する耐振強度の確保

本項では設計ワークフローと CAE の関係を記述したが、CAE から見た設計に関しては「4) CAE と設計」を参照されたい。(設計フローでの設計案探索を自動的に行う内容を「4)(1) 最適設計」で、スケールアップ設計に設計フローを適用した場合を「4)(2) スケールアップ設計」で扱う。)

¹ 二次流れ領域でない翼高さ方向中央部付近の流量分布を多くし、かつ内外壁付近ではリーン構造として二次流れの発達を抑制させるフローパターンとして段落効率を向上させる。

3) CAE と事前・事後解析

設計段階で事前に評価することが困難な実機損傷事例として、蒸気タービンの高温部材を取り上げ、その損傷現象を CAE で事後に解析した事例をいくつか紹介する。

蒸気タービンのように高温で長期間使用する機器においては、室温に近い環境中で使用される部材では生じないようなさまざまな損傷が長時間使用後に顕在化することが知られている。ここで高温とは、材料強度的にクリープ現象が現れる温度域（例えば耐熱低合金鋼であれば 450℃以上）を指すものとする。高温環境中での損傷とは、クリープ変形および破壊、クリープ・疲労破壊などの機械的な損傷の他に、高温加熱中に材料の組織変化（高温劣化）により高温強度、衝撃値などの材料特性が徐々に劣化していく現象があげられる。

既設の運転時間が 10 万時間を越えて、寿命評価を検討すべき蒸気タービン機器の当時の設計段階では詳細に検討できる解析技術（ツール）、KNOW-HOW が確立していなかったことから、経験上の安全率の設定により十分裕度がある設計がなされ、損傷を回避していることが多い。ただ、当初は起動停止の頻度の少ないベースロード運転用に主としてクリープ強度を基準として設計された（現在から見れば）中小規模の蒸気タービンが、その後の大容量蒸気タービンを有する火力発電や原子力発電がベースロードを担うようになるにつれて、DSS 運転のような起動停止を頻繁に行う運用形態に変更されることにより、設計当初の予想を超えて大きな熱応力が繰り返され、疲労損傷が蓄積される例も見られる。

このような蒸気タービン高温使用部位について、クリープ・疲労損傷評価に基づく寿命評価を CAE を活用して行った場合の全体の流れを、**図 3.1.2-4**に示す³⁾。ここでは大きく、モデル化、温度解析、応力解析、寿命評価の 4 段階に分けることができる。

まずモデル化の段階で、構造物の形状、重要度に応じて有限要素法解析の要素（はり、シェル、平面、3 次元ソリッドなど）による離散化モデルを構築する。

温度解析においては、熱境界条件（部材の雰囲気温度、表面の熱伝達率や輻射条件の時刻歴）が、**図 3.1.2-4**に示したように、実機の定常ならびに非定常運転条件に基づく熱・流体解析あるいは実験・理論式による結果より与えられる。これらの熱的な境界条件をもとに、部材温度の空間的、時間的な履歴が求められる。

応力解析の段階では、温度解析結果と機械的な境界条件（拘束条件、荷重条件等）に基づき熱応力、遠心応力、内圧応力などが求められる。解析の種類は、部材特有の条件や温度・応力の大きさにより、弾性解析、弾塑性解析、クリープ解析、大変形解析、接触解析などが適宜選択される。

寿命評価の段階では部材の温度・応力履歴と材料の強度特性（ここではクリープおよび疲労データ）を参照しつつ、実機の運転データ（運転実績だけでなく、将来の運転計画も含む）に基づき、クリープならびに疲労損傷量を累積評価する。ここで強度特性データは、長時間の加熱による劣化を実機の非破壊計測により修正を加えた値を使用することで、寿命評価の一層の精度向上を図っている。最終的に、クリープ損傷と疲労損傷を、限界損傷特性データを参照することで寿命消費率が計算され、現在および将来の部材の損傷蓄積状況と余寿命が評価される。

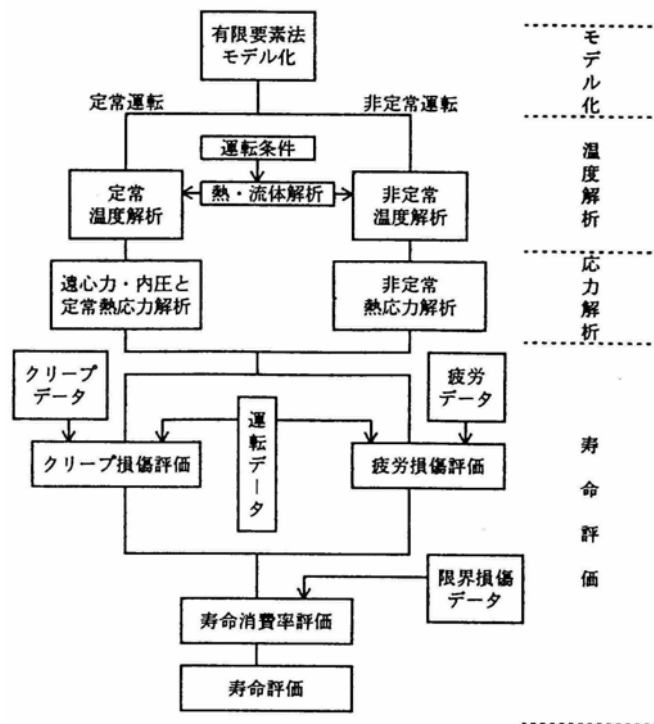


図 3.1.2-4 CAE を利用した蒸気タービン高温部材の寿命評価の流れ

次に図 3.1.2-4 で示した寿命評価システムで CAE を用いた事後解析の事例を具体的に示す。

第一の例は、高温に曝される時間が支配的な蒸気タービンロータの経年的軸曲がりの事後解析の例である⁴⁾。図 3.1.2-5 は蒸気タービンの高温部位である高圧・中圧段落の構造を模式的に示したものである。このなかで蒸気タービンロータは、蒸気エネルギーをタービン翼を介して回転動力に変換する役割を有し、高速で回転する重要部材である。ロータは一般的に大型の鍛造品であり、かつ高速回転体であることから理想的には材質的に均一であることが必要であるが、大型であることからロータ製造の各プロセスにおいて完全に均一化することは困難である。ロータ中の材料特性（この場合はクリープ変形特性）の不均一性がランダムではなく、結果的に軸芯に対してわずかな偏りがあった場合には、長時間の運転により非軸対称のクリープ変形を生じてロータの軸に徐々に曲がり progresses、マスマバランスが崩れて運転に支障が出る場合がある。本現象は設計段階には全く考慮されていない問題である。

図 3.1.2-6 は実機で軸曲がりを生じたロータの曲がりの最も大きな部位から試験片を採取してクリープ速度試験をした結果であり、同時にロータ外周部の硬さ分布も示した。クリープ速度試験は応力加速を行っているので特性の違いが極端に出ているが、明らかにロータ周方向でのクリープ特性に差が認められる。

タービンロータについて、本クリープ特性の偏りを実機応力条件での偏りに置き換えた材料条件を与えて、定格運転条件で 3 次元有限要素法クリープ解析を行った結果、図 3.1.2-7 に示すようなロータ曲がり変形が得られ、変形速度、変形方向などが実機と良好

に対応することが判明し、曲がり変形の進行と材料の偏芯の度合いの関連性が CAE により明らかになった。（これは「1）実験評価情報高度利用 CAE の考え方」で述べた「実機情報と物性への影響を通して連成させた場合」に該当する。）

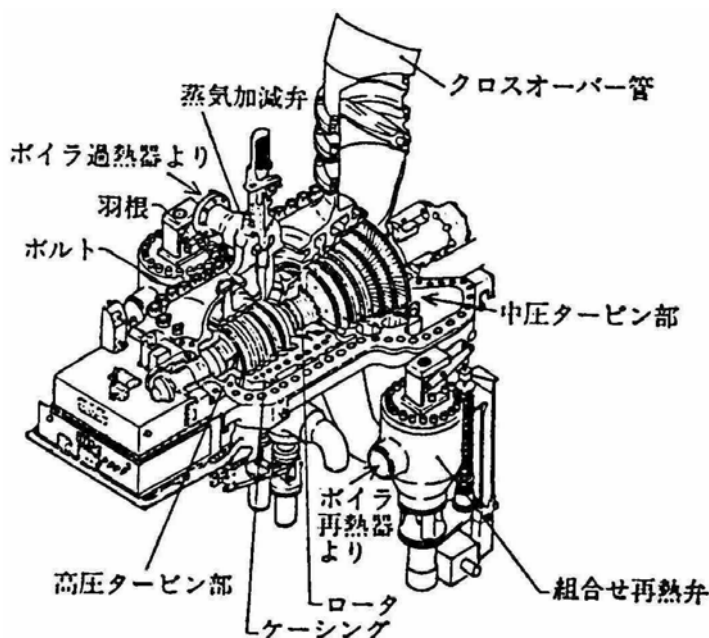


図 3.1-2-5 蒸気タービン高温部の構造

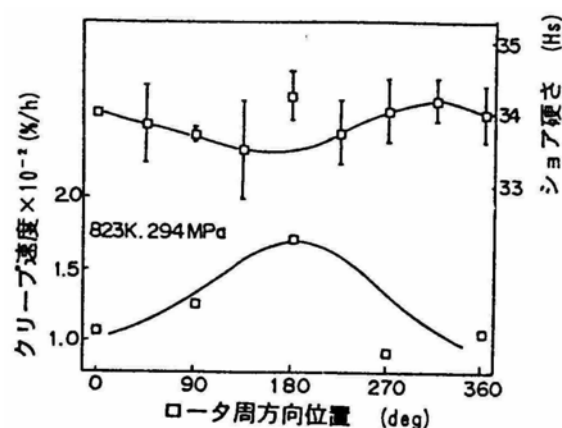


図 3.1.2-6 ロータ高温部のクリープ速度、硬さの周方向分布

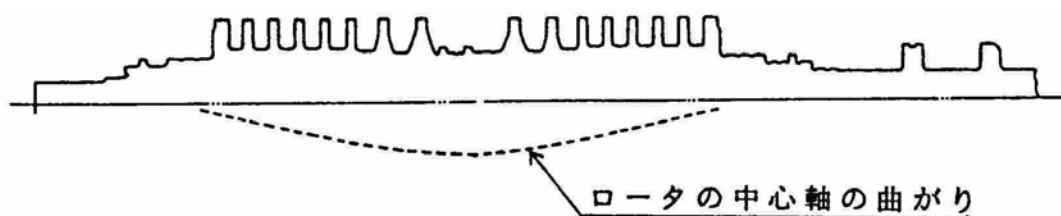


図 3.1.2-7 蒸気タービンロータの軸曲がり解析結果

第二の例として、高温に曝される時間が支配的である蒸気タービン動翼植込部のクリープ変形の事例を紹介する⁵⁾。蒸気タービンの動翼、特に高圧初段翼では運転中に遠心力による一定の高い荷重が負荷され、クリープによる変形が進行する。設計段階では動翼植込部にクリープが生じることは盛り込み済みで、クリープ破断強度を基準にして適切に応力の制限が課せられ、設計が行われている。ところが、高温環境中の材料劣化により動翼材のクリープ強度が低下した場合には、当初の設計予測よりも早くクリープ変形が観察される場合がある。これらのクリープ変形は定期検査の際に翼浮き上がり量として計測され、場合によっては翼交換などの処置が行われる。

そこで、CAE により、翼浮き上がり量と動翼に発生するクリープ損傷の関係を求めるこ

とにした。ここでは翼植込部を 2 次元接触体としてモデル化し、弾塑性クリープ接触解析を行った。図 3.1.2-8 に 3 段フックを有する動翼の解析結果（変形図）例を示す。解析結果から、動翼側だけではなくロータ側の変形も加わり、翼の浮き上がる様子がわかる。解析により求められた損傷が集中する翼フック部コーナに発生するクリープひずみと、定期検査で計測される翼の浮き上がり量の関係、さらに動翼材料の高温劣化に伴うクリープ破断延性の低下を考慮して、タービン材料ごとに浮き上がり量の制限を設け、タービンの運用管理に役立てている。

また、翼植込部に作用する応力が定常状態で支配的な場合には上記クリープ評価となるが、起動停止が頻繁になる場合には低サイクル疲労による損傷を同時に検討する必要がある⁶⁾。（この事例はクリープ変形の影響を事後に認識した事例ではあるが、CAE には特に実験情報は用いていないので、「1) 実験評価情報高度利用 CAE の考え方」で述べた通常のマルチフィジックスの例に該当する。）

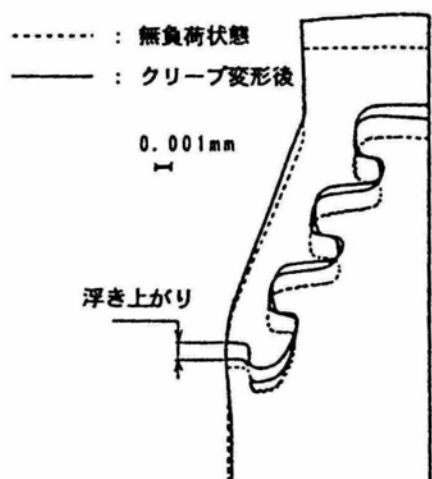


図 3.1.2-8 動翼植込部のクリープ変形解析結果

第三の例として、DSS 運用によってクリープ変形に影響が出る部位である高温ケーシングの熱応力評価の事例について紹介する^{7), 8)}。タービン高温部の蒸気を閉じ込める圧力容器としてケーシングが設置されている。高圧あるいは高中圧ケーシングは通常厚肉の低合金鋳鋼製であり、高温高圧の蒸気の入出力や内部にノズル等の構造物を支持する役目もあるため、図 3.1.2-5 に示すように複雑な構造である。このように厚肉で応力集中を生じやすい複雑な構造物であることに加え、熱容量が大きいこと、温度勾配が大きくなる隔壁構造があるため、タービン全体が常温に近い状態から定格運転、停止に至るまでにケーシングの各部位に大きな温度差が生じ、その結果高い熱応力が発生することになる。

図 3.1.2-9 は実機タービンケーシングの表面に高温ひずみゲージを多数貼付し、実測した例である。タービンの起動から定格運転、停止までのタービン出力、ロータ回転数とともにケーシングに発生したひずみ量が時系列的に計測された。

実機の運転状態と同様の条件で 3 次元有限要素法により非定常熱応力解析を実施し、実

機のひずみ計測結果と比較したものが図 3.1.2-10 である。これらの解析からケーシングの解析精度の検証が確認され、熱応力による低サイクル疲労損傷の高精度な評価が可能となった。また、解析面では、ケーシング内部の複雑な熱的境界条件（雰囲気温度、熱伝達率、輻射条件等）を従来は内部流体の状態を推定して与えていたが、本実測との比較結果から、推定の妥当性が確認された。（この事例はクリープ変形の影響を事後に実測し CAE と比較した事例ではあるが、CAE には特に実験情報は用いていないので、「1）実験評価情報高度利用 CAE の考え方」で述べた通常のマルチフィジックスの例に該当する。）

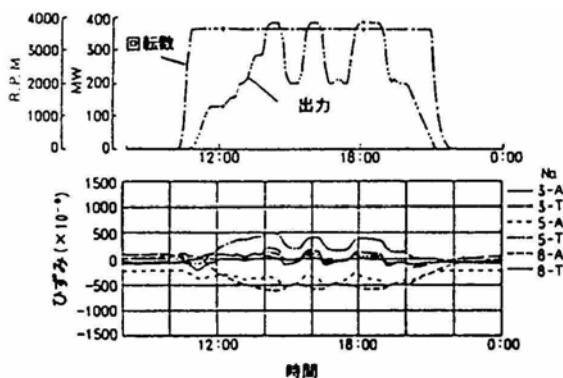


図 3.1.2-9 蒸気タービンの起動から停止までのケーシングのひずみ変化

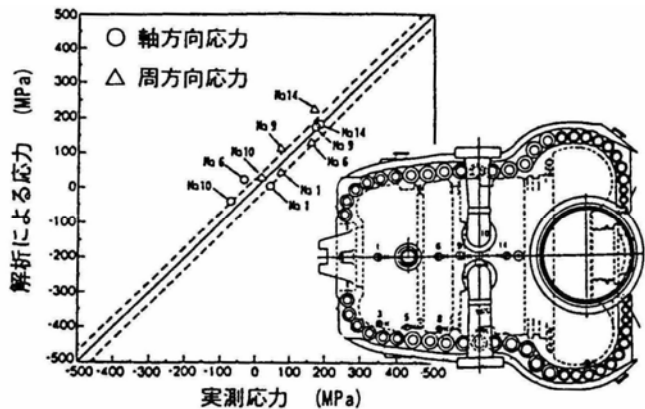


図 3.1.2-10 蒸気タービンケーシングの実測と解析による応力比較

これまでの設計時点では、タービンの運用時に発生するこれらの多くの現象を直接的には評価することなく、経験的に安全を見込んだ強度基準を採用してきた。近年の計算機技術、CAE 技術の発展を考えると、一層の合理化を図るためには、事後ではなく、設計の前段階で蒸気タービンの損傷事例を盛り込んだ検討がますますなされる必要がある。また、ユーザである電力各社においても、経験的に安全を見込んだメンテナンス基準の合理化、運用変更の効果・影響の事前評価の必要性は高く、本技術の確立および共有・応用による問題解決が望まれている。

4) CAE と設計

(1) 最適設計

最適設計は、適用対象として、構造要素設計とシステム設計の二つに大きく分けられる。ここでは、タービン機器の設計に対して実績のある、構造要素最適設計について説明する。

機器のコスト競争力を強化し構造を合理化するために、従来のように構造変さらに設計者の勘と経験に基づく設計プロセスを行うだけでは設計の合理化に限界があり、構造を抜本的に変えるような高度な合理化指針を与える構造最適化手法を組み込んだ CAE 手法が脚光を浴びてきている。構造最適化問題は以下の 3 つのタイプに分類できる。

① 位相最適化問題

構造物にある部材を取り付けるか否かの「有る無し」の問題や、部材をどのように

組み合わせるかといった形態の位相（トポロジ）を求める問題。概念設計段階で形状を定めたい時、あるいは革新的構造を検討する場合に用いることが多い。

② 形状最適化問題

構造物の位相は変えずに既に存在する穴の径やフィレットの半径、幅、高さ、角度などの形状を最適にする問題。詳細設計段階で局部の形状を定めたい場合に用いることが多い。

③ 変数（寸法）最適化問題

シェル構造物の板厚や断面係数、ヤング率といった構造物の特性を変えて最適化する問題。モデル形状を変更しないため、汎用解析コードで実行できるものが多い。

また、市販の構造最適化ソフトを解析機能別に分類したものを、**図 3.1.2-11** に示す。

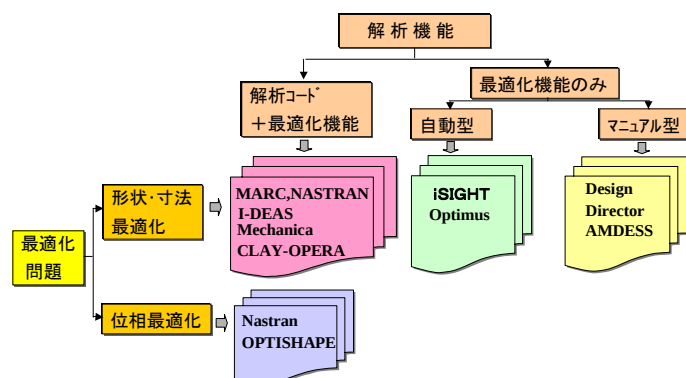


図 3.1.2-11 市販の構造最適化ソフトの分類

そこで、以下に、構造要素最適設計の適用事例について紹介する^{9,10)}。

一般に蒸気タービン機器のような構造設計においては、熱流体性能を確保しつつ、与えられた期間を安全に稼動するために、構造強度を基にした設計を行っている。単に安全性を追求するだけでは発生する応力を低減するために多くの材料を使用し、構造合理化に逆行することになる。このため、構造物の設計目的（目的関数）として、例えば製品重量の軽量化を掲げ、安全性や製造時間、費用などを制約条件として、その制約内で目的関数（重量）を最小化する構造を求めることが要求される。これが構造最適化問題である。すなわち、設計問題における各種の判断基準をもとに設計上のパラメータ（形状、板厚寸法その他）を選定し、このパラメータを各種制約条件（変位、応力など）内に収めつつ目的関数を最大あるいは最小化するものである。

蒸気タービン部品への形状最適化の適用事例として、ここでは蒸気タービン最終段長翼有効部および植込部の応力低減を目指した最適化問題を、構造最適化ソフト CLAY OPERA¹¹⁾を用いて実施した例を紹介する。CLAY OPERA は 3 次元形状最適化ソフトであり、汎用構造解析モジュールと設計感度解析モジュール、最適化モジュールが一体化され、さらにプリプロセッサとポストプロセッサを加えてパッケージ化されている。本プログラムは構造変更を行うために有限要素法の節点座標値を直接設計変数とせず、ベシスベクトルを適用したことが特徴である。ベシスベクトル法はひとつの設計変

数で複数の節点を同時にコントロールでき、まとまった節点グループの移動をひとつの形状変化のパターンとみなすものである。実際の最適化では複数の形状変化パターンを定義して、最終的な最適形状を得るための形状変化の基本形状として利用する。

a) 蒸気タービン低圧最終段長翼有効部の構造最適化¹²⁾

蒸気タービンの低圧最終段翼は図 3.1.2-12、図 3.1.2-13 に示すように、非常に蒸気流にさらされる有効部が長いため、運転中に大きな遠心応力を受け、有効部の根元付近に高い応力が作用する。通常の設計計算では断面翼型と平均応力に基づいた断面積が決定され、その断面翼素をどのように積み上げて翼構造を確定するかは設計者の技量である。そこで、ここでは既存の長翼について断面翼型と断面積を変えずに、翼に設定した 20 個の断面（図 3.1.2-13 の水平方向の要素分割境界に相当）を軸方向あるいは周方向に移動および翼全体の傾きを変えることにより、翼全体の遠心応力のピーク値を最小化させることを目的とする。断面形状を変えないのは流体性能を変えないためであり、断面積は平均応力として設計条件を満足しているためである。

最適化の制約条件として、遠心力が最も強く作用する根元部の要素応力の低減と、曲げ応力成分の低減のため、各断面の背側と腹側の応力差を 5kg/mm^2 以内に抑えることにした。制約条件の数は合計 19 個である。翼有効部の形状変更パラメータは図 3.1.2-14 に示すように、各断面の 2 方向の平行移動をさせるベシスベクトル 40 個と羽根全体を傾けるベシスベクトル 2 個を定義した。

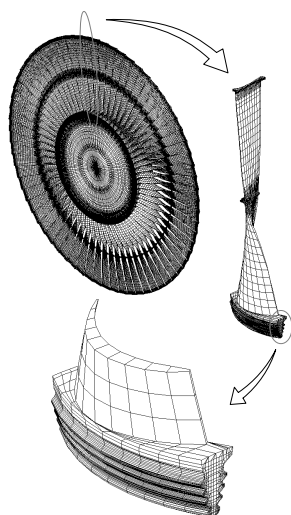


図 3.1.2-12 蒸気タービン最終段翼の構造

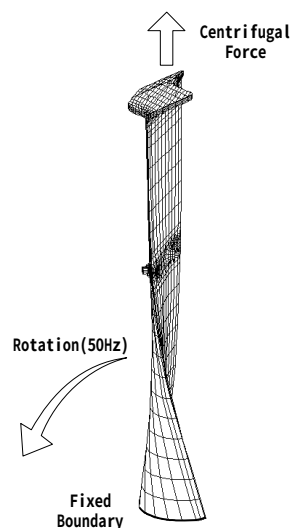


図 3.1.2-13 翼有効部の最適化に使用した FEM モデル

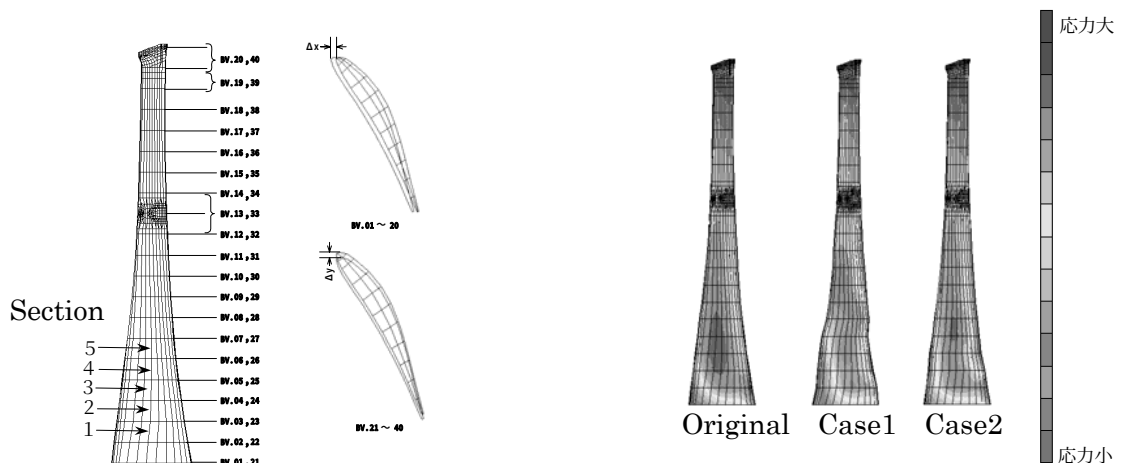


図 3.1.2-14 構造最適化のためのベースベクトル
(40 種類)

図 3.1.2-15 最終段翼有効部の
最適化形状、応力分布

この事例では最適化計算を 2 通り実施している。Case1 は 20 断面全てを独立に平行移動させて最適化する場合で、この場合には 40 個のベースベクトルを用いている。Case2 は Case1 の結果を基に、ベースベクトルを絞り込み、図 3.1.2-14 の BV.2,3,4,22,23,24,および全体を傾ける BV.41,42 の 8 個のベースベクトルのみとしたものである。

図 3.1.2-15 に長翼のオリジナル形状の遠心応力分布と、Case1、Case2 の最適化計算の結果求められた最適形状とその遠心応力分布を示す。Case1 の最適形状は応力分布から明らかなように、オリジナル翼の根元付近の応力のピークが緩和されている。しかし、40 個の独立な形状変更パターンを用いて応力最小化を図ったために羽根下部の形状変更が著しく、実機への適用が困難な形状となっている。Case2 は、Case1 の結果では羽根上部の形状変更がほとんどなかったことから、羽根下部の 6 個の形状変更パターンに絞り込み、さらに新たに羽根全体を傾けるパターンを加えて最適化を行ったものである。表 3.1.2-4、表 3.1.2-5 に示すように、Case1 ほどではないが、全体的に応力が低減し、応力の制約条件である背腹の応力差も満足している上に形状的にも滑らかであり、最適形状と判断できる。

表 3.1.2-4 Comparison of stress
difference in Case1(kg/mm²)

Section	Limit	Initial	Optimum	Change
1	5.00	7.76	4.99	-35.7%
2	5.00	5.55	5.00	-9.8%
3	5.00	8.08	5.00	-38.1%
4	5.00	6.84	1.12	-83.7%
5	5.00	5.48	0.05	-99.1%

表 3.1.2-5 Comparison of stress
difference in Case2(kg/mm²)

Section	Limit	Initial	Optimum	Change
1	5.00	7.76	5.00	-35.6%
2	5.00	5.55	5.00	-9.9%
3	5.00	8.08	2.95	-63.5%
4	5.00	6.84	5.01	-26.8%
5	5.00	5.48	5.00	-8.8%

b) 蒸気タービン長翼植込部の構造最適化¹¹⁾

長翼をロータに植え込む形状として図 3.1.2-16 の右に示す 4 個のフックを有するクリスマスツリー型植込部を考え、この形状の最適化を実施した。実際の形状は図に示すように 3 次元の複雑な形状であるが、ここでは単純に図 3.1.2-16 左側の FEM モデルのように上部に翼有効部の遠心力が作用する 2 次元断面形状の最適化を行うものとする。最適化の目的は、羽根の遠心力による引張荷重が作用した場合に植込部に生じる集中応力の最小化とする。

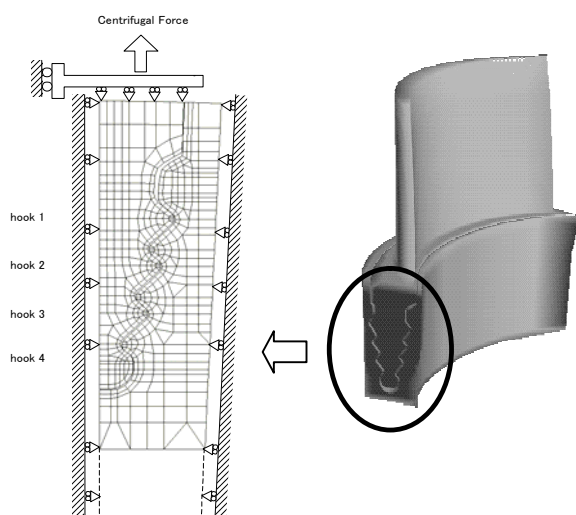


図 3.1.2-16 翼植込部の解析モデルと境界条件

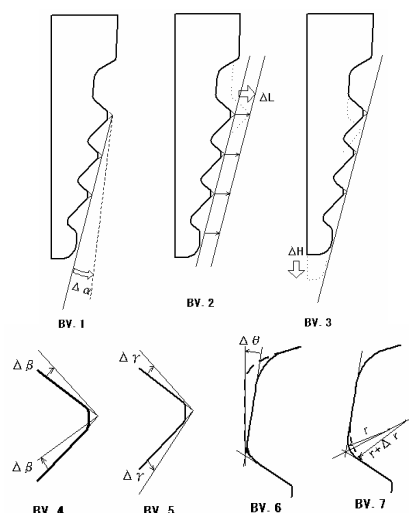


図 3.1.2-17 翼植込部のベーススペクトル (7 種類)

そこで、制約条件として、羽根側、ロータ側各々の各フックにおける高応力が生じている要素を選択して、それらの応力値が許容値以下に制限するものとした。また、各フックに荷重が分散されるように各フック間の応力差に制約条件を設定した。これらの制約条件の合計は 27 個となった。

形状変更パターンとしてのベーススペクトルは、図 3.1.2-17 に示すように、植込部全体の形状変更パターンの BV.1 から BV.3 と、全フックの共通の形状変更を表す BV.4 および BV.5、さらにオリジナル形状で羽根側第 1 フックコーナ部の応力が高かったため、羽根側第 1 フックコーナ部の形状パラメータの BV.6 および BV.7 の合計 7 個とした。図 3.1.2-18 に初期形状と最適形状の応力分布を示す。初期形状ではロータ側の上部フックと羽根側の下部フックが比較的低い応力分布となっているが、最適形状では全フックの応力分布が均等化されている。

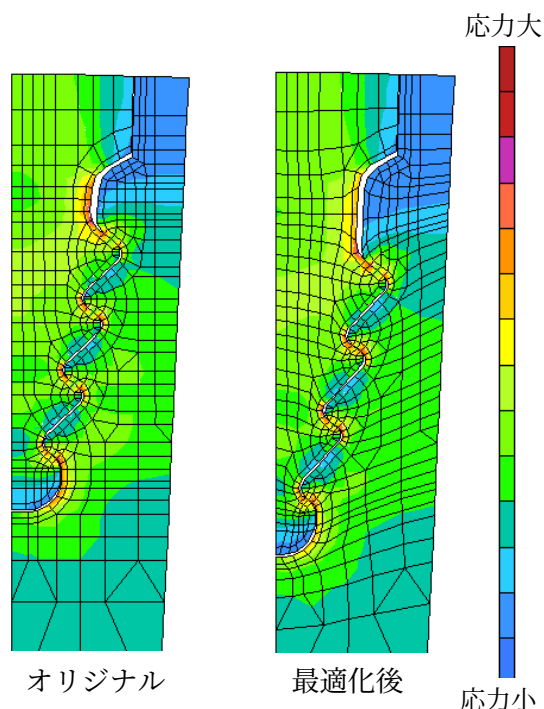


表 3.1.2-6 Change of design variable coefficients

Variable	Low Limit	Up Limit	Initial	Optimal
$\Delta \alpha$	-1.00	1.00	0.00	-0.401
ΔL	-1.00	1.00	0.00	0.745
ΔH	-1.00	1.00	0.00	1.000
$\Delta \beta$	-1.00	1.00	0.00	-0.573
$\Delta \gamma$	-1.00	1.00	0.00	0.214
$\Delta \theta$	-1.00	1.00	0.00	1.000
Δr	-1.00	1.00	0.00	0.956

図 3.1.2-18 翼植込部の最適形状と応力分布

表 3.1.2-6 は、各形状変更パターンに対応するベシスベクトル係数の最適化後の値である。各係数の変動範囲は-1 から 1 までで、初期値は 0 としている。プラス側の変化は図 3.1.2-17 の矢印方向の形状変化であり、マイナスはその反対の形状変化を表している。この結果から植込部は垂直、水平方向の長さが長くなるなどの形状変更が読み取れる。

以上のように蒸気タービン最終段構造の最適化の事例を紹介した。本最適化ソフトを活用する際に、ベシスベクトルの設定と選択にはユーザの判断が入ることから、適切な解が得られたか十分に吟味する必要がある。なお、本事例の構造最適化は応力低減を目的にしたものであるため、実際の設計にあたっては翼の振動特性など他の要因を総合的に勘案して形状を決定する必要があることを付記しておく。

実際の設計には多くの要因や特性が関係するが、その関連する特性間には複雑な競合関係が存在しており、それらの関係を明らかにした上で、総合的な最適化を実施するシステム最適化法^{13,14)}を、このような機器設計に生かすことにより、より信頼性が高く、競争力のある製品設計が可能になるものと考えられる。また、ユーザである電力各社でも、安心安全確保のための最適運用計画、最適メンテナンス計画等への応用による大きな効果が期待されるところである。

(2) スケールアップ設計

a) 蒸気タービンのスケールアップ設計について

発電プラントにおける大容量化、高効率化は世界的に環境に対する意識が高まりつつある中で、風力発電や太陽電池といった自然エネルギーの開発と併せて、化石燃料を用いている火力発電プラントにおいて蒸気タービンのみならず重要な課題として取り組ま

れている。具体的な例を以下に示す。

- ・ IGCC 発電 ・ 超高温ガスタービンコンバインドサイクル発電
- ・ 超々臨界石炭火力発電

一般に蒸気タービンの大容量、高効率化として最も行われている方法の代表例としては次の 4 点があげられる。

- ①入口圧力上昇
- ②入口温度上昇
- ③排気圧力低下
- ④蒸気流量増加

上記のうち、①、②については構造物としての蒸気タービンの大きさにはほとんど関係なく、①に至っては従来よりコンパクト化されることから、実際に蒸気タービン本体が大きくなるのは③、④の場合である^{注2}。

しかし、事業用火力蒸気タービンは幾つかのタービン車室を組み合わせることで 1 ユニットを構成している場合が多い。図 3.1.2-19 に蒸気タービンの出力増加の変遷を、図 3.1.2-20 に一般的な蒸気タービンの形式をまとめる。両図に示すとおり、単機出力は現在では 1000MW を超えるものまで運転されているが、それらのタービン形式はさまざまである。

一方、最終翼長は 1980 年代までは 60Hz 機で 30 インチ級が最長であり、長翼化が本格化したのは 90 年以降になる。すなわち、蒸気タービンの単機出力の増加は必ずしもタービン本体構造の大型化とは一致していない。具体的に見ると、300MW 級の蒸気タービンを蒸気流量増加により 600MW 級の蒸気タービンを設計する場合、低圧タービン車室を増やす場合と、低圧タービンの最終翼を長大化する場合がある。また、蒸気入口弁についても同様に流量が増加した分弁個数を増加させる場合と蒸気弁を大型化する場合がある。これらの判断は長大化に対する技術的な難易度の他に、経済性、運転性、保守性などさまざまな要因によって決められることになる。度の他に、経済性、運転性、保守性などさまざまな要因によって決められることになる。

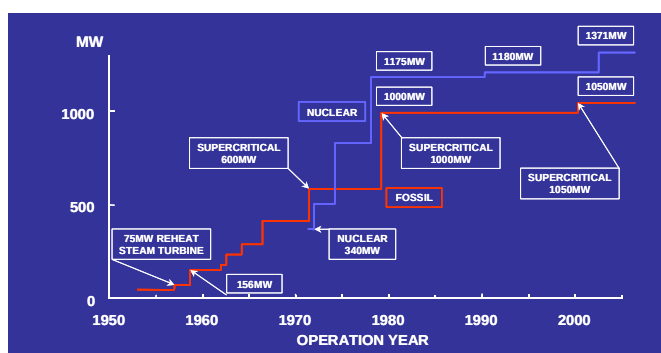


図 3.1.2-19 蒸気タービン大容量化の変遷

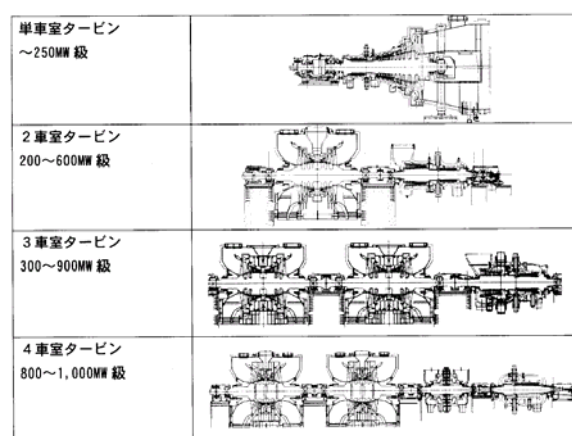


図 3.1.2-20 蒸気タービンの形式例

² 国内の場合は排気圧力（復水器圧力）が一定値を用いられ、地域差は循環水系統設備に反映されることから、蒸気タービンの大きさに影響することはない。

b) 蒸気タービン最終翼の長大化について

前項では蒸気タービンプラント全体の大容量化について述べてきたが、本項では最終翼に絞って記載する。

従来の国内事業用発電プラントでは、送電端電気出力を通年で一定に保つ定格電気出力運用が一般的に用いられてきた。定格電気出力運用の場合は夏場最も排気圧力が悪くなる条件で出力が決定されることから、冬場排気圧力が改善した場合でも出力が一定に保たれるため、タービン最終翼を長大化することによる効率改善による環境面、経済面での利点を十分に生かせていなかった。

一方、最近ではボイラの発熱量を通年で一定に保つ定格熱出力運用が用いられる場合が増えてきている。定格熱出力運用は刻々と電気出力が変化するため系統運用上は複雑になるが、高効率発電プラントの負荷が上げられるため、効率が低い発電プラントの運用期間削減など CO₂ 削減の利点が発揮される。

このように国内での電力運用の変化に伴い、近年蒸気タービン最終翼の長翼化が非常に重要になってきている。

以下に長翼化による高効率化について記載する。

蒸気タービンは熱量の回収を最終段階まで行う機械である。この様な蒸気タービンでもボイラから受け取った熱量の約半分は復水器から海水に廃棄されることになる（図 3.1.2-21 参照）。

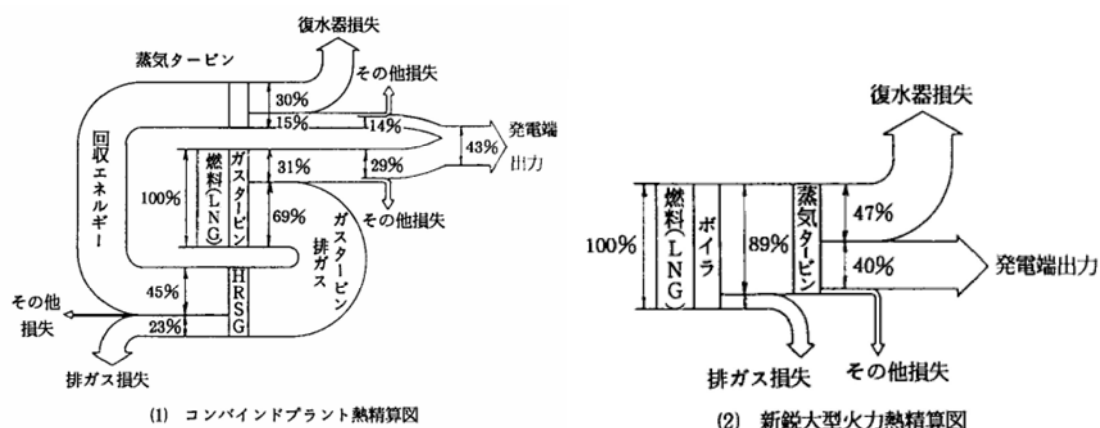


図 3.1.2-21 熱精算図

電気出力を縦軸に取り、復水器真空度(排気圧力)を横軸に取ると一般的に図 3.1.2-22 のようになる。これは図 3.1.2-21 の熱精算図に示されている復水器損失が復水器真空度に依存していることを示している。

定格電気出力運用の場合、夏場最も復水器真空度が低下(排気圧力が上昇)した条件で決定した電気出力で通年運用される。一方、定格熱出力運用の場合は通年でカーブの沿った電気出力で運用されるため、年間の利得として環境面、経済面に寄与することになる。

また、最終翼長を延ばすことによりこの傾向は顕著になる。従って、年間の復水器真空度の推移から最適な最終翼の長さを選定されることになるが、高真空時の利得が得られることから、従来に増して長翼化のニーズが増加してきている。

表 3.1.2-7 タービン翼の相似

Item	1/n Model	Note
Rotating Speed (Ω)	n	Adjusted by tip speed
Acceleration	$r\Omega^2$	$(1/n \times n^3 = n)$
Mass (m)	$1/n^3$	Volume
Centrifugal Force (F)	$1/n^3$	$m r \Omega^2$ $(1/n^3 \times n^3 = 1/n^3)$
Centrifugal Stress (σ)	$1/n$	$m r \Omega^2 / A$ $(1/n^3 \times n^3 = 1/n)$
Twist Angle	$1/n$	$\rho \Omega^2 R^4 / G$ $(n^3 \times 1/n^3 = 1/n)$
Elongation (ΔL)	$1/n$	$L m r \Omega^2 / A E$ $(1/n \times 1/n^3 \times n^3 = 1/n)$
Displacement	$1/n$	
Length (L)	$1/n$	
Area (A)	$1/n^2$	
Velocity (U)	$1/n$	Adjusted by mach number
Weight Flow (G _w)	$1/n^3$	AU $(1/n^3 \times 1/n = 1/n^3)$
Heat Drop (H)	$1/n$	Adjusted by mach number
Turbine Output (L)	$1/n^3$	G _w H $(1/n^3 \times 1/n = 1/n^3)$
Turbine Torque (T)	$1/n^3$	L/U $(1/n^3 \times 1/n = 1/n^3)$
Resonant Stress (δ)	$1/n$	
Blade Frequency (ω)	n	$\frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{I}{A}}$ $(n^3 \times \sqrt{1/n^3} = n)$
Reduced Frequency (ω_r)	$1/n$	$\omega \cdot C / U$ $(n \times 1/n = 1)$
Reynolds Number (Re)	$1/n$	$L \times U$ $(1/n \times 1/n = 1/n)$
Ω_s / Ω_r	$1/n$	Resonant RPM Ω_s / Blade Natural Frequency RPM Ω_r
Tolerance	$1/n$	
Damping (δ)	$1/n$	
Stimulus (s)	$1/n$	Examined in this paper

r : Radius, G : Shear Modulus, ρ : Mass Density
E : Elastic Modulus, C : Blade Cord Width, I : Moment of Inertia

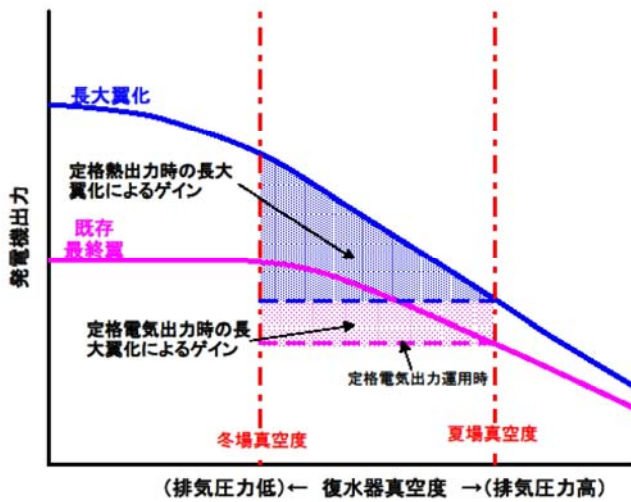


図 3.1.2-22 出力特性曲線(ケーパビリティカーブ)

c) 蒸気タービン最終翼の長大化とスケール設計について

最終翼を長大化する場合に最も一般的に行われるのがスケールアップ設計である。表

3.1.2-7 にスケールアップに伴う機械的性質の傾向を示した相似則をまとめる。

蒸気タービンの定格回転数が変わる場合、すなわち、

- ・ 60Hz 機(3,600rpm)⇒50Hz 機(3,000rpm)
- ・ 火力 2 極機(3,600rpm)⇒原子力 4 極機(1,800rpm)
- ・ 減速タービン(6,000rpm)⇒50Hz 機(3,000rpm)

という様な場合はそれぞれ 1.2 倍、2 倍、2 倍の完全スケール設計が可能であり、遠心応力、振動特性は同一になる。

一方、回転数が同一の場合のスケールアップ設計は上述の様に簡単ではない。具体的な例として遠心応力で考える。

断面平均の遠心応力 σ は以下の式で表される。

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{m r \omega^2}{A} \quad m: \text{質量}$$

r : 重心半径

ω : 回転角速度

A : 断面積

遠心力 F は質量 m の関数であり、スケール比の 3 乗で増加、重心半径 r は 1 乗で増加するが、断面積 A は 2 乗でしか増加しない。従って、遠心応力はスケール比の 2 乗で増加することになる。

一方で最終翼は非常に厳しい環境で運転されることから遠心応力の増加を許容しない場合が多い。従って、大容量化にともなう最終翼のスケールアップ設計ではほとんどの場合に翼の軽量化が必要となる。

5) 電力プラント設計における主要劣化要因と CAE

電力プラントの劣化モードとして、SCC (Stress Corrosion Cracking：応力腐食割れ)、エロージョン・コロージョン、(高サイクル) 疲労、フレット疲労、摩耗、クリープ、脆化、等が知られている。これらの劣化モードと CAE との関連を議論するにあたり、議論ターゲットを明確にし、その議論ターゲットに関わる主要劣化モードを選定し、一般論としてではなく、ターゲットを明確にした、深掘りの議論、調査を行った。表 3.1.2-8 に、各劣化モードの定義を示す。

表 3.1.2-8 劣化モードの定義

劣化モード	定義
SCC (Stress Corrosion Cracking：応力腐食割れ)	金属に腐食環境下で応力が働いている場合、その腐食環境にない場合より低い応力で破壊すること
エロージョン・コロージョン (Erosion・Corrosion)	機械的作用による壊食 (エロージョン) と化学的作用による腐食 (コロージョン) との相互作用によって起きる減肉現象
疲労 (Fatigue)	材料の降伏応力を超えない荷重を与えたときの繰り返し荷重あるいは交番荷重での破壊のこと
フレット疲労 (Fretting Fatigue)	金属と金属が接触し繰り返し荷重を受けることによる摩耗および表面凹凸を原因とする強度低下のこと
摩耗 (Wear)	摩擦に伴う表面部分の逐次減量
クリープ (Creep)	一定負荷応力のもとで時間の経過と共に生じる変形の様式 (特に高温 (材料の融点 $T(K)$ の $1/2T(K)$ 以上) において顕著)
脆化 (Embrittlement)	物理的あるいは化学的な変化により延性が低下すること

まず、議論ターゲットの選定に関してである。電力プラントには大別して原子力プラント、火力プラント、水力プラントがある。このうち、火力プラントは長期連続運転ではなく、毎日始動・停止を繰り返す DSS (Daily Startup & Shutdown) 運転をされることが多く、他の二つのプラントと比較して過酷な運用をされている。その火力プラントの中で、蒸気タービンは最も主要な部分であり、劣化が特に激しい。ここでは、実機の運転データが豊富で、製造側、電力側が情報共有して議論可能な対象として、35 万 kW 級の火力発電用蒸気タービン最終段をターゲットとして選定した。

次に、火力発電用蒸気タービン最終段をイメージし、議論対象としての劣化モードの選定を行った。劣化モードのうち、SCC (Stress Corrosion Cracking：応力腐食割れ)、エロージョン・コロージョン、摩耗は使用条件等、劣化に影響する要因因子の数が非常に多く、劣化を引き起こす外部因子も不特定であるため、議論の対象には不適切と判断した。一方、クリープ、疲労等については、物性的な挙動がすべては解明されてはいないものの、劣化挙動を諸係数・モデルを工夫することによって工学的にシミュレーションする事は可能となっており、今回の議論対象から外す事とした。エロージョンの中でも水滴エロージョン、フレット疲労は、物性的な挙動は不明ではあるが、外部因子が特定されており、また、劣化を引き起こす要因因子が比較的少ないため、今回の調査での劣化モード対象に

選定した^{15)~19)}。(表 3.1.2-9 (「資本財の信頼性確保のための実機データ援用型設計・製造支援に関する調査研究報告書」(財団法人 機械システム振興協会) から転載) は劣化モード以外も含むタービン最終段における実機対応型の CAE を示す。最終段は非常に長い翼であるため、遠心力の影響、翼速度と水滴との速度差の影響が問題となる。主に回転軸と翼を繋ぐ「植込部」と蒸気を受けて回転する「軸有効部」の二つの部分から構成され、前者では「フレッティング疲労」、「腐食」、後者では「水滴エロージョン」の劣化モードが問題とされる。)

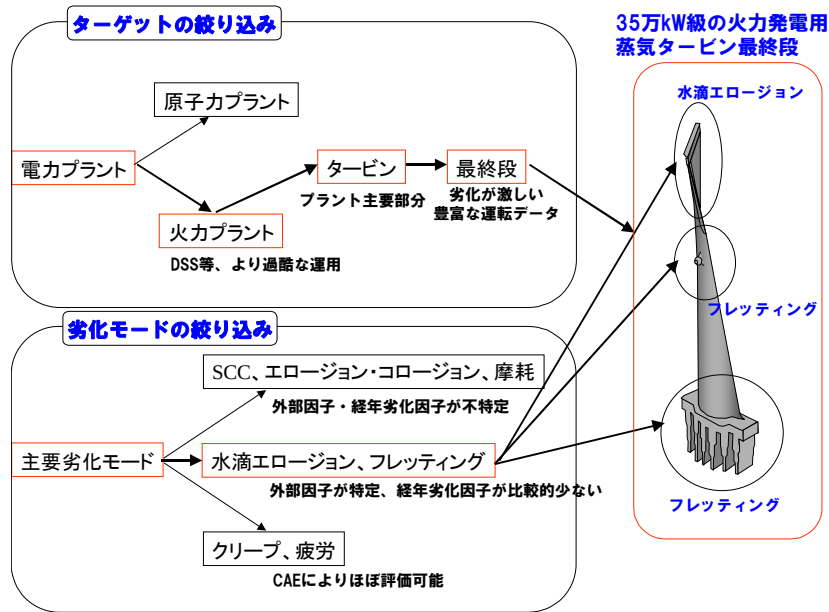


図 3.1.2-23 ターゲットおよび劣化モードの絞り込み

表 3.1.2-9 タービン最終段における実機対応型の CAE

部位	機能	現象	現象の主な評価手段	CAE/実験のタイプ	評価パラメータ	評価手法	他の機能・現象との干渉関係	備考
タービン最終段	ロータ軸と翼の結合部(植込み部)	フレッティング疲労	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE(接触解析) (実験の場合) 標準試験/モックアップ	・接触端部の応力 ・相対すべり量	・流体振動を考慮した構造解析 ・縮小モデルモックアップ	・環境(温度、湿度、腐食成分) ・翼振動 ・遠心力	
		腐食	・実験	・標準試験	・腐食深さ ・SCC有無	・浸漬試験 ・板曲げ試験(CBB)	・表面処理 ・翼振動	
		構造強度	・CAE	・市販CAE	・許容応力比	・遠心場における応力評価	・振動 ・環境 ・加工公差	
	翼有効部	翼性能	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE/自社製CAE (実験の場合) モックアップ	・流力特性	・流体・構造連成解析 ・縮小モデルモックアップ	・上流側、下流側の各種構造	
		水滴エロージョン	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE/自社製CAE (実験の場合) 噴霧試験、スピンテスト	・衝突速度角度 ・水滴量 ・減肉量	・水滴の経路解析 ・衝突解析 ・エロージョンシールド材との関係	・上流ノズルとの距離 ・湿り度 ・蒸気環境	
		振動	・CAE主体 ・実験 ・最終的に実サイズ回転試験	(CAEの場合) 市販CAE (実験の場合) 単翼および群翼モックアップ	・共振周波数 ・振動モード ・減衰量	・定格回転数での離調 ・過渡時の振動特性 ・制振構造(タイワイヤ、シュラウド等)	・蒸気特性 ・上流ノズル構造 ・植込み部構造	
		構造強度	・CAE	・市販CAE	・許容応力比	・遠心場における応力評価	・振動 ・環境 ・加工公差	

以上の観点から、本調査研究では、議論ターゲットとして 35 万 kW 級の火力発電用蒸気タービン最終段、議論ターゲットに関わる主要劣化モードとして水滴エロージョンとフレッキングについて扱う事とする。

6) 水滴エロージョンと実験評価情報高度利用 CAE 技術

火力用蒸気タービンの低圧部や原子力タービンでは、蒸気条件が飽和域に入るため、多量の水滴が発生する。このような湿り蒸気流動中では、図 3.1.2-24 に示すように水滴の発生や成長に伴って熱力学的、流体力学的なエネルギー損失、いわゆる湿り損失が付加され、タービン効率を低下させる。この湿り損失は、水滴の発生に伴って生ずる潜熱移動、壁面上に形成される水膜流や飛散水滴の加速、さらに水滴の衝突による制動力など蒸気タービン特有の損失である。また、高速で回転するタービン動翼に水滴が衝突すると、翼表面が浸食作用(エロージョン)を受け易く、寿命短縮など信頼性低下につながる恐れが多い^{20,21)}。

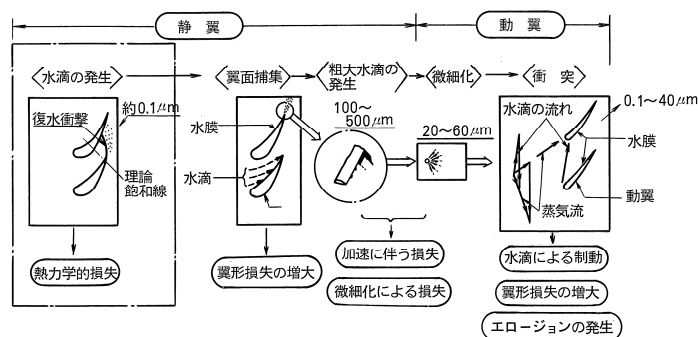


図 3.1.2-24 蒸気タービン段落内湿り蒸気流に起因する諸問題

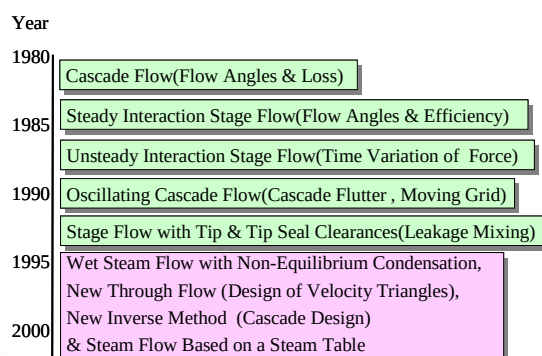


図 3.1.2-25 翼間流れ解析の開発状況

このような問題に対処し、性能および信頼性の高いタービンを設計、評価するには、この湿り蒸気の性質、すなわち発生する水滴の粒径分布や数密度分布、さらには、流体中の個々の水滴の速度ベクトルなどを把握し、その基本的な流動特性を解析、評価することが重要となる。しかし、数値解析が著しく発展した現在でも、凝縮開始直後のようなサブミクロン以下の水滴が発生する領域から、翼面への水滴捕集、さらに後縁端から飛散する数百ミクロン以上の粗大水滴が蒸気流中で微細化するとともに、下流を回転する動翼に衝突するまでを一貫して解析できるツールは実現していない。このため、現状では表 3.1.2-10 に示すように解析と計測技術を併用して解析、評価するのが一般的である。

表 3.1.2-10 タービン設計における湿り蒸気に関する解析評価法

現象	復水衝撃現象	水滴捕集および衝突	粗大水滴発生と微細化
解析	非平衡凝縮を考慮した翼間流れ解析	翼間流れ解析と水滴流動の重ね合わせ	一次元解析と実験式の併用
計測	湿り度計測システム	可視化試験	光ファイバ方式のLDV計測

ここでは、主として湿り蒸気流動解析技術を中心に実機蒸気タービンの水滴エロージョ

ン評価手法について概説する。

(1) 非平衡凝縮を考慮した翼間流れ解析法

図 3.1.2-25 に蒸気タービンの設計解析に利用される翼間流れ解析技術の開発動向を示す。乱流解析技術の高度化に伴い、二次元翼間乱流解析から、3次元段落流れ解析、さらには静翼と回転する動翼を同時に解析できる非定常段落流れ解析や振動する翼周りに流れ解析、翼先端のシールフィン周りの漏洩流の混合を考慮した段落流れ解析へと発展してきており、この間性能予測精度も格段に改善されている。最近では蒸気の非平衡凝縮を解析できる乱流解析技術が開発され、活用され始めている^{22,23)}。

一般に蒸気の圧力が低下して飽和蒸気圧力以下、いわゆる湿り域に入ると、凝縮が始まって水滴が発生する。しかし、蒸気タービン段落内部では蒸気が膨張して飽和線を横切って理論的な湿り域に達しても水滴が発生せず、乾き蒸気の性質を有した非平衡状態となる。図 3.1.2-26 はこの非平衡状態を示したもので、蒸気が過熱状態 A から飽和域の圧力まで膨張させても状態 B'、すなわち圧力、温度の過飽和状態に到達せず、乾き蒸気状態が理論的な湿り域まで持ち越され、圧力、温度が状態 B となる。この点の蒸気温度は圧力の飽和温度より低くなり、過冷却状態となる。

このような過冷却現象が生ずる原因は、蒸気中で発生する水滴が表面張力によって球形に形成されることに関連している。すなわち、理論的な飽和線が蒸気と水とが平面境界で共存し、平衡状態を保持するのに対して、水滴のように曲面境界で気液が接する場合、表面張力の効果で液相の分圧が飽和圧力よりも高くなるためである。さらに作動流体が膨張して蒸気の圧力が低下し、ある過冷却度以上に到達すると、非平衡状態が破れて蒸気中で急激な凝縮現象を生ずる。この現象を復水衝撃 (Condensation Shock)、あるいは自然凝縮 (Spontaneous Condensation) と称し、多量の微小水滴が急激に発生するとともに、場合によっては圧力の回復現象が現れる。又、この現象が始まる点をウィルソン点、蒸気の $i-s$ 線図 (i : エンタルピー, s : エントロピー) 上でウィルソン点を結んだ線をウィルソン線と称し、タービン段落の場合 2~4% の理論湿り度近傍に現れると言われている。

この復水衝撃現象の二次元翼間流れ解析による結果の一例²²⁾を図 3.1-2-26 の右に示す。図は典型的な蒸気タービン翼列の翼面圧力分布を示す。横軸は翼前縁からの軸方向位置 x を翼巾 Cax で無次元化して示している。特に、翼背側の圧力分布において静圧の減少に伴って蒸気流速が増大し、 $x/Cax=0.4$ 近傍で過冷却現象が発生、その後、潜熱放出 (凝縮減少) による圧力上昇 (復水衝撃現象) が明確に把握することができる。このようにウィルソン点近傍では微細な水滴核が発生して急激に成長するため、蒸気との潜熱の授受、断熱指数の変化などを生ずる。この現象は熱力学的に非過逆過程であるので、エントロピーの増大、すなわち熱力学的損失を伴うことになる。

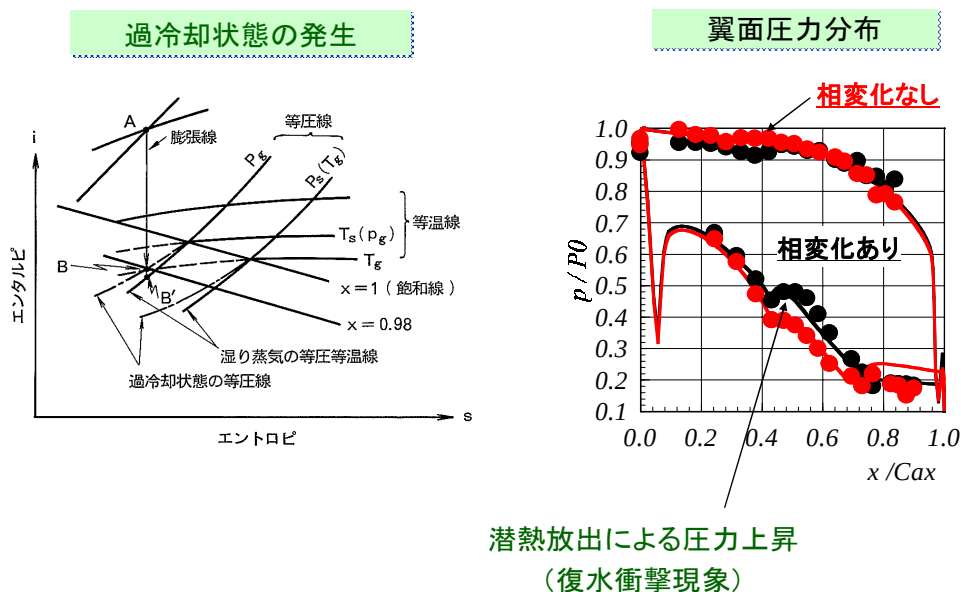


図 3.1.2-26 蒸気の過冷却状態の発生と復水衝撃

現在はさらに改良され、蒸気の熱力学特性、いわゆる実在気体効果を考慮した翼間乱流解析技術²³⁾として実機蒸気タービンの性能改善などに活用されている。活用の一例を図 3.1.2-27 に示す。図は火力用蒸気タービンの低圧段長翼先端部の解析結果を比較したもので、左側の解析例が翼列入口過冷却度 12℃の条件での湿り度分布で、翼間の高速域で相変化が生じており、急激な非平衡現象（非可逆過程）による湿り損失が大きくなった例である。一方、右側の解析例は、相変化が翼上流の低速域で始まっており、液滴が緩やかに成長するため、湿り損失が小さくなる。このように、蒸気の水蒸気凝縮現象を考慮した翼間乱流解析の活用により、負荷配分の適正化などが可能となる。

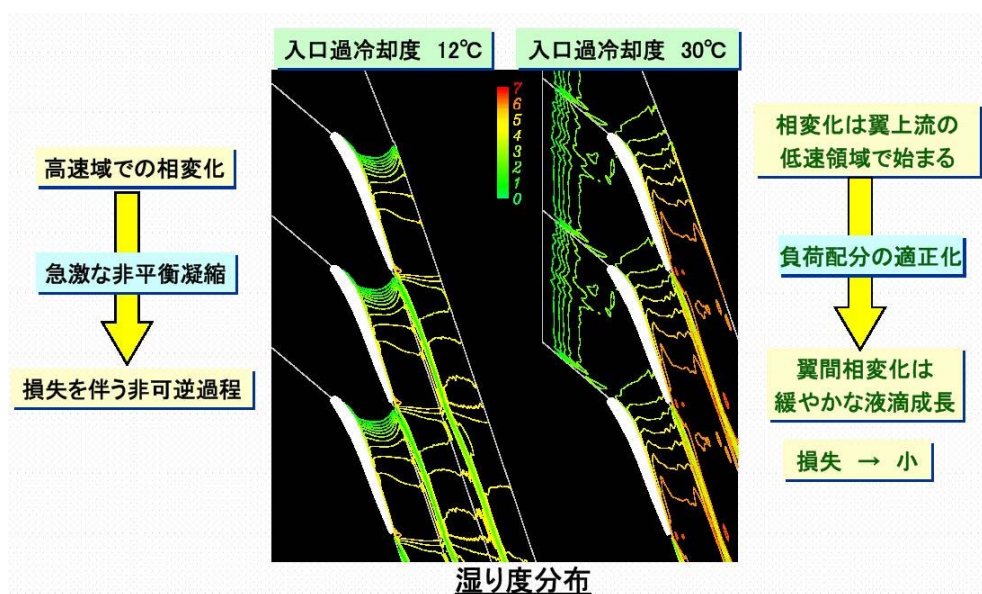


図 3.1.2-27 翼間湿り乱流解析の活用例

【エロージョン損傷の評価法】

水滴の衝突速度、平均水滴径および衝突頻度を変えたエロージョン試験結果により、チタン合金系の翼材料は従来の 12Cr 系翼材料に比較して耐エロージョン性が高いことが判明した。特に、これら材料のエロージョン特性は翼材料の硬度など金属学的な強度だけでなく、水滴の衝突速度や平均水滴径および衝突頻度に強く影響されることを明らかにした。これらのパラメータの影響指数を定量的に検討すると、次の関係式となる。

$$ER_m \propto D_{3-2}^l \bullet V_d^m \bullet G_w^n$$

$$l = 2.5 \sim 3.1$$

$$m = 5$$

$$n = 0.9 \sim 1.0$$

V_d : 水滴衝突速度 G_w : 水滴流量

この関係式を利用することによって、メーカーとユーザの双方で、エロージョン損傷の評価やエロージョン防止策の開発とその効果の把握が可能となる。

7) フレッシングと実験評価情報高度利用 CAE 技術

フレッシング疲労試験結果や実機の振動に関する情報が得られた場合に、これらの情報を活用して、接触部について CAE 手法によるフレッシング評価を行う必要がある。

ここでは接触端部にフレッシングき裂が発生・進展が起る可能性があるかを判断するための一手法として、接触端部の詳細な応力分布を解析により求め、さらに応力分布から微視き裂の破壊力学的評価法を利用した事例を紹介する²⁴⁾。

フレッシング疲労を回避する手段は、変動応力の低減や摩擦係数の低減、相対すべりの低減などがあげられるが、接触端部の高い応力を低減するために図 3.1.2-28 に示す接触端に逃げ溝(Groove)を設けることがある。この形状も接触端部は存在し、フレッシング疲労が生じる可能性があるため、端部からき裂が発生した場合の疲労き裂の進展挙動を調べた。応力解析は図 3.1.2-29 に境界要素で示すモデルを用いた境界要素法 (BEM) により実施した。き裂の方向はこの事例では表面に垂直方向としている。

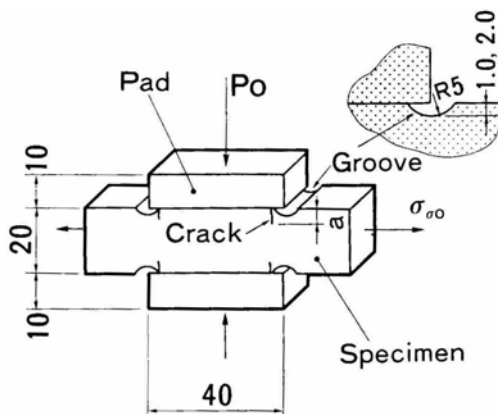


図 3.1.2-28 フレッシング疲労強化構造の例
(接触端部に逃げ溝)

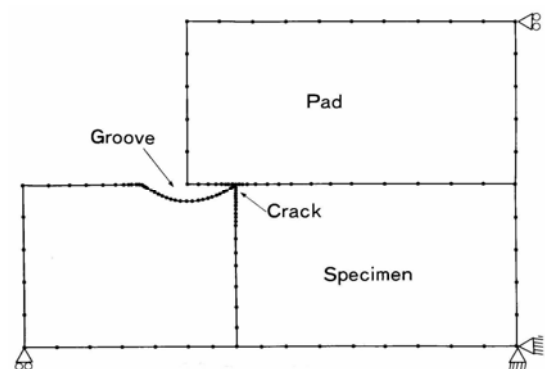


図 3.1.2-29 逃げ溝を有する接触端部 BEM モデル

また、破壊力学によると、疲労き裂の進展はき裂先端の応力の強さを表す応力拡大係数範囲 ΔK （繰り返しの応力負荷に対応した最大応力拡大係数 $K_{\max}$ と、最小応力拡大係数 $K_{\min}$ の差 $= K_{\max} - K_{\min}$ ）と、き裂進展速度 da/dN に良い関係が成立する。

さらに、疲労き裂の場合には応力拡大係数範囲の下限界値 ΔK_{th} 以下ではき裂が進展しないことが知られている。下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は材料や負荷条件毎に変わる材料固有の値である。

図 3.1.2-28 に示す試験片の応力振幅 σ_a が 137, 147, 157MPa である場合のフレット疲労き裂の深さ a と応力拡大係数範囲 ΔK の関係をそれぞれ図 3.1.2-30～図 3.1.2-32 に示す。

図 3.1.2-30 の応力振幅の場合にはき裂が非常に短いときには応力拡大係数範囲 ΔK が下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} よりも大きいため進展性があるが、き裂深さが $a = 20\mu m$ でこの大小関係が逆転し、 ΔK 値が下限界 ΔK_{th} 以下となると、疲労き裂の進展は停止し、停留き裂として残存する。

一方、図 3.1.2-32 の応力振幅の場合には、き裂深さに関わらず応力拡大係数範囲 ΔK は下限界 ΔK_{th} を上回っていたため、荷重負荷が続く限りき裂は進展し続けることになる。また、き裂の停留・進展継続の限界は図 3.1.2-31 に示すように ΔK と ΔK_{th} とがちょうど接触する位置である。従って本構造の場合にはフレットによる疲労限は 147MPa となる。

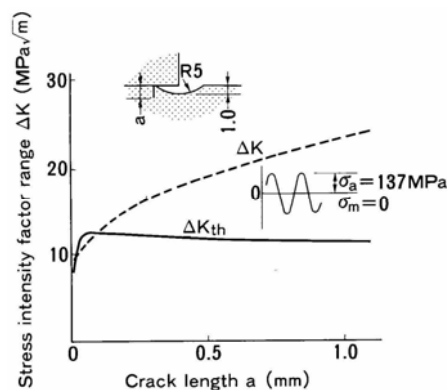


図 3.1.2-30 ΔK とき裂深さ a の関係
(応力振幅 137MPa)

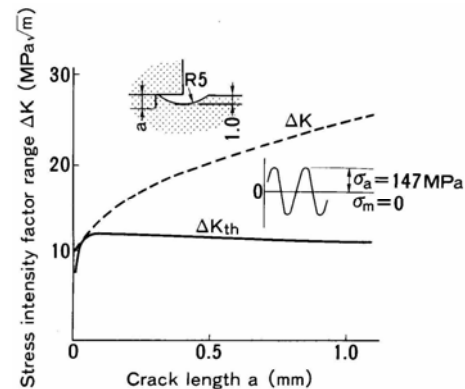


図 3.1.2-31 ΔK とき裂深さ a の関係
(応力振幅 147MPa)

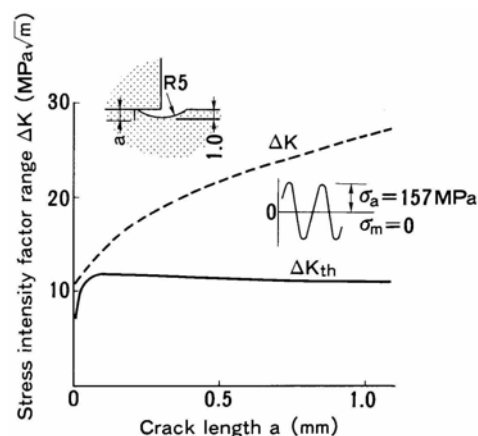


図 3.1.2-32 ΔK とき裂深さ a の関係 (応力振幅 157MPa)

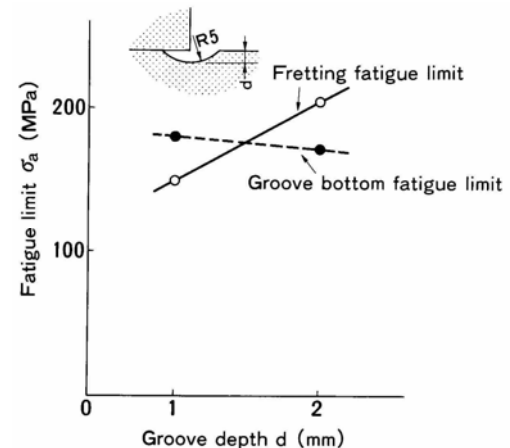


図 3.1.2-33 逃げ溝構造の疲労限

図 3.1.2-33 は逃げ溝の深さと疲労限の関係を求めたもので、フレット疲労の場合は前述の手段で求めるとともに、溝底から発生する通常の疲労限も同時にプロットしている。図示のようにフレットによる疲労限と通常疲労の疲労限が交差していることから、本逃げ溝構造で最大の疲労限を持たせる構造は交点の溝深さ 1.5mm が最適であることがわかる。

このように接触部の形状、応力振幅、面圧、相対すべり量、材料の疲労き裂進展下限界を表す破壊力学パラメータなどを入力条件として CAE 手法（ここでは境界要素法を用いているが有限要素法でも同様に実施することが可能²⁵⁾）を利用して詳細な接触部の解析を実施すればフレット評価を行うことは可能である。従って、蒸気タービンシステムでは非常に多くの接触部があるため、評価部位の選定に過去の経験が必要ではあるが、設計段階で構造物の全体解析を行った結果をポスト処理としてフレット疲労評価のルーチンへ情報を流れる仕組みを構築すればフレット疲労のフロントローディングが実現するものと考えられる。これは、メーカでの設計段階のみならず、ユーザでのメンテナンスの段階で、分解点検することなしにはフレット疲労が発見困難である状況を考えると、ユーザである電力会社にとっても早急に望まれる技術である。

8) マルチクライテリア電力プラント設計システム

(1) 劣化・損傷情報を活用した設計システムの概念

図 3.1.2-34 に、複合した損傷現象が生じる部材に対する設計プロセスの概念を、長翼を例にとって示す。構造設計は、流体解析とそれに基づく振動応力解析、遠心応力解析および接触応力解析を行って、流体条件からエロージョンを予測し、各種応力解析に基づいて損傷を評価し、最適な環境強度設計を行う。このとき、構造寸法の中で肉厚などの寸法に関する自由変数と応力との関係に、材料データベースから得られる強度値を代入すると自由変数の値も決まることから、材料ごとに構造設計寸法を決めることができる。このようにして求めた寸法と設計目標を満たす許容寸法とを比較して、最適な材料を選択できるようにしておけば、材料と構造を同時に決めることができる。さらに、寸法から求められる材料使用量に応じたコスト制約条件も設定しておけば、選択すべき材料をさらに絞り込むことができる。なお、エロージョンなど流体条件に影響を与える損傷は、損傷予測結果を流体解析にフィードバックし、再度損傷評価を行うようにしておくことと実機の損傷の蓄積をさらに精度良く推定することができる。

以上が、複合する損傷現象を考慮して最適な構造設計を行う方法の概略であり、この手順をアルゴリズム化し、必要なデータベースと組み合わせて最適化するようなシステムを構築することによって、電力プラントの複合損傷条件に対応したフロントローディング設計 CAE システムが実現される。以下では、その主要構成要素である、構造解析モジュール、材料・構造選択モジュール、損傷評価モジュールおよびデータベースの構成について述べる。

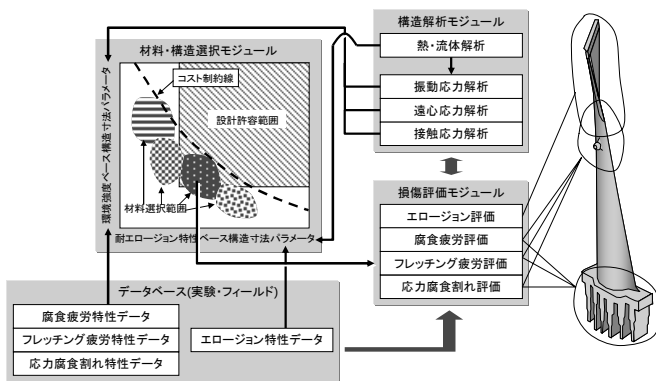


図 3.1.2-34 複合損傷に対する構造設計解析
（長翼の例）

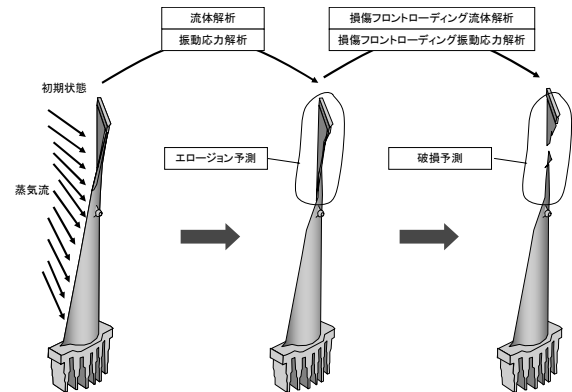


図 3.1.2-35 損傷現象をフィードバックした
フロントローディング設計解析

(2) 構造解析モジュール

構造解析モジュールの役割は、図 3.1.2-35 に示すように、材料・構造選択モジュールにおける必要な構造寸法パラメータを計算するため、応力値などの使用条件を与える一次解析を行うことと、一次選択された材料・構造に対して詳細な二次解析を行うことにあります。一次解析においては、構造寸法パラメータを変化させて最適化ができるような定式化を行う。二次解析においては、選択された材料の特性と構造寸法を用いて、詳細な設計条件評価ができるようにする。この段階ではさらに、損傷評価モジュールの結果を参照して、損傷の蓄積に伴う熱・流体条件の変化を考慮したフィードバック解析を行うことが望ましい。エロージョン減肉による流体条件の変化と部品の固有振動数の変化とともに評価して、破損寿命の予測をしておくことはフロントローディング設計において特に重要である。

(3) 材料・構造選択モジュール

材料・構造選択モジュールでは、自由変数を材料強度特性によって規定し、材料ごとの構造選択領域を表示することによって、材料と構造寸法を同時に決定する。例えば、振動応力 σ_v が、材料のヤング率 E 、蒸気力 P 、構造代表寸法 L で表されるものとして、 σ_v に材料の疲労限度 σ_w を代入すると、材料ごとに構造寸法 L_w が定まる。一方、エロージョン速度に対して、材料の引張強度 σ_B （または硬さ）ごとに構造代表寸法 L_e が定まるとすると、両者の組み合わせを満たす構造寸法の領域を決めることができる。これによって設計可能領域を設定するとともに、コストなどの制約条件を課して選択可能領域を絞り込む。このような表現をすることにより、材料を選択すれば自動的に寸法も決定することができる。

このほかにも、図 3.1.2-36 に示すように、高温蒸気配管などにおいては、クリープに対する部材の肉厚と、熱疲労に対する部材の肉厚に対し、前者は肉厚が大きい方が安全であるが後者は肉厚が薄い方が好ましいことから、両者の条件を満たす設計領域が設定できる。このように部材の使用条件と損傷モードに応じてパラメータを選択し、設計可能領域を設定しておくことは材料・構造選択モジュール構成において特に重要である。

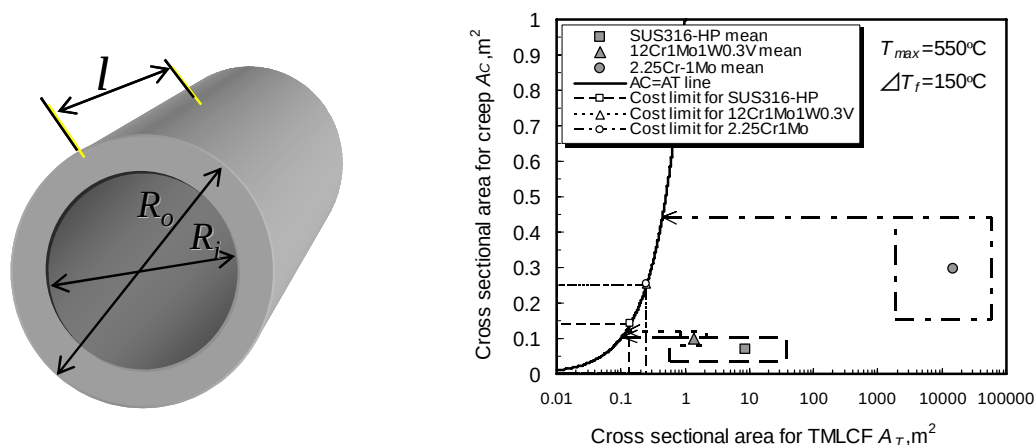


図 3.1.2-36 高温蒸気配管のクリープ-熱疲労設計における材料・構造選択マップの例

(4) 損傷評価モジュール

損傷評価は選択した材料・構造に対して詳細な寿命評価を行うためのものであり、材料データベースから得られる評価式を用いて運転時間・起動回数の増加による損傷の蓄積量を求める。このとき、構造解析モジュールで得られる損傷支配パラメータに対応した評価式を選択する必要がある。

(5) データベース

表 3.1.2-11 に、蒸気タービンの設計に必要となる材料と現象の一覧を示す。データベースはできる限り統計的処理を行い、平均・分散などの統計パラメータと併せて整備することが望ましい。

表 3.1.2-11 蒸気タービンの設計に必要とされる材料特性

部 品	適用実績材料	使用される材料特性
高中圧ロータ	CrMoV 鍛鋼、12Cr 基鍛鋼	高温強度、じん性、延性、熱疲労強度
高中圧ケーシング・弁・ノズルボックス・蒸気管フランジ	0.5Mo 鋳鋼、CrMo 鋳鋼、CrMoV 鋳鋼、12Cr 基鋳鋼	製造性、溶接性、高温強度、延性、熱疲労強度
高中圧段翼・高中圧ノズル板	12Cr 基鍛鋼	高温強度、高サイクル疲労強度、振動減衰能、耐エロージョン性、耐食性
高中圧ノズル内外輪	0.5Mo 鍛鋼、CrMo 鍛鋼 CrMoV 鍛鋼	高温強度、溶接性
低圧ロータ	NiCrMoV 鍛鋼	常温強度、じん性
低圧段翼	12Cr 基鍛鋼、Ti 合金	常温強度、比強度、じん性、高サイクル疲労強度、振動減衰能、耐エロージョン性、耐食性
低圧ノズル板	12Cr 基鍛鋼	耐食性・強度
低圧ノズルダイヤフラム	鋳鋼、鋳鉄	製造性・強度
低圧ケーシング	炭素鋼	同上

(6) 統合設計 CAE システム

本項で述べた損傷情報を基にした電力システムに対するフロントローディング統合設計 CAE システムの一般的構成例を図 3.1.2-37 に示す。各部品に対する基本構造、流体条件、損傷モードと使用条件に応じた評価法とデータセットの選択は統合設計モジュールにおいて行う。構造解析結果を基に、材料・構造を同時選択し、詳細な損傷評価を行って、予測した寿命が要求寿命を満たすか否かを判断し、要求寿命を満たさないときは解析条件を変更しフィードバックを行う。これにより、蒸気タービン全体について損傷情報を反映したフロントローディング設計・運用設計が可能となる。

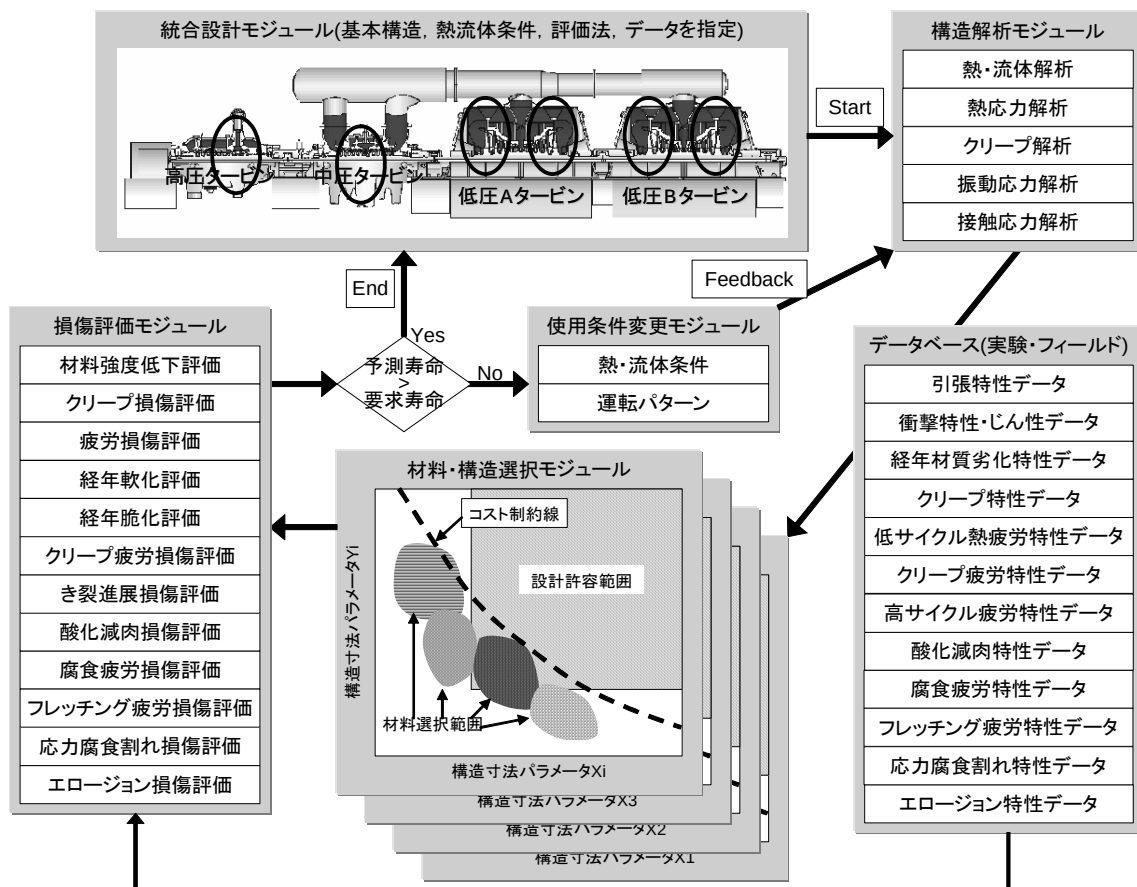


図 3.1.2-37 蒸気タービンのフロントローディング統合設計システムの構成例

9) 実験評価情報高度利用 CAE の今後の課題と展望

35万 kW 級の火力発電用蒸気タービン最終段の議論ターゲットに関わる主要劣化モードとして水滴エロージョンとフレッチングと CAE に関して、本調査研究で得られた現状と課題の要約を示す。

図 3.1.2-38 と図 3.1.2-39 に水滴エロージョンとフレットィングの評価方法の分析をそれぞれ示す。水滴エロージョンとフレットィングとも現象メカニズムは明らかにされていないが、実験を基とする現象因子関係式と計測・CAE を用いた評価がされている。

水滴エロージョンでは現象因子群の関数で表された平均エロージョン率（時間毎の平均減肉量）の関係式で減肉量が評価される。平均水滴直径、水滴衝突速度、衝突水滴流量はシステム全体の設計因子と運転状況因子に依存するが、「6) 水滴エロージョンと実験評価情報高度利用 CAE 技術」では、水滴の発生—翼面捕集—粗大水滴の発生—微細化—衝突と、時系列的にその因果律を計測と一次元 CAE で解析した例を述べている。平均エロージョン率評価式の各項の次数は材料に依存している。また、水滴エロージョンの脆化に関わる現象因子および関係式は未だ確立されていない。

一方、フレットィングでは現象因子群は接触端の形状、相対すべり量、接触面圧、応力振幅、応力比、繰り返し速度、材料の組み合わせ等であり、このうち、境界条件（接触端の形状、相対すべり量、接触面圧）、荷重条件（応力振幅）、物性（材料の下限界応力拡大係数範囲）を CAE に与えることで、き裂進展解析による疲労限の評価が可能である。これらの現象因子群および疲労限はシステム全体の設計因子と運転状況因子に依存する。「3.7 フレットィングと実験評価情報高度利用 CAE 技術」では設計因子の一つである接触端に設ける逃げ溝寸法と疲労限との関係を CAE により分析評価した事例である。

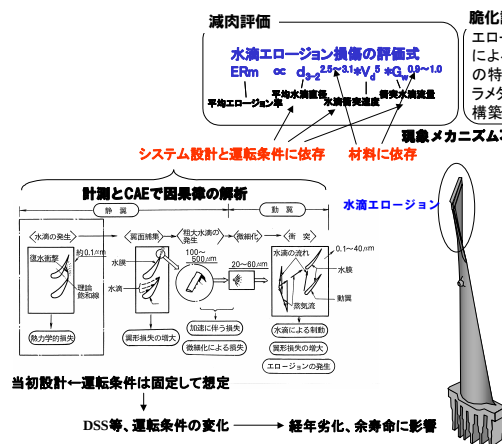


図 3.1.2-38 水滴エロージョン評価方法の分析

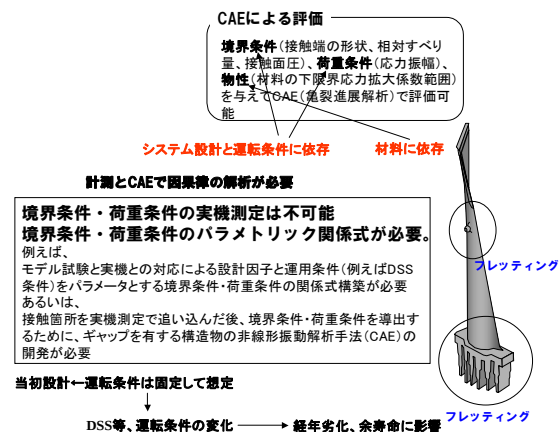


図 3.1.2-39 フレットィング評価方法の分析

上記の議論では、現象因子、設計因子・運用因子を明確に分けている。現象因子、設計因子・運用因子からなる関係式を一度に考えていくのは数の爆発を招くため、賢い方法とは言えない。フレットィング、水滴エロージョンの分析事例のように、現象因子からなる関係式、設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式、というように階層的に考えていくのが現実的である。図 3.1.2-40 に現象評価式—現象因子—設計変数・運転状況因子の入れ子関係を図示した。これは設計あるいは運用評価のためには、現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられている必要があることを意味している。(例えば、時間変化に対して減肉量を測定しただけのデータは設計あるいは運用評価に対しては有効ではない。)

現象評価：現象因子から構成される関係式あるいは現象因子を入力とするCAE
 例えば、
 ・水滴エロージョン：
 平均エロージョン率＝平均水滴直径、水滴衝突速度、衝突水流量を因子とする関係式
 ・フレットニング：
 亀裂進展解析＝境界条件（接触端の形状、相対すべり量、接触面圧）、荷重条件（応力振幅）、物性（材料の下限界応力拡大係数範囲）を入力因子としてCAE解析

設計・運転条件因子：現象因子は設計変数・運転条件因子と因果律で結びつく
 例えば、
 ・水滴エロージョン：
 水滴衝突速度＝羽根形状、湿度、運用温度、DSS方式等を因子とする関係式
 ・フレットニング：
 応力振幅＝構造及びDSS方式等を因子とする関係式

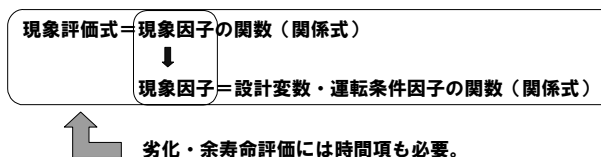


図 3.1.2-40 現象評価式—現象因子—設計変数・運転状況因子の入れ子関係

本調査研究ではフレットニング、水滴エロージョンに関するケーススタディを扱ったが、これまでの分析を通しての一般的な考え方は、余寿命評価、経年変化評価に関わる安全・安心確保に広く有効と考える。議論の詳細は報告書本体に譲ることにして、ここでは結論のみを示すことにする。

今後の課題と展望(1)

- ・設計あるいは運用評価のためには、現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられていることが必要
- ・これを実験のみで行うと天文学的な実験試行が必要。実験評価情報高度利用 CAE は、現象因子からなる関係式と設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式の階層的構造を保持することにより、その実験試行回数を減らす方法
- ・実験評価情報高度利用 CAE のためには、境界・荷重条件および物性の記述が空間座標・時間・現象因子の関係式で記述されているか、現象評価式が時間および現象因子の関係式で与えられ、設計変数・運転状況因子とのパラメトリックな関係が理解されていることが必要

今後の課題と展望(2)^{26, 27)}

- ・現象因子からなる関係式、設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式は(多次元多因子の)リスponsサーフェス(Response surface methodology: 応答曲面法)等で記述され、製造側・ユーザ側を含め、誰でも使えるようにするのが望ましい
- ・関係する因子が後に認識され、関係式の因子群を付加したい時に、リスponsサーフェスに簡単に付加できる仕組み(因子付加に対する効果的なリスponsサーフェス update のアルゴリズム)が必要
- ・任意の多次元多因子関数の構築が可能な Radial basis functions(RBF)等、局所挙動の情報を逃さない、リスponsサーフェスの関数近似の方法および現実的な計算効率の構築アルゴリズム開発も重要
- ・自動計測装置および高速探索技術等を駆使してパラメトリックな関係式を自動構築するようなシステムの開発も検討されるべき

今後の課題および展望(3)

- ・当初の設計では運転条件は固定して想定されている
- ・DSS 等の運用変化により影響が出る経年変化・余寿命評価を再考慮する必要
- ・実験評価式を含めた広義の強連成手法を含む、始動・停止時の挙動をきちんと評価可能な CAE 手法の構築が必要

今後の課題および展望(4)

- ・最適な設計案を CAE により導出する最適設計も計算機的能力向上を背景に近年有効になってきた
- ・実験評価式も許容する広義の連成 CAE を前提とした最適設計システムの大枠をまず開発し、個々の評価技術をそこに入れていくトップダウン的な開発アプローチも併用することが有効
- ・実験評価情報高度利用 CAE による評価技術の確立を目指すボトムアップの開発と併せ、設計フロー全体のフレームワークを共有したトップダウン的な開発との組み合わせによる開発が望ましい

今後の課題および展望(5)^{28~31)}

- ・材料が削られるような現象、それに伴う材料の脆化のメカニズムは解明されていない
- ・材料依存のファクターは実験によるパラメータチューニングが必要とされている
- ・異なるスケール間での緩和時間の違いのオーダーは計算機の進歩を持っても吸収できない
- ・第一原理分子動力学を異なるスケール間を連成する有機的連携に用いるのは無謀
- ・異なるスケール間・異なる緩和時間現象のそれぞれの学術分野で発展している手法のインプット・アウトプット部分のみ連携させるブリッジ的連携の手法確立が今後の課題

今後の課題および展望(6)

- ・マイルストーンとしては、既に実機のある余寿命評価、経年変化評価に対して、現象因子からなる関係式・設計因子・運用因子からなる関係式を多次元多因子レスポンスサーフェスの共有により専門知見を結集して現象再現精度を高め、実機評価情報高度利用 CAE 開発にある程度の目処を立てた後に、その技術をスケールアップ設計に適用し、更に実機評価情報高度利用 CAE の守備範囲・現象再現精度を高めて行くという順序が望ましい

人類は失敗・事故を徹底的に解析し、科学技術を進歩させることによって、未知の問題を解明し、より賢くなり、その結果、より安全で安心な生活を手に入れてきた。タイタニック号やリバティ号の予想もしない沈没事故の分析により低温脆性破壊を起こさない設計方法を学び、世界初のジェット機であるデハビランド・コメット号の墜落事故から低サイクル疲労破壊の防止策を学び、イギリスのホリックスポローという小さな町の化学工場の事故から応力腐食割れの危険性を学んできた³²⁾。これらの事故は比較的単純な系で実験評価も比較的しやすいものであった。それに対して、本調査研究で対象としたタービンにおける劣化モード（応力腐食割れ、エロージョン・コロージョン、（高サイクル）疲労、フレット疲労、摩耗、クリープ、脆化等）は、複合現象であり、劣化が長期間にわたり、実機とモデル実験との挙動が異なり、実機での計測が十分にできないため、追試実験を繰り返して現象を分析していく従来の方法論が十分に使えない。ゆえに、実機評価情報高度

利用 CAE への期待は非常に大きい。本節で詳細に議論した、実機評価情報を CAE で受け取るための条件（現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられている必要性等）を十分に議論し、一見、人知が及ばないと思われる事象を、年々進歩する計算機能力を背景に、CAE と実験情報、メンテ情報との合わせ技で解決していく、新しい形の方法論の確立を、立場・専門を異にする専門家の英知がソフトウェア開発を通して、集中的に結集する形で実現していく技術開発が強く望まれる。

参考文献

- 1) Erwin Stein, Rene De Borst, Thomas J. R. Hughes, Rene De Borst : Encyclopedia of Computational Mechanics, John Wiley & Sons Inc (2004).
- 2) 竹内 則雄, 寺田 賢二郎, 樫山 和男 : 計算力学, 森北出版 (2003).
- 3) 日本機械学会講習会教材 : 強度設計における有限要素法の基礎から応用まで, No.96-82 ,p65 (1996).
- 4) Kimura K., Inukai T., Fukuda K. and Muramatsu M : Steam Turbine Bowing Analysis, International Conference on Creep, p1520 (1986).
- 5) Ayano S., Suzue S., Muramatsu M. and Yamada M : High Temperature Blade Deterioration and Life Assessment Technique, EPRI CS-5085 (1987).
- 6) 藤山、村松、木村、伊藤、石井 : タービン羽根植込部の高温低サイクル疲労強度, 第 18 回高温強度シンポジウム前刷集, p73 (1980).
- 7) Fushimi T., Onda K., Muramatsu M., Ishii F., Kimura K. and Fujiyama K. : On-Line Measuring System Using High-Temperature Strain Gages and Application to the Steam Turbine Casing, The 6th international Conference on Experimental Mechanics, p644 (1988).
- 8) 加藤、恩田、村松、石井、木村 : オンライン熱応力計測システムの開発および実機蒸気タービンケーシングへの適用, 日本非破壊検査協会 第 21 回応力・ひずみ測定シンポジウム, P1 (1989).
- 9) 犬飼、田中 : ターボ機械における構造・強度設計の最適化, ターボ機械, Vol.30, No.5, pp283 (2002).
- 10) 中谷 : 熱応力解析への形状最適化手法の応用, 東芝レビュー, Vol.61, No.2, p70 (2006).
- 11) 趙、中村、遠藤、名取 : 構造最適設計プログラム 3D FINAL DESIGN の開発と応用, 機構論, 99-27 (1999).
- 12) 趙、中村、藤井、名取 : タービン構造最適設計への 3D FINAL DESIGN の応用, 機械論, 99-27 (1999).
- 13) 吉村 : モノづくりにおけるシステム設計最適化, 養賢堂, 2007
- 14) M. Yoshimura, M. Taniguchi, K. Izui, and S. Nishiwaki: Hierarchical Arrangement of Characteristics in Product Design Optimization, ASME Journal of Mechanical Design, Vol.128, July, 2006, pp.701-709.
- 15) 松村 昌信、矢吹 彰広、磯本 良則 : エロージョン-コロージョン入門—流れがもたらす材料劣化現象 , 日本工業出版 (2005).

- 16) 吉田幸一：蒸気タービン段落内の湿り蒸気流問題に関する研究,九州工業大学 博士論文
- 17) 杉村忠士：金属疲労と強度・剛性 CAE(I), 第 10 期非線形 CAE 勉強会テキスト, 非線形 CAE 協会(2006).
- 18) 豊貞雅宏: 金属疲労と強度・剛性 CAE(II), 第 10 期非線形 CAE 勉強会テキスト, 非線形 CAE 協会(2006).
- 19) 猪狩敏秀: 金属クリープの強度・剛性 CAE,第 10 期非線形 CAE 勉強会テキスト, 非線形 CAE 協会(2006).
- 20) M. J. Moore et.al. : Predicting the Fog-Drop Size in Wet-Steam Turbines, Instn. Mech. Engrs. Wet Steam 4, pp.41(1973).
- 21) 坪内他：蒸気タービン長翼におけるエロージョン防止技術の開発, 日立評論, Vol.70, No.2 pp.53-60(1988-2).
- 22) S. Senoo, etc.: Two-Dimensional Analysis for Non-Equilibrium Homogeneously Condensing Flows Through Steam Turbine cascades, Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference, July 18-23, 1999, San Francisco, CA
- 23) 例えば妹尾他：蒸気の熱力学特性を考慮した二次元翼間乱流解析, 日本機械学会, 日本機械学会論文集, Vol.69, No.681(2003.5).
- 24) Hattori T., Nakamura M. and Ishizuka T., Fretting Fatigue Analysis of Strength Improvement Models with Grooving or Knurling on a Contact Surface, ASTM STP 1159, p101, (1992).
- 25) 永田晃則, 深倉寿一：機論, Vol.58, pp1561 (1992).
- 26) Douglas C. Montgomery, Raymond H. Myers, Response Surface Methodology, Wiley-Interscience (1995).
- 27) 例えば, J.C. Carr, R.K. Beaton, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, T.R. Evans :“ Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions ”, ACM SIGGRAPH 2001
- 28) 第一原理分子動力学の入門書は種々あるが、内容がコンパクトに要約されているものとして 例えば、手塚明, 土田英二：「6.2 量子物理学への応用」, アダプティブ有限要素法, 丸善, 2003
- 29) OCTA プロジェクト、http://octa.jp/index_jp.html
- 30) W. K. Liu, Eduard G. Karpov, Harold S. Park : Nano Mechanics And Materials, John Wiley & Sons Inc (2006).
- 31) 小山敏幸、http://www.nims.go.jp/cmsc/pst/koyama/docs/Lecture_H18/H18_Chapter_1.pdf
- 32) 畑村洋太郎：失敗に学ぶものづくり、講談社(2003).

3.1.3 情報活用技術の開発に関する調査・検討

1) メンテナンス情報活用プロセスの開発

我が国の各種プラント設備の高経年化および現場のエンジニアの高齢化と世代交代のピークを迎えることと重なり、コンピュータによる情報システムを用いてメンテナンス情報を有効に利活用することが期待されている。

本調査研究は、メンテナンス情報を活用するシステム構築に向け、これまでのメンテナンス単独ではなく、設計まで含めた設備ライフサイクルのマクロな視点から、メンテナンスやトラブル・事故情報を日常の保全活動やその分析に基づく高度保全に活かすと共にその源流である設計にどのようにフィードバックするかについて検討したものである。

(1) 情報活用プロセスの考え方

メンテナンス情報活用プロセスの「あるべき姿」として目指すものは、存在するメンテナンス情報をフィードバックすることにより、設備の長寿命化をはかり、かつ事故やトラブルを繰り返さないことである。そのためには、メンテナンス情報活用プロセスを、**図 3.1.3-1** に示すように、「日常保全」、「高度保全」は言うまでもなく、施設・設備のライフサイクルにおける開始点である「新設設計建設、リニューアル設計工事」に確実にフィードバックすることが重要である。

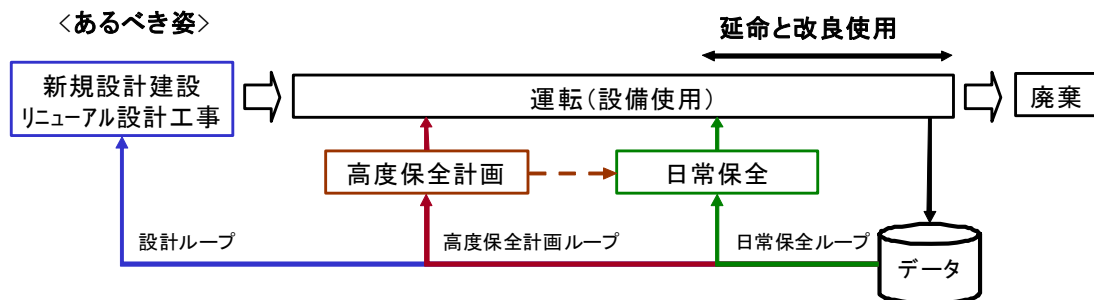


図 3.1.3-1 メンテナンス情報活用プロセスのありべき姿 出典：文献[1]

前記各ループの中に、**図 3.1.3-2** に示す SECI サイクルになぞらえた「表出化」、「連結化」、「価値化」、「共同化」の4つの知的変換サイクルを適用するプロセスと捉え、メンテナンス情報を確実にフィードバックすることとする。

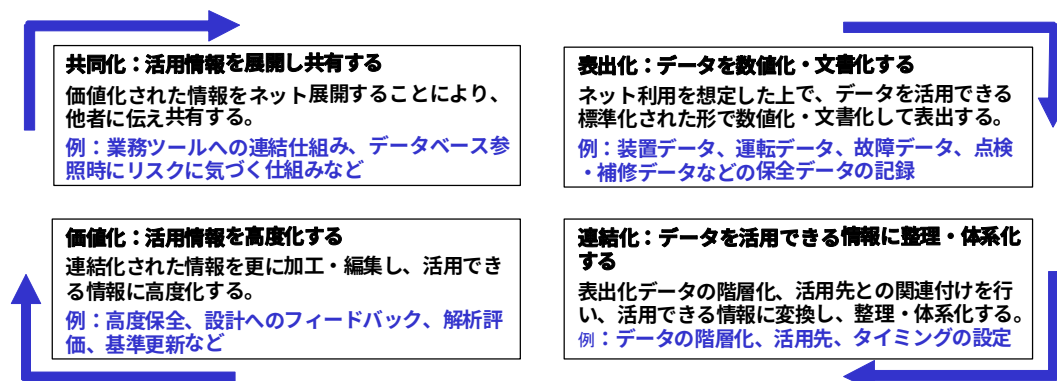


図 3.1.3-2 メンテナンス情報知識共有化サイクル 出典：文献[1]

(2) 情報活用プロセスの分析とモデル化

図 3.1.3-3 は、プラントのライフサイクルである設計・運転・保全情報と事故情報の関係をマクロの視点で表したものである。事故の原因は設備故障（ハード）に起因するものと、人為的な運転もしくは管理ミス（ソフト）によるもの、いわゆるヒューマンエラーとに類別される。エラーに対しては、ハード・ソフトの防護措置が取られるが、「ヒヤリハット」といわれるものも、この中に含まれる。以下具体例を用いたプロセス分析を示す。

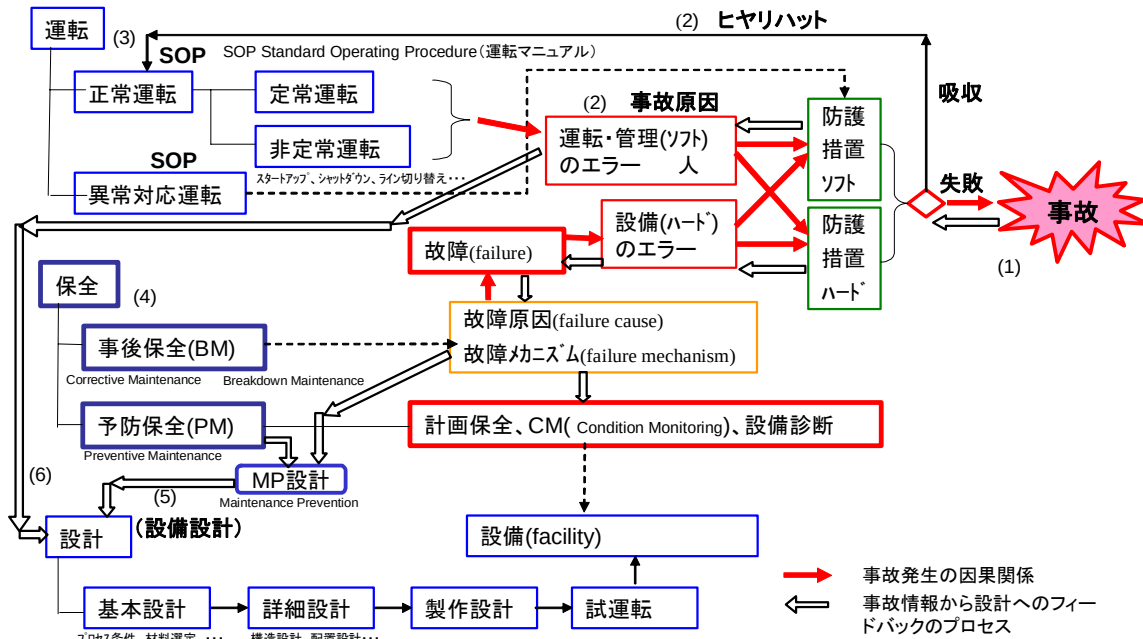
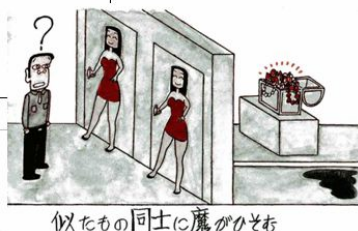


図 3.1.3-3 事故データの設計へのフィードバック 出典：文献[2]

a) 事故事例分析

文献[3]の事故事例から設計へのフィードバック分析の1例として、ヒューマンエラーではあるが、設計で回避できる可能性のあるものを図 3.1.3-4 に示す。この分析過程で、事故情報を収集するプロセスが「表出化」であり、それを類別し原因を究明し、体系化するところが「連結化」であり、高度保全や設計レベルで利用できる形にまで加工するプロセスが「価値化」である。

No.	事故の名称	事故概要	*2	事故の原因	設備要素	人的・管理要素
38	常圧蒸留装置、配管漏洩	常圧蒸留装置の熱交換器の修理後N2でのリークテスト終了、圧を抜くとき、誤って、隣接する運転中の配管ブリーダー弁を開放したので、原油(200℃)が漏洩し、その飛沫で作業員1名が火傷した。	102	近傍の同形同大のブリーダー弁を誤って操作した。 運転中は、ブリーダー弁にプラグをさるが、そのときはプラグの確認を忘れた。		同形、等大のために、配列が同じのために操作員をとりちがえた。 やるべき確認を忘れた。怠った。 教育・訓練の不徹底
				設計へのフィードバックの視点	操作目的が異なるバルブなどは隣接して配置しない。とくに同形のときにはこの配慮が重要である	



出典：事故事例は文献[3]，イラストは文献[4]による

図 3.1.3-4 常圧蒸留塔配管漏洩事故の設計へのフィードバック

b) 事事故事例から設計へのフィードバックプロセス

ベテランエンジニアによるプラントにおける事事故事例から設計へのフィードバックする思考過程を分析すると、図 3.1.3-5 のようなプロセスに分解できる。事故について、工場の設備に対してどのような処置がなされたかの記録も一次的な参考情報として利用している。設備管理活動で発見された想定外の劣化、磨耗などの「異常メンテナンス情報」や事故に至らなかった「ヒヤリハット情報」についても、同様なプロセスで処理される。

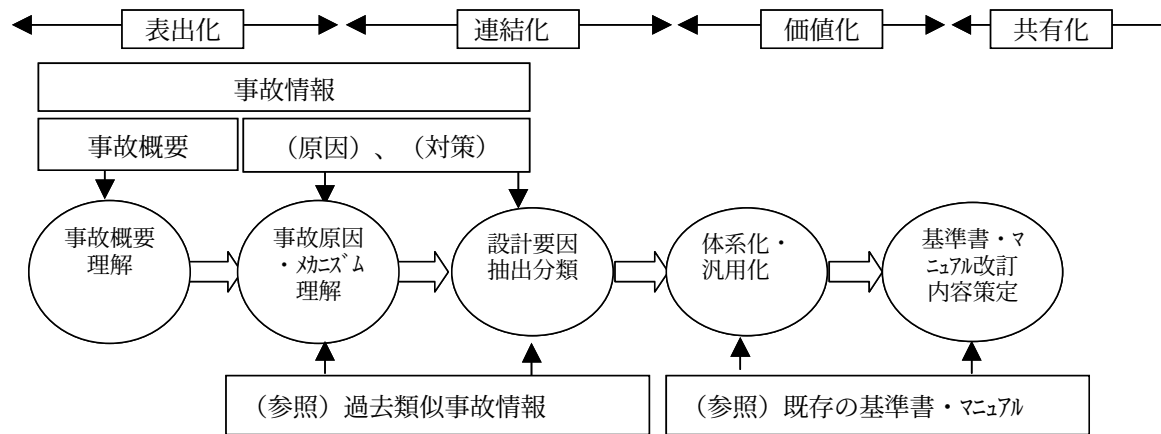


図 3.1.3-5 事故情報から設計フィードバックの思考・検討プロセス

c) 配管事故情報の配管設計への対応

図 3.1.3-6 は、配管機能展開と配管設計業務を対応させたものである。事故の原因のひとつである故障とは、「アイテムが要求機能達成能力を失うこと」であることから、この機能が、どの設計行為に対応しているかを把握しておくことも必要である。

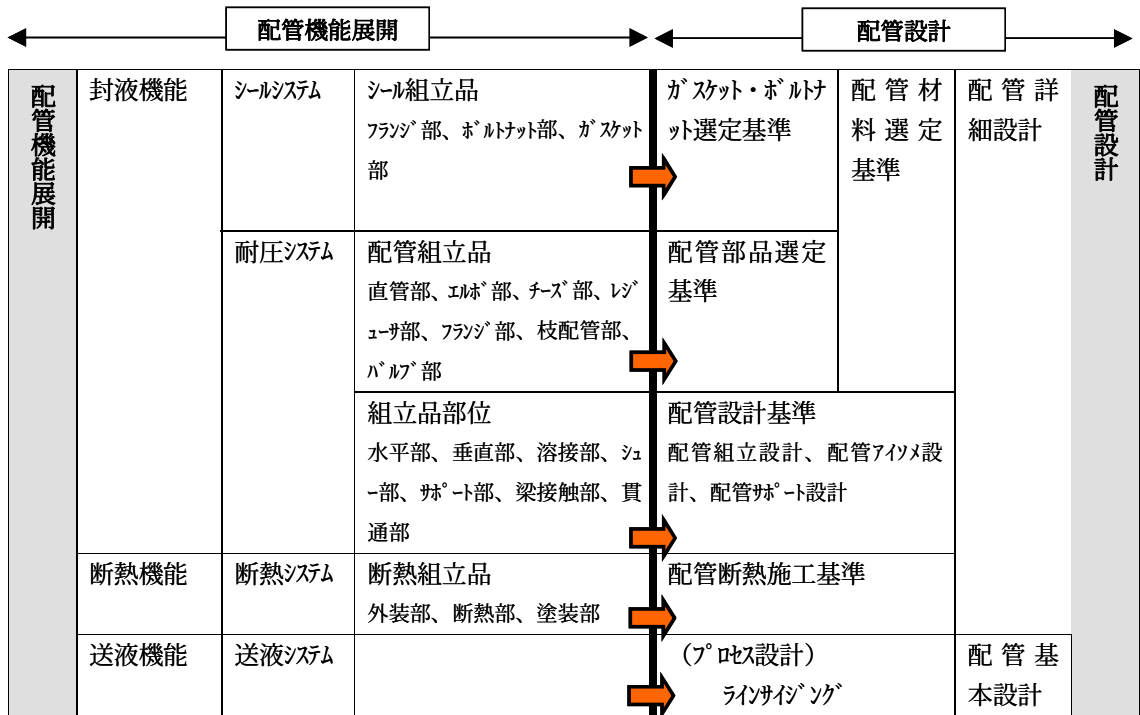


図 3.1.3-6 配管機能展開と配管設計との対応関係

d) ヒューマンエラーを防ぐ配管設計へのフィードバック

文献[3]によると、事故原因のうちヒューマンエラーは次のように分類されている。

- a. 作業情報の提供・伝達の不備
- b. 認知・確認のミス
- c. 誤判断
- d. 誤操作
- e. 技量未熟（ミスを起こした作業者の学習不足、経験不足によるもの）
- f. 作業基準(SOP)の不備
- g. 指揮命令の不備
- h. 点検不良（定められた作業手順として当人がやるべき確認または点検をしなかった、という場合は確認ミスとする。ここでは事故関係者以外の人による点検不良を指す。）
- i. 補修不良（運転員が補修作業を不適当に施工した場合）
- j. 技術的に未知または経験不足（例えば設備を開設してまだ日が浅く、事業所としてその取り扱いを十分に知らなかったことによるものなど）
- k. 教育・訓練の不徹底

このうちの「認知・確認のミス」、「誤判断」、「誤操作」などは、設備の配置や形状、表示などの設計段階での配慮でミスを防げることも少なくない。また「点検不良」にあるような頻繁に点検をせねばならない注意箇所というのは、材質の選定や構造問題に帰する場合もある。

e) フィードバック情報の配管設計プロセスへの活用

図 3.1.3-7 は、配管設計プロセスの概要を表したものであり、各プロセスには多数の参照すべき情報がある。トラブル情報、メンテナンス情報を設計にフィードバックすることは、こうした各種基準書やマニュアルに取り入れて、配管設計者の業務に著実に反映させることである。その場合に、単に「この場合にはこうする」という画一的なものではなく、幾つかの代案を示し、その優劣比較と、必要なときには何故そうなるのかという理由や背景に容易にたどり着けるようなものでなくてはならない。

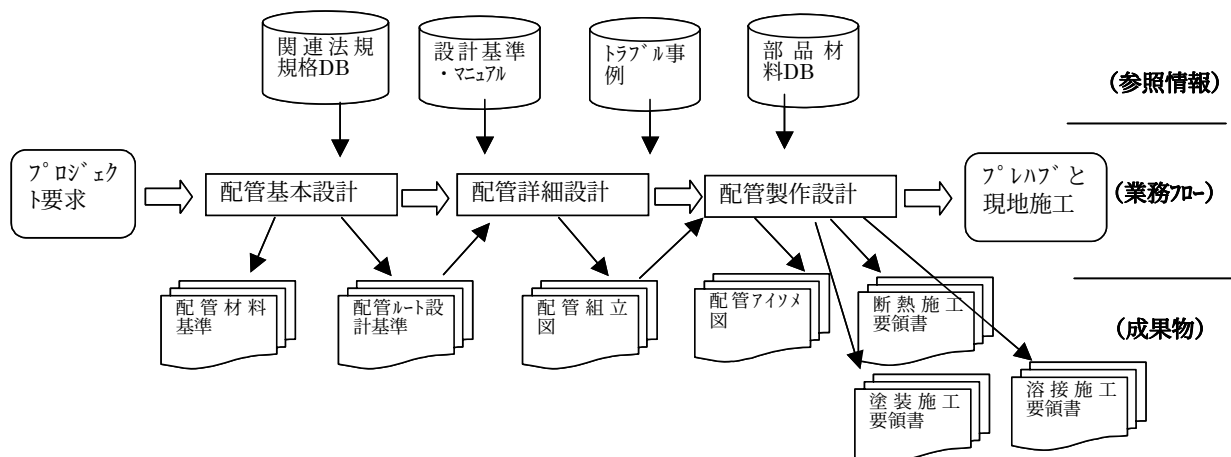


図 3.1.3-7 フィードバック情報の配管設計プロセスへの活用 出典：文献[1]

(3) 情報活用プロセスの検証

a) 検証の目的

今回の検証試験では、情報活用プロセスを雛型として汎用化（以下「テンプレート」と呼ぶ）し、その「テンプレート」が配管設計プロセスへのフィードバックに有効であることを検証した。

b) 検証の方法

「テンプレート」を作成し、その有効性を検証する方法を以下に述べる。

(a) 検証のシナリオ（評価の方法）

今回の検証試験では次の3つのサンプルを採取し、比較することで「テンプレート」の有効性を評価した。

表 3.1.3-1 検証のシナリオ

サンプル 1	サンプル 2	サンプル 3
ベテランエンジニアによる「フィードバック」	中堅エンジニアによる「フィードバック」 ※「テンプレート」利用	中堅エンジニアによる「フィードバック」 ※「テンプレート」利用せず

ベテランエンジニア（「サンプル 1」）と中堅（「サンプル 3」）では、「フィードバック」結果に差が出るのは当然である。ベテランから抽出したノウハウを組み込んだ「テンプレート」を中堅エンジニアが利用して「フィードバック」行った場合（「サンプル 2」）は、「サンプル 3」よりも「サンプル 1」に近い「フィードバック」結果が期待できる。「サンプル 2」と「サンプル 3」との差で「テンプレート」の有効性を評価する。

(b) 検証試験の流れ

今回の検証試験は、図 3.1.3-8 に示す 4 つのステップを経て進めた。

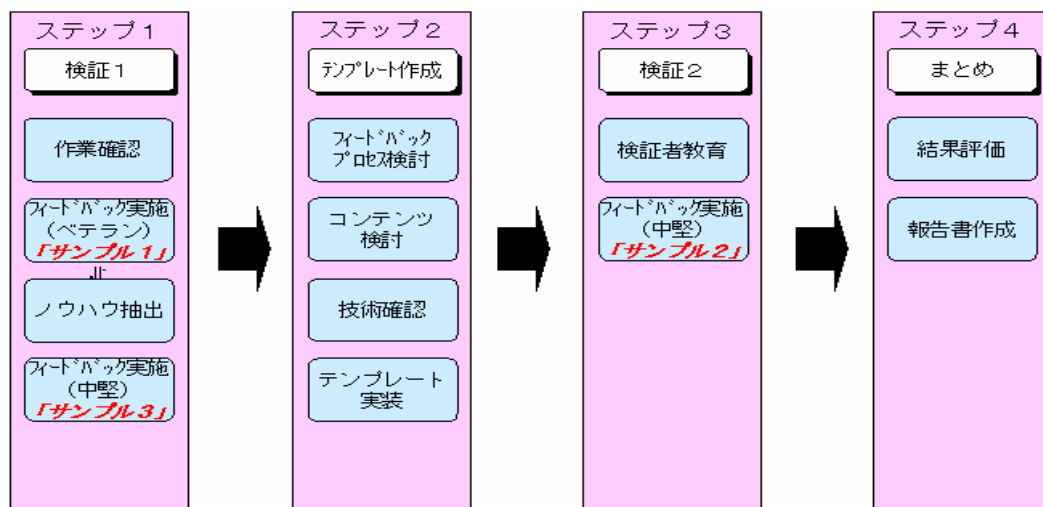


図 3.1.3-8 検証試験の流れ

c) 検証試験の対象題材

本検証試験では、化学プラントの配管設備を例とした。高圧ガス保安協会（KHK）作成の「コンビナート保安調査報告書」から、配管に関わる 52 件の事故事例を抜粋して今回の検証試験の対象題材とした。検証試験の対象題材とした理由を以下に示す。

- a. 少し古いが、事故発生事例としては現在でも同じようなことが言える。
- b. KHK において、昭和 51 年水島、昭和 52 年千葉、昭和 53 年堺泉北、昭和 54 年四日市、昭和 56 年徳山・岩国と調査してきて、昭和 57 年横浜・川崎が一連の最後の報告書であり、毎年調査・分析の工夫改良がなされてきて、この最後が一番体系的に整理されている。

d) 「テンプレート」の内容

今回の検証試験で作成・利用した「テンプレート」について説明する。

「テンプレート」はステップ 1 でベテランから抽出した「フィードバック」の雛型（手本）を可視化したものである。

(a) 「テンプレート」のプロセス

今回の検証試験では、次の 4 手順を「フィードバック」のプロセスとして「テンプレート」で提供した。

① 事故概要理解

対象題材の事故の名称と事故の概要記」を読み、各事故の内容を理解する。

② 事故原因推察

理解した内容に基づき、各事故の原因を推察する。

③ 事故原因の分類推察

各事故の原因を分類する。事故原因の分類とフィードバック先は対応関係が深い
ため、事故原因の的確な分類が、フィードバック先の精度向上に寄与する。

④ 設計へのフィードバック先推察

対象題材各事故のフィードバック先を推察する。

「テンプレート」の外観を図 3.1.3-9 に示す。

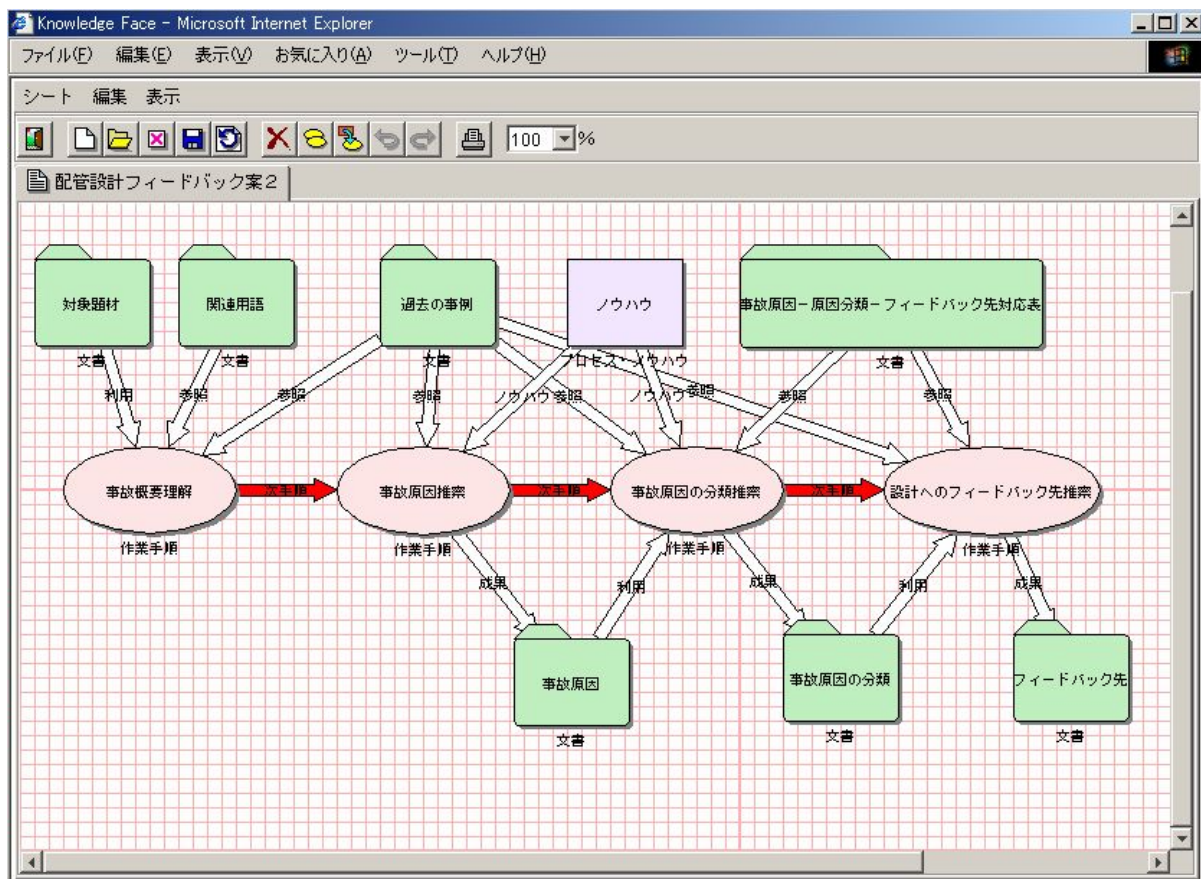


図 3.1.3-9 「テンプレート」の外観

e) 「フィードバック」実施結果の評価

「フィードバック」で得られたサンプル比較による定量評価を中心として、「フィードバック」実施者のコメント等を交えて「テンプレート」の有効性について説明する。

(a) 「フィードバック」実施結果スコア算出の前提

「フィードバック」実施結果のスコア算出にあたっては、次の2点を前提とした。

① 100点法による単純平均

今回の検証試験の題材52件には、被害が大きかった事故と軽微な事故、事象が複雑で概要記述が長い事故と比較的単純で概要記述が簡潔な事故等、さまざまなものが含まれている。「フィードバック」実施結果の評価にあたっては、個々の対象題材の内容には目を向けず（重み付けせず）、52件の題材を同等に扱った。対象題52件毎に100点法によるスコアを算出し、個々のスコアの単純平均を用いてそれぞれのサンプルのスコアとした。

② 加点方式の採用

中堅エンジニアは、ベテランがフィードバックした箇所にフィードバックしなかったり、逆にベテランがフィードバックしなかった箇所にフィードバックしたりする。後者の（「余計な箇所」にフィードバックした）場合でも減点することはせず、ベテランの判断の近さに応じた加点方式で今回はスコアを算出した。

(b)「フィードバック」実施結果スコア算出の方法

「サンプル 2」と「サンプル 3」を定量的に比較するため、ベテランエンジニアのフィードバック結果である「サンプル 1」を「是」（満点）とする相対値によるスコアを算出した。

ベテランの「フィードバック」先点数を分母、中堅の「フィードバック」先点数を分子として対象題材毎に 100 点法（小数点第一位まで）でスコアを算出し、52 件の単純平均を算出した。

「フィードバック」先は、設計分野のみ階層化している。「設計」を大分類とし、その下に「構造」、「材料」といった 5 つ（さらに「他」）の中分類を設定し、中分類によってはさらに小分類を設定（例えば「材料」という中分類の場合は「材料選択」、「材料間違」、「材料欠陥」）した。今回の検証試験で使用した「フィードバック」先を表 3.1.3-2 に示す。

表 3.1.3-2 「フィードバック」先

運転管理	日常保全				高度保全	設計																						
	保全検査					構造		材料		工作			計装					劣化				他						
	保全検査以外	部位不適	周期不適	手法不適		判定不適	構造上	負荷条件	材料選択	材料間違	材料欠陥	継手	開先形状	溶接欠陥	技術管理	機器性能	取付位置	計装ミス	システムエラー	作業空間	その他	腐食	磨耗	疲労	劣化	荷重	配置形状	その他

ベテランの「フィードバック」先点数（絶対値）は、「フィードバック」先の多少や中分類小分類に関わらず単純に 1 箇所 2 点の合計値。

中堅の「フィードバック」先点数（絶対値）は、ベテランと小分類まで同じ箇所は 2 点、小分類は異なるが中分類が同じ箇所は 1 点とした単純合計値。

スコア算出の例を表 3.1.3-3 に示す。

表 3.1.3-3 スコア算出の例

No	フィードバック実施者	フィードバック先						スコア (相対値)	フィードバック先 点数 (絶対値)
		設計以外 の中分類	設計の中分類1		設計の中分類2				
			小分類 1-1	小分類 1-2	小分類 2-1	小分類 2-2	小分類 2-3		
1	ベテラン	○	○						分母4点
	中堅	○						50.0	分子2点
2	ベテラン	○		○		○			分母6点
	中堅		○			○		50.0	分子3点
3	ベテラン	○		○	○				分母6点
	中堅						○	16.7	分子1点
4	ベテラン		○		○				分母4点
	中堅	○	○			○		75.0	分子3点

(c) 「フィードバック」実施結果のスコア

中堅エンジニアのフィードバック結果（スコア）は、表 3.1.3-4 の通りであった。

表 3.1.3-4 各サンプルのスコア

サンプル種別	サンプル 1	サンプル 2	サンプル 3
内容	ベテランエンジニアによる「フィードバック」	中堅エンジニアによる「フィードバック」※「テンプレート」利用	中堅エンジニアによる「フィードバック」※「テンプレート」利用せず
スコア	100.0（基準）	62.6	55.0
相対比		113.8	100.0

ベテランエンジニアを 100 点とする相対評価で、「テンプレート」使用前（「サンプル 3」）は 55.0 点だった中堅のスコアは、「テンプレート」を使用する（「サンプル 2」）と 62.6 点に向上した。今回の検証試験全体として、「テンプレート」使用によりスコアが 13.8%向上したことになる。

(d) スコア以外の定量評価

全体的な傾向は前述の通りだが、52 件の対象題材にはスコアが向上したものもあればスコアが低下してしまったものもある。個々の対象題材毎のスコアに着目し、スコアの上下別に分類した結果を表 3.1.3-5 に示す。

表 3.1.3-5 スコア上下別の題材数

分類	件数	比率
スコアが向上した題材	15 件	28.9%
スコアが同じ題材	28 件	53.8%
スコアが低下した題材	9 件	17.3%
計	52 件	100.0%

「スコアが同じ題材」28 件には、サンプル 2、サンプル 3 とともに 100 点だった題材 9 件が含まれている。元々スコア向上の余地がないこれら 9 件も「スコアが向上した題材」として扱えば、46.2%の題材でスコア向上の効果があったといえることができる。元々 100 点だった題材 9 件を「スコアが向上した題材」に組み入れた場合の分類結果を表 3.1.3-6 に示す。

表 3.1.3-6 スコア上下別の題材数（その 2）

分類	件数	比率
スコアが向上した題材	24 件	46.2%
スコアが同じ題材	19 件	36.5%
スコアが低下した題材	9 件	17.3%
計	52 件	100.0%

(e)「テンプレート」の有効性

配管設計のフィードバックを題材とした場合の「テンプレート」の総合的な定量評価は前項で述べた。ここでは数字（定量評価）には表れて来ない「テンプレート」の効果を、実際にフィードバックを行った中堅エンジニアのコメントも交えて説明する。

① コンテンツの有効性

中堅エンジニアがフィードバックを実施する際に、「テンプレート」上の何らかのコンテンツを参照した題材と、何のコンテンツも参照しなかった題材とがある。スコア上下別に分類した題材別のコンテンツの参照有無は、表 3.1.3-7 の通りである。

表 3.1.3-7 スコア上下別のコンテンツの参照比率

分類	件数	うちコンテンツを参照した件数	コンテンツ参照比率
スコアが向上した題材	24 件	15 件	62.5%
スコアが同じ題材	19 件	10 件	52.6%
スコアが低下した題材	9 件	3 件	33.3%
計	52 件	28 件	53.8%

スコアが向上した題材ほどコンテンツの参照比率が高くなっており、スコアの向上とコンテンツの参照比率には相関関係が見られる。コンテンツの情報が、フィードバック先の判断に好影響を与えたと考える。

② プロセスの有効性

スコアが向上した 24 件のうち 9 件は、「フィードバック」の際に「テンプレート」上のコンテンツが一切参照されておらず、コンテンツはスコアの向上に何ら寄与していない。フィードバックを実施した中堅エンジニアは、「テンプレートにより判断が方向付けられた」と語っており、「テンプレート」で提供されるフィードバックのプロセスによって、よりベテランに近い判断ができたと考える。

今回の検証試験では、コンテンツあるいはプロセスが（もしくはコンテンツとプロセスの相乗効果で）「フィードバック」の際に有効に働き、スコアの向上に寄与したと結論付けることができる。

業務プロセスを可視化し、可視化した業務プロセスに情報を関連付けるプロセス支援型ナレッジマネジメントのコンセプトを具体化した「テンプレート」の有効性が、配管設計プロセスへのフィードバックを対象とした今回の検証試験で確認できた。

(4) ナレッジマネジメントによるシステム構築に向けて

前述した情報活用プロセスのモデル化・検証の内容について、近い将来ガイドライン化が望ましい。ここでは、「プラント設備メンテナンス情報・トラブル情報の設計へのフィードバック支援システムの構築と利用」についてのガイドライン構成案の骨子を図 3.1.3-11 に示す。

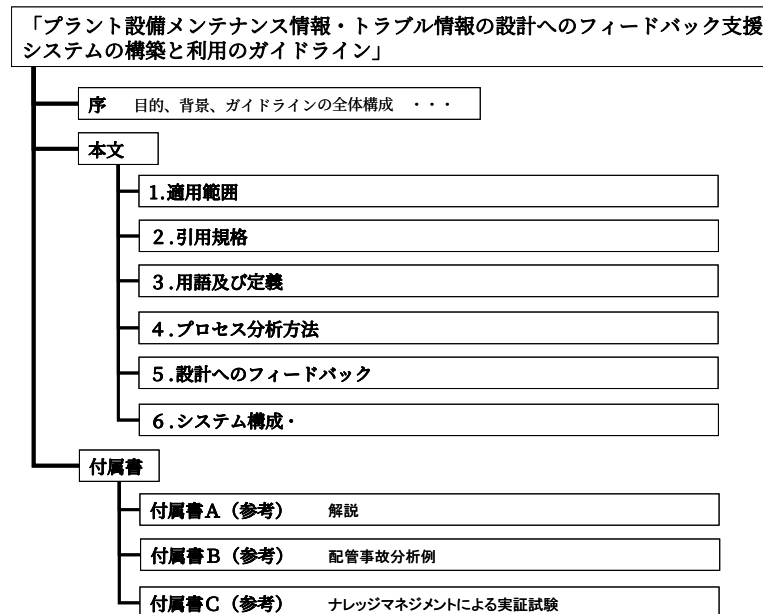
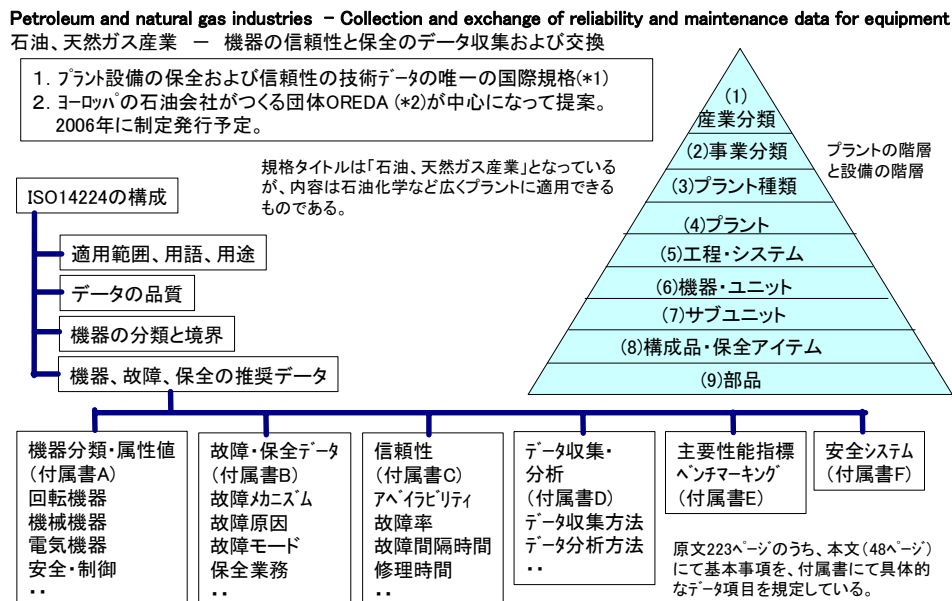


図 3.1.3-11 メンテナンス情報の設計フィードバック・ガイドライン構成案

引用規格として、ISO 14224、ISO 10303 AP239 PLCS、JIS 8115「ディペンダビリティ（信頼性）用語」等がある。例として ISO14224 /DIS 10) の構成を図 3.1.3-12 に示す。



(*1) プラントライフサイクルデータとしてはISO15926、プラント・ライフサイクル支援としてはISO10303 AP239 などがある。
(*2) OREDA(Offshore RELiability DAta) Shell、BP、など8社が、標準化活動とともに、データサービスセンターを運用している。

図 3.1.3-12 ISO14224 の構成

2) メンテナンス情報の共有化

(1) データベースの運用の現状

事故情報・メンテナンス情報の共有化の動向把握を目的として、主に石油・石化、エネルギー分野の各種団体・企業におけるデータベース（以下 DB）の開発・運用の状況についてヒアリングおよびホームページなどの公開資料による調査を実施した。

調査したメンテナンス情報の共有化に係わる DB の開発・運用の状況を図 3.1.3-13 に、調査結果の要約を以下に示す。

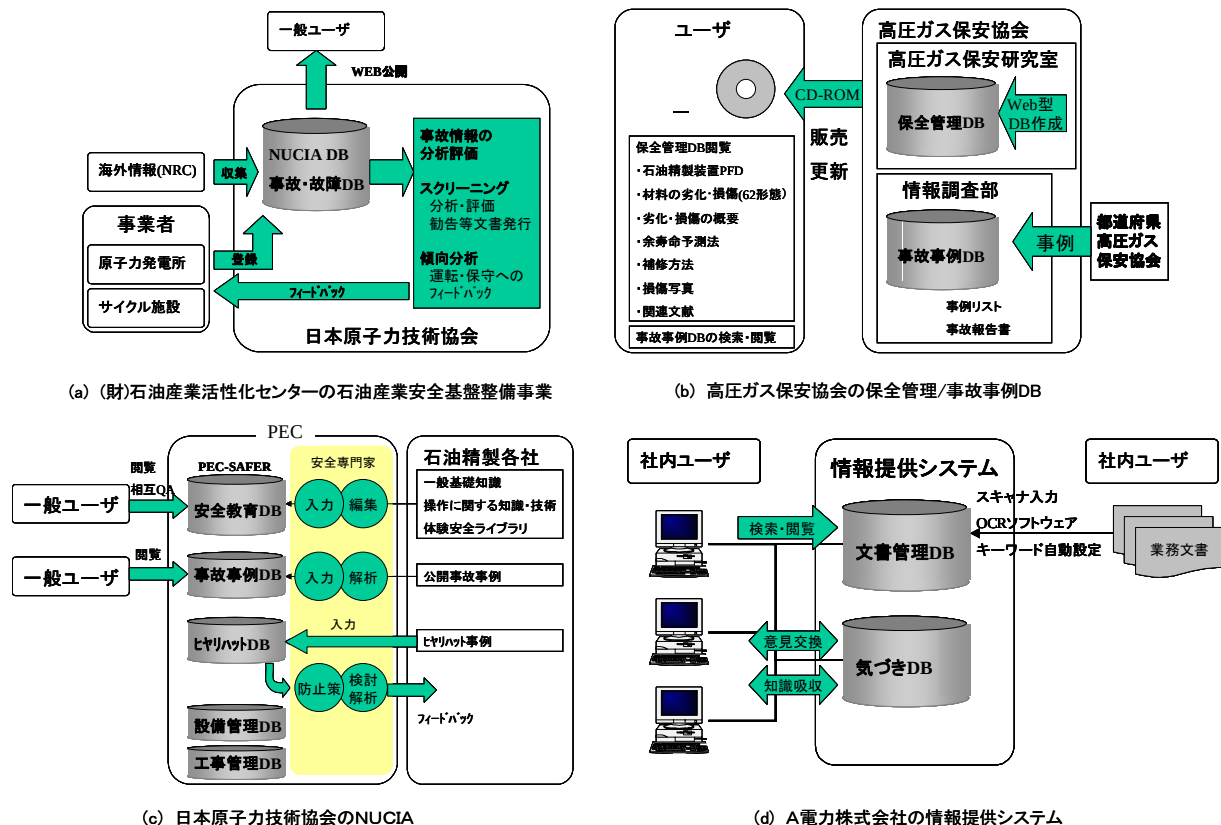


図 3.1.3-13 メンテナンス情報の共有化に係わる DB の開発・運用の状況

a) 財団法人 石油産業活性化センター：石油産業安全基盤整備事業¹²⁾

石油精製各社が保有している設備安全に係わる情報・知識・教訓などを業界全体で共有化し、横断的に活用することで事故の防止を図ることを目的に、安全教育 DB（<http://safer.peci.or.jp/>）を開発・運用している。今後ヒヤリハット DB、事故事例 DB などの構築を予定している。ヒヤリハット DB では、事故に至らなかった設備トラブルだけでなく、運転のヒヤリハット情報も収集することとしている。

b) 高圧ガス保安協会：保安全管理 DB および事故事例 DB¹³⁾

高圧ガス保安分野における規格・基準の国際整合化・性能規定化、保安対策・保安技術の合理化、ヒューマンエラーや経年劣化などへの対応一環として、石油精製の保安全管理に特化した Web 型 DB（CD-ROM）を開発・運用している。なお、事故事例 DB は、都道府県の高圧ガス保安協会から報告される損傷事例を DB 化したものである。

c) 有限責任中間法人 日本原子力技術協会：事故・故障情報活用の取り組み

原子力施設のトラブルの再発防止、原子力施設運営の透明性向上のために、事故・故障情報の公開ライブラリー；ニューシア（NUCIA：Nuclear Information Archives）を運用している（<http://www.nucia.jp/>）。登録された事故・故障事例に対して、1件1件スクリーニング（分析・評価、勧告文書発行）を行う組織を有しており、情報の水平展開と事故の未然防止を図っている。

d) A 電力株式会社：情報提供システム

電力会社の火力発電プラント設備管理分野における、運転保守に関するノウハウ（ルール・マニュアル・記録等）に係わる膨大な技術文書の迅速かつ有効な活用および「2007年問題」を契機とした技術伝承への対応を目的に、メンテナンス情報の共有化・活用に係るナレッジマネジメントシステムを開発し運用している。そのシステムの構成・特徴は、文書を登録し検索する「文書管理機能」と一人ひとりが持つノウハウを提供しあう「気づきメモ機能」の2つの主要機能で構成されている。

(2) 石油・石化プラント機器の情報共有化の条件と枠組み

a) 共有化の現状

石油・石化プラントの損傷事例・事故事例情報の共有化の現状は以下であり、これらをクリアする情報共有化の方法を検討する必要がある。

- ・所轄官庁ごとに異なるデータの管理を行っており、一元管理がなされていない。
- ・重大事故は事故調査委員会により事故原因、事故状況、再発防止策の詳細情報が開示されるが、その他の事故事例については、詳細情報が不明となるケースが多い。
- ・事故・トラブルの結果として、同種事故・同種トラブル防止のための技術的検討が十分になされていない事例が存在する。
- ・業界団体による事例 DB は、開発に視点を置いて予算措置が取られており、運用体制および運用環境整備の検討が行われていないケースが存在する。
- ・ヒヤリハット事例（通報義務のない事例）については、リスクの概念が一般に理解されていないことと、稼働後の装置についても設計・製作時の規格がそのまま適用され、供用期間中の維持規格（Fitness for Service）といった考え方がまだまだ容認されない環境にある。
- ・ヒヤリハット事例を提供した場合、「自社設備の危険性」といった見方をされる懸念がある。自社のヒヤリハット事例が他社の参考になったとしても、他社からそのような情報が得られるとは限らない。

事例データは膨大な件数で有り、それらを個々の企業が評価・解析を行うことは無駄が多い。そのため、個々の事例データを整理し、評価・解析することで、事故再発防止策、業界の保守指針、設計指針などに反映させる仕組みが必要と考える。

b) 既存の各種事例 DB の公開条件

調査を行った各種事例 DB について、どのような条件をクリアして公開に至ったかを

まとめた結果を表 3.1.3-8 に示す。原子力分野では、設備の安全性に対する企業活動の透明性を持たせる要求が強いことから、事故事例・ヒヤリハット事例のいずれも、一般に公開している。石油・石化分野では、官庁通報事例のみが公開されているのが現状である。

表 3.1.3-8 各種事例 DB の事例公開の条件

分野	事業者	事業名	DB 名称	事例公開の条件
石油 石化	(財)石油産業活性化センター	石油産業安全基盤整備事業	ヒヤリハット DB	事故に至る前の事例のため、業界内の共有化に限定される
	(財)石油産業活性化センター	石油産業安全基盤整備事業	事故事例 DB	官庁通報事例のため一般公開
	石油連盟	—	—	官庁通報事例であるが、業界内で共有化
	高圧ガス保安協会	事例 DB		官庁通報事例のため一般公開
	(独)科学技術振興機構	失敗知識 DB 整備事業	失敗知識 DB	官庁通報事例のため一般公開
原子力	有限責任中間法人 日本原子力技術協会	事故・故障 情報活用	NUCIA	事故事例・ヒヤリハット事例を一般公開。原子力分野では、設備の安全性に対する企業活動の透明性を持たせる要求が強いことによる
医療	(財)日本医療機能 評価機構	情報 DB 構築・公開事業	ヒヤリハット事例	医療事故に至らなかった事例を一般公開

c) 共有化の条件

石油・石化業界の事例情報について、当面官庁通報事例に限定して共有化することが考えられる。通報事例に限定しても、同様な事故・トラブルが繰り返し発生しており、共有化の枠組み・運用体制を構築し、石油・石化業界、エンジニアリング業界にフィードバックすることで、事故防止に寄与できると考えられるからである。そして共有化の意義が浸透したところで、通報事例以外のヒヤリハット事例も取り扱うことが考えられる。これらを踏まえ、情報共有化を行うにあたって考慮すべき条件を以下に示す。

① 情報共有化の範囲

原因分析・対策への応用がきく、受け手の知見・経験に応じた使える情報コンテンツのレベルと範囲の設定に工夫が必要である。

② 情報開示への配慮

情報提供者・利用者の双方向によるスパイラルアップを期すために、多くの情報、

価値ある情報を提供すれば、その分多くの情報、価値ある情報が入手できる方策が重要である。

③ 情報共有化の枠組み

情報収集交換を行うためのニュートラルな支援組織（情報センター）を、コンプライアンス、CSR(企業社会責任)に基づく、さらに企業価値向上に直結した社会のコンセンサスを得るために機能させることが重要である。

d) 情報共有化の枠組み

近年のコンピュータ技術・Web環境の進歩により、個々の企業・団体がそれぞれ損傷事例・事故事例を個別にDB化するため、情報の共有化が進まない問題がある。公的機関への通報事故についても、設備の適用法規ごとに、それぞれの監督官庁が事故事例を個別に開示している。

そこで、石油・石化プラント機器の公的機関への通報事故については少なくとも、損傷事例・事故事例データを横断的に共有化する枠組み（一元管理組織）として、**図 3.1.3-14** に示すような産・学・官連携による中立の情報センターを開設することが考えられる。情報センターは、DBの入力・管理・保守組織と事例データの分析・評価・情報配信組織で構成される。

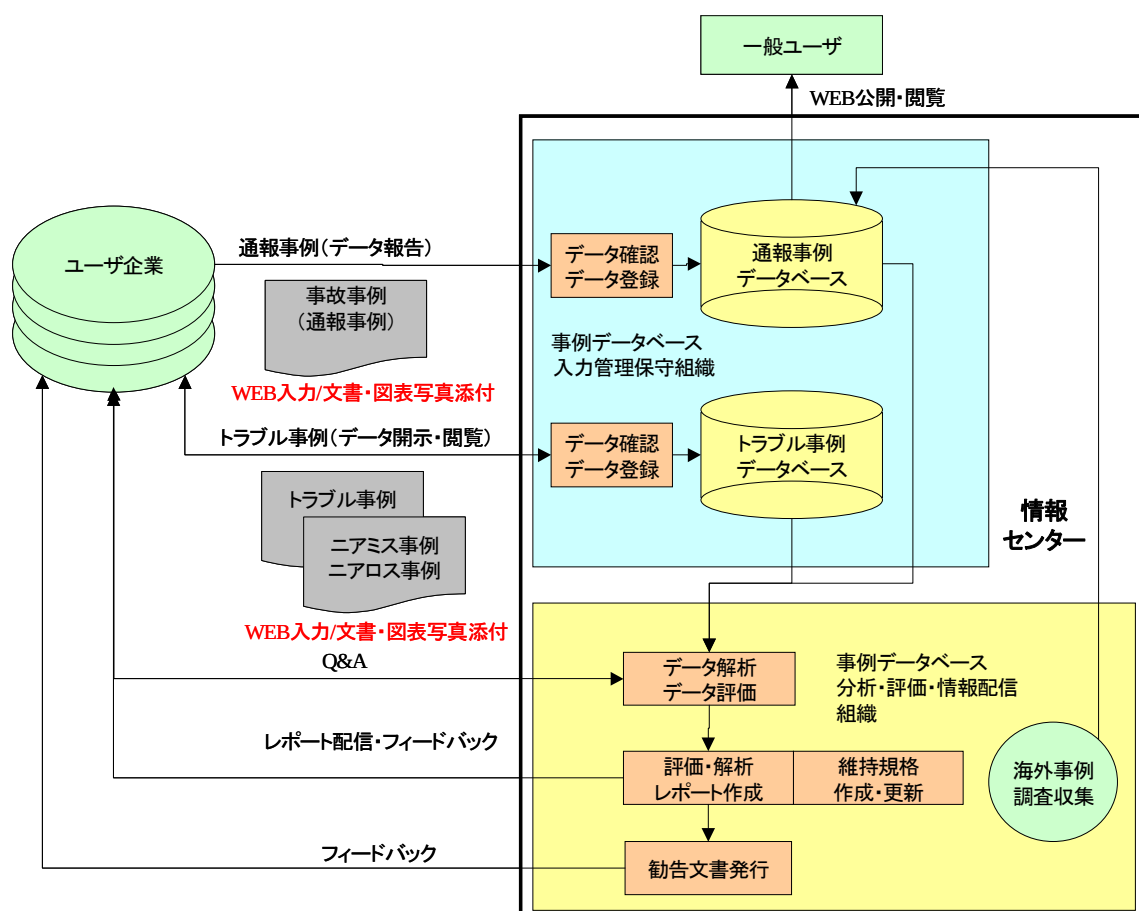


図 3.1.3-14 情報センターのデータの活用方法・運用体制案

(a) 入力・管理・保守組織

DB の入力・管理・保守組織は、ユーザ企業および一般ユーザが DB を随時閲覧可能な環境を与える。そのためには、以下に示す情報配信組織と連携して、ユーザ企業からの質問・相談への回答および定期的な事例データの評価・解析レポートのユーザ企業への配信機能を持つことが必要と考える。また、ユーザ企業の拡大と情報の開示を目的に、広く社会に対して事例データの要約や統計数値を公表することも必要と考える。

(b) 分析・評価・情報配信組織

一方、事例データの分析・評価・情報配信組織は、運転・保全・安全・設計（材料・損傷）に関する有識者（中立な立場の産学の有識者）で構成され、ユーザ企業が発信した事例データの質を確保するために、開示されたデータの信頼性をチェックする確認機能を持たせる。そして、データ分析・評価業務および分析・評価レポート作成業務、および海外事故事例の収集を行う。また、事故防止の観点から、フィードバックプロセスを取り込んだ形とするため、装置・機器の運転・保全・設計に関する基準・規格の作成・改訂、勧告文書などの作成についても対応できるようにする。

(3) 電力プラント機器の情報共有化の条件と枠組み

一方、電力プラント機器に関しては、原子力プラントについては、独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）および有限責任中間法人日本原子力技術協会（JANTI）等により損傷事例・事故事例データを横断的に共有化されている。一方で、火力プラントにおいては電力事業者間の競争原理が主導的に働くために故障情報の共有化はほとんど行われていない。しかしながら、火力発電プラントが過酷な条件で運用されるようになってきている中で、今後の運転保守において重要な課題であるとともに装置設計上課題となっている主要な劣化要因については、電力事業者と製造者の両者において共通的に取り組むことで課題を解決可能である。このための枠組みとして、調査検討委員会における議論といくつかの事業者に対する意見聴取を行った結果、電力事業者における運転・保守ノウハウ、製造者における設計・製造ノウハウのそれぞれの秘匿性を確保しつつ課題を解決するための方策として、それらのデータの交換によって共有するのではなく、製造者において信頼性のあるプラントを設計するための主要な劣化事象を模擬する標準的試験評価方法と予測計算手法の開発を図り、実際の運用から得られる劣化データとの対照により評価予測手法の有効性を関連各事業者に示しつつ、その信頼性をさらに改善していくという道筋が見出された。この実現のためには、電力事業者と、製造者および保守事業者が協調して取り組むための体制とそれに対する国としての長期的な支援が重要と考えられる。

3) 情報活用技術の今後の課題および展開

(1) 情報活用プロセスの課題と提言

① プロセス支援型知識伝承支援

本調査研究では、プロセス支援型ナレッジマネジメントを採用し、情報活用プロセス

の思考支援・知識伝承におけるその有効性を確認した。今後、情報活用システムの構築においては、これまでの単なるキーワードや全文検索による検索型のシステムではなく、人間の思考過程を支援するプロセス支援型ナレッジマネジメントの採用が適切であると考ええる。

② 論理構造の解明

さまざまな事故情報、保全情報を大量に整理・体系化しても、他のプラントや他企業において有効に活用できるとは限らない。やはり、現象面の徹底的な分析だけではなく、その事象をもたらした根源的理由とメカニズムなどの論理構造の解明が重要である。

③ 保全・設計情報の融合

これまで業務革新のためのシステム化は、自らの部署や管轄範囲でなされることが多かったが、本調査研究で試行した情報システムとデータという形での保全と設計の結びつけは、両者の密度の濃い情報の融合を図るものとして期待できる。

(2) 情報共有化の課題と提言

① 開放型 Web と中央管理型の協調による情報共有

今や各個人がインターネットにて自由に情報収集と発信できる環境が整ってきており、こうした開放型情報共有の特性を大いに活用すべきであろう。情報センターは、中央集権的ではなく、ごくゆるい最低限のルールだけを制定して、ネットによるユーザ参画型、自己増殖型を目指す。それと同時に部分的に有識者による評価結果も公表され、両者の情報が明確に区分して入手でき、ユーザは自己責任において利用する環境が望ましい。

② 関連業界の協調が成功の要

メンテナンス情報に関わる研究会、委員会は、それぞれに目的とアプローチが異なるとはいえ、共通部分も少なくない。お互いに情報交換を密にし、個々のプロジェクトのねらいと特徴を明確にすると同時に、共通に利用できるものは利用して行くような協調体制を保持することが重要である。規格化・ガイドライン化を視野に入れたこうした研究の成果を業界内に有効に浸透させて行く活動は、設備オーナー系の業界団体が中心になって進められるべきであるが、エンジニアリング業界を含め、法制度的・政策的支援が不可欠であり、官民一体となった連携を期待する。

③ コンプライアンス、CSR、さらに企業価値向上

各企業が自社の事故・トラブルのようなネガティブな情報をオープンにすることは、これまでの社会風土として大きな抵抗が存在する。事故・トラブルの真の原因と対策を提言する中で、その企業の信頼度を高める世論を形成して行くことが、コンプライアンス、CSR（企業社会責任）を果たし、さらに企業価値向上に効果がある、という社会のコンセンサス作りが重要である。

参考文献

- 1) 財団法人 機械システム振興協会：平成 17 年度機械システム等のメンテナンス最適化のための高度メンテナンス技術開発に関するフィージビリティスタディ報告書, 平成 18 年 3 月
- 2) <http://www.sparj.com>, 資料 B-2
- 3) 高圧ガス保安協会：川崎・横浜コンビナート保安調査報告書, 昭和 58 年 9 月
- 4) 浅見芳男：「生産現場がやさしく分かる本」, 高圧ガス保安協会, 1998 年初版
- 5) 財団法人 機械システム振興協会：高度設備管理技術支援の基盤構築に関する調査研究報告書, 平成 14 年 3 月
- 6) 社団法人 石油学会：石油学会規格, 配管維持規格 JPI-8S-1-2004, 平成 16 年改訂
- 7) 独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)：「失敗知識データベース」
<http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>
- 8) 高田祥三：ライフサイクル・メンテナンス, JIPM ソリューション, 2006 年
- 9) 黒瀬邦夫：富士通の知的「現場」改革, ダイヤモンド社, 2005 年
- 10) ISO：DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 14224, 2004
- 11) Det Norske Veritas：Offshore Reliability Data 4th Edition, 2002
- 12) 財団法人 石油産業活性化センター：ヒヤリハット・事故情報処理システム, ヒヤリハット・事故情報 DB の設計報告書, 平成 18 年 3 月 (PEC-2005TS-02)
- 13) 高圧ガス保安協会：KHK 保安全管理 DB (サンプル版), 平成 17 年 11 月

3.1.4 フロントローディング設計の統合環境に関する開発動向調査

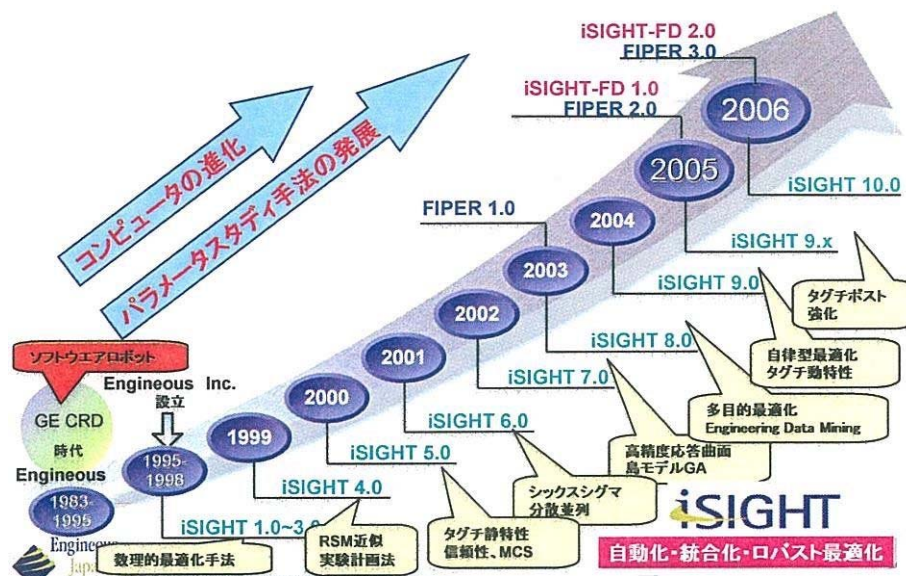
1) 設計統合環境の動向

ここでは、国内外で開発されている設計統合環境のうち主要なものをいくつか紹介する。

(1) iSIGHT-FD

iSIGHT-FD は、自動車、航空宇宙、電機・電子、機械など製造業向けのエンジニアリングプロセス自動化・統合化・最適化機能を持ったソフトウェア・ロボットであり、日本ではエンジニアス・ジャパン株式会社^{注1}によって販売されている。

ベースとなった iSIGHT は、設計・解析などのエンジニアリングプロセスを統合し、アプリケーション間の連携や、入出力ファイルの読み書き、プログラム実行作業等を自動化するシステムであった。iSIGHT-FD は iSIGHT シリーズの最新バージョンであり、米国の国家プロジェクトとして開発された FIPER^{注2} のアーキテクチャを採用しているのが特徴である。スタンドアロンでエンジニアにデスクトップ環境を提供するだけでなく、エンタープライズ規模の協調設計システムに拡張することが可能である。



出典：エンジニアス・ジャパン株式会社作成資料

図 3.1.4-1 iSIGHT と FIPER の変遷

¹ 米国 Engineous Software 社の日本法人である。米ゼネラル・エレクトリック（GE）社の中央研究所においてソフトウェア・ロボットのシステムである「Engineous」の開発を担当した Engineous プロジェクトを母体とする。1994 年 GE 社より Engineous プロジェクトが分離独立し、1995 年には iSIGHT1.0 の出荷が開始された。

² FIPER は、Federated Intelligent Product EnviRonment の略。米国 NIST（National Institute of Standards and Technology）の先端技術プロジェクトで、Engineous Software 社はこのプロジェクトに中核技術を提供するとともに、商品化に関する全権利を保有している。なお、FIPER 開発コンソーシアムのメンバには GE、Parker Hannifin、Goodrich、Honeywell 等といった各種製造業における主要企業が名前を連ねている。

iSIGHT-FD では、日本語 GUI である Design Gateway により、コンポーネントのアイコンをドラッグ&ドロップやコピー&ペーストして、ワークフローを構築でき、ワークフローの実行と結果は Runtime Gateway に表示される。多目的最適化などの意思決定可視化ツール Engineering Data Mining、近似モデルによる設計評価ツール Visual Design Driver を搭載している。



出典：iSIGHT-FD2.0 パンフレット

図 3.1.4-2 iSIGHT-FD の仕組み



Visual Design Driver

Engineering Data Mining

CorrelationMap

出典：iSIGHT-FD2.0 パンフレット

図 3.1.4-3 iSIGHT-FD の可視化ツール群

(2) MSC SimEnterprise

MSC SimEnterprise は、企業全体でシミュレーション設計データを統一、共有、および自動化することが可能なエンタープライズ・シミュレーション・プラットフォームであり、日本ではエムエスシーソフトウェア株式会社³によって販売されている。

³ 米国 MSC Software 社の日本法人である。MSC Software 社は、コンピュータによるバーチャルな環境で製品の設計支援を行う CAE のパイオニアとして、40 年以上の歴史を持つ。最近では、「VPD (Virtual Product Development: シミュレーションによる製品開発)」の実現をビジョンに掲げ、企業の製品開発プロセスを支援するさまざまなソフトウェアとサービスを提供している。

MSC のエンタープライズソリューション製品群には、解析専任者向けソフトウェア SimXpert、設計者向けソフトウェア SimDesigner、シミュレーションデータマネジメントソフトウェア SimManager が含まれる。また、これらの製品群のソルバーエンジンとして複合領域解析ソルバー MD Nastran がある。以降では、そのうち SimManager を取り上げて、その機能や適用事例を見ていく。



出典： エムエスシーソフトウェア株式会社 Web サイト ¹⁾

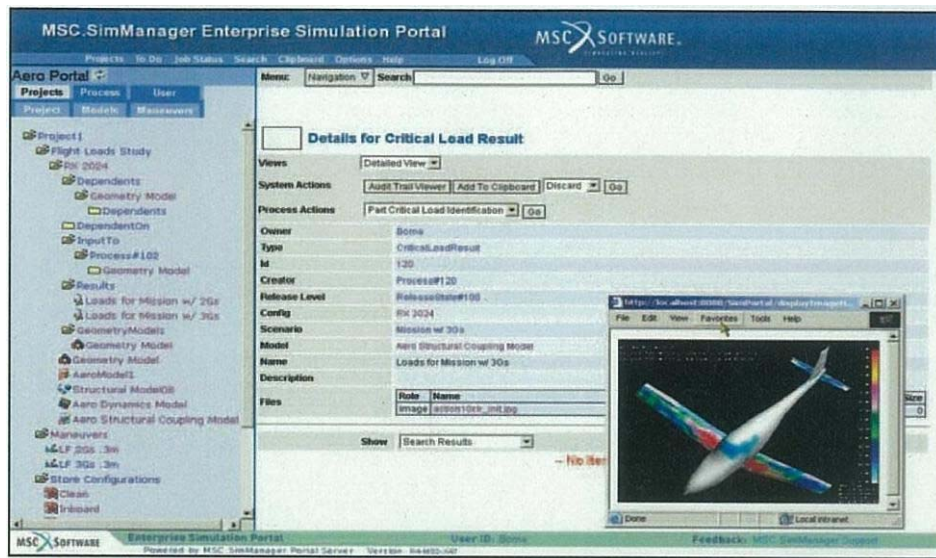
図 3.1.4-4 MSC SimEnterprise における各製品群の位置づけ

SimManager は、シミュレーション・プロセスの管理と自動化、シミュレーション・データや履歴のコントロールとアクセスを提供する Web ベースの環境であり、次のような特長を持っている。

- ・ 全てのデータとモデルの一貫した管理によって、シミュレーション・プロセスの反復可能性が向上
- ・ VPD 環境で、Bill of Analysis（解析手法）と Bills of Design（設計手法）構築のためのインフラを提供し、コラボレーションが実現可能
- ・ プロセスを自動化し、手作業を減らすことで生産性が向上
- ・ 単一プロセスで複数の解析領域を統合することで、トレードオフスタディが実施可能

また、SimManager には次にあげる機能が搭載されている。

- ・ 衝突および安全性シミュレーション
- ・ NVH（Noise, Vibration, and Harshness）シミュレーション
- ・ 製造プロセス・シミュレーション
- ・ SimManager Report Generator は、SimManager のあらゆるシミュレーション・ポータルで利用が可能

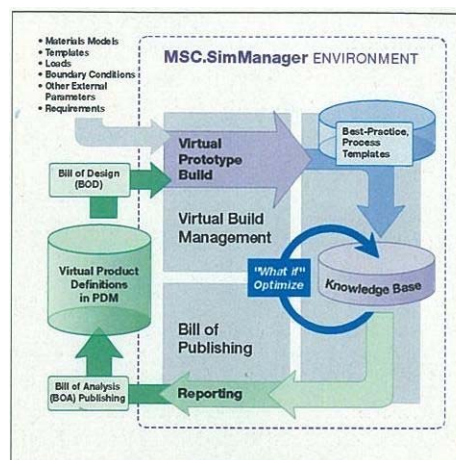


出典：SimManager Data Sheet²⁾

図 3.1.4-5 SimManager による航空機の構造解析画面例

さらに、最新バージョンである SimManager 2005 r2 では、主に次のような機能強化が行われている。

- ・従来の Web ベースによるインターフェースに加え、新たに統合された Client/API 経由による SimManager へのアクセスも可能となった
- ・外部アプリケーションを SimManager から起動するための Javascript ベースのフレームワークである Action Runner を実行するためのインフラが大幅に強化された
- ・ネットワーク上で複数のボールド（vault）をサポートし、より効率的なデータ保管と転送が可能となった

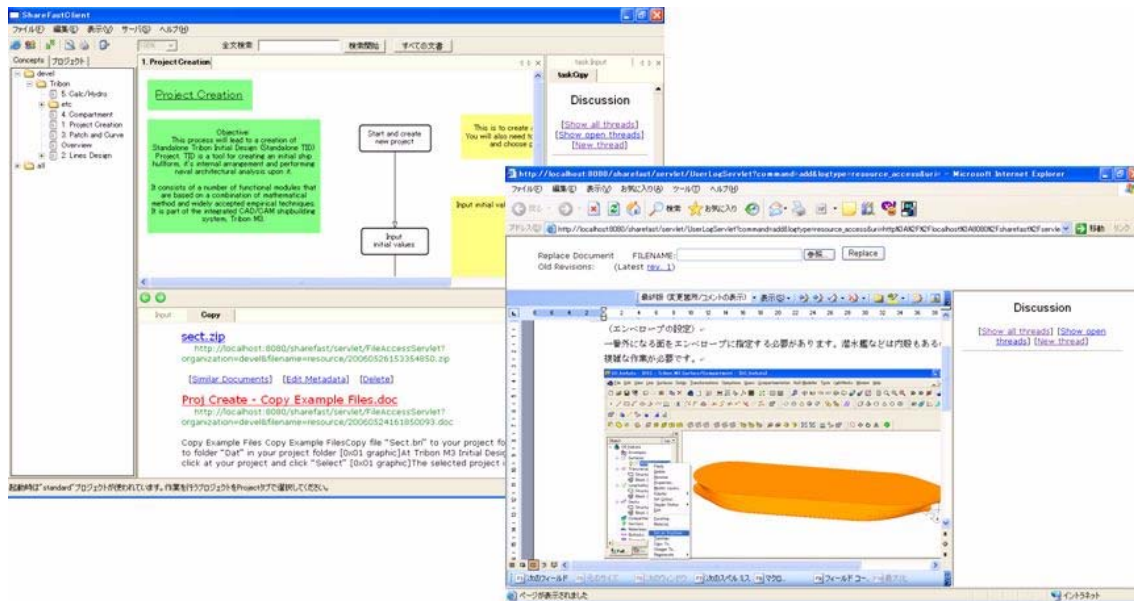


出典：SimManager Data Sheet²⁾

図 3.1.4-6 SimManager により実現される VPD プロセスの情報フロー

(3) ShareFast

ShareFast は、製造業における設計作業のように業務プロセスの定型化が難しく、かつ多種のデータ・文書を大量に扱う業務を支援する文書管理システムである。元々は、造船設計のナレッジマネジメントの研究から生まれたものだが、IPA（独立行政法人情報処理推進機構）の 2005 年度下期「未踏ソフトウェア創造事業」において「業務プロセスに基づく文書管理システム ShareFast の開発」として採択を受け、さらなる品質向上・機能強化が行われた。その成果物はオープンソースとして公開されている³⁾。



出典：ShareFast Project Web サイト³⁾

図 3.1.4-7 ShareFast のクライアント画面例

ShareFast では、プロセスをワークフローの形に記述し、文書をワークフローに関連付けて管理する。これを、ファイルやデータに RDF 形式のメタデータを付加して管理するクライアント/サーバ型の Web アプリケーションとして実現させている。メタデータの管理には Jena フレームワークを用い、組織内におけるセマンティック Web として構築する。サーバは文書ファイル等のデータの管理を行い、クライアントはワークフローの編集・閲覧、文書の検索・閲覧などの機能を提供する。また、Apache Lucene を使った全文検索、ブログ的なディスカッション機能など、一般的な文書管理システムやグループウェアで必要とされる機能も提供している。

適用事例としては、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社による NC 加工用データの作成ナビゲータ開発、国内製造業某社による船の耐航性評価における加速度評価、株式会社テクノソリューションによるパラリーガル業務支援システム等が報告されており、知識を体系的に整理できる点や操作の容易性といった面で高い評価が得られている⁴⁾。

2) 設計統合への要求

本調査研究では、タービン設計の中でも最終翼段の設計における手順と劣化現象に対する対応ということを中心に整理してきた。一方、実機に対応した試験機の構想や実機に対応した CAE のあり方について本調査研究の中で議論したが、設計の現場でこれらの仕組みが有効に機能していくためには、設計環境として位置付けを明らかにしておく必要がある。

対象としてタービンの最終翼の設計について、その検討手順を整理してきた。ヒアリングを通して設計の流れを整理したが、タービンの最終翼の設計タイミングは、新規の最終翼のシリーズを投入する場面で行われている。この新規の設計開発は、一般消費財のような短いサイクルで開発されるものではないことから、過去の設計手順や設計方法が異なる（改善する）ことになる。

設計に対する要求として、その設計期間をいかに短くしてタイムリーに市場に投入することが求められる。この点からすれば、設計の試行錯誤は出来るだけ CAE に依存する方が設計期間の短縮に効果がある。一方、複雑な設計性能等を評価する際には、CAE のモデル化の範囲を逸脱することもあり、実験等による実環境に近い評価が求められる。設計の現場では、CAE を用いて検討する現象と実験を通して性能を評価しなくてはならない現象とをその時に使用可能で精度的に信用に足る方法を選んで設計のフローを改善することになる。

さらに、CAE と実験の設計時に活用するための特性としては、以下のような長所と短所が整理される。

表 3.1.4-1 CAE と実験の設計時における効果

CAE/実験	長所	短所
CAE	①結果を入手するまでの時間が短くてすむ。 ②比較的簡単に複数の条件に対する評価が可能である。	①モデル化できていない現象の影響は評価できない。 ②精度は理論モデルに依存する。
実機・実験	①モックアップ等により実機に近い現象の把握が可能である。 ②試験の設定ケースにはコスト面、時間面で制約がある。	①試験準備および試験期間等から結果の入手に時間がかかる。 ②精度は設定・稼働している環境条件に依存する。

主として CAE が活用可能な現象としては、「応力評価」や「流れ場の評価」がある。これらは、かつての「ホログラフィックテスト」や「翼列試験」等の実験・試験によってデータを入手していたが、最近では FEM と CFD にとって代わられた。また、これらを CAE に置き換えることにより、設計期間の短縮に効果を上げている。

一方、新規材料を採用する場合や長時間かけて生じる現象等については、CAE で対応することが難しく、実験や定期点検時に得られるデータを活用することになる。設計サイクルをどのような形で整理するかという定義もありえるが、設計をある最終翼シリーズの開

発から次期（改良）の最終翼シリーズの開発までの広義に解釈し、実際に図面等に起こすのに必要である設計期間を狭義の設計期間という形で整理する。

設計時の経済性等を勘案すると狭義の設計期間をできるだけ短縮することは意義があり、その部分は高度な CAE に対応することが設計全体の効率面でも優位性が高い。また、CAE を用いて設計が終了したとしても設計確認時には、かならず、スケールモデルレベルでは実機に近い環境での試験が行なわれることが通常である。この試験の意味は2通り考えることができ、本来の目的である設計性能の確認試験という意味と次期（改良）設計における実機レベルでのデータ収集という側面がある。

最終翼シリーズが開発され、実機に適用されている期間は、実機の定期点検等でのデータ収集が次期（改良）の設計に貴重なデータとなる。これらのデータはデータベースに整備されることで、タービン設計の貴重なノウハウとすることができる。

さらに、次期（改良）設計開発の計画が決定された場合には、スケールや材料等の新しい検討要素が加わることが想定されるので、試験等によって現象や性能を確認する必要がある。先に整理したように試験はその準備や試験期間に時間を必要とするものであるが、その期間が短縮でき、さらに評価性能等の信頼性が高いデータが得られることは、狭義の設計期間に先行する期間として、設計の経済性にも十分に寄与することになる。

設計に必要となる時間スケールについてのイメージを下図に示す。

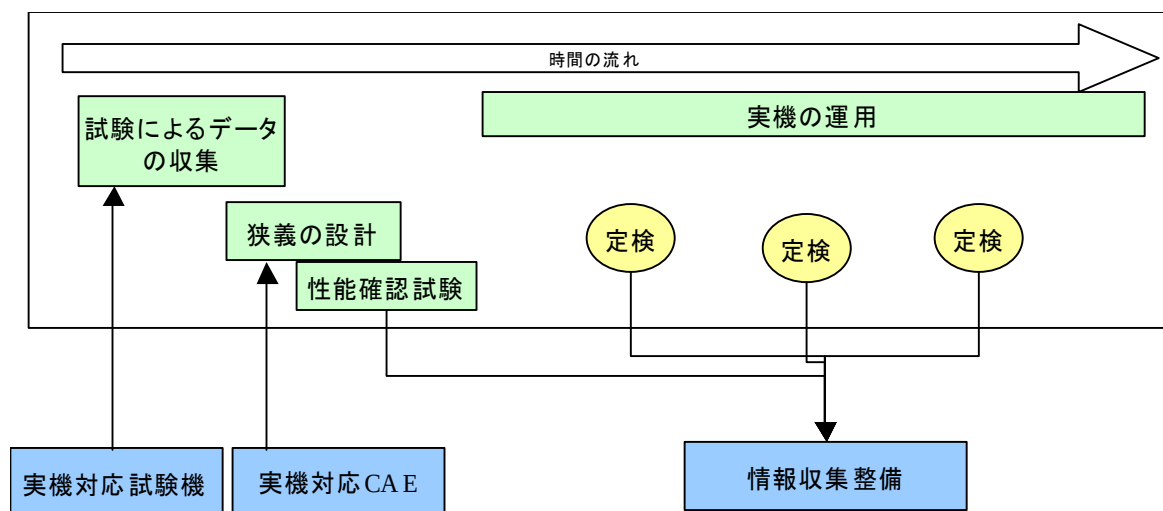


図 3.1.4-8 設計サイクルの時間イメージ

設計の統合的な環境を構築する枠組みとして、それぞれの CAE、試験、情報収集の役割とその連携を整理した設計全体の環境構築が設計の効率化と有機的な仕組みになると考える。そのような形で、設計サイクルの全体像を次期（改良）設計へ繋がる設計の流れとして以下のようなフローで整理した。

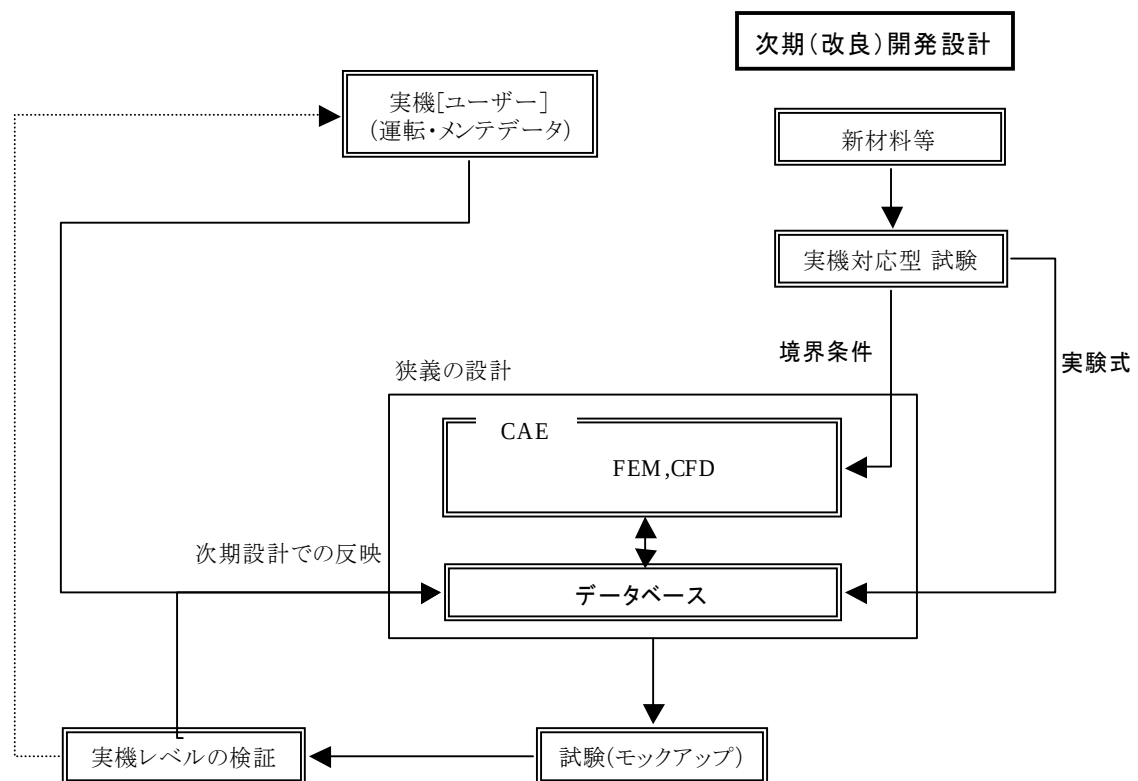


図 3.1.4-9 次期設計への反映

参考文献

- 1) エムエスシーソフトウェア株式会社 Web サイト, <http://www.mscsoftware.co.jp/enterprise/>
- 2) SimManager Data Sheet, <http://www.mscsoftware.com/assets/SDM2005AUGZZZLTDAT.pdf>
- 3) ShareFast Project Web サイト, http://sharefast.sourceforge.net/index_j.html
- 4) IPA (独立行政法人情報処理推進機構) : 2005 年度事業成果報告集
<http://www.ipa.go.jp/about/jigyoseika/05fy-pro/main.html>

3.2 擦り合わせ型製造業における日本型ものづくりや設計高度化のための設計支援環境に関する調査研究

3.2.1 調査の背景

我が国製造業の重要な競争力分野は、擦り合わせ型（インテグラル）アーキテクチャーの製品（例えば、自動車、工作機械、ロボットなど）であるとされるが、その分野では、統合型設計・統合型組織能力【統合型ものづくり】がその競争力の源泉となっている。つまり、擦り合わせ型アーキテクチャーでは、製品や工程を構成する要素間の相互依存性が高く、企業組織内の統合（調整）活動の能力として、より緊密な相互連携や濃密なコミュニケーションや部門間の相互調整のメカニズムに高い能力が要求される。

一方、現代のものづくりは、ITを抜いては語ることができない。携帯電話に代表されるように、多くの製品がソフトウェアを内蔵しており、その開発費はハード部分の開発費をはるかに凌ぐ状況となっている。また、製品開発や製造・販売の業務においてもさまざまなITシステムが必須のものとなっている。特に、設計や製造準備においては、CAD/CAM/CAEなどの、いわゆるデジタルエンジニアリングが90年代後半より急速に普及し、生産性増大の推進力となっている。

しかし、その一方でデジタルエンジニアリングシステムは欧米製が席卷しており、そのようなシステムは、欧米型の設計開発組織・プロセスに最適化されており、日本固有の統合型ものづくりには不向きであるという問題意識が多くの現場から指摘され、それが我が国の製造業の競争力にとって障害となることを懸念する声が大きくなっている。その他にも、高騰するシステム費用やカスタマイズ費用の問題、ユーザの要求によるシステムの改良が進まない問題などもあり、「欧米製ではなく、国産のデジタルエンジニアリングが必要」という声があった。本調査研究で明らかになってきたことは、この議論はわかりやすい反面、少々短絡的に過ぎるということである。それは、多くの企業が（力づくで）欧米製システムを使いこなし、日本流の統合的組織能力と（無理やりに）マッチさせて生産性を上げてきているのは、否定できない事実だからである。

その一方で現状のデジタルエンジニアリングに満足していないこともやはり事実である。ただ、それは現在の欧米製システムを日本製に置き換えても解決されないであろう。なぜなら、この不満の本質が、「欧米製システムが日本の製品開発プロセスに適合しない」ということによるのではなく、（不適合を力づくで解消し、不満ながらも欧米製システムを使いこなしている企業にとっては）「欧米製であれ、日本製であれ、現在のデジタルエンジニアリングで支援できる作業や業務の範囲が圧倒的に不足している」という問題のほうにむしろ大きいからである。例えば、「CADは別に何でもいい」という声がそれを象徴している。

ものづくりは日々進化をしている。顧客の要求や社会環境も大きく変動している。デジタルエンジニアリングが導入されて、設計開発問題の一部が解決されても、常に新しい問題が起き、また、品質・期間・コストにおいてさらに高いレベルを目指すことが要求される。このような中で、進化する企業ほど、デジタルエンジニアリングが支援できる部分は相対的に縮小する。その意味では、問題はデジタルエンジニアリングの「不適合」ではなく、「不足」にある。カラダに合わない服でも窮屈を我慢すれば着ることができるが、そもそも着る服が無く、熾烈な競争の嵐の中なのに裸なのが問題なのだ。

本調査研究では、熾烈な競争を勝ち抜き、より競争力の高い製品の開発を行うための革新的な設計技術の実現こそが真の課題であることを示す。特に、日本優位のものづくり戦略を維持するために設計に過度な負荷集中が起きていることを示し、そのために我が国のものづくりの根幹を脅かすような深刻な設計品質問題を引き起こしていることを指摘する。次に、今、製造業が必要としている、設計品質問題を解決するための設計技術と、そのためのデジタルエンジニアリングシステムについて述べる。これは現在使われている CAD/CAM/CAE とは異なる問題解決に対応するものであり、また、現在のシステムを機能拡張してカバーできるようなものではない。そして、今後の課題と研究の展開について述べる。

1) 日本優位のものづくり戦略を支える設計の特徴とその問題点

図 3.2-1 に、ものづくりにおける設計の種類と位置付けを示す。本調査研究で対象としているものづくりプロセスは、商品企画以降の、設計（構想設計）、製品開発（詳細設計）、製造準備、そして生産工程を含むものである。日本の製造業は、製造準備や生産工程においては非常に高い工程能力を持ってきた。また、製品開発では伝統的に統合型組織能力が培われ、最近ではデジタルエンジニアリングを駆使したフロントローディングによって更なる開発力を有するようになった。本調査研究では、このものづくりのさらに上流に位置する設計が危機的な状況にあり、それが製造業の競争力にとって大きな問題となっていることを示す。また、現状の設計支援技術であるデジタルエンジニアリングシステムは、設計が抱える問題を解決することができないという、危機的な状況にある。

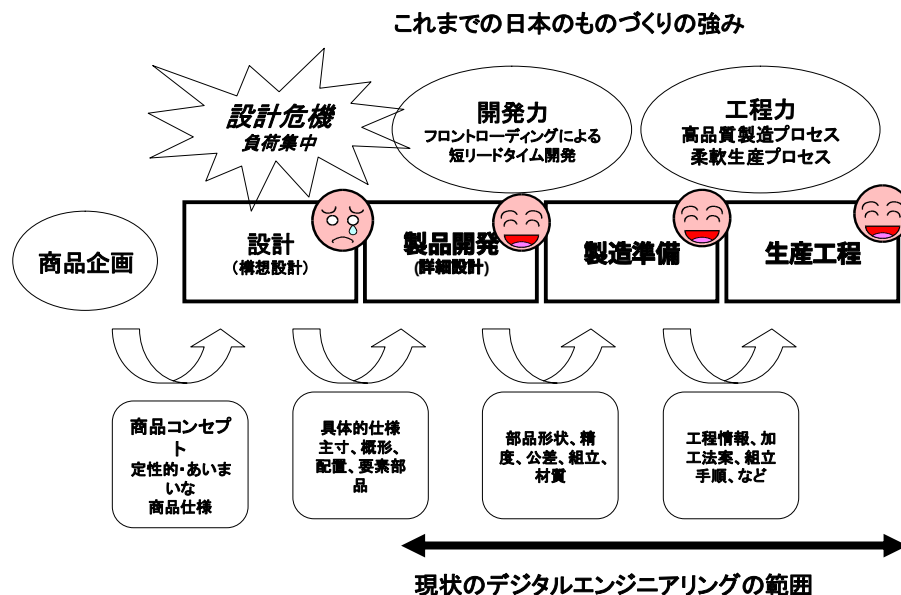


図 3.2-1 ものづくりにおける設計の種類とその位置づけ

2) 我が国と欧米との設計負荷の比較

では、欧米でも同様の状況であろうか。実は、欧米と日本では状況は異なっているようである。図 3.2-2 に、我が国と欧米との設計の現状の比較を示す。例えば欧米の自動車メーカーでは、製品の付加価値をブランドに求める商品戦略を立てているところが多く、設計では、設計期間よりも、ブランドを維持するための品質の作りこみを重視する傾向にあるようだ¹⁾。(もちろん、欧米の自動車メーカーが日本のメーカーのような短期開発はやりたくても出来ないのも事実である。)逆に言うと、日本は、ブランド力の不足を埋めるために、上記のような商品戦略をとっており、そのために設計負荷が増大していると考えられる。つまり、高い設計負荷を前提とする商品戦略といってよいだろう。

一方、設計者の能力や、使用している設計ツールなどの技術力、あるいは開発力は、ほぼ同等と考えてよいだろう。そうすると、日本の商品戦略を支えるための設計負荷に耐えるためには、設計支援技術を高度化するしか道がないと言える。言い換えると、日本の製造業の商品戦略を維持するためには、強力な設計技術が必要であり、欧米と同様の設計技術では、これを維持することができない。もちろん、優秀な人材が必須であることは、言うまでもない。

3) 設計品質問題

設計負荷の激増による最も深刻な問題は、設計品質問題である。図 3.2-2 に示すとおり、設計品質問題には、不具合問題と商品力問題の 2 種類がある。

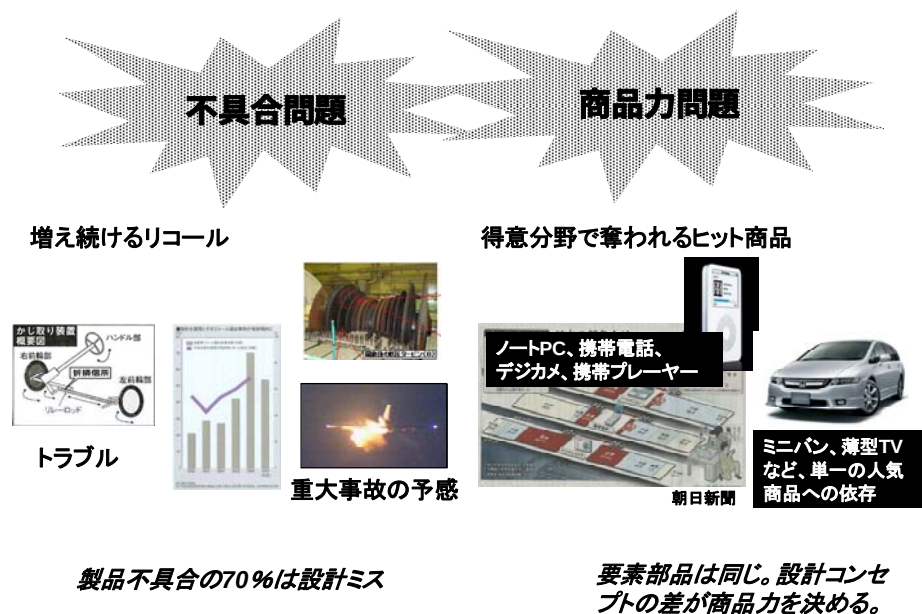


図 3.2-2 設計品質問題

最近、自動車や家電品、原発、航空機など、さまざまな機械のトラブルが報告されている。死亡事故も引き起こしており、将来、さらなる大事故の発生が懸念されている。自動車のリコールの70%が設計ミスによるという報告があるが、一般にも、このようなトラブルが設計の不具合によることは想像に難くない。日本の製品は、何をおいても、その品質

の高さで世界市場に知られているわけで、それを維持することは、製造業の生命線と言えるだろう。

もう一つの設計品質問題は、商品力の低下である。例えば、これまで日本製品が独占してきた、ノート PC、携帯電話、デジカメ、携帯プレーヤーなどにおいて、最近日本の製品のシェアが大きく後退してきている。また自動車も一見絶好調のように見えるが、実はミニバンや小型車など単一の人気商品にすがっている状態で、新しいヒット商品を送り出すことができないでいる。

4) 設計品質問題を打破する設計支援技術

以上のような認識に基づき、本調査研究では、図 3.2-3 に示すような、設計品質問題を打破する革新的な設計支援技術を提唱する。

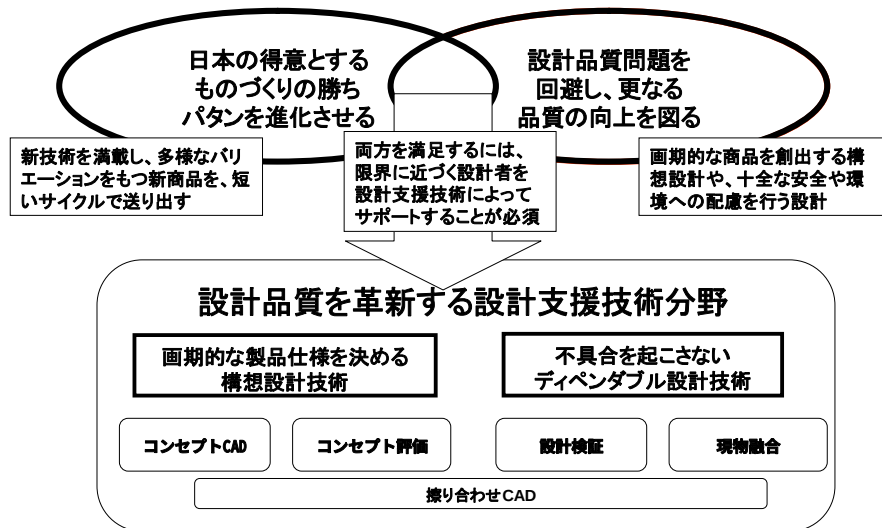


図 3.2-3 設計品質問題を打破する革新的設計支援技術

新技术を満載し、多様なバリエーションをもつ新商品を、短いサイクルで送り出すという日本のものづくりの勝ちパターンを進化させ、かつまた、画期的な商品を創出する構想設計や十分に安全や環境に配慮する設計を行うことによって設計品質問題を回避し、さらなる品質の向上を図るには、負担の限界に近づく設計者を知的かつ効率的に支援する設計支援技術を実現して支援することが不可欠である。

そのためには、設計を革新する支援技術分野の技術開発が必須であり、本調査研究では、その中でも以下の技術開発が重要であるとの結論に達した。

- ① 画期的な製品仕様を決める構想設計技術として、コンセプト CAD 技術とコンセプト評価技術
- ② 不具合を起こさないディペンダブル設計技術として、設計検証技術と現物融合技術（ここでディペンダブルとは、「信頼できる、頼れる」という意味）
- ③ さらに、それらを統合する擦り合わせ CAD 技術

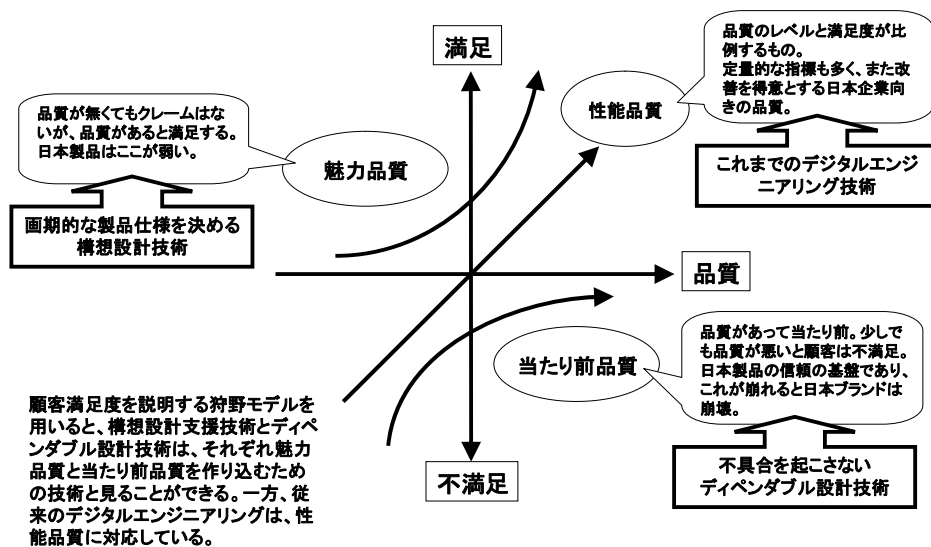


図 3.2-4 狩野モデル

図 3.2-4 は、製品の品質を顧客満足度から説明する狩野モデル^{2,3)}によって、設計品質問題を整理したものである。狩野モデルは、顧客満足を得る品質は 3 つに分類できるとしている。

一つは、性能品質と呼ばれるもので、品質のレベルと満足度が比例するものである。例えば、牛乳パックは、牛乳の品質保証期間が長ければ長いほど顧客の満足度が得られる。自動車などでみると、その基本品質である静粛性、燃費などがこれに当たる。これまでのデジタルエンジニアリングシステムは、ある性能目標が与えられたときに、それを最適に満足する設計解を導出するには適したツールと考えられる。

もう一つは、当たり前品質である。これは、その品質があって当たり前で、少しでも品質が悪いと、顧客は非常に不満になるというものである。牛乳パックでは、牛乳が漏れるような場合である。漏れなくて当たり前なのである。前述の不具合問題は、この品質に相当するもので、日本製品の商品価値の基礎であり、これが崩れると販売に大きな影響が出るだけでなく、それを回復するのは非常に困難となる。ここにディペンダブル設計技術の意義がある。

三つめの設計品質は、魅力品質とか、喜び品質と呼ばれるものである。これは、その品質がなくても顧客は不満になることはないが、もしあれば満足を得られるというものである。牛乳パックでいえば、飲み易いとか、捨てるときに簡単に潰せるとかのようなものである。日本製品は、この部分が弱い、と言われる。これは、前述の構想設計の問題と関連し、顧客が驚き喜ぶような設計ができていないのである。

以下、コンセプト CAD 技術、コンセプト評価技術、設計検証技術の 3 つについては、「標準化支援 IT 技術」の節で、現物融合技術については「現物融合化 IT 技術」の節で、擦り合わせ CAD 技術については「コラボレーション支援 IT 技術」の節で述べる。

3.2.2 標準化支援 IT 技術の調査・検討

1) 構想設計支援技術

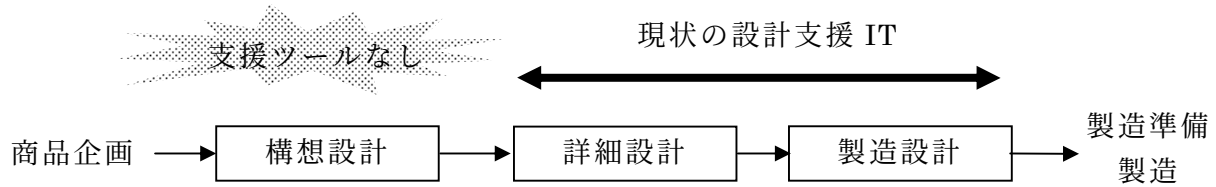


図 3.2-5 構想設計の必要性

構想設計は、図 3.2-5 に示すように、設計過程の上流に位置する業務である。商品企画から指示された製品要求仕様に対して、実現可能で、従来にない良い品質の製品仕様を決定するのが構想設計である。製品仕様としては、主要部品の基本形状・構造、レイアウト・パッケージング、主要寸法、構成部品などが含まれる。構想設計に続いて、この情報を基にして、より細部の構造や属性を決定するのが詳細設計であり、さらに製造準備を考慮して行うのが製造設計である。

現状の設計支援 IT である CAD や CAE などのデジタルエンジニアリングシステムは、主に下流の設計プロセスを支援する。これに対し、上流の構想設計を支援するツールは今のところ存在しない。従来にない良い品質の商品を生み出す環境を整備するため、構想設計を支援するツールの開発が強く望まれる。

構想設計では、創造的なアイデアをめぐらし、基本構造の異なる多数の設計案を検討することが必要である。これは、図 3.2-6 に示すように、設計解の空間を横型に探索することを意味する。これに対して、現状のデジタルエンジニアリングは、ある構造が決定されたときに、その構造の中で各種の設計パラメータを最適化することが得意（縦型の探索）であり、構想設計に必要な横型の探索には全く向かないのである。設計の初期の段階で十分な横型探索を行うことは、設計トータルとしても、最適解を効率よく得られるのであるが、後述のように、成果物の見えにくい構想設計はむしろ縮小され、十分な検討無しに定められた構想に基づいて、詳細設計（より具体的に言えば、3 次元 CAD を使ったモデリング）が行われており、それがフロントローディングの進展によって、さらに前倒しされる傾向にある。

設計品質の向上には、このような横型の探索をする技術とともに、新しい構想を設計として提案するためのツールが重要となる。特に、新しいコンセプトであればあるほど、それを裏付けるためのデータはないわけで、如何にして、その新しいコンセプトの有効性を証明するか、ということが重要となる。

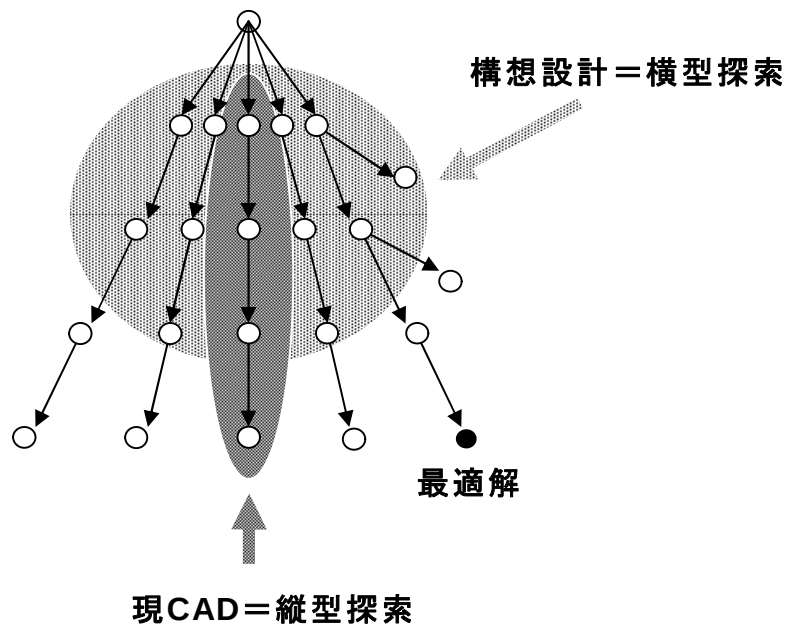


図 3.2-6 設計解空間の縦型検索と横型検索



図 3.2-7 コンセプト CAD システム

図 3.2-7 に、コンセプト CAD 技術の一例を示す。一つは、モデル入力技術である。前述のように、設計者がより自由自在に、そのアイデアを表現するためのスケッチを入力したり、スケッチからコンピュータモデルを生成する技術、さらには、構想図・計画図・ポンチ絵・写真・数式などのさまざまなマルチメディアデータを入力し、それから段階的に 3D CAD モデルを構成する技術も有効である。また、意匠設計では、高品質なスタイルデザインのためにはクレイモデルなどの実体モデルが作られるので、これをコンピュータに

取り込みモデル表現とするリバースエンジニアリング技術も重要である。

一方で、繰り返し述べるように、新しいアイデアに対しては、既存の情報はない。しかし、アイデアの評価を行うには、相当量のデータを用意する必要があるので、これをできるだけ効率的に行う技術が必要となる。一つの鍵は、既存情報を流用することである。例えば、自動車の場合には、先行製品に関しては、自動車 1 台すべての情報が揃っているで、それを流用するために編集する技術、さらには詳細なモデルから構造モデルなどを抽象化によって生成する技術が有効である。また、類似検索によって、先行製品データベースから、必要な情報を効率よく検索する技術も必須となろう。

一方、構想設計段階のフロントローディングを行うには、構想の実現可能性を、さまざまな視点から評価する必要がある。図 3.2-8 に、コンセプト評価技術の例を示す。例の一つは、コンセプトモデル評価技術で、例えば、FOA (First Order Analysis)などがその代表例である。FOA は、設計対象をシステム線図や梁構造などの抽象化されたモデルで表現し、それを用いて機能評価を行う技術である。また、DfX (Design for X)と呼ばれる技術は、製品のライフサイクルの各段階での情報を活用して、それらにおける課題を評価するものである。このような各段階でのライフサイクル情報を収集して、データベースに一元化し、構想設計段階で利用することが重要となる。

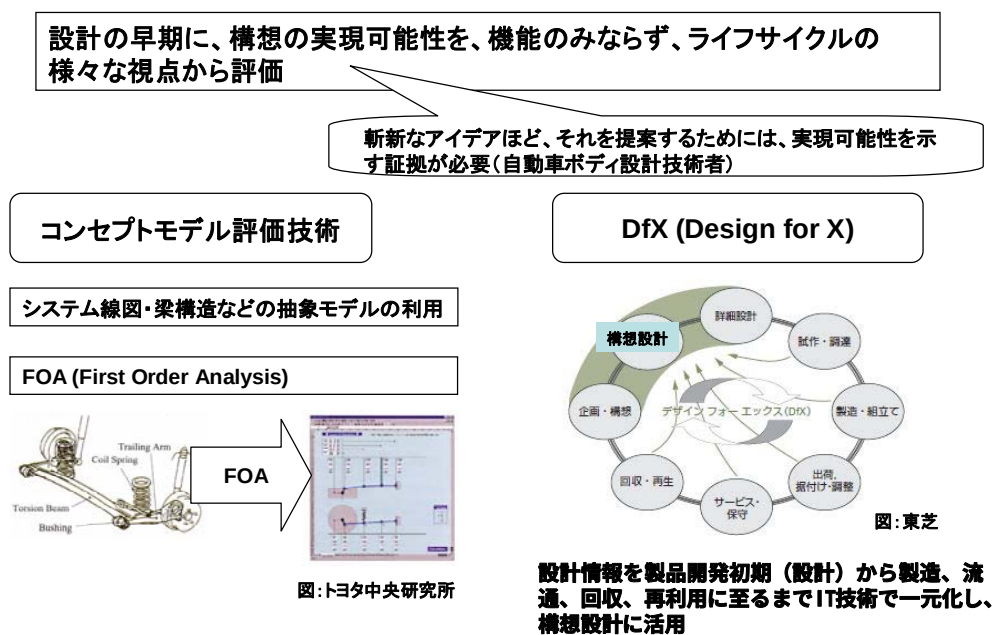


図 3.2-8 コンセプト評価システム

2) 設計検証技術

画期的な製品の開発と並んで重要なのが、設計による不具合の撲滅である。図 3.2-9 に、設計による不具合撲滅のための施策を示す。図の左側に示した人材育成による設計能力の向上が重要であることは言うまでもないが、右側に示すような、設計ミスを駆逐するためのツールとしてのディペンダブル設計技術の充実も重要である。

ディペンダブルという言葉は、「信頼できる」とか「頼れる」という意味で用いている。

端的には、安全・安心な設計を支援・保証する技術を指す。つまり、不具合の起きにくい構造の設計や、設計をチェックしミス防止する技術、さらには、シミュレーションの信頼性向上や、PL対応の技術などが含まれる。

ここでは、設計検証技術について述べる。現物統合技術については、次節で詳述する。

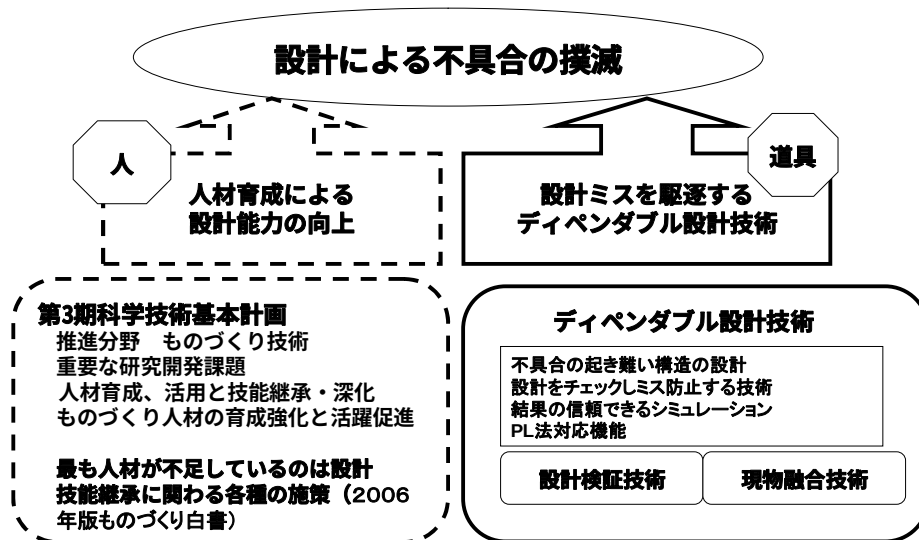


図 3.2-9 設計による不具合撲滅のための施策

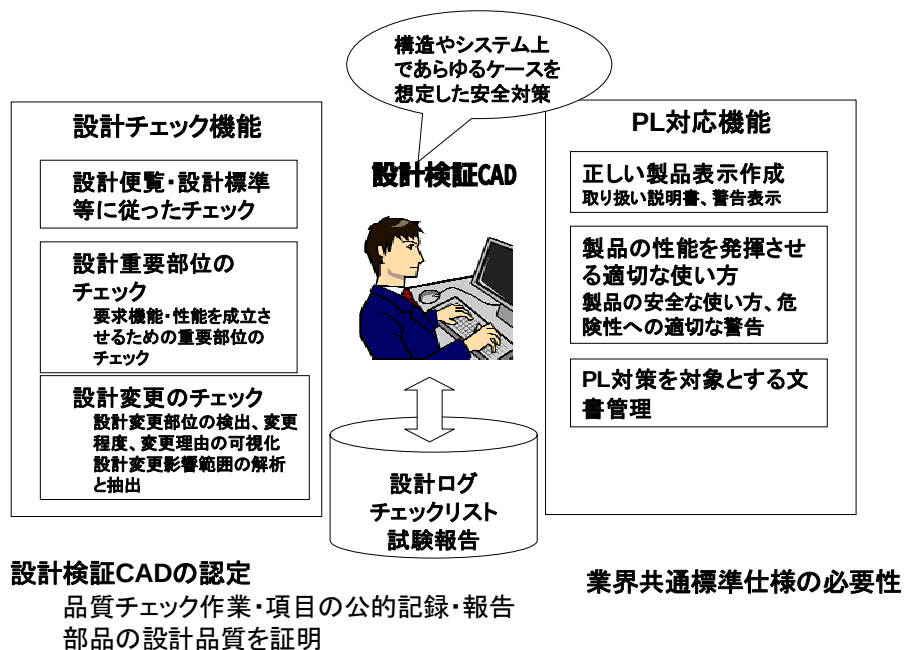


図 3.2-10 設計検証技術

図 3.2-10 に、設計検証技術の例を示す。製品機能が高度化・複雑化する中で、あらゆるケースを想定した安全対策を行うことは設計者の義務であるが、非常に難しい問題でもある。善意の設計者がしかるべき設計検討・評価、検証をきちんと行っていることを証明する仕組みがあれば、設計者の負担の軽減し、過大な責任追及から保護することができる。例えば、設計チェック機能として、設計便覧や設計標準に従ったチェックを促し、実行し、結果を確認させる、という機能や、設計上重要な部位について、要求仕様や性能を満たしていることを、シミュレーションや試験とリンクしてチェックする機能が重要である。

また、設計変更への対応も忘れてはならない機能である。設計ミスが多くが、設計変更に対する波及部分の見落としにあると言われている。一度しっかりと検証した設計案でも、さまざまな要因から変更を迫られる場合がある。その際に、変更部分を検出確認し、その変更の背景にある理由を明示し、さらにその影響範囲と影響度をもらさずに列挙する機能が必要となろう。

また、設計者の一連の設計過程を記録し、特に設計チェック作業や試験作業の記録を残し、それによって公的にも効力のある設計記録を作成、報告、保存することは、万が一に設計不具合があったときの原因解明に有用なだけでなく、設計者を防衛する点でも意味がある。システムに対して何らかの公的な認証を行い、そのシステムからのレポートに効力を与えることも考えられるであろう。

3.2.3 現物融合化 IT 技術の調査・検討

一般的に言えば、設計は製品を製造するために必要な情報を作る作業である。デジタルエンジニアリングという IT が活用されるのも、それが基本となっている。一方、「もの」という視点から見ると、デジタルエンジニアリングという情報の世界で、「もの」は仮想的にモデルとして表現される。このモデル情報が、最終的には工場の工作機械によって材料に転写されて物理的な実体（現物）となる。

しかし製造プロセスという転写過程において、その精度限界やさまざまな要因により、現物はかならず誤差をもち、バラツキをもつ。また、製造工程の制限や要求から、製造工程の段階で初めて形が決まるような場合もある。このような不確定性をもつ現物は、モデルと完全に一致することはない。これは試作実験についても同様であり、モデルを用いたシミュレーションと、試作品を用いた試験結果が一致しないのは、シミュレーションの誤差や理論限界などもあるが、そもそもモデルと試作品が一致していないことが大きな要因となっている。

このような現物のもつバラツキや、誤差・差異を、デジタルエンジニアリングという情報の世界にフィードバックし、例えば、製造バラツキを見込んだ頑健な設計やシミュレーションを行うとか、あるいは、現物情報を用いてシミュレーションをすることによってよりシミュレーションの精度を上げて不具合を検証する、さらには部品偏差をより詳細に解析して製品品質の向上に利用する、などのような技術を現物融合設計技術という。

図 3.2-11 に、現物融合設計技術のイメージを示す。このような技術を実現するためには、現物をデジタル化する必要があるが、近年 3 次元の非接触スキャナーや工業用 X 線 CT 装置などがめざましい進歩を遂げており、これを活用することができる。特に工業用 X 線 CT 装置は、対象の内部構造の計測が可能なことから、注目されている。

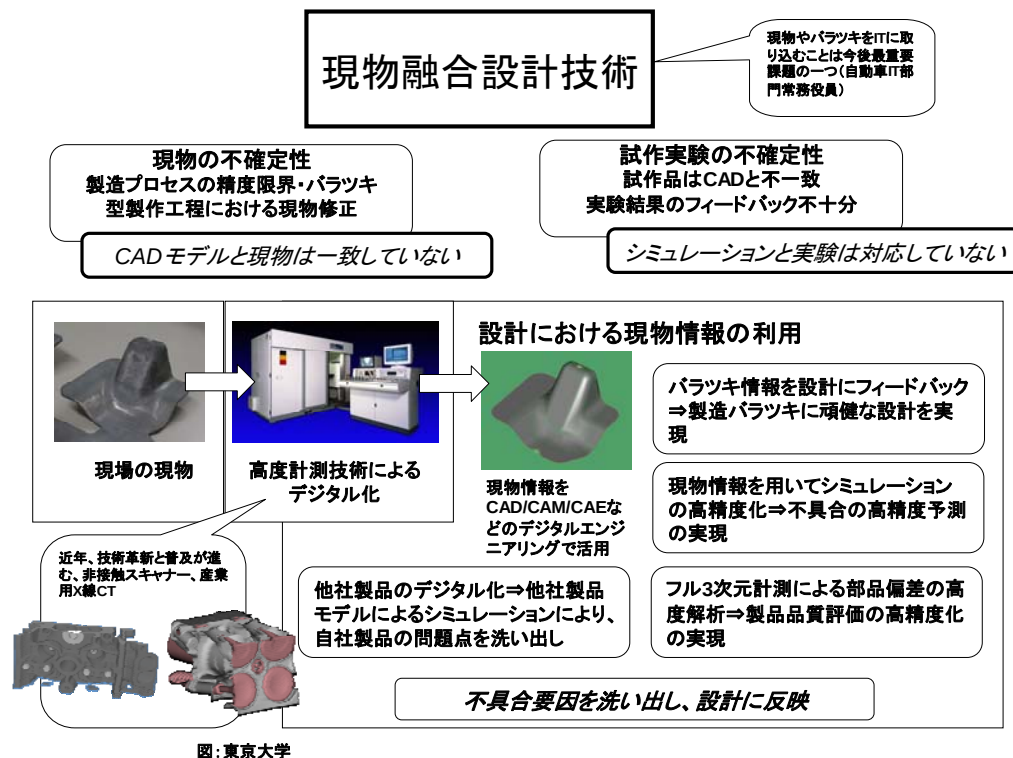


図 3.2-11 現物融合設計技術の必要性和利用イメージ

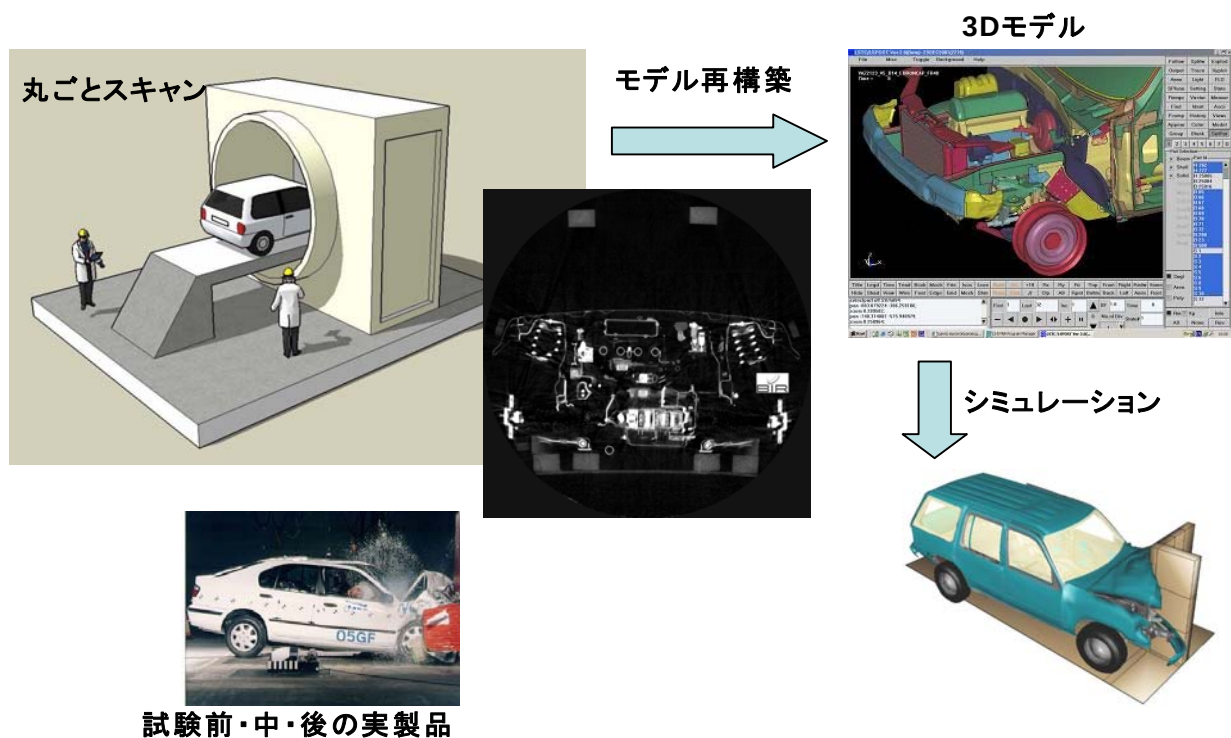


図 3.2-12 自動車丸ごとスキャン技術

図 3.2-12 は、現物融合設計技術の一例で、自動車メーカーが将来の実現を期待している、自動車を丸ごとスキャンしてしまう装置の構想図である。このシステムでは、大型の X 線

CT 装置を用いて自動車をスキャンし、そのスキャンデータから 3 次元モデルを再構築してシミュレーションを行ったり、また、衝突試験後の試作車をスキャンして、それとシミュレーション結果を比較したりするなどが検討される。技術的にも困難な課題が多く、チャレンジングな構想ではあるが、現物融合設計技術を説明する一つの例である。

現物融合設計技術の技術分野は、次の四つに分類して考えられる。

① 現物検証

工程内で現物形状を計測し、形状や寸法を比較検証する。例えば、各工程で型や製品を計測し CAD と比較して問題点を洗い出したり、異なる製造条件による製品の形状比較を行うことによって製造条件を最適化したりする。

② 現物設計

実体の形状を操作して設計し、それをデジタル化する。代表例は、クレイモデルから CAD モデルを生成するリバースエンジニアリングであろう。人間の感性による評価が重要な製品意匠の場合は、モックアップの作成が不可欠であり、モックアップを手修正して製品意匠を評価し修正後のモックアップから CAD モデルを生成する。あるいは、金型の手直しが行われた時に、その CAD モデルを生成する。さらに現物しかないもの（旧製品、他社製品）の CAD モデルの生成もこれに含まれる。

③ 現物 CAE

実験とシミュレーションを同じ形で実施するために、試験対象の現物形状を計測して作成された現物モデルを用いてシミュレーションを行うものである。現物の主な誤差要因としては、例えばスプリングバック、ヒケ・反り、手直し等がある。また CAD データがなく、現物しかないもののシミュレーションにも有効である。例えば、古い製品や、他社製品(ベンチマーキング)などである。

④ 現物計画

現物のデータに基づいて生産や設備の計画を行うものである。例えば、機上で素材材を計測して、その形状データに基づいて NC 加工を行ったり、組立中の車体を計測してロボットの溶接経路を変更したりする。また、最近では建造物などをスキャンできる装置が開発され、それを用いて工場の設備や建屋を計測し、それに合った設備設計を行う As Built モデリングと呼ばれるものもある。

このような技術にとっては、より高精度・高速な計測を可能にするような、技術の高度化は重要であるが、むしろ、計測データをデジタルエンジニアリングのさまざまなアプリケーションに適用していくモデリング技術が重要である。つまり、デジタルエンジニアリングでこのような計測データを活用するには、3 次元画像や点群のままでは CAD/CAM/CAE との相性が悪いので、通常まずメッシュに変換され、さらに CAD モデルへと変換されるが、この過程に多くの労力と時間を要しているのが大きな課題となっている。現状ではこの部分の技術が不足するためにアプリケーション領域が広がらず、高額な計測器に対する投資に見合わないとの判断から普及が遅れているのが実態であろう。モデリング技術の開発により、計測データのデジタルエンジニアリングでの活用が広範囲に広がれば、計測器を含めて急速に普及するものと考えられる。

3.2.4 コラボレーション支援 IT 技術の調査・検討

全体の設計の進捗が**見える**。

写真提供：DIPRO



ボデー線図の作図作業

他の人の作業の様子が**見える**。

設計に苦勞しているところが**見える**。

図 3.2-13 CAD 導入前の設計作業でのコラボレーション

図 3.2-13 は、CAD が導入される前の、自動車のボデー原図と呼ばれる図面を作成している様子である。大きな図面の上に複数の設計者が作業している様子がわかる。CAD が導入されてこのような姿は消えてしまったが、ここに設計作業における擦り合わせや、コラボレーションの本質を見ることができる。このような作業形態では、共同作業者の作業の様子を逐次把握できるので、議論や調整がリアルタイムでできることは自明である。また、必要に応じて助け合うことも簡単である。さらには設計知識の共有や、設計に対する意図の共有も容易で、技術伝承も自然に行われる。管理者にとってみると、設計全体の進捗が「見える化」されており一目瞭然である。また、図面の汚れ具合から、設計者が苦勞しているところなどもわかる。

擦り合わせの実際とはこのようなフェース・ツー・フェースのものであって、コラボレーション機能を標榜する IT が数多く存在するが、これらの情報システムを介してクリティカルな擦り合わせを行うのは難しいのが現状である。

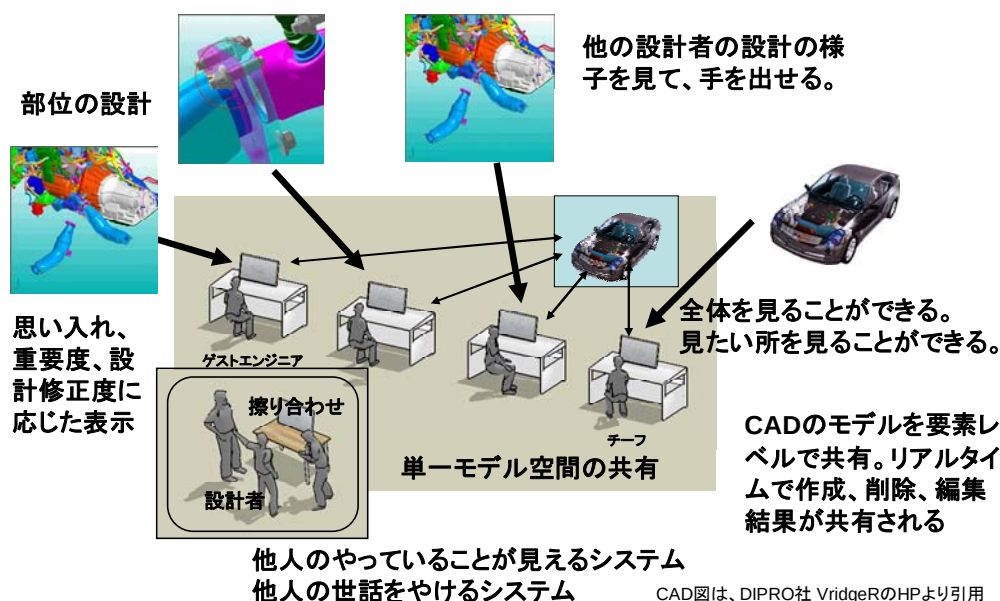


図 3.2-14 擦り合わせ CAD 技術

図 3.2-14 に、擦り合わせ CAD に要求される機能を示す。擦り合わせ CAD は、ボデー原図上で行われていたような擦り合わせを支援するための IT システムである。上記のようにボデー原図は設計情報を共有し、さらには設計者の意図や、思い入れ、重要度、設計根拠なども表現し共有する設計空間であったと考えることができる。そこでこれまでの遠隔地会議システムのようなコラボレーションシステムのようにフェース・ツー・フェースの擦り合わせを排除するのではなく、手描き図面で実現されていた設計空間の IT 化を図る。これによって、例えば N 人のチームが設計を行っているときに、全体を見ることができ、他の設計者に対して手を出して世話をやけるようなシステムを実現する。

3.2.5 今後の課題および展開

日本の製造業は、その世界最高の製造プロセス技術を基盤として、開発スピードの速い開発業務プロセスと需要量変動に柔軟に対応できる生産システムを実現することによって国際競争力を高めてきた。これらを原動力として、短いサイクルで、新技術を満載した、豊富な商品バリエーションを揃える製品を送り出すことがコアコンピタンスとなり、国際市場においても優位な位置を獲得してきた。

しかし、このような我が国が優位とするものづくりの戦略を推進するために、設計に対する過剰な負荷の集中が起きており、それが設計品質問題を起こしている。製品の不具合による重大な事故やリコールが多発し、また携帯やデジカメなど従来我が国の最も得意とする分野での製品シェアが大きく減少するなどの深刻な問題が起きており、国際競争力の大幅な低下につながると危惧される。

リコールの 70% 以上は設計不良であると言われており、また携帯プレーヤーの例に見るように同じ要素部品を用い、ほぼ同じ形をしていても製品の基本的な設計の差がシェアに決定的な差を生じている。つまり、ものづくり技術の上流に位置する設計やその品質が製

造業のコアコンピタンスに関わる根本問題となっている。

このような設計品質を革新し、複雑化・多機能化する最近の製品の設計に対応するには、IT 技術とそれを使いこなす組織力や設計技能の構築が必要不可欠である。ところが、現在の IT 技術や設計システムは、上述のような設計品質問題には対応できない。

そこで、日本の製造業の根幹となる設計品質技術全般に関し、設計・製造アプリケーションのための革新的設計支援技術の研究開発を行い、その成果が、将来にわたり設計現場において活用され、さらに育成されるための拠点や仕組み作りを目指す。

1) 海外の取り組み

海外に目を向けると、国の支援の下、より戦略的に産学連携のプロジェクトが行われている（表 3.2-1）。大きなプロジェクトとしては、ドイツの iViP や米国の FIPER がある。また、最近韓国では PLM コンソーシアムが設立され、産業界主導で PLM 技術の活性化への取り組みが始まっている。韓国では、このほかにも設計技術に関して 10 年の長期研究プロジェクトが、大学に拠点を設ける形でいくつか行われている。ものづくりの重心が東アジアにあり、また、韓国、中国、台湾などの国にはデジタルエンジニアリングに関する研究者の層も厚い。

表 3.2-1 主な海外の設計支援技術開発プロジェクト

名称	国	概要
iViP (Integrated Virtual Product Creation)	ドイツ	統合化仮想製品設計技術に関するプロジェクト 産学 約 50 パートナー 1998 年から 2001 年の 4 年。その後は成果普及活動 予算 1 億独マルク（国と企業が折半）
FIPER (Federated Intelligent Product EnviRonment)	米国	NIST の先端技術プロジェクト 産学 15 パートナー(GE, GM, NASA 他) 1999 年から 2003 年（現在、商用化） 予算 \$21.5 million
PLM コンソーシアム	韓国	PLM 技術の活性化とグローバル技術化（CAD・CAM 学会） 産業界主導(HKMC, サムスン, LG)+学+米国ベンダー 2006 年 11 月設立 分科会(自動車/航空, 電気/電子, 建設/重工業/造船, etc)

特に米国では 3D CAD → CAE → CAO(最適化、統計的な高信頼性設計) → PIDO (Process Integration and Design Optimization)という明確なデジタル設計の進化ビジョンを掲げて、産・官(軍)・学で連携して着実に技術移管を進めている。

2) 提案する要素技術の優先順位

本調査研究においては、(A) 擦り合わせ CAD 技術、(B) コンセプト CAD 技術、(C) コンセプト評価技術、(D) 設計検証技術、(E) 現物融合技術の 5 つの技術要素を提案してきた。これらの技術要素は、それぞれ重要であるが、現実的にはこれらの課題すべてを同時に取り組むことは困難である。このため、技術要素の重要度を品質、実現可能性などの項目で点数化して、優先順序付けを実施した。なお、優先順序付けにおいて、現在の日本のものづくりで問題とされている、狩野モデルにおける喜び品質を特に重視し、次に、当たり前品質を重視するような点数配分とした。

討議の結果を表 3.2-2 に示す。この結果、(C) コンセプト評価技術と (E) 現物融合技術が高い得点となり、本調査研究では、これらの技術研究を優先的に実施するのが妥当であるとの結論に至った。

表 3.2-2 技術要素の優先順位検討

	品質			実現可能性	現時点での 充実度	波及効果	合計点
	喜び	当たり前	性能				
(A)擦り合わせCAD技術			○	○	○		3
(B)コンセプトCAD技術	○				○		5
(C)コンセプト評価技術	◎					○	9
(D)設計検証技術		○				○	3
(E)現物融合技術		◎	○	◎		○	8
重み	×4	×2	×1	×1	×1	×1	
	◎:2点 ○:1点						

3) プロジェクト体制の提案

図 3.2-15 に革新的設計支援技術の研究開発を行うプロジェクト体制を提案する。

前述のように、ユーザ、IT ベンダー、研究機関が連携する必要がある。特に、課題のフィールドを持つユーザの深い関与は不可欠である。また、基礎研究から実用化まで、要求分析⇒研究開発⇒試用評価というサイクルを何度も回して実用化への道を開いていくことが必要であるため、継続性のある体制を作ることが必要である。その一方で、ものづくりの業務も日進月歩であるため、短いサイクルで中間成果物を含めて活用していくことも重要なポイントである。

そのためには、研究開発拠点を作り、そこに課題を抱えるユーザ、大学・研究所、そして IT ベンダーのチームがプロジェクトを実施するという形態が望ましい。拠点化によって、研究開発の目的やフェーズ、成果物の完成度に従ってチーム組織の修正、資金源の変更を行うことが可能となろう。

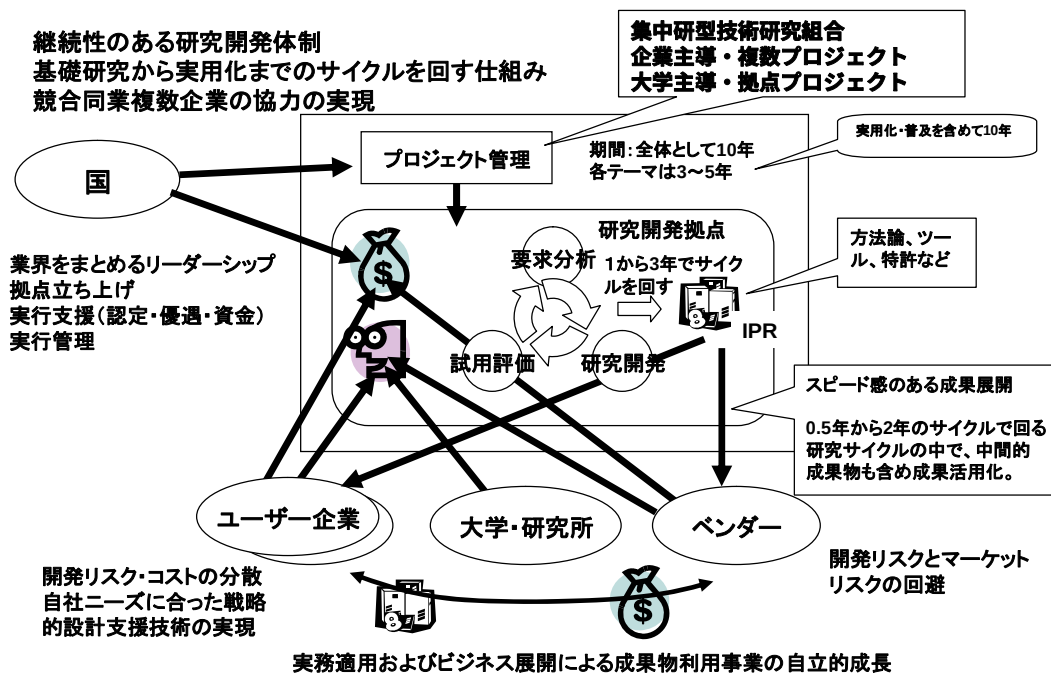


図 3.2-15 設計支援技術開発体制

参考文献

- 1) 藤えりか: 欧州車デザインは日本人, 朝日新聞, 2007 年 1 月 14 日朝刊 (2007).
- 2) 狩野紀昭ほか: 魅力的品質と当たり前品質, 品質, Vol.14, No.2, pp.39-48 (1984).
- 3) S. Ungvari: 狩野モデルの文脈内にある TRIZ: 品質への 3 次元の追加, TRIZ ジャーナル, <http://www.goldfire.jp/IM/journal/1999/1002/index.htm> (2007/02/13 確認) (1999).

4 調査研究の今後の課題および展開

4.1 フロントローディング設計支援技術に関する調査研究

4.1.1 実機対応試験技術の今後の課題と展望

本章においては、実際の機器におけるダイナミックな経時変化・劣化を加速評価可能な予測実験手法は信頼性の高い設計に不可欠であることから、現状の試験評価法とその課題について調査し、新たな実機対応評価試験法について基本的考え方を整理した。

具体的検討対象としては、蒸気タービンを選定した。中でも、火力発電プラントにおける蒸気タービンは、蒸気温度・圧力、回転数、起動・停止の回数や負荷変動の頻度・大きさなどの点から、原子力プラントにおける蒸気タービンよりも過酷な運用を強いられ、機器・部材の経年劣化・損傷が著しいため、検討対象として適切であると考えた。特に、35万kW級の火力発電プラントは比較的成熟した規模のものであり、実機の運転データが豊富で、プラントメーカーおよびプラントユーザが協調して詳細に検討が可能である。さらにそのプラントの中でも、運用形態の変化により課題が特に深刻化しつつある低圧蒸気タービン最終段動翼を主たる具体的検討対象として選定した。

火力発電用タービンにおいては、摩擦、クリープ、腐食、疲労、など多様な現象により劣化が進むが、低圧蒸気タービン設備の損傷状況について過去の損傷事例等を調査した結果、実機対応試験技術の開発が最も強く求められている課題は、

- ① フレッチング
- ② 水滴エロージョン

の二点である、という結論となった。これ以外の現象に関しては、標準試験法が適用可能、あるいは劣化・損傷の実績データ・試験データが豊富であり、実機対応試験技術に対する必要度は相対的に低い。火力発電用のタービンにおいては、水滴による翼の表面のエロージョンや、タービン翼を軸に取り付ける部分のフレッチングによる疲労の問題は、現在のところ信頼性を左右する最も重要な設計上の課題であり、試験法が模索されているところである。

従来、これらは機械システムの動作条件あるいは形状と密接に関連する劣化事象であり、システム設計の秘密性との関係もあり、データは組織内・企業内にとどまっていた。従って、メーカー個別の取り組みでは試験法とデータの組み合わせが十分に扱えないことから極めて狭い範囲にしか適用されていないことも明らかになった。以下、二点のそれぞれについて本調査研究の結果をまとめる。

フレッチング疲労破壊に関しての解明の困難さの一因は、接触構造の数が極めて多く、どの部位がフレッチング疲労の危険度が高いかの判定が難しいことにある。さらにその発生原因が複雑・複合的であるために、構成的に試験法を構成する方法では現象を再現しえないことから満足な評価が行えていない劣化事象であることが再確認された。

調査事例から明らかになったフレッチングの原因、発生要件等の具体例をまとめると、以下に列举するとおりとなる。これらは、今後開発すべき実機対応試験の具体的方法・装

置の持つべき要件そのもの、あるいは重要な関連要件となるであろう。

(1) 起動停止時、負荷変動時に翼に生じる大きな振動

これにより接触部に相対すべりが生じ、フレットング発生に至る。定格運転中は問題は少ない。

(2) 腐食疲労

湿乾交番状態による腐食因子の孔内部の隙間への滞留濃縮が、腐食による翼とワイヤの固着を引き起こし、制振機能の低下、低負荷時の蒸気流の乱れによる翼振動の増加によりフレットングが発生する。

【実機対応試験で考慮すべき要件】

- ① 蒸気水質
- ② 穴内面の腐食疲労強度
- ③ スケール除去の頻度

(3) 蒸気流流入方向の変化

ボイラ側から高圧蒸気とともに飛来する多量のスケールのノズルへの衝突による固体粒子エロージョンにより、ノズルの開口面積の増大、蒸気流入角度の変化が起こり、動翼への蒸気の入射部位の変化と加振力の発生から動翼の大きな振動が起こり、フレットングが発生する。

【実機対応試験で考慮すべき要件】

- ① 材料の疲労強度
- ② ショットピーニング施工の有無
- ③ ノズルの侵食表面加工処理の種類

(4) 長時間運転により隣接翼との接触面に生じる隙間

(5) 加工ミス

これらの事例等から総合的に検討した結果、実機対応フレットング試験は、いくつかの主要因子を制御して実機に近い条件を加速して試験できる機能が必要である。その因子は下記のように整理された。

- ① 相対すべり振幅
- ② 接触面圧の大きさと分布状況
- ③ 平均応力と応力振幅
- ④ フレットング疲労繰返し数
- ⑤ 材料・表面状況
- ⑥ 繰返し速度（周波数）
- ⑦ 雰囲気
- ⑧ 温度

以上の因子のいくつかを考慮した既存の試験法に関して調査を行い、その効果と問題点について具体的事例に基づき検討した。

水滴エロージョンも、その発生原因が複雑・複合的であるために、構成的に試験法を構成する方法では現象を再現しえないことから満足な評価が行えていない劣化事象である。本調査研究では、水滴エロージョンに関する実機対応試験方法を検討していく上で必要と

なる要件に関して検討し、それらは下記のようにまとめられた。

(1) 気液二相流状態の把握

- ① 発生する水滴の粒径分布・数密度分布
- ② 個々の水滴の速度ベクトル

(2) 微小水滴の発生と成長のメカニズム解明

(3) 水滴の捕集と噴霧過程の解明

また、実機対応試験方法に盛り込むために計測すべきパラメータと、その実機からの計測方法に関して、以下の点について検討を行った。

- ① 湿り度
- ② 微小水滴
- ③ 粗大水滴

さらに、上記に対して有効な計測技術として、既存の光応用計測技術に関するまとめを行い、その精度、適用範囲と限界、長所・短所等に関して検討を行った。

最後に、実機における水滴エロージョンの評価とその対策として、

- ① 実機における水滴エロージョン対策
- ② 実機における水滴エロージョンの実態把握

についてまとめた。

以上のように、実プラント機器のデータを参照して適用範囲の広い評価法を見出すために、現象を再現しうる動的試験装置を開発してこれに新たな測定技術や事象評価法を導入する方向が重要であることが明確化し、フレットィングと水滴エロージョンについて、試験装置の方向性が提案された。

今後重要な点は、フレットィングと水滴エロージョンのそれぞれについて、

- ① 発生にかかわる複雑かつ複合的な要因・条件の洗い出し、整理、相互関係の解明をさらに進める
- ② 上記要因・条件に関する諸量を、実機で計測する手法の開発をさらに進める
- ③ 実機よりもはるかに小型・安価・かつ単純でありながら、実機における複雑かつ複合的な劣化現象の評価が可能な実機対応試験装置を開発する

ことである。本調査研究はそのための見通しと方向性、および有効性を示した。

開発する評価装置に基づく予測評価の結果は、共通的な条件における試験結果についてデータベースとして蓄積するとともに、幅広い条件に適した手法を見出して標準的な手順として国内の製造業者間で共有することが重要である。ただし、手順や基準としては、法令に基づく検査規則、JIS 等の規定、自主規格のようなさまざまなフェーズがありうるものの、まず自主的な関連事業者間内のデファクト基準作りを指向して手法の形成に取り組むことが適切であろうと考えられる。この評価情報を、次章で検討される CAE 技術において有効に活用することがポイントであり、これが可能となれば経時変化・劣化を予測評価した機械システムの設計が可能になると考えられる。また評価のための装置や方法は、将来的には実機の長期信頼性に関する検証可能な仕様記述、品質基準や状態監視保全のための要素技術や技術基準としても有効に活用できると考えられ、システムの信頼性を飛躍的に向上させることに大きく寄与することが期待される。

4.1.2 実験評価情報高度利用 CAE の今後の課題と展望

35万 kW級の火力発電用蒸気タービン最終段の議論ターゲットに関わる主要劣化モードとして水滴エロージョンとフレットィングと CAE に関して、本調査研究で得られた現状と課題の要約を示す。

図 4.1.2-1 と図 4.1.2-2 に水滴エロージョンとフレットィングの評価方法の分析をそれぞれ示す。水滴エロージョンとフレットィングとも現象メカニズムは明らかにされていないが、実験を基とする現象因子関係式と計測・CAE を用いた評価がされている。

水滴エロージョンでは現象因子群の関数で表された平均エロージョン率（時間毎の平均減肉量）の関係式で減肉量が評価される。平均水滴直径、水滴衝突速度、衝突水滴流量はシステム全体の設計因子と運転状況因子に依存するが、「3.1.2 6) 水滴エロージョンと実験評価情報高度利用 CAE 技術」では、水滴の発生—翼面捕集—粗大水滴の発生—微細化—衝突と、時系列的にその因果律を計測と一次元 CAE で解析した例を述べている。平均エロージョン率評価式の各項の次数は材料に依存している。また、水滴エロージョンの脆化に関わる現象因子および関係式は未だ確立されていない。

一方、フレットィングでは現象因子群は接触端の形状、相対すべり量、接触面圧、応力振幅、応力比、繰り返し速度、材料の組み合わせ等であり、このうち、境界条件（接触端の形状、相対すべり量、接触面圧）、荷重条件（応力振幅）、物性（材料の下限界応力拡大係数範囲）を CAE に与えることで、き裂進展解析による疲労限の評価が可能である。これらの現象因子群および疲労限はシステム全体の設計因子と運転状況因子に依存する。

「3.1.2 7) フレットィングと実験評価情報高度利用 CAE 技術」では設計因子の一つである接触端に設ける逃げ溝寸法と疲労限との関係を CAE により分析評価した事例である。

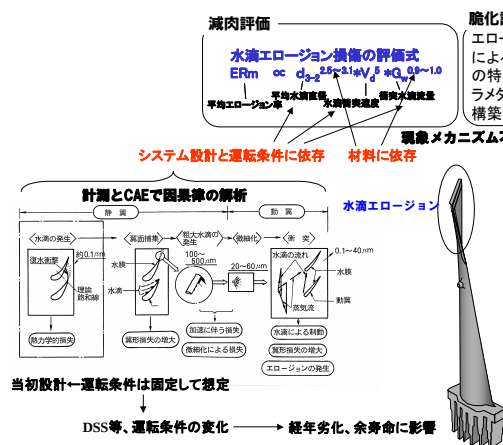


図 4.1.2-1 水滴エロージョン評価方法の分析

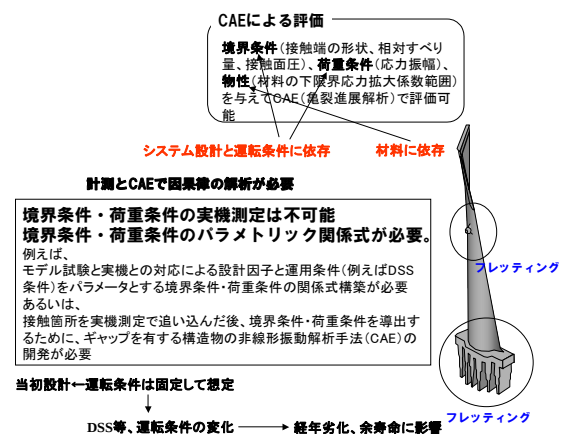


図 4.1.2-2 フレットィング評価方法の分析

上記の議論では、現象因子、設計因子・運用因子を明確に分けている。現象因子、設計因子・運用因子からなる関係式を一度に考えていくのは数の爆発を招くため、賢い方法とは言えない。フレットィング、水滴エロージョンの分析事例のように、現象因子からなる関係式、設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式、というように階層的に考えてい

くのが現実的である。図 4.1.2-3 に現象評価式—現象因子—設計変数・運転状況因子の入れ子関係を図示した。これは設計あるいは運用評価のためには、現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられている必要があることを意味している。(例えば、時間変化に対して減肉量を測定しただけのデータは設計あるいは運用評価に対しては有効ではない。)

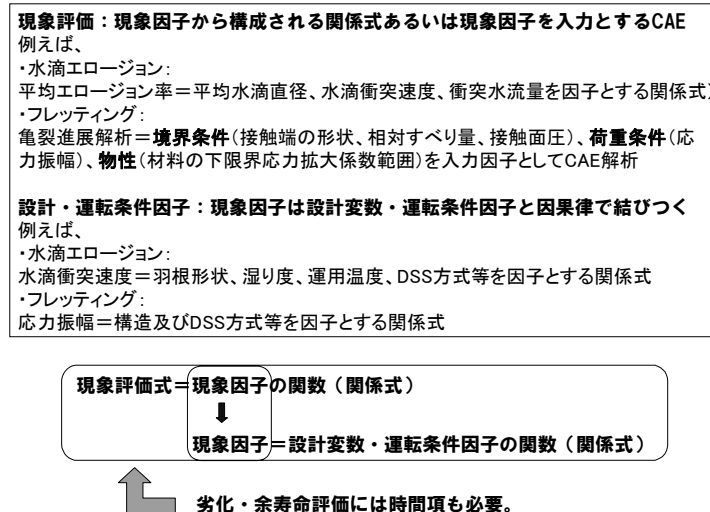


図 4.1.2-3 現象評価式—現象因子—設計変数・運転状況因子の入れ子関係

本調査研究ではフレットイング、水滴エロージョンに関するケーススタディを扱ったが、これまでの分析を通しての一般的な考え方は、余寿命評価、経年変化評価に関わる安全・安心確保に広く有効と考える。議論の詳細は報告書本体に譲ることにして、ここでは結論のみを示すことにする。

今後の課題と展望(1)

- ・設計あるいは運用評価のためには、現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられていることが必要
- ・これを実験のみで行うと天文学的な実験試行が必要。実験評価情報高度利用 CAE は、現象因子からなる関係式と設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式の階層的構造を保持することにより、その実験試行回数を減らす方法
- ・実験評価情報高度利用 CAE のためには、境界・荷重条件および物性の記述が空間座標・時間・現象因子の関係式で記述されているか、現象評価式が時間および現象因子の関係式で与えられ、設計変数・運転状況因子とのパラメトリックな関係が理解されていることが必要

今後の課題と展望(2)^{1,2)}

- ・現象因子からなる関係式、設計因子・運用因子からなる現象因子の関係式は(多次元多因子の)リスponsサーフェス(Response surface methodology: 応答曲面法)等で記述され、製造側・ユーザー側を含め、誰でも使えるようにするのが望ましい
- ・関係する因子が後に認識され、関係式の因子群を付加したい時に、リスponsサーフェスに簡単に付加できる仕組み(因子付加に対する効果的なリスponsサーフェス update のアルゴリズム)が必要
- ・任意の多次元多因子関数の構築が可能な Radial basis functions(RBF)²⁾ 等、局所挙動の情報を逃さない、リスponsサーフェスの関数近似の方法および現実的な計算効率の構築アルゴリズム開発も重要
- ・自動計測装置および高速探索技術等を駆使してパラメトリックな関係式を自動構築するようなシステムの開発も検討されるべき

今後の課題および展望(3)

- ・当初の設計では運転条件は固定して想定されている
- ・DSS 等の運用変化により影響が出る経年変化・余寿命評価を再考慮する必要
- ・実験評価式を含めた広義の強連成手法を含む、始動・停止時の挙動をきちんと評価可能な CAE 手法の構築が必要

今後の課題および展望(4)

- ・最適な設計案を CAE により導出する最適設計も計算機的能力向上を背景に近年有効になってきた
- ・実験評価式も許容する広義の連成 CAE を前提とした最適設計システムの大枠をまず開発し、個々の評価技術をそこに入れ込んでいくトップダウン的な開発アプローチも併用することが有効
- ・実験評価情報高度利用 CAE による評価技術の確立を目指すボトムアップの開発と併せ、設計フロー全体のフレームワークを共有したトップダウン的な開発との組み合わせによる開発が望ましい

今後の課題および展望(5)^{3~6)}

- ・材料が削られるような現象、それに伴う材料の脆化のメカニズムは解明されていない
- ・材料依存のファクターは実験によるパラメータチューニングが必要とされている
- ・異なるスケール間での緩和時間の違いのオーダーは計算機の進歩を持っても吸収できない
- ・第一原理分子動力学を異なるスケール間を連成する有機的連携に用いるのは無謀
- ・異なるスケール間・異なる緩和時間現象のそれぞれの学術分野で発展している手法のインプット・アウトプット部分のみ連携させるブリッジ的連携の手法確立が今後の課題

今後の課題および展望(6)

- ・マイルストーンとしては、既に実機のある余寿命評価、経年変化評価に対して、現象因子からなる関係式・設計因子・運用因子からなる関係式を多次元多因子リスponsサーフェスの共有により専門知見を結集して現象再現精度を高め、実機評価情報高度利用 CAE 開発にある程度の目処を立てた後に、その技術をスケールアップ設計に適用し、更に実機評価情報高度利用 CAE の守備範囲・現象再現精度を高めて行くという順序が望ましい

人類は失敗・事故を徹底的に解析し、科学技術を進歩させることによって、未知の問題を解明し、より賢くなり、その結果、より安全で安心な生活を手に入れてきた。タイタニック号やリバティ号の予想もしない沈没事故の分析により低温脆性破壊を起こさない設計方法を学び、世界初のジェット機であるデハビランド・コメット号の墜落事故から低サイクル疲労破壊の防止策を学び、イギリスのホリックスポローという小さな町の化学工場の事故から応力腐食割れの危険性を学んできた⁷⁾。これらの事故は比較的単純な系で実験評価も比較的しやすいものであった。それに対して、本調査研究で対象としたタービンにおける劣化モード（応力腐食割れ、エロージョン・コロージョン、（高サイクル）疲労、フレット疲労、摩耗、クリープ、脆化等）は、複合現象であり、劣化が長期間にわたり、実機とモデル実験との挙動が異なり、実機での計測が十分にできないため、追試実験を繰り返して現象を分析していく従来の方法論が十分に使えない。ゆえに、実機評価情報高度利用 CAE への期待は非常に大きい。本節で詳細に議論した、実機評価情報を CAE で受け取るための条件（現象評価式が現象因子および設計変数・運転状況因子のパラメトリックな関係式として捉えられている必要性等）を十分に議論し、一見、人知が及ばないと思われる事象を、年々進歩する計算機能力を背景に、CAE と実験情報、メンテ情報との合わせ技で解決していく、新しい形の方法論の確立を、立場・専門を異にする専門家の英知がソフトウェア開発を通して、集中的に結集する形で実現していく技術開発が強く望まれる。

参考文献

- 1) Douglas C. Montgomery, Raymond H. Myers, Response Surface Methodology, Wiley-Interscience (1995).
- 2) 例えば、J.C. Carr, R.K. Beaton, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, T.R. Evans : “ Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions ”, ACM SIGGRAPH 2001
- 3) 第一原理分子動力学の入門書は種々あるが、内容がコンパクトに要約されているものとして 例えば、手塚明, 土田英二 : 「6.2 量子物理学への応用」, アダプティブ有限要素法, 丸善, 2003
- 4) OCTA プロジェクト、http://octa.jp/index_jp.html
- 5) W. K. Liu, Eduard G. Karpov, Harold S. Park : Nano Mechanics And Materials, John Wiley & Sons Inc (2006).
- 6) 小山敏幸、http://www.nims.go.jp/cmsc/pst/koyama/docs/Lecture_H18/H18_Chapter_1.pdf
- 7) 畑村洋太郎 : 失敗に学ぶものづくり、講談社(2003).

4.1.3 情報活用技術の今後の課題および展開

石油・石化プラントのメンテナンスに関する情報活用技術についての今後の課題と展開を以下に述べる。

1) 情報活用プロセスの課題と提言

(1) プロセス支援型知識伝承支援

本研究では、プロセス支援型ナレッジマネジメントを採用し、情報活用プロセスの思考支援・知識伝承におけるその有効性を確認した。今後、情報活用システムの構築においては、これまでの単なるキーワードや全文検索による検索型のシステムではなく、人間の思考過程を支援するプロセス支援型ナレッジマネジメントの採用が適切であると考ええる。

(2) 論理構造の解明

さまざまな事故情報、保全情報を大量に整理・体系化しても、他のプラントや他企業において有効に活用できるとは限らない。やはり、現象面の徹底的な分析だけではなく、その事象をもたらした根源的理由とメカニズムなどの論理構造の解明が重要である。

(3) 保全・設計情報の融合

これまで業務革新のためのシステム化は、自らの部署や管轄範囲でなされることが多かったが、本研究で試行した情報システムとデータという形での保全と設計の結びつけは、両者の密度の濃い情報の融合を図るものとして期待できる。

2) 情報共有化の課題と提言

(1) 開放型 Web と中央管理型の協調による情報共有

今や各個人がインターネットにて自由に情報収集と発信できる環境が整ってきており、こうした開放型情報共有の特性を大いに活用すべきであろう。情報センターは、中央集権的ではなく、ごくゆるい最低限のルールだけを制定して、ネットによるユーザ参画型、自己増殖型をめざす。それと同時に部分的に有識者による評価結果も公表され、両者の情報が明確に区分して入手でき、ユーザは自己責任において利用する環境が望ましい。

(2) 関連業界の協調が成功の要

メンテナンス情報に関わる研究会、委員会は、それぞれに目的とアプローチが異なるとはいえ、共通部分も少なくない。お互いに情報交換を密にし、個々のプロジェクトのねらいと特徴を明確にすると同時に、共通に利用できるものは利用して行くような協調体制を保持することが重要である。規格化・ガイドライン化を視野に入れたこうした研究の成果を業界内に有効に浸透させて行く活動は、設備オーナー系の業界団体が中心になって進められるべきであるが、エンジニアリング業界を含め、法制度的・政策的支援が不可欠であり、官民一体となった連携を期待する。

(3) コンプライアンス、CSR、さらに企業価値向上

各企業が自社の事故・トラブルのようなネガティブな情報をオープンにすることは、これまでの社会風土として大きな抵抗が存在する。事故・トラブルの真の原因と対策を提言する中で、その企業の信頼度を高める世論を形成して行くことが、コンプライアンス、CSR（企業社会責任）を果たし、さらに企業価値向上に効果がある、という社会のコンセンサス作りが重要である。

4.2 擦り合わせ型製造業における日本型ものづくりや設計高度化のための設計支援環境の今後の課題および展開

日本の製造業は、その世界最高の製造プロセス技術を基盤として、開発スピードの速い開発業務プロセスと需要量変動に柔軟に対応できる生産システムを実現することによって国際競争力を高めてきた。これらを原動力として、短いサイクルで、新技術を満載した、豊富な商品バリエーションを揃える製品を送り出すことがコアコンピタンスとなり、国際市場においても優位な位置を獲得してきた。

しかし、このような我が国が優位とするものづくりの戦略を推進するために、設計に対する過剰な負荷の集中が起きており、それが設計品質問題を起こしている。製品の不具合による重大な事故やリコールが多発し、また携帯やデジカメなど従来我が国の最も得意とする分野での製品シェアが大きく減少するなどの深刻な問題が起きており、国際競争力の大幅な低下につながると危惧される。

リコールの70%以上は設計不良であると言われており、また携帯プレーヤーの例に見るように同じ要素部品を用い、ほぼ同じ形をしていても製品の基本的な設計の差がシェアに決定的な差を生じている。つまり、ものづくり技術の上流に位置する設計やその品質が製造業のコアコンピタンスに関わる根本問題となっている。

このような設計品質を革新し、複雑化・多機能化する最近の製品の設計に対応するには、IT技術とそれを使いこなす組織力や設計技能の構築が必要不可欠である。ところが、現在のIT技術や設計システムは、上述のような設計品質問題には対応できない。

そこで、日本の製造業の根幹となる設計品質技術全般に関し、設計・製造アプリケーションのための革新的設計支援技術の研究開発を行い、その成果が、将来にわたり設計現場において活用され、さらに育成されるための拠点や仕組み作りを目指す。

1) 海外の取り組み

海外に目を向けると、国の支援の下、より戦略的に産学連携のプロジェクトが行われている（表4.2-1）。大きなプロジェクトとしては、ドイツのiViPや米国のFIPERがある。また、最近韓国ではPLMコンソーシアムが設立され、産業界主導でPLM技術の活性化への取り組みが始まっている。韓国では、このほかにも設計技術に関して10年の長期研究プロジェクトが、大学に拠点を設ける形でいくつか行われている。ものづくりの重心が東アジアにあり、また、韓国、中国、台湾などの国にはデジタルエンジニアリングに関する研究者の層も厚い。

表 4.2-1 主な海外の設計支援技術開発プロジェクト

名称	国	概要
iViP (Integrated Virtual Product Creation)	ドイツ	統合化仮想製品設計技術に関するプロジェクト 産学 約 50 パートナー 1998 年から 2001 年の 4 年。その後は成果普及活動 予算 1 億独マルク（国と企業が折半）
FIPER (Federated Intelligent Product EnviRonment)	米国	NIST の先端技術プロジェクト 産学 15 パートナー(GE, GM, NASA 他) 1999 年から 2003 年（現在、商用化） 予算 \$21.5 million
PLM コンソーシアム	韓国	PLM 技術の活性化とグローバル技術化（CAD・CAM 学会） 産業界主導(HKMC, サムスン, LG)+学+米国ベンダー 2006 年 11 月設立 分科会(自動車/航空, 電気/電子, 建設/重工業/造船, etc)

特に米国では 3D CAD→ CAE → CAO(最適化、統計的な高信頼性設計) → PIDO (Process Integration and Design Optimization)という明確なデジタル設計の進化ビジョンを掲げて、産・官(軍)・学で連携して着実に技術移管を進めている。

2) 提案する要素技術の優先順位

本調査研究においては、(A) 擦り合わせ CAD 技術、(B) コンセプト CAD 技術、(C) コンセプト評価技術、(D) 設計検証技術、(E) 現物融合技術の 5 つの技術要素を提案してきた。これらの技術要素は、それぞれ重要であるが、現実的にはこれらの課題すべてを同時に取り組むことは困難である。このため、技術要素の重要度を品質、実現可能性などの項目で点数化して、優先順序付けを実施した。なお、優先順序付けにおいて、現在の日本のものづくりで問題とされている、狩野モデルにおける喜び品質を特に重視し、次に、当たり前品質を重視するような点数配分とした。

討議の結果を表 4.2-2 に示す。この結果、(C) コンセプト評価技術と (E) 現物融合技術が高い得点となり、本調査研究では、これらの技術研究を優先的に実施するのが妥当であるとの結論に至った。

表 4.2-2 技術要素の優先順位検討

	品質			実現可能性	現時点での 充実度	波及効果	合計点
	喜び	当たり前	性能				
(A)擦り合わせCAD技術			○	○	○		3
(B)コンセプトCAD技術	○				○		5
(C)コンセプト評価技術	◎					○	9
(D)設計検証技術		○				○	3
(E)現物融合技術		◎	○	◎		○	8
重み	×4	×2	×1	×1	×1	×1	
	◎:2点 ○:1点						

3) プロジェクト体制の提案

図 4.2-1 に革新的設計支援技術の研究開発を行うプロジェクト体制を提案する。

前述のように、ユーザ、IT ベンダー、研究機関が連携する必要がある。特に、課題のフィールドを持つユーザの深い関与は不可欠である。また、基礎研究から実用化まで、要求分析⇒研究開発⇒試用評価というサイクルを何度も回して実用化への道を開いていくことが必要であるため、継続性のある体制を作ることが必要である。その一方で、ものづくりの業務も日進月歩であるため、短いサイクルで中間成果物を含めて活用していくことも重要なポイントである。

そのためには、研究開発拠点を作り、そこに課題を抱えるユーザ、大学・研究所、そして IT ベンダーのチームがプロジェクトを実施するという形態が望ましい。拠点化によって、研究開発の目的やフェーズ、成果物の完成度に従ってチーム組織の修正、資金源の変更を行うことが可能となろう。

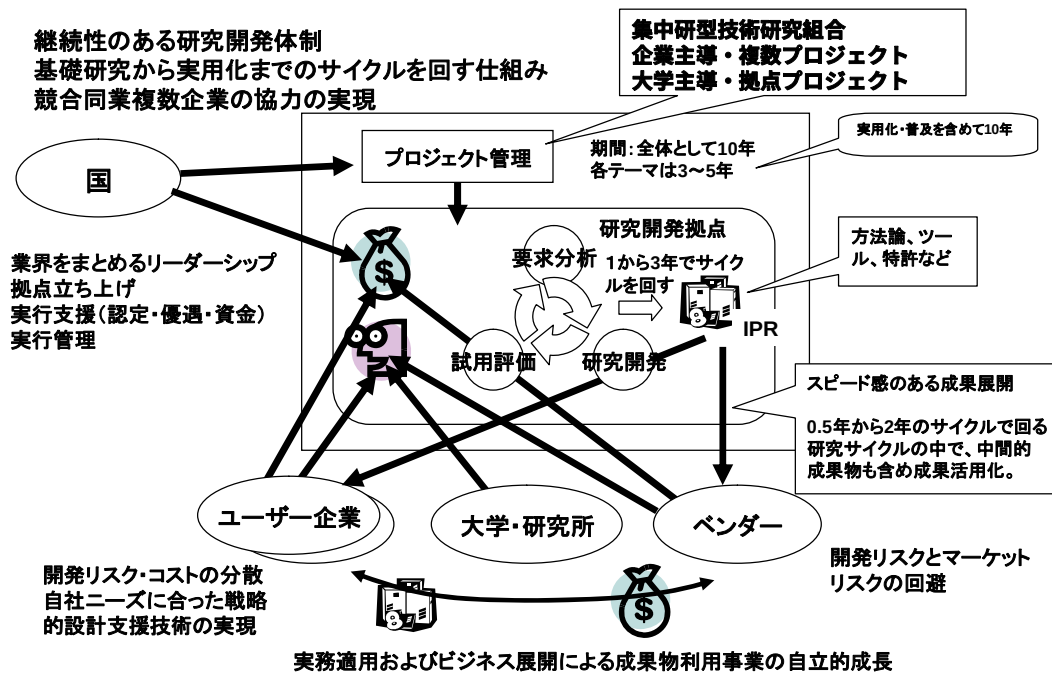


図 4.2-1 設計支援技術開発体制

4.3 総括

経済のグローバル化が進む中で機械システム産業の競争は年々激しさを増している。すなわち、市場ニーズに応じて製品は複雑化し高度化しており、同時にコストダウンへの要求も厳しくなっている。また、新技術の開発と導入が進んでおり、材料・構造・機能の全てが多様化している。一方で、製造物に対する責任の観点から機械システム製造業が果たすべき責任は大きく、また、設計・製造した当時には想定しえなかった課題についても、ある程度の予測をもって新たな設計・製造をすることが期待されている。

このような中で、本調査研究では、「フロントローディング設計」と「擦り合わせ型製造業」の2つをキーワードに、設計品質の向上、安全・安心の確保、価値創造型ものづくり力強化に資する設計を支援する技術開発の動向について、我が国の関連業界を代表する企業や、関連技術に関する主だった学識経験者の協力を得て調査検討を行った。さまざまな分野領域の機械システム製品にかかわる生産活動が我が国の経済的発展に大きく貢献していること、それぞれの分野領域の製品における設計・製造技術の問題はそれぞれ多岐にわたること、また、個々の製品の設計は各々の製造企業の競争力の源泉であることなどを総合的に勘案した上で、問題を深く掘り下げて検討を行うべく、分野別研究戦略並びに既往の調査研究等を踏まえて、我が国にとって重要度が高い領域あるいは課題を例題として設定して、調査研究を実施した。すなわち、フロントローディング設計支援技術に関しては、社会的資本財として社会の基盤を構築する役割を担っており信頼性向上が強く要求されている、電力プラント並びに石油・石化プラントの信頼性向上を図るための具体的課題について、詳細に調査した。他方、日本型ものづくりや設計高度化のための設計支援環境に関しては、機械システム製品の設計品質問題を解決するための技術要素を分類した上で、「擦り合わせ型」の典型的製品である自動車を中心とした機械システム製品について検討を行った。本調査研究の結果として明らかになった課題の詳細については本報告書で述べたとおりであるが、本調査研究の実施により、機械システム製造業における課題の解決から新たな価値創造へのアクションプランを提示することができたと考えている。

喫緊の課題となっているプラント等の信頼性向上に対しては、製造企業の連携を中心として製品のユーザ、及び保守補修に関わる企業と大学・研究所が知識を結集する形で重要課題解決に集中的に取り組む共同技術開発を実施することが重要である。他方、設計品質問題の解決にあたっては、研究開発拠点を形成し、そこに課題を抱える製造企業、大学・研究所、そしてITベンダーのチームが多様な目的およびフェーズに対応する適切なプロジェクトを、多様な形態で実施することが望ましい。

個別の機械システムの設計はあくまでメーカ個々が取り組むべき技術開発課題であるが、フェアな競争の土台となる新たな基準および基盤の開発に関しては産学官の連携による統合的取り組みが重要であり、これに対して国が積極的にリードしバックアップすることが強く望まれる。経済産業省各部局課ならびに関係者の方々を始めとする、各位におかれては是非ともご理解とご協力を賜りたく、お願い申し上げる次第である。

— 禁無断転載 —

システム技術開発調査研究 18-R-10

価値創造型ものづくり力強化に資する
協調型フロントローディング設計支援技術開発
に関する調査研究
(要旨)

平成19年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
T E L 03-3454-1311
委託先名 社団法人 日本産業機械工業会
東京都港区芝公園三丁目5番8号
T E L 03-3434-6821