

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「溶接構造物の高精度寿命予測法の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 5 月

委託者 九州経済産業局

委託先 株式会社パール構造

目 次

	ページ
第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論 - 1	6
2-1 基本システムの開発	6
2-1-1 本研究開発部分の概要	6
2-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ	7
2-1-3 本研究開発部分の成果	7
2-2 メインコントロールシステム	8
2-3 疲労寿命計算プログラムの商用コード化	10
2-4 プリ・ポストサブシステム群/プログラム群の開発	11
2-5 データベースとの接続	12
第3章 本論 - 2	13
3-1 データベースの構築	13
3-1-1 本研究開発部分の概要	13
3-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ	13
3-1-3 本研究開発部分の成果	13
3-2 格納データの調査	14
3-2-1 固有ひずみデータ	14
3-2-2 材料定数データ	14
3-2-3 アスペクト比データ	15
3-2-4 K値算出式データ	15
3-3 データの格納	16
3-3-1 固有ひずみデータ	16
3-3-2 材料定数データ	16
3-3-3 アスペクト比データ	16
3-3-4 K値算出式データ	16

第4章 本論 - 3	16
4-1 総合テスト	16
4-1-1 本研究開発部分の概要	16
4-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ	17
4-1-3 本研究開発部分の成果	17
4-2 開発システムの動作テスト	17
4-3 寿命計算のテスト	19
第5章 全体総括	21
5-1 研究開発の成果	21
5-2 今後の課題	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 背景

自動車車体を始めとする溶接構造物の疲労設計は、試験片で得られた応力振幅と破断繰返し回数の関係（S-N 曲線）を用いた疲労寿命推定法が用いられている。しかし、疲労設計がなされた溶接構造物においても、疲労損傷の発生が後を絶たないのが現状である。

この原因は、

- (a) 疲労寿命に及ぼす変動荷重の影響を単純な線形累積被害則で取り扱うため、荷重変動で複雑に変化するき裂の伝播挙動を評価できない。
- (b) 溶接継手部の応力集中や溶接残留応力は溶接箇所によって異なるが、それを一律の設計 S-N 曲線で取り扱うため、継手部の多様な力学的環境の影響を評価できない。
- (c) S-N 曲線にはき裂の大きさに関する情報が含まれておらず、疲労き裂の発生、未発生だけが評価され、実際の構造物に生じるき裂の大きさを評価できない。

などの現行の疲労設計手法における問題点を有したまま、実構造物における疲労損傷の実態を踏まえた経験工学手法によって、疲労設計が行われているためと考えられる。

このため、自動車メーカーは S-N 曲線を用いる疲労設計だけに頼らず、膨大な時間とコストをかけて、実際の荷重履歴を模擬した台上耐久性試験による信頼性・安全性の確認を余儀なくされており、自動車車体を始めとする溶接構造物の耐用期間における信頼性・安全性の向上のためには、疲労損傷リスク回避の観点から高精度寿命予測技術の確立が重要な課題である。

(2) 研究目的及び目標

豊貞雅宏九州大学名誉教授は、既存の疲労き裂伝播則を発展させて、繰返し塑性域寸法をパラメータとした独自の疲労き裂伝播則を提案し、変動荷重下における疲労き裂の発生から大きなき裂に成長するまでの疲労き裂成長曲線を推定するアルゴリズムを考案した。

本研究開発は、豊貞の考案したアルゴリズムに基づく溶接構造物の高精度寿命予測法を商用プログラム化するとともに、設計現場で活用できる高精度疲労寿命予測システムを開発して、溶接構造物の設計プロセスにおける疲労設計技術の高度化、及び溶接構造物の製造プロセスにおける品質保証検査技術の高度化を図り、我が国ものづくり製造業の発展に資することを目的とする。

研究開発の具体的目標は、次の3点である。

- (a) 溶接構造物の実働ランダム荷重下における疲労寿命計算を実用化する。
- (b) (a)の成果を用いて溶接構造物の実働環境における寿命診断技術を確立する。
- (c) 設計現場で活用可能な高精度疲労寿命予測システムを開発する。

中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律における法認定計画では、次に示す研究テーマについて研究開発を実施するよう計画している。

【1】基本システムの開発

【2】FLARPの高機能化等

(FLARP: 豊貞雅宏九州大学名誉教授らが開発した疲労寿命予測の研究用プログラム)

【3】実験による検証およびデータベースの構築

【3-1】寿命計算プログラムの実用化に必要な疲労試験を実施

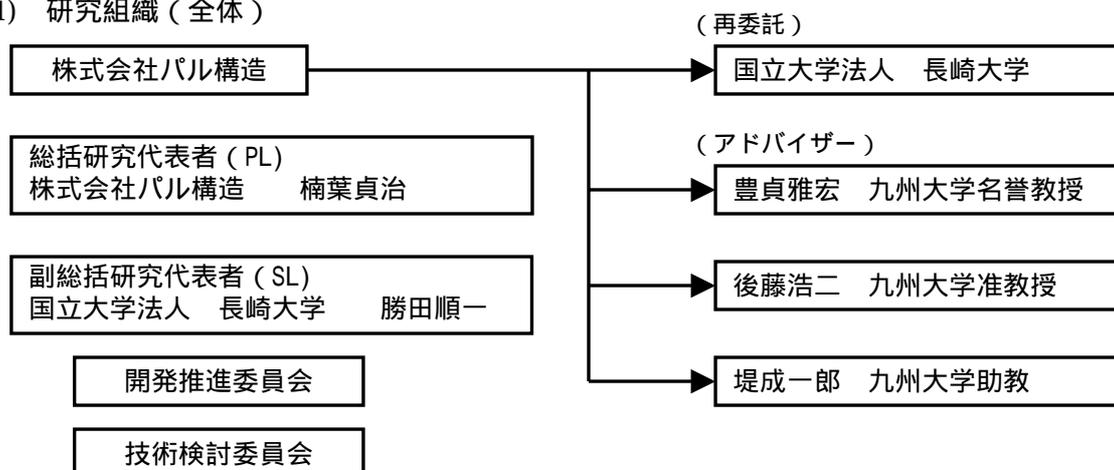
【3-2】データベースの構築

これら研究テーマのうち、本研究開発は、【1】基本システムの開発と、【3-2】データベースの構築により、設計現場で活用可能な高精度疲労寿命予測システムを開発することを目的とする。

基本システムは、使用者が殆どの処理をマウス操作で簡易に行えること、設計現場で構造物の設計に活用されているFEM(有限要素法)計算から疲労寿命計算への接続を1時間内で行えることを開発目標とする。

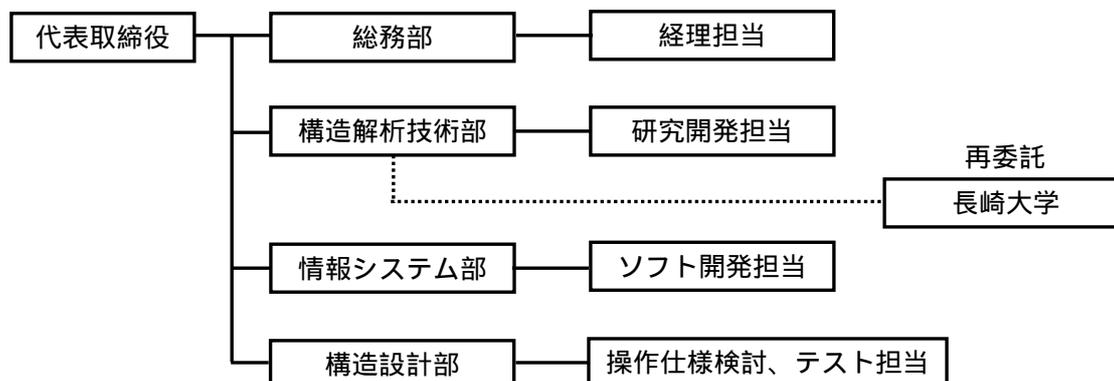
1-2 研究体制

(1) 研究組織(全体)



(2) 管理体制

【事業管理者】株式会社パル構造



【再委託先】国立大学法人 長崎大学



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】株式会社パル構造

管理員

氏 名	所属・役職	実施内容
河角 省治	構造解析技術部 取締役部長	管理業務主担当
本田 貞光	構造解析技術部 次長	管理業務副担当
宮本 麻美	総務部 主任	管理業務副担当

研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
河角 省治	構造解析技術部 取締役部長	, , , ,
楠葉 貞治	構造解析技術部 次長	, , ,
本田 貞光	構造解析技術部 次長	,
東 貴浩	構造解析技術部 第一技術課 課長	,
小坂 英樹	構造解析技術部 第一技術課 主務	,
岡田 公一	構造解析技術部 第二技術課 主務	,
大谷 直弘	構造解析技術部 第一技術課 主任	,
伊藤 健志	構造解析技術部 第二技術課 主任	,
有田 幸子	構造解析技術部 第二技術課 主任	,
濱村 敦美	構造解析技術部 第二技術課	,
徳永 真也	情報システム部 システム二課 課長	, , ,
山下 章	情報システム部 システム二課 主任	, ,
藤嶋 誠	情報システム部 システム二課 主任	, ,
古場 瑛	情報システム部 システム二課	,
中岡 さゆり	情報システム部 システム二課	,
山本 美鈴	情報システム部 システム二課	,
清田 真司	構造設計部 次長	,
溝上 稔	構造設計部 第二設計課 課長	,

【再委託先】国立大学法人 長崎大学

研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
勝田 順一	工学部 准教授	

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】株式会社パル構造

(経理担当者) 総務部 宮本 麻美
 (業務管理者) 構造解析技術部 取締役部長 河角 省治

【再委託先】国立大学法人 長崎大学

(経理担当者) 工学部 管理係長 松山 英樹
 (業務管理者) 工学部 工学部長 清水 康博

(5) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

開発推進委員会委員

開発推進委員会は、本研究開発の全般的な技術内容についての検討・指導を行う。

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
豊貞 雅宏	九州大学名誉教授	アドバイザー
後藤 浩二	九州大学 大学院工学研究院 准教授	アドバイザー
堤 成一郎	九州大学 大学院工学研究院 助教	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
楠葉 貞治	株式会社パル構造 構造解析技術部 次長	PL
勝田 順一	長崎大学 工学部 構造工学科 准教授	SL
岡田 公一	株式会社パル構造 構造解析技術部 主務	
徳永 真也	株式会社パル構造 情報システム部 課長	
清田 真司	株式会社パル構造 構造設計部 次長	
河角 省治	株式会社パル構造 構造解析技術部 取締役部長	業務管理者
本田 貞光	株式会社パル構造 構造解析技術部 次長	業務管理者

技術検討委員会委員

技術検討委員会は、本研究開発の技術的な詳細事項についての検討・指導を行う。

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
豊貞 雅宏	九州大学名誉教授	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
河角 省治	株式会社パル構造 構造解析技術部 取締役部長	業務管理者
楠葉 貞治	株式会社パル構造 構造解析技術部 次長	PL
岡田 公一	株式会社パル構造 構造解析技術部 主務	

1-3 成果概要

研究開発の各実施項目と成果概要、及び全体成果を以下に示す。

実施項目	成果概要
【1】基本システムの開発	
メインコントロールシステムの開発	メニュー操作（キーボード入力やマウス操作によるデータ入力、処理指示）、FEM 構造モデルのグラフィック表示・操作、及び計算結果や中間データのグラフ表示の各機能を作成し、FEM 構造解析結果を疲労寿命計算へ接続する一連操作を可能にした。
疲労寿命計算プログラムの商用コード化	研究用プログラム(FLARP)を再構成して、疲労寿命計算プログラムを作成し、将来的な機能拡張等のメンテナンスを容易にした。
プリ・ポストサブシステム / プログラム群の開発	下記の各機能を作成し、FEM 構造解析結果を疲労寿命計算に接続することをシステム化した。 -1 溶接残留応力算出 FEM プリ機能 -2 き裂伝播経路の設定機能 -3 き裂伝播経路上の応力分布の算出機能 -4 表面き裂領域と板厚貫通き裂領域の設定機能 -5 表面き裂領域に対する応力分布の設定機能 -6 き裂長さとお応力拡大係数の関係の設定機能 -7 等価分布応力の算出機能
データベースへの接続機能	固有ひずみ、材料定数、荷重条件、アスペクト比、K 値の各データベースに接続するプログラムを作成し、疲労寿命計算に必要な情報のデータベースからの取り込みやデータベースへのデータ追加を可能にした。
【3-2】データベースの構築	
格納データの調査	文献調査等により、固有ひずみデータ 2 種、材料定数データ 15 種、アスペクト比データ 3 種、K 値データ 212 種のデータを収集した。
データ格納	で収集したデータを分析、選定し、データベースシステムを用いて固有ひずみデータ 2 種、材料定数データ 5 種、K 値データ 5 種をデータベース化した。
総合テスト	開発システムの動作テスト、寿命計算テストの実施により、目標性能の達成を確認するとともに、今後の課題を明確にした。
全体成果：【1】基本システムの開発と【3-2】データベースの構築の実現により、高精度疲労寿命予測システムの製品版プロトタイプを開発した。	

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒852-8003 長崎県長崎市旭町 8 番 2 0 号

株式会社パル構造 構造解析技術部 次長 楠葉 貞治

TEL: 095-834-2793

FAX: 095-834-2705

E-mail: kusuba@pal.co.jp

第2章 本論 - 1

2-1 基本システムの開発

2-1-1 本研究開発部分の概要

本研究開発部分では、高精度疲労寿命予測システムの基幹となる基本システムを作成した。作成した基本システムの構成を図 2-1.1 に示す。

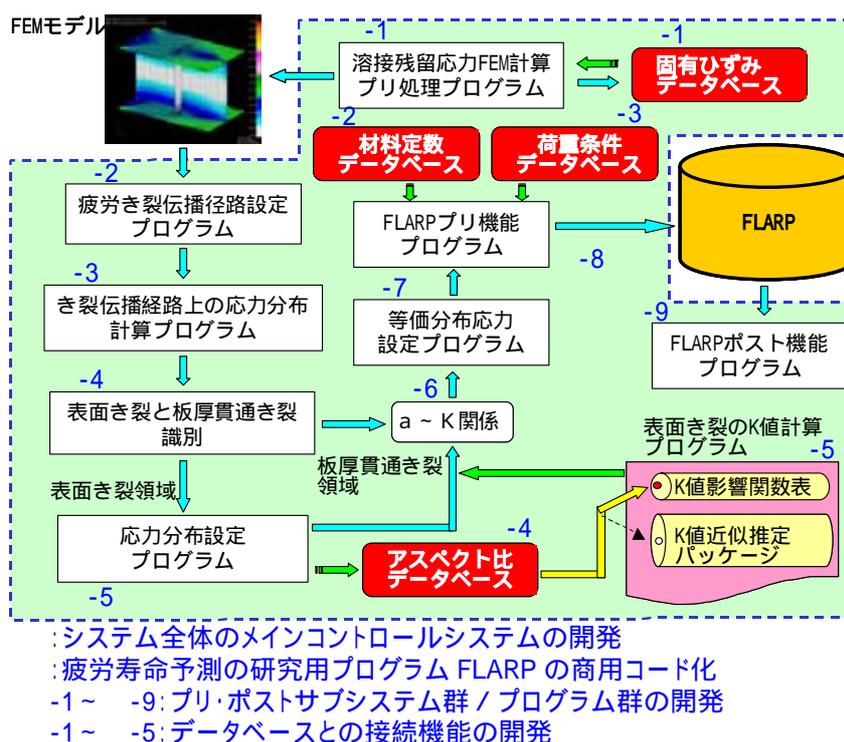


図 2-1.1 基本システムの構成

メインコントロールシステムは、実構造の FEM 解析結果を出発として疲労寿命計算に至るまでの一連処理を個々のサブシステムで実行させるためのコントロールプログラムとした。さらに、構造モデルのグラフィック表示、及び寿命計算結果等のグラフ表示のためのユーティリティプログラムを作成した。開発言語は VC++ 言語とした。

疲労寿命計算プログラムの商用コード化は、豊貞雅宏九州大学名誉教授が開発した研究用プログラム (FLARP) を再構成し、疲労寿命計算プログラムとした。

プリ・ポストサブシステム群 / プログラム群は、FEM 解析結果を疲労寿命計算に接続するための演算処理プログラム群、グラフィック処理プログラム群を作成し、これらを個々のサブシステムに統合した。演算処理プログラムは FORTRAN を開発言語とした。また、FORTRAN プログラムは DLL (ダイナミックリンクライブラリ) としてシステムに接続した。

データベースとの接続機能は、材料定数、荷重条件、アスペクト比（表面き裂の形状特性）、K 値（疲労き裂の伝播速度を支配する物理量）、及び溶接残留応力（溶接で生じる応力）算出用の固有ひずみ（溶接で生じる応力の値を規定する物理量）の各データベースに接続するプログラムを作成した。開発言語は VC++言語とした。

2-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

設計現場で活用できるソフトウェアシステムとすることを開発目標に、高精度疲労寿命予測システムの製品版プロトタイプを開発した。また、開発したグラフ表示機能を活用することで、入力条件や寿命計算結果を簡易に確認できるようになり、高精度疲労寿命予測システムの製品化に向けた今後の研究開発の効率化が図れる。

2-1-3 本研究開発部分の成果

実構造のFEM解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続する一連のシステム動作を実現させることを目標に、以下の個別機能を開発した。

メインコントロールシステムは、実構造のFEM解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続するための一連操作を、メニュー操作やダイアログ操作（キーボード入力やマウス操作によるデータ入力、処理指示）により簡易に行えるようにした。さらに、FEM構造モデルのグラフィック操作のための表示、及び計算結果等のグラフ表示を可能にした。

疲労寿命計算プログラムの商用コード化は、今後取り組む機能拡張等のメンテナンスを容易にすることを目的に、研究用プログラム(FLARP)の寿命計算理論とプログラムフローを把握するとともに、FLARPを商用疲労寿命計算プログラムに再構成した。

プリ・ポストサブシステム群 / プログラム群は、実構造のFEM解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続することを目的に、図2-1.1に示す -1 ~ -9の各機能のプログラムを作成し、個々のサブシステムに統合した。

データベースとの接続機能は、疲労寿命計算に必要な情報のデータベースからの取り込みやデータベースへのデータ追加を可能にすることを目的に、材料定数、荷重条件、アスペクト比、K値、及び溶接残留応力算出用の固有ひずみの各データベースとの接続プログラム（ダイアログ）を作成した。

なお、目標とした一連のシステム動作は、設計現場で活用できるソフトウェアシステムの根幹をなすものであり、FEM解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続するための基本プロセスに対応するものである。

データベースを活用して疲労寿命計算を実施する場合を始めとし、様々な実施プロセスに対応するための機能拡張、さらにはソフトウェア製品に不可欠となるエラー処理やマニュアル整備は、今後の課題として次年度以降に取り組む。

開発した個別機能の概要を 2-2 節 ~ 2-4 節に示す。

2-2 メインコントロールシステム

(1) プログラム機能

作成したメインコントロールシステムは、実構造の構造解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続することを主目的に、図2-1.1に示すプログラム処理の流れをメニューバー登録したプルダウンメニューの選択でダイアログ（キーボード入力やマウス操作によるデータ入力や処理指示を行うウインドウ画面）を起動し、ユーザーの指示したサブシステムの実行をコントロールすることが主な機能である。さらに、FEM計算モデルのグラフィック表示・グラフィック処理の機能などを有している。

(2) プログラム構成

メインコントロールシステムにおけるプログラム構成は、図2-2.1に示すシステム起動時のスタートアップダイアログによるプロジェクト（一連のデータグループ）の選択、及び、図2-2.2に例を示すオープンプロジェクトダイアログによる処理ルートや読み込むファイルの指定に始まり、プルダウンメニュー選択によるダイアログ起動プログラムで構成される。メニューバーに登録したメニューは、File、View、Conditions、Calculation、Result、Data Base、Tool、Helpなどで、これらの詳細について抜粋を表2-2.1に示す。

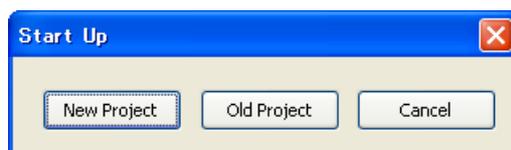


図 2-2.1 スタートアップダイアログ

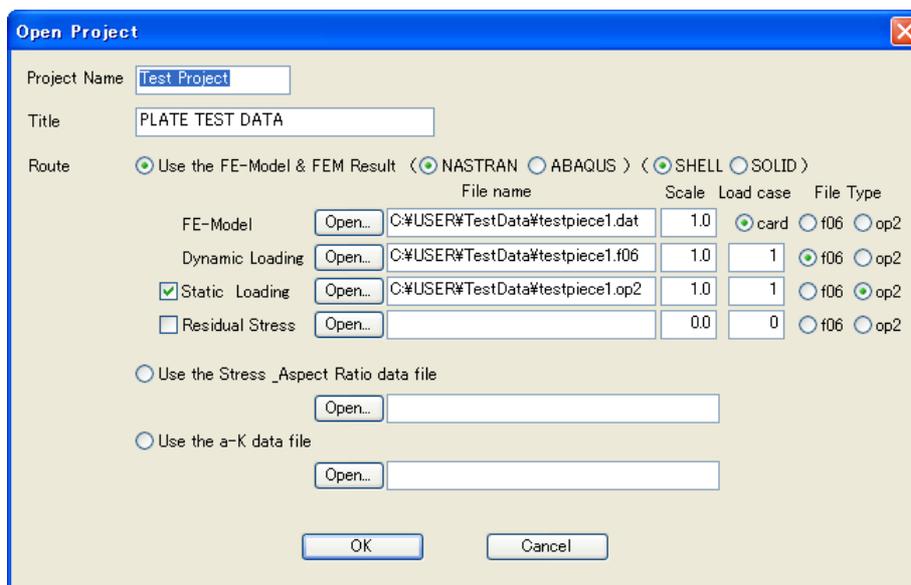


図 2-2.2 オープンプロジェクトダイアログ

表 2-2.1 プルダウンメニュー構成

メニューバー 登録メニュー	第 1 階層 プルダウン	第 2 階層 プルダウン	機能	
File	New		新規プロジェクトを開く	
	Open		既存プロジェクトを開く	
	Save as		プロジェクトを指定ファイルに保存	
	Save		プロジェクトをファイルに保存	
	Exit		システムの終了	
View			グラフィック表示の指示 (別途整理)	
Conditions	Material	Create	材料データの入力 / DB 追加登録	
		D.B.	材料データを DB から取得	
	Load	Create	荷重データの入力 / DB 追加登録	
		D.B.	荷重データを DB から取得	
	Stress(Shell)		シェルモデル計算結果応力の読取	
	Crack P.(Shell)		シェルモデルき裂経路の作成指示	
	Crack P.(Solid)		ソリッドモデルき裂経路の作成指示	
	Stress(Solid)		ソリッドモデル計算結果応力の読取	
	Pre-Cal.	Surface Crack	表面き裂成長問題の準備計算	
		TTC	貫通き裂成長問題の準備計算	
		S+TTC	表面 + 貫通き裂成長問題の準備計算	
	Calculation	FLARP		疲労寿命計算プログラムの起動
	Results	Graph		計算結果のグラフ表示
File			計算結果のファイル保存	
Data Base	Material		材料 DB のメンテナンス	
	Load		荷重 DB のメンテナンス	
	Aspect ratio		アスペクト比 DB のメンテナンス	
	K-value		K 値計算 DB のメンテナンス	
	Inherent S.		固有ひずみ DB のメンテナンス	
Tool	Inherent S.	Weld Path	残留応力計算の条件定義	
		FEM data C.	残留応力計算の FEM データ出力	
Help	Version		バージョン情報	
	Manual		オンラインマニュアル (将来課題)	

注 ; 第 1 階層プルダウンにおける、Crack P. 表記は Crack Path の略器、

Inherent S. 表記は Inherent Strain の略記

第 2 階層プルダウンにおける、TTC 表記は Through Thickness Crack の略記

S+表記は Surface Crack + の略記

(3) ユーティリティプログラム

グラフィック表示のためのユーティリティプログラムとして、表 2-2.2、表 2-2.3、及び表 2-2.4 に示すプログラムを作成した。また、計算結果や中間データのグラフ作成を目的として、ダイアログ drawgraphDlg()によるグラフの画面表示・印刷・画像ファイル保存を自動化できるようにした。

表 2-2.2 グラフィック表示アイコン操作プログラム

アイコン	処理名称	処理内容	関数名
X	視線方向(X)	X 軸正方向からの視線図表示	OnDRAW_X()
Y	視線方向(Y)	Y 軸負方向からの視線図表示	OnDRAW_Y()
Z	視線方向(Z)	Z 軸負方向からの視線図表示	OnDRAW_Z()
BE	視線方向(BE)	鳥瞰図表示	OnDRAW_BE()
R	逆視線(R)	モデル図を原点中心に 180 度回転	OnDRAW_REVERSE()
F	標準サイズ(F)	モデル図を描画領域内に表示	OnDRAW_FIT()
G	定率拡大(G)	現状の表示サイズから 10%拡大	OnDRAW_G()
S	定率縮小(S)	現状の表示サイズから 10%縮小	OnDRAW_S()
	定量平行移動()	モデル図を右へ移動	OnDRAW_RIGHT()
	定量平行移動()	モデル図を左へ移動	OnDRAW_LEFT()
	定量平行移動()	モデル図を上へ移動	OnDRAW_UP()
	定量平行移動()	モデル図を下へ移動	OnDRAW_DOWN()
Rx	定量回転(Rx)	X 軸周りに 5 度回転	OnDRAW_RX()
Ry	定量回転(Ry)	Y 軸周りに 5 度回転	OnDRAW_RY()
Rz	定量回転(Rz)	Z 軸周りに 5 度回転	OnDRAW_RZ()

表 2-2.3 グラフィック表示マウス操作プログラム

ボタン	処理内容	関数名
左	クリックしながらの操作でモデル図の移動	DoTracking(CPoint point)
中	スクロールでモデル図の拡大・縮小	DoTracking(CPoint point)
右	クリックしながらの操作でモデル図の回転	DoTracking(CPoint point)

表 2-2.4 メニューバーView 操作ダイアログ

メニュー	処理内容	関数名
Center	モデル図の表示中心を指定	OnViewCenter()
Angle	モデル図を指定した角度で表示	OnViewAngle()
Zoom	モデル図を指定した倍率で表示	OnViewZoom()

2-3 疲労寿命計算プログラムの商用コード化

豊貞雅宏九州大学名誉教授の技術指導による寿命計算理論とプログラムフローの把握に基づき、研究用プログラム(FLARP)を再構成して、疲労寿命計算プログラムを作成した。

2-4 プリ・ポストサブシステム群/プログラム群の開発

図2-1.1に示す -1 溶接残留応力算出FEMプリ機能、 -2 き裂伝播経路の設定機能、 -3 き裂伝播経路上の応力分布の算出機能、 -4 表面き裂領域と板厚貫通き裂領域の設定機能、 -5 表面き裂領域に対する応力分布の設定機能、 -6 き裂長さとお力拡大係数の関係の設定機能、及び -7 等価分布応力の算出機能のプログラムを作成し、個々のサブシステムに統合した。作成した主なダイアログ及び関連するDLL関数の一覧を表2-4.1に示す。

表 2-4.1 開発主要プログラム一覧

ダイアログ	DLL-1	DLL-2	DLL-3	内容
New (Open) Project	NSBULK	ABBULK		基本設定・FEM モデル読取
Stress(Shell)	NSR101	NSROP2	ABRSLT	シェル FEM 計算結果読取
Crack Path(Shell)				シェルき裂経路・応力設定
Surface Crack(E_D)	PRSTR1			表面き裂垂直応力計算(要素)
Surface Crack(G_D)	PRSTR2			表面き裂垂直応力計算(節点)
(Surface+)TTC(E)	C13ELM	C13SRT	PTSTR1	貫通き裂垂直応力計算(要素)
(Surface+)TTC(G)	C14GRD	C14SRT	PTSTR2	貫通き裂垂直応力計算(節点)
(Surface+)TTC(A)	STRGRF	CRKPAT	PTSTR3	貫通き裂垂直応力計算(自動)
Crack Path(Solid)				ソリッドき裂経路・応力設定
Surface Crack(E_D)	C21ELM	C21SRT	SLSTR1	表面き裂応力計算準備(要素)
Surface Crack(G_D)	C22GRD	C22SRT	SLSTR2	表面き裂応力計算準備(節点)
Stress(Solid)	NSR101	NSROP2	ABRSLT	ソリッド FEM 計算結果読取
	SLSTR3			表面き裂垂直応力計算
Conditions/ Pre-Cal/ Surface Crack/ (TTC/ (Surface+TTC)/ Auto (Manual)	SGDPDY	SGDPST	SGDPRS	板厚方向応力分布算出
	ASPTDY			表面き裂アスペクト比変化
	AKSURF			表面き裂 a-K 関係算出
	SGTHRG			貫通き裂応力分布算出
	AKTHRG			貫通き裂 a-K 関係算出
	AKSFTH			遷移領域 a-K 関係算出
	EQVSTR			等価分布応力算出
Graph Plot				計算データのグラフ表示
FLARP				疲労寿命計算 (FLARP 起動)
Graph Plot				計算結果のグラフ表示
File Output				計算結果のファイル出力
Weld Path				溶接残留固有ひずみ算出
FEM data Create	NSIOUT	ABIOUT		溶接残留応力計算モデル出力

注 ; () 内青字記載は別メニュー選択を併記

() 内E表記はElementの略記、G表記はGridの略記、D表記はDirectionの略記、A表記はAutoの略記、TTC表記はThrough Thickness Crackの略記

2-5 データベースとの接続

疲労寿命計算等に必要情報のデータベースからの取り込みやデータベースへのデータ追加を可能にするよう、材料定数、荷重条件、アスペクト比、K 値、及び溶接残留応力算出用の固有ひずみの各データベースとの接続機能を作成した。

(1) 固有ひずみデータベース

固有ひずみデータベースは、2-4 節に示した溶接残留応力算出 FEM プリ機能で用いる。

固有ひずみデータベースとの接続機能は、既登録の溶接継手種類を指定して、固有ひずみ算出式のパラメータ値を取り込む機能、及びデータベースに固有ひずみデータ追加する機能とした。

(2) 材料定数データベース

材料定数データベースとの接続機能は、疲労寿命計算で必要となる弾性係数、ポアソン比、静的降伏応力、繰返し荷重下の降伏応力、結晶粒径、き裂伝播則定数等の材料定数を、材料名を指定して材料定数の登録データを取り込む機能、及びデータベースに材料定数データを追加する機能とした。

(3) 荷重条件データベース

荷重条件データベースとの接続機能は、疲労寿命計算で必要となる荷重条件を、荷重条件名を指定して、荷重条件の登録データを取り込む機能、及びデータベースへ荷重条件データを追加する機能とした。

(4) アスペクト比データベース

アスペクト比データベースは、2-4 節に示した表面き裂アスペクト比変化の算出機能を用いないで、アスペクト比変化をデータベース登録データから設定する場合に用いる。

アスペクト比データベースとの接続機能は、アスペクト比変化名を指定してアスペクト比変化の登録データを取り込む機能、及びデータベースへアスペクト比変化のデータを追加する機能とした。

(5) K 値算出式データベース

K 値算出式データベースは、2-4 節に示したき裂長さとの関係の設定機能を用いないで、き裂長さとの関係をデータベース登録算出式から設定する場合に使用する。K 値算出式データベースとの接続機能は、K 値算出式名を指定するとともに、算出式のパラメータを入力して、DLL 化した K 値算出式を起動することで、き裂長さとの関係の関係を算出する機能とした。

第3章 本論 - 2

3-1 データベースの構築

3-1-1 本研究開発部分の概要

疲労寿命計算に必要な材料定数データ、表面き裂アスペクト比データ、K 値算出式データ、及び溶接残留応力算出に用いる固有ひずみデータを、文献調査、訪問調査、及び試験の実施により取得して、外注で作成したデータベースシステムを用いてデータベース化した。なお、疲労寿命計算に必要な荷重条件データについては、使用者が独自データを登録するデータベース機能の提供のみとした。

3-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

設計現場で活用できる高精度疲労寿命予測システムとするためには、多種多様な疲労き裂の問題に対応できるシステムの開発が課題になる。本研究開発部分では、疲労寿命計算に必要な材料定数、荷重条件、表面き裂アスペクト比、K 値算出式、及び固有ひずみのデータの内、荷重条件データ除くデータを使用者にデータベースとして提供すること、また、使用者が独自データをデータベースに追加できるようにすることで、広範な疲労き裂問題に対応できるシステムの構築を可能にした。

3-1-3 本研究開発部分の成果

広範な疲労き裂問題に対応できるシステムとすることを目標に、以下の各データベースを構築した。

固有ひずみデータベースは、溶接残留応力算出FEMプリ機能における条件設定とデータ入力を容易にするため、また、各種溶接継手の溶接残留応力の算出に対応可能とするため、溶接継手の形式に応じた固有ひずみ算出式のパラメータ値を用意した。

材料定数データは、各種材料に対する疲労寿命計算を可能にするため、材料種に応じた機械的特性とき裂伝播則定数のデータを用意した。

アスペクト比データは、各種溶接継手部に生じる表面き裂の疲労寿命計算を可能にするため、溶接継手の形式に応じたアスペクト比変化のデータを用意した。

K値算出式データは、種々のき裂形態に対する疲労寿命計算を可能にするため、き裂形態や負荷条件に応じたK値算出式を用意した。

データベースは、3-2節に示す格納データの調査と3-3節に示すデータの格納の実施により構築した。

3-2 格納データの調査

3-2-1 固有ひずみデータ

固有ひずみデータは、溶接残留応力の算出に用いる固有ひずみ算出式のパラメータ値を文献調査により収集し、データベース化が可能なように収集データを整理した。

上記の調査により、突合せ溶接と隅肉溶接の2種の溶接形態に対応する固有ひずみ算出式のパラメータ値を取得した。

3-2-2 材料定数データ

材料定数データは、疲労寿命計算に用いる材料の機械的特性とき裂伝播則定数を文献調査、訪問調査、及び試験の実施により収集し、データベース化が可能なように収集データを整理した。

訪問調査は、独立行政法人 物質・材料研究機構を訪問し、材料定数に関する最新情報やデータを調査した。調査結果は次のようである。

- ・物質・材料研究機構 は、クリープ、金属組織、疲労、腐食、宇宙材料強度等に関する世界最大級の物質・材料データベース「NIMS 物質・材料データベース」を構築しており、このデータベースは、Web および印刷物で一般に公開している。
- ・「疲労データベース」は、「NIMS 物質・材料データベース」の一部で、国産実用材料 51 種、バネ鋼・低合金鋼などの高強度鋼、フェライト系・オーステナイト系などの耐熱鋼、およびチタン合金等についての疲労特性データが収録されている。
- ・「疲労データベース」のうち、き裂伝播特性に関するデータは以下の7種で、応力拡大係数範囲 K を規準とするき裂伝播特性が収録されている。

溶接構造用圧延鋼 SM50B 突合せ溶接継手

溶接構造用 800N/mm² 級高張力鋼突合せ溶接継手

ボイラー及び圧力容器用炭素鋼板 SB42 突合せ溶接継手

圧力容器用鋼板 SPV50(Si-Mn, 500N/mm²YS) 突合せ溶接継手

熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP(18Cr-8Ni) 突合せ溶接継手

ボイラ、圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV2-2NT(1Cr-0.5Mo) 突合せ溶接継手
(中温度域)

ボイラ、圧力容器用炭素鋼 SB450 突合せ溶接継手 (中温度域)

試験は、引張試験と疲労試験を実施した。引張試験は、鋼材の機械的特性（弾性係数、降伏応力、引張強さ、破断伸び）を計測した。

引張試験の概要は次のようである。

鋼材種：薄板鋼板の軟鋼材と高張力鋼材

試験片：JIS 5 号試験片（長崎大学保有の鋼板を加工して製作）

試験数：軟鋼材 2 片、高張力鋼材 2 片の計 4 片

試験機：長崎大学の引張試験機を使用

計測法：試験片に準静的引張力を漸増負荷して、荷重 - ひずみ関係を計測

結果から応力 - ひずみ関係を求めて弾性係数、降伏応力、引張強さを算出

試験片破断後の変形量から破断伸びを計測

また、疲労試験は、鋼材の疲労き裂伝播特性を計測し、き裂伝播則定数 $C_{RP,MRP}$ （疲労寿命計算に用いる材料定数）を取得した。疲労試験の概要は次のようである。

鋼材種：薄板鋼板の軟鋼材（通常強度の鋼材）と高張力鋼材（高強度の鋼材）

試験片：帯板の端部き裂試験片（長崎大学保有の鋼板を加工して製作）

試験数：軟鋼材 5 片、高張力鋼材 5 片の計 10 片

試験機：長崎大学の疲労試験機を使用

計測法：試験片に一定振幅の繰返し荷重を負荷して、疲労き裂長さとし繰返し回数を計測し、疲労き裂の成長曲線を取得

き裂部に貼付した 5 連ひずみゲージでき裂先端のヒステリシスループ（荷重とひずみの関係）を計測

き裂成長曲線からき裂伝播速度を算出、ヒステリシスループからRPG荷重（引張塑性域が生じ出す時の荷重）を算出して、き裂伝播則定数 $C_{RP,MRP}$ を取得

以上のような調査、及び試験の実施により、計 15 種の材料定数データを取得した。

3-2-3 アスペクト比データ

表面き裂のアスペクト比変化の算出法や実験結果について文献調査を行った。調査の結果、表面き裂のアスペクト比変化についての既往研究は少なく、溶接線に沿う箇所が生じる表面き裂のアスペクト比変化についての 3 例の実験結果を得るに留まった。

3-2-4 K 値算出式データ

K 値データは、種々のき裂形態に対する K 値算出式を文献調査により収集し、K 値算出式のデータベース化とライブラリ化が可能なように収集データを整理した。また、K 値計算外部プログラムについて訪問調査を行った。

文献調査の結果、以下に示す対象部材、き裂形態、及び荷重形態に対応する 212 種の K 値算出式を取得した。

対象部材：板材（有限板、無限板）、パイプ材、丸棒材

き裂形態：表面き裂、板厚貫通き裂（片側き裂、両側き裂、中央き裂）

荷重形態：引張、曲げ

訪問調査は、財団法人電力中央研究所を訪問し、表面き裂の K 値計算プログラム SCAN の基本システムへの組み込みについて交渉した。しかし、著作権者である財団法人電力中央研究所の承諾が得られず、SCAN の基本システムへの組み込みは断念した。より精密な K 値算出法のシステム化は、今後の課題として次年度以降に取り組む。

3-3 データの格納

3-3-1 固有ひずみデータ

固有ひずみデータは 3-2-1 節の調査で取得した、突合せ溶接と隅肉溶接の 2 種の溶接形態に対応する固有ひずみ算出式のパラメータ値を、固有ひずみデータベースへ格納した。

固有ひずみの格納データを表 3-4.1 に示す。

3-3-2 材料定数データ

材料定数データは、3-2-2 節の調査、及び試験で取得した 15 種の材料定数データのうち、疲労寿命計算のテストに用いる 5 種について材料定数データベースへ格納した。

3-3-3 アスペクト比データ

溶接線に沿う箇所が生じる表面き裂のアスペクト比について、3-2-3 節の調査で得られた実験結果を分析した。その結果、これら実験結果は限定された板厚条件や荷重条件下で得られたもので、アスペクト比変化の統一的な取扱いを検討するには、データ数が不十分と判断された。アスペクト比データのデータベースへの追加は、今後の課題として次年度以降に取り組む。

3-3-4 K 値算出式データ

K 値算出式データは、3-2-4 節の調査で取得した 212 種の算出式のうち、使用頻度が高いと考えられる 5 種を選定してライブラリ化するとともに、ライブラリを管理するためのデータベースを作成した。

第 4 章 本論 - 3

4-1 総合テスト

4-1-1 本研究開発部分の概要

溶接構造物の高精度疲労寿命予測法の開発における、製品版プロトタイプとなる基本システムの動作テスト、及び寿命計算テストを実施した。

テスト用の FEM 構造モデルは次の 4 種を作成した。また、これらモデルの FEM 解析で得られた結果を、テスト用の FEM 解析結果とした。

モデル 1：角回し溶接継手を模擬する試験片モデル（シェル要素：板状の要素）

モデル 2：ビードオン溶接を模擬する試験片モデル（ソリッド要素：立体状の要素）

モデル 3：隅肉溶接継手部を有する船体実構造の部分モデル（シェル要素）

モデル 4：隅肉溶接継手部を有する自動車車体の部分モデル（シェル要素）

4-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

開発した高精度疲労寿命予測システムの製品版プロトタイプの動作テストと寿命計算テストを実施し、システムの正常動作を確認するとともに今後の課題を明確にした。

4-1-3 本研究開発部分の成果

動作テストは、FEM 解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続する一連のシステム動作を 4-1-1 節に示したモデル 1 ~ 4 を用いてモデル表示や一連動作の正常処理を確認した。

寿命計算テストは、4-1-1 節に示したモデル 1 ~ 2 を用いた疲労寿命計算を実施し、疲労寿命プログラム、及び寿命計算結果のグラフ出力機能の正常稼働を確認した。

4-2 開発システムの動作テスト

作成したテスト用の FEM 構造モデルの例を図 4-2.1 ~ 図 4-2.2 に示す。

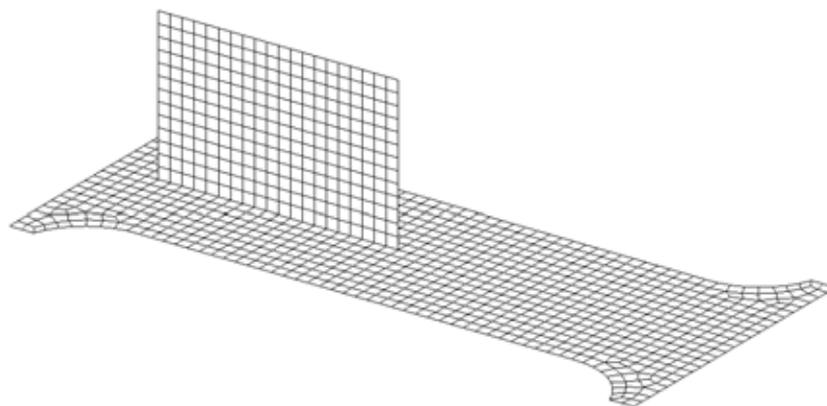


図 4-2.1 モデル 1 : 角回し溶接継手を模擬する試験片モデル (シェル要素)
(市販の FEM プリ・ポストツール MSC.Patran で表示)

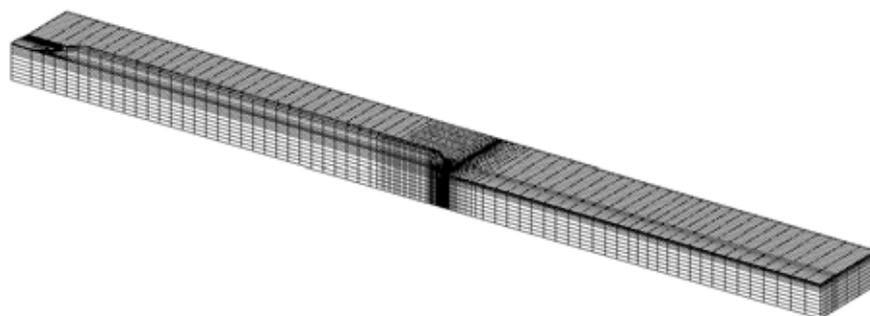


図 4-2.2 モデル 2 : ビードオン溶接を模擬する試験片モデル (ソリッド要素)
(市販の FEM プリ・ポストツール MSC.Patran で表示)

開発システムのグラフィック機能による FEM 構造モデルの表示例を図 4-2.3、図 4-2.4 に示す。これら表示と図 4-2.1、図 4-2.2 に示す市販の FEM プリ・ポストツールの表示を比較することでグラフィック機能の正常動作を確認した。グラフィック機能においてはモデルの回転、拡大・縮小等のグラフィック操作が迅速かつ正常に動作することを確認し、FEM 解析モデルの読み込みに始まる一連のシステム動作が、正常に動作することを確認するとともに、疲労寿命計算プログラムに予定のデータが接続されることを確認した。

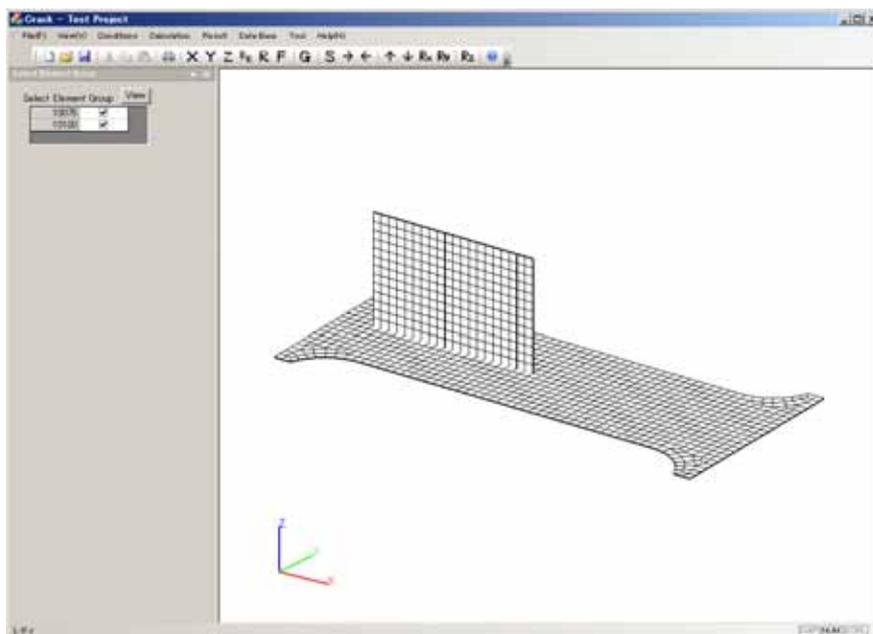


図 4-2.3 FEM 構造モデルのグラフィックウィンドウ表示 (モデル 1)

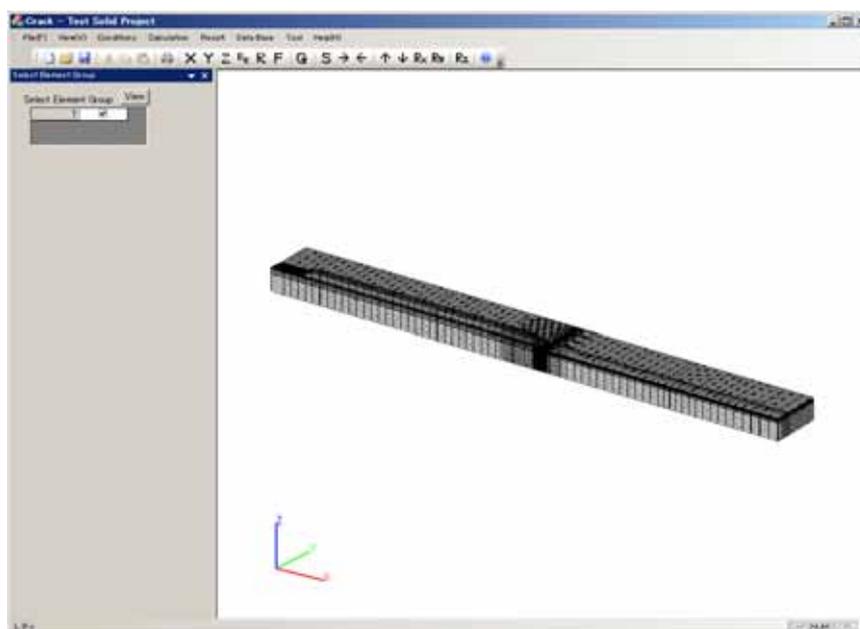


図 4-2.4 FEM 構造モデルのグラフィックウィンドウ表示 (モデル 2)

4-3 寿命計算のテスト

シェル要素モデル1を用いた寿命計算テストを実施し、疲労寿命計算プログラム、及び寿命計算結果のグラフ出力機能をテストした。なお、荷重条件は一定振幅荷重とした。

寿命計算結果のき裂成長曲線（き裂長さと繰返し数の関係）をグラフ出力図 4-3.1 に、き裂長さと各種荷重の関係をグラフ出力図 4-3.2 に示す。

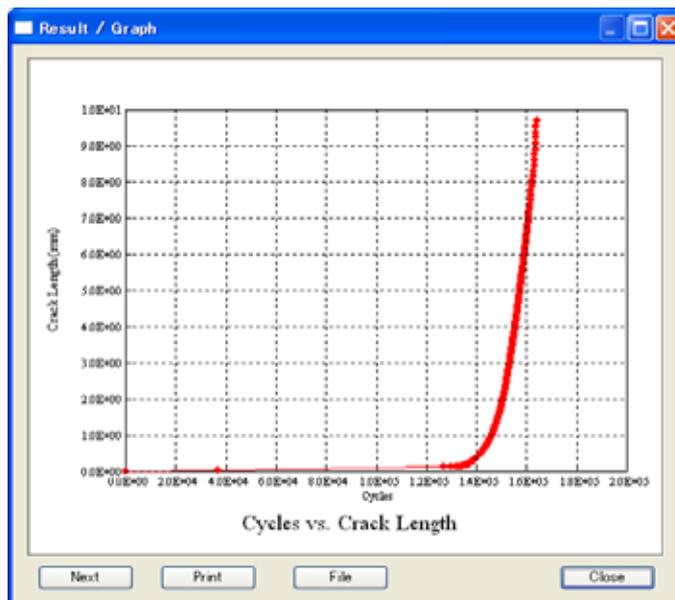


図 4-3.1 き裂成長曲線（モデル1）

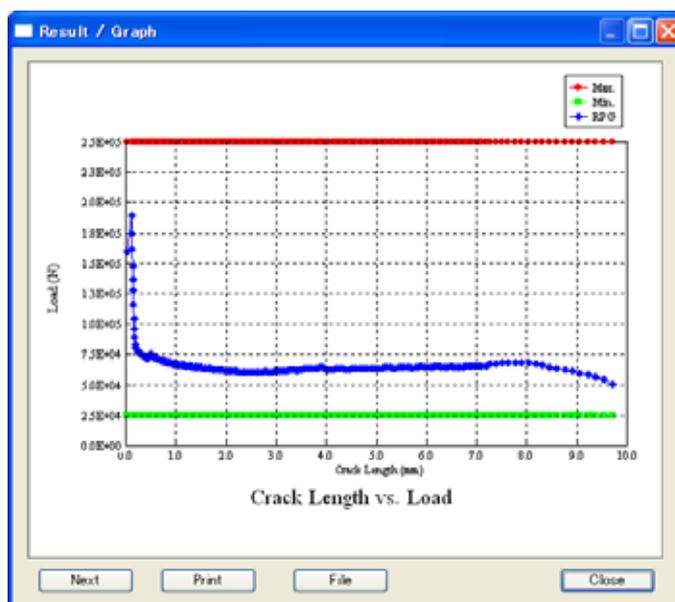


図 4-3.2 き裂長さと各種荷重の関係（モデル1）

また、き裂長さと各種 K 値の関係をグラフ出力図 4-3.3 に示す。

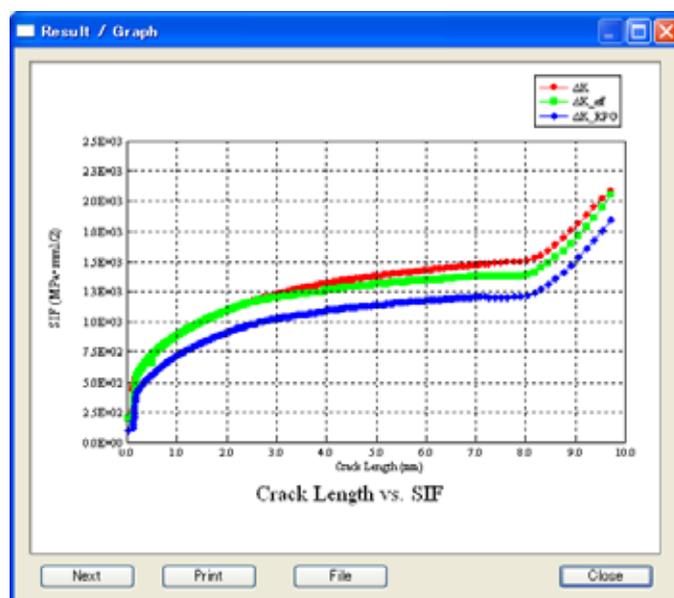


図 4-3.3 き裂長さと各種 K 値の関係 (モデル 1)

以上に示したように、グラフ出力機能が正常に稼働することを確認した。

また、モデル 1 を用いて得られた計算結果は、九大で開発した研究用プログラム(FLARP)の計算結果と一致することを確認した。このことは、モデル 2 を用いたテストにおいても同様に確認した。

このように疲労寿命計算プログラムの正常動作を確認できたが、モデル 1、モデル 2 の両者において、プログラムは表面き裂(板材の表面から生じる半楕円状の疲労き裂)が板厚を貫通する直前に停止した。このことから表面き裂に引き続く板厚貫通き裂(板厚を貫通した状態で伝播する疲労き裂)の疲労寿命計算が正常に計算できるようなプログラム改造が必要なことを確認した。この問題については、今後の課題として次年度以降に取り組む。

第5章 全体総括

5-1 研究開発の成果

設計現場で活用できるソフトウェアシステムを開発すること目標に、メインコントロールシステム、疲労寿命計算プログラム、プリ・ポストサブシステム群/プログラム群、及びデータベース接続機能からなる基本システムの作成と、材料定数データ、表面き裂アスペクト比データ、K 値算出式データ、及び溶接残留応力算出に用いる固有ひずみデータのデータベースの構築により、高精度疲労寿命予測システムの製品版プロトタイプを作成した。

基本システムは、設計現場で活用できるソフトウェアシステムの根幹をなすものであり、FEM解析結果を疲労寿命計算プログラムに接続するための基本プロセスに対応する一連のシステム動作を可能にした。

また、データベースにより、疲労寿命計算に必要な材料定数、荷重条件、表面き裂アスペクト比、K 値算出式、及び固有ひずみのデータの内、荷重条件データ除くデータを使用者に提供すること、また、使用者が独自データをデータベースに追加できるようにすることで、広範な疲労き裂問題に対応できるシステムを実現した。なお、データベースは、文献調査等により、固有ひずみデータ 2 種、材料定数データ 15 種、アスペクト比データ 3 種、K 値データ 212 種のデータを収集し、収集データを分析、選定して、固有ひずみデータ 2 種、材料定数データ 5 種、K 値データ 5 種をデータベース化した。

5-2 今後の課題

高精度疲労寿命予測システムの製品版プロトタイプにおける課題は次のようである。

- ・ データベースを活用して疲労寿命計算を実施する場合を始めとし、様々な疲労寿命計算の実施プロセスに対応するための機能拡張
- ・ ソフトウェア製品に不可欠となるエラー処理やマニュアル整備
- ・ 疲労寿命計算のランダム変動荷重への対応（き裂発生過程の高精度化と計算高速化）
- ・ 表面き裂に引き続く板厚貫通き裂の疲労寿命計算が正常に計算できるようなプログラム改造
- ・ 表面き裂アスペクト比データのデータベースへの追加（溶接線に沿う箇所が生じる表面き裂の場合等）

以上のような課題の解決に向け、次年度以降も研究開発を継続実施して、3年間の法認定計画の完了後、速やかに高精度疲労寿命予測システム製品版をサンプル出荷する。また、サンプル出荷後は、ソフト販売・保守事業、及び疲労寿命計算サービス・コンサルティング事業を展開し、これら事業の収益から保守資金を確保し、高精度疲労寿命予測システムの改良を継続する。