

平成23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24年3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 実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化	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	6
2-1-3 本研究開発部分の成果	6
2-2 寿命計算プログラムの高精度化	6
2-3 寿命計算プログラムの計算高速化	8
第 3 章 本論－ 2	9
3-1 疲労き裂発生プロセスの検証試験	9
3-1-1 本研究開発部分の概要	9
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	9
3-1-3 本研究開発部分の成果	9
3-2 検証試験	9
3-2-1 試験概要	9
3-2-2 荷重条件	10
3-2-3 試験結果	10
3-3 開発プログラムによる疲労き裂発生解析の結果と実験結果の比較	12
第 4 章 本論－ 3	13
4-1 疲労き裂成長プロセスの検証試験	13
4-1-1 本研究開発部分の概要	13
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	13
4-1-3 本研究開発部分の成果	13
4-2 検証試験	13
4-2-1 試験概要	13
4-2-2 荷重条件	14
4-2-3 試験結果	14

4-3	開発プログラムによる疲労き裂成長解析の結果と実験結果の比較	16
第5章	本論－4	17
5-1	模型試験体を用いた検証試験	17
5-1-1	本研究開発部分の概要	17
5-1-2	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
5-1-3	本研究開発部分の成果	17
5-2	検証試験	17
5-2-1	試験概要	17
5-2-2	荷重条件	18
5-2-3	試験結果	18
5-3	開発プログラムによる疲労寿命解析の結果と実験結果の比較	19
第6章	本論－5	20
6-1	実用化に向けた整備	20
6-1-1	本研究開発部分の概要	20
6-1-2	プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ	20
6-1-3	本研究開発部分の成果	20
6-2	システム機能拡張	20
6-3	誤操作対応処置と利用マニュアル整備	21
6-4	総合テスト	21
6-4-1	総合テストの評価結果	22
第7章	全体総括	23
7-1	研究開発の成果	23
7-2	今後の課題	23

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^{注1)}の高機能化等

【3】実験による検証及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

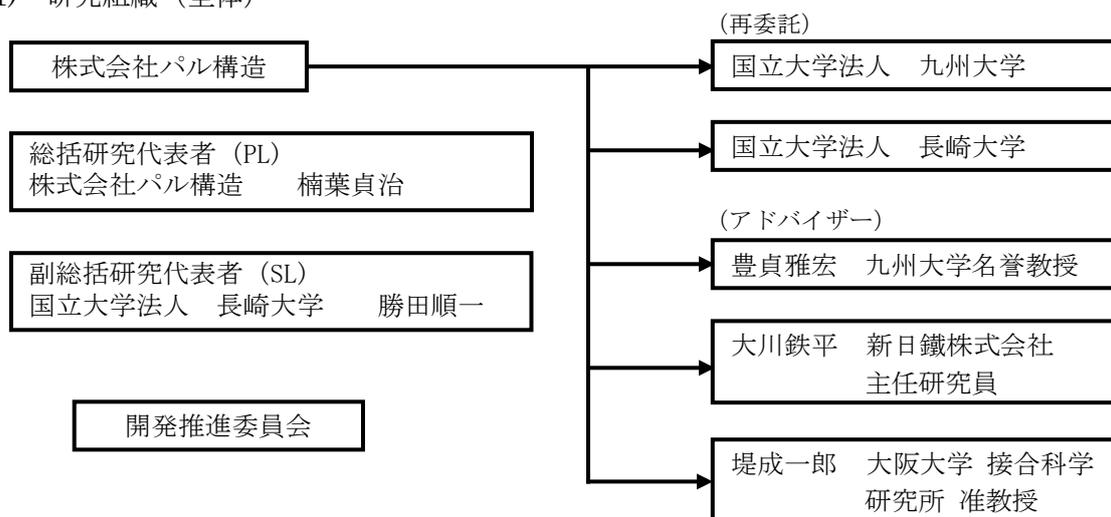
これら研究テーマのうち、【1】基本システムの開発と、【3-2】データベースの構築は、平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業で実施した。

平成22年度及び平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業においては、残された研究テーマである【2】FLARPの高機能化等、及び【3-1】寿命計算プログラムの実用化に必要な疲労試験について、以下の項目の研究開発を実施した。

- ① 実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化検討及びプログラム試作
- ② 疲労き裂発生プロセスの検証試験
- ③ 疲労き裂成長プロセスの検証試験
- ④ 模型試験体を用いた検証試験
- ⑤ 基本システムの機能拡張及び整備
- ⑥ 総合テスト

1-2 研究体制

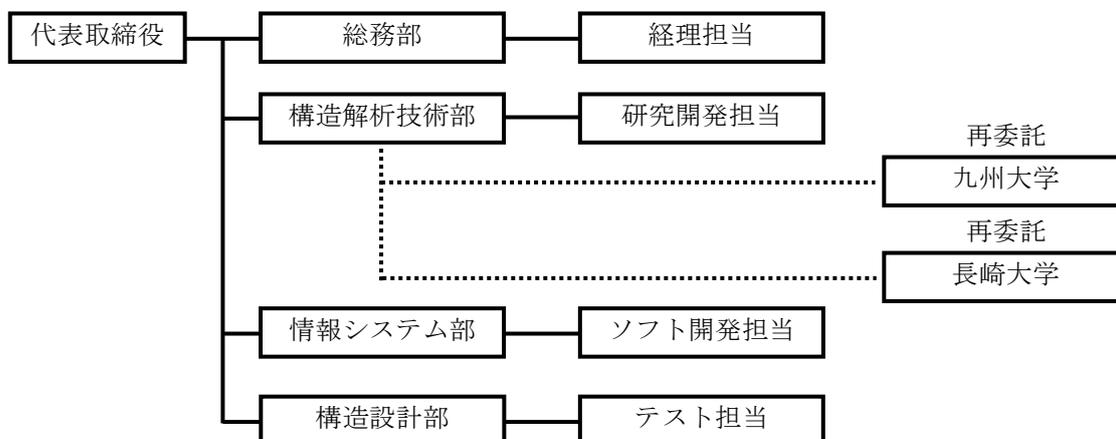
(1) 研究組織（全体）



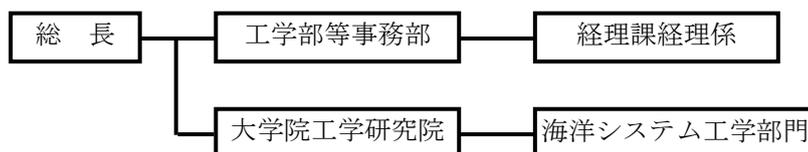
注1 FLARP：豊貞の考案したアルゴリズムに基づく研究用疲労寿命計算プログラム

(2) 管理体制

①【事業管理者】株式会社パール構造



②【再委託先】国立大学法人 九州大学



【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】株式会社パール構造

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容
河角 省治	構造解析技術部 取締役研究開発総括主管	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

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容
河角 省治	構造解析技術部 取締役研究開発総括主管	⑤, ⑥
楠葉 貞治	構造解析技術部 部長	①, ④, ⑤, ⑥
本田 貞光	構造解析技術部 次長	⑤, ⑥
岡田 公一	構造解析技術部 第二技術課 課長	①, ④, ⑤
伊藤 健志	構造解析技術部 第二技術課 主任	⑤, ⑥

濱村 敦美	構造解析技術部 第二技術課	①, ⑤
徳永 真也	情報システム部 システム二課 課長	⑤, ⑥
山下 章	情報システム部 システム二課 主任	⑤, ⑥
清田 真司	構造設計部 次長	⑤, ⑥

【再委託先】 国立大学法人 九州大学

①研究員

氏名	所属・役職	実施内容
後藤 浩二	大学院工学研究院 准教授	②
村上 幸治	大学院工学研究院 技術専門職員	②

【再委託先】 国立大学法人 長崎大学

①研究員

氏名	所属・役職	実施内容
勝田 順一	大学院工学研究科 准教授	③

(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 取締役研究開発総括主管 河角 省治

【再委託先】 国立大学法人 九州大学

(経理担当者) 工学部等事務部経理課経理係 係長 藪口 剛士
(業務管理者) 工学研究院海洋システム工学部門 准教授 後藤 浩二

【再委託先】 国立大学法人 長崎大学

(経理担当者) 工学部支援課 管理係長 都々木 信一郎
(業務管理者) 大学院工学研究科 研究科長 石松 隆和

(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 (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
大川 鉄平	新日本製鐵株式会社 技術開発本部 主任研究員	アドバイザー
堤 成一郎	大阪大学 接合科学研究所 准教授	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 部長	PL
勝田 順一	長崎大学 大学院工学研究科 准教授	SL
後藤 浩二	九州大学 大学院工学研究院 准教授	
岡田 公一	株式会社パル構造 構造解析技術部 課長	
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	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

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
【2】FLARPの高機能化等	
① 実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化検討及びプログラム試作	疲労寿命計算プログラムの高精度化と計算高速化手法を検討し、検討結果に基づいて実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版を作成した。
【3-1】寿命計算プログラムの実用化に必要な疲労試験	
② 疲労き裂発生プロセスの検証試験	疲労き裂の発生段階における実用版疲労寿命計算プログラムの計算手法の妥当性を検証するための比較データを取得した。また、き裂の発生挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。
③ 疲労き裂成長プロセスの検証試験	疲労き裂の成長段階における実用版疲労寿命計算プログラムの計算手法の妥当性を検証するための比較データを取得した。また、き裂の成長挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。
④ 模型試験体を用いた検証試験	実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化計算手法の妥当性検証データを取得した。また、き裂の発生・成長挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。
実用化に向けたシステム整備	
⑤ 基本システムの機能拡張及び整備	高精度疲労寿命予測システムの実用化に向けて基幹となる基本システムの機能拡張と、製品化に不可欠となる誤操作対応処理やマニュアルの整備を実施した。
⑥ 総合テスト	高精度疲労寿命予測システム全体の機能性、及び操作性についてテストを実施して、システムの正常動作を確認するとともに、設計担当者が容易に使えるかを確認し、システムのさらなる改善に向けた課題を抽出した。
全体成果： 以上により、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版の試作、及びソフトウェアシステムの製品化に向けたシステムの機能拡張やマニュアル整備等を完了した。	

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20号

株式会社パル構造 構造解析技術部 部長 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 実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化

2-1-1 本研究開発部分の概要

疲労寿命計算プログラムの高精度化と計算高速化に係る数理モデル、アルゴリズム、及び定式化を実施し、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版を作成した。

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

設計現場で実用的に使える高精度疲労寿命予測システムとするためには、溶接構造物に作用するランダムに変動する実働荷重を取り扱い可能にする必要があるとともに、実用上十分な計算速度を持つことが必要である。本研究開発部分は、ランダム変動荷重下の疲労寿命計算を可能にするような疲労寿命計算プログラムの高精度化と計算高速化とに係る数理モデル定式化を実施し、その定式化に基づいて実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版を作成することである。

2-1-3 本研究開発部分の成果

疲労寿命計算プログラムの高精度化は、ランダム変動荷重下における疲労き裂発生プロセス、及びき裂成長プロセスの取り扱いを可能にするように、ランダム変動荷重を疲労き裂の発生、成長に有効な実効荷重履歴に置き換えて取り扱う方法等を主に検討して数理モデル定式を構築した。さらに構築した数理モデル定式を基にコーディングを行い、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版を作成した。

疲労寿命計算プログラムの計算高速化は、疲労寿命計算においてき裂開閉口挙動を取り扱う数理モデルに、高次要素を適用して要素数を低減すること等を主に検討して数理モデル定式を構築した。さらに構築した数理モデル定式を基にコーディングを行い、実用版疲労寿命計算プログラムに組み込んだ。

2-2 寿命計算プログラムの高精度化

ランダム変動荷重下における疲労き裂の発生、成長の取り扱いを可能にするために、まず数理モデル、アルゴリズム、定式化を検討した。

図 2-2.1 にこれまでの寿命計算プログラムにおけるき裂成長計算の流れを示す。疲労き裂は、き裂先端部に繰返し荷重の最大荷重時に引張塑性域^{注1)}、最小荷重時に圧縮塑性域が形成され、繰返し塑性域が生じることで成長することが知られている。最小荷重時に圧縮塑性域が形成された直後は、以降に続くピーク荷重がこの最小荷重から RPG 荷重^{注2)}の荷

注1 塑性域：負荷時の変形が除荷時に完全復元する弾性ひずみに対して、材料の弾性変形能を超える負荷により除荷時に永久変形を生じるような塑性ひずみが生じている領域

注2 RPG 荷重：繰返し荷重の負荷過程で、き裂先端前方に引張塑性域が生じ始める時の荷重



図 2-2.1 き裂成長シミュレーションの流れ

重範囲内に位置し続ける限り、き裂成長には何ら寄与しない荷重サイクルとなる。したがって、最小荷重以降に続くピーク荷重が上記のき裂成長に寄与しない荷重範囲を離れる際に

case A : 初めて下限値（最小荷重）より小さくなる場合

case B : 初めて上限値（RPG 荷重）より大きくなる場合

に場合分けし、それぞれ図 2-2.2 に示すような荷重履歴の置き換えを行うものとする。

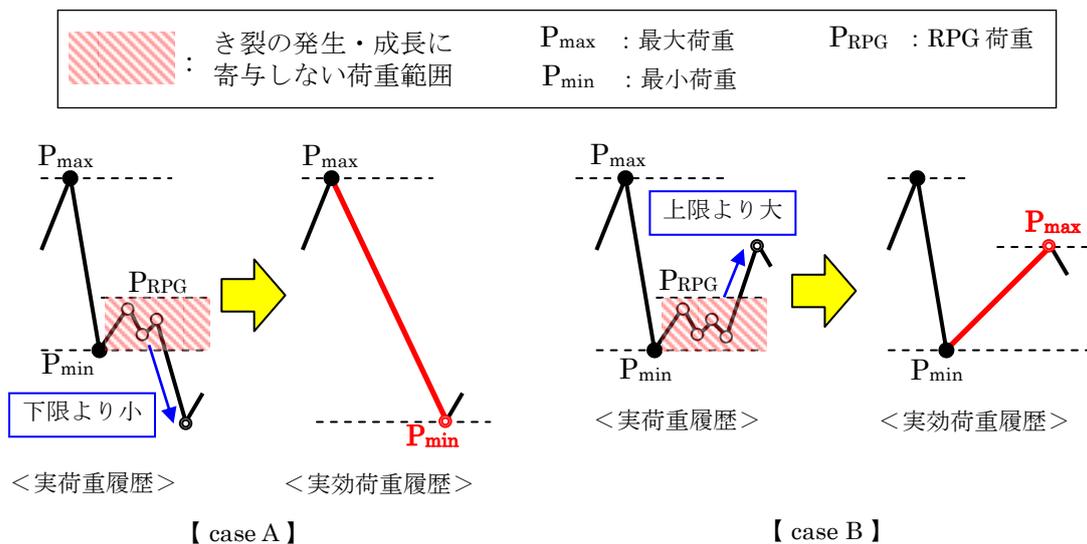


図 2-2.2 実効荷重履歴への置き換え（case A、case B）

注 1 RPG 荷重：繰返し荷重の除荷過程で、き裂先端前方に圧縮塑性域が生じ始める時の荷重

一方、最大荷重時に塑性変形を起こした場合（RPG 荷重より大きな荷重となった場合）、最大荷重から RCPG 荷重にいたる荷重変化では圧縮の塑性域は形成されず、疲労き裂の進展に何ら寄与しない。したがって、最大荷重から続くピーク荷重が上記のき裂成長に寄与しない荷重範囲を離れる際に

case C : 初めて下限値（RCPG 荷重）より小さくなる場合

case D : 初めて上限値（最大荷重）より大きくなる場合

とに分けて扱い、それぞれ図 2-2.3 に示すような荷重履歴の置き換えを行うものとする。

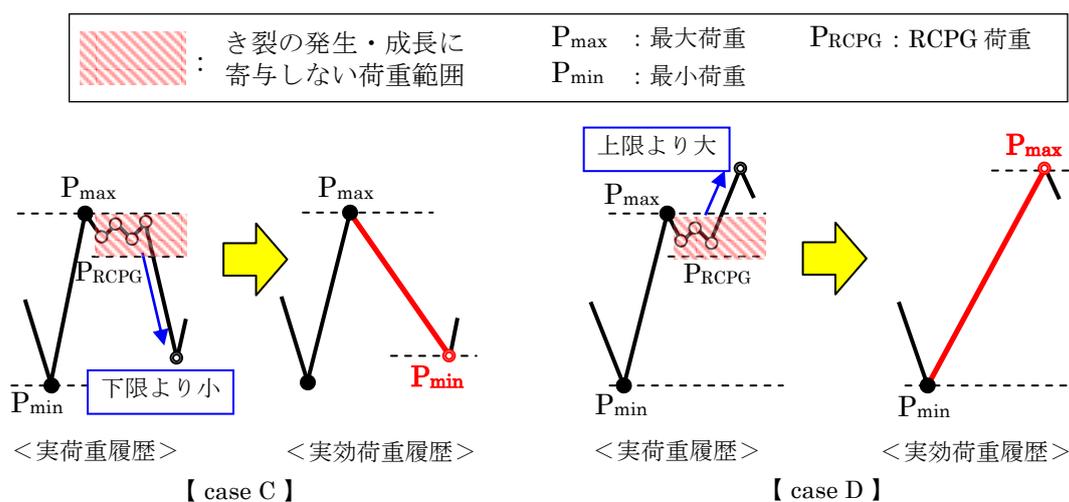


図 2-2.3 実効荷重履歴への置き換え（case C、case D）

以上のように、実際の荷重履歴をき裂の発生・成長に寄与する最大荷重・最小荷重の荷重対のみからなる実効荷重履歴に置き換えることにより、ランダム変動荷重下における疲労き裂の発生・成長を取り扱うことが可能となるような数理モデル定式を構築した。さらに構築した数理モデル定式に基づいてコーディングを行い、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版を作成した。

2-3 寿命計算プログラムの計算高速化

これまでの寿命計算プログラムで使用しているき裂開閉モデル^{注1)}では、各要素内は一定応力が作用すると仮定した定応力要素を用いて仮想き裂部を含めたき裂先端近傍を要素分割しており、き裂先端近傍の応力分布を表現するために細かく分割することが必要となっている。そこで寿命計算プログラムの計算高速化のために、少ない要素分割で応力分布やき裂開口変位を精度良く与えることができるように、高次要素を用いた数理モデル、アルゴリズム、定式を構築した。さらに構築した数理モデル定式に基づいてコーディングを行い、実用版疲労寿命計算プログラムに組み込んだ。

注1 き裂開閉モデル：疲労き裂の発生、成長を計算するための疲労き裂開閉挙動を取り扱う数理モデル

第3章 本論－2

3-1 疲労き裂発生プロセスの検証試験

3-1-1 本研究開発部分の概要

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化における疲労き裂発生プロセスの高精度化に係る数理モデル、アルゴリズム、定式化の妥当性確認、及び改良のための疲労試験を実施した。平成22年度は、疲労試験の試験片形状、計測法及びデータ評価手法を検討した。平成23年度は、平成22年度の成果を活用して疲労試験を実施した。

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

設計現場で実用的に使える高精度疲労寿命予測システムとするためには、溶接構造物に作用するランダムに変動する実働荷重を取り扱い可能にする必要がある。本研究開発部分は、実用版疲労寿命計算プログラムにおいて推定できる、疲労き裂発生段階におけるき裂成長曲線の妥当性を検証するための比較データの取得を行うことである。

3-1-3 本研究開発部分の成果

疲労き裂の発生段階における実用版疲労寿命計算プログラムの計算手法の妥当性を検証するための比較データを取得した。また、き裂の発生挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。

3-2 検証試験

3-2-1 試験概要

試験の様子を図3-2.1に示す。



図 3-2.1 試験の様子

3-2-2 荷重条件

荷重条件は、変動荷重履歴として、図 3-2.2 に示す三段のブロック荷重を与えた。

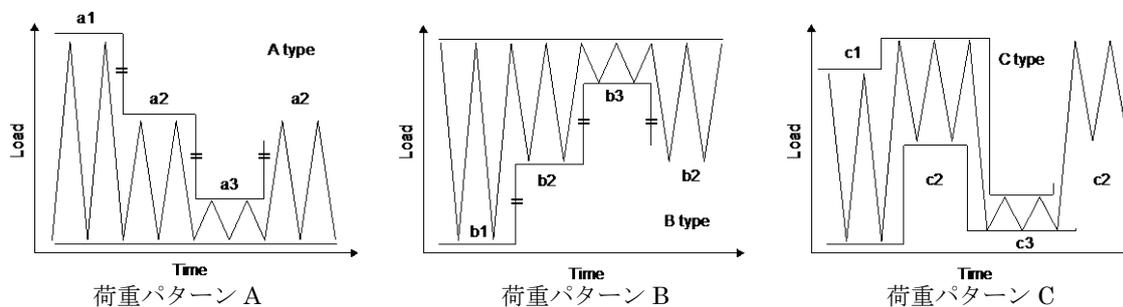


図 3-2.2 三段ブロック荷重の载荷パターン

3-2-3 試験結果

試験で観察された疲労き裂発生段階のき裂成長の様子を図 3-2.3 から図 3-2.5 に示す。

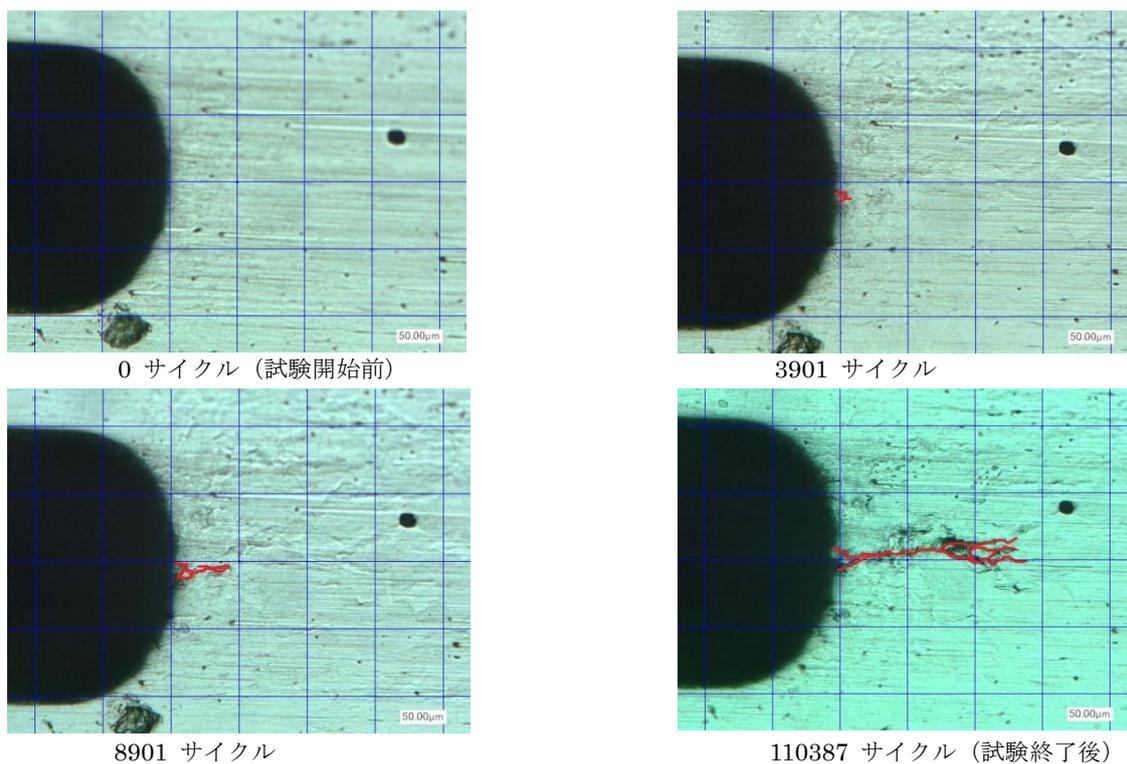


図 3-2.3 荷重パターン A の場合の疲労き裂観察画面の例

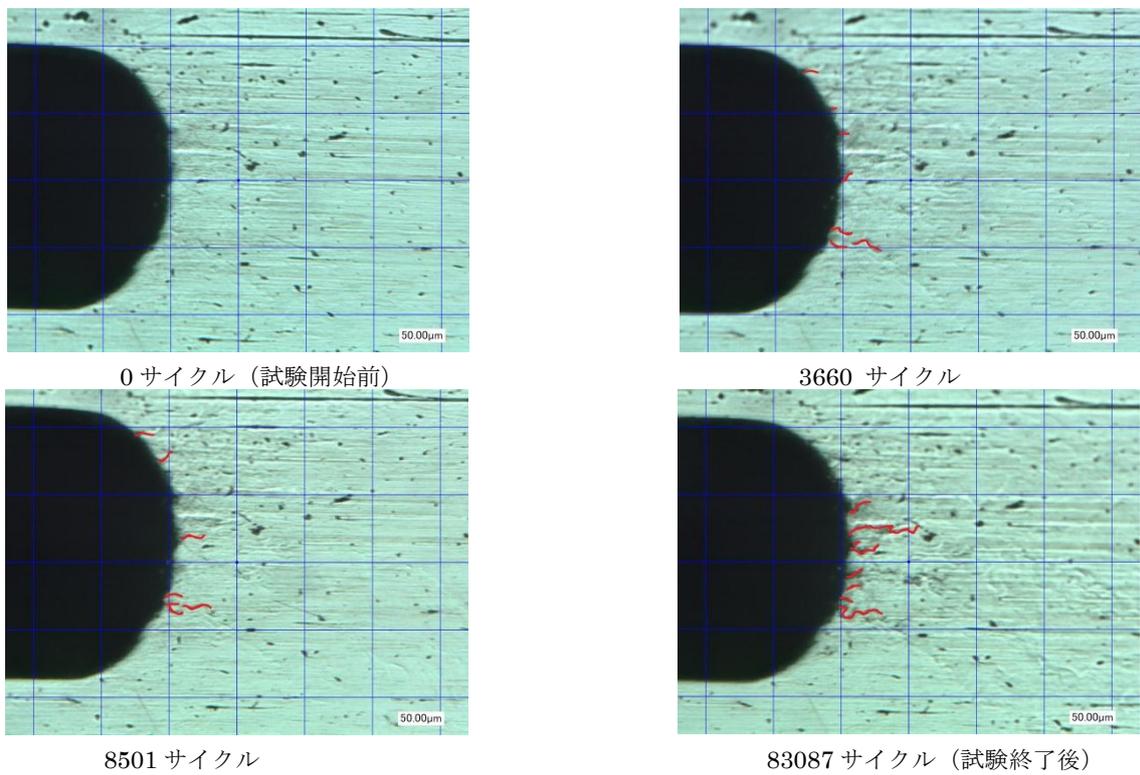


図 3-2.4 荷重パターン B の場合の疲労き裂観察画面の例

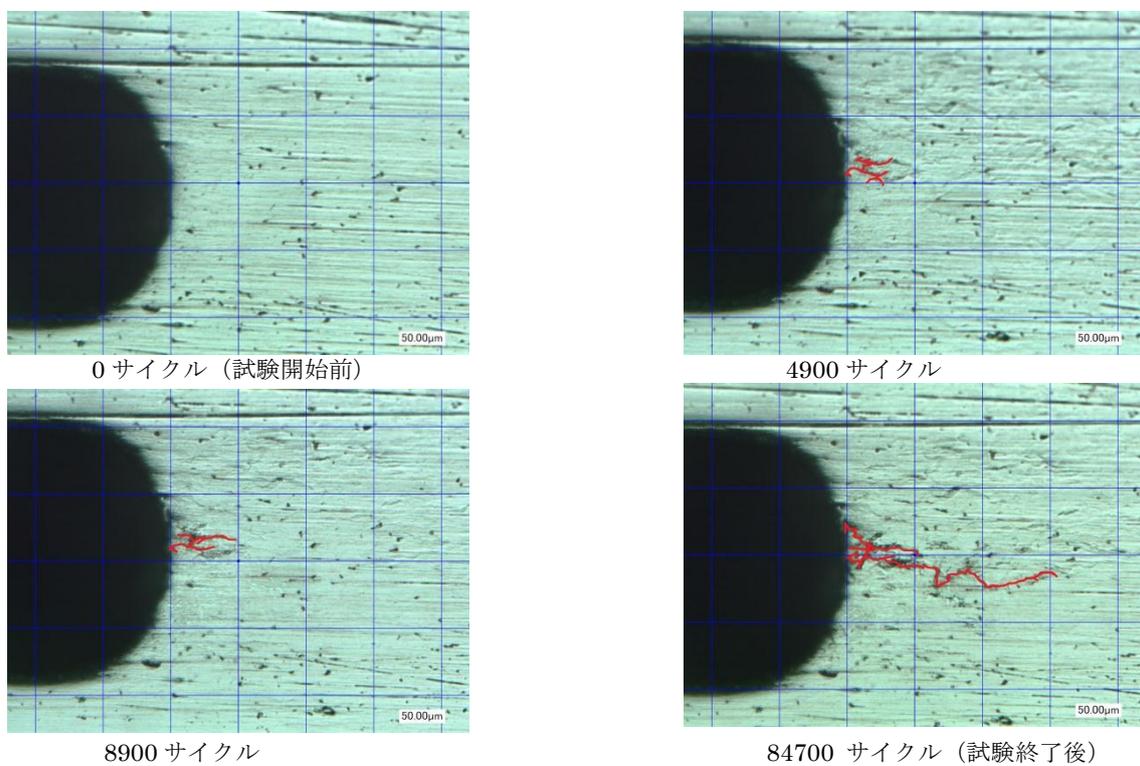
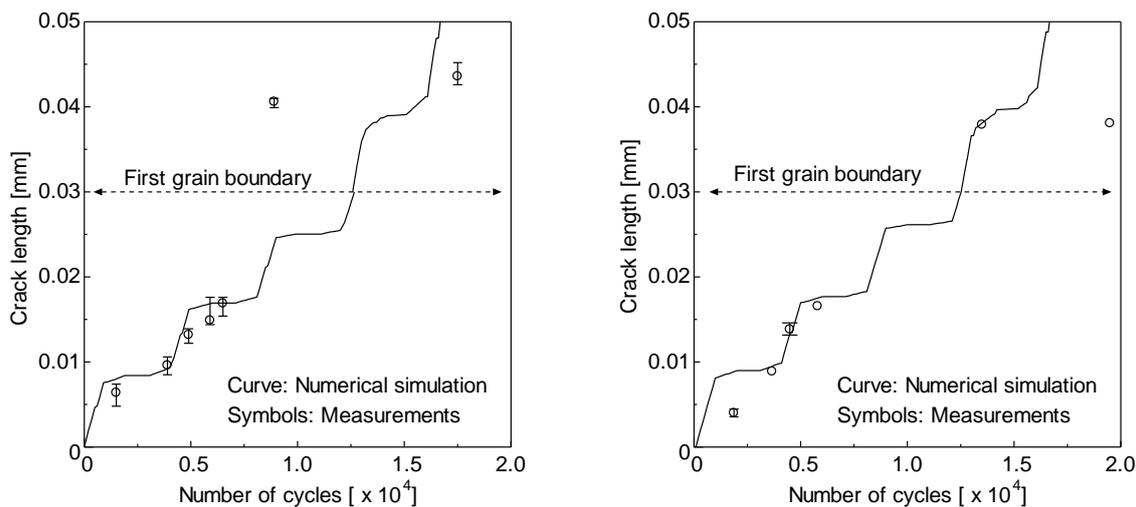


図 3-2.5 荷重パターン C の場合の疲労き裂観察画面の例

3-3 開発プログラムによる疲労き裂発生解析の結果と実験結果の比較

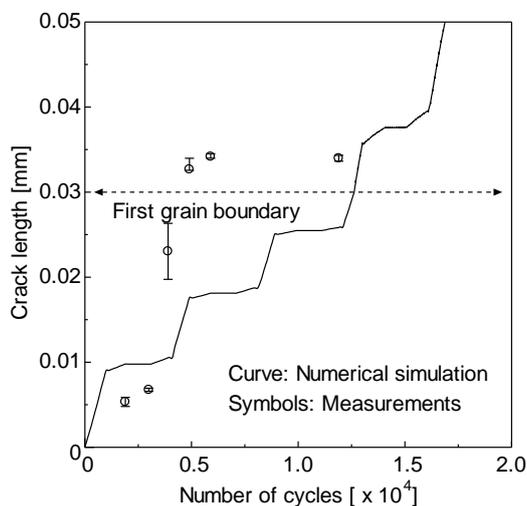
試験で計測された疲労き裂発生段階のき裂成長と、実用版疲労寿命計算プログラムにおける疲労き裂発生アルゴリズムで算出したき裂成長計算結果の比較を図 3-3.1 に示す。

図 3-3.1 から分かるように、き裂成長の計算結果は試験結果と良好に一致しており、実用版疲労寿命計算プログラムにおける疲労き裂発生アルゴリズムの妥当性が確認できた。



(A) 荷重パターン A の場合

(B) 荷重パターン B の場合



(C) 荷重パターン C の場合

図 3-3.1 き裂成長曲線についての疲労試験結果と寿命計算結果の比較

第4章 本論－3

4-1 疲労き裂成長プロセスの検証試験

4-1-1 本研究開発部分の概要

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化における疲労き裂成長プロセスの高精度化に係る数理モデル、アルゴリズム、定式化の妥当性確認、及び改良のための疲労試験を実施した。平成22年度は、疲労試験の試験片形状、計測法及びデータ評価手法を検討した。平成23年度は、平成22年度の成果を活用して疲労試験を実施した。

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

設計現場で実用的に使える高精度疲労寿命予測システムとするためには、溶接構造物に作用するランダムに変動する実働荷重を取り扱い可能にする必要がある。本研究開発部分は、実用版疲労寿命計算プログラムにおいて推定できる、疲労き裂成長段階におけるき裂成長曲線の妥当性を検証するための比較データの取得を行うことである。

4-1-3 本研究開発部分の成果

疲労き裂の成長段階における実用版疲労寿命計算プログラムの計算手法の妥当性を検証するための比較データを取得した。また、き裂の成長挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。

4-2 検証試験

4-2-1 試験概要

試験の様子を図4-2.1に、また、疲労き裂成長プロセスを計測するための試験システムを図4-2.2に示す。

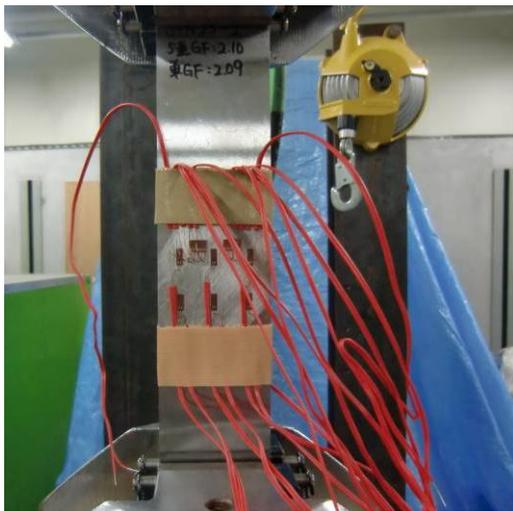


図 4-2.1 試験の様子



図 4-2.2 試験システム

4-2-2 荷重条件

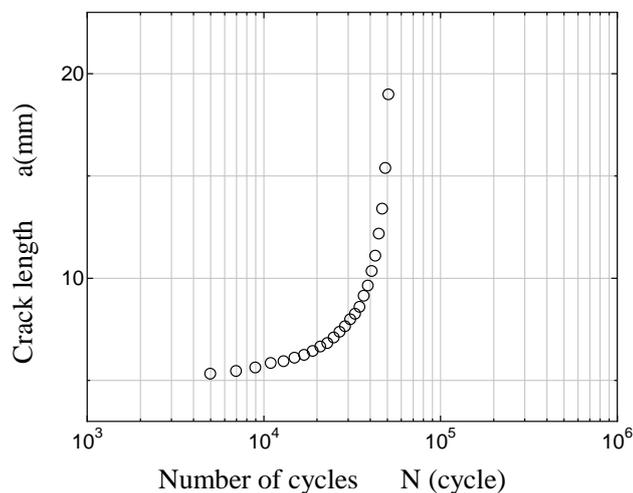
荷重条件を表 4-2.1 に示す。荷重条件は、一定振幅荷重の場合と一定振幅載荷中に過大荷重を負荷する場合の 2 種とした。

表 4-2.1 荷重条件

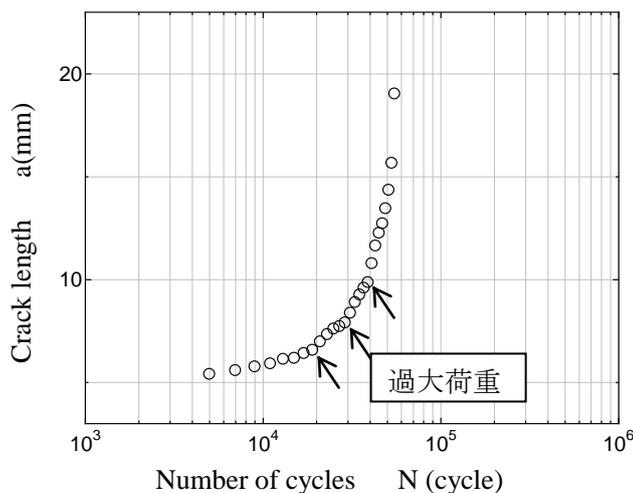
試験種別	荷重条件(kN)		回数 (cycle)	備 考
	一定荷重	過大荷重		
一定荷重	10.0-1.0	—	記録なし	51000 回までの計測データ有り
一定荷重 + 過大荷重	10.0-1.0	15.0-1.0	55,628	スパイクは、 20000-100-10000-100-10000-100-…

4-2-3 試験結果

一定振幅荷重の場合と一定振幅荷重載荷中に過大荷重が作用する場合のき裂成長曲線を 図 4-2.3 に示すように得た。



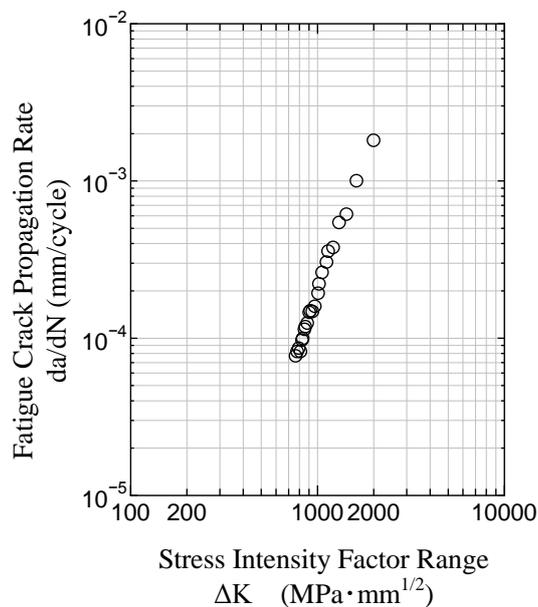
(A) 一定振幅荷重の場合



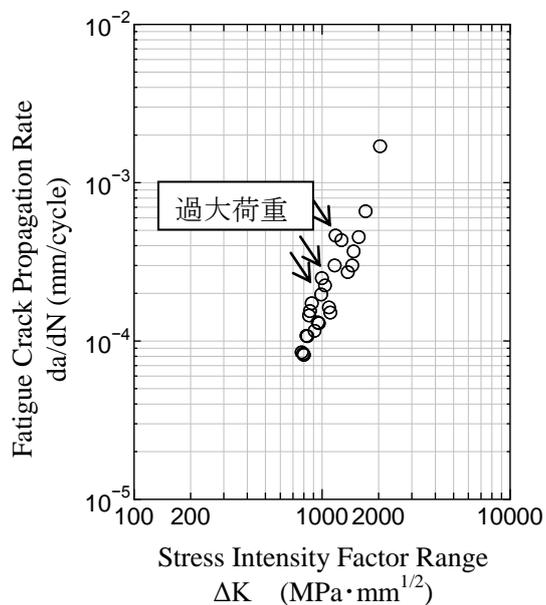
(B) 過大荷重が作用する場合

図 4-2.3 き裂成長曲線

また、一定振幅荷重の場合と一定振幅荷重载荷中に過大荷重が作用する場合について、き裂伝播の特性を表す、疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲^{注1)}の関係の計測結果を図4-2.4に示すように得た。



(A) 一定振幅荷重の場合



(B) 過大荷重が作用する場合

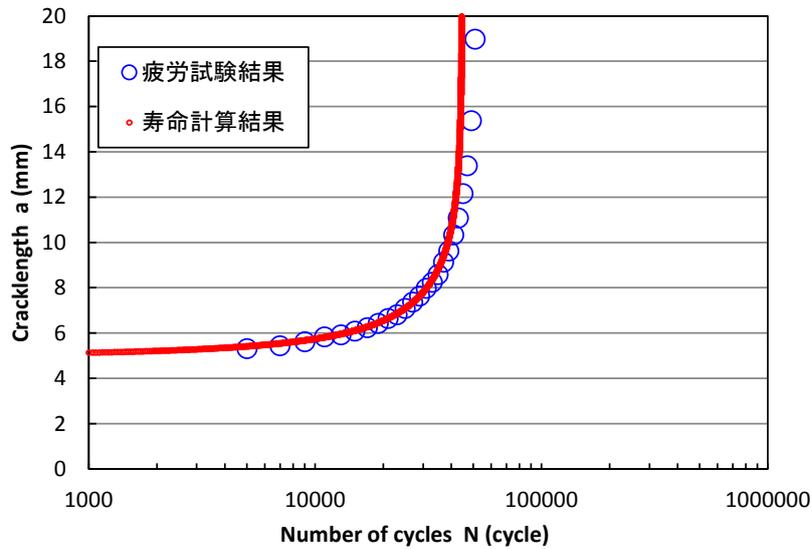
図 4-2.4 疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係

注1 応力拡大係数範囲：き裂の成長速度を規定する物理量

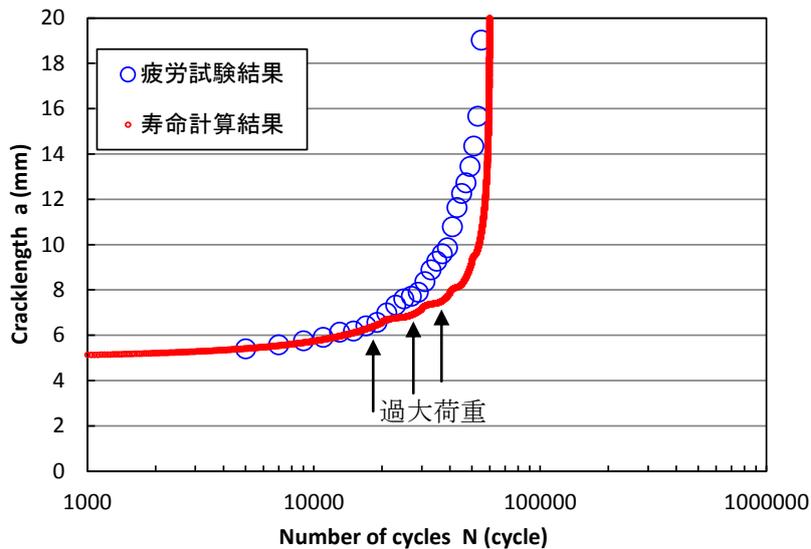
4-3 開発プログラムによる疲労き裂成長解析の結果と実験結果の比較

図 4-2.3 に示したき裂成長について、疲労試験結果と実用版疲労寿命計算プログラムによる寿命計算結果の比較を図 4-3.1 に示す。

一定振幅荷重の場合の寿命計算結果は疲労試験結果と良好に一致している。一方、過大荷重が作用する場合は、寿命計算結果における過大荷重の影響によるき裂伝播速度の低下の程度が、疲労試験結果に較べて大きいように見受けられる。今後、疲労き裂成長プロセスのさらなる高精度化に向けた、数理モデル、アルゴリズム、定式化の改良検討を補完研究として継続実施するものとする。



(A) 一定振幅荷重の場合



(B) 過大荷重が作用する場合

図 4-3.1 き裂成長曲線についての疲労試験結果と寿命計算結果の比較

第5章 本論－4

5-1 模型試験体を用いた検証試験

5-1-1 本研究開発部分の概要

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化における疲労き裂発生、成長プロセスの高精度化、計算高速化に係る数理モデル、アルゴリズム、定式化の妥当性確認と改良のため、また、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版、及び高精度疲労寿命予測システム全体の総合テストに供するため、溶接構造物の実機構造体部分を模擬する模型試験体を用いた試験を実施した。

5-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化における数理モデル、アルゴリズム、定式化の妥当性を検証するため、また、高精度疲労寿命予測システム全体の機能、操作の総合テストに供するためのデータが必要である。

本研究開発部分は、模型試験体を設計するとともに、模型試験体を用いた疲労試験等を実施して、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化に資するための検証用データ、及びシステム全体の総合テストに供するための試験データの取得を行うことである。

5-1-3 本研究開発部分の成果

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化計算手法の妥当性検証データを取得した。また、き裂の発生・成長挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。

5-2 検証試験

5-2-1 試験概要

模型試験体、及び疲労試験の様子を図 5-2.1 に示す。



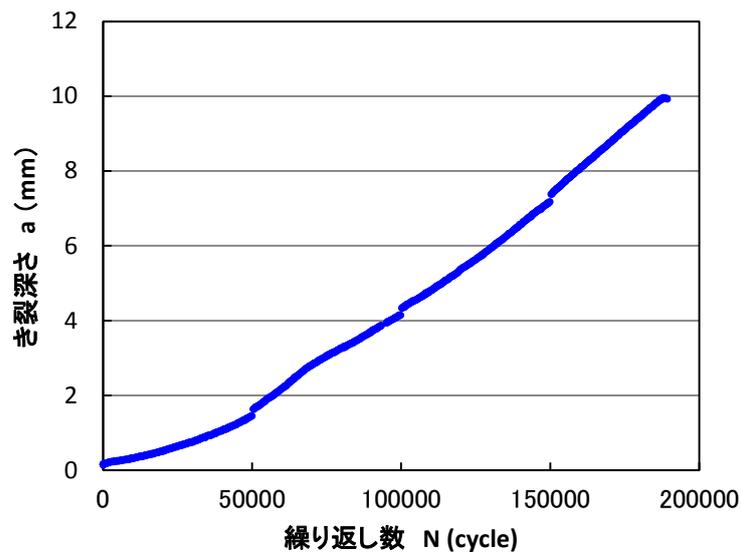
図 5-2.1 模型試験体、及び疲労試験の様子

5-2-2 荷重条件

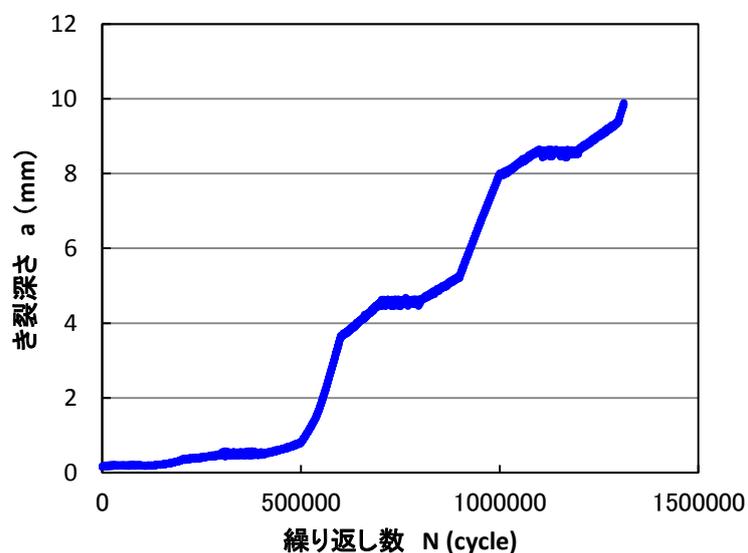
荷重条件は、一定振幅荷重とブロック変動荷重^{注1)}の2種とした。

5-2-3 試験結果

疲労試験で計測された、き裂深さと繰返し数の関係(き裂成長曲線)を図5-2.2に示す。



(A) 一定振幅荷重の場合



(B) ブロック変動荷重の場合

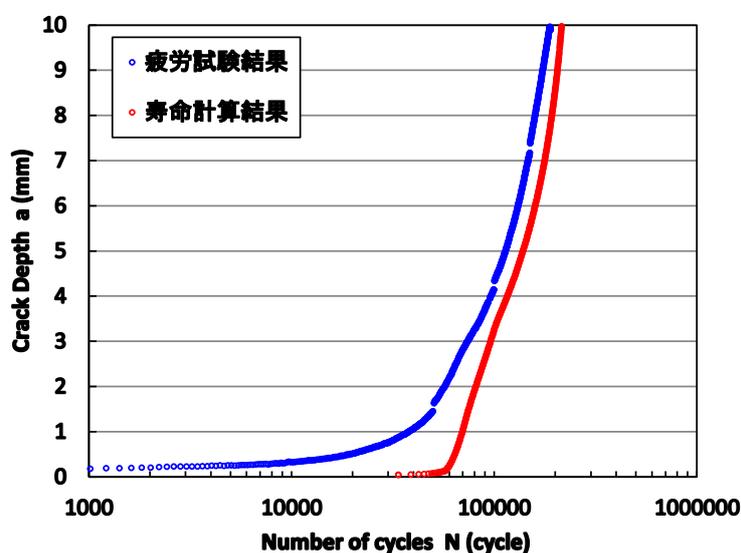
図5-2.2 き裂成長曲線の計測結果

注1 ブロック変動荷重：階段状に荷重範囲（最大荷重－最小荷重）が変化するような荷重条件

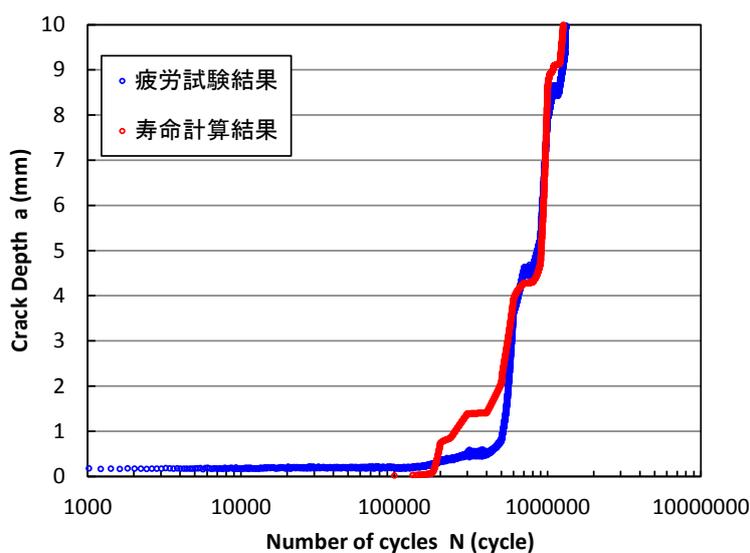
5-3 開発プログラムによる疲労寿命解析の結果と実験結果の比較

一定振幅荷重、及びブロック変動荷重の場合のき裂の成長について、疲労試験結果と実用版疲労寿命計算プログラムによる寿命計算結果の比較を図 5-3.1 に示す。

一定振幅荷重、ブロック変動荷重の場合ともに、き裂深さが 1.5mm 以下の小さなき裂領域において、疲労試験結果と寿命計算結果に多少の相違が見られる。しかし、き裂深さが 1.5mm 以上の比較的に大きなき裂領域の寿命計算結果は、疲労試験結果と良好に一致している。疲労寿命の推定においては、溶接構造物の損傷等に繋がるような比較的に大きなき裂に対する寿命推定が重要であることから、実用版疲労寿命計算プログラムによる寿命計算は実用上、十分な精度を有していると言える。



(A) 一定振幅荷重の場合



(B) ブロック変動荷重の場合

図 5-3.1 き裂成長曲線についての疲労試験結果と寿命計算結果の比較

第6章 本論－5

6-1 実用化に向けた整備

6-1-1 本研究開発部分の概要

平成22年度は、疲労寿命計算に至る処理ルートを多様化する目的で、FEM解析結果を利用する処理ルートだけでなく、構造要素の応力分布等を与える処理ルート等、寿命計算に至る幾つかの処理ルートの追加を実施した。さらに基本システムの各実施プロセスにおけるヒューマンエラーによる不適切操作を抽出し、誤操作に関するエラーメッセージの表示やエラー処置、及び疲労寿命計算プログラムにおける計算エラーに関するメッセージ表示の機能を整備した。

平成23年度は、ソフトウェアシステムの製品化に向けて、さらなる機能の拡張を行うとともに、製品化に不可欠となるマニュアルを整備し、また、高精度疲労寿命予測システム全体の機能、及び操作について、総合的なテストを実施した。

6-1-2 プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業において、設計現場で活用できるソフトウェアシステムの根幹となる、FEM解析^{注1)}結果を疲労寿命計算プログラムに接続するための一連のシステム動作を実現する、基本システムを完成させた。

高精度疲労寿命予測システムの実用化のためには、基本システムの機能拡張、及び誤操作対応処置や利用マニュアルの整備が不可欠である。さらに高精度疲労寿命予測システム全体の機能、及び操作についての総合的なテストが重要である。平成22年度及び平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業における本研究開発部分は、これらシステム整備を充実させることである。

6-1-3 本研究開発部分の成果

高精度疲労寿命予測システムの実用化に向けて基幹となる基本システムの機能拡張と、製品化に不可欠となる誤操作対応処理やマニュアルの整備を実施した。

また、高精度疲労寿命予測システム全体の機能性、及び操作性についてテストを実施して、システムの正常動作を確認するとともに、設計担当者が容易に使えるかを確認し、システムのさらなる改善に向けた課題を抽出した。

6-2 システム機能拡張

基本システムの機能拡張は、応力分布や表面き裂のアスペクト比変化の既存データを使用して疲労寿命計算へと接続する処理ルート、及びき裂深さと応力拡大係数の関係の既存データを使用して疲労寿命計算へと接続する処理ルートが選択できるようにした。また、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能版を、寿命計算の起動、計算条件入力、寿命計算実行、及び計算結果のプロット出力等の機能を有する基本システムに統合した。

注1 FEM解析：設計現場で多用されている有限要素法を用いた構造解析

6-3 誤操作対応処置と利用マニュアル整備

誤操作対応処置は、基本システムの各実施プロセスにおいて不適切操作に起因すると判断できるエラーが検出された場合のエラーメッセージ表示を整備するとともに、一意的に誤操作を特定できる場合と誤操作を一意的には特定できない場合について、それぞれのエラー検出後のシステム動作を整備した。すなわち、一意的に誤操作を特定できる場合には直前の操作の再試行を促し、誤操作を一意的には特定できないエラーの検出時にはサブメニューの先頭からの再試行を促す等の処置を整備した。また、一意的には特定できない誤操作の原因推定や対処法に関するマニュアルを作成した。さらには、疲労寿命計算プログラム、及び FEM 計算結果の後処理に始まる幾つかのデータ処理プログラムにおける計算エラー発生時のメッセージ表示等を整備した。

マニュアル整備は、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、構造要素の応力分布等を与えて疲労寿命計算を行う処理ルート、及びデータベースを用いた試験片の疲労寿命計算や疲労寿命計算の条件設定にユーザーノウハウを反映可能とする処理ルート等の種々の処理ルートに対応するシステムの使用法、また、寿命計算プログラムの使用法についてのガイダンス、基礎理論等を文書化した。

6-4 総合テスト

本研究開発の目標は、次の3点である。

- (1) 構造物や部品が実際に受けるランダム変動荷重下で、溶接止端部など欠陥のない健全な応力集中場から疲労き裂が入り進展する様子を、実用的にシミュレートできる手法を開発する。
- (2) この成果を適用した既存構造物のそれぞれの実働環境に応じた寿命診断技術を確立する。
- (3) 高精度寿命予測を設計現場で実施可能とするようなシステムを開発する。

高精度寿命予測システムの総合テストとしては、これらの目標の内 (1)及び (2)については、本報告書2章から5章に具体的実施内容及び成果をまとめていることから、本節においては、目標(1)及び(2)については、計算速度性能の評価を行い、目標(3)「高精度寿命予測を設計現場で実施可能とするようなシステムを開発する」について、システムの操作性及び設計者の使い易さを評価した。

総合テストにおいては、図 6-4.1 に示す模型試験体モデルを用いて、高精度疲労寿命予測システム全体の機能性、及び操作性についてテストを実施して、システムの正常動作を確認するとともに、設計担当者が容易に使えるかを確認した。また、寿命計算テストを実施して、実用版疲労寿命計算プログラムの速度性能を検証した。さらに、大規模構造解析モデルを用いたシステム操作テストを実施するために、パル構造の独自事業において作成した中規模(数万要素)から大規模(10万要素以上)の FEM 解析データを用いたテストを実施した。

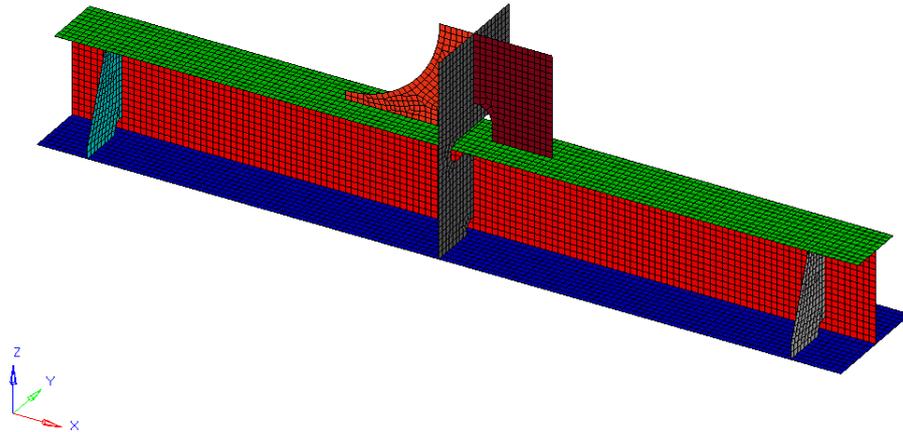


図 6-4.1 模型試験体モデル

6-4.1 総合テストの評価結果

総合テストにおいて得られた、操作機能・性能に関する評価は、次のようであった。

- ・グラフィック表示における操作は、おおよそ必要な機能が整備されている
- ・中規模以下の解析データの読取及びグラフィック操作は快適に動作する
- ・大規模解析データの読取及びグラフィック操作はかなり重い動作になる

設計者の使い易さに関する評価は、次のようであった。

- ・FEM 解析データの取込及び疲労寿命予測箇所の設定等は問題なく操作できる
- ・K 値の推定や a-K 関係の設定においては、システムで用意された接合様式以外は、操作することが難しい

疲労寿命計算の速度性能については、次のようであった。

- ・一定荷重振幅やブロック変動荷重を受ける寿命推定は、目標の 1 ケース数時間を達成できたが、ランダム変動荷重の場合はさらなる速度性能向上が課題となる
- ・速度性能向上を目的とした、き裂開閉口モデルに高次要素を適用するなどの高機能化だけでは目標の速度性能を達成することは難しいことが分かった

以上の総合テスト評価結果を踏まえて、次の 3 点の改善を今後の補完研究において、実施する必要がある。

- (1) 大規模 FEM 解析データを快適に操作できる環境の整備
- (2) システムがサポートする溶接接合様式の拡張
- (3) 並列コンピューティングなどを視野に入れた寿命計算の高速化

事業化に向けた補完研究において、次の 2 点を引き続き実施する。

- (1) システム及びプログラムを 64 ビット PC 環境で動作可能なようにシフトする
- (2) 使用者の必要とする接合様式のサポート

第7章 全体総括

7-1 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を目標に、平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業において、疲労寿命計算プログラム、プリ・ポストサブプログラム群、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、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ている。

平成22年度、及び平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業においては、高精度疲労寿命予測システムの実用化に向けて、実用版高精度疲労寿命予測プログラムの高精度化と計算高速化を目的とする高機能化版プログラムを試作した。

また、高精度疲労寿命予測システムの実用化に向けて基幹となる基本システムの機能を拡張するとともに、誤操作対応処置や利用マニュアルの整備等を実施した。

さらに、疲労き裂発生プロセスの検証試験、疲労き裂成長プロセスの検証試験、及び模型試験体を用いた検証試験を実施し、実用版疲労寿命計算プログラムのき裂成長計算手法の妥当性を検証するための比較データを取得した。これら検証試験結果と寿命計算結果の比較から、一定振幅荷重条件下はもとより変動荷重履歴条件下においても、き裂の発生・成長挙動を実用的な精度で推定できていることを確認した。

最後に、高精度疲労寿命予測システム全体の機能性・操作性についてのテストを実施して、システムの正常動作を確認するとともに、設計担当者が容易に使えるかを確認した。

以上により、実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版の試作を完了するとともに、ソフトウェアシステムの製品化に向けたシステムの機能拡張・整備を完了した。

7-2 今後の課題

実用版疲労寿命計算プログラムの高機能化版の検証、及び総合テスト評価結果を検討した結果、次の4点の改善を今後の補完研究において実施する必要があることを確認した。

- (1) 疲労き裂成長プロセスのさらなる高精度化に向けた改良検討
- (2) 大規模 FEM 解析データを快適に操作できる環境の整備
- (3) システムがサポートする溶接接合様式の拡張
- (4) 並列コンピューティングなどを視野に入れた寿命計算の高速化

また、事業化に向けた補完研究として、次の2点を早急を実施する。

- (1) システム及びプログラムを 64 ビット PC 環境で動作可能なようにシフトする
- (2) 使用者の必要とする接合様式のサポート

さらに、本研究開発成果の事業化に向けて、製品版高精度疲労寿命予測システムを完成させるとともに、川下製造業に「設計プロセスにおける疲労設計技術の高度化」、「製造プロセスにおける品質保証検査技術の高度化」を提案する取組を推進する。