

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2019

課題番号：26289338

研究課題名（和文）結晶組織と伸び性能による高張力鋼の疲労亀裂伝播特性の革新的向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on Improvement of Fatigue Crack Propagation Characteristics of High Strength Steel by Crystal Structure and Elongation

研究代表者

勝田 順一（Katsuta, Junichi）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：20161078

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、鉄鋼材料の疲労亀裂伝播性能を向上させるために、鉄鋼材料の変形能を高めた場合、及び亀裂伝播中に硬い結晶組織に出会うことにより、亀裂を3次的に折れ曲がり伝播させる場合について伝播寿命の変化を調査し、確認することであった。

鉄鋼材料の変形能を高めることについては、780MPaクラスの静的強度を有する鉄鋼材料では伸び性能を2.5倍とした材料の亀裂伝播寿命が1.5倍長くなることを確認した。また、疲労亀裂を屈曲伝播させて伝播寿命を延ばすことについては、降伏応力に対する負荷応力の比を同じにした場合に、3次的に折れ曲がり伝播する鋼材のほうが伝播寿命が2.3倍に延びるという結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶のような鋼構造物では、自然界から受ける変動荷重によって疲労破壊からは逃れることはできず、外力の大きさや順序も不明であるために、事前に疲労亀裂伝播寿命を予測することも困難である。そこで、いかなる状況であっても、従来よりも疲労亀裂伝播寿命が長くなる対策を施した鋼材について研究した。

その結果、鋼材の伸び性能を向上させることや硬い結晶組織によって伝播する疲労亀裂を3次的に折れ曲がり伝播させることで伝播寿命が長くすることができることを確認した。このことは、力学だけでなく、使用する材料の結晶学的な配慮も行うと、構造物の疲労寿命向上に寄与できることを示すことができ、社会的意義も大きいと思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to increase the fatigue crack propagation life of steel materials by increasing the elongation of steel materials, and by hard crystal structures during crack propagation, a crack propagate three-dimensionally.

It was clarified that the fatigue crack propagation life was improved by 50% when the elongation was improved. And when a fatigue crack propagates three-dimensional zigzag due to scattered hard crystal structures, the fatigue crack propagation life is 2.3 times as long as when the fatigue crack propagates straight.

研究分野：船舶海洋分野

キーワード：疲労亀裂 亀裂伝播 結晶組織 亀裂折れ曲がり 伝播遅延

1. 研究開始当初の背景

2013年6月に、アラビア海で日本の造船所で建造された大型コンテナ船が折損・沈没事故が発生した。現在、事故原因の解明やシリーズ船への対応策が鋭意進められている。申請者は、今までの状況や他の事故の経験から、今回の事故原因を次のように推察している。まず、構造上、大型コンテナ船は断面剛性が低くなるために、高強度鋼材、極厚板を適用する傾向がある。ところが、高強度鋼材の使用は、剛性や静的な強度を向上させることは可能であるものの、変形能や降伏応力や引張り強さに対する疲労強度は低下する傾向にある。また、780MPa 級以上の高張力鋼の疲労強度の検討は、従来の軟鋼や 490MPa 級の高張力鋼に比べて非常に少ない。

申請者は、2008年度～2010年度に受けた科研費 基盤研究(C) で検討した疲労亀裂伝播特性の新しい評価方法について、現在も 様々な鋼種について特性を把握するための研究を継続していた。本年度、偶然にも今回のコンテナ船事故前に 780MPa 級高張力鋼の試験を実施していた。この結果は、切欠き付丸棒試験片を圧縮塑性変形と引張り塑性変形を繰返した後に、引張り変形能の変化を調べた。いずれの鋼材も、圧縮塑性変形が大きくなるほど、また、圧縮・引張り塑性変形の繰返し回数が多くなるほど、破断時の伸び性能が低下する傾向がある。この図から、490MPa 級の高張力鋼に比べて 780MPa 級高張力鋼は、破断伸び性能が低いことがわかった。破断伸びが低くなると、疲労亀裂伝播速度が速くなることを明らかにしている。また、他の鋼材に比べて繰返し回数が非常に少なく、これ以上繰返すと繰返し中に破断し、さらに破断伸びが低くなることが推察される。

さらに、申請者は、強度の異なる自動車外板用薄板を用いて疲労亀裂伝播試験を実施している。この試験結果の伝播速度 - 応力拡大係数範囲関係における係数 C と m を用い、数値シミュレーションを実施した。シミュレーションは、モデルのリガメントが降伏応力に達するまでの伝播寿命が 50 万回となる応力範囲 (応力比 0.1) と各鋼材の降伏応力の比を求めた。これらの結果から、高強度鋼材の降伏応力の増加とともに 50 万回疲労寿命は少なくなり、伸び性能が低くなるにつれて 50 万回疲労寿命は低くなることが明らかとなった。

鋼構造物に高張力鋼を適用すると、設計応力を高く設定することができるために板厚を薄くして重量を軽減することが可能である。しかし、一般に軟鋼に比べて高張力鋼は伸び性能が低く、高い降伏応力のために切欠き感受性が高いまま維持される。これらのことが、疲労強度や疲労亀裂伝播特性の低下を招いている可能性がある。780MPa 級以上の高張力鋼の疲労強度については、現在、疲労特性が十分に把握されているとは言えない。さらに、今回のような事故が発生すると、780MPa 級高張力鋼の疲労強度向上の検討をすることも急務であると考えている。

2. 研究の目的

高張力鋼を船舶に適用すると設計応力を高く設定でき、板厚を薄くして船体重量を削減できるという利点がある。しかし、780MPa 級の高張力鋼は、溶接性が悪く、切欠き感度が高いという問題もある。また、疲労破壊に対する検討も十分でない。本研究では、疲労亀裂発生は不可避であることから、従来とは異なる発想の対策によって疲労亀裂伝播性能を向上させることを目的とした。従来と異なる方法として、今まで検討してきた成果を利用して、硬い組織の適切な配置によって疲労亀裂を屈曲伝播させること、及び塑性域での繰返し伸び性能を確保するために鋼材の伸び性能に焦点を絞って検討する。

3. 研究の方法

疲労亀裂伝播特性を評価するために、亀裂先端の動画を PIV 法により画像処理して、疲労亀裂先端の再圧縮塑性域範囲を明瞭に算出するシステムを開発する。このシステムは現在も保有しているが、高速カメラの解像度やピントの問題から、PIV 法により処理された亀裂先端の変形画像にノイズが多く存在していた。その後の自動処理が困難で、時間をかけた手作業に頼っており、しかも質の悪い分析結果しか得られていない。これを大幅に改善し、自動化した。次に、結晶組織寸法や硬質組織の配置の相違、結晶組織の方位の集積度の相違、及び塑性変形の繰返し伸び性能の相違が、疲労亀裂伝播に及ぼす影響について明らかにするために、それぞれの調査項目用の鋼材を製作購入し、疲労亀裂伝播試験を実施する。これらの試験に、高精度化した評価システムを用いる。

粒子画像流速測定法 (PIV 法) を適用して分析する亀裂先端周辺の変形分析を高精度化するために、疲労亀裂先端の開閉口挙動を撮影する高速カメラなどの機器を更新してシステムを改善する。このシステムで撮影した結果を用いて、亀裂先端の圧縮塑性域の領域を明らかにするための自動処理システムを構築する。改善した評価システムを用いて、780MPa 級高張力鋼の疲労亀裂伝播特性を向上させるために、結晶組織寸法、分布、結晶方位、破断伸びに注目して、加速している場合、及び減速している場合の亀裂先端の圧縮塑性域の領域

の変化を調査する。この調査によって、疲労亀裂伝播速度を減速させるための結晶組織の寸法（3次元）、結晶組織の分布（3次元）、破断伸びを把握する。以上のことにより、疲労き裂伝播特性を向上させた鋼材の基礎的な特性を明らかにした。

【平成 26 年度の計画】

疲労亀裂先端の開閉口挙動を動き解析マイクロスコープで撮影し、この画像に PIV 法を適用して亀裂周辺の変形挙動を算出すること、さらに、PIV 法で分析した結果を用いて、亀裂先端の圧縮塑性域の範囲を求めることは、現在実施中の基盤研究（B）で実施可能になった。しかし、動き解析マイクロスコープは、以前に購入したものを利用しており、撮影速度、白黒撮影、レンズの低視野深度の問題があって、今回申請する研究においては、十分な解像度の画像が入手できず、自動処理の段階でノイズとして処理される部分があるという問題が生じる。さらに、画像から PIV 法によって亀裂周辺の変形量を解析するまでは自動的に行うことができるが、その後の亀裂先端の再圧縮塑性域範囲を求めるまでは、手作業を逐次行いながら分析しており、非常に時間がかかることなどの問題がある。

そこで、今回申請する研究の初年度では、撮影機器を最新のハイスピードマイクロスコープ（設備備品費に計上）に更新することにより、撮影の高速化し、現在よりも視野深度の深いレンズ（設備備品費に計上）に変更して、鮮明な画像の撮影を可能とする。現在、保有している PIV 処理を行うプログラムは、研究分担研究者が作成したものであり、共同でこの成果発表も行っている。現在は、亀裂先端周辺の画像を処理して亀裂周辺の変位の変化をベクトル表示するところまでが自動化されている。今回の研究では、刻々の変形量を求めるのではなく、それぞれの注目点の載荷過程全ての変形を積算し、弾性変形量を除去して引張り塑性変形量を算出すること、除荷過程全ての変形を積算し、弾性変形量を除去して圧縮塑性変形量を算出することを自動化するためのプログラムを開発する。さらに、現在は PIV 法で画像を処理する場合に相関法を用いているが、追跡法を適用して分析精度を向上させる予定である。これは現在も試行中であるが、取得している画像精度の問題があって処理結果にノイズが多く、この処理方法では使用可能な結果が得られていない。また、これらの画像処理や変形分析は、多量の容量が必要のため、処理速度が速く、容量の大きなパソコン（設備備品費に計上）を購入した。結晶組織の 3 次元形状は、現在、疲労亀裂伝播試験が終了した試験片を手作業で研磨、エッチングし、表面を撮影している。この画像を重ね合わせることで、結晶組織の 3 次元形状を取得している。これは、非常に時間を有する作業であり、自動化したい作業であるが、現在、このような装置は市販されていなかった。今回の研究では、自作する予算的な問題と時間的な問題があるために、従来通り、手作業で計測することとした。

以上のシステム改善を行うと共に、疲労亀裂の進展に結晶組織が及ぼす影響を明らかにするための疲労亀裂伝播試験も継続する。疲労亀裂伝播試験の伝播寿命や伝播経路の結果、結晶組織の 3 次元形状、PIV 法から求めた疲労亀裂先端の変化を統合して、疲労亀裂の進展に及ぼす結晶組織の影響、疲労亀裂の屈曲状況と亀裂先端の の関係を明らかにした。初年度に使用する鋼材は、市販の 780MPa 級高張力鋼を用いる予定である。また、疲労亀裂伝播方向は、鋼板板幅方向と鋼板板厚方向とした。

【平成 27 年度以降の計画】

○平成 27 年度の計画

平成 26 年度に予定している研究は、前の基盤研究（B）の延長線上にあり、精度改善の色合いが強いため、研究は遂行できた。開発する画像処理のプログラムについては、初年度だけではなく、逐次改善した。また、疲労亀裂進展と結晶組織の関係については、今回申請する研究期間全般に亘って継続して実施した。平成 27 年度に新規に実施した研究は、今までの成果から得られた結晶組織が疲労亀裂進展に及ぼす影響のうち、結晶組織の寸法や硬い組織の間隔や分布の影響を調査対象とした。使用した鋼材は、780MPa 級程度の高張力鋼とするが、同じ化学成分で同程度の静的強度を有する鋼材で、結晶組織寸法を変化させた 3 種類の鋼材を特別に製作して購入する。疲労亀裂伝播試験する方向は、鋼板板幅方向と鋼板板厚方向について行う。第 1 年度に改善したシステムを用いて、亀裂先端の再圧縮塑性域範囲と結晶組織の関係を調査した。

○平成 28 年度の計画

平成 28 年度に新規に実施する研究は、今までの成果から得られた結晶組織が疲労亀裂進展に及ぼす影響のうち、結晶組織の方位の影響を調査対象とした。使用する鋼材は、780MPa 級高張力鋼としたが、同じ化学成分で同程度の静的強度を有する鋼材で、結晶方位の集積度を変化させた 3 種類の鋼材を特別に製作して購入する。疲労亀裂伝播試験する方向は、鋼板板幅方向と鋼板板厚方向について行う。第 1 年度に改善したシステムを用いた。

○平成 29 年度の計画

平成 29 年度に新規に実施する研究は、今までの成果から得られた結晶組織が疲労亀裂進展に及ぼす影響のうち、結晶組織の組み合わせによる破断伸びを向上させた鋼材を調査対

象とする。使用する鋼材は、780MPa 級程度の高張力鋼として、同じ化学成分で同程度の静的強度を有するような鋼材で、破断伸びを変化させた 2 種類の鋼材を特別に製作して購入する。疲労亀裂伝播試験する方向は、鋼板板幅方向について行う。第 1 年度に改善したシステムを用いた。

○平成 30 年度の計画

研究全般の項目について、追加試験、確認試験、システムの仕上げを、最終年度に実施する。得られた成果は、研究代表者、研究分担者が所属する学会、研究会等で、逐次公表する予定であった。なお、平成 30 年度に申請者は所属先を移籍した。新しい赴任先の業務のために、平成 30 年度に予定したシンポジウムや研究者への公表ができなくなり、1 年間研究期間を延長した。

しかし、予定していた査読付き論文の投稿までに至らず、研究を終了することとなった。

今後は、準備中の論文を仕上げ公表することで、大学、企業の研究者、技術者に成果を周知して、実構造物への適用に向けた鋼材 開発に努力する。

4. 研究成果

平成 26 年度に計画していた、高精度の動き解析マイクロスコープで撮影し、この画像に PIV 法を適用して亀裂周辺の変形挙動を算出することは、実施して可能となった。さらに、以前に購入した動き解析マイクロスコープは、後述する 3 次元的に伝播する疲労亀裂と結晶組織の画像取得のために利用することとした。また、試験片を伝播する疲労亀裂が除荷時に閉口して 300 倍の画像においても完全に消失することが確認できた。(従来から、疲労亀裂の先端は閉口することは知られていたが、今回実際の画像で確認し、公表できた。)

平成 27 年度に計画していた、780MPa 級程度の高張力鋼で、同じ化学成分で同程度の静的強度を有する鋼材で、結晶組織寸法を変化させた 3 種類の鋼材を用いて疲労亀裂伝播試験を行い、伝播特性を把握した。

平成 28 年度に計画していた、780MPa 級程度の高張力鋼で、同じ化学成分で同程度の静的強度を有する鋼材で、結晶方位の集積度を変化させた 3 種類の鋼材を用いて疲労亀裂伝播試験を行い、伝播特性を把握した。

平成 29 年度に計画していた、結晶組織の組み合わせによる破断伸びを向上させた鋼材を調査対象とした疲労亀裂伝播試験は、点在する硬質の結晶組織を利用して、疲労亀裂を 3 次元的に屈曲伝播させるような鋼材と屈曲伝播しない通常の鋼材を用いて疲労亀裂伝播試験を行い、伝播特性を比較した。

これらの結果、PIV 法を用いて画像処理した変位ベクトルから求めた微小な亀裂先端塑性域を求めることができるようになり、しかも、亀裂の進展直前に亀裂先端塑性域の最大分布方向が変わると、その後表面に進展する疲労亀裂が塑性域の最大分布方向に屈曲伝播することが明らかになった。

さらに、鋼材の変形能を向上させた 780MPa 級程度の鋼材では、従来の同程度の静的強度を有する鋼材よりも変形能を 2.5 倍増加させた鋼材は、同じ伝播長さにおいて伝播寿命が 50% 長くなる結果が得られた。ただし、780MPa 級程度の鋼材よりも汎用性の高いと考えられた 570 MPa 級程度の鋼材においては、比較材に圧縮の残留応力の影響により亀裂伝播がほぼ停止してしまい、同様の結果が得られなかった。

また、分散して存在する硬質組織の影響により、亀裂が 3 次元的に屈曲伝播する場合には、亀裂が屈曲伝播しない鋼材に比べて伝播寿命が 2.3 倍長くなることが明らかになった。

以上の結果から、発生を避けることができない疲労亀裂が伝播する際、荷重の大きさや変動する順序は不明であり、それらの影響で事前に予測できない伝播寿命を従来よりも長くさせて最終破断までに至る時間を長くすることは、荷重だけでなく、鋼材の特性(変形能、伸び性能)や結晶組織も利用することで、疲労亀裂の伝播寿命を確保する可能性が高いことを示すことができた。

平成 30 年度に所属する学会、研究会等で、逐次公表し、研究者、企業技術者を対象としたシンポジウムを企画する予定していたが、平成 30 年度に申請者が所属先を移籍し、新しい赴任先の業務のために、平成 30 年度に予定したことができなくなり、1 年間研究期間を延長した。しかし、予定していた査読付き論文の投稿までに至らず、研究を終了することとなった。今後は、準備中の論文を仕上げ公表することで、大学、企業の研究者、技術者に成果を周知して、実構造物への適用に向けた鋼材 開発に努力する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 勝田順一, 山下晋, 緒方洋典, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 矢島浩	4. 巻 第5巻第1号
2. 論文標題 ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性及び疲労亀裂伝播特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 圧力技術	6. 最初と最後の頁 4-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山下晋, 勝田順一, 緒方洋典, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 矢島浩	4. 巻 Vol.15
2. 論文標題 ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 溶接学会九州支部講演論文集	6. 最初と最後の頁 31-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 賈子萌, 勝田順一, 谷野忠和, 矢島浩	4. 巻 Vol.15
2. 論文標題 超音波ピーニング処理による十字溶接継手部の海中疲労強度改善に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 溶接学会九州支部講演論文集	6. 最初と最後の頁 38-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井成政, 白石麻里子, 才木隼, 勝田順一
2. 発表標題 画像処理によるCT型試験片を伝播する疲労亀裂の挙動評価の改善について
3. 学会等名 溶接学会九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原貴翔, 才木隼, 白石麻理子, 勝田順一
2. 発表標題 破断伸び性能を向上させた鋼材の疲労亀裂伝播特性と伝播破断限界
3. 学会等名 溶接学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井成政, 白石麻理子, 勝田順一
2. 発表標題 PIV法によるCT型試験片の疲労亀裂伝播中の挙動評価
3. 学会等名 溶接学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井成政, 勝田 順一
2. 発表標題 C T型試験片を伝播する疲労亀裂先端の開閉口挙動の評価に関する研究
3. 学会等名 平成28年度 溶接学会九州支部 ポスターセッション
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内野耀太, 才木隼, 白石麻理子, 勝田順一
2. 発表標題 鋼材結晶組織の三次元形状が疲労亀裂伝播経路に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小原貴也, 才木隼, 白石麻理子, 勝田順一
2. 発表標題 疲労亀裂伝播中の画像を用いたPIV法による伝播挙動の評価
3. 学会等名 溶接学会九州支部
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 内野耀太, 平野智大, 勝田 順一
2. 発表標題 鋼材の疲労亀裂伝播寿命におよぼす3次元結晶組織の影響に関する研究
3. 学会等名 溶接学会九州支部
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮崎 大地, 勝田 順一
2. 発表標題 強度と伸びが異なる鋼材の疲労亀裂伝播特性とその評価
3. 学会等名 溶接学会九州支部研究講演会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 内野 耀太, 勝田 順一
2. 発表標題 鋼材結晶組織の三次元形状が疲労亀裂の伝播経路に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 西村和也, 勝田順一, 和田眞禎, 森山雅雄
2. 発表標題 PIV法を用いた疲労亀裂先端の再圧縮塑性域寸法の算出について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 宮崎大地, 勝田順一
2. 発表標題 780級高張力鋼板の疲労亀裂伝播と新しい伝播性能評価について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 小宮賢太, 勝田順一, 和田眞禎, 堤成一郎
2. 発表標題 薄板鋼板のスポット溶接部における疲労寿命の評価について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 勝田順一, 森山雅雄
2. 発表標題 PIV法を用いた画像処理による疲労亀裂先端塑性域の算出と伝播経路予測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会材料・溶接研究会, 溶接学会溶接構造研究委員会合同講演会
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	森山 雅雄 (moriyama masao) (00240911)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	削除：2019年6月4日