疲労特性に着目した鋼材開発

誉　田　　登
Noboru KONDA

理工学部機械システム工学科　教授
Professor, Department of Mechanical and Systems Engineering

2017 年 4 月機械システム工学科に着任した誉田登です．本稿では私がメンバーの一員として開発した鋼材について簡単に紹介します．

1. はじめに

金属材料は繰返し荷重を受けると，疲労損傷することが知られている．この疲労損傷を防止することは，安全・安心な社会を維持・向上する上で不可欠であり，自動車，船舶，橋梁などの溶接鋼構造物においては設計，製作，保全の各段階で，最も重要な技術課題である．ここでは，構造用鋼の疲労損傷について，従来の知見等について簡単に紹介する．その後，溶接継手の疲労損傷の特徴，溶接継手の疲労強度改善技術，耐疲労鋼の実構造物への適用状況，今後の課題について述べる．

2. 構造用鋼の疲労損傷

繰返し荷重を受ける機械や構造物の破壊事故は，それを構成している部材の疲労損傷が引き金となっていることが多く，破壊事故のうち約 80% は何らかの形で疲労が関与しているとも言われている[1]．長年に渡り膨大な検討がなされているにもかかわらず疲労損傷を今なお根絶できない理由として，初期段階では損傷領域の極めて狭いことが挙げられる．また，除荷すれば完全に元の形に戻る，つまり残留変形が生じないような極めて小さな荷重でも，繰返すことにより疲労破壊の芽である疲労き裂が発生することも理由として挙げられる．

例えば，全長 300 m を超える船舶のような大型溶接鋼構造物においても，初期の疲労損傷領域は，1 mm^2 以下と極めて狭く，損傷初期段階での検出や補修を困難にしている．

母材鋼板では，引張強度の上昇に伴い，疲労限度も単調に上昇する．これは鋼材の引張強度の高強度化に伴い，疲労損傷の始まりである繰返しすべりに対する変形抵抗も同時に高まるためである．図 1[1]

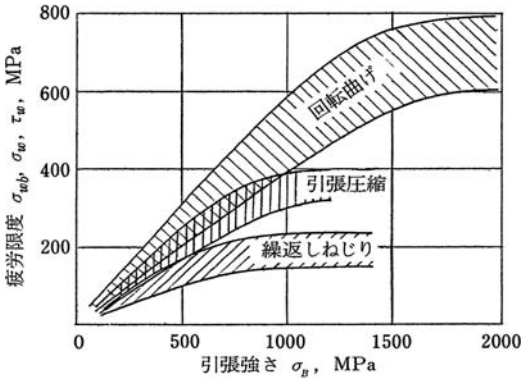

図 1　母材鋼板の疲労限度に及ぼす引張強さの影響[1]

に示すように，曲げ，引張，ねじりといった負荷モードにかかわらず，引張強度が 800 MPa あたりまで，引張強度の上昇に伴い，疲労限度は単調に上昇している．ここで疲労限度とは，数百万回の繰返し荷重が負荷されても疲労破壊をしない応力の上限値である．

3. 溶接継手の疲労損傷の特徴

母材鋼板が構造物にそのまま使用されることもあるが，通常，溶接施工により組立てられる．溶接施工で接合された接手を溶接接手と呼ぶ．溶接継手の疲労特性の評価は，母材鋼板の場合と同様，一定の繰返し応力を与えて，破断するまでの繰返し数を疲労破断寿命として測定する．疲労強度評価結果は，縦軸に繰返し負荷した応力を，横軸に破断寿命を，各々対数軸で表示した S-N 曲線で表示することが多い．図 2 には溶接接手の S-N 曲線の一例として，十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果[2)]を示す．溶接継手の S-N 曲線の特徴は，母材鋼板に比べ疲労限度が明瞭には存在しないこと，また，疲労限度の絶対値は母材のそれに比べかなり低くなること，である．

母材鋼板と溶接継手の疲労強度を比較した例として，日本造船研究協会で行われた共同研究成果[3)]の一部を図 3 に紹介する．母材鋼板に比べ溶接継手の疲労強度は，単に低強度側に位置しているだけでなく，母材の降伏応力にかかわらずほぼ一定の値となっていることが判る．この結果は，溶接鋼構造物の部材寸法を疲労設計する場合に，母材鋼板を単に高強度化するだけでは構造材料の寸法を低減できないことを意味する．つまり，高強度鋼を採用しても，許容応力を高めることができず，結果として，低強度鋼の場合に比べ構造物を軽量化できない．地球温暖化問題，環境問題を解決する上で，溶接鋼構造物の軽量化を通し燃費等を改善することが強く望まれているが，溶接接手の疲労特性が軽量化のネックとなっている．

母材鋼板の場合と異なり，溶接継手の疲労強度が母材強度にかかわらずほぼ一定で，母材強度では向上しない理由として，主として以下の 3 点挙げられる．

まず，溶接止端が形状的不連続部となり応力集中源として働き，切欠きの影響を受けるためである．ここで溶接止端とは，溶接施工時に溶接ワイヤーなどから溶接部に材料が供給され表面が蒲鉾状に盛り上がるが，その盛り上がり始める端部を指す．また，切欠きがあると疲労強度は低下するが，切欠きの影響は高強度鋼ほど敏感である．つまり，例えば同じ形状の切欠きが高強度鋼，低強度鋼に各々存在した場合，平滑材の疲労強度を基準として切欠き材の疲労強度を比率で評価すると，高強度鋼の方が低強度鋼より低下が著しい．

次に，溶接接手には母材鋼板の降伏強度と同等の高いレベルの溶接残留応力が引張内部応力として存

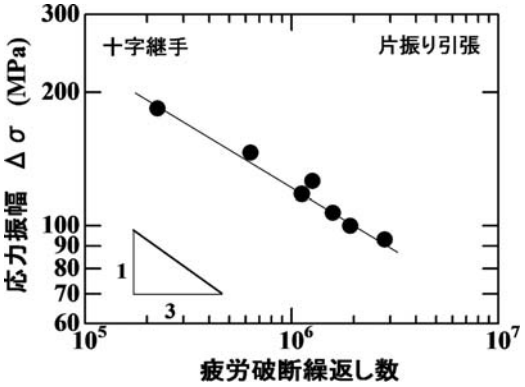

図 2　溶接継手の S-N 曲線の一例[2)]

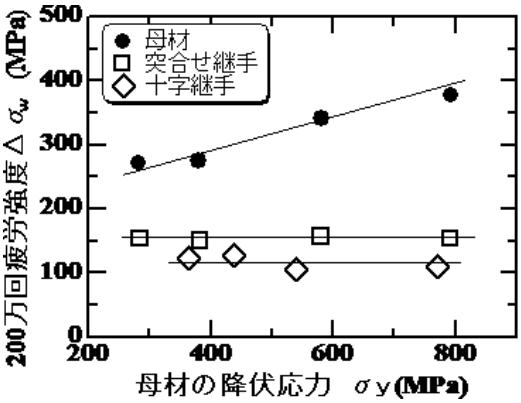

図 3　疲労強度に及ぼす母材降伏応力の影響[3)]

在し，高強度鋼ほど溶接残留応力が継手疲労強度に不利に作用するためである．一般に，引張の内部応力が存在すると疲労強度は低下し，内部応力レベルが高い程，低下が顕著になる．ここで，溶接残留応力が発生する理由は，溶接が高温の溶融状態で行われ，その後，凝固，冷却する過程で，拘束がなければ熱収縮する部分が必ず存在し，その一部が拘束されてしまうためである．溶接直後に温度の不均一分布がある限り，引張の溶接残留応力の発生は避けられない．鋼板の板厚が数 mm と薄い場合には，この溶接残留応力は溶接変形することにより緩和される場合もある．しかし，造船・橋梁などインフラに使用される板厚は 10 mm 以上と厚く，変形抵抗が大きいため溶接変形は少なく，その結果，溶接残留応力は緩和されない．板厚が増した場合と同様，鋼材の強度が高い場合も変形抵抗が大きくなり，残留応力は緩和されない．以上より，残留応力の観点からも溶接接手の疲労強度は，母材鋼板の引張強度が高いと不利になる．

最後に，継手の疲労強度が母材鋼板の強度にかかわらずほぼ一定となる 3 つ目の理由として，破壊起点部の金属組織が，溶接熱履歴の影響を受け，母材鋼板の金属組織とは大きく異なり，疲労に対する抵抗性が劣化しているためである．

なお，上記 3 つの理由の内，溶接残留応力は，継手疲労特性に特に大きく影響する重要な因子であり，継手疲労特性を評価する場合にも注意を要する．すなわち，溶接継手の疲労強度を実験室レベルの小型形状の試験体で評価する場合には，試験片加工に伴う溶接残留応力の緩和に注意が必要である．小型試験体を用いると，残留応力が解放された結果，同じ応力下でも実構造物より寿命の長い結果が得られ，危険側の評価となる可能性があるからである．そこで，溶接残留応力の緩和分を疲労試験荷重で補う方法が提案[4]されている．また，船舶や橋梁等の分野では，膨大な労力を費やして大型構造モデルを用いた試験が実施されている．このような試験では，溶接残留応力の緩和を避け得るだけでなく，理論的裏付けに乏しいと言われている板厚効果に関する経験式を用いなくて済む点においても，信頼性の高い結果が得られる．

4. 溶接継手の疲労強度改善技術

溶接鋼構造物の疲労損傷を防止するため，従来から，設計面・施工面で数々の取組みがなされてきた．

設計面からの取組みとしては，有限要素法を初めとする各種応力解析環境を整え，精度の高い応力解析結果を活用するようになっている．例えば，高精度の応力解析結果を活用する継手疲労設計法として，IIW（International Institute of Welding）を中心に検討が重ねられている有効切欠き応力法がある．

一方，施工面からの疲労損傷防止に関する取組みとしては，従来から，グラインダーなどによる余盛り止端の形状仕上げがある．また，疲労強度向上効果がより顕著な，グラインダーに替わる方法として，UIT（Ultrasonic Impact Technology）が報告[5]されている．UIT の改善効果は明瞭であり，今後の更なる展開が期待されている．

このように，従来は，設計面，施工面からの取組みに限られてきたが，最近になって，材料面からも提案できるようになった．

一例として，溶接により発生する引張残留応力の低減，さらには引張から圧縮への転換が可能な，特殊な溶接材料の開発成果がある[6]．この溶接材料では冷却過程における溶接金属のマルテンサイト変態時の変態膨張現象が利用されている．画期的な発想に基づく日本独自の技術であり，実用化が待たれている．

次に，母材鋼板でも溶接鋼構造物の疲労損傷防止に寄与する技術が提案され，一部はすでに実用化されている．

例えば，表面細粒鋼と呼ばれる，表層に粒径 2 μm 以下の極細粒フェライト相を生成させ，疲労き裂の発生・進展を抑制する鋼板がある[7]．

また，母材鋼板の金属組織をフェライト（軟相）

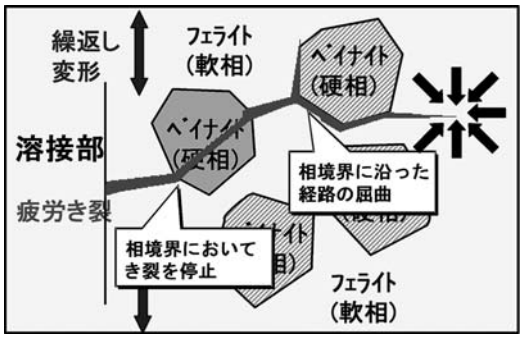

図 4　疲労き裂進展特性の改善メカニズム[9)]

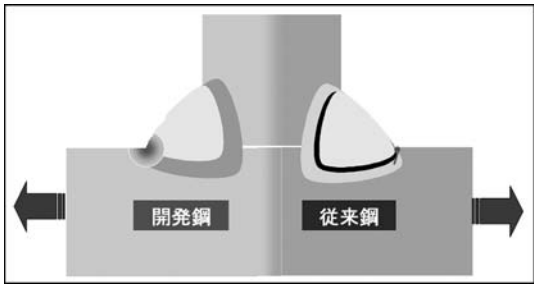

図 5　疲労き裂発生特性の改善メカニズム[10)]

とベイナイト（硬相）の最適な組織に制御し，かつ溶接熱影響部の組織も制御することにより，母材内での疲労き裂進展抵抗と溶接継手部の疲労強度を高めた耐疲労鋼があり，私が所属していたグループで開発[8)]した．なお，溶接構造用鋼として必要な機械的性質や溶接性などは従来鋼と同等レベルに維持している．疲労き裂進展特性の金属組織による改善メカニズムを模式的に図 4[9)]に示す．軟相と硬相の境界を積極的に活用している．また，継手疲労き裂発生抑制に適した組織は，図 5[10)]に模式的に示すように，溶融境界線（Fusion Line）での局所的な硬化を避けたものである．この結果，溶接部は比較的フラットな硬度分布となり，疲労損傷領域が局在化することを抑制している．

5. 耐疲労鋼の実構造物への適用状況

開発した耐疲労鋼は，疲労き裂の発生・進展の両過程において疲労損傷を抑制し，溶接鋼構造物の疲労強度健全性向上に寄与する鋼材である．ここでは，船舶，橋梁への適用状況を紹介する．

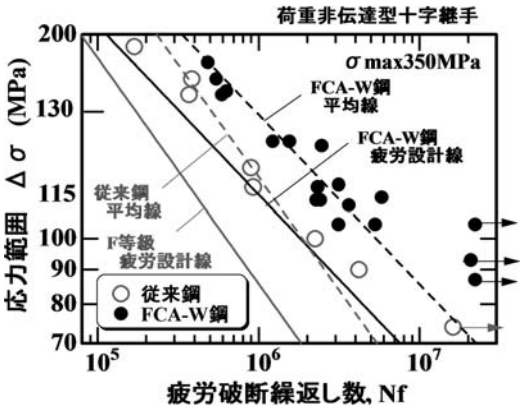

図 6　耐疲労鋼の疲労設計線図の一例[11)]

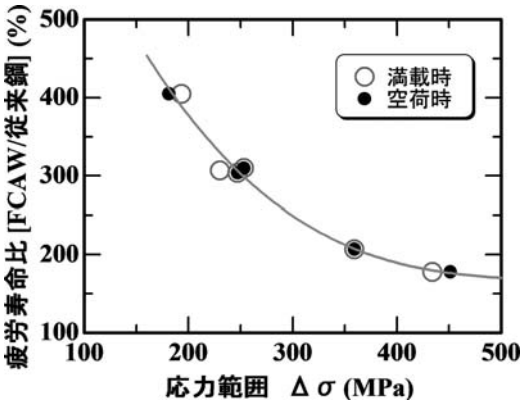

図 7　寿命延伸効果の解析例[11)]

まず，船舶に関しては，液化プロパンガス運搬（LPG）船に初めて適用された．この初適用を契機に，各種船舶，国内各地の造船所で採用いただき，適用実績が重ねられた[10)]．図 6 の疲労設計線図に基づき設計された例として，液化天然ガス運搬（LNG）船がある．モス型と言われる球形タンクを複数有する LNG 船では，海象によっては，剛性の高い球形タンクと，波浪によるたわみが比較的大きい甲板，との接合部付近で応力を抑制し難くなる場合が考えられる．このような部位に耐疲労鋼を適用すると疲労寿命の延伸効果が発揮される．図 7[11)]は船舶の疲労設計の検討で使われる図面で，供用期間中に遭遇する応力範囲の最大値と，該当部位に従来鋼に替えて耐疲労鋼を適用したときの疲労寿命比と

の関係を示す．中・低応力域での寿命延伸効果が特に顕著であることが判る．

今後，船舶の燃費向上は，地球環境保全の観点からも重要視され，構造軽量化のニーズがますます高まると考えられる．軽量化を阻害する一因であった溶接継手部の疲労強度に対し，設計・施工とともに鋼材からも取組むことが可能となった．

次に，橋梁への適用状況を紹介する．橋梁への適用においては，実橋梁で測定された応力頻度分布を基に，波浪荷重に対して船舶で検討したのと同様の手法で，疲労寿命を推定し，耐疲労鋼による寿命延伸効果を確認した．

これらの検討の結果，和歌県の入野橋には耐候性仕様を兼ね備えた耐疲労鋼が適用[12]された．さらに，高規格高速道路の高架橋の隅角部にも耐疲労鋼が適用[13]されている．

6. 今後の課題

溶接鋼構造物を疲労設計する場合，溶接継手部の疲労特性が主に照査される．継手疲労特性の更なる向上に向け，今後とも英知を積み重ねる必要がある．そのためには，溶接部の疲労に関する実験データは貴重な財産として関係者間で共有されることが望ましい．母材鋼板の疲労特性に関しては，疲労強度[14]，疲労き裂進展特性[15]に関するデータベースが既に存在し，活用されている．それらに続き，溶接継手疲労特性のデータベースの構築が必要と考えられる．ただし，有益なデータベースとするには，何をどのように計測・記録しておくべきか，という点から慎重に議論すべきと思われる．例えば，溶接余盛止端形状ひとつを取り上げても，どの部分をどう計測するのが合理的か，という点が未だ明らかにはなっていないと思われる．

上述したように，設計・施工とともに，材料の観点からも継手疲労特性の改善が可能となりつつある．しかし，過去の経緯より溶接鋼構造物の継手疲労設計体系では，極一部を除き，鋼材による相違が考慮されていない．疲労特性を改善する技術に対し，疲労設計体系に合理的に反映させるための手順等を，今後，確立していく必要があると考えられる．

7. おわりに

耐疲労鋼の開発は住友金属工業株式会社ならびに新日鐵住金株式会社において，多くの関係者のご指導，ご協力の下で行われたものである．開発メンバーの一員として公開資料を基に一部を紹介させていただいた．

本学においても本件に関連するテーマを研究すべく現在準備をすすめているところである．

参考文献

1）疲労設計便覧，日本材料学会編，養賢堂（1995）
2）平川賢爾，小松英雄，北浦幾嗣：住友金属誌，Vol.31, No.4（1979），pp.301-322
3）日本造船研究協会，第202研究部会「海洋構造物の疲労設計法および溶接部の品質に関する研究」
4）A. Ohta, Y. Maeda, T. Mawari, S. Nishijima and H. Nakamura : Int. J. Fatigue, Vol.8, No.3（1986），pp.147-150
5）島貫広志，野瀬哲郎：溶接学会全国大会講演概要，No.81（2007），pp.230-231
6）久保高宏，森影康，天野虔一，太田昭彦，毛利雅志，町田文孝：材料とプロセス，12（2000），pp.423-426
7）石川忠，間渕秀里：CAMP-ISIJ, Vol.10（1997），1168-1171.
8）誉田登，有持和茂，藤原知哉，永吉明彦，稲見彰則，山下正人，矢島浩：日本造船学会論文集，第190号，pp.507-515
9）誉田登，有持和茂，稲見彰則，堺堀英男：溶接技術，Vol.56, 8月号（2008），pp.86-93
10）稲見彰則，鹿島和幸，誉田登：日本船舶海洋工学会誌，24，（2009），6.
11）J. Hara, Y. Takaoka, N. Konda, K. Arimochi, A. Inami, H. Dobashi and N. Yamamoto : Proc. of 24th Asian − Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting, Vladivostok（2010），263.
12）有持和茂，誉田登，西尾大，山野達也，森下泰光，鷹羽新二，安田修：溶接構造シンポジウム講演論文集，（2006），223.
13）宇根孝司，信永博文，大城荘司，利根川太郎，中村

宏，三根克秀：橋梁と基礎，5，(2010)，5.
14）日本材料学会編，金属材料疲労強度データ集およびデータベース
15）日本材料学会編，金属材料疲労き裂進展抵抗データ集およびデータベース