

自動車用材料における高強度鋼の適用およびその問題点 (第3報, 高強度鋼の疲労強度に及ぼす介在物性状の影響)

高 行男・井藤賀久岳

1. 緒 言

近年,自動車に対する社会の要求は省エネルギーおよび環境に対する優しさである。これを実現するための一つとして,高強度材や表面処理材を使用し部品を軽量化する方法がある。しかし,このような高強度材等において,従来破壊を生じないと考えられていた疲労限度以下の応力域においても繰返し数 10^7 回以上で疲労破壊を起こすものがあることが確認された^{1)~4)}。この現象は破壊起点が表面から内部に遷移することによる。このことは従来から行われてきた耐疲労設計では十分な安全性を確保できないことを意味しており,その対処は実用的観点から重要な課題である。

第1報⁵⁾では高強度鋼である高炭素クロム軸受鋼およびその表面処理材に対して疲労強度特性の検討を行い,表面処理による表面起点型破壊の長寿命化および遷移応力の高応力化が確認できた。また,第2報⁶⁾では疲労強度特性に及ぼす外部環境中の湿度の影響について検討を行い,湿度の上昇に伴う遷移応力の低下および高湿度環境中での内部起点型破壊の消失が確認でき,湿度の影響について把握することができた。しかし,両研究とも表面起点型破壊の疲労強度に影響を及ぼすものの,内部起点型破壊にはほとんど影響を及ぼさない。これは内部起点型破壊が材料内部の非金属介在物を起点としてき裂が発生し進展しているため,試験片表面の加工硬化層や外部環境の影響を受けにくいからである。一方,内部起点型破壊における疲労強度に影響を及ぼす因子として介在物性状が考えられる。一般に,材料内部には製造過程等で混入した非金属介在物が存在する。これまで製造過程の改善により介在物の個数や寸法の低減が試みられてきたが,混入する介在物を皆無にすることは不可能と考えられる。JISでは材料に含まれる非金属介在物の個数により清浄度を規定しているが,高強度鋼の疲労強度は清浄度だけで決定されるものではなく,介在物寸法にも依存すると考えられる。しかし,これまで内部起点型破壊の起点となる介在物性状(個数,寸法)に関する検討は必ずしも十分ではない。

そこで本報では,介在物性状の異なる2種類の高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて室温大気中において疲労試験を行い,両材の結果を比較することによってS-N曲線の形態や破壊機構に及ぼす介在物性状の影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

2. 1 供試材

用いた材料は高炭素クロム軸受鋼SUJ2および清浄度の異なる高炭素クロム軸受鋼の2種類である。後述するように、以後清浄度の高いものをSUJ2-H材、清浄度の低いものをSUJ2-L材とする。化学成分および熱処理条件をそれぞれ表1および表2に示す。熱処理後、両材とも図1に示す試験片形状に機械加工した。応力集中係数は1.06である。

表1 化学成分 [mass%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUJ2-L	1.01	0.23	0.36	0.012	0.007	0.06	0.04	1.45	0.02
SUJ2-H	1.00	0.19	0.33	0.002	0.002	0.06	0.05	1.43	0.01

表2 熱処理条件

Material	Quenching	Tempering
SUJ2-L	835°C/40min, O.Q.	180°C/120min, A.C.
SUJ2-H	850°C/30min, O.Q.	180°C/120min, A.C.

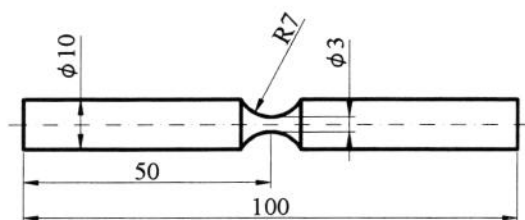


図1 疲労試験片の形状寸法

2. 2 試験片の清浄度

ビッカース硬さは両材とも内部までほぼ一様であり、SUJ2-L材ではHV:784, SUJ2-H材ではHV:792であった。また、3次元表面構造解析顕微鏡を用いて最小断面部の表面粗さを測定した。その結果、SUJ2-L材およびSUJ2-H材の最大高さRzはそれぞれ2.57 μ m, 2.19 μ m, 算術平均高さRaは0.29 μ m, 0.23 μ mであった。さらに、X線回折装置を用いて最小断面部表面における残留応力の測定を行った結果、SUJ2-L材およびSUJ2-H材の残留応力はそれぞれ-539MPa, -533MPaであった。

以上のように、両材の硬さ、表面性状、残留応力には相違は見られなかったので、疲労試験結果には以下に述べる介在物性状の影響のみが反映されると考えられる。

両材について清浄度をJIS点算法 (JIS G0555) によって測定した結果を表3に示す。表中のA, BおよびCはそれぞれ, 加工によって粘性変形したもの(硫化物, けい酸塩など), 加工方向に集団をなして不連続に粒状の介在物が並んだもの(アルミナなど), および粘性変形をしないで不規則に分散するもの(粒状酸化物など)と規定されている。表から明らかなように, SUJ 2-H材の清浄度はSUJ 2-L材に比べて高い。

上述のJIS点算法による清浄度は介在物の個数によって定義されているので, その寸法は考慮されていない。そこで介在物寸法を測定した。介在物の面積の平方根 \sqrt{area} を求め, 極値統計処理を行った結果を図2に示す。測定条件は検査基準面積 $S_0 = 0.078\text{mm}^2$, 検査回数 $n=100$ である。図から明らかなように, 累積分布 $F=95\%$ 以上においてSUJ 2-H材の介在物の \sqrt{area} がSUJ 2-L材より大きい。このように, 清浄度の高いSUJ 2-H材のほうが清浄度の低いSUJ 2-L材よりも, より大きい介在物を含む場合もあることに注意が必要である。なお, 両材において観察された最大の介在物の \sqrt{area} は, それぞれ $18.6\mu\text{m}$ および $13.6\mu\text{m}$ であった。

表3 清浄度

Material	A (%)	B+C (%)	A+B+C (%)
SUJ-L	0.0375	0.0063	0.0438
	0.0438	0.0125	0.0563
SUJ-H	0.0250	0.0063	0.0313
	0.0125	0.0188	0.0313

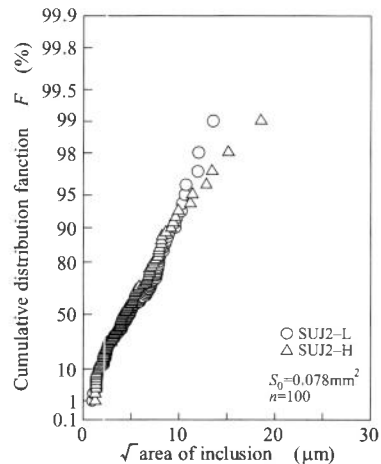


図2 介在物寸法の分布

2. 3 実験方法

試験には, 材料強度確立モデル研究会(代表者: 立命館大学理工学部, 酒井達雄教授)で提案された4連式片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度52.5Hz)を用いた。

疲労試験後, 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面様相を詳細に観察した。また, エネルギー分散型分光器(EDS)を用いて破壊起点となった介在物の元素定性分析も行った。

3. 実験結果

3. 1 疲労強度特性

S-N曲線を図3に示す。破面の観察結果に基づいて, 表面起点型破壊を中空印(○, △), Fish-eyeを伴う内部起点型破壊を中実印(●, ▲)で区別した。図中の実線は, 両材の表面起点型のデータおよび各材の内部起点型のデータを直線回帰したものである。

図から明らかなように, SUJ 2-L材では高応力・短寿命域では表面起点型破壊, 低応力・長寿命

域では内部起点型破壊が生じる結果、そのS-N曲線は明瞭な2段折れ曲がりを示す。SUJ 2-H材でも高応力・短寿命域では表面起点型破壊、低応力・長寿命域では内部起点型破壊を生じるが、SUJ 2-L材のS-N曲線と異なり水平部が不明瞭である。内部起点型破壊が生じる最も高い応力を遷移応力と定義すると、遷移応力はSUJ 2-L材では1300MPa、SUJ 2-H材では1500MPaであり、SUJ 2-H材のほうが高応力となる。また、表面起点型破壊と内部起点型破壊が混在する応力の範囲は、SUJ 2-L材

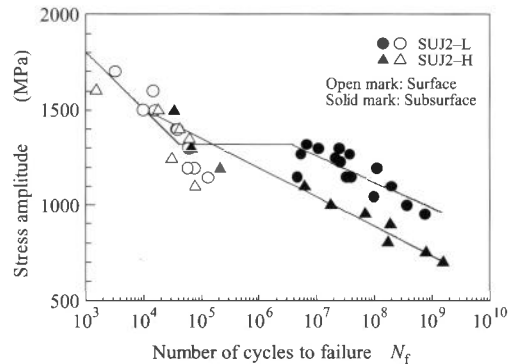


図3 S-N曲線

では150MPa ($1150\text{MPa} < \sigma < 1300\text{MPa}$)、SUJ 2-H材では400MPa ($1100\text{MPa} < \sigma < 1500\text{MPa}$)であり、SUJ 2-L材に比べてSUJ 2-H材のほうが広い。すなわち図2からも推測されるように、SUJ 2-H材ではSUJ 2-L材に比べて、より大きな介在物が、破壊起点となりうる表面近傍に存在する確率が高いので、高応力まで内部起点型破壊が生じ、また表面起点型破壊と内部起点型破壊の競合の結果、両起点型破壊の混在する応力の範囲も広がったと考えられる。

表面起点型破壊の領域においては、両材の疲労寿命および表面起点型破壊となる下限の応力はほぼ同程度である。表面起点型破壊は外部環境や表面性状によって強く影響を受けるが、本研究の場合、両材の表面粗さ、残留応力および硬さはほぼ同程度であり、かつ同一環境で疲労試験が行われているので、こうした結果が得られたものと考えられる。一方、内部起点型破壊の領域においては、SUJ 2-H材の清浄度がSUJ 2-L材に比べて高いにもかかわらず、その疲労寿命は短い。これは介在物の個数で表される清浄度よりも、その寸法が大きな影響を及ぼしているためである。すなわち図2に示したように、SUJ 2-L材に比べてSUJ 2-H材のほうが大きな介在物が存在するので、そこからのき裂発生が促進され、またその後のき裂成長寿命も短くなることに起因すると考えられる。

3. 2 破面様相

両材の内部起点型破壊の破面には図4に示すような介在物を起点としたFish-eyeが観察されたが、両材のFish-eyeの様相には顕著な差異は認められず、すべてのFish-eyeはほぼ円形で試験片表面に内接しており、その中心付近には介在物が存在していた。

次に、破壊起点となった介在物のEDSによる元素分析結果を図5に示す。ただしSUJ 2-L材については、大気湿度を制御した実験⁶⁾で得られた破面を使用した。6例(両材3本ずつ)中5例はAlとOが検出されたことから、介在物は Al_2O_3 であると考えられる(図5(a))。残りの1例(SUJ 2-L材)は図5(b)に見られるようにSが検出されたことから硫化物系の介在物と推測される。なお、本研究で用いた材料と同じSUJ 2-L材において、破壊起点となった介在物はTiNであるとの報告も

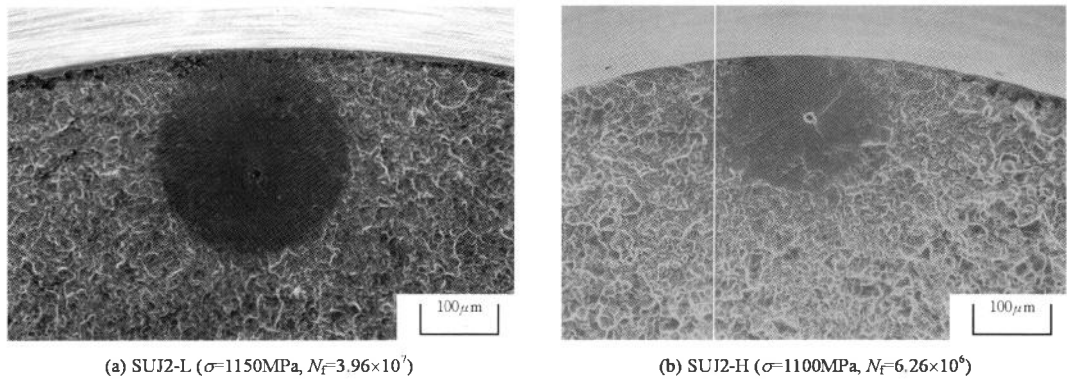


図4 Fish-eyeの様相

ある⁷⁾。介在物の形状は Al_2O_3 と硫化物系で異なっており、前者は球状であるのに対して後者は角張った形状である。このように、SUJ2-L材では介在物の形状は異なっているが、疲労寿命に顕著な差異は認められなかった。このことは、介在物の形状の違いによって疲労寿命は大きな影響を受けないとする報告⁸⁾と一致している。

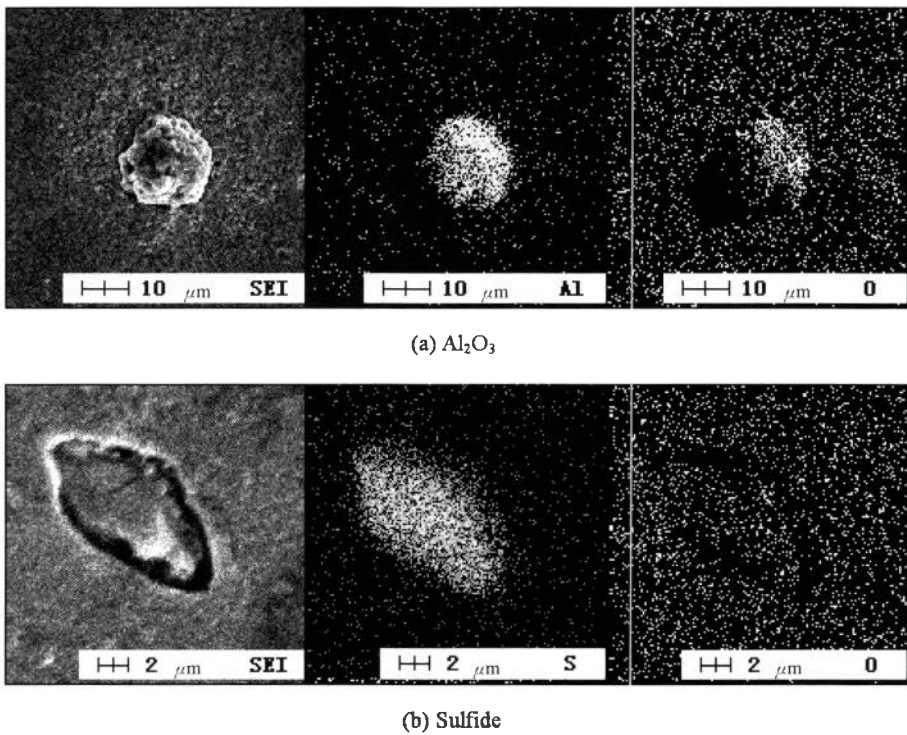


図5 介在物のEDS解析

ところで、表3からわかるように、両材ともA系の介在物（硫化物）に比べてB、C系の介在物（酸化物）の数が少ない。しかしEDSの結果では前述のとおり、6例中5例がB系（ Al_2O_3 ）であった。このことから、 Al_2O_3 の寸法が大きいため破壊起点となったと考えられる。

3. 3 Fish-eyeと介在物の定量的検討

Fish-eyeの試験片半径方向長さ $2b$ とその直角方向長さ $2a$ の関係を図6に示す。図中の直線は真円を示す。図から明らかなように、清浄度にかかわらずFish-eyeの形状はほぼ真円であり、またその大きさも同程度である。しかし、一例のみ他の試験片と異なりFish-eyeはかなり大きく、 $2a=496\mu m$ 、 $2b=412\mu m$ 、表面から介在物までの深さ $d=212\mu m$ 、介在物寸法 $\sqrt{area}=20.3\mu m$ であった。介在物は試験片表面から深い位置に存在していたが、その寸法が大きかったので破壊起点となったと考えられる。

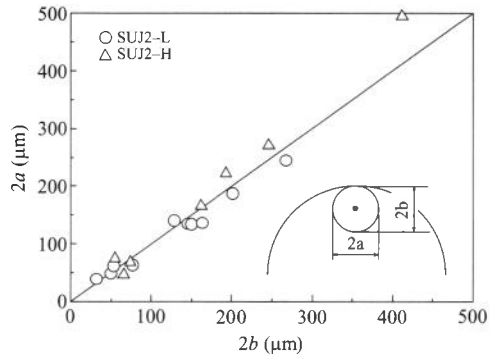


図6 介在物の形状

次に、試験片表面から介在物までの深さと介在物の \sqrt{area} の関係を図7に示す。図からわかるように、破壊起点となった介在物の \sqrt{area} はSUJ2-L材に比べてSUJ2-H材のほうが明らかに大きく、その平均値は前者では $8.3\mu m$ であるのに対して後者では $17.1\mu m$ である。また、両材とも介在物までの深さの増加に伴って介在物の \sqrt{area} は増加する傾向がある。

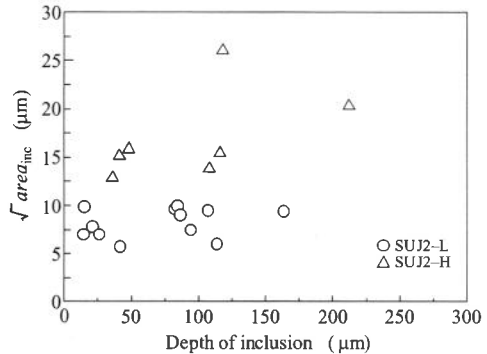


図7 介在物の位置と介在物寸法の関係

本研究において破壊起点となった最大の介在物はSUJ2-H材の $\sqrt{area}=26.1\mu m$ であった。しかし、そのFish-eyeの大きさは他のFish-eyeと比較して顕著な差異は認められなかった ($2a=271\mu m$ 、 $2b=246\mu m$ 、 $d=118\mu m$)。

以上のことから、介在物寸法はFish-eyeの形状に影響を及ぼさないが、介在物がより深い位置に存在していても、その寸法が大きければ破壊起点となりうると言える。両材の破壊起点となった介在物の大きさ $\sqrt{area_{inc}}$ から、村上らが提案している次式⁹⁾を用いて応力拡大係数幅 ΔK_{inc} を求めた。

$$\Delta K_{inc} = 0.5\sigma_{inc}\sqrt{\pi\sqrt{area_{inc}}}$$

ただし、計算には応力勾配を考慮した介在物の位置における応力を用い、引張側のみを考慮して

いる。 ΔK_{inc} と疲労寿命 N_f の関係を図8に示す。図中の直線は全データに関して最小自乗法で求めたものである。図から明らかなように、介在物性状にかかわらず ΔK_{inc} と N_f の間に強い相関がある。すなわち、両材とも ΔK_{inc} の減少に伴って N_f は増加する。このことから供試材の特性（引張強さ、硬さ、残留応力など）がほぼ同程度であれば、介在物寸法 \sqrt{area} によって $S-N$ 特性が決定されると考えられる¹⁰⁾が、内部起点型破壊の下限値については別の視点で検討する必要がある¹¹⁾。

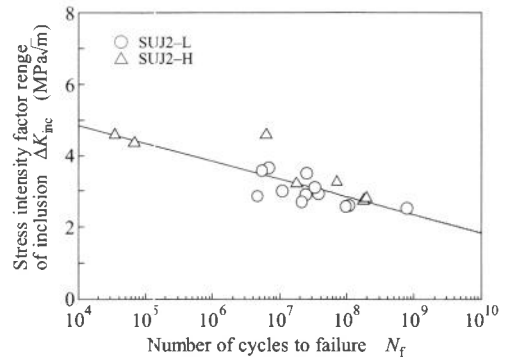


図8 疲労寿命と介在物の応力拡大係数幅の関係

3.4 介在物性状に依存する $S-N$ 曲線

実験結果に基づいて、介在物性状に依存する $S-N$ 曲線の形態を図9に示す。本実験で用いた供試材は清浄度および介在物寸法は両材で異なっていたにもかかわらず、表面起点型破壊が生じる領域における疲労寿命に顕著な差異は認められなかった。このことから表面起点型破壊は介在物性状に影響されず、機械的性質によって $S-N$ 特性が決まると考えられる。

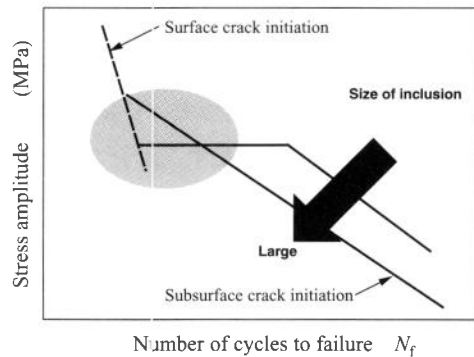


図9 介在物寸法に依存する疲労強度特性の模式図

一方、内部起点型破壊においては、清浄度によってその $S-N$ 特性は規定されず、介在物寸法が問題となる。すなわち、本実験結果で明らかにしたように、清浄度が高くても、大きな介在物が存在すればそれが破壊起点となり疲労強度を低下させる。

ところで、内部き裂の発生は介在物をき裂と見なして求めた応力拡大係数幅が最大となる介在物から生ずると考えられるので、介在物寸法だけでは決まらない。すなわち、大きな介在物であれば表面から深い位置に存在していても、表面近傍の小さな介在物に比べて応力拡大係数幅が大きくなる可能性がある。このことから、大きな介在物を含む試験片ほど危険断面の面積は大きくなり、内部起点型破壊を生じ易いと考えられる。

本研究において、介在物寸法の大きい試験片（SUJ2-H材）の遷移応力は小さい試験片（SUJ2-L材）より高くなった。介在物寸法のみを考慮すれば、その増加に伴って遷移応力は上昇すると考えられるので合理的な結果であると思われる。しかし、表面起点型破壊と内部起点型破壊の混在する領域（ $\sigma = 1400\text{MPa}$ 付近）においては、介在物寸法に加えて表面性状や外部環境などの他の要因に

も依存して、どちらの破壊形態となりうるかが決定されると考えられるので、遷移応力の介在物寸法依存性を明確に把握するためには、さらに多くの疲労試験を行い統計的に検討する必要があると考えられる。なお、実用上重要な内部起点型破壊の疲労限度の存在については、試験片内部で発生する現象に対する観察手段の問題や疲労強度のデータに多大な時間を必要とする問題から、今後の課題である。

5. 結 言

介在物性状の異なる2種類の高炭素クロム軸受鋼について室温大気中で疲労試験を行い、 $S-N$ 特性および破壊機構に及ぼす介在物性状(清浄度および寸法)の影響について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 表面起点型破壊となる領域において介在物性状の影響は認められず、両材はほぼ同様の疲労強度特性を示した。一方、内部起点型破壊となる領域においては、大きな介在物を多く含んでいない材料ほど疲労強度特性は高く、遷移応力も低応力となった。

(2) 清浄度が高い材料であっても疲労強度特性が優れていなかったことから、清浄度は内部起点型破壊の疲労強度を支配する因子ではなかった。これはJISによる清浄度の評価が介在物の個数を対象としており、寸法が考慮されないためである。

(3) Fish-eyeの形態や様相に清浄度および介在物寸法の影響は認められず、すべてのFish-eyeはほぼ円形で試験片表面に内接しており、その中心付近には介在物が存在した。また、破壊起点となった介在物の多くは Al_2O_3 であった。

(4) 介在物性状にかかわらず、介在物の応力拡大係数幅の減少に伴って疲労寿命は増加した。すなわち、内部起点型破壊の疲労特性は起点となった介在物の寸法 \sqrt{area} で決定され、介在物寸法が内部起点型破壊の $S-N$ 特性を規定する重要な因子のひとつであると言えるので、実用にあたり留意する必要がある。

終わりに本研究を進めるにあたり、多大なご助力をいただいた大同分析リサーチ・飯久保知人博士、岐阜大学工学部・戸梶恵郎教授、豊田工業高等専門学校・中島正貴教授に謝意を表する。

参 考 文 献

1. 増田千利・西島 敏・田中義久, 機論, 52-476, A (1986), 847-852.
2. 小沼静代・古川 徹, 材料, 38-433 (1988), 1128-1132.
3. 江村秀樹・浅見克敏, 機論, 55-509, A (1989), 45-50.
4. 中島正貴・酒井達雄・清水利弘, 機論, 65-640, A (1999), 2504-2510.
5. 高 行男・井藤賀久岳, 中日本自動車短期大学論叢, 33 (2003), 33-42.
6. 高 行男・井藤賀久岳, 中日本自動車短期大学論叢, 34 (2004), 1-7.
7. 酒井達雄・武田光弘・塩澤和章・越智保雄・中島正貴・中村 孝・小熊規泰, 材料, 49-7 (2000), 779-785.

高 行男・井藤賀久岳：自動車用材料における高強度鋼の適用およびその問題点

8. 村上敬宣, 金属疲労微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂 (1993).
9. 村上敬宣・児玉昭太郎・小沼静代, 機論, 54-500 (1988), 688-696.
10. 高 行男・井藤賀久岳・長谷川達也・加賀谷忠治・戸梶恵郎・中島正貴, 機論, 68-667, A (2002), 484-490.
11. 中島正貴・神谷奈美・井藤賀久岳・戸梶恵郎・高 行男, 機論, 70-699, A (2004), 1636-1642.