疲労の基礎と実機疲労設計の最新動向

3. 自動車の疲労設計の基礎と最近の研究動向

宮 川 進* 藤 井 淳 司**

Fundamentals of Fatigue and Recent Trends on Fatigue Design in Mechanical Structures

III : Fundamentals and Recent Research-Trends on Fatigue Design for Automobile

by

Susumu MIYAKAWA* and Atsushi FUJII**

Key words : Automobile, Fatigue, Durability testing, FMEA, Research trends, Efficient fatigue testing, Small specimen

1 はじめに

自動車の疲労設計に重要なこととして「疲労に関する知識」と「解析予測手法」は勿論のこと、それ以外にも「使用環境負荷の把握」と「破壊モード予測に基づく設計」がある。

本稿では、負荷の把握、疲労強度保証技術および未然防止の3つの観点から自動車の信頼性・疲労耐久性保証の取組みについて解説し、さらに話題となっている疲労研究の最新動向を紹介する。

2 自動車の信頼性・疲労耐久性保証の特徴

自動車は世界各地の多様な環境下で使用される。ユーザーは走行性能、制動性および操縦性といった基本性能は勿論のこと、付属する快適性機能や利便性機能も、期待する期間において適切に維持されることを求める。ここに、自動車の信頼性保証の特徴が良く表れている。道路整備状況や気温・湿度といった使用環境は地域によって大きく異なり、走行車速、積載量および耐用期間中の走行距離等の使用条件はユーザー毎に異なる。即ち、負荷条件は大きくばらつく。一方、大量生産品であることも特徴の一つである。極めて低い故障率を保証するには、製造工程や素材に起因するばらつきを考慮する必要がある。そのために、製造・素材因子の疲労強度への影響メカニズム究明や材料力学的解析手法の整備が重要である。従って、負荷把握と材料力学的視点の両面から疲労強度保証を検討する必要がある。

以上の背景から、自動車の疲労設計は図1に示す信頼性保証の基本であるストレス・ストレングスモデル¹⁾の概念に基づいて議論されることが多い。このモデルは、市場の負荷分布と部品の強度分布が交差する領域で故障が発生することを表している。即ち、強度の下限が負荷の上限を十分に余裕を持って上回るならば、故障発生確

$$F = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad u = -\frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}} \quad (1)$$

率を十分に低いレベルに抑えることができる。仮に、負荷と強度が正規分布または、対数正規分布で近似でき、さらに、それぞれの平均と標準偏差が既知であるならば、故障発生確率は、式(1)によって表される。

一方、車両の初期設計段階では、負荷や強度の平均や標準偏差を定量的に把握できるとは限らない。しかし、このような場合にも、ストレス・ストレングスモデルの考え方は信頼性保証の指針として有効である。この考え方によれば、設計上の安全率は負荷の上限に対する強度の下限の余裕度として定義されるべきである。即ち、負荷や強度の変動要因を洗い出し、その上下限を想定して初期検討を行うならば、ストレス・ストレングスモデルにおける負荷分布と強度分布の交差を十分に小さくすることができる。

ストレス・ストレングスモデルの重要性は自動車分野に限るものではない。疲労強度保証技術を学ぶ上で負荷分布の議論は疲労解析技術と同等に重要であるが、一般

† 原稿受理 平成 21 年 6 月 22 日 Received Jun. 22, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (株)デンソー材料技術部 〒448-8661 刈谷市昭和町, Mat. Eng. R & D Dept., DENSO CORPORATION., Showa-cho, Kariya, 448-8661

** 正 会 員 トヨタ自動車(株)車両技術開発部 〒471-8572 豊田市トヨタ町, Vehicle Eng. Dept Div., TOYOTA MOTOR CORPORATION., Toyota-cho, Toyota, 471-8572

論として議論し難いために取り上げられることが少ない。そこで、次章では、特に市場負荷のばらつきが大きい自動車分野における市場負荷把握事例とそれに基づいた耐久性試験方法の設定事例を紹介するので、参考として頂きたい。

3 負荷把握と耐久性試験法

3・1 使用環境

自動車の使用される気象環境が多岐にわたることは容易に想像がつく。例えば、気温に関しては、カナダ北部等の厳寒期には $-40 \sim -45^{\circ}\text{C}$ となる一方で、アラビア半島やアフリカの夏期には $+40 \sim 50^{\circ}\text{C}$ になることもある。低温条件は各種機器の作動荷重の増大や材料の衝撃強さ等に、高温条件は樹脂材料の強度や劣化等に影響する。

また、世界各地で道路環境は大きく異なる。国内の舗装率は非常に高いが、海外では未舗装路面はめずらしくない。例えば、図2に示す「岩石路」²⁾は大小の岩石が路面を覆っている道路であり、負荷が厳しい。このような路面はアフリカ、中近東および東南アジアに見られる。続いて、図3には「波状路」²⁾と呼ばれる路面を示す。これはアフリカ、オーストリアおよびブラジルで見られる。この路面はサスペンションばね下部品の上下共振とタイヤの駆動トルクで形成されるもので、一定周波数の振動負荷を車両に与え、部品の共振現象等の点で厳しい路面である。

一般的な路面凹凸から自動車が受ける負荷は広帯域のランダム負荷に分類される。自動車が受ける負荷を他の輸送システムと比較して図4に示す。³⁾この様に、自動車が路面の凹凸のランダム性を反映した負荷を受けることは決められた軌道上を走行する鉄道や決められた条件下で作動する各種装置とは大きく異なる特徴である。

3・2 使用条件

走行車速、積載条件、走行距離、始動回数、加減速頻度、旋回加速度、トーイングの有無および操作荷重等の

図2 岩石路

図3 波状路

図4 負荷波形の比較

使用条件は個々のユーザー毎に大きく異なる。右左折や旋回走行時に発生するディスクホイールの負荷計測結果⁴⁾を図5に示す。縦軸の曲げモーメントは旋回横加速度に相関の強い指標で、横軸の累積頻度は走行距離当たりの発生確率と考えれば良い。例えば、0.1回/kmの頻度と比較すると、97%のドライバーの走行条件では曲げモーメントが $700\text{N}\cdot\text{m}$ であるが、上限1%の厳しい走行をするドライバーでは $1200\text{N}\cdot\text{m}$ に達することを表す。

3・3 市場負荷把握と評価路面

以上のように、自動車の使用環境や使用条件は多岐に渡るから、信頼性保証のためには、市場負荷を把握することが重要となる。市場負荷を調査する手法としては、以下の方法がある。

- (a) 市場での計測による方法
- (b) 市場故障品の調査による方法
- (c) 市場を模擬した評価路面での計測

図6に「市場での計測による方法」の例⁵⁾を示す。同図は、路面舗装率と負荷の大きさの関係を調査したものであり、負荷の大きさを疲れ被害度に換算して示してい

図5 ディスクホイールの曲げモーメント

図6 市場負荷計測の例ー舗装率と負荷の関係

る。同図より、舗装率が上がるにつれて上下方向の負荷は減少するが、左右方向の負荷が逆に増大する場合もあることがわかる。舗装率が高くなるにつれて高速でのコーナリング機会が増えることがその要因と考えられる。

このような負荷の大きさを把握する試みを自動車技術会疲労信頼性部門委員会路面入力標準化 W/G が実施した。⁶⁾ この活動では、日本全国 350 にのぼるルートを計測し、データベースを整備した。さらに最近では、簡単に取り付けられる自動計測・記録装置が開発され、新興市場の調査に使われる。⁷⁾

次に「市場故障品の回収による方法」は、市場でごく希に故障が生じた場合に用いる方法で、故障時の走行距離に対しワイブル解析を行う。自動車の場合、何年間にも渡って同型車が販売され、それぞれの車両の走行距離もばらつくため、特定の走行距離における母数台数の推定は非常に煩雑なものとなる。即ち、対象車両全体の走行距離分布を、各月の販売台数の変動や車両残存率や各地域の月間走行距離を用いて推定する。このようにして得たワイブル解析結果と試験場内評価路面（以下、プルーピンググラウンド）での試験結果と比較することにより、市場負荷情報を定量的に知ることができ、設計目標の設定に利用される。図 7 は市場データと試験場内評価路面での耐久試験結果の相関を比較した一例⁸⁾である。

この他にも、廃車調査において、限られた故障情報から故障率を推定する手法も提案されている。⁹⁾

得られたワイブル解析結果や市場での計測結果等を通してプルーピンググラウンドと市場の厳しさの相関を把握する。その結果、開発過程では、通常、作用荷重を「市場を模擬した評価路面での計測」により予測することができる。図 8 にプルーピンググラウンドの例を示す。²⁾

3・4 実車耐久評価

3・4・1 自動車の耐久試験の種類 自動車の耐久試験を分類すると、試験車を実際に走行させて行う実車試験と実験室内で実施するベンチ試験となる。

3・4・2 実車耐久走行 実車耐久走行試験には、エンジンや駆動部品を主な対象とする高速耐久走行試験、ボデーやサスペンションの路面凹凸負荷に対する耐久性評価を目的とする悪路耐久走行試験がある。

図 7 市場とプルーピンググラウンドの比較

図 8 プルーピンググラウンドの例（トヨタ：士別）

この内、悪路耐久走行では、一般に未舗装悪路、舗装悪路、基準凹凸路および波状路等の比較的凹凸の厳しい路面を長期間走行することにより耐久寿命を確認する。なお、悪路耐久走行の効率化を目的として、無人走行による耐久試験方法も開発されてきた。²⁾

3・4・3 ロードシミュレーション試験 ロードシミュレーション試験は悪路耐久走行試験を実験室内で行うために開発された実車による加振疲労試験手法である。路面凹凸に対する耐久強度を評価する手法ということから、ロードシミュレーションと呼ばれている。図 9 に示す 12 軸加振装置は、治具に固定した車軸を、前後、上下、左右方向および制動負荷として加振するものである。いずれの場合にも、ランダムな路面凹凸による負荷を忠実に再現するために、事前にテストコースで計測した加速度やひずみの実働波形を目標信号として、これを忠実に再現するような制御を行っている。

ここまでは、疲労強度保証における負荷・環境条件把握の重要性を紹介した。疲労耐久性保証の議論がストレスングスの視点に偏りがちな中で、ストレス把握の重要性を再認識することを目的として解説したものである。

4 破壊モード予測に基づく設計改善

前節までは、技術論や技術手法に関わる議論であるが、ここからは、信頼性エンジニアの意識や職場での信頼性向上活動のあり方に関する議論である。開発現場に立つと、高度な技術だけで問題を回避できるものではなく、それを補う方法が非常に重要であることを痛感する。例えば、初期設計段階で注目していない部位に弱点があることが開発後期に分かったとか、専門家の助言があれば

図 9 12 軸加振ロードシミュレータ

早く解決できていたのに、と思えることがある。このような場合、故障モードを洗い出してその影響度を議論することが有効である。そのために、FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) が活用されることが多い。FMEAは構成部品の機能と故障モードを洗い出し、上位のシステムにどのように影響するかを評価するためのものである。また、「故障の厳しさ」や「発生頻度」等から故障の重要度も評価する。これは、リスクマネジメントの概念に通ずるものである。さらに、その設計対応や確認試験の内容を記入するため、管理技術の面でも活用される。図10にFMEAシートの例を示す。

自動車分野では、米国3社が規定したQS9000の影響により、FMEAは広く浸透しつつある。一方、本来の問題発見の目的から外れ、形式的な使い方が見られることもある。例えば、ある部品の耐久性に課題があることを検出しても、その対応を単に疲労試験で確認するとしたのでは意味がない。このような場合、一步踏み込んで、「熱処理条件の下限供試品を用意して確認試験を行う」とか、「加工精度の公差の組合せから下限を確認する」等の具体的な検討方法へ反映されてこそ意味がある。

この様な視点から、FMEA とデザインレビューを組み合わせた手法として DRBFM (Design Review Based on Failure Mode) が提案されている。^{10), 11)} この手法は「人の問題発見能力を生かすこと」に力点がおかれ、デザインレビューに参加するメンバーの議論を通して問題点を発見して、設計改善や信頼性試験計画に反映することを狙いとしている。FMEA シートと実物を前に、設計者と生産技術や実験評価の専門家がそれぞれの立場から意見交換を行い、議論のキャッチボールの中で問題点を発見する手法である。信頼性問題を予見して対応する能力は創造性に通ずるものであると指摘されている。

5 最近の疲労研究動向

近年、環境問題に対する関心がより一層強くなり、その対応の一つとして軽量化が求められ、他の一つとして自動車部品の性能や機能向上に関する技術開発が求められている。

前者に対して構造の最適化，材料の置換およびサイズダウン等が考えられる．材料の置換に関しては，高強度鉄鋼材料による板厚の低減や軽量であるアルミニウム合金材料，マグネシウム合金材料および樹脂材料の採用が考えられる．このうち，高い比強度とじん性を有し，Cuが含まれていないため耐食性も良く，さらに熱処理による強度やじん性の向上も可能である Al-Si-Mg 系アルミニウム合金鋳物材料 AC4CH の疲労強度が使用環境温度¹²⁾

残留応力付与¹³⁾および接合法¹⁴⁾等の面から検討されている。

自動車部品の性能や機能向上に係る材料の疲労強度特性を得るための最近の疲労試験法を以下に示す。

5・1 高効率な疲労試験法

自動車部品に対する使用環境の苛酷化および長寿命要求があり、構造用材料の強度保証と耐久性向上が重要となっている。よって、実用環境下での強度信頼性を迅速に評価し、その結果を自動車部品開発に反映させる必要がある。

疲労強度特性は安全設計には欠かすことのできない重要な材料特性である。近年の疲労強度研究によると、高強度材料では 10^7 回の繰返しを超える超長寿命領域で内部介在物を起点とした疲労破壊（フィッシュアイ破壊）が顕著となり、^{15)~20)} 従来、疲労限度とされてきた 10^7 回程度の繰返し数に対する応力レベル以下においても疲労破壊することが明らかにされてきている。この現象は、破壊形態が表面すべりを起点とする表面起点型から介在物などの内部欠陥を起点とする内部起点型に遷移することにより起こる、ということもすでに明らかにされてきている。^{15)~20), 23)}

自動車のエンジンや駆動部部品は 10 年の使用において、 10^8 回以上の寿命が求められる。例えば、噴射ポンプシステムの部品では、内部介在物起点の疲労破壊が懸念される高強度材料が採用されている。この高強度材料として、焼入れ焼戻しの熱処理がなされた軸受け鋼 SUJ2、合金工具鋼 SKD11、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS、浸炭の熱処理がなされた機械構造用合金鋼 SCr 等がある。

実部材の疲労強度設計は、これまで、この 10^7 回程度の疲労強度を疲労限度として行われてきている。実際の設計ではある一定の安全率を考慮しているものの、超長寿命領域における疲労強度の低下は実部材の疲労強度設計の根幹に関わる現象と言え、各種材料の超長寿命疲労強度特性の把握が必要であると考えられる。

実部材の超長寿命疲労強度特性の把握を考えた場合、材料の製造段階から実部材としての使われ方に至るまで種々な要因について検討を加える必要がある。種々な要因としては、材料製造段階における清浄度、熱処理による硬さ、各工程で生じる残留応力があり、実部材には角部などの応力集中部、組付け方法や作動状態によっては平均応力がある。

一方、超長寿命領域の疲労強度評価では試験が長期化することが懸念される。従来の疲労強度評価には、小野式回転曲げ疲労試験機や電気油圧サーボ式の疲労試験機等が用いられてきており、多くの疲労データが蓄積されてきている。しかし、これらの試験機で超長寿命領域の疲労強度評価を行おうとすると、例えば、 10^9 回の疲労試験となると小野式回転曲げは周波数 60Hz 程度であるので、 $10^9 / (60\text{Hz} \times 60\text{sec} \times 60\text{min} \times 24\text{hr}) = 193\text{day}$ となり、わずか 1 点のデータを取得するのに半年以上の期間が必要となる。近年において、300Hz 程度の高速度タイプの電気油圧サーボ式の疲労試験機も開発されているが、

[illegible]

図 10 FMEA シート

10^9 回オーダーの S-N 曲線を取得するためには効率的ではないと考えられる。この基本的課題を解決するために各種疲労試験法が提案されている。

1 台の試験機で同時に 4 本の試験片に対する疲労試験が可能な 4 連式軸荷重疲労試験機が開発されている。²¹⁾ 荷重容量 10kN ($\approx$ 1ton) 荷重速度 80Hz であり、安価でありながら荷重波形、長期安定性、高剛性および十分なアライメント等、試験機に要求される基本的な性能を備えている。そして、本試験機により、高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) に対する超長寿命領域の疲労試験を実施した結果、得られた S-N データのばらつきはかなり小さく、超長寿命領域における破壊形態はすべて内部起点型破壊であり、試験片や試験機の偏心による曲げ成分は十分に小さいことが検証されたとの報告がなされている。

特に、 10^8 回を超えるような実用長寿命領域の疲労強度特性の評価を迅速に行うために、試験効率が画期的に高く、かつ、高精度、低コストで運用工数もかからない高効率マルチ疲労試験システムが開発されている。²²⁾ 試験ユニット 6 台を備え、各試験ユニットの試験速度を従来機の 2 倍の 100Hz とすることで、試験効率は従来機 (50Hz $\times$ 1 軸) に比べて 12 倍である。図 11 は、組成や欠陥量の異なるアルミニウム合金鋳物からの切出し試験片について、高温疲労強度を開発機にて評価した例である。図中の 5 本の S-N 線図の全データ 51 点を求めるのに要した日数は、開発機で 8 日であった。同様のデータを従来機 (50Hz $\times$ 1 軸) を用いて採るとすると、約 92 日必要であり、開発機を用いることにより評価時間を約 1/12 に低減できるとの報告がなされている。

超音波による共振を利用した超音波疲労試験法も有効である。^{24)~31)} 現在、用いられている超音波疲労試験機の多くは 20kHz で疲労試験が可能であることより、例えば 10^9 回の疲労試験がわずか 14 時間で実施可能となる。この超音波疲労試験には、その高い試験周波数にとまなう試験片の内部摩擦による発熱の問題もあるが、空気による試験片強制冷却²⁴⁾、断続運転²⁶⁾、²⁷⁾ や断熱運転および低温槽³²⁾ により発熱が抑えられるとの報告がある。そして、高強度鋼に対し、内部破壊の場合には従来式と 20kHz の超音波式の結果が良く一致したとの報告がな

れており、^{33)~35)} 超音波疲労試験を用いた報告が増加してきている。自動車部品に用いられている各種鉄鋼材料、³⁶⁾ アルミニウム合金鋳物材料³⁸⁾ およびアルミニウム合金ダイカスト材料^{39)~41)} に対する超長寿命疲労強度特性が検討されている。図 12 に各種鉄鋼材料に対して求められた S-N 線図を、図 13 にアルミニウム合金鋳物材料に対して求められた S-N 線図を示す。図中のデータを高効率で得ることが可能であり、超音波疲労試験機の有用性が明らかとなった。

但し、インコネル 718⁴²⁾ の疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響を検討するため、大気中と窒素ガス中で平滑材と切欠き材を用いて超音波疲労試験と回転曲げ疲労試験を行った結果、本合金では疲労強度に繰返し速度の影響が認められるとの報告がなされている。材料によっては、超音波疲労試験を加速試験法として用いる場合に注意する必要があることを示唆しているものと思われる。

5・2 小型試験片による疲労試験法

近年、自動車の車体軽量化を目的として、高張力鋼板の適用が進められている。しかしながら、高強度化に伴い鋼板自身の疲労強度は増加するのに対して、そのスポット溶接継手の疲労強度は向上せず、軟鋼板のそれと大きく変わらなく、高張力鋼板スポット溶接継手の重要な課題となっている。

例えば、スポット溶接を環状き裂とみなし、応力拡大

図 12 各種鉄鋼材料の S-N 線図

図 11 アルミニウム合金鋳物の S-N 線図

図 13 アルミニウム合金鋳物 A356-T6 の S-N 線図

係数を用いて疲労寿命を整理することが試みられている。この手法では、溶接部を弾性体あるいは均質体として扱うことから、鋼板強度・材質の差異を考慮した寿命評価は不可能であった。

軟鋼板および高張力鋼板のスポット溶接部を構成する各部分（母材、熱影響部および溶接金属等）から全長3mm以下（板厚0.3mm）の小型試験片を採取し、引張試験および疲労試験を行なう技術が開発された。それらの材料データを用いてスポット溶接継手の有限要素解析と疲労限度予測を行なった結果、溶接継手の疲労限度を精度良く予測することができるとの報告がなされている。⁴³⁾

この開発された技術は、今後、自動車の高張力鋼板スポット溶接継手の疲労強度改善にとって有用な手法になるものと期待される。

6 おわりに

自動車の信頼性保全全般の取組みと疲労強度保証のための技術に関して概説した。その上で、漏れの無い検討を実現するためにFMEA等の手法を活用することの重要性を説明した。自動車は疲労強度評価技術の向上と共に、FMEA等の手法を通じた設計・評価試験の質の向上によって品質確保がなされている。

最後に、本稿前半では、大見泰明博士（元トヨタ自動車）の調査資料を活用させていただいたことを付記する。

参考文献

- 1) H. Shiomi, "Shinraisei Kougaku Nyum", p.77 (1982) Maruzen.
- 2) T. Sakai, "Jidousha no Kyodo Hoshou to Taikyusei" (1997) Kougyou Chousakai.
- 3) Edited by JSMS, "Zairyuu Kyoudo Gaku", p.116 (1986).
- 4) A. Wimmer and J. Petersen, "Road stress resistance and light weight construction of automobile road wheels", SAE Paper 790713 (1979).
- 5) C. Kubota, K. Konno and M. Yokokawa, "Shijyou ni okeru Siyou Kankyojyoken Chosa no Ichirei", Reliability and Maintainability Symposium JUSE, p.205 (1977).
- 6) T. Aoki, M. Amano, M. Haraguchi, S. Yamamoto, T. Miyatake and S. Yamakawa, "A Measurement and Database Creation of Vehicle Service Loads in Japan Market", JSAE Annual Congress Proceedings, No.12-05, 20054921, (2005).
- 7) H. Markus, V. Markus and K. C. Michael, "Vehicle Structural Durability Requirement Setting for New Markets", JSAE Annual Congress Proceedings, No.19-08, 20085041, (2008).
- 8) B. H. Simpson, "The Ford Engineering Reliability Program", Proceedings of Reliability and Maintainability Conference, pp.171-181 (1965).
- 9) T. Yoshimura and Y. Itou, "The Method to Obtain the Failure Distribution of Population from the Recovery Parts", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.36, No.408, pp.1018-1020 (1987).
- 10) H. Shimizu and T. Yoshimura, "Creative Design Review for Automotive Components", Reliability and Maintainability Symposium JUSE, pp.165-170 (2000).
- 11) T. Yoshimura, "Toyota Shiki Mizen Boushi Shuhou GD3", (2001) Union of Japanese Scientists and Engineers.
- 12) Y. Uematsu, K. Tokaji and N. Hasegawa, "Effect of Test Temperature on Fatigue Behaviour in AC4CH Cast Aluminium Alloy", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.2, pp.199-204 (2006).
- 13) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiura, "Retardation of Fatigue Crack Growth on AC4CH Cast Aluminium Alloy by Laser Peening", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.12, pp.1133-1138 (2007).
- 14) Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, H. Shibata, K. Fujiwara and T. Murayama, "Effect of Friction Stir Processing on the Fatigue Behaviour of Cast Aluminium Alloy", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.1, pp.69-75 (2009).
- 15) Y. Kuroshima, T. Ikeda, M. Harada and S. Harada, "Subsurface Crack Growth Behavior on High Cycle Fatigue of High Strength Steel", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.64, No.626, pp.2536-2541 (1998).
- 16) M. Nakajima, T. Sakai and T. Shimizu, "An Observation of Fish-eye Fracture Process in High Strength Steel SUJ2", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.65, No.640, pp.2504-2510 (1999).
- 17) L. T. Lu and K. Shiozawa, "Effect of Shot-peening on Super-long-life Fatigue Behavior in High Carbon-chromium Bearing Steel", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.67, No.662, pp.1630-1638 (2001).
- 18) L. T. Lu, K. Shiozawa and Y. Morii, "Gigacycle Fatigue Behaviour and Fracture Morphology of High Speed Tool Steel, JIS SKH51", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.69, No.679, pp.662-670 (2003).
- 19) K. Tanaka and Y. Akiniwa, "Fatigue crack propagation behaviour derived from S-N date in very high cycle regime", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.25, pp.775-784 (2002).
- 20) Y. Kuroshima, Y. Saito, M. Shimizu and K. Kawasaki, "Relationship between Fatigue Crack Propagation Originating at Inclusion and Fracture-mode Transition of High-strength Steel", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.60, No.580, pp.2710-2715 (1994).
- 21) T. Furusawa, T. Sakai, R. Takizawa, M. Nakajima, K. Shiozawa, N. Oguma, K. Okada, Y. Ochi, A. Sugeta, N. Kawagoishi, A. Sakaida and H. Sakamoto, "Development of an Multi-type Fatigue Testing Machine in Axial Loading and Verification of Its Fundamental Performance", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.72, No.718, pp.886-893 (2006).
- 22) H. Hohjo and H. Ikuno, "Development of an Efficient Multi Fatigue Testing System", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.12, pp.1177-1182 (2007).

- 23) Y. Furuya, S. Matsuoka, T. Kimura and M. Hayaishi, "Effects of Inclusion and ODA Sizes on Gigacycle Fatigue Properties of High-strength Steels", *Tetsu-to-Hagane*, Vol.91, No.8, pp.630-638 (2005).
- 24) T. Abe, E. Takeuchi, T. Ohmura and S. Matsuoka, *Proceedings of the 1999 Annual Meeting of JSME/MMD*, No.99-16, pp.589-590 (1999).
- 25) H. Ishii, K. Yamanaka and K. Tohgo, "Giga-Cycle Fatigue Strength in Some High Strength Steels by Ultrasonic Fatigue Testing", *Materials Science Research International, Special Technical Publication-1*, pp.59-63 (2001).
- 26) H. Ishii, K. Yamanaka, and K. Tohgo, *Proceedings of the 1999 Annual Meeting of JSME/MMD*, No.99-16, pp.591-592 (1999).
- 27) H. Ishii, *Proceedings of the 48th JSMS Meeting*, pp.11-15 (1999).
- 28) I. Hassen and A. Tholen, "Plasticity due to Superimposed Macrosonic and Static Strains", *Ultrasonics*, March, pp.7-64 (1978).
- 29) S. E. Stanzl, M. Czegley, H. Mayer and E. Tschegg, "Fatigue crack growth under combined Mode I and Mode II loading", *ASTM STP 1020*, pp.479-496 (1989).
- 30) Y. Akiniwa, K. Tanaka and A. Nakatsu, "Evaluation of Fatigue Strength in Very-long Life Regime of SNCM439 Steels", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.70, No.696, pp.1036-1041 (2004).
- 31) Y. Akiniwa, H. Kimura, H. Tsuru and A. Nakamura, "Fatigue Tests of Thin Stainless Steel Sheets Under Bending at Ultrasonic Frequency", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.74, No.742, pp.879-884 (2008).
- 32) K. Takahashi and T. Ogawa, "Evaluation of Giga-cycle Fatigue Properties of Austenitic Stainless Steels Using Ultrasonic Fatigue Test", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.723, pp.1731-1736 (2006).
- 33) Y. Furuya, S. Matsuoka, T. Abe and K. Yamaguchi, "Effect of Frequency on Giga-cycle Fatigue Properties for Low-Temperature-Tempered SNCM439 Steel", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.68, No.667, pp.477-483 (2002).
- 34) Y. Furuya, S. Matsuoka, T. Abe and K. Yamaguchi, "Gigacycle fatigue properties for high-strength low-alloy steel at 100Hz, 600Hz and 20kHz", *Scripta Materialia*, Vol.46, pp.157-162 (2002).
- 35) Y. Furuya and S. Matsuoka, "Ultrasonic Fatigue Properties of High-strength Steel Under Tensile Mean Stress", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.71, No.709, pp.1201-1206 (2005).
- 36) N. Miyamoto, H. Asai, S. Miyakawa, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Gigacycle Fatigue Properties Evaluation for Martensitic Stainless Steels by Using Ultrasonic Fatigue Tests", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.70, No.696, pp.1080-1086 (2004).
- 37) N. Miyamoto, H. Asai, S. Miyakawa, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Evaluation for Gigacycle Fatigue Strength of Alloy Tool Steel", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.54, No.12, pp.1206-1212 (2005).
- 38) A. Fujii and Y. Ohmi, "High cycle fatigue technology in automotive industry-approach for aluminum alloy", *Proceedings of the third International Conference on Very High Cycle Fatigue*, pp.290-297 (2004).
- 39) K. Yamada and S. Miyakawa, "Extra Long Life Fatigue Properties of Aluminum Die Casting Materials", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.55, No.3, pp.295-300 (2006).
- 40) K. Yamada and S. Miyakawa, "Super-long Life Fatigue Properties of Al-Si-Cu Die Casting Alloy by Using Ultrasonic Fatigue Tests", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.717, pp.749-756 (2006).
- 41) K. Yamada and S. Miyakawa, "Super-long Life Fatigue Properties of Aluminum Alloy Die-casting Related with Internal or Surface Defects", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.723, pp.1751-1758 (2006).
- 42) N. Kawagoishi, J. Ogawa, Q. Chen, M. Goto and K. Morino, "Effect of Loading Frequency on Fatigue Strength of Ni-Based Super Alloy", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.722, pp.1542-1549 (2006).
- 43) E. Nakayama, M. Miyahara, K. Okamura, H. Fujimoto and K. Fukui, "Prediction of Fatigue Strength of Spot-Welded Joints Based on Local Material Strength Properties Measured by Small Specimen", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.53, No.10, pp.1136-1142 (2004).