

## 高強度アルミニウム合金重ね継手の疲労き裂モニタリングとその疲労破壊特性

佐々木哲也\* , 本田 尚\*

### Fatigue Crack Monitoring of the High-Strength Aluminum Alloy Lap Joint and its Fatigue Fracture Properties

by Tetsuya SASAKI\* , Takashi HONDA\*

**Abstract;** To prevent fatigue fracture of machines, equipments or structures is essentially important to assure safety of workers at industrial sites because most fracture accidents are attributed to fatigue. Basically, prevention of fatigue fracture used to be attained by employing safe life design or damage tolerance design. However, these conventional anti-fatigue design concepts are not perfect because predicted fatigue life is inaccurate and all cracks are not always detected by non-destructive inspection. These fundamental problems of the safe life design and the damage tolerance design can be eliminated if fatigue damage which may result in a fatal accident can be monitored at any time using some kind of damage sensor. Since fatigue fracture generally occurs in the stress concentration area, developing fatigue damage monitoring technique in joints is important for this approach. In this point of view, the authors proposed new fatigue damage monitoring technique for bolted joints which uses strain gauges embedded in bolts as damage sensors. The previous study revealed that this method is applicable to both shear type bolted joints and flange type bolted joints. However, in shear type specimens, the monitored fatigue damage was limited to visible cracks initiating in outer plates and the change of strain gauge signal due to fatigue crack propagation was relatively small.

In this study, the proposed fatigue damage monitoring method is applied to the high-strength aluminum alloy lap joint specimens in order to confirm the monitoring ability for fatigue damage at any locations, and the more sensitive monitoring method is also examined. Two types of specimens, notched and unnotched, are used to investigate the effect of initial notches at outer plate bolt holes, and fatigue fracture properties of the lap joint are investigated. Following conclusions are obtained from this study:

- (1) There are three different fatigue fracture locations in the high-strength aluminum alloy lap joint specimens that have no initial notches at bolt holes. However, fatigue lives of these specimens are not seriously effected by the fracture location.
- (2) With propagating of a fatigue crack, the fluctuating range of strain gauge signal changes further than the mean value of gauge signal does.
- (3) Using the range of strain gauge signal, fatigue cracks can be detected before final fracture of lap joint specimens regardless of fatigue fracture locations.

**Keywords;** Fatigue, Lap Joint, Damage Monitoring, Strain Gauge, High Strength Aluminum Alloy

---

\* 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

## 1. 緒言

産業現場で使用される各種機械・構造物の破壊による事故の多くは何らかの形で疲労に起因しており<sup>1)</sup>、疲労破壊を防止することは産業現場で働く労働者の安全確保の観点から重要である。このため、疲労破壊が問題となる構造部材には従来から安全寿命設計<sup>2)</sup>や損傷許容設計<sup>2)</sup>などの耐疲労設計手法が開発され、採用されてきた。しかし、疲労寿命の見積もりが甘かったり、非破壊検査で疲労き裂を見落とししたりすると、従来の耐疲労設計手法では疲労破壊を防止できないことがあった。

これらの問題を解決する方法として、構造部材の疲労損傷を常時モニタリングすることによって、致命的な破壊を防止する手法が近年注目されている<sup>3)</sup>。疲労破壊は構造部材の全ての場所に発生するのではなく、溶接部やボルト接合部などの応力集中部に発生するため、これらの部位を集中的に監視すれば疲労破壊の防止が可能になる。このような観点から、材料表面にひずみゲージを貼って疲労損傷をモニタリングする試みが、真壁ら<sup>4-7)</sup>や著者ら<sup>8)9)</sup>によって行われている。また、著者らはひずみゲージ内臓ボルトによる疲労き裂モニタリング手法を開発しており、せん断型継手母材の疲労き裂やフランジ型継手におけるボルトの疲労き裂のモニタリングが可能であることを明らかにしている<sup>10)</sup>。しかし、前報<sup>10)</sup>のせん断型ボルト継手では、外側から観察可能な部材(2面せん断型継手の外側の板)で疲労破壊が発生する場合についてしかモニタリング結果を示せなかった。また、疲労き裂進展に伴うひずみゲージ出力の変化が比較的小さく、ある程度長いき裂しか検出できないという問題があった。

そこで、本研究では外側から見えない部材に疲労破壊が生じる場合についても疲労き裂のモニタリングが可能であるかどうかを検討するとともに、より感度の高いモニタリング方法についても検討する。さらに、継手の疲労破壊位置と疲労寿命の関係などについても検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

Fig.1に本研究で使用した重ね継手試験片を示す。この試験片は、母板(6mm厚)を2枚の添接板(3mm厚)で挟んだ2面せん断型継手であり、ファスナには軸力測定用ひずみゲージを内蔵したM8の

六角穴付きボルト2本を使用している。ボルトに埋め込んだひずみゲージによって正しくボルト軸力を測定するためには、ボルト頭部とナットの間に十分な長さが必要であるため、円筒形のスペーサを介してナットを締付けている。

ボルト穴に初期欠陥が存在することによる影響を調べるために、ボルト穴に切欠きを付与しない場合、ボルト頭部側添接板の荷重端側ボルト穴の両側に切欠きを付与した場合の2種類を疲労試験に供した。

### 2.2 供試材

試験片の材料は代表的なAl-Cu系構造用高強度アルミニウム合金である2024-T3とした。本実験で使用した2024-T3は、切欠きなし母板、切欠きなし添接板、切欠き付き添接板のそれぞれについて異なるメーカーが製造したものであったが、その機械的性質と化学成分はいずれもJIS H4000(2001)の基準を満たすものである。

代表例として、切欠きなし母板で使用した2024-T3の機械的性質と化学成分をそれぞれTable 1、Table 2に示す。

### 2.3 実験条件

ボルト軸力はボルト内に埋め込んだ軸力測定用ひずみゲージの出力に基づいて測定した。実験に使用し

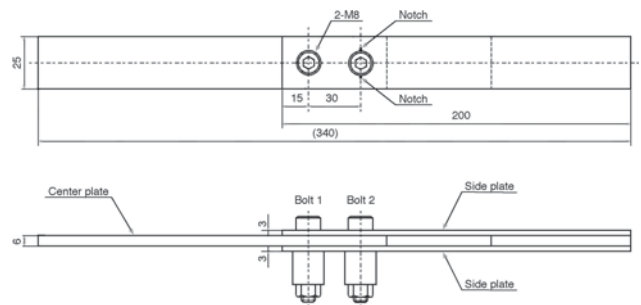


Fig.1 Configuration of lap joint specimen.  
重ね継手試験片の形状

Table 1 Mechanical properties of 2024-T3.  
2024-T3の機械的性質

Tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation %
446	307	17.2

Table 2 Chemical composition of 2024-T3 (wt. %).  
2024-T3の化学成分(重量%)

Cu	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Ti	Zn	Ti+Zr
4.3	1.5	0.59	0.004	0.057	0.13	0.029	0.038	0.031

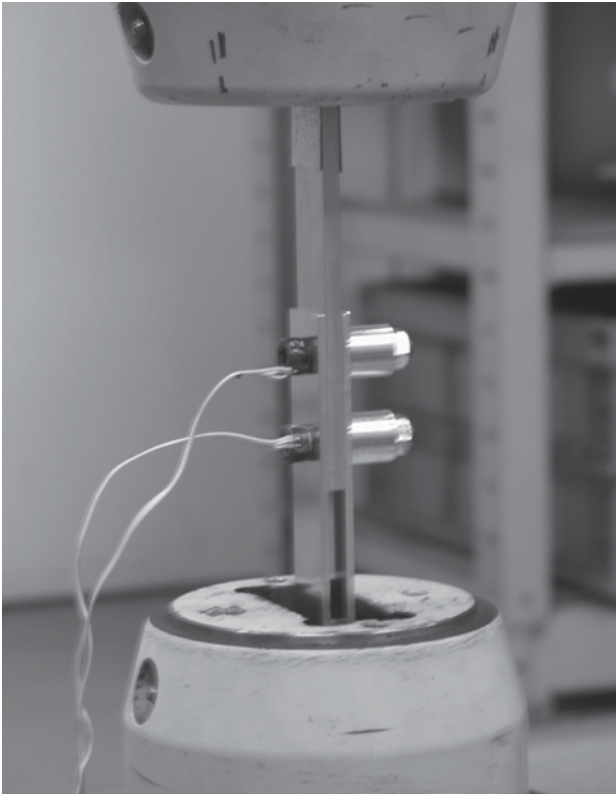


Photo 1 Lap joint specimen in fatigue testing.  
疲労試験中の重ね継手試験片

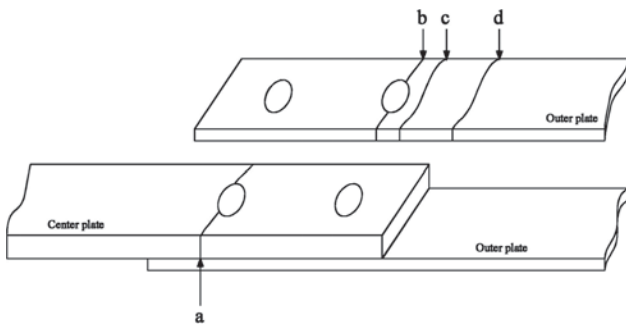


Fig. 2 Location of fatigue failure for lap joint specimens.  
重ね継手試験片の疲労破壊位置

たボルト軸力は $F=12\text{kN}$ であり、2本のボルトが同じ軸力になるようにした。

実験に供した試験片本数は、切欠きなし試験片が6本、切欠き付き試験片が3本である。

疲労試験は、容量100kNの電気油圧サーボ試験機を用い、周波数10Hzの正弦波状繰り返し荷重を負荷して行った。荷重条件は、全て応力振幅80MPa、応力比0.1の一定荷重振幅とした。Photo 1に実験の様子を示す。

## 2.4 疲労き裂モニタリングの方法

疲労き裂モニタリングは疲労試験中のボルト内蔵ひずみゲージの出力変化を共和電業(株)製センサーインタフェースPCD-300Aで計測することによって行った。計測は30分もしくは1時間間隔で実施し、1回の計測のサンプリング周波数は2kHz、計測時間は0.5secとした。

そして、1回の計測で得られるボルト軸力データ $F_i$ から、次式で軸力平均値 $F_{mean}$ 、軸力変動幅 $\Delta F$ を算出して時間経過に伴う変化を評価した。

$$F_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

$$\Delta F = F_{max} - F_{min} \quad (2)$$

ただし、 $n$ 、 $F_{max}$ 、 $F_{min}$ はそれぞれ1回の計測で得られるボルト軸力データ $F_i$ のデータ数、最大値、最小値を表している。

## 3. 実験結果

### 3.1 疲労破壊位置

本研究で使用した継手試験片の疲労破断位置をFig.2に示す。添接板に切欠きを付けた試験片の場合は、いずれの場合も切欠き底から疲労き裂が発生し、Fig.2のbの位置で破断した。

一方、切欠きなし試験片では母板から疲労破壊する場合と、添接板から疲労破壊する場合があった。母板から疲労破壊する場合は、全てFig.2のaの位置で破断したが、添接板から破断する場合はFig.2のcの位置で破断する場合と、dの位置で破断する場合の2通りがあった。cはボルト頭部の外周あるいはスペーサの外周と接しており、dは母板の端部が接する位置と一致している。

### 3.2 疲労き裂モニタリング結果

#### 3.2.1 母板から疲労破壊する場合

継手が母板 (Fig.2のa部) から疲労破壊する場合のモニタリング結果の一例をFig.3に示す。Fig.3 (a)、(b)はそれぞれ $F_{mean}$ 、 $\Delta F$ でモニタリングした場合であり、いずれも初期値で割って無次元化している。

Fig.3から、 $F_{mean}$ 、 $\Delta F$ ともに荷重繰返し数の増加とともに破断位置に近いボルト1の出力が変化しており、寿命末期であれば疲労き裂の検出が可能であることがわかる。ただし、出力変化の割合は、 $F_{mean}$ より $\Delta F$ の方が大きい。一方、ボルト2の出力は $F_{mean}$ 、 $\Delta F$ ともにほとんど変化していない。

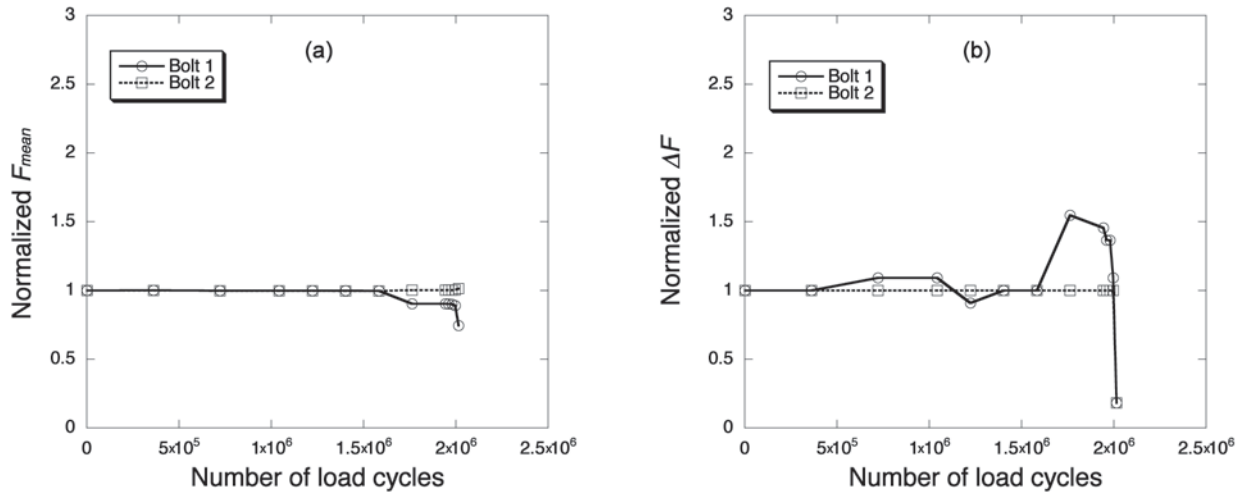


Fig. 3 Sample fatigue damage monitoring result for failure from the center plate bolt hole.  
母板ボルト穴から破壊する場合の疲労損傷モニタリング結果の一例

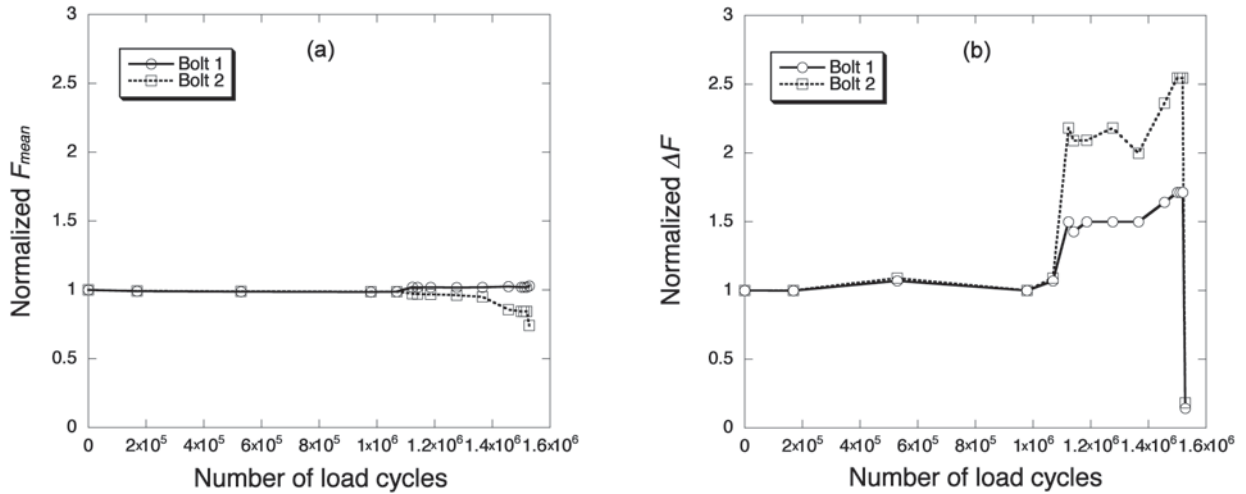


Fig. 4 Sample fatigue damage monitoring result for failure from the outer plate bolt hole.  
添接板ボルト穴から破壊する場合の疲労損傷モニタリング結果の一例

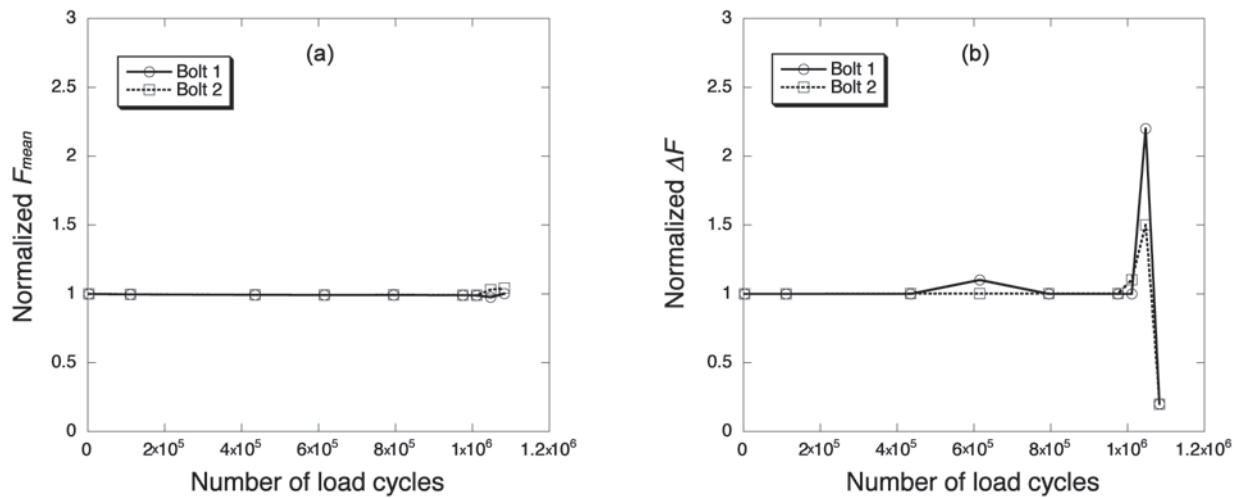


Fig. 5 Sample fatigue damage monitoring result for failure from the remote place of the outer plate bolt hole.  
添接板ボルト穴から離れた位置で破壊する場合の疲労損傷モニタリング結果の一例

### 3.2.2 添接板ボルト穴から疲労破壊する場合

継手が添接板ボルト穴 (Fig.2のb部) から疲労破壊する場合のモニタリング結果の一例を, Fig.3の場合と同様にFig.4に示す。

Fig.4 (b) から,  $\Delta F$  については荷重繰返し数の増加とともにボルト1, 2のいずれの出力も変化しているが, 破断位置に近いボルト2の出力変化の方が大きいことがわかる。一方, Fig.4 (a)から,  $F_{mean}$  については破断位置に近いボルト2の出力のみが変化しているが, その変化の割合は $\Delta F$ の場合よりも小さいことがわかる。

### 3.2.3 添接板ボルト穴以外から疲労破壊する場合

継手が添接板ボルト穴から離れた位置 (Fig.2のd部) で疲労破壊する場合のモニタリング結果の一例を, Fig.3の場合と同様にFig.5に示す。

Fig.5 (a)から,  $F_{mean}$  についてはボルト1, 2ともに, その出力はほとんど変化していないことがわかる。一方, Fig.5 (b) から,  $\Delta F$  については荷重繰返し数の増加とともに, ボルト1, 2のいずれの出力も変化しているが, 破断位置から遠いボルト1の出力変化の方が大きいことがわかる。

### 3.3 破壊位置と疲労寿命の関係

一般に疲労寿命は大きくばらつくことが知られているが, 本研究の切欠きなし試験片では試験片によって破壊位置が大きく異なったため, これが疲労寿命の違いに影響している可能性がある。そこで, Fig.6に疲労破壊の発生位置と疲労寿命との関係を示す。切欠きなし試験片の疲労破壊位置は, Fig.2のa, c, dの3箇所であるが, 破壊位置の違いによる疲労寿命の差は明確ではない。一方, 切欠き付き試験片の疲労寿命は, 切欠きがない場合よりも短い傾向にあるが, その差は顕著ではない。しかし, ファスナの締付け力が重ね継手の疲労破壊特性に大きな影響を及ぼすことが知られており<sup>11)12)</sup>, ボルト軸力を変化させた場合などには異なる結果が得られる可能性もあるため, 今後の検討が必要であると考えられる。

## 4. 結論

高強度アルミニウム合金2024-T3の重ね継手試験片を用いて, ボルト軸力の変化で疲労き裂モニタリングを行った結果, 以下の結論が得られた。

- (1) 添接板ボルト穴に切欠きがある場合は, 切欠き底から疲労き裂が発生し, 切欠きを含む断面で疲労破壊する。一方, ボルト穴に切欠きがない場合の疲労破壊位置は大きく3箇所に分類できた。
- (2) 疲労き裂の進展に伴うボルト軸力の変化割合

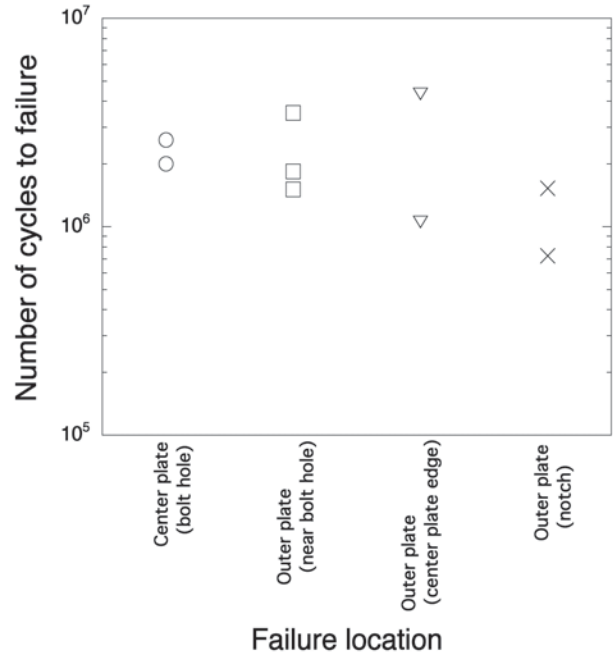


Fig. 6 Effect of the failure location on fatigue life. 破壊位置が疲労寿命に及ぼす影響

は, 軸力の平均値 $F_{mean}$ よりも軸力の変動幅 $\Delta F$ の方が大きく, 疲労き裂モニタリングには適している。

(3) 重ね継手が母板, 添接板のいずれから疲労破壊する場合であっても, ボルト軸力の変動幅 $\Delta F$ を用いることによって, 寿命末期であれば疲労き裂を検出することが可能である。

(4) 本実験の範囲内では, 切欠きなし重ね継手試験片の疲労寿命は, 疲労破壊位置の影響をほとんど受けなかった。

## 謝辞

本研究における疲労試験は, 東京電機大学理工学部知能機械工学科4年生野村明子君の協力を得て実施した。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 例えば, 西田新一, 機械機器破損の原因と対策, pp.4~5, 日刊工業新聞社, (1986).
- 2) 例えば, 市川昌弘, 構造信頼性工学, pp.97~111, 海文堂 (1988).
- 3) 例えば, 小林英男, 破壊事故は何故起こるか (2), 高压ガス, 27-6, pp.423~431 (1990).

- 4) 真壁朝敏,兼城英夫,き裂開閉口挙動に基づく疲労き裂発生を検出法について, 日本機械学会論文集, A編, 56- 531, pp.2223 ~ 2228 (1990).
- 5) 真壁朝敏, 糸数真哉, 大場克巳,兼城英夫, ひずみ情報による非貫通穴材の疲労き裂進展挙動の検知, 日本機械学会論文集, A編, 58- 546, pp.186 ~ 191 (1992).
- 6) 真壁朝敏, 西田新一, 兼城英夫, 玉城史郎, ひずみ波形解析による疲労き裂発生を検出法, 日本機械学会論文集, A編, 58- 551, pp.1191 ~ 1198 (1992).
- 7) Makabe, C., Kaneshiro, H., Itokazu, M. and Ohba, K., An Inspection of Fatigue Crack Extension Based on Strain Information, Engineering Fracture Mechanics, 45-5, pp.655 ~ 662 (1993).
- 8) 佐々木哲也, 酒井信介, ひずみゲージによる疲労き裂モニタリングの基礎研究, 日本機械学会材料と構造物の強度と破壊シンポジウム講演論文集, No.940-34, pp.30 (1994).
- 9) 佐々木哲也, ひずみゲージを用いた疲労き裂モニタリングの基礎研究, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-94, pp.21 ~ 26 (1995).
- 10) 佐々木哲也, 本田尚, ボルト接合部材の疲労損傷モニタリング技術の開発, 産業安全研究所研究報告, NIIS-SRR-30, pp.47 ~ 53 (2004).
- 11) 日本鋼構造協会接合小委員会編, 鋼構造接合資料集成 - リベット接合・ボルト接合 -, pp.652 ~ 694, (1977).
- 12) Sasaki, T. and Honda, T., An Experimental Study on Fatigue Crack Growth in Lap Joints with Multiple Fastener Holes, Proceedings of 7th Int. Conference on Damage and Fracture Mechanics, pp.225 ~ 234 (2002).

(平成18年 1月31日 受理)

## 屋根工事における軒先からの墜落防止に関する研究

日野泰道

本報は、低層住宅工事における屋根からの墜落災害に焦点を絞り、災害発生状況とその防止対策について検討を行ったものである。検討の結果、足場先行工法のガイドラインの基準を満たす足場が設置された現場でも、墜落死亡災害が発生している場合があることが分かった。また実験的検討により、墜落防護を完全に行うためには、限られた本数の手摺・中棧を使用する方法では難しいことを明らかにした。これらの結果を踏まえ、墜落防護方法としてネットを用いた方法を取り上げ、その適切な設置方法について実験的に検討を行った。その結果、ネットに衝突後の跳ね返りにより、被災者が頭部を屋根面に強打することで傷害の発生可能性があることが明らかとなった。そのため、屋根からの墜落防止用として安全ネットを設置する場合には、屋根面への跳ね返りを防止するための措置が必要であることが明らかとなった。（図14、表3、参考文献16）

## RFIDを用いた広大空間における再起動防止に関する研究

深谷 潔

危険空間が広大になると、操作装置の位置から全体を見通すことができず、作業者がその空間内においても分からず誤って機械を起動し、事故となることがある。このような事故を防止するため、RFIDを用いて危険空間内部の作業者の位置を常時モニターするシステムを開発し、評価した。

格子状に設置したタグを作業者が所持するリーダーでその位置を読み取るシステムであるが、周りの物の配置により電波の受信距離が異なり遠くのタグを受信することもあり、位置計測の誤差となることがあった。実用化のためには、装置を小型化すると共に誤差を考慮したシステム設計が必要である。

（図5、表2、写真3、文献7）

## 着火性放電を抑制したノズル型除電器の除電特性

崔光石，山隈瑞樹，児玉勉，鈴木輝夫，最上智史  
粉体輸送プロセスにおける静電気トラブルの発生を防止する方法として、粉体の帯電量を静電気トラブル発生レベル以下に制御できるノズル型除電器（コロナ式）を開発した。しかし、コロナ式除電器は、高電圧を利用しているために何等かの原因で異常作動すると、まれに着火性放電を起こし、爆発、火災を誘発する危険性がある。そこで著者らは開発したノズル型除電器の安全性を着火試験によって評価した。その結果、放電針と高電圧源の間に100Mの高抵抗（結合抵抗）を有する放電電極は、印加電圧が7kV以下（交流又は直流）であれば、放電針からの放電火花が最小着火エネルギー0.1mJ以上の可燃性雰囲気への着火源にならないことが判明した。また、このノズル型除電器を内蔵したフランジ型除電器を実規模大の粉体空気輸送帯電実験装置のサイロ内に設置して、実際に粉体を除電してその効果を調べた。その結果、上記の電圧範囲内で印加電圧を制御することによって粉体の帯電を効果的に除電できることが明らかになった。したがって、本除電器は、改良を加えることにより可燃性雰囲気を伴う粉体プロセスにおける静電気障災害の防止に十分寄与できると考えられる。（図9、参考文献8）

## 高強度アルミニウム合金重ね継手の疲労き裂モニタリングとその疲労破壊特性

佐々木哲也，本田 尚

高強度アルミニウム合金重ね継手の疲労破壊を防止するために、ボルト内に埋め込んだひずみゲージの出力で疲労き裂をモニタリングすることを試みた。実験の結果、ひずみゲージ出力の平均値よりも変動幅の方が疲労き裂進展に伴う変化の割合が大きく、疲労き裂モニタリングに適していることが明らかになった。なお、ボルト穴に初期切欠きのない重ね継手の疲労破壊位置は、大きく3箇所に分類できたが、いずれの場合も疲労寿命に大きな差はなかった。

（図6、写真1、表2、参考文献12）