

抵抗膜上の直流電位差を利用した デブリ衝突に対する面センサの提案

(平成16年11月30日 原稿受付)

機械知能工学専攻	福 重 進 也
機械知能工学科	赤 星 保 浩
機械知能工学科	高 良 隆 男
機械知能工学科	原 田 昭 治

Proposal of area sensor to detect space debris impact using direct potential drop on resistance film

by Shinya FUKUSHIGE
Yasuhiro AKAHOSHI
Takao KOURA
Shoji HARADA

Abstract

The current measures for space debris in International Space Station are bumper protection and avoidance based on ground observation. However, there is no effective measure against space debris between 1cm and 10cm which can perforate a pressurized wall. The only measure is evacuation of crew in a punctured module. In case of the occurrence of perforation hole, the decompression informs perforation of crews but the promptly detection of the leak point is difficult. It is important to install a health monitoring system to detect perforation hole on a space structure for decision of escape direction and repair area. In this study, we propose a perforation hole detection system for space debris impact. This system uses a resistance film which bonds to an insulated Al plate as an area sensor. When space debris perforates the Al plate, the Al plate and the resistance film conduct each other by a plastic deformation of the Al plate and a perforation hole is detected by measurement of a resistance value which changes in response to the distance from a measurement point to perforation hole. The effectiveness of this monitoring system was verified by not only the numerical analysis, pseudo-perforation hole tests but also hypervelocity impact tests.

1. 結 言

現在の宇宙構造物におけるスペースデブリに対する防護手段は、バンパによる防御と観測による回避である。しかし、防御も観測も不可能であり、衝突により与圧壁が損傷する恐れのある直径 1cm ~ 10cm のデブリに対しては、減圧が発生したモジュールから搭乗員が避難するという対策しかなされていない⁽¹⁾。しかし、構造物に減圧が生じた場合、1997年の宇宙ステーションミール、2003年の国際宇宙ステーションにおいて問題になったように、減圧箇所を即座に特定することは難しい⁽²⁾。した

がって、デブリの衝突により、与圧壁に貫通孔が生じた場合、搭乗員がどこに避難すべきか、どこを修復すればよいのかを適切に判断する上で、貫通孔の発生位置をリアルタイムで検知することができるヘルスマモニタリングシステムの実装が重要である。現在のヘルスマモニタリング技術として歪みゲージを用いる方法やアコースティックエミッションを利用する方法、光ファイバをセンサ網として用いる方法等がある⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、点計測である歪みゲージは、貫通孔の場所を知るという観点から言えば適切ではない。また、アコースティックエミッションを利用する方法は、デブリ衝突の瞬間を確実にとらえる必

要がある。光ファイバをセンサ網として用いる方法は、デブリが宇宙構造物に衝突する場合、構造が破壊されると同時に、モニタリングを行うために設置するセンサ網の一部も破壊されてしまうという問題がある。そこで本研究では、Al板に絶縁・貼付した抵抗膜を用い、デブリの衝突に対する面センサとすることを提案し、貫通孔が即座に同定可能な複雑な解析を用いないモニタリング法の検討および有効性の検証を行った。

2. モニタリング法

2.1 基本システム

本研究で提案するデブリ衝突に対するモニタリングシステムの基本概念図を Fig-1 に示す。

構造物の与圧壁としての Al 板に、面センサとして抵抗膜を絶縁・貼付する。デブリの衝突により与圧壁に貫通孔が発生すると、その際の損傷によって、絶縁されていた抵抗膜と Al 板が導通した状態となる。この方法は貫通孔周縁部の Al 板の塑性変形を利用するため、必ずしも衝突の瞬間をとらえる必要はない。導通状態になった抵抗膜上の抵抗値は、既知の測定点から、貫通孔までの距離に応じて決まる。これを直流電位差として測定することにより、測定点から損傷位置までの距離を知ることができる。

2.2 貫通孔の同定法

2.2.1 基本式

薄い抵抗膜が無限に広がっているとき、半径 r_m の測定点から、距離 r_d までの抵抗値 R_m は次式により与えられる。

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_d}{r_m} \quad (1)$$

ここで、 ρ は体積抵抗率、 t は膜厚である。同様に、半径 r_p の貫通孔から、距離 r_d までの抵抗値 R_p は次式により与えられる。

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_d}{r_p} \quad (2)$$

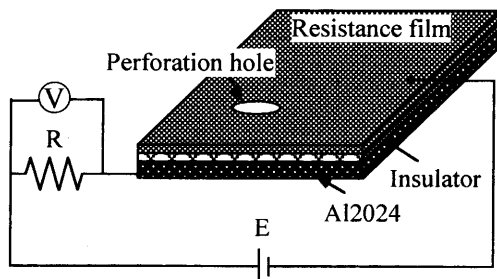


Fig-1 Configuration of monitoring system

よって、測定点から貫通孔に電流 I が流れるとき、抵抗膜上の電圧降下 V_f は、次のようになる。

$$V_f = R_m I + R_p I = (R_m + R_p) I \quad (3)$$

したがって、抵抗膜上の抵抗値 R は、

$$R = R_m + R_p = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{r_d^2}{r_m r_p} \quad (4)$$

となる。上式を変形すれば、抵抗膜上の抵抗値 R により、測定点から貫通孔までの距離 r_d を求める式が次のように与えられる。

$$r_d = \sqrt{r_m r_p} e^{\frac{\pi R t}{\rho}} \quad (5)$$

2.2.2 貫通孔位置同定法

式(5)を用いて、抵抗膜上の貫通孔を同定することを考える。いま、測定点の半径 r_m 、抵抗膜の体積抵抗率 ρ 、厚さ t および抵抗膜上の抵抗値 R は既知であるとする。しかし、貫通孔の半径 r_p は未知である。このとき、測定点が3点あれば、抵抗膜上の貫通孔を同定することが可能である。以下に貫通孔位置の同定法を示す。

Fig-2 に示すように各測定点と、貫通孔 (x, y) があるとする。

このとき、抵抗膜上の抵抗値と測定点から貫通孔までの距離 r_d の関係は式(5)により、それぞれ次のように表される。

$$r_{d1} = \sqrt{r_m r_p} e^{\frac{\pi R_1 t}{\rho}} \quad (6)$$

$$r_{d2} = \sqrt{r_m r_p} e^{\frac{\pi R_2 t}{\rho}} \quad (7)$$

$$r_{d3} = \sqrt{r_m r_p} e^{\frac{\pi R_3 t}{\rho}} \quad (8)$$

いま、貫通孔の半径 r_p は未知である。そこで、式(7)、式(8)の辺々を式(6)で割る。

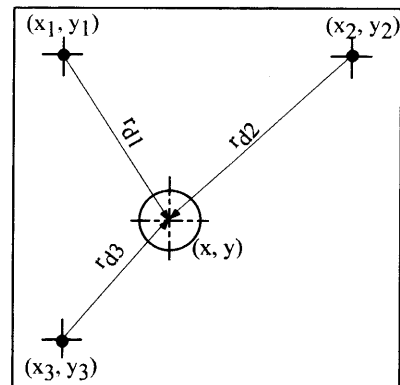


Fig-2 Measurement points and perforation hole

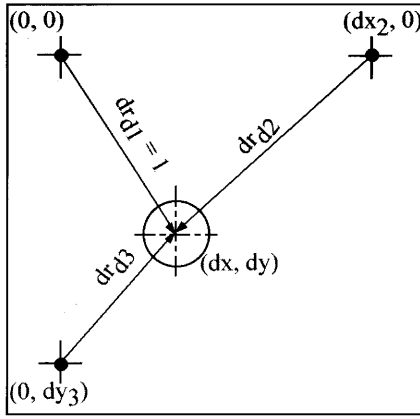


Fig. 3 Coordinate conversion

$$dr_{d1} = \frac{r_{d1}}{r_{d1}} = e^{\frac{\pi}{\rho}(R_1 - R_1)} = 1 \quad (9)$$

$$dr_{d2} = \frac{r_{d2}}{r_{d1}} = e^{\frac{\pi}{\rho}(R_2 - R_1)} \quad (10)$$

$$dr_{d3} = \frac{r_{d3}}{r_{d1}} = e^{\frac{\pi}{\rho}(R_3 - R_1)} \quad (11)$$

ここで、各測定点座標を Fig. 3 に示すように変換する。

これにより Fig. 3 の座標空間内で、貫通孔の位置を dr_{d1} , dr_{d2} , dr_{d3} の 3 円弧が交わる一点 (dx, dy) として表すことができる。すなわち、 $dx_2 = (x_2 - x_1)/r_{d1}$, $dy_3 = (y_3 - y_1)/r_{d3}$ であるから、

$$dx = \frac{x - x_1}{r_{d1}} = \frac{dx_2^2 + dr_{d1}^2 - dr_{d2}^2}{2dx_2} \quad (12)$$

$$dy = \frac{y - y_1}{r_{d1}} = \frac{dy_3^2 + dr_{d1}^2 - dr_{d3}^2}{2dy_3} \quad (13)$$

また、

$$dx^2 + dy^2 = dr_{d1}^2 = 1 \quad (14)$$

の関係から、 r_{d1} を求めることができ、

$$r_{d1} = \sqrt{\frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{A}} \quad (15)$$

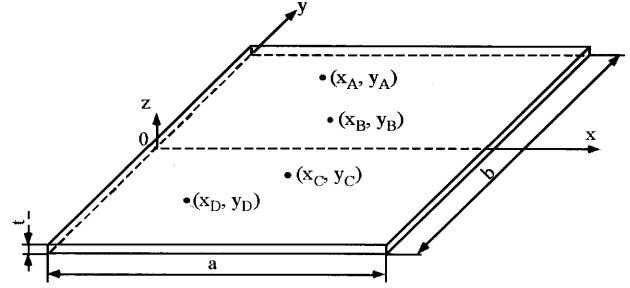
ただし、

$$A = y_3^2(dr_{d1}^2 - dr_{d2}^2)^2 + x_2^2(dr_{d1}^2 - dr_{d3}^2)^2 \quad (16)$$

$$B = x_2^2 y_3^2 (dr_{d2}^2 + dr_{d3}^2) \quad (17)$$

$$C = x_2^2 y_3^2 (x_2^2 + y_3^2) \quad (18)$$

以上により、 $x = dx r_{d1} + x_1$, $y = dy r_{d1} + y_1$ として貫通孔の位置 (x, y) を同定することができる。



(x_A, y_A) , (x_D, y_D) : 電流探針
 (x_B, y_B) , (x_C, y_C) : 電圧探針

Fig. 4 Axes of coordinates

2. 2. 3 貫通孔半径同定法

2.2.2 節により、測定点から貫通孔までの距離 r_{d1} が求まっているので、式(6)を変形した次式を用いて貫通孔半径 r_p を同定することができる。

$$r_p = \frac{r_{d1}^2}{r_m} e^{-\frac{2\pi}{\rho} R_1} \quad (19)$$

2. 2. 3 形状効果

前節までの議論は、抵抗膜が無限の広がりを持つことが前提となっていたが、実際の抵抗膜の大きさは有限であるため、形状効果を考慮する必要がある。一般に体積抵抗率と抵抗膜上の抵抗値の関係は、次のように表される。

$$\rho = F t R \quad (20)$$

ここで、 F は抵抗率補正係数である。式(4)より、本モニタリング法に用いる抵抗膜では、広さが無限の場合、

$$F_i^{-1} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_d^2}{r_m r_p} \quad (21)$$

となる。一方、有限の広さの抵抗膜の場合、Fig. 4 の座標系において、抵抗率補正係数は次のように与えられる⁽⁵⁾。

$$F_f^{-1} = \frac{y_B - y_C}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a \xi \sinh(b \xi)} \left[\left\{ \cos(\xi x_B) \cosh \left[\xi \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\xi x_C) \cosh \left[\xi \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \left\{ \cos(\xi x_A) \cosh \left[\xi \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] - \left\{ \cos(\xi x_B) \cosh \left[\xi \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\xi x_C) \cosh \left[\xi \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\xi x_D) \cosh \left[\xi \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a\eta \sinh(b\eta)} \\
& \left[\left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \right. \\
& \quad \left. \cosh \left[\eta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] - \right. \\
& \quad \left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \\
& \quad \left. \cosh \left[\eta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \\
& \left[\left\{ \cos(\xi x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \cos(\xi x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \right. \\
& \quad \left. \cos(\xi x_A) \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] - \right. \\
& \quad \left\{ \cos(\xi x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \right. \\
& \quad \left. \cos(\xi x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \\
& \quad \left. \left. \cos(\xi x_D) \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \right] \quad (22)
\end{aligned}$$

ただし,

$$\xi = \frac{m\pi}{a} \quad (m \text{ は整数}), \quad \eta = \frac{n\pi}{t} \quad (n \text{ は整数}), \quad \zeta = (\xi^2 + \eta^2)^{\frac{1}{2}}$$

本研究では, 測定点と貫通孔が探針に相当し, 電流探針と電圧探針が同一の2探針となるため, $(x_A, y_A) = (x_B, y_B)$, $(x_C, y_C) = (x_D, y_D)$ とした。

以上により, 無限抵抗膜における抵抗値を R_i , 有限抵抗膜で測定される抵抗値 R_f とすれば, 体積抵抗率はどちらの場合においても共通であるから, 式(20)より,

$$\begin{aligned}
F_i R_i &= F_f R_f \\
\therefore R_i &= \frac{F_f}{F_i} R_f \quad (23)
\end{aligned}$$

として, R_f を R_i に換算することができる。これにより, 有限抵抗膜において, 2.2.2, 2.2.3 節で説明した貫通孔同定法を用いることが可能となる。

3. 検 証

3.1 形状効果の考慮

2.2.3 節で述べた方法により, 有限抵抗膜における抵抗値を無限抵抗膜の値に換算できることを確かめるために数値計算を行った。抵抗膜は厚さを $50[\mu\text{m}]$, 体積抵抗率を $5.07 \times 10^{-3}[\Omega\text{m}]$ とした。無限抵抗膜の値は式(4)を用い

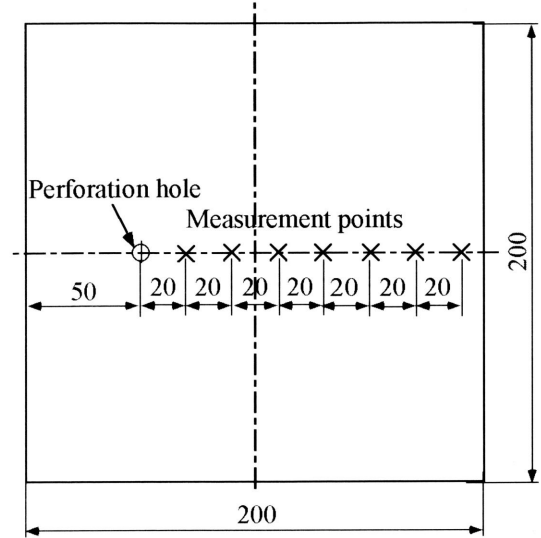


Fig-5 Measurement points on resistant film

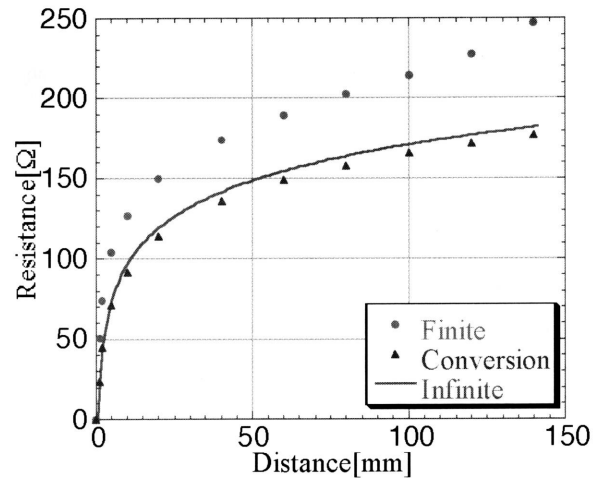


Fig-6 Correlation between resistance and distance

て計算し, 有限抵抗膜の値は Fig-5 に示す領域について 200×200 の正方格子に分割し, 差分法により電位に関するラプラス方程式を解いた。なお, 測定点および貫通孔の直径は $1[\text{mm}]$ とした。結果を Fig-6 に示す。

Fig-6 より, 有限抵抗膜における抵抗値が無限抵抗膜における抵抗値に良好に換算されており, 2.2.3 節の方法が有効であることがわかった。

3.2 貫通孔の同定実験

3.2.1 数値計算

本研究における貫通孔の同定法の有効性を検証するため, Fig-7 に示すように, 貫通孔および測定点を設定し, 数値計算により同定実験を行った。まず, 3.1 節と同様の計算条件で, 差分法により各測定点における抵抗膜上の抵抗値を求めた。結果を Table-1 に示す。

Table-1 の抵抗値を用いて, 2.2 節で説明した方法によ

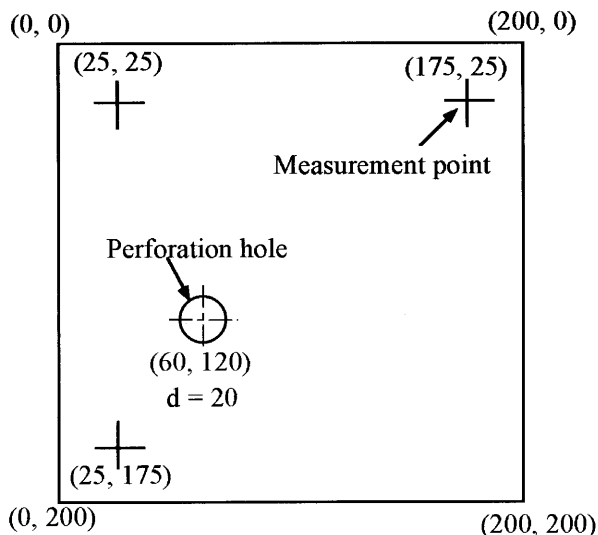


Fig-7 Condition of detection test

Table-1 Result of numerical analysis

Measurementpoint	(25, 25)	(175, 25)	(25, 175)
Resistance[Ω]	171	196	143

Table-2 Result of test with pseudo-perforation hole

Measurementpoint	(25, 25)	(175, 25)	(25, 175)
Resistance[Ω]	163	186	144

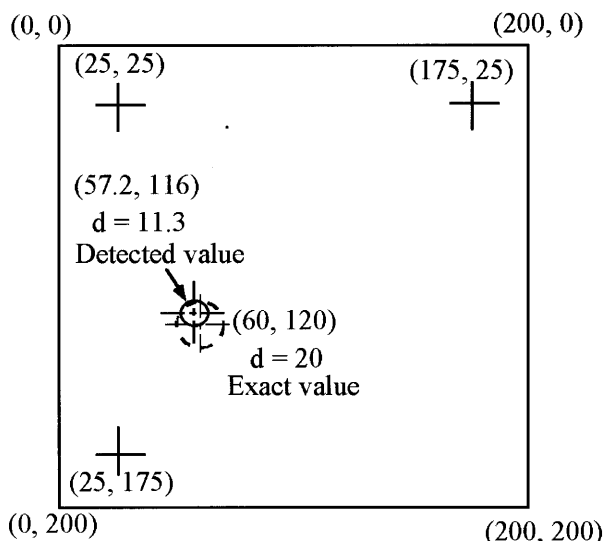


Fig-9 Result of detection

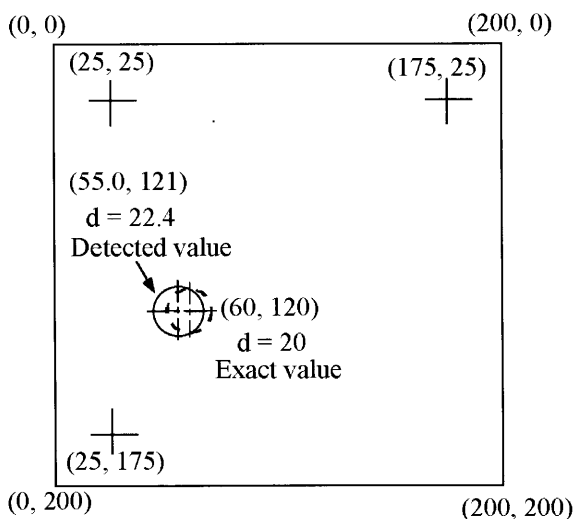


Fig-8 Result of detection

り貫通孔を同定した結果を Fig-8 に示す. 貫通孔の位置, 大きさともに良好な同定結果を得ることができた.

3.2.2 模擬貫通孔による実験

前節で数値計算により本研究における同定法の有効性を確認することができたので, 実際に市販の抵抗膜を用いて貫通孔の同定実験を行った. 抵抗膜として鬼怒川ゴム工業社製のフィルム(厚さ: 50[μm], 体積抵抗率 $4.5 \times 10^{-3}[\Omega m]$), 模擬貫通孔として直径20[mm]の銅電極を使用した. 貫通孔および測定点の配置は Fig-7 と同様とした. 各測定点における抵抗値の測定結果を Table-2 に示

す.

これらの抵抗値を用いて貫通孔を同定した結果を Fig-9 に示す. 貫通孔の位置については, 数値計算の場合と同程度の精度で同定することができたが, 貫通孔の大きさは, 小さな値となり相対誤差は43.5%であった.

3.2.3 超高速衝突実験

次に, 実際の衝突による損傷によって抵抗膜と Al 板が導通し, 貫通孔の位置を同定できることを確認するために超高速衝突実験を行った. 超高速飛翔体の衝突条件を Table-3 に, 超高速衝突実験の模式図を Fig-10 に示す.

Table-3 Conditions of hypervelocity impact test

Material	Shape	Diameter[mm]	Mass[g]	Velocity[km/s]
Polycarbonate	Cylinder	10	1	3

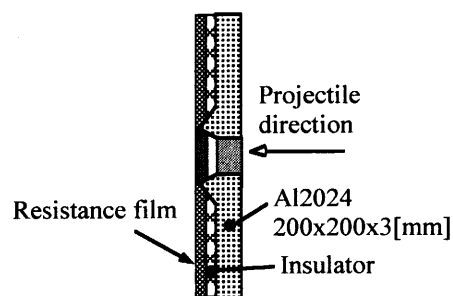


Fig-10 Configuration of hypervelocity impact test

Table-4 Result of hypervelocity impact test

Measurementpoint	(25, 25)	(175, 25)	(25, 175)
Resistance[Ω]	531	539	497

抵抗膜とAl板の絶縁層には、20×2[mm]間隔、厚さ51[μm]の紙製格子状のスペーサを用いた。抵抗膜、絶縁層、Al板の接着には二液硬化型弾性エポキシ接着剤を用いた。抵抗膜とAl板は、スペーサによって生じる間隙で絶縁され、衝突後Al板の塑性変形により両者が接触し、導通する。

超高速衝突実験後、Fig-7と同様に測定点を定め、各測定点から貫通孔までの抵抗値を測定した。測定結果をTable-4に示す。

これらの抵抗値を用いて貫通孔を同定した結果をFig-11に示す。これまでの同定実験と比較して位置の誤差が大きくなった。また、測定された抵抗値が大きかったため大きさを同定することができなかった。

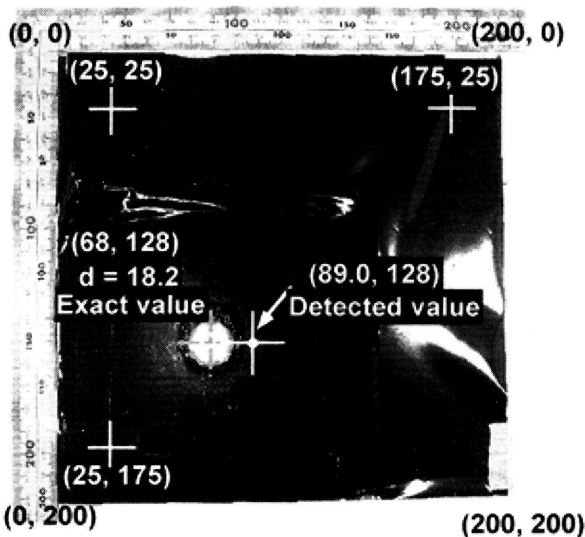


Fig-11 Result of detection

4. 考察

数値計算による貫通孔同定実験では、貫通孔の位置、大きさ共に近い値で同定することができた。模擬貫通孔を用いた実験では位置の同定には、ほぼ成功しているが、貫通孔の大きさについては、直径20[mm]に対して直径11.3[mm]で相対誤差43.5%となり、精度良く同定することはできなかった。この原因として、模擬貫通孔として用いた銅電極円板と抵抗膜の接触抵抗が考えられる。位

置の同定に関しては、式(9)~(11)において互いの抵抗値の差をとっているため、接触抵抗の影響は除かれている。しかし、貫通孔の大きさの同定に関しては、式(9)からわかるように、測定値を直接用いているため、接触抵抗の影響を受けてしまうことがわかる。このことを確かめるために、式(9)の抵抗値に接触抵抗 R_t を加算した式、

$$r'_p = \frac{r_d^2}{r_m} e^{-\frac{2\pi}{\rho}(R_t + R_i)} \quad (24)$$

を考え、式(9)の辺々を割り、測定値から求まる貫通孔半径 r'_p と真の貫通孔半径 r_p の比を表すと次式となる。

$$\frac{r'_p}{r_p} = e^{-\frac{2\pi}{\rho}R_t} \quad (25)$$

式(25)をグラフに表すとFig-12となる。これによると、10[Ω]程度の接触抵抗で、貫通孔の同定値は実際の値の半分となることがわかる。また、模擬貫通孔を用いた同定実験の際の接触抵抗は8.17[Ω]であったことがわかった。

超高速衝突実験においては、模擬貫通孔による同定実験と同じ仕様の抵抗膜を用いたが、接触抵抗の影響を大きく受けている。そのため貫通孔の大きさの同定値が 1×10^{-10} [mm]と非常に小さな値となり、大きさを同定することができなかった。このときの接触抵抗は式(25)によれば368[Ω]であった。また、位置の同定も数値計算、模擬貫通孔を用いた実験に比べて誤差が大きかった。これは、貫通孔の周縁部で均一な導通が得られなかったためであると考えられる。しかし、数値計算や模擬貫通孔を用いた実験では、位置の同定に成功していることから、抵抗膜のAl板への実装方法を改善することによって貫通孔周縁部で均一な導通を得ることができれば、実際の

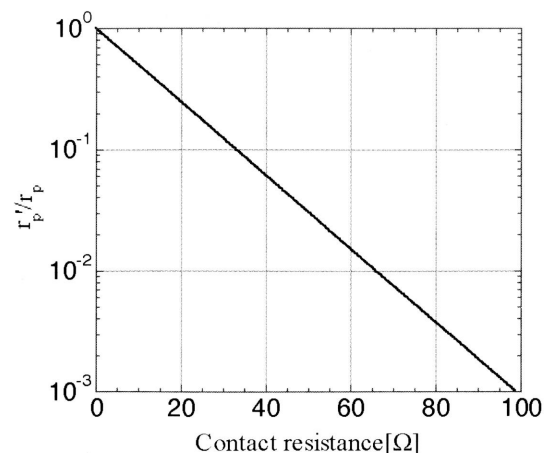


Fig-12 Contact resistance

衝突においても貫通孔の位置を同定することができると考えられる。また、貫通孔の大きさの同定についても同様に、抵抗膜の実装方法を改善することによって、毎回同程度の接触抵抗を得ることができれば、予め接触抵抗を見積もっておくことにより、貫通孔の大きさを同定することができる。

5. 結 言

本研究は、有人宇宙構造物において、デブリの衝突による貫通孔を同定することができるモニタリングシステムを構築する目的で行われ、面センサとして抵抗膜を用いることで、貫通孔の位置を同定できるシステムを提案することができた。有人宇宙構造物における搭乗員の避難や修理場所の特定ということを考えると本モニタリングシステムは十分な精度を有しているといえる。貫通孔の大きさや超高速衝突時の同定精度は、抵抗膜の実装方法の改善し、予め接触抵抗を見積もることによって向上させることができると考えられる。

6. 謝 辞

本研究は九工業大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー大学院生研究助成制度の支援の下に行われたことを記し、感謝の意を表す。

7. 参考文献

- (1) National Research Council, "Protecting the Space Station from Meteoroids and Orbital Debris" National Academy Press, Washington D.C., 1997
- (2) International Space Station Status Report #04-2
- (3) 山本鎮男, ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視, 1999, 共立出版株式会社
- (4) 日本航空宇宙学会誌, 第52巻, 第605号, 特集「知的材料・構造システム研究の現状」, 2004
- (5) JIS K 7149 導電性プラスチックの4探針法による抵抗率試験方法