

細線の材料評価について  
(テザーのつかみ切れ防止の基礎的研究)

工学院大学[院] ○石本智理, 工学院大学 小林光男, JAXA 河本聡美,  
工学院大学 伊藤慎一郎, 工学院大学 金野祥久

要 旨

細線及び薄板材料の利用は、設計上増加傾向にあるが、その機械的性質を適正に評価することが難しく、各分野ごとでなく統一的な評価方法が要望されている。本報告は、航空宇宙分野で使用されようとしているテザー材料の引張強度の評価をするために、比較的強度の高いステンレス鋼の細線を使い、その基本的特性である引張強度を把握するために、チャッキングにおける滑り及びつかみ切れについて防止技術を報告する。

Key word; Tension Test, Strength evaluation, materials, Wire of steel, Rupture of gripping, Tether

1. まえがき

宇宙開発において、宇宙デブリの問題が指摘され久しいが、デブリの対策は、観測、解析のためのモデル化、防御、発生防止などが進められており、発生防止の観点からは、地球低軌道上にあるデブリを降下させ大気との摩擦により除去することや、ミッション終了後のデオービットが必要であり、そのための推進システムとして考案されているのが導電性テザーシステムである<sup>1)</sup>。EDTシステムでは、導電性のテザーと打ち上げ時、テザーを収納するリール機構、軌道上で伸展する放出機構の開発が必要である。

そのため、このシステムで重要な問題点として、テザーの強度とその信頼性があり、強度の適切な評価方法が検討されている。導電性テザーは多数の繊維からなる構造物であり、テザーの直接引張試験ではつかみ切れを生じ、正確な引張強度を評価できない。

そこで、テザーの強度とその信頼性に関して、機械工学上の問題でもある細線の強度評価に置き換え、つかみ切れ及びその防止の問題に着目した。薄板及び細線の引張試験では製品を切りとってそのまま引張り試験を行うことが多いが、平行部とつかみ部の断面積が等しく、くさび型のつかみ装置を使用する場合は、チャッキングによるきずによりつかみ切れ(端切れ)が起こりやすい。また、つかみ部に生じるきずを小さくして引張試験を行うと、ステンレス鋼のような硬質の薄板及び細線ではすべりを生じ荷重が適正に負荷されない。これらの端切れ及びすべりは板厚及び線径が小さくなる程顕著になるので適正な機械的性質に影響を与えることになる。本研究は、つかみ部での端切れ及びすべりを防ぐ手軽な方法について検討する。

2. つかみ部の力学的関係

図1は、引張試験におけるチャック部の構造で、試験片をチャックで挟み、引張荷重Pが作用した時のつかみ部内の静力学的関係を示す。上側チャック部において、チャック部に働く垂直及び水平方向のつり合いにより、

$$R \sin \alpha - m'R \cos \alpha - f = 0 \tag{1}$$

$$R \cos \alpha + \mu'R \sin \alpha - \mu f = 0 \tag{2}$$

また、試験片に働く力のつり合いから、

$$2\mu f = P \tag{3}$$

これらの式(1)(2)及び(3)から、

$$f = R \sin \alpha - \mu'R \cos \alpha = P(\tan \alpha - \mu') / 2(1 + \mu' \tan \alpha) \tag{4}$$

ここで、 $\mu = \tan \rho$ 、 $\mu' = \tan \phi$  とすると上式(4)は、

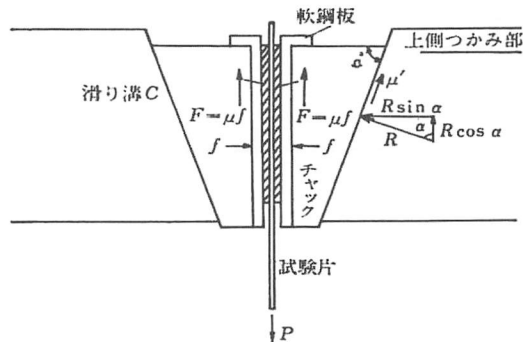
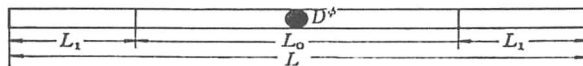
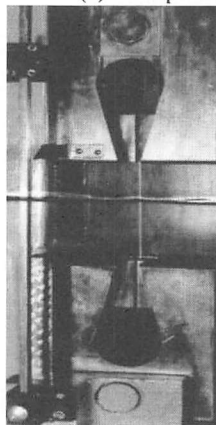


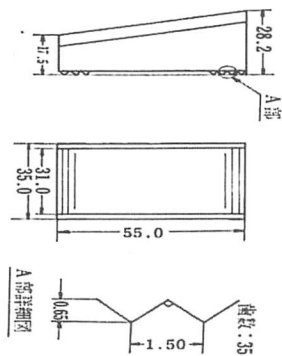
Fig.1 Gripping part in tension test



(a) Shape and dimensions of specimen



(b) Gripping part of test machine



(c) Shape of chuck

Fig.2 Specimen and gripping part of test machine

$$\tan \rho \tan(\alpha - \rho) = 1 \tag{5}$$

式(5)は試験片が破断するまで成立する。従って、摩擦係数  $\mu$ 、 $\mu'$  を求めることにより式(4)から各種線径に対して押しつける力  $f$  が求まり、滑りの問題は解決することになる。つまり、試験片のすべり防止には、式(5)を満たす摩擦状態を考えればよく、更につかみ部に生じるきずを小さくするようなつかみ部であれば良いことになる。しかし、実際上は、くさび作用によって試験片に加えられた荷重が有効に自らを押さえる力は、試験片の線径、材質及びチャックの粗さなどにより異なり、難しい問題であると言える。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材及び試験機

実験に使用した材料は、オーステナイト系ステンレス鋼の細線(図2(a)の標点距離  $L_0 = 150\text{mm}$ , 線形  $D = 0.3^f, 0.4^f, 0.6^f, 0.8^f$ )で使用したつかみ装置は図2(b) 2(c)のくさび型(くさびの目の粗さ  $1.5\text{mm}$ , 角度  $90^\circ$ , 大きさ  $31 \times 55\text{mm}$ )で、試験機は図2(b)のつかみ装置を持つトーチ式AL型多能試験機で最大容量  $2\text{ton}$  である。

#### 3.2 つかみ切れ防止方法

つかみ切れの原因はつかみ装置によるきずであることから、このきずを極力小さくし、試験片とチャックのすべりが起こらない程度の摩擦力を生じさせる為に次のようなつかみ部の補強を行った。(1)接着剤による効果:つかみ部の油を取り除き接着剤でつかみ部をかぶせる。(2)軟ロウ付けによる効果:電気式はんだごてによりつかみ部をステンレス用はんだのフラックスに浸しロウ付け処理を行い同時に低温焼なまし施す。(3)溶融塩浴浸漬による効果:低温焼なまし特性を利用して熱処理の時間と温度を変化させ適正熱処理条件を求め補強を行う。(4)エメリーによる効果:各種粒度のエメリー粉(紙, 布)をはり付け、試験片つかみ部のきずを小さくし摩擦を大きくする効果を利用する。

#### 3.3 評価法

引張試験による破断位置が図2(a)の  $L_0$  内である場合の引張強さ ( $\sigma_B = P/A_0$ ) は、他の破断位置の引張強さより大きく安定して得られる。よって、各種防止法においてすべりが小さく、大きい引張強さが安定して得られる程良いと評価した。

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 エメリーの粗さと摩擦係数及び正常破断率

粒径(粗さ)の異なる各種エメリーを図1の軟鋼板に付け引張試験を行い、エメリーの粒度番号に対する正常破断率と各粒度の摩擦係数を実験的に求める。実験結果は、粒度番号 #60, #80, #100, #120, #150 に対して、正常破断率 ( $D=0.8, n=20$ ) は、各々  $30\%, 50\%, 80\%, 80\%, 50\%$  で、摩擦係数は  $0.45 \sim 0.55$  の値である。図3の通り、この傾向は線径が変わっても同様であり、理論値と近い値を示している。

#### 4.2 つかみ切れ防止法による評価

図3には各種防止法に対する実験結果を示す。ここで、図の横軸は、(A)は何も施していない無処理の場合、(B)は前項で比較的 normal 破断の割合が高いエメリー #100 の場合、(C)はつかみ部にエポキシ系接着剤を用いた場合、(D)は軟ロウを用いつかみ部の傷を防ぎ強度を増加させて場合、(E)は溶融塩浴処理を施した場合を示している。また、縦軸は引張強さ  $\sigma_B$  ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) で、 $2000\text{MPa}$  レベルの強度を持つ材料である。図より溶融塩浴浸漬の場合(E)は、つかみ部のみを処理温度  $350 \pm 50^\circ\text{C}$ , 処理時間を  $60\text{sec}$  の低温焼なましを行うことにより  $3\%$  以上の強度増加がえられ、またきずの防止にエメリーを併用すると有効である。軟ロウメッキの(D)場合も同様な熱処理効果が得られる。また、エメリー(B)及び接着剤(C)の場合も簡単なことから実用性があるが、つかみ切れ及びすべりが多少見られ強度が低下している。特にエメリーの場合は径の細い  $D = 0.3\text{mm}$ , ま

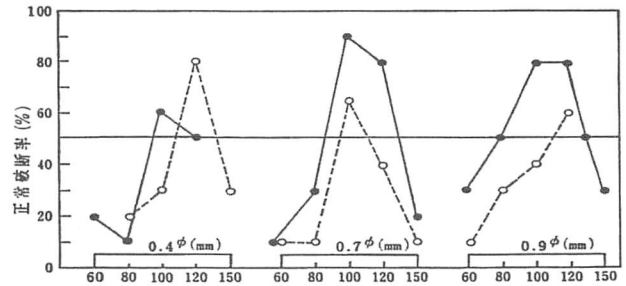


Fig.3 Influence of emery number(size) on rupture position

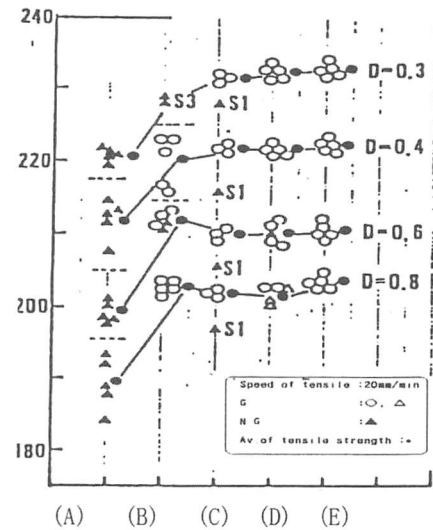


Fig.4 Tensile test result and rupture position

た接着剤では各線径につかみ切れ及びすべりが生じる。

#### 4.3 極薄板への適用

本報の手法を極薄板に適用したが、細線の場合と多少異なり、薄板のつかみ切れ防止には、軟ロウメッキ、軟ロウ付け及び紙などを介した接着による場合が有効である。中でも接着は他の方法と比べ熱影響が無く簡単に行える。これらがつかみ切れ及びすべり防止法として有効な理由はつかみ部が軟ロウ及び紙等により補強され、更にチャックの刃から受けるきずを防ぐ役目をしている為である。また、溶融塩浴浸漬で引張強さが低いのは、板厚 ( $T = 0.05$ ) が薄いため、塩浴による浸蝕で板厚減少が強度の上昇を打消した為と思われる。

### 5. あとがき

以上の実験結果より試験片のつかみ部に適切な方法を施せば特殊なチャックでも困難な引張強度を試験機常設のチャックで充分実施できる事を確かめた。これらのつかみ切れ防止及び滑り防止技術において、熱に関係しない方法である摩擦方式はテザーの強度評価及びテザーの固定技術に応用できることと考えられる。

#### [参考文献]

- 1) JAXA 技術資料: 宇宙デブリ低減技術
- 2) 玉置正恭, 小林光男: 金属薄板・細線の引張試験について, 日本設計製図学会誌, 17, 92, 24-31.
- 3) 小林光男, 玉置正恭, 北郷 薫: 細線の引張試験におけるつかみきれ防止について(第1報-第3報).
- 4) 吉澤武男: ステンレス鋼線の引張試験(第1報-第3報), ステンレス協会技術委員会資料.