

金箔の展延機構に関する一考察

著者	黒部 利次, 坂谷 勝明, 今中 治
著者別表示	Kurobe Toshiji, Sakaya Katsuaki, Imanaka Osamu
雑誌名	日本海域研究所報告 = Bulletin of the Japan Sea Research Institute, Kanazawa University
巻	12
ページ	59-66
発行年	1980-11-30
URL	http://doi.org/10.24517/00029602



金箔の展延機構に関する一考察

黒部利次* 坂谷勝明** 今中 治*

Extension Mechanism of Gold Leaf in *Haku-Uchi* Processing

by

Toshiji KUROBE, Katsuaki SAKAYA and Osamu IMANAKA

Abstract

The deforming processes of the gold foil between *Haku-Uchi Gami* by beating are discussed in connection with the mechanical properties of a *Haku-Uchi Gami* and the work-hardening effect of the foil. Based on the von Mises-Hencky condition, a criterion on extension of gold foil is proposed. The theoretical analyses have shown that Young's modulus of the *Haku-Uchi Gami* in the cross direction has a great influence on the deformation behavior of a gold foil, and have indicated that the *Haku-Uchi Gami* of small Young's modulus which had been repeatedly treated by the "*Aku-Shori*", is favorable to the extension of the gold foil to leaf.

1. 緒 言

金箔の展延の良否は、箔打紙の力学的性質とその表面状態によってほぼ決まるといわれている。和紙としての箔打紙は、流漉きによる手漉きによって製造されるため、繊維の配向が一樣でなく、力学的異方性を有している。したがって、金箔の打立ての際は経験上パック内の打紙を互に90度ずらして積み重ね、金箔の展延が一樣になるように配慮している。しかしながら、箔打紙の弾性異方性が箔の展延に如何なる影響を及ぼすのか、また、金箔の加工度（各箔打工程における箔の展延度）が、次段の箔打工程の箔の展延に如何なる影響を及ぼすのか、などについてはまだ明らかにされていない。

本研究は、箔打紙の弾性異方性と箔の加工硬化特性を考慮して、金箔の展延に関して理論的観点

* 工学部精密工学科 日本海域研究所員

** 金沢大学工学研究科大学院生

より考察を行ったもので、所期の結果が得られたので報告する。

2. 箔打紙・金箔に生ずる応力とひずみ

箔打紙（以後打紙もしくは紙と略称する）の弾性異方性が、箔の展延に影響を及ぼすことが経験上知られている。すなわち、打紙の方向を揃えて層を作り、その間に箔を入れて槌打ちすると、紙の縦方向と横方向では、箔の伸びの大きさが異ってくる。縦方向に比べ横方向の伸びが大きい。この現象は、槌打ち時において紙の変形は箔の伸びと無関係でなく、箔は紙とともに伸びることを示している。

そこで、各箔打工程での箔の展延は、箔打紙の弾性変形によるものとして、以下にその解析を行う。理論解析にあたって次のような仮定を設ける。

(1)箔打紙は粘弾性体であるが、取り扱いを簡単化するため弾性体とする。また、箔は弾塑性体とする。

(2)図1に示すように、箔は上下2枚の打紙に挟まれ、それらは完全に密着した状態にあり、一種のサンドイッチ構造を形成しているものとする。また、槌打ちによる衝撃圧力は紙面の全面にわたって一様に加わっているものとする。(3)厚さ方向に加わる圧力を主応力とし、その値は打紙、箔の両者とも同じであるとする。(4)計算の簡単化のため、打紙・

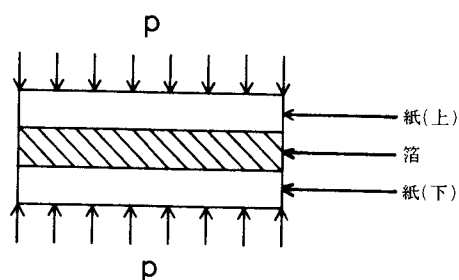


図1 箔打ちの概念図

箔の界面に生ずるせん断応力の効果は無視するものとする。

2.1 槌打ちによる箔打紙のひずみ

箔打紙はその特異な繊維配列のため、弾性異方性を有しており、以下に、紙を横等方性体であると考えて応力計算を行う。ここで、紙の横方向および厚方向の弾性率、ポアソン比を E_1 、 ν_1 とし、

縦方向のそれを E_2 、 ν_2 とする。

実際、箔の打立てでは、上下の箔打紙を互に90度ずつずらして重ねている。そこで、箔を挟んでいる上下の紙を図2に示すように、上の打紙の横方向を x 方向、下の打紙の横方向を y 方向とし、紙厚の方向を z 方向になるよう配置する。したがって、打紙についての応力とひずみの関係は

$$\varepsilon_{x_1} = \frac{1}{E_1} \left\{ (\sigma_{x_1} - \sigma_p) + \nu_1 p \right\} - \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma_{y_1} - \sigma_p)$$

$$\varepsilon_{y_1} = -\frac{\nu_2}{E_1} \left\{ (\sigma_{x_1} - \sigma_p) - p \right\} + \frac{1}{E_2} (\sigma_{y_1} - \sigma_p)$$

$$\varepsilon_{z_1} = \frac{1}{E_1} \left\{ -p - \nu_1 (\sigma_{x_1} - \sigma_p) \right\} - \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma_{y_1} - \sigma_p)$$

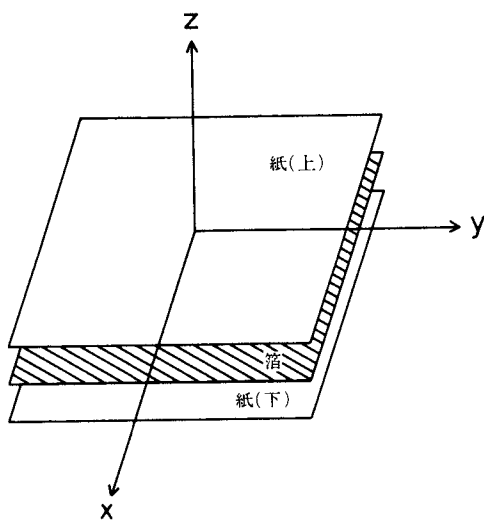


図2 箔打ち紙の配置

$$\varepsilon_{x_2} = -\frac{\nu_2}{E_1} \left\{ (\sigma_{y_2} - \sigma_p) - p \right\} + \frac{1}{E_2} (\sigma_{x_2} - \sigma_p)$$

$$\varepsilon_{y_2} = \frac{1}{E_1} \left\{ (\sigma_{y_2} - \sigma_p) + \nu_1 p \right\} - \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma_{x_2} - \sigma_p)$$

$$\varepsilon_{z_2} = \frac{1}{E_1} \left\{ -p - \nu_1 (\sigma_{y_2} - \sigma_p) \right\} - \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma_{x_2} - \sigma_p)$$

と求められる。ここで、 ε_x , ε_y , ε_z はx, y, z方向のひずみであり、 σ_x , σ_y は紙の異方性によって生ずるx, y方向の応力である。 σ_p は箔の変形抵抗によって生ずる応力であり、pは圧力である。添字1, 2は上と下の打紙を表わす。

先の仮定より、紙の各方向のひずみは同じでなければならないから、上下の紙の変形も一様でなければならない。したがって、

$$\sigma_{x_1} = -\sigma_{y_1} = -\sigma_{x_2} = \sigma_{y_2} = \sigma$$

$$\varepsilon_{x_1} = \varepsilon_{y_1} = \varepsilon_{x_2} = \varepsilon_{y_2} = \varepsilon$$

$$\varepsilon_{z_1} = \varepsilon_{z_2} = \varepsilon_z$$

とおくと、

$$\varepsilon = \frac{1}{E_1} \left\{ (\sigma - \sigma_p) + \nu_1 p \right\} - \frac{\nu_2}{E_2} (-\sigma - \sigma_p) \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{\nu_2}{E_1} \left\{ (\sigma - \sigma_p) - p \right\} + \frac{1}{E_2} (-\sigma - \sigma_p) \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_1} \left\{ -p - \nu_1 (\sigma - \sigma_p) \right\} + \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma + \sigma_p) \quad (3)$$

となる。式(1), (2)より、

$$\sigma = \frac{(\nu_2 - \nu_1) E_2}{(1 + \nu_2)(E_1 + E_2)} p + \frac{E_2 - E_1}{E_1 + E_2} \sigma_p \quad (4)$$

また、式(1), (4)より、

$$\varepsilon = \frac{(\nu_1 + \nu_2^2) E_1 + \nu_2 (1 + \nu_1) E_2}{(1 + \nu_2) E_1 (E_1 + E_2)} p - \frac{2(1 - \nu_2)}{E_1 + E_2} \sigma_p \quad (5)$$

さらに、式(3), (4)より、

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = & -\frac{(1 + \nu_2)(E_1 + E_2) + (\nu_2 - \nu_1)(\nu_1 E_2 - \nu_2 E_1)}{(1 + \nu_2) E_1 (E_1 + E_2)} p \\ & + \frac{2(\nu_1 + \nu_2)}{E_1 + E_2} \sigma_p \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

ここで、もし仮りに上下の箔打紙の縦（横）方向を揃えて重ねた場合には、双方の打紙の応力とひずみの関係は等しくなる。いま、打紙の横方向を x 方向に、縦方向を y 方向にとると、そのときの応力とひずみの関係は

$$\varepsilon_x = \frac{\nu_1}{E_1} p - \left(\frac{1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2} \right) \sigma_p \quad (7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\nu_2}{E_1} p + \left(\frac{\nu_2}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \sigma_p \quad (8)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{E_1} p + \left(\frac{\nu_1}{E_1} + \frac{\nu_2}{E_2} \right) \sigma_p \quad (9)$$

となる。

2.2 槌打ちによる箔の変形

先の仮定より、箔は弾塑性体であると考えているので、x、y 方向に作用する応力は等しい。いま、この応力を σ_θ とすると次の関係が成り立つ。

$$\sigma_p t_p = \sigma_\theta t_\theta$$

ただし、 t_p 、 t_θ はそれぞれ箔打紙、箔の厚さを表わす。したがって、

$$\sigma_p = \frac{t_\theta}{t_p} \sigma_\theta \quad (10)$$

となる。また、von Mises-Hencky の降伏条件³⁾を適用すると、次の関係が成り立つ。

$$\sigma_\theta + p = \sigma_t \quad (11)$$

ここで、 σ_t は箔の降伏応力である。式(10)、(11)より、

$$\sigma_p = \frac{t_\theta}{t_p} (\sigma_t - p) \quad (12)$$

いま、式(12)を式(4)、(5)、(6)にそれぞれ代入すると、

$$\sigma = \frac{(\nu_2 - \nu_1) E_2}{(1 + \nu_2)(E_1 + E_2)} p + \frac{(E_2 - E_1) t_\theta}{(E_1 + E_2) t_p} (\sigma_t - p) \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{(\nu_1 + \nu_2^2) E_1 + \nu_2 (1 + \nu_1) E_2}{(1 + \nu_2) E_1 (E_1 + E_2)} p - \frac{2(1 - \nu_2) t_\theta}{(E_1 + E_2) t_p} (\sigma_t - p) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = & -\frac{(1 + \nu_2)(E_1 + E_2) + (\nu_2 - \nu_1)(\nu_1 E_2 - \nu_2 E_1)}{(1 + \nu_2) E_1 (E_1 + E_2)} p \\ & + \frac{2(\nu_1 + \nu_2) t_\theta}{(E_1 + E_2) t_p} (\sigma_t - p) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。

式(14)において、 t_θ/t_p の値が箔打工程であまり変わらず、ほぼ一定の値をとるものとする、ひずみ ε の値は紙の弾性率が小さいほど大きくなることが推察される。すなわち、箔打工程において、槌

打ちによって箔が加工硬化し、箔が伸びにくくなれば、弾性率の小さい紙を使用したほうが、箔の展延に有利であることを式は示している。したがって、箔打工程の各段階で、例えば灰汁処理回数の少ない小間紙から、灰汁処理回数の多い主紙に換えるのは、弾性率の小さい紙に換えることによって、箔の伸びの効率を上げるためと推考される。

3. 箔の焼鈍と展延について

3.1 箔の焼鈍しの意味

箔打工程のうち、ある1つの箔打工程を取り上げ、その工程における箔の展延状態について考えてみることにする。一般に、1つの箔打工程では打紙の取り換えは行わない。これは、1つの工程期間中では、槌打回数が増しても紙質（紙厚）がほとんど変化しないからである。したがって、1つの工程のみに限って箔の展延を考える場合は、式(14)は次のように書くことができる。

$$\varepsilon = Ap - Bt_{\theta}(\sigma_t - p) \quad (16)$$

ここで、A、Bは定数である。

いま、1つの箔打工程を考え、その初めの箔の厚さを $t_{\theta 0}$ とし、箔の加工度 χ を $\chi = (t_{\theta 0} - t_{\theta})/t_{\theta 0}$ と定義すると、

$$t_{\theta} = (1 - \chi)t_{\theta 0} \quad (17)$$

となる。箔は槌打回数が増すにつれて加工硬化を生じるため、箔の降伏応力は次第に増加することになる。したがって、 σ_t は次式のように書き表わされる。

$$\sigma_t = \alpha \chi^n + \sigma_0 \quad (n > 1) \quad (18)$$

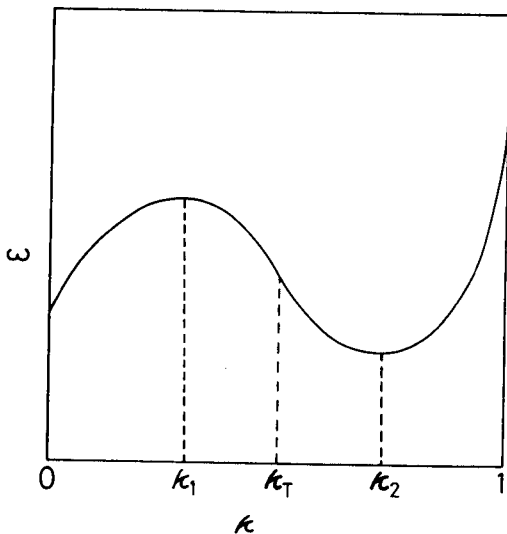


図3 χ と ε の関係

ここで、 α 、 σ_0 、 n は各々定数であると仮定し、式(17)、(18)を式(16)に代入すると、

$$\begin{aligned} \varepsilon = & Ap - Bt_{\theta 0}(1 - \chi) \\ & \times (\alpha \chi^n + \sigma_0 - p) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。式(19)より、加工度 χ とひずみ ε の関係は図3のようになる。

以下に、図の表わす意味を少しく考察してみよう。図から、箔の展延性は槌打回数が増すにつれて次第に増すが、加工（展延）がある程度進み、 χ の値が χ_1 の値になる所で最大となる。しかし、それ以後は逆に展延性は次第に減少してゆく。そして、 χ_2 の所で伸びは最小となり、以

後、再び展延性が増すことを示している。図の曲線を見ると、図には変曲点が1つ存在することがわかる。その値を x_T で表わすと

$$x_T = \frac{n-1}{n+1}$$

となる。したがって、 n の値が大きいくほど、変曲点は $x=1$ の側にシフトすることになる。

ここで、実際の箔打ち工程について考えてみると、箔を小間紙から主紙に移しかえる段階で加工度は約0.7である。この段階では箔は延び難くなっているものと思われる。すなわち、図において、 x の値がピークをすぎた所に位置するものと考えられる。この段階で「火の間作業」を行うことは図からも合理的なことで、箔を鈍すことによって、箔の展延性を回復させるということを行っているものと考えられる。

箔を焼鈍すということは、槌打作業で加工硬化（降伏応力が増大）した箔の降伏応力を減少させ、展延性を回復させることを意味する。このことは、式(16)において、 σ_t の値を小さくすることに対応する。箔打工程では、焼鈍しを行っても箔の厚さは変わらないから、降伏応力が減少した分だけ箔の展延性は良くなることになる。

3.2 箔の展延条件

以下に、箔の展延条件について少しく考察を行う。箔と紙が完全に密着した状態で箔が延びるためには、

$$\sigma_{gmax} + p > \sigma_t \quad (20)$$

の関係が成り立たねばならない。ここで、 σ_{gmax} を次のように仮定する。

$$\sigma_{gmax} = \frac{mp}{t_g} \quad (21)$$

ただし、 m は箔と紙との結合係数である。

式(20)、(21)より箔が展延を起すための p の条件は

$$p > \frac{\sigma_t}{\frac{m}{t_g} + 1} \quad (22)$$

となる。式(22)を書きかえると、

$$m > \left(\frac{\sigma_t}{p} - 1 \right) t_g \quad (23)$$

となる。いま、圧力 p が一定であるとする、箔の厚さ t_g が大きいほど、また、降伏応力が大きくなるほど m は大きな値をとる必要がある。 m は紙の表面状態、摩擦係数、硬さ、箔の硬度などによって決まる係数であり、実際の場合、箔と紙のなじみの度合を示すものである。したがって、延びにくい箔ほどなじみのよい紙が必要となる。

3.3 ハンマ形状が箔の展延に及ぼす効果

主ひずみを ε_1 、 ε_2 とすると、任意の方向 θ のひずみ ε_θ は次式で書き表わされる。

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta$$

紙には、紙面に平行なせん断応力は作用しないと考えられ、したがって、紙面でのせん断ひずみは零となるから、紙の縦、横方向のひずみを主ひずみと仮定し、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ とすると、ひずみは方向によらず一定である。したがって、円形に分布する圧力を受ける紙は、その中心から半径方向に一様に延びることになる。

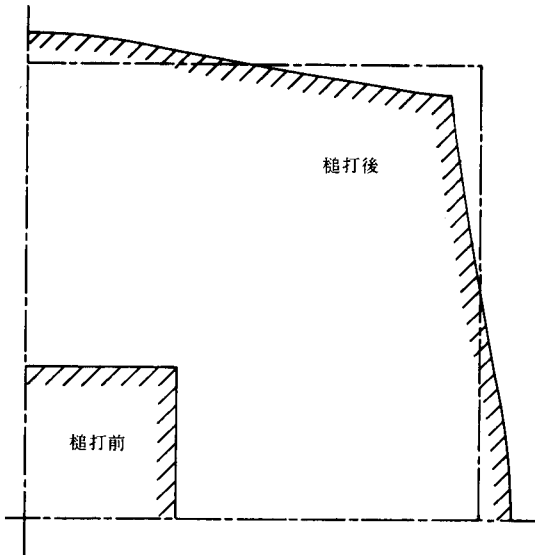


図4 箱の展延状況

実際の箔打工程では、図4¹⁾に示すように、最初正方形であった箔は、槌打回数が増えて展延が進むにつれて、その形にゆがみを生じてくる。すなわち、正方形の中心から辺の方向へのひずみが、角の方向へのひずみに比べて大きくなっていく。これは円形断面の槌を用いているために、圧力分布が円形となり、紙はその圧力の中心から半径方向に一様に応じて延びる。それが結果として箔の形にゆがみを生じてくると考えられる。

4. 結 論

金箔の展延は、箔打紙の弾性変形によるものとして、その展延特性を理論的に解析し、実際の箔打工程で観察されている結果と比較・検討した。その結果、次のような結論が得られた。

- 1) 箔の展延に対して、紙の縦方向の弾性率より、横方向の弾性率の方がより大きく影響する。
- 2) 弾性率の大きな紙より、小さな紙の方が箔の展延に有利であり、実際の箔打工程で、灰汁処理回数の少ない紙から多い紙にかえるのは、これが一因と考えられる。
- 3) 1つの箔打工程においては、箔の展延性は最初増加するが、ある点をすぎると減少する。実際にはこの時点で焼鈍を行って、その展延性の回復をはかっている。
- 4) 箔の展延には紙の表面状態が大きく影響し、延び難い箔ほど、箔となじみのよい紙を使用する必要がある。工程が進むにつれて、灰汁処理回数の多い紙を使うのはこの理由も一因と思われる。
- 5) 箔打工程で、槌打回数が進むにつれて箔の形がゆがんでくるのは、展延が紙の弾性変形によるため、円形断面の槌で打つと、紙が方向によらず一様に変形し、箔もそれに応じて延びるためと考えられる。

参 考 文 献

1. 上田益造・谷村喜代志：日本海城研究所報告 第11号 (1979) 1

2. 黒部利次・今中治・小林茂彦 : 日本海域研究所報告 第11号 (1979) 25
3. 中沢一・小泉堯 : 固体の力学 養賢堂 (1975) 237