

目次

第 1 章	はじめに-----	3
第 2 章	蛍光 X 線分析法による金箔の合金組成および膜厚の調査	
2.1	実験方法および実験試料-----	3
2.2	合金組成の測定-----	4
2.3	金の割合と膜厚-----	6
2.4	金箔、白金、パラジウム箔、ミャンマー箔の膜厚および膜厚分布-----	7
第 3 章	金箔の反射特性および表面形状	
3.1	反射光の測定およびデータ解析-----	12
3.2	製法の違いによる金箔の反射特性および表面形状-----	14
3.3	種類の違いによる金箔の反射特性および表面形状-----	18
第 4 章	金箔の力学的特性	
4.1	実験装置・実験方法-----	25
4.2	引張試験の結果-----	26
第 5 章	まとめ-----	27
参考文献	-----	28

第1章 はじめに

これまでに、金箔の光学的特性（反射スペクトル、吸収スペクトル）、穴の分布、膜厚などの特徴を金沢箔、三浦箔（昭和初期の製箔と思われる金箔）、国外箔（中国箔、ドイツ箔）について、調査してきた。それらの特徴は金箔の合金組成や箔打ち工程に大きく依存していると思われる。

金箔は金をベースに、銀と銅を経験則にしたがって所定の割合で配合し、溶解して塊状にしたものを出発材料とし、多くの製箔工程を経て作製されている。そのため、製品として出来上がった金箔の合金組成は溶解時の金、銀、銅の質量%で表されている。しかし、一般的には、溶解時の見込み配合組成がそのまま最終製品の合金組成とはならない。そこで今回、蛍光X線分析法を用いて数種類の金箔について、その合金組成の測定を目的とする。

また、縁付け箔はつやがない、断切り箔はつやがありすぎる等と金箔の輝きの評価が語られる。これらは金箔の表面の形状に関係していると思われる。表面形状の評価も行う。

さらに、縁付箔は断切箔に比べてしなやかで複雑な形状の対象物にも貼りやすいとされる。このような特徴は金箔の引張り強さや剛軟性といった機械的性質によるものと思われる。よって、引張強度の調査も目的とする。

第2章 蛍光X線分析法による金箔の合金組成および膜厚の調査

2.1 実験方法および実験試料

金箔の合金組成の測定は比較的簡便な方法であるX線分析顕微鏡（石川県工業試験場設置 HORIBA XGT-5000）の蛍光X線を用いた元素分析機能を使った。この分析方法は金属の場合分析に要する厚さは数十 μm とされている。金箔は約 $0.1\mu\text{m}$ であり、薄すぎるため箔のままでは計測を行うことができない。そのため、製品となっている金箔を試験管状の石英ガラス管に入れ、バーナーで加熱することで金箔を溶かし、金箔を粒状にし、その後、錠剤成形機を使用して 200kg の圧力をかけることで半径約 2mm 、厚さ約 0.1mm の円盤状に成形した。この厚さであれば分析可能である。

再成形した円盤状試料は1種類の金箔について1個作成し、図2-1に示すように、1個につき中心部1箇所、外周部付近4箇所の合計5箇所で計測を行った。結果についてはそれらを平均した値が載せられている。

本実験においては、三浦箔は使用せず、現代国内箔、国外箔の合金組成を測定した。また、比較のために純金についても蒸着用で購入した金線を用いて同様に実験試料を作成した。国内箔について、1号色、3号色、4号色、3歩色の金箔を代表して、縁付1号色、断切3号色、縁付4号色、断切3歩色のものを使った。中国箔については、中国1号色、中国4号色、ドイツ箔については、ドイツ23.75カラッ

ト、ドイツ 23 カラットのものを用意した。

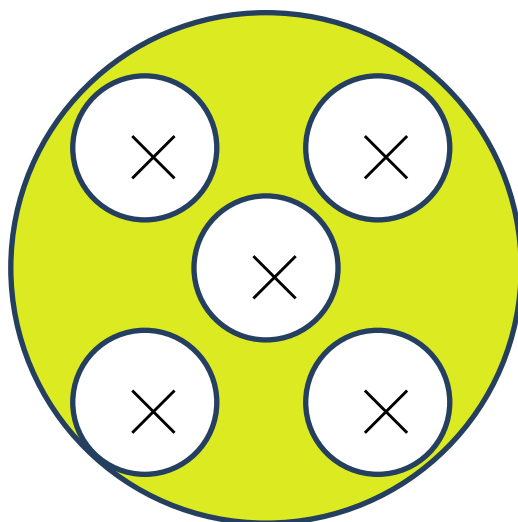


図 2-1 試料測定箇所

2.2 合金組成の測定

蛍光 X 線分析法は簡便であるが、測定精度および誤検出という問題もあり、検出する金属をあらかじめ指定しておく必要がある。金箔は金、銀、銅を所定の割合で配合し溶解して塊状にしたものを箔打ちすることにより作製されるので鉄が混入することは考えられないが、分析装置の自動判定機能により鉄の成分が入っている可能性を否定できなかった。そのために、鉄を検出元素として加えるかどうか判断しなければならない。蛍光 X 線分析法で金以外の金属がほとんど入っていない純金板（ニラコ 金比率 99.95%以上 厚さ 0.2mm、大きさ 10mm×10mm）の合金組成を購入した状態で測定することによってその判断を行った。自動判定機能を用いた測定結果について、表 2-1 に見られるように金以外のタリウム、ニオブ、臭素、トリウム、ルビジウムなどの金属が検出されている場合がある。その値が 0 となっているものと斜線が引かれているものがあるが、0 となっているものは項目が表示された上で 0 と示されたもの、斜線は自動判定により存在しないとされ、項目が表示されなかったものである。結果としては、金以外の元素の表示は不定であり、表示されたとしても値が不定であった。さらに、この純金板の金比率が 99.95%以上であるとされているので、これらの値は誤検出の可能性はある。この試料において、鉄は全く検出されていない。したがって、純金板には鉄が混入している可能性は全くないと考えられる。

表 2-1 純金板の合金組成測定結果（質量%）

検出金属	箇所 1	箇所 2	箇所 3	箇所 4	箇所 5
金	99.83	99.19	99.07	99.83	99.6
タリウム	0.17	0.31	0.22	0.17	
ニオブ	0	0.01	0		0.03
臭素			0.29		0.33
トリウム		0.49	0.41		
ルビジウム					0.05

表 2-2 に、検出金属に金、銀、銅、鉄を指定して測定したそれぞれの割合の平均値を示す。鉄を指定したのは、上に見たように純金板では鉄は検出されていないが、自動判定機能を用いた場合、どの金箔にも鉄が検出されており、鉄の成分が混入していると考えたからである。比較のために、金箔の試料作成の場合と同様に純金線を溶かして塊状にしたものを錠剤成形機で円盤状に成形して作った試料についても載せてある。表 2-3 には、今回測定された結果と石川県箔商工業協同組合で規定した合金の割合（規定割合と呼ぶ）との比較が載せてある。

国内箔については全体的に銅が規定割合と比較して小さい値となったものの、それ以外は規定割合とほぼ同じ値となった。

中国箔においては、規定割合が不明であるが、中国箔の 1 号色および 4 号色と称されている金箔は測定された合金組成を見ると金沢箔の 1 号色および 4 号色に近いものであることが分かる。

ドイツ箔に関しては、金の規定割合はカラットから推定できるが、金以外不明であるため、銀と銅の比較はできない。しかし、金に関しては規定割合とほぼ同じで、標準偏差も小さい結果となっている。

表 2-2 合金組成および標準偏差（質量％）

	金		銀		銅		鉄	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
縁付 1 号	97.94	0.07	1.31	0.04	0.66	0.02	0.10	0.04
断切 3 号	96.02	0.13	3.41	0.15	0.45	0.02	0.12	0.04
縁付 4 号	94.30	0.39	4.83	0.18	0.44	0.05	0.43	0.21
断切 3 歩	76.86	0.44	22.96	0.42	0.01	0.01	0.18	0.02
中国 1 号	98.04	0.08	1.29	0.06	0.53	0.02	0.14	0.03
中国 4 号	94.54	0.31	4.86	0.31	0.28	0.01	0.33	0.09
独 23.75K	98.79	0.12	0.65	0.02	0.29	0.03	0.27	0.11
独 23K	95.70	0.14	2.91	0.13	1.08	0.03	0.31	0.03
純金線	99.94	0.03	0	0	0	0	0.05	0.04

純金線においては銀や銅は検出されていない。

どの金箔にも、鉄の成分が検出されている。試料作成過程で鉄が混入したことが考えられる。金箔や純金線を溶かし成形する過程も考えられる。しかし、純金線においては、鉄は非常に少ないことを考えると、鉄成分の多くは金箔を製箔する過程で混入した可能性が高いと思われる。

比較のために、表 2-4 に鉄を検出金属として指定しないで測定した金、銀、銅のみの結果を規定割合と並べて載せてある。鉄を指定すると、金の割合は少し小さくなり、銀の割合は少し増える。銅の割合はほとんど変わらない結果となっている。

表 2-3 合金組成と規定割合の比較（質量％）

	金		銀		銅		鉄	
	平均	規定割合	平均	規定割合	平均	規定割合	平均	規定割合
縁付 1 号	97.94	97.67	1.31	1.36	0.66	0.98	0.10	—
断切 3 号	96.02	95.80	3.41	3.34	0.45	0.86	0.12	—
縁付 4 号	94.30	94.44	4.83	4.90	0.44	0.66	0.43	—
断切 3 歩	76.86	75.59	22.96	24.41	0.01	0	0.18	—
中国 1 号	98.04	—	1.29	—	0.53	—	0.14	—
中国 4 号	94.54	—	4.86	—	0.28	—	0.33	—
独 23.75K	98.79	98.96	0.65	—	0.29	—	0.27	—
独 23K	95.70	95.83	2.91	—	1.08	—	0.31	—
純金線	99.94	99.95	0	—	0	—	0.05	—

表 2-4 鉄を指定しない場合の各試料の合金組成と規定割合（質量％）

	金		銀		銅	
	平均	規定割合	平均	規定割合	平均	規定割合
縁付 1 号	98.05	97.67	1.30	1.36	0.66	0.98
断切 3 号	96.21	95.80	3.34	3.34	0.45	0.86
縁付 4 号	94.88	94.44	4.68	4.90	0.43	0.66
断切 3 歩	77.47	75.59	22.53	24.41	0.01	0
中国 1 号	98.14	97.67	1.33	1.36	0.53	0.98
中国 4 号	95.11	94.44	4.61	4.9	0.28	0.66
ドイツ 23.75K	99.04	98.96	0.67	—	0.29	—
ドイツ 23K	96.08	95.83	2.84	—	1.08	—
純金線	100	100	0	0	0	0

2.3 金の割合と膜厚

箔打ち職人に聞くと、1号色、3号色、4号色と銀の割合が高くなるほど「たたき易い」「延び易い」といわれ、箔打ちの回数が増えるといわれる。このことは製箔された金箔の膜厚と合金組成との間に何らかの関係の存在をうかがわせる。

図 2-2 に金箔の金規定割合と膜厚との関係が示されている。縁付箔、断切箔ともにばらついており関係性がはっきりしない。これは箔を打った職人によってばらつきがあることも考えられる。そこで同一職人 T 氏が打った金箔（T 箔と呼ぶ）の結果を並べたのが T 箔のデータである。引いてある直線からわかるように、明らかに金の割合の増加につれて厚さが増している。

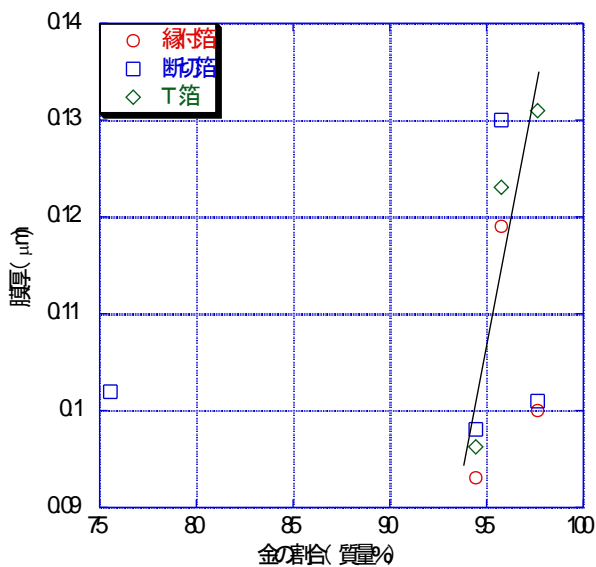


図 2-2 金の規定割合と厚さ

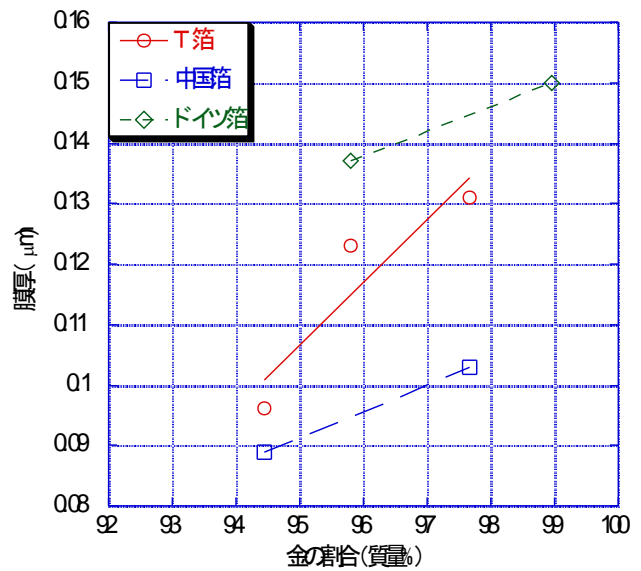


図 2-3 金の割合と厚さ

図 2-3 に、T箔、中国箔、ドイツ箔について金の割合と膜厚の関係を示した。T箔については金の規定割合を基に、中国箔、ドイツ箔については測定された金の割合を基にしてプロットした。この3種類については、偶然かもしれないがどの種類の金箔も金の割合の増加に伴って膜厚が増大しているのが分かる。槌打ちによって製箔し製品として仕上げる場合、その時々々の天気（湿度や温度など）や箔打ち紙の質、状態、さらに職人にもよるといわれるが、金箔の膜厚は一般に金の割合の増加に伴って増加するといえそうである。詳細は不明であるが、合金組成に依存した金合金の塑性的性質が関係しているものと思われる。現在製箔されている金箔の合金組成は金合金の塑性的性質を経験的につかみ取って現在の割合に落ち着いたのかもしれない。

2.4 金箔、白金、パラジウム箔、ミャンマー箔の膜厚および膜厚分布

図 2-4 から図 2-21 にそれぞれの試料数枚の平均した膜厚分布が金箔、白金、パラジウム箔について模式図として、表 2-5 には膜厚について昨年度の結果とともにまとめて載せてある。模式図の数値は膜厚を μm で表してある。膜厚模式図より、多くの箔において、中心部の膜厚が最も大きくなり、外周方向に向かって膜厚が小さくなる傾向が見られる。特にこの傾向は本研究で使用した現代国内箔において顕著である。これは金箔の製法が、中心より外側方向に槌打ちによって伸ばしていくものであることが原因なのではないかと予想される。白金、パラジウムにも同様の傾向が見られるが、これらはそれ以上に測定箇所による膜厚の変化が大きく見られ、一般的な金箔より箔とするには難しいものなのではないかと考えられる。三浦箔、中国箔、ドイツ箔ではこの傾向が比較的小さい。

平均膜厚については大まかな傾向として、三浦箔が最も薄く、次に中国箔、現代国内箔、白金箔、ドイツ箔、パラジウム箔の順に厚くなるという結果が得られた。また、縁付箔、断切箔、中国箔の1号色と4号色およびドイツの23.75カラットと

23カラットを比較すると、4号色および23カラットの方が膜厚は小さいという結果が出た。このことは図2-3でみたとおりである。比較のために、純金箔、純銀箔の膜厚も載せてある。

標準偏差においては、膜厚模式図で見られた膜厚変化の傾向が大きい箔ほど標準偏差の値も大きいものとなり、その膜厚の変化の大きさを表している。

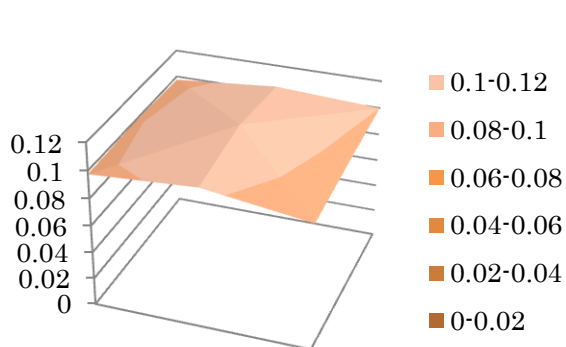


図 2-4 縁付 1 号の膜厚模式図

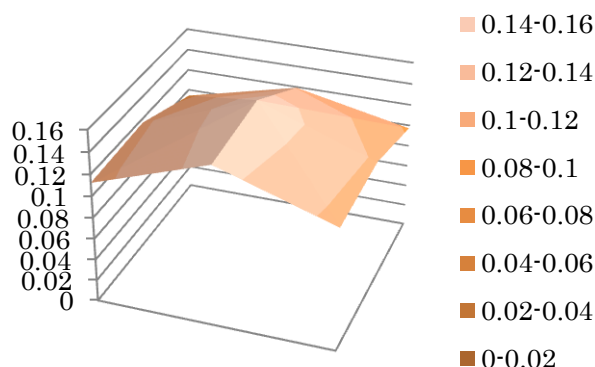


図 2-5 縁付 3 号の膜厚模式図

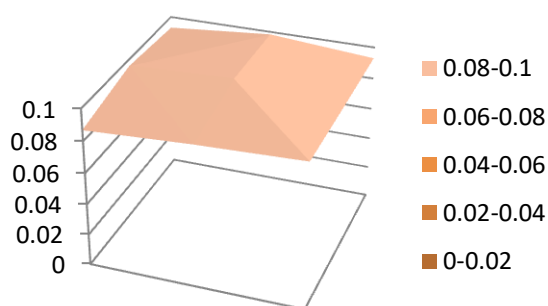


図 2-6 縁付 4 号の膜厚模式図

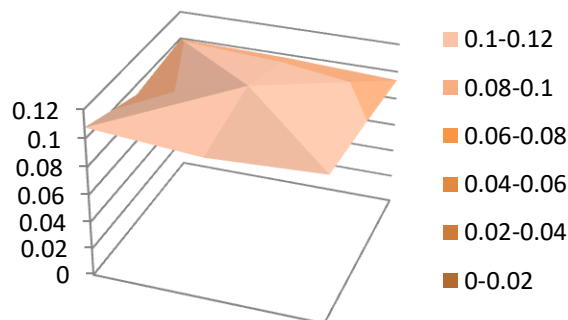


図 2-7 断切 1 号の膜厚模式図

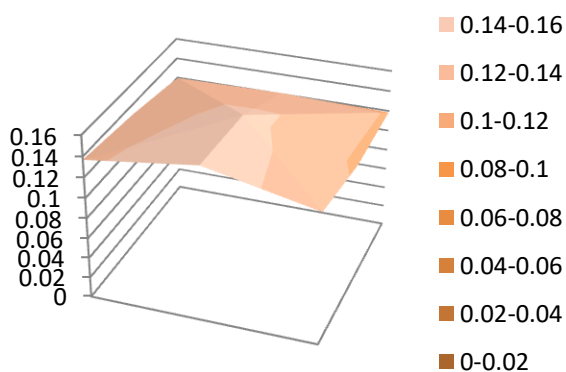


図 2-8 断切 3 号の膜厚模式図

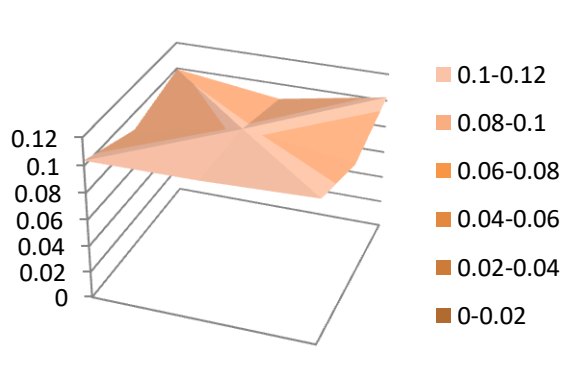


図 2-9 断切 4 号の膜厚模式図

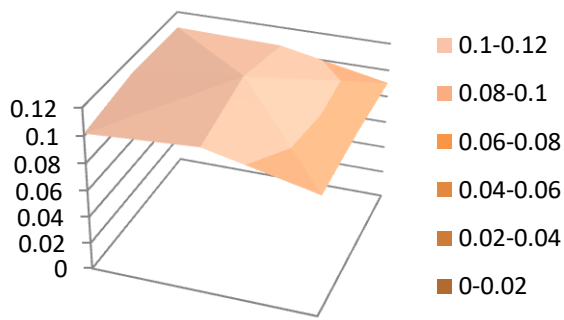


図 2-10 断切 3 歩の膜厚模式図

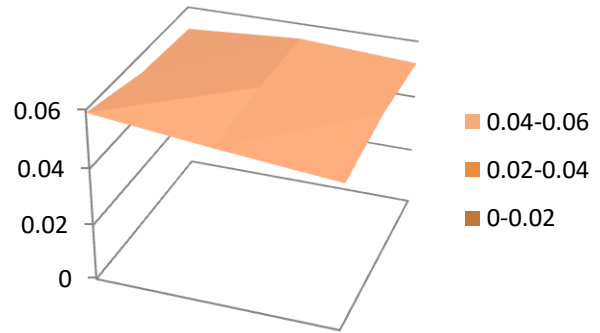


図 2-11 三浦大焼の膜厚模式図

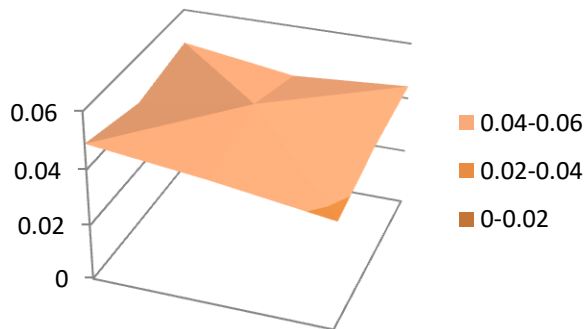


図 2-12 三浦 3 歩の膜厚模式図

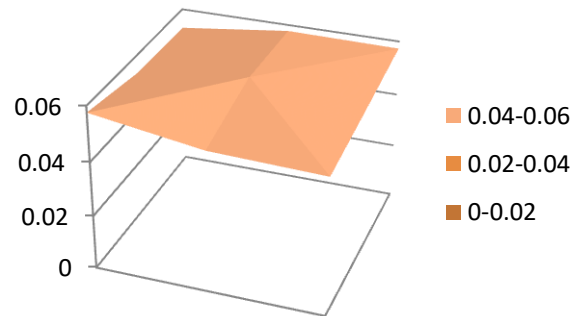


図 2-13 三浦本焼 3 号の膜厚模式図

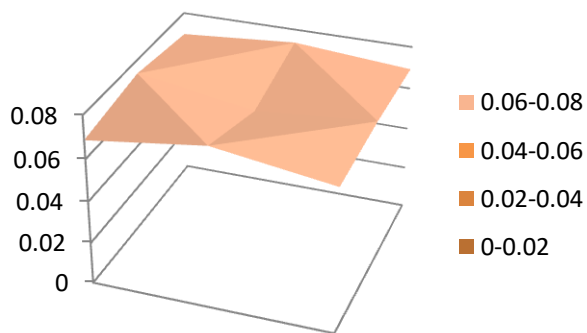


図 2-14 三浦本焼 4 号の膜厚模式図

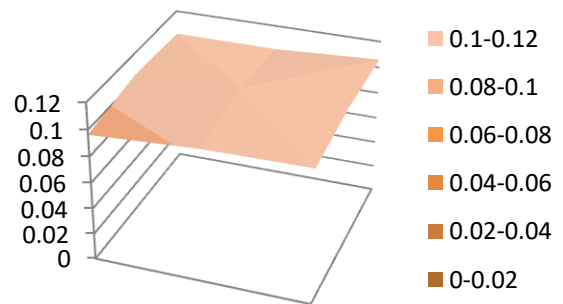


図 2-15 中国 1 号の膜厚模式図

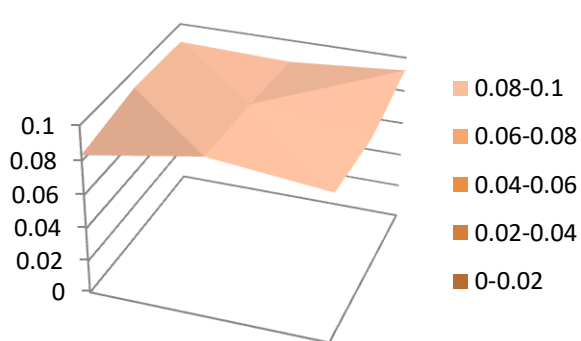


図 2-16 中国 4 号の膜厚模式図

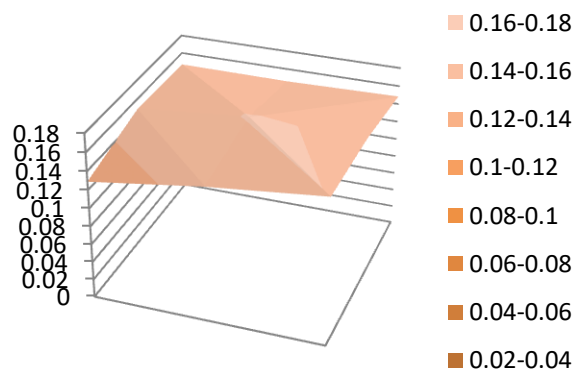


図 2-17 ドイツ 23.75K の膜厚模式図

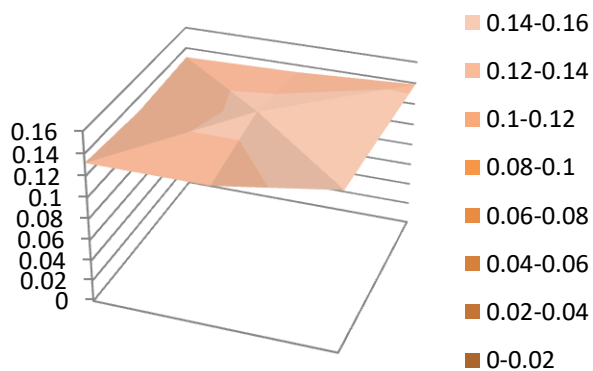


図 2-18 ドイツ 23K の膜厚模式図

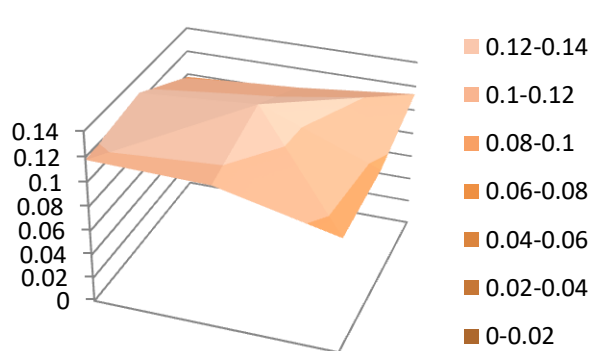


図 2-19 白金(thin)の膜厚模式図

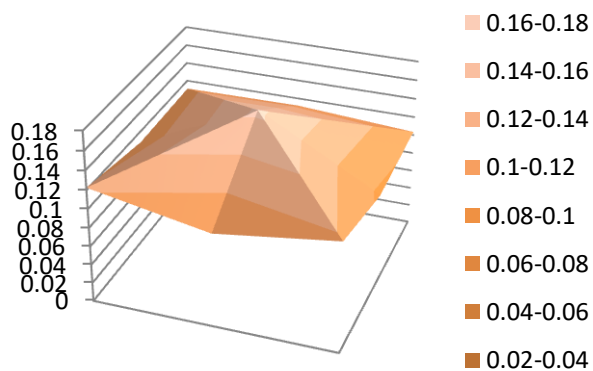


図 2-20 白金の膜厚模式図

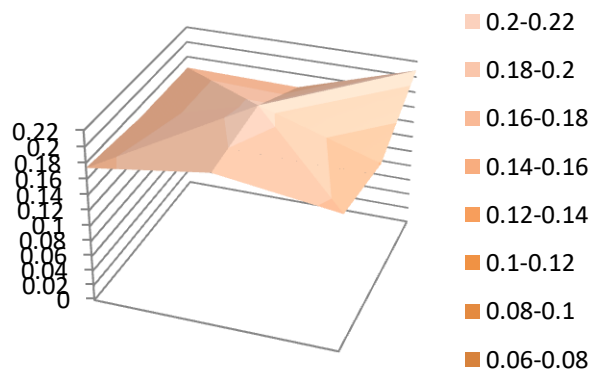


図 2-21 パラジウムの膜厚模式図

表 2-5 各種箔の平均膜厚、標準偏差(μm)

種類	平均膜厚	標準偏差
縁付 1 号	0.100	0.005
縁付 3 号	0.119	0.021
縁付 4 号	0.093	0.004
断切 1 号	0.101	0.007
断切 3 号	0.130	0.013
断切 4 号	0.098	0.008
断切 3 歩	0.102	0.011
三浦大焼	0.054	0.002
三浦 3 歩	0.045	0.004
三浦本焼 3 号	0.055	0.003
三浦本焼 4 号	0.071	0.003
中国 1 号	0.103	0.003
中国 4 号	0.089	0.004
ドイツ 23.75	0.150	0.01
ドイツ 23	0.137	0.008
純金	0.101	0.017
純銀	0.274	0.057
白金(thin)	0.111	0.027
白金	0.115	0.024
パラジウム	0.179	0.031

表 2-6 に入手したミャンマーの金箔の膜厚を記す。この箔は手打ちのものであり、大きさは約 2cm 四方である。合金組成は分からない。手打ちのため測定箇所によってかかなりばらついているが、平均膜厚 0.186μm は思ったより薄い。

表 2-6 ミャンマーの金箔

測定箇所	膜厚(μm)
1	0.622
2	0.089
3	0.124
4	0.207
5	0.103
6	0.120
7	0.231
8	0.096
9	0.084
平均	0.186
標準偏差	0.172

第3章 金箔の反射特性および表面形状

「縁付箔はツヤがなく、白っぽい。上品な感じがある。断切箔はツヤがありすぎて落ち着かない感じがする。」[1]などと縁付箔、断切箔の見た感じの違いが表現されている。このような違いは金箔に反射した光の特徴によると考えられる。そして、反射光の様子は金箔表面の凹凸形状の違いによる。そこで、金箔表面での反射特性および表面形状を調査した。

3.1 反射光の測定およびデータ解析

金箔の反射光強度の角度分布の測定は石川県工業試験場にある3次元変角光度計(村上色彩技術研究所 GP200 型)を用いて行なった。光源はハロゲンランプ、受光器は光電子増倍管が使われている。図3-1に3次元変角光度計を上から見た概略図を示す。

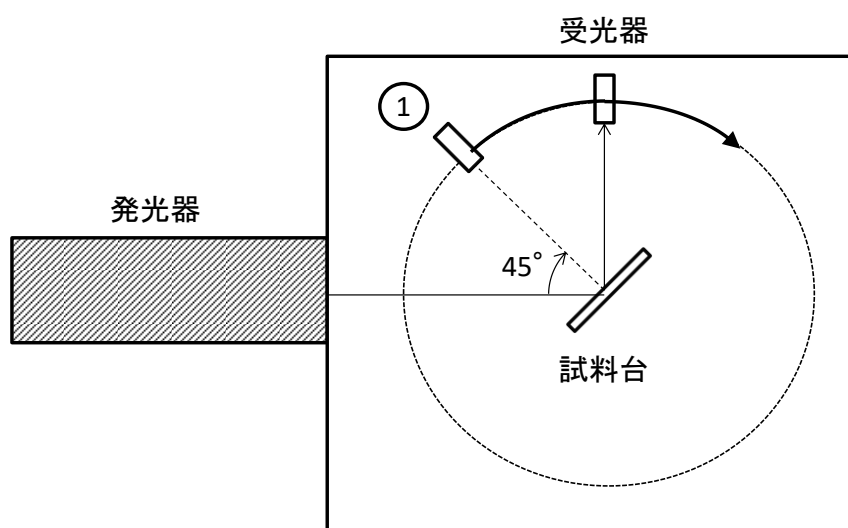


図3-1 3次元変角光度計の概略図

図3-1の左側の発光器部分から試料に光が当てられ、受光器が図の円に沿って時計回りで移動しながら、0.1度刻みで各角度における光の強さを計測する仕組みになっている。試料台に対する入射角は45度であり、入射光径は7.0mmである。受光器の径は6.8mmとなっている。試料台に金箔を設置し反射光強度の角度分布を測定することによって、金箔表面の平均化された凹凸形状が推測される。その方法を以下に記す。

図3-2のように、左側から試料台に対して入射角45度で試料台に設置された金箔によって試料台に対する反射角 θ [度]で光が反射するものとする。試料台にはわずかに(角度 α)傾いて金箔が設置され、また、金箔の一部分(面積 $\Delta S(\theta)$)から反射角 θ で反射するものとする。入射光束の単位断面積あたりの光強度を i_0 、反射光束の単位断面積あたりの光強度を i_r 、反射率を r とすると、

$$i_r = r i_0$$

である。 r が反射角に依存しないと仮定する。

今、 θ で反射する光について考える。 $\Delta S(\theta)$ からの反射光束（断面積 $\Delta S_r(\theta)$ ）の光強度 $\Delta I(\theta)$ に対して、

$$\Delta I(\theta) = i_r \Delta S_r(\theta)$$

である。発光器からの光が金箔に当たって反射した光が受光器に入る金箔上の面の内で光を反射角 θ で反射する面の総面積を $S(\theta)$ （ $\Delta S(\theta)$ をすべて足し合わせたもの）、反射した光強度の総和を $I(\theta)$ 、反射光束の断面積の総和を $S_r(\theta)$ とすると、

$$I(\theta) = i_r S_r(\theta)$$

である。

$$S_r(\theta) = S(\theta) \cos\left(\frac{45 + \theta}{2}\right)$$

なので、

$$S(\theta) = \frac{I(\theta)}{i_r \cos\left(\frac{45 + \theta}{2}\right)}$$

となる。反射角 $\theta = 45^\circ$ 付近で、反射光強度は最大となり、そのとき $\theta = \theta_m$ とし、

$$I_m = I(\theta_m) = i_r S(\theta_m) = i_r S_m$$

とする。そうすると、

$$S(\theta) = \frac{S_m}{I_m} \frac{I(\theta)}{\cos\left(\frac{45 + \theta}{2}\right)}$$

と表される。

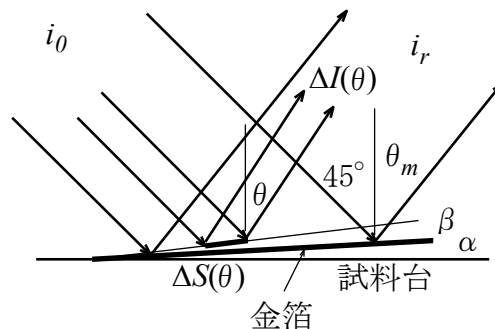


図 3-2 試料台、金箔と光との関係

図 3-3 のように、 $S(\theta)$ が金箔表面に対して角度 β で傾いており、それを長さで表しその長さの横成分を $x(\theta)$ 、縦成分を $y(\theta)$ とすると

$$x(\theta) = S(\theta) \cos\beta$$

$$y(\theta) = S(\theta) \sin\beta$$

$$\alpha = \frac{45 - \theta_m}{2}$$

$$\beta = \frac{\theta_m - \theta}{2}$$

であるので、

$$x(\theta) = \frac{S_m}{I_m} \frac{I(\theta)}{\cos\left(\frac{45+\theta}{2}\right)} \cos\left(\frac{\theta_m - \theta}{2}\right)$$

$$y(\theta) = \frac{S_m}{I_m} \frac{I(\theta)}{\cos\left(\frac{45+\theta}{2}\right)} \sin\left(\frac{\theta_m - \theta}{2}\right)$$

となる。これを測定された反射角の範囲(35 度から 55 度まで)を 0.1 度刻みで求めた $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ を加え合わせていくことにより、金箔表面の凹凸形状が求められる。

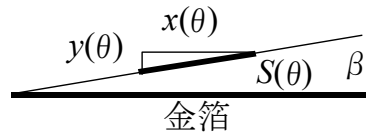


図 3-3

3.2 製法の違いによる金箔の反射特性および表面形状

3 次元変角光度計による反射光の角度分布の測定は金箔の表面形状に依存するので、ガラスに金箔を貼って試料を作成するとき、貼り方の影響が少ない方がよい。そのために、同一の貼り職人に同じような方法で貼ってもらったものを用いた。

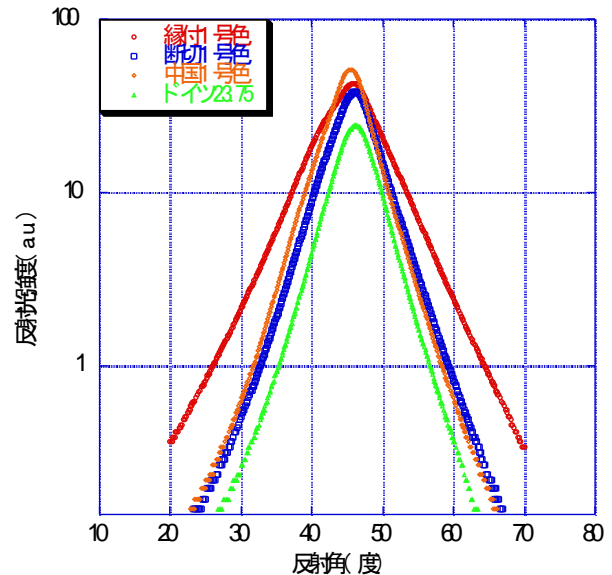
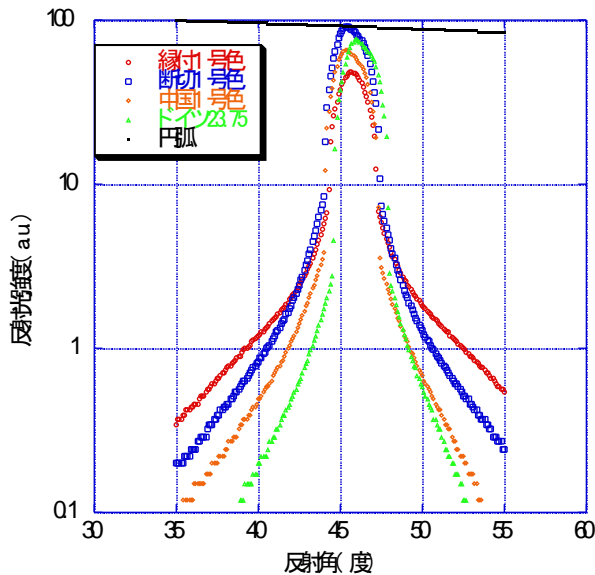


図 3-4 各種 1 号色反射光強度の角度分布 図 3-5 金箔を 2 度傾けた時の反射光度の角度分布

図 3-4 には試料台を垂直のまま各種 1 号色金箔（ドイツ箔は 23.75 カラットのもの）による反射光強度(対数で表してある)の角度分布を示す。図には、比較のために凹凸が円弧である場合の様子も示す。縁付箔は裾が広がっており、比較的広い角度範囲に反射していることを表している。他のものは断切箔、中国箔、ドイツ箔の順に狭まっている。

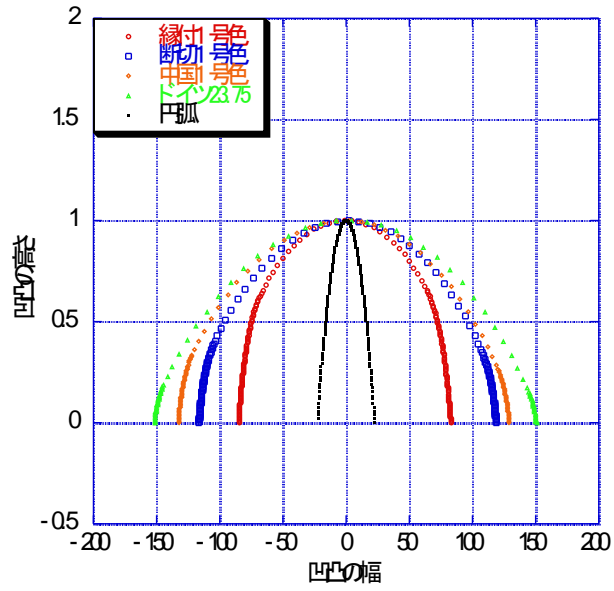


図 3-6 計算された 1 号色の凹凸形状

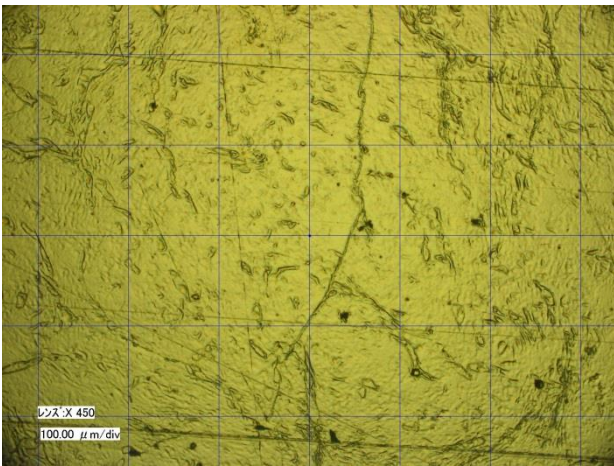


図 3-7 縁付箔 1 号色

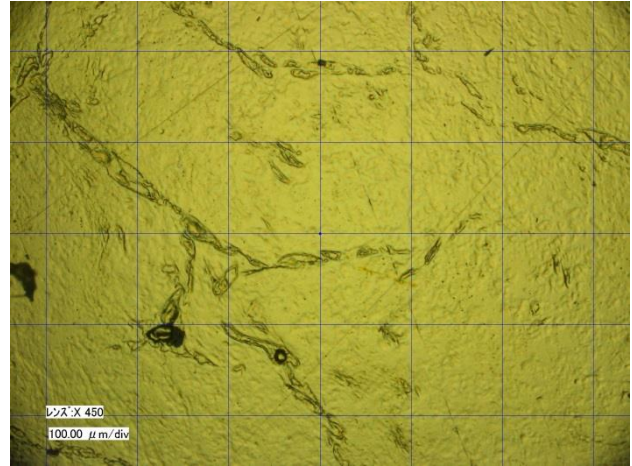


図 3-8 断切箔 1 号色

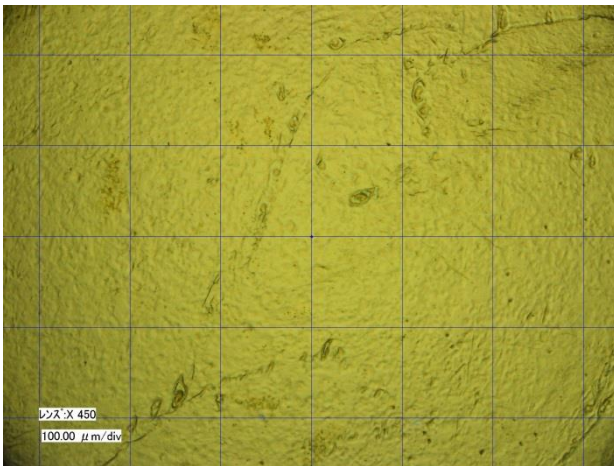


図 3-9 中国箔 1 号色

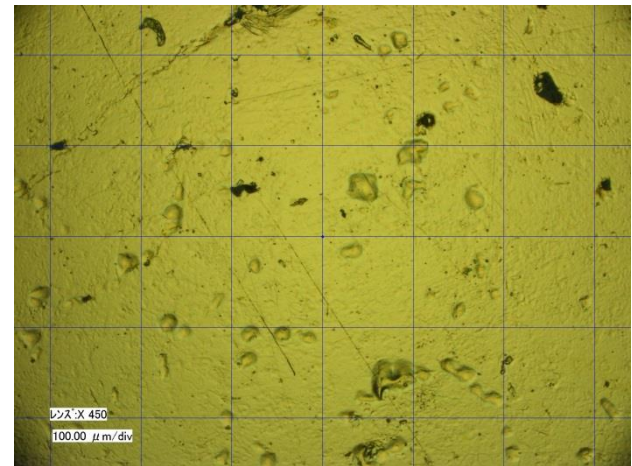


図 3-10 ドイツ箔 23.75 カラット

図 3-5 には、試料台を垂直から 2 度傾けた場合について反射光強度の角度分布を

示す。それぞれのデータは傘状の形をしており、これも縁付箔のものは他のものよりも広がっている。図 3-6 には 3.1 節に書かれた方法に基づいて図 3-4 のデータから計算されたそれぞれの金箔表面の凹凸形状が高さを 1 にし、中央を 0 に左右を揃えて示されている。したがって、このような図は凹凸形状の絶対的な関係を表しているのではなく、相対的な関係を表していることに注意が必要である。図より、縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔の順に図 3-4 とは逆に広がっていることが分かる。縦軸を 100 倍に引き延ばしてあるために、円弧の場合も尖った形をしている。「縁付箔はツヤがなく、白っぽい。上品な感じがある。断切箔はツヤがありすぎて落ち着かない感じがする」と言われている金箔に対する感じは金箔からの反射光の角度分布や表面の凹凸形状から推測される。反射光が広がっていることは、目を見た場合には逆に広い範囲からの光が入ってそれが反射して見えていることになるからである。

図 3-7 から 3-10 は 450 倍に拡大した表面の画像である。縁付箔 1 号色の表面の凹凸の皴模様は細かく沢山あるように見える。断切箔、中国箔、ドイツ箔の順に疎らになっているように見える。ドイツ箔では皴は比較的丸い形をしている。

図 3-11 から 3-13 には縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔 (23 カラット)、三浦箔の 4 号色に対して、1 号色と同様な図が載せてある。1 号色と同様な傾向を示していることが分かる。

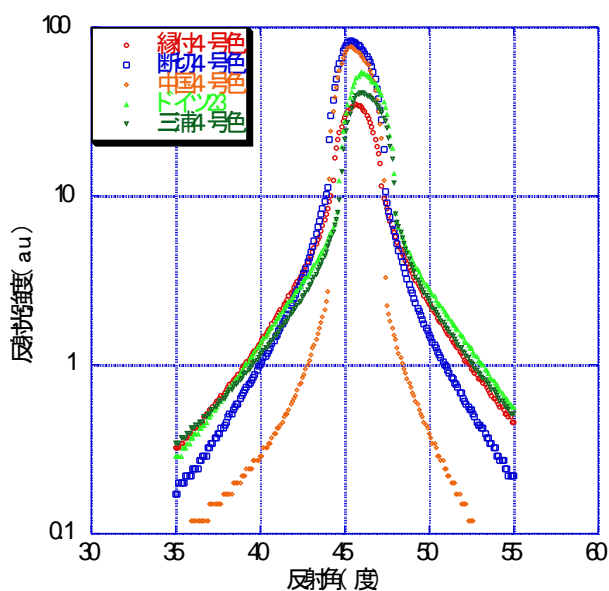


図 3-11 各種 4 号色反射光強度の角度分布

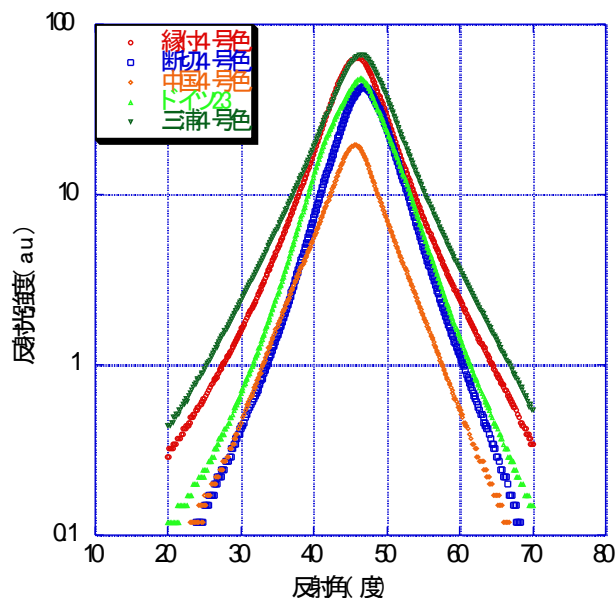


図 3-12 金箔を 2 度傾けた時の反射光強度の角度分布

図 3-14 から 3-18 には各種 4 号色の 450 倍の表面画像が示してある。表面上の凹凸皴模様は三浦箔が最も細かく、縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔の順で少なくなっていくように見える。また、その形も細長いものから丸いものになっているようにも見える。ドイツ箔では 2 重になっているものが多い。こうした凹凸皴模様が金箔のツヤに関係していると思われる。



図 3-13 計算された各種 4 号色の凹凸形状

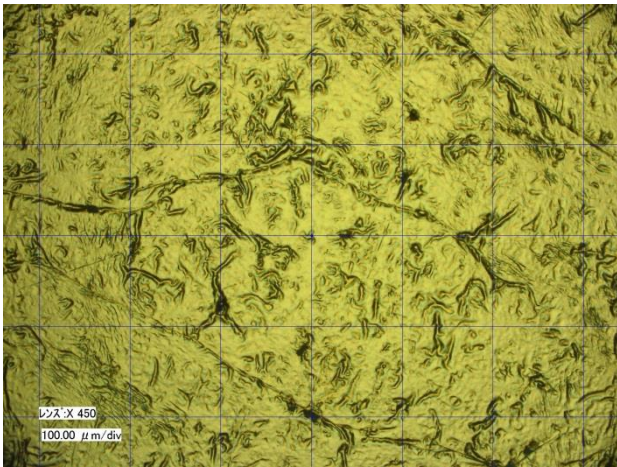


図 3-14 三浦箱 4 号色

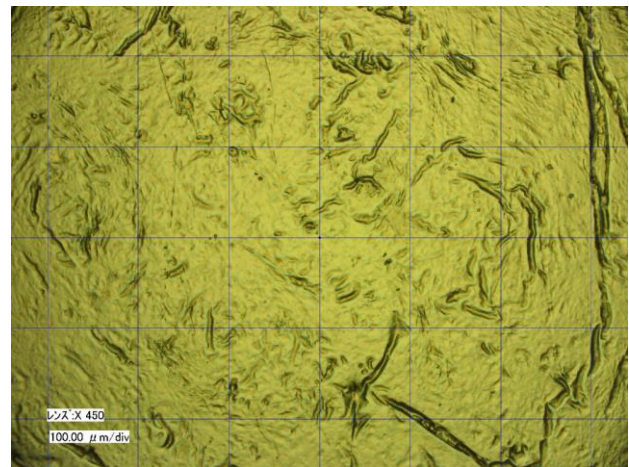


図 3-15 縁付箱 4 号色

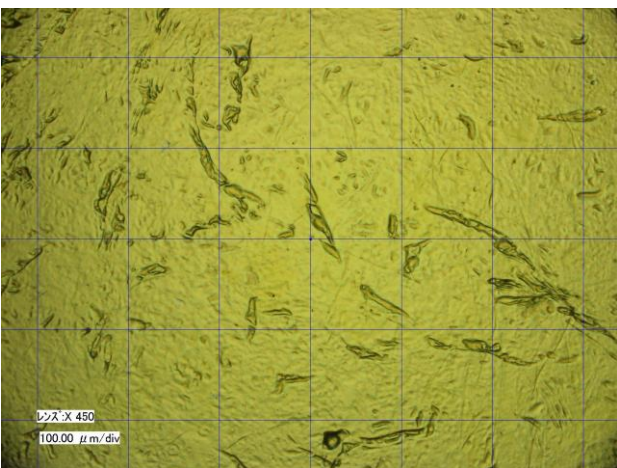


図 3-16 断切箱 4 号色

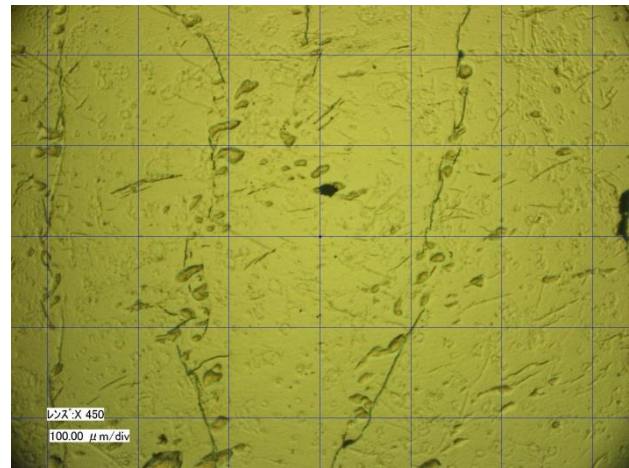


図 3-17 中国箱 4 号色

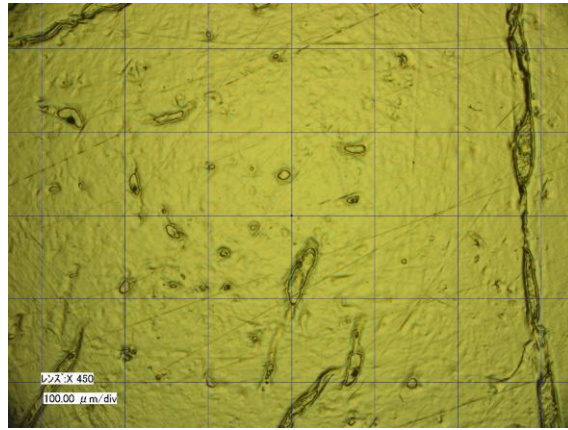


図 3-18 ドイツ箔 23 カラット

凹凸の皺模様は凹んでいるようにも見えるが、膨らんでいるのかもしれない。このような凹凸模様の原因ははっきりしないが、穴に関係しているのかもしれない。拡大画像での穴の調査はないが、昨年度の報告書を見ると、平均面積ははっきりした傾向を示していないが、穴の面積比率は三浦箔、縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔の順に大きくなっている。金箔の膜厚が薄く、比較的穴が少ない場合に表面の凹凸皺模様が細長く細くなるために、反射光が広がり、つやが少なく見えるのかもしれない。

3.3 種類の違いによる金箔の反射特性および表面形状

前節で、製法の違いによって金箔表面の凹凸皺模様の幅が縁付、断切、中国箔の順に広がっていく傾向があることが分かったが、同じ製法でも金の割合が減り銀の割合が多くなるにしたがってどのような傾向があるのかを見る。図 3-19、図 3-20 は純金箔と純銀箔の反射光の角度分布、表面の凹凸形状、図 3-21、図 3-22 は表面の拡大画像である。純金箔の方が純銀箔よりも凹凸形状が広がっているが、銀箔の方が模様は大きい、それに比して間隔が狭いからである。

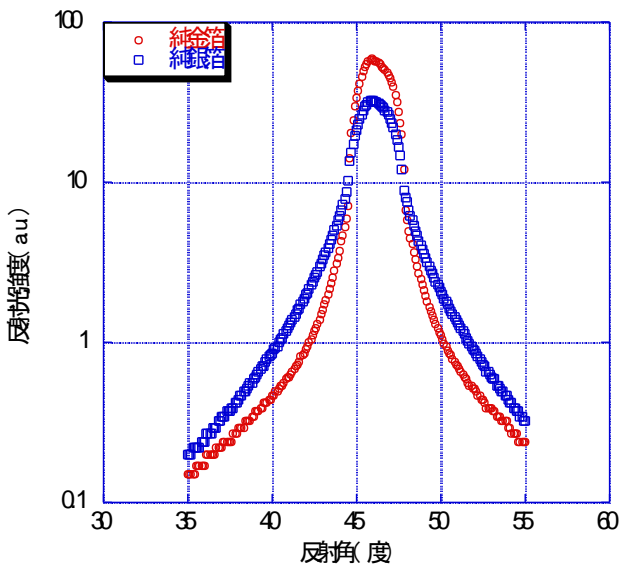


図 3-19 純金純銀の反射光の角度分布

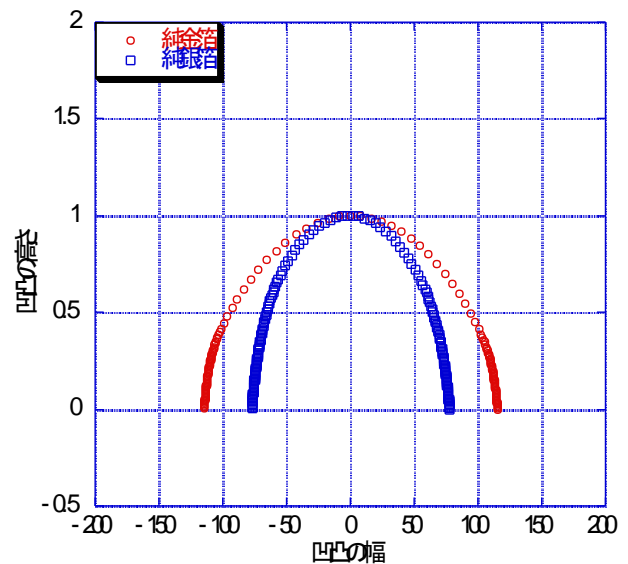


図 3-20 純金純銀の凹凸形状

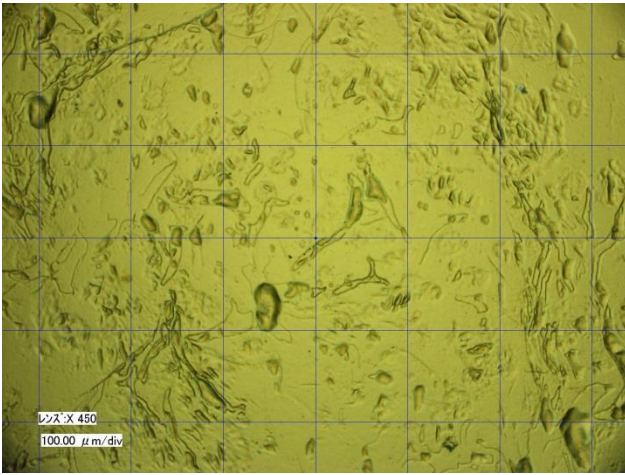


図 3-21 純金箔

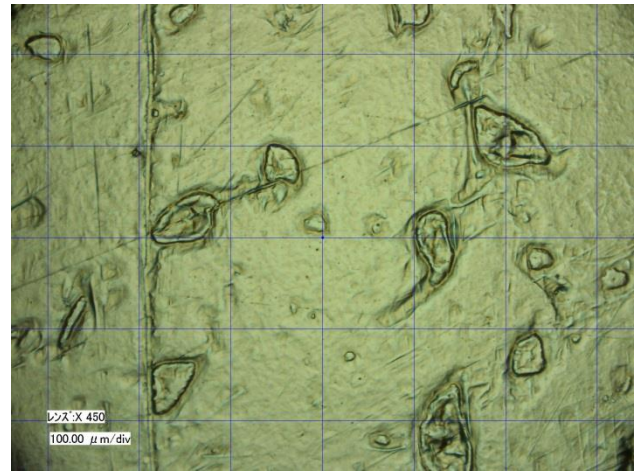


図 3-22 純銀箔

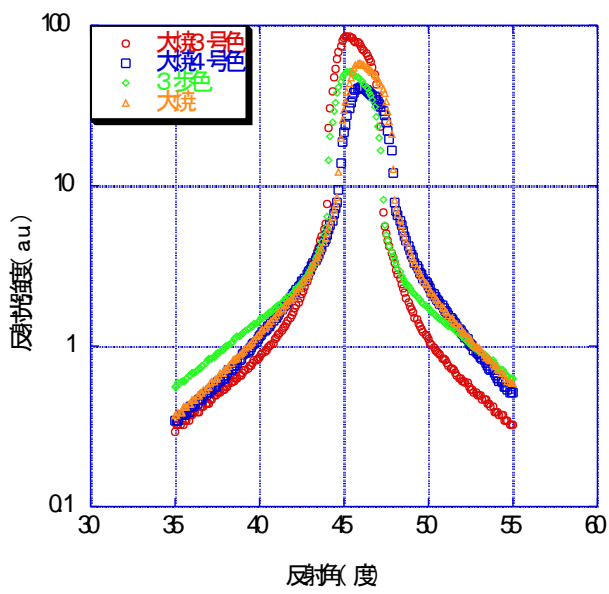


図 3-23 三浦箔の反射光の角度分布

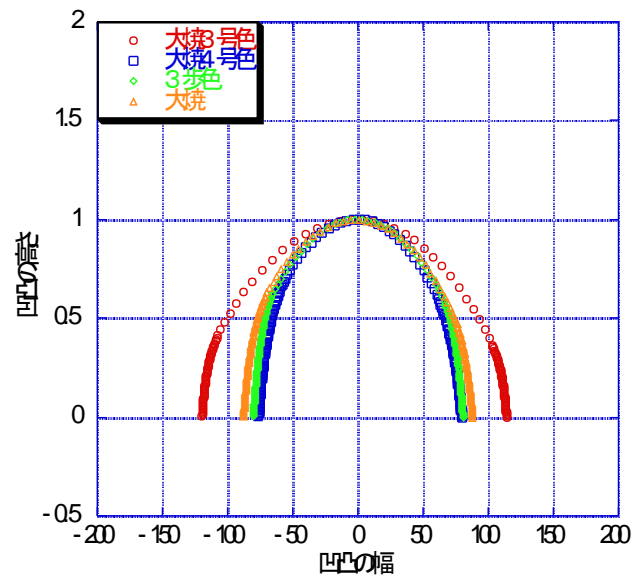


図 3-24 三浦箔の凹凸形状

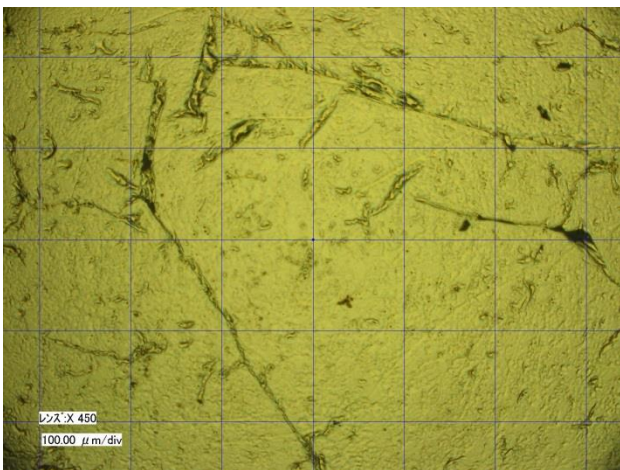


図 3-25 大焼 3号色

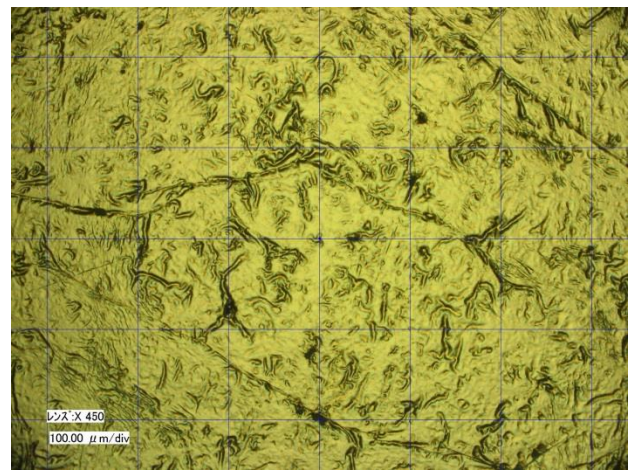


図 3-26 大焼 4号色

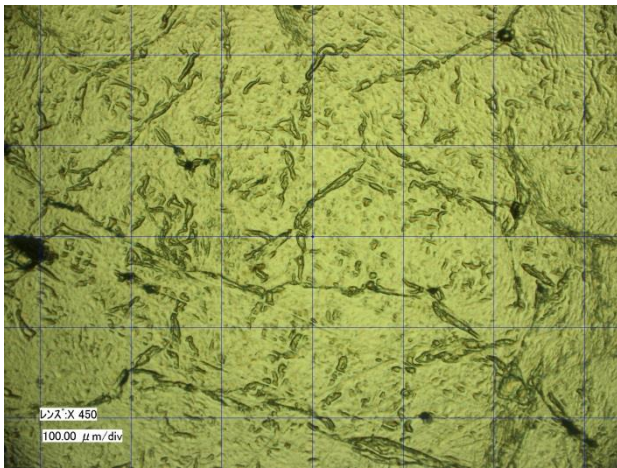


図 3-27 大焼 3 歩色

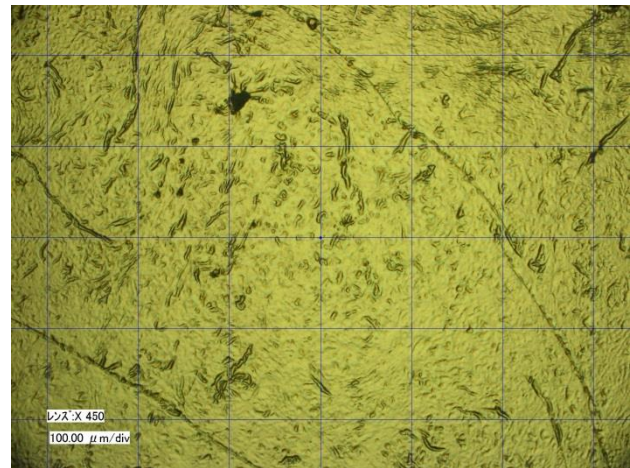


図 3-28 大焼

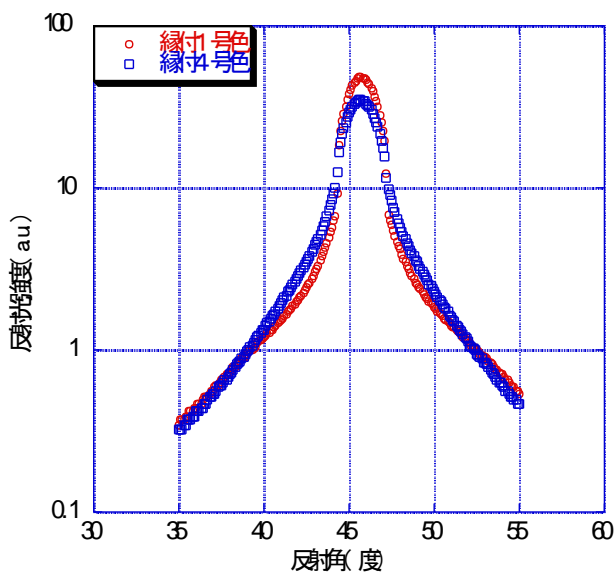


図 3-29 縁付箱の反射光の角度分布

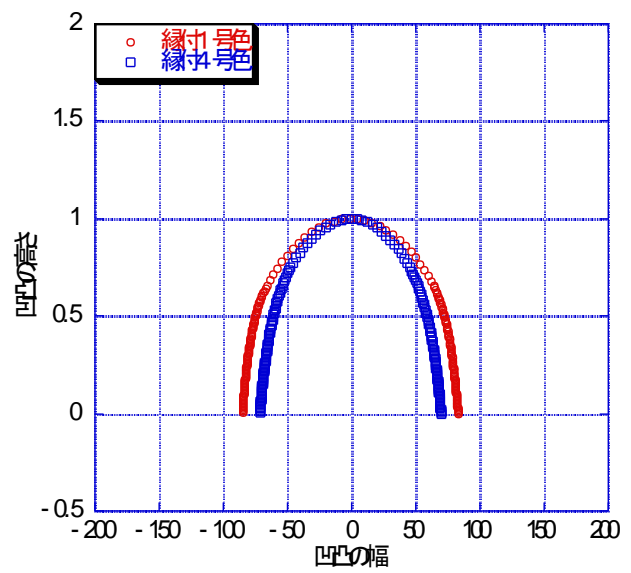


図 3-30 縁付箱の凹凸形状

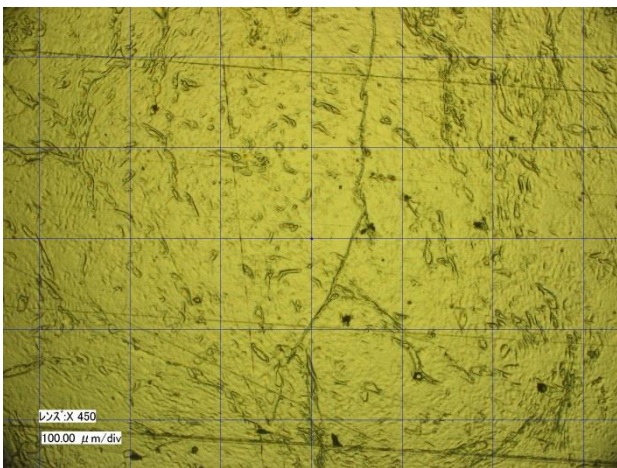


図 3-31 縁付 1 号色

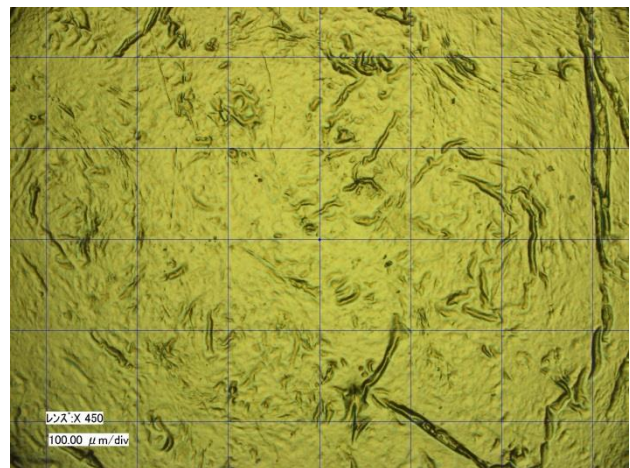


図 3-32 縁付 4 号色

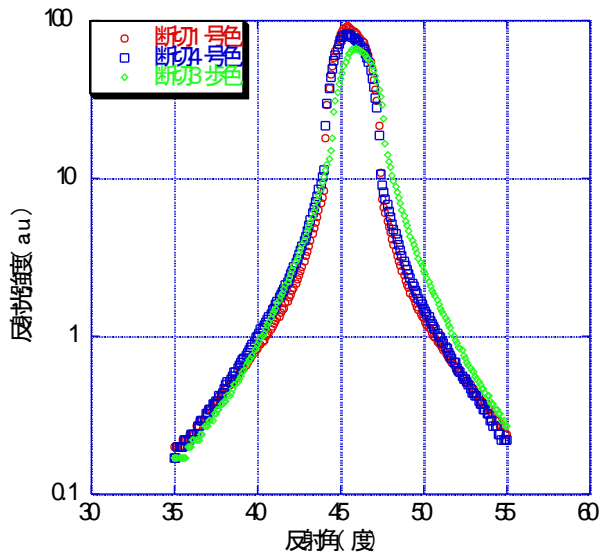


図 3-33 断切箔の反射光の角度分布

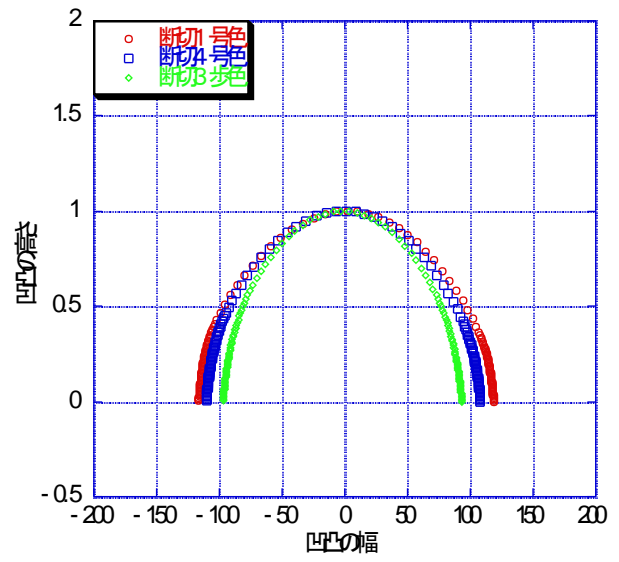


図 3-34 断切箔の凹凸形状

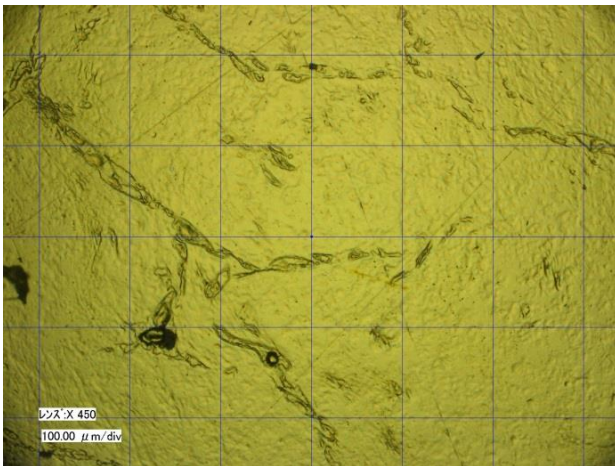


図 3-35 断切 1 号色

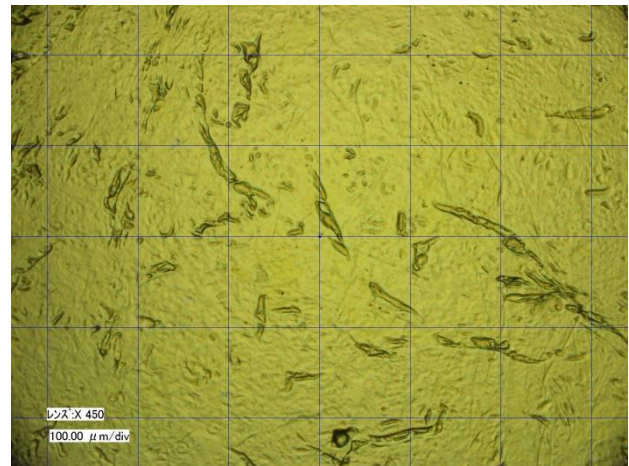


図 3-36 断切 4 号色

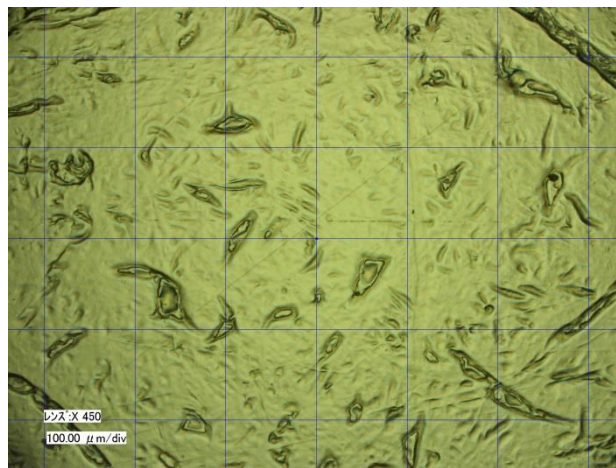


図 3-37 断切 3 号色

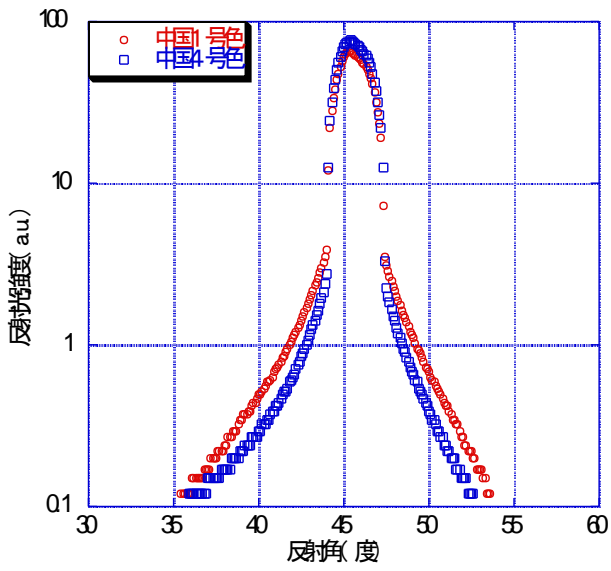


図 3-38 中国箱の反射光の角度分布

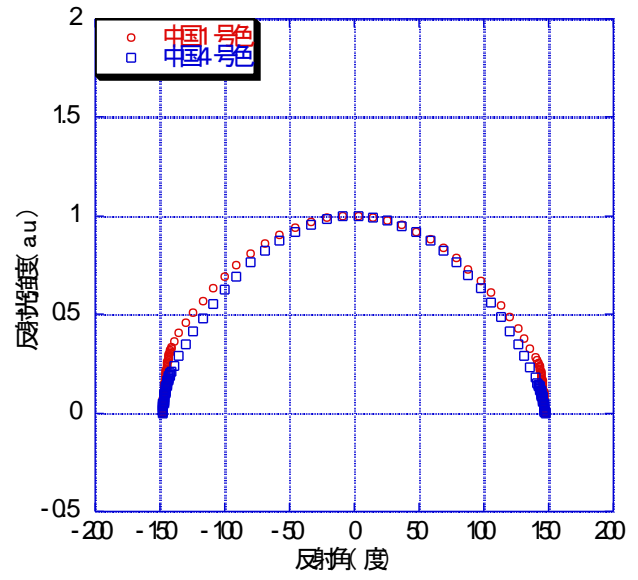


図 3-39 中国箱の凹凸形状

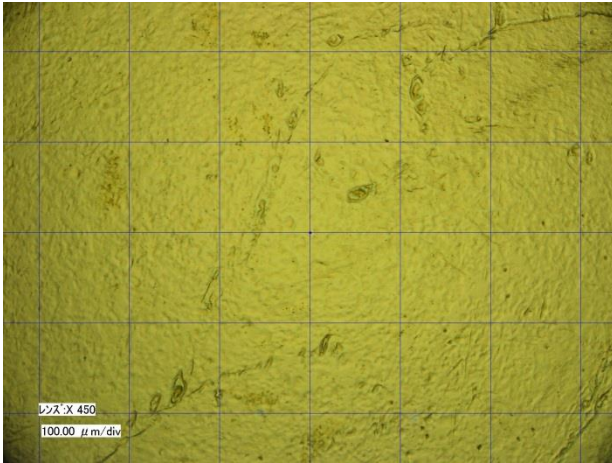


図 3-40 中国 1 号色

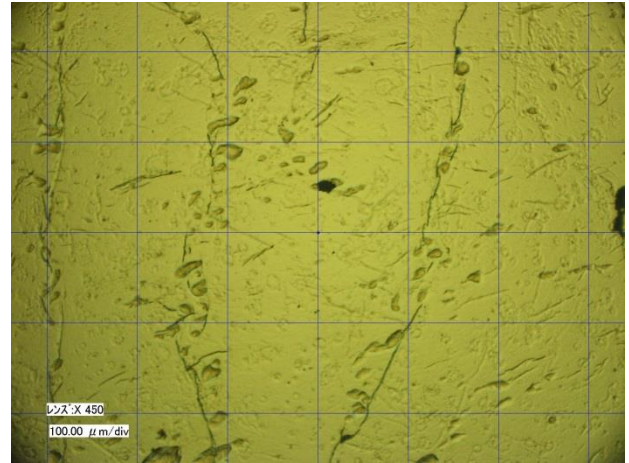


図 3-41 中国 4 号色

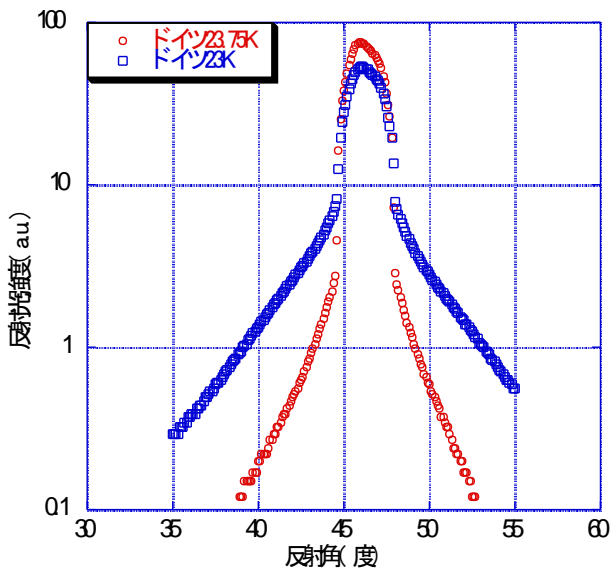


図 3-42 ドイツ箱の反射光の角度分布

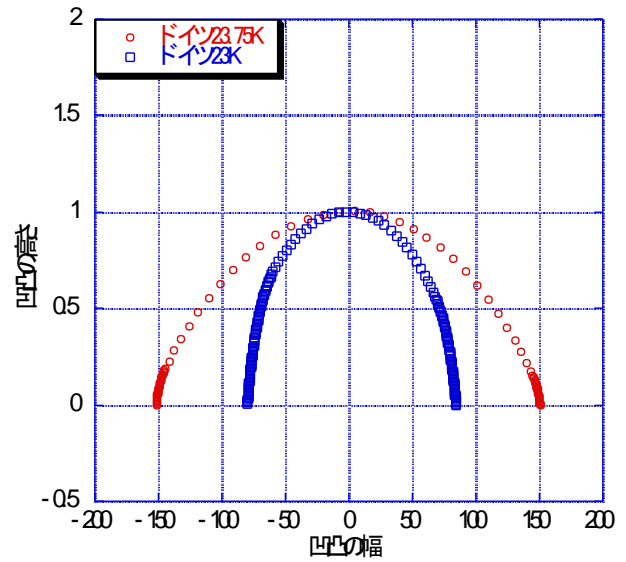


図 3-43 ドイツ箱の凹凸形状

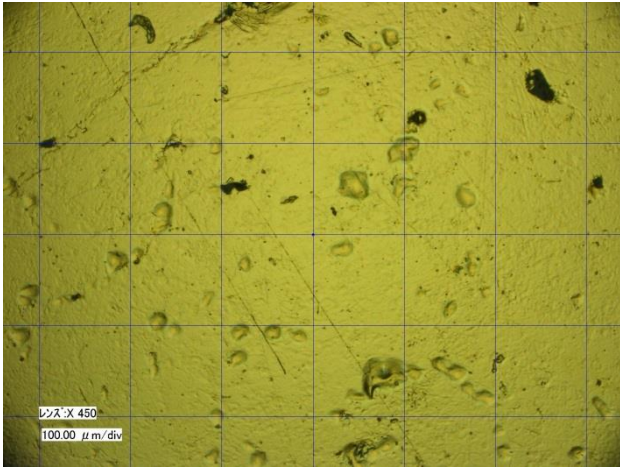


図 3-44 ドイツ 23.75 カラット

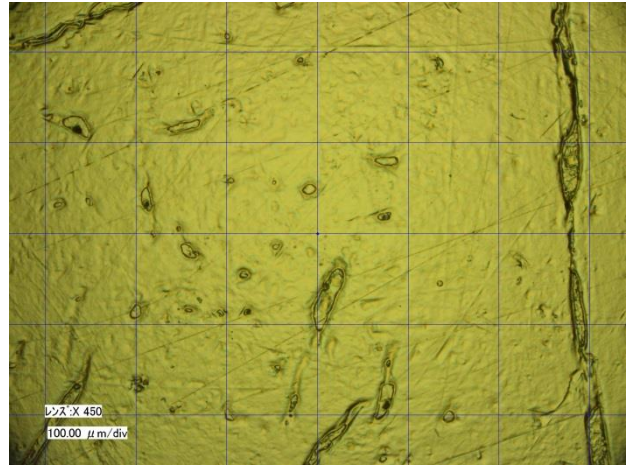


図 3-45 ドイツ 23 カラット

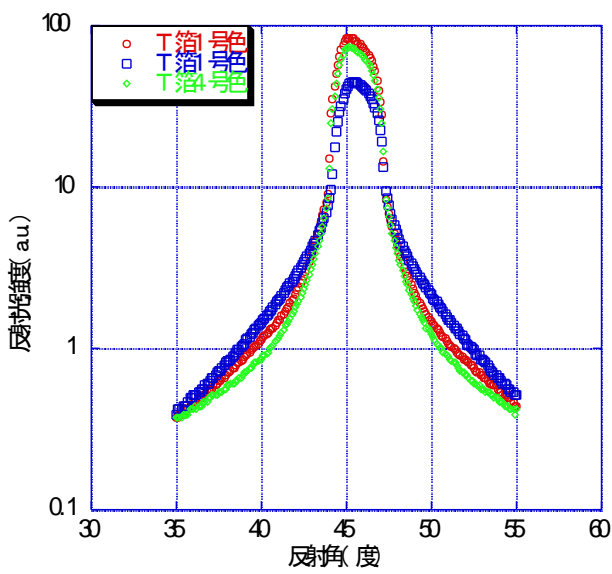


図 3-46 T 箱の反射光の角度分布

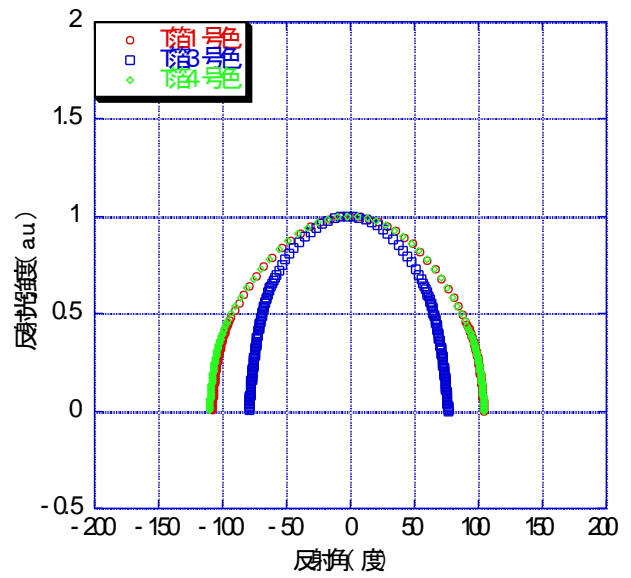


図 3-47 T 箱の凹凸形状

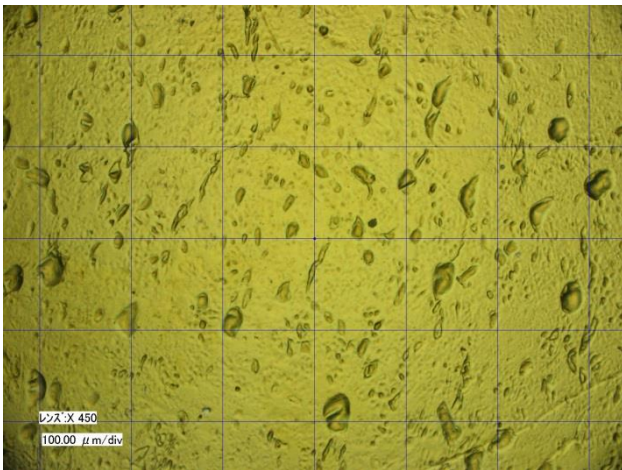


図 3-48 T 箱 1 号色

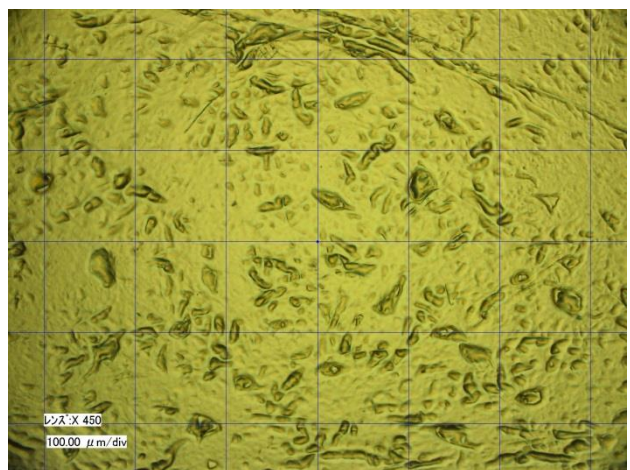


図 3-49 T 箱 3 号色

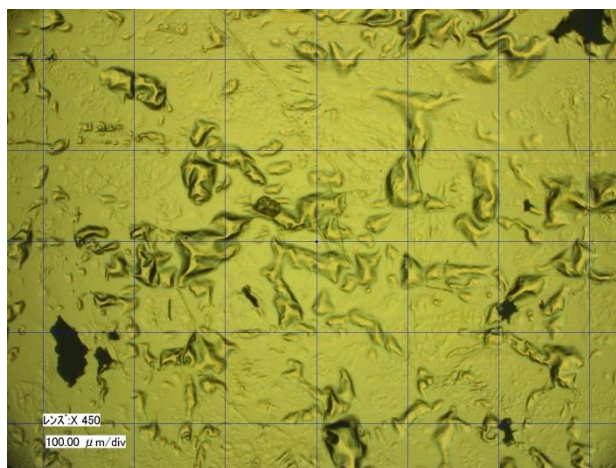


図 3-50 T 箔 4 号色

図 3-23 から図 3-50 は三浦箔、縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔、T 箔の反射光の角度分布、表面の凹凸形状、表面の拡大画像である。例外もあるが、金の割合が少なくなるにしたがって、表面の凹凸形状の幅は狭まっていき、細く細かい模様から大きく丸い模様になっていく傾向があるように見える。この傾向はやわらかすぎる純金から銀が入るにしたがって少し固く延ばし易くなるといわれていることと関係があるように思える。

以上の結果は実験用のガラス上に同一の貼り職人に同じ方法で貼ってもらったものを試料として用い、測定したものの結果である。図 3-51 から図 3-52 は縁付、断切の 3 号色のものであるが、アクリル板に貼ったものである。静電気のため接着剤が少し多めとなったものである。上に見てきたどの金箔よりも凹凸模様の幅が広い。

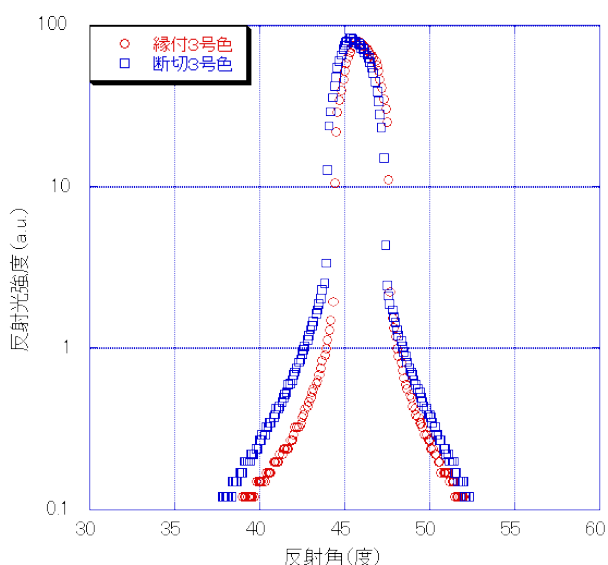


図 3-51 3 号色の反射光の角度分布

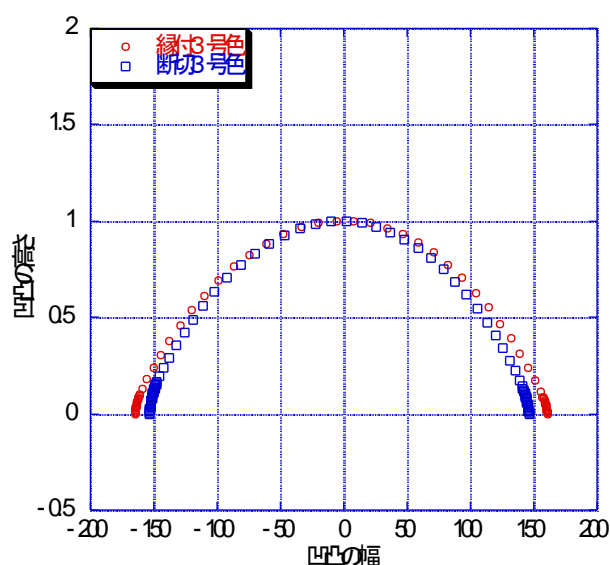


図 3-52 3 号色の凹凸形状

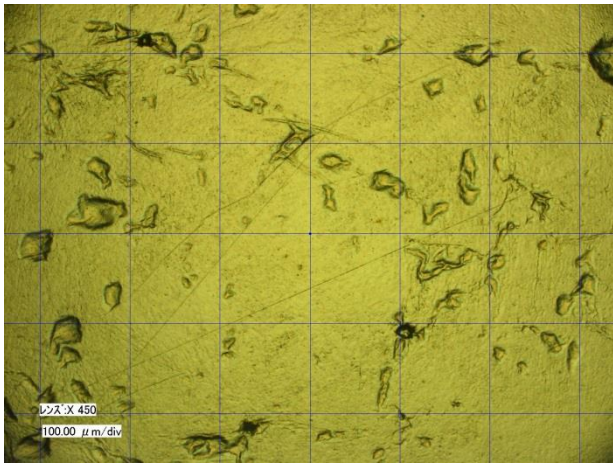


図 3-53 縁付 3号色

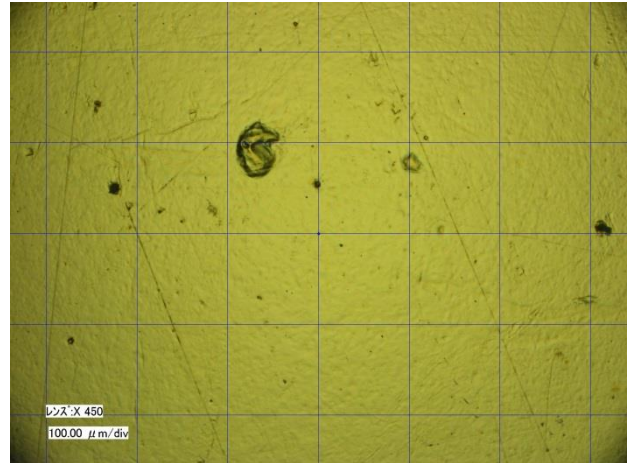


図 3-54 断切 3号色

第 4 章 金箔の力学的特性

4.1 実験装置・実験方法

本実験の実験装置は、万能材料試験機（INSTRON 5965）をベースに、微小荷重型ロードセル（MINEBEA UTA-100GR）やデジタル指示計（TEAC TD-260T）を組み合わせたものを用いた。

図 4-1 に示されているように、型に沿って切り取った金箔試験片を、印刷紙の真ん中を四角にくりぬいた試料保持用紙片に貼り付けた。それを試験機にセットし、引張試験を行った。引張試験は試料保持用紙片の両端を切り取り、速度 $10\mu\text{m}/\text{min}$ で引っ張り、金箔が破断した瞬間の荷重を測定した。試験片のサイズは幅 1cm 、直線部分は 3cm である。

なお、金箔の中央から外側に向けて放射状の模様ができるが、その模様を平行または垂直方向の引張り強さの違いを調べるための試料は、幅 1cm 、長さ約 3.5cm で、曲線部分のない金箔片を、図 4-1 の窓の長さを 2.5cm にしたものを用いた。

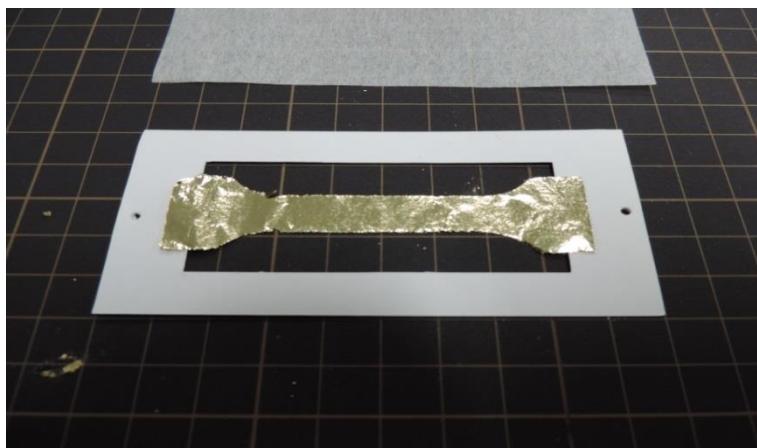


図 4-1 両端を印刷紙に貼り付けた実験試料

4.2 引張試験の結果

引張試験によって測定された各試料の引張強度を図 4-2 に示す。引張強度は破断時の荷重を試料の幅で割った値[g/cm]で示した。これは厚さが試料によって異なりはつきりしないためである。したがって、厚さが厚ければ厚いほど大きな値となることが予想されるが、今回の実験では種類・製法の違いによる明確な傾向は見られなかった。金箔の引張強度については理科年表[2]に 200-250MPa と書かれている。また、Karanjgaokar ら[3]は長さ 1mm、幅 100 μ m、厚さ 850nm の金蒸着膜の引張り強さは温度やひずみ速度によって異なるが、370-550MPa と報告している。これらの値から考えて、断面を 0.1 μ m \times 1cm と仮定すると、20-56g/cm となる。図 4-2 に示されているように、3-6g/cm はこれらの値を大きく下回る。厚さの不定を考えたとしても、これらの値の違いは大きすぎる。この大きな違いの原因ははつきりしない。金箔そのものの特徴なのか、試料作成過程において生じた試料側面の小さな切欠きなのか分からないが、金箔の形状に大きく関係している可能性がある。特に金箔には無数の穴があることは昨年度の報告書でも報告されており、また、膜厚も一様ではなく斑になっている。これらのことが金箔における局所的な応力集中を引き起こし、引張強度が減少したことが考えられる。

なお、今回は種々の要因により、引張強度の測定を各試料に対して 2 回ずつしか行うことができなかった。したがって、試験回数を増やしたり、試験方法を改良するなどの工夫をすれば、試験結果に一定の傾向が見られる可能性はある。

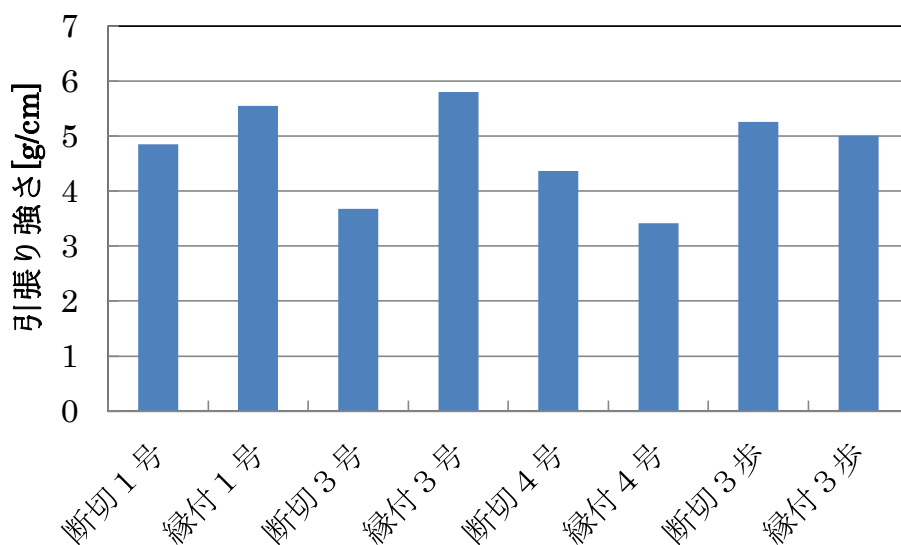


図 4-2 各試料の破断時の引張り強さ

金箔は槌打ちによって引き伸ばされるので、中央から周辺に向かって放射状の模様が生じている。図 4-3 にあるように、この模様と平行方向に引っ張る場合と垂直方向に引っ張る場合とでは強度が違うことが予想される。そのことを試験した結果が断切、縁付の 4 号色について、表 4-1 に示されている。表を見ると明らかに平行方向に引っ張った方が垂直方向に引っ張るのよりも強度が大きいことが分かる。放射状模様は透過画像から分かるように、平行方向では膜厚がおよそ一定であるが、

垂直方向では膜厚の違う領域が交互に並んでいることになる。このような厚さの並び方の違いによって引張り方向によって強度に違いが生じたものと思われる。

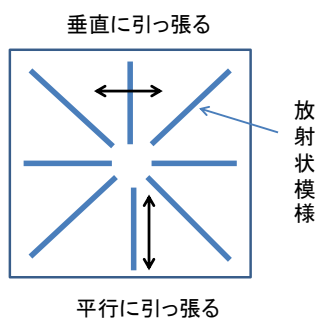


図 4-3 引張試験の方向

表 4-1 放射状模様 に平行方向と垂直方向の引張強度 (g/cm)

試料	断切4号(垂直)	断切4号(平行)	縁付4号(垂直)	縁付4号(平行)
1	3.48	4.62	2.64	3.20
2	4.03	3.75	2.92	3.61
3	4.17	3.09	2.22	3.48
4	3.34	4.87	3.75	4.03
5	3.34	3.20	2.32	3.20
6	3.67	3.94	2.72	3.50
7	3.67	3.91	2.77	3.50
平均	3.67	3.91	2.76	3.50
標準偏差	0.326	0.662	0.502	0.283

第5章 まとめ

種々の金箔の蛍光 X 線分析法による合金組成、膜厚の調査、反射光の角度分布による金箔表面の形状および力学的特性の調査を行ってきた。以下に、その結果をまとめる。

1. 金箔の金、銀、銅の割合は石川県箔商工業協同組合で規定した合金の割合に近かった。中国箔の1号色、4号色は国内箔の1号色、4号色に相当する。ドイツ箔はカラットで示された割合で金が入っている。全ての金箔に鉄が僅かばかり含まれている。
2. 金の割合の比較的少ないほうが薄くできる。
3. 平均膜厚については、三浦箔、中国箔、現代国内箔、白金箔、ドイツ箔、パラジウム箔の順に厚い。手打ちのミャンマー箔の平均膜厚は $0.186\mu\text{m}$ である。
4. 金箔表面の凹凸の高さに対する幅の大きさは縁付箔、断切箔、中国箔、ドイツ箔の順に広がっている。また、金の割合が多いほうが大きくなっている。
5. 金箔の引張強度は金について報告されているものの10分の1程度である。引張強度に異方性があり、中央からの放射状模様 に平行な方向の引張強度はそれと直角方向の引張強度よりも大きい。

謝辞

本報告書作成に当たっては、石川県箔商工業協同組合および金沢箔技術振興研究所の皆様のご協力、ご助言を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。また、試料の合金組成や反射光の測定等に当たって本学修士2年金森賢悟氏および4年生の尾上拓弥氏の協力を得ました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 金沢金箔伝統技術調査報告 金沢金箔伝統技術保存会 平成22年3月
- [2] 理科年表(平成23年 物31)
- [3] N.J.Karanjgaokar, C.-S.Oh, J.Lamblos, I.Chasiotis, Acta Materialia
60(2011)5352-5361