

素粒子実験向け微細電極フォイル

プリント回路事業部開発部 荒井大輔¹・岩村昌浩²

Fine-Electrode Foil for Particle Physics Experiment

D. Arai, and M. Iwamura

近年のスマートフォンに代表されるように各種電子機器の小型化、高機能化が進んでいる。これに伴い、その配線材であるフレキシブルプリント配線板（FPC）においても、回路の微細化や高密度化など技術的な進歩を遂げてきた。我々はこれまで培われてきたFPC製造技術を応用し、新たな製品の開発にも取り組んでいる。本稿では、その一例として素粒子実験用測定器に使用される微細電極フォイルの開発を紹介する。

Recently, various electronic devices have decreased in size and increased in functionality, as typified by smart phones. In step with this, flexible printed circuit (FPC) boards, which are used as a wiring material in these devices, have been making progress in the production techniques, especially, to pattern finer and denser traces. Using Fujikura's proprietary FPC production techniques, we are working on new products. This report describes a fine-electrode foil, which is used in a detector for a particle physics experiment, as an example of these newly developed products.

1. ま え が き

近年スマートフォンに代表されるように、様々な電子機器の小型化、薄型化が進められるとともに、多くの機能が一つの機器に集約されるなど、高機能化が進められている。薄く、柔軟性を持つフレキシブルプリント配線板（FPC：Flexible printed circuit）は、これらの電子機器を構成する必要不可欠な部品であり、我々は、その発展に伴って、回路の微細化、高密度化に代表されるような、様々な技術的開発要求に応えてきている^{1),2)}。

我々は、このような技術開発の中で培われてきた、微細回路形成の技術を応用し、新たな製品の開発に取り組んでいる。この開発の一例として、素粒子実験用測定器に使用される微細電極フォイルがある。

現在、次世代の素粒子実験として、ILC（国際リニアコライダー：International Linear Collider）計画が進められており、世界的な注目が集まっている。これは、全長約 30 km の線形加速器により、電子と陽電子を加速、衝突させることで発生する、様々な粒子を観測する実験である。これらの発生粒子を非常に高精度に観測できる測定器の開発が、国際協力のもと進められている^{3),4)}。ここで、この測定器において、微細電極フォイルの開発が重要な課題の一つとなっている⁵⁾。

我々はFPC製造技術を応用することで、この微細電極フォイルの製造に世界で初めて成功した。以下に、開発結果について報告する。

2. 微細電極フォイル

測定器に使用される微細電極フォイルは、絶縁体の両面に銅箔を貼り付けたCCL（銅貼積層板）に対し、微細な貫通孔を高密度に配置させたものである⁶⁾。具体的に要求される構造は、表 1 に示すように、絶縁体厚 25 μm 以下のCCLに、孔径約 300 μm 以下の貫通孔を、170 mm \times 220 mm の範囲に開口率 80 % 以上となるように配置させるものである。

これまでに、他社において、上記電極フォイルの製造が検討されているが、要求された構造を実現することはできていない。

FPCの製造においてCCLに貫通孔を形成することは、

表1 微細電極フォイルの要求仕様
Table 1. Required spec of fine electrode foil.

要求項目	要求仕様	他社実績
孔径	約 300 μm 以下	90 μm
絶縁体厚	25 μm 以下	25 μm
孔間隔	35 μm 以下	50 μm
開口率	80 % 以上	37 %
有効面積	170 mm \times 220 mm	100 mm \times 100 mm

1 開発部 新商品開発グループ

2 開発部 新商品開発グループ グループ長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
CCL	Copper Clad Laminate	絶縁材料上に銅箔を張り合わせたもの。FPCを製造するための主要な材料である。絶縁材料として、主にポリイミドフィルムが用いられる。
BVH	Blind Via Hole	主に多層プリント配線板に使用され、外層導体パターンと内層導体パターン間を接続するために形成される非貫通孔である。非貫通孔であるため、プリント配線板の片側だけに開口し、反対面まで貫通しない。
フォトリソグラフィ	Photolithography	FPCの製造においては、CCL上に貼り付けた感光性のフィルムに対して、パターン状に露光することで、露光されていない部分とされている部分で回路パターンを形成する技術。この技術を使用し、銅上に回路パターンを形成している。

一般的に確立された技術である。しかしながら、孔径約 300 μm 以下の貫通孔で、開口率 80 % 以上とするためには、貫通孔を非常に近接させて配置しなければならない。加えて、これらの貫通孔を、170 mm \times 220 mm の範囲に均一に配置しなければならない。

これらの要求は、現状のFPC製造技術において、非常に難易度が高い。そのため、一般的なFPCにおける貫通孔形成方法での製造検討に加え、新たな貫通孔の形成方法を考案し、この微細電極フォイルの製作に取り組んだ。

3. 微細電極フォイルの製造検討

3.1 レーザ孔あけ方式

波長 355 nm のUV-YAGレーザを、CCLに照射することで、銅と絶縁体（以下、ポリイミドフィルム）を同時に加工し、貫通孔を形成する方法がある。この方法を用いて、微細電極フォイルの製造を検討した。

レーザの加工面におけるビーム径は、20～30 μm 程度であるため、図 1 に示すように、円形状にビームを動かし、孔径 300 μm の貫通孔の加工を実施した。このとき、貫通孔は丸穴を 60 度の千鳥状に配置した。

上記方法で製作した微細電極フォイルを、図 2 に示す。このとき、ポリイミドフィルム厚 25 μm に対し、貫通孔の間隔は、レーザ照射面側をF面、反対面側をB面として、F面 14 μm 、B面 28 μm であり、孔径は 302 μm

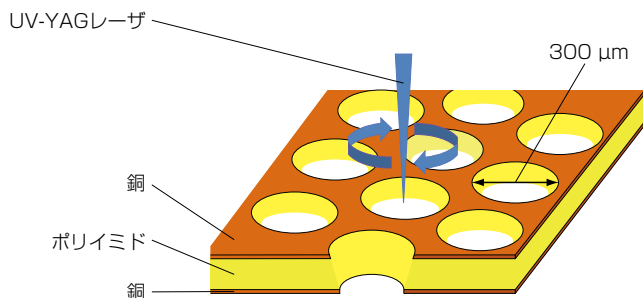


図1 レーザ加工による製造方法イメージ
Fig. 1. Schematic view of laser drilling.

であった。開口率は要求値には及ばず約 75 % であった。また、加工した範囲は 10 mm \times 10 mm である。

このとき、レーザにより加工された貫通孔は、テーパ形状となるため、開口率は孔径とB面の貫通孔間隔から算出している。

開口率を 80 % 以上とするためには、貫通孔の間隔をさらに狭める必要があるが、F面の貫通孔間隔が 10 μm 以下となると、銅がポリイミドフィルムから剥がれてしまうことが確認された。前述した方法によって、80 % 以上の開口率を実現することは難しい。

一方で丸孔の千鳥配置ではなく、六角形の孔を 60 度の千鳥状（以下、ハニカム形状）に配置すれば、上記の貫通孔間隔においても、計算上では開口率 85 % を達成できる。しかしながら、使用したUV-YAGレーザは、円形状の貫通孔加工を目的として最適化されたFPC製造用の装置であるため、ハニカム形状に貫通孔を一孔一孔加工していくことは、加工精度、加工時間の観点から考えて現実的ではない。

以上の理由から、レーザ孔あけ方式を、微細電極フォイルの製造方法として適応することは、難しいと判断した。

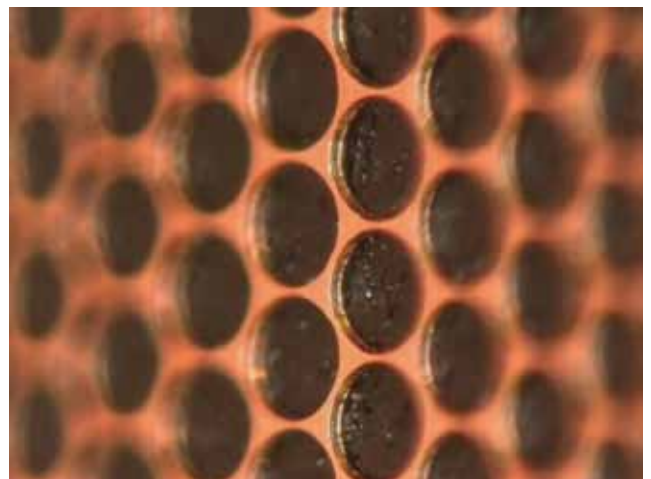


図2 レーザ孔あけ方式で製作した微細電極フォイル
Fig. 2. Fine electrode foil after laser drilling.

3. 2 フトリソグラフィ方式

FPC 製造における層間接続の方法として、図 3 に示すような、非貫通孔のBVH (Blind Via Hole) がある。

これは、一方面の銅をフトリソグラフィとエッチングによって孔形状に加工し、加工した銅をマスクとして、ポリイミドフィルムをレーザ等で除去する方法である。この方法では、フトリソグラフィとエッチングにより孔を形成するため、孔形状を自由に設計でき、ハニカム形状の孔の形成も可能である。

しかしながら、BVHは非貫通孔であるため、貫通孔を形成するためには、BVHの孔底部の銅を除去する方法を新たに考える必要がある。

3. 2. 1 ニッケルめっきを用いた方法

一方面（以下、F面）の銅に形成したハニカム形状回路に、ニッケルめっきを施し、これを銅エッチング時のマスクとして利用することで、BVHの孔底部の銅を除去する方法を考えた。

図 4 に示すように、F面にハニカム形状の回路を形成し、回路にニッケルめっきを施す。その回路をマスクとして、UV-YAGレーザによってポリイミドを除去する。その後、対向面（以下、B面）に、エッチング保護フィルムを貼り、F面から銅エッチング液によって、BVHの孔底部面の銅のみをエッチングする。

ここで、F面の回路はニッケルめっきにより保護されるため、銅エッチング液ではエッチングされない。そのため、孔底部面の銅のみが選択的にエッチングされ、貫通孔を形成することができる。

上記方法で製作した微細電極フォイルの外観写真を図

5 に示す。このとき、孔径は 295 μm 、孔間隔は、F面 25 μm 、B面 36 μm 、ポリイミドフィルム厚は 125 μm である。ポリイミドフィルム厚は、測定器の性能の観点から、薄いほど良く、25 μm から 12.5 μm としている。ここで、開口率は約 80 % であり、加工範囲は 30 mm \times 30 mm である。

F面電極がポリイミドフィルムから剥がれている箇所が存在しており、図 5 のF面電極に見られる黒色部に、電極の剥がれが生じている。

電極フォイルの断面写真を図 6 に示す。ニッケルめっき下の銅がエッチングされ、空隙が生じている。

これは孔底部面の銅エッチングの際、ニッケルめっき下に銅エッチング液が入り込み、保護されるはずの銅を溶解させたためと推測される。このような空隙が存在する場合、電極とポリイミドフィルムとの密着度が著しく低下し、容易に剥がれてしまう。よって、ニッケルめっきを用いた貫通孔形成方法での、微細電極フォイルの製造は難しいと判断した。

3. 2. 2 エッチング速度を利用する方法

次に、両面で異なる銅厚を用い、エッチング速度を利用することで、ニッケルめっきを使用せずに、貫通孔を形成する方法を検討した。この方法では、両面に異なる銅厚（厚い側：F面、薄い側：B面）を持つCCLを使用する。

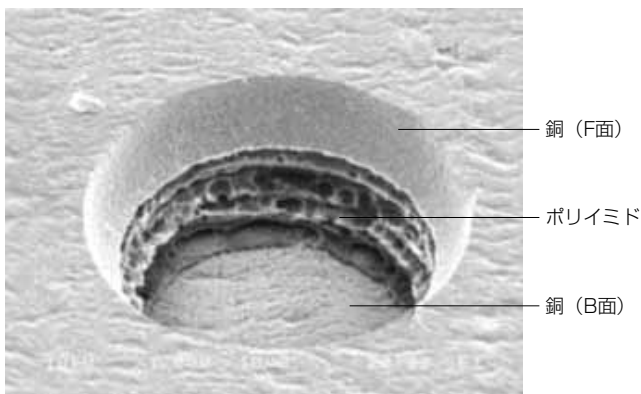


図3 BVHの外観写真
Fig. 3. External appearance of BVH.

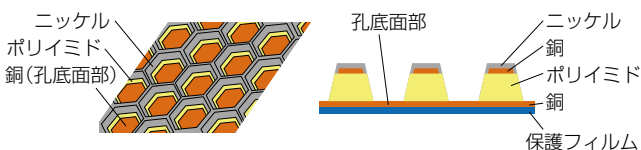


図4 電極の形成過程 (左：F面外観，右：断面)
Fig. 4. Schematic external and cross-section views of electrode fabricated by nickel plating.



図5 製作した微細電極フォイル (左：F面，右：B面)
Fig. 5. Micrograph of fine electrode foil fabricated by nickel plating.

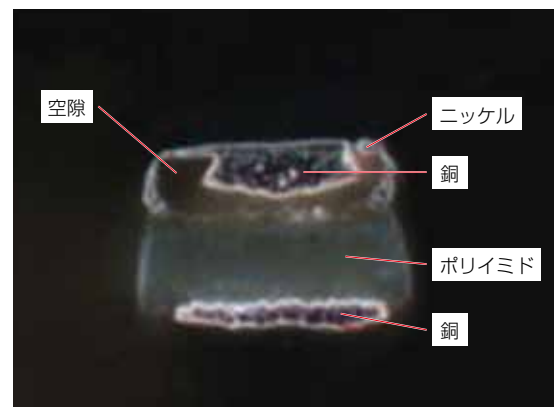


図6 電極フォイルの断面画像
Fig. 6. Cross-section view of fine electrode foil fabricated by nickel plating.

F面にハニカム形状の回路を形成し、その回路をマスクとして、UV-YAGレーザーによりポリイミドフィルムを除去する。次に、両側から銅エッチング液によりエッチングすることで、孔底部の銅を除去し貫通孔を形成する。

このとき、孔底部は、図7に示すように、両側から銅エッチング液があたること、エッチング速度が他の部分と比較し早くなる。そのため、両側の銅電極部を残したまま、孔底部の銅を溶解除去することが可能となる。また同時に、F面銅電極部については、銅厚を厚く設計することで、適切な形状の銅電極が形成されるように設計している。

上記方法で製造した微細電極フォイルを図8に示す。このとき、孔径は304 μm、貫通孔の間隔は、F面27 μm、B面31 μm、ポリイミド厚は12.5 μm、加工範囲は100 mm×100 mmである。また、「3.2.1 ニッケルめっきを用いた方法」で確認された、銅電極のポリイミドフィルムからの剥離は確認されなかった。このとき、開口率は82%であり、要求される80%を達成することができている。

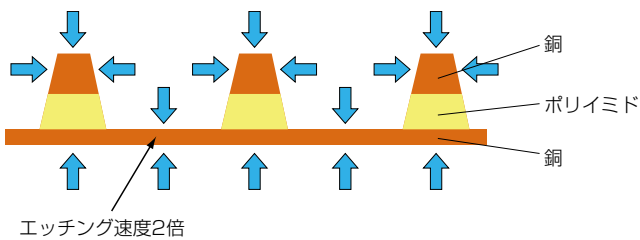


図7 貫通孔形成イメージ

Fig. 7. Schematic view of electrode being etched to form honeycomb structure using difference in etching speed.

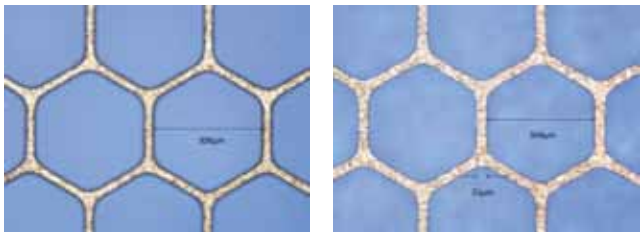


図8 製作した微細電極フォイル (左: F面, 右: B面)

Fig. 8. Micrographs of fine electrode foil fabricated using difference in etching speed.

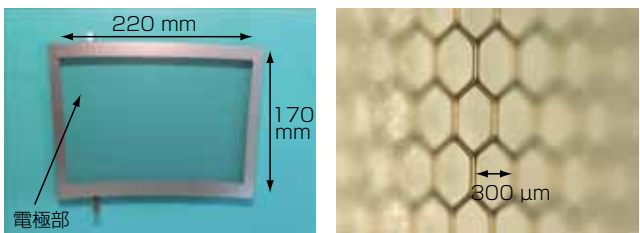


図9 製作した170 mm×220 mmサイズの

微細電極フォイル (左: 外観, 右: 電極部拡大)

Fig. 9. 170 mm×220 mm size fine electrode foil.

4. 製造限界の検討

次に、エッチング速度を利用する方法を用いた微細電極フォイルの製造限界について検討した。

4.1 170 mm×220 mmサイズの製造検討

微細電極フォイルに要求されるサイズは、表1に示したように、170 mm×220 mmであり、一般的なFPCサイズと比較して、非常に大きいものとなっている。

このような非常に大きな面積を加工する場合の問題は、フォトリソグラフィとエッチングにより、F面に形成するハニカム形状回路の断線である。回路が断線している場合、レーザーによるポリイミドフィルム除去の際、回路をマスクとして使用しているため、断線部にマスクが存在しない状態となり、該当部のポリイミドフィルムが消失してしまう。我々は、製造環境の見直しと、使用材料の最適化により、要求されている170 mm×220 mmサイズの電極フォイルにおいて、一本の回路断線もなく製造することに成功している。

製作した測定器試験用の170 mm×220 mmサイズの微細電極フォイルを図9に示す。

また、上記検討の結果から、現状における加工範囲の限界は、240 mm×300 mm程度と考えている。

4.2 最小孔間隔

微細電極フォイルを測定器で使用する際の性能の観点から、開口率は高いほど良い。そこで、開口率を向上させるため、どの程度まで貫通孔の間隔を狭くできるかを検討した。

貫通孔の間隔、すなわち、電極幅を狭めていくと、銅電極とポリイミドフィルムとの密着度が低下するため、剥離してしまう。

現状において、F面の電極幅が約7 μm以下から銅電極の剥離が確認できている。そのため、図10に示すように、B面の電極幅で考えれば、最小の電極幅は15 μm程度であると考えている。

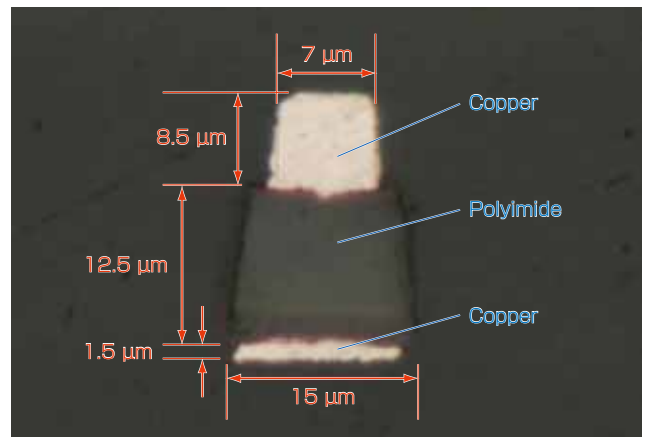


図10 電極フォイルの断面画像

Fig. 10. Cross-section view of fine electrode foil.

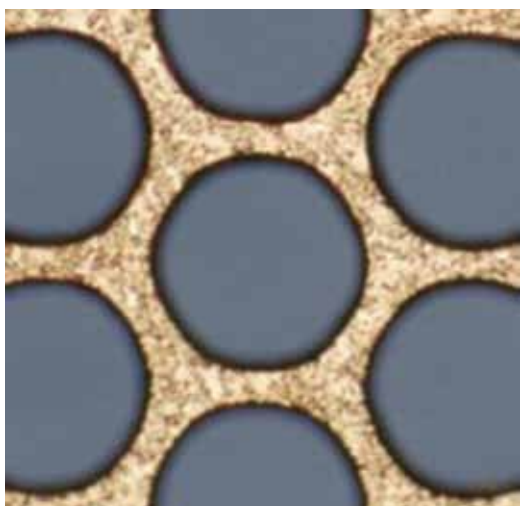


図11 孔径100 μm 、貫通孔間隔20 μm の場合の微細電極
フォイル

Fig. 11. Micrograph of fine electrode foil with 100 μm
diameter holes and 20 μm hole-to-hole pitch.

4. 3 最小孔径

更に、貫通孔の孔径についても、小さいほど測定器の性能が向上する。図11に孔径100 μm 、貫通孔の間隔20 μm の試作品を示す。

100 μm 以下の小さな孔径においては、フォトリソグラフィとエッチングによる、ハニカム形状回路の形成が難しくなり、円形状に近づいてしまう。この場合、「3.1 レーザ孔あけ方式」の項と同様に、開口率が低くなってしまふ。そのため、現状における最小の孔径は150 μm 程度と考えている。

5. 測定器における性能試験結果

各種製造方法、製造限界についての検討結果をもとに、表2に示すような微細電極フォイルの製作を実施した。

製作した微細電極フォイルは、粒子観測用測定器の試作機に搭載され、性能試験が実施されている⁷⁾。ここで、

表2 製作した微細電極フォイルと要求仕様
Table 2. Spec of fine electrode foil.

要求項目	要求仕様	当社製
孔径	約 300 μm 以下	304 μm
絶縁体厚	25 μm 以下	12.5 μm
孔間隔	35 μm 以下	31 μm
開口率	80 %以上	82 %
有効面積	170 mm \times 220 mm	170 mm \times 220 mm

搭載されたサンプルは、正常に動作し、期待通りの性能を発揮していることが確認された。よって、考案した製造方法によって、要求される微細電極フォイルの製造に成功したと考えている。

6. むすび

FPC製造技術を応用することで、素粒子実験用測定器に使用される、開口率80%を越える微細電極フォイルの製造に成功した。

今後も様々な分野への、FPC製造技術の応用を模索していく。

参 考 文 献

- 1) 池田ほか：「微細回路形成技術」, フジクラ技報, 第115号, pp38-41
- 2) 小林：「先進フレキシブルプリント配線板技術」, フジクラ技報, 第123号, pp44-48
- 3) ILC Reference Design Report, <http://www.linearcollider.org/rdr>.
- 4) R. yonamine, et al. JINST. 7, C06011 (2012)
- 5) D. Arai, Master thesis (2012), Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT)
- 6) P. Gros, et al. JINST 8, C11023 (2013)
- 7) K. Ikematsu on behalf of the LCTPC-Japan Collaboration, IEEE (NSS/MIC) 2014 Conference Record (N44-7)