

# 発表テーマ：テラヘルツ帯ワイヤーグリッドの製作技術

河合利秀

教育研究技術支援室 装置開発系 第二装置開発（金工室）

概要：

ワイヤーグリッド（以下WGと表記する）とは金属線を等間隔に並べたもので、ミリ波～サブミリ波の開放伝送系における偏波素子である。WGはマーチンパープレート型分光器を形成するときの重要な構成要素として知られている。

私は長年にわたり独自の方法でWGを製作する技術（以下名古屋方式と表記する）を開発し、NANTEN（チリの天文観測用電波望遠鏡）のミリ波～サブミリ波帯受信機などに使われている。名古屋方式によるWGの製作は天文学会等で発表してきた。

ワイヤー直径20  $\mu\text{m}$ 、間隔60  $\mu\text{m}$ のWGはテラヘルツ帯における透過・反射特性を確認しているが、耐久性やワイヤー間隔の精度、製作過程における困難性などから、改善の余地を残していた。

2005年以降、天文台をはじめとする研究機関からの製作依頼をきっかけに、製作方法全般を見直すことになり、欠点や製作過程の困難性を整理して改良を加えた結果、常温で使うWGについては精度・耐久性の向上とともに困難性の緩和に成功した。

今回のポスター発表では、これまでの経緯と問題点を整理し、改良の具体的内容を公開するとともに、会場にて試作品を展示した。

## 1、WG製作技術開発の経緯

WGの製作を依頼され、作り始めたのは1980年代であった。

当時ミリ波帯の電波による天文観測が脚光をあび、受信機の性能向上で世界がしのぎを削っていた。WGはミリ波～サブミリ波帯の受信機を構成するのになくはならない素子の一つである。WGは欧米で製作方法が確立されて市販されているが、有効径50mmで約30万円と非常に高価であり、かつ入手に時間がかかる。このWGはワイヤー面にちょっとでも触れるとすぐに破損する非常にデリケートな素子で、研究室では大きく欠損したものでも大事に使わざるをえないような状況にあった。

本技術開発は、既存の方法とは異なる製作方式（名古屋方式）を考案してWGを安価に供給することを目的とした。以下はこれまでの技術開発のおおまかな経緯である。

### 1990年

旋盤の自動送り機構を使って100GHz帯WGの製作に成功、天文学会で発表し好評を得た。

巻枠、固定枠、接着方法など一連の製作技術に関する主要なアイテムをほぼ完成させた。

写真1に旋盤の自動送りを使ってWGを製作している様子を示す。

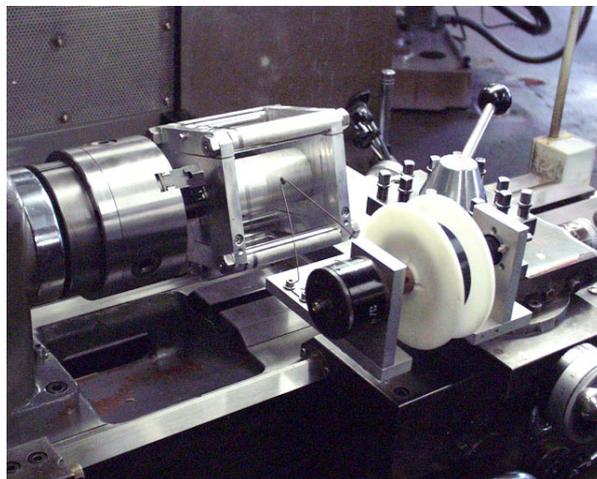


写真1 旋盤の自動送りでWG製作

1998年

WG専用の巻き取り機を開発し、THz領域のWG製作に道を切り開いた。

以後、名古屋大学だけでなく天文関係の研究グループに試作品を提供するようになった。

2001年

接着方法を改善、その他細かい部分の改良を重ねる。この時点でピッチエラーは20  $\mu\text{m}$ 程度。

2003年

三鷹天文台にて偏波特性測定、サブミリ波領域の偏波特性（透過・反射特性）を確認した。

2005年

産総研より製作依頼あり、改めて製作方法の見直しを行った。

2007年

ワイヤー送り出し機構、接着方法などを改良、ピッチエラー平均6  $\mu\text{m}$ と大きく向上した。

今回の発表は2005年以降の機構と接着方法の改良についての報告である。

## 2、名古屋方式の特徴

私が開発したWGの製作方法（名古屋方式）は欧米のメーカーが採用している方法にはない特徴があり、製作コスト低減を実現している。

・放電加工用のタングステンワイヤーを用いることによるコストダウン

従来は金メッキ付きタングステンワイヤーを用いていたが、このワイヤーは極めて高価である。名古屋方式は放電加工用のワイヤーをそのまま使うことによって大幅なコストダウンとなった。

金メッキ付きワイヤーとの性能比較は行っていないが、分光計による透過特性の測定では十分な弁別比（透過と反射の比で25 dB以上必要）を得ている。一般的には、高い周波数の電気回路では表面の電気抵抗が低いことが求められ（表皮効果）、金メッキする意味もここにある。タングステンは電気抵抗が比較的大きいので不都合と思われるが、実際には透過特性の測定に見るようにその影響は見られない。放電加工用タングステンワイヤーは大量に製作されており、金メッキワイヤーに比べて長尺ものが入手できるので、大面積のWGを製作することができるというメリットもある。

最もコストのかかるタングステンワイヤーに安価なものを使っても十分性能を発揮できることを証明したことは収穫であった。

・高価なワイヤーの利用効率を高めた巻き取り枠

欧米の方式では1枚のWGを作るのに板状の巻枠にワイヤーを巻き取り、2面のうちの1面を破る。あるいは別の枠に接着剤やハンダ付けによって固定する。この方法はワイヤーの利用率がわるく、製造コストを上げる要因にもなっている。

名古屋方式は、欧米の方法とは違って、写真1のように凧揚げの時の用いる糸巻きのような形をした「巻き枠」にワイヤーを等間隔に巻き取っていき、そのうちの1面ごとに固定枠を接着固定するという方法で、一度の巻き取り作業で4面のWGが得られる。名古屋方式は高価なワイヤーの利用率がよいことでも有利である。

## 3、製作手順の概要

以下に名古屋方式によるWGの製作手順を示す。

(1) タングステンワイヤーを巻枠に巻く

放電加工用タングステン線（直径20  $\mu\text{m}$ ）を間隔60  $\mu\text{m}$ で巻き取る。巻き枠のサイズは固定枠の大きさ（有効径：30 mm～180 mm）に対応するため、4種類用意している。巻き取り作業は専用機を製作し、主軸の回転とワイヤー繰り出し装置の位置制御をPLCで自動化している。

写真2に自動巻取り装置の全景を示す。

巻き取りの間隔は150  $\mu\text{m}$ 、60  $\mu\text{m}$ 、46  $\mu\text{m}$ の3種類を表面のパネルスイッチで選べるようにしている。主軸回転数は30 rpm、ワイヤーの張力調整はパーマトルクを使ったパッシブ型で、三角形の頂点に送り出しの位置決めとなるV溝付きプーリーを配置して、ワイヤー繰り出し速度の変化を板ばねで吸収する。

## (2) 固定枠に接着剤を付けてワイヤーを固定

1990年代に一度接着剤の選定を行っており、常温用は耐衝撃性瞬間接着剤（シアノアクリレート系）、低温用はスタイキャスト2850FT（エポキシ系2液混合タイプ）、固定枠は主にアルミニウムを旋盤やフライス盤で整形したものと用いるが、タングステンの熱膨張係数に近い42インバーを用いることもある。

固定方法は、固定枠に接着剤を塗布し、巻枠の中央にそっと乗せるだけである。このとき、ちょっとでも動かすとワイヤーの間隔が大きく損なわれるので接着剤が初期接着強度に達するまでは決して動かさない。この作業を4回繰り返し、4面全てに固定枠を接着する。

写真3に巻き取り枠の上に接着剤を塗布した固定枠を載せている様子を示す。

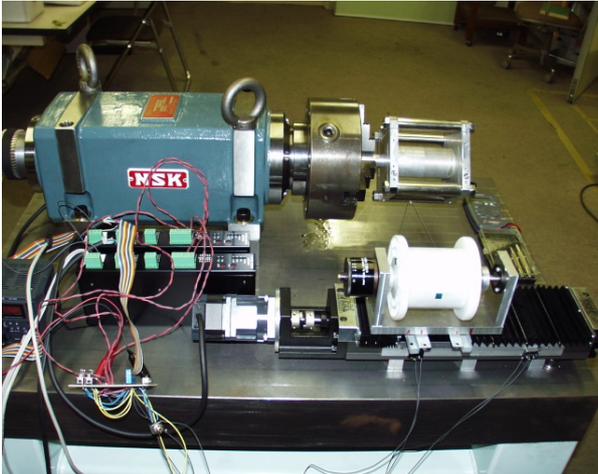


写真2 自動巻取り装置

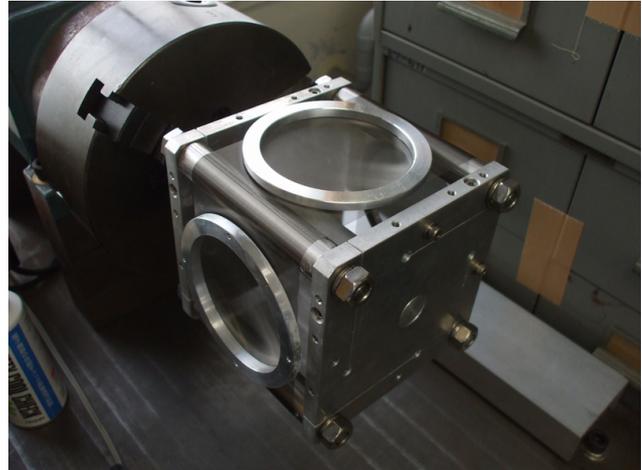


写真3 名古屋式巻取り枠

## (3) 巻枠の張力除去、ワイヤー切断

固定枠の接着剤が固まったら巻枠のワイヤーを切断して固定枠ごと切り取る。この方法では一度に4枚のWGを作ることができる。

ここまでの工程で概ね5日必要となるが、接着工程は作業そのものは短時間だが接着剤がある程度硬化するまで次の面の接着を待たなければならない。従って5日間を全部この作業に費やすことはない。巻枠を複数用意し、順次巻き取りを行いつつ、接着、切断の工程をうまく組み合わせれば、連続的に多数のWGを製作することができる。

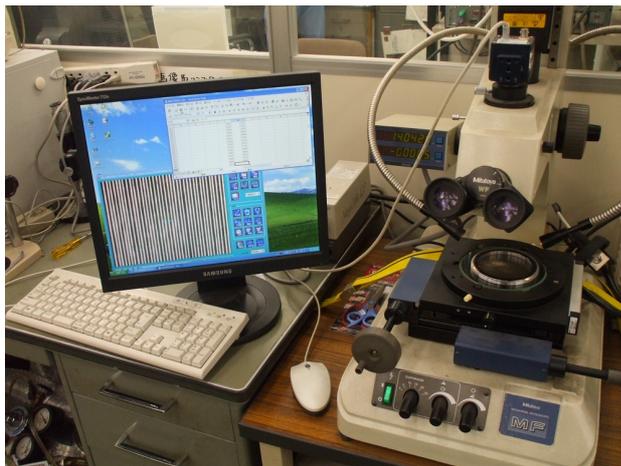


写真4 工具顕微鏡による間隔測定

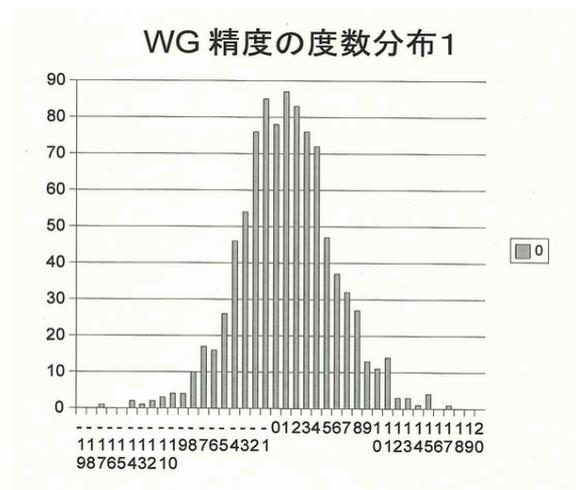


図1 ワイヤー間隔誤差の度数分布

## (4) ワイヤーの精度確認

固定枠に貼り付けたワイヤーの間隔は工具顕微鏡で測定する。

写真4に工具顕微鏡によるワイヤー間隔測定の様子を示す。

工具顕微鏡の載物台にWGを載せて、ワイヤーの間隔を直接測る。ワイヤ接着一面に顕微鏡の焦点を合わせ、接眼レンズのレチクルかCCD画面上のマークをワイヤーのエッジに重ね、載物台のリニアス

ケールによってワイヤーの間隔を測定する。リニアスケールの分解能は $0.5 \mu\text{m}$ であるが、光の回折によって実際の分解能は $2\sim 3 \mu\text{m}$ 程度となる。

目標値からのずれを $1 \mu\text{m}$ 毎の度数分布としてグラフを作成し、精度確認を行う。誤差平均の目標は間隔の $10\%$ 以内とし、合格品をA級、 $10\%$ より悪いものをB級品とする。

図1はこの方法によって作成した誤差の度数分布である。横に設定値からのずれを $1 \mu\text{m}$ でとり、縦に度数をとった。

#### 4、WG製作上の問題点

従来の名古屋方式によるワイヤー径： $20 \mu\text{m}$ 、ピッチ： $60 \mu\text{m}$ のWGは2002年、天文台（三鷹）が所有するフーリエ分光照度計により透過特性を測定、 $3\text{THz}$ まで良好であることを確認した。この測定に供したWGはワイヤー間隔の誤差平均は $16 \mu\text{m}$ 程度であったが、目標としていた弁別比が得られたことから、間隔の精度で少々欠損があっても偏波特性に大きく影響しないことを確認した。図2はフーリエ分光照度計による透過特性、写真5に国立天文台におけるフーリエ分光光度計を使って偏波特性を測定している様子を示す。ウェブナンバー40あたりで乱反射による測定値のばらつきが見える。

透過特性を計測するのは非常に難しく、フーリエ分光光度計の経路内で乱反射が発生し、 $3\text{THz}$ より短い波長領域は暴れていて信頼性に欠ける。それでも、直接の測定値は暴れているにしても、計測によって明らかになった偏波特性のプロファイルは理論値と良く一致し良好であることから、テラヘルツ領域でも十分な偏波特性が得られていると思われる。

それにしても、ピッチエラーが平均 $16 \mu\text{m}$ は大きく、性能に見栄えは関係ないとはいえ、欧米製と比較すると見劣りすることも事実である。間隔の精度には改善の余地がある。

もう一つ大きな問題はワイヤーの張力が緩むことである。これは原因がまだ明確ではないが、スタイキャスト2850FTを使ったものに顕著である。古いワイヤーを使ったWGは問題ないが、新しいワイヤーを使ったWGに張力緩みの減少が発生する。WG面に僅かでも触れただけで緩んでしまう、（写真6）極めてデリケートである。写真7は接着強度不良のために一部剥離したWGである。

従って、改善する項目は、①間隔精度の向上、②接着方式の見直しの2点である。



写真5 フーリエ分光光度計による測定

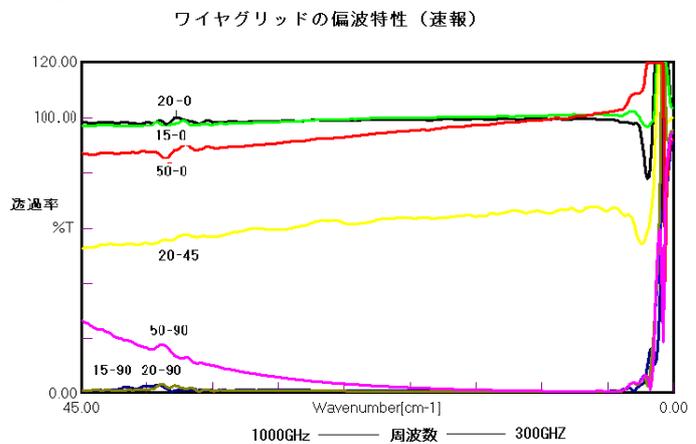


図2 WGの偏波特性



写真6 ワイヤーが緩んだWG

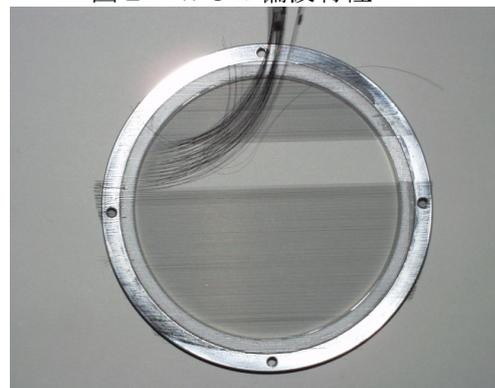


写真7 一部が剥離したWG

## 5、製作方法の改良

間隔精度向上と接着方法の見直しは二律背反するところがあり、この部分でワイヤー径に対する有効な張力を見つけ出す必要があった。そのため、ワイヤー繰り出し機構を全面的に見直し、細かい張力調整が可能な構造を模索した。

同時に、接着方法も根本から見直し、予断や常識にとらわれず入手可能な接着剤を試すことにした。

### (1) ワイヤー位置決め機構の改善

ワイヤー繰り出し機構全般を見直す中で、繰り出し位置を決めるプリーの直径を大きくし、張力調整部分とポビンを支える部分の細かな修正・改良を行った。この作業の中で、今まで常識と思っていたことが間違いであったことに気づいたことがある。

それは、ワイヤーのリリースポイントと巻き枠の距離の問題である。ワイヤーのリリースポイントが巻き枠に近いほうが精度がよいように考えていたが、実際には遠くしたほうがV溝付きプリーの揺れの影響が少ない。ワイヤーのよれなどの影響も間隔が大きいほど影響が少ない。

実際に、リリースポイントの精度は同程度にもかかわらず、ここでの誤差は $5\ \mu\text{m}$ から $2\ \mu\text{m}$ へと大きく改善した。写真8は改善前、写真9は改善後のワイヤー繰り出し機構である。

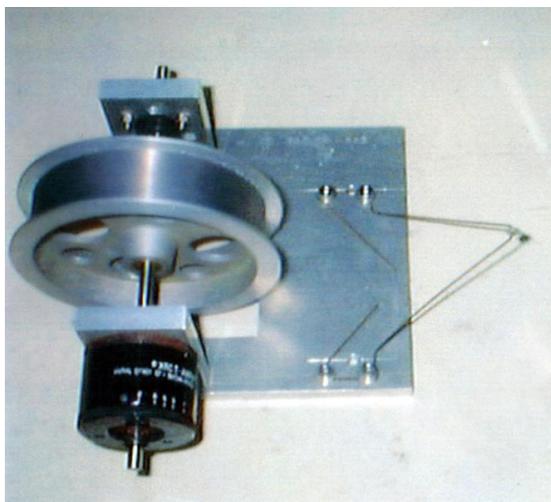


写真8 改良前のワイヤー繰り出し機構

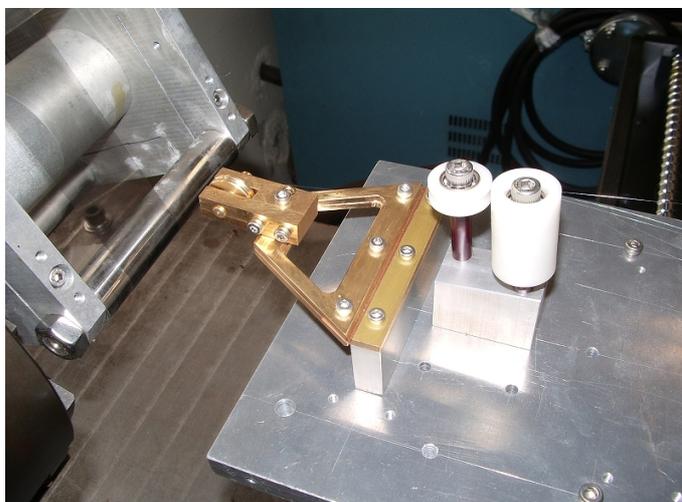


写真9 改良後のワイヤー繰り出し機構

### (2) 接着方法の改善方法を探る

接着の問題点は先にあげた通りである。スタイキャスト2850FTはエポキシ系接着剤中最強の部類に入るものである。しかし2液混合のスタイキャストは化学的安定性や鮮度の条件が厳しい。スタイキャストは1Kgの缶入りで最小単位であり、購入後6ヶ月が使用期限ということ考えると、時々数十グラムを使うような用途には向かない。最小単位の価格も相対的に高価となる。

コンビニや生協で普通に入手できる接着剤が利用できればそれにこしたことはない。接着剤の強度が下がる分はワイヤー張力を多少下げて対応できないかと考えたからである。一般的な接着剤が使用可能にする意義は大きい。

そこで、これまでの経験や知識を捨てて、現在手軽に入手できる接着剤を改めて評価しなおすことにした。

### (3) 接着部分の評価

ワイヤー張力と接着強度を計算で求めると、ワイヤー張力 $50\text{g}$ （1本あたり）とすれば、 $\Phi 20\ \mu\text{m}$ のワイヤー全部が枠の幅 $10\text{mm}$ に働く張力は約 $3.3\text{Kg}$ 、接着部分の表面積が $0.3\text{mm}^2$ であれば $166\text{g}/\text{mm}^2$ に相当する。

接着剤のせん断接着強さ（ $\text{g}/\text{mm}^2$ ）はメーカーのカタログから、一般のエポキシ系で $1000\sim 1500$ に対し、シアノアクリレート系は $30\sim 50$ となり、エポキシ系ならば合格だがシアノアクリレート系は不足である。ちなみに、スタイキャスト2850FTは引張り強度： $6.1\text{Kg}/\text{mm}^2$ （エポキシ系では最強、 $60\text{MPs}$ ）であった。

#### (4) 接着剤の試験

ワイヤーの張力を低く設定し市販の接着剤を全てテストすることにした。この結果を以下に示す。

- ・アラルダイト ラピッド————— 良好
- ・瞬間接着剤（ゼリー状のもの）————— 剥離
- ・アロンアルファ#31303————— 剥離
- ・スコッチ 70402E————— 一部欠損
- ・ウレタン系一液型機械金属系接着剤（SUタイプ）—— 良好

この結果を見ると、驚いたことに、以前はまったく期待していなかったウレタン系が今回好成績を得た。取り扱いのことを考えると、ウレタン系がもっとも優れているので、以後の試作でウレタン系接着剤を積極的に採用することとした。

## 6、接着作業の改善

### (1) 適切なワイヤー張力を探す

製作方法の改善で接着剤まで踏み込んだことで、ワイヤー張力の見直しをすることにした。

接着剤の強度が下がった分、ワイヤーの張力を下げる必要がある。しかし下げすぎてもピッチエラーが目立つようになるので、その閾値を探る必要がある。名古屋方式による線径20 $\mu$ mのワイヤーの張力は、50gから20gに変更することとした。

しかし、試作を進めていく過程で、接着部分の処理で大幅に接着強度を増すことで剥離破壊を防ぐことがわかり、今ではワイヤー張力を元に戻している。

今後、スタイキャスト2850FTで起きたような張力緩和はワイヤー張力を高めることでおきやすくなることもあり、経年劣化も考えて張力を決めていくといったところが現状である。

### (2) 接着面の改善

もう一つの重要な改善点は接着面の処理&追加加工である。

従来は、ワイヤー接着面の精度を良くするために平面研磨を実施していた。これにより接着平面の精度は向上したが、面が綺麗な為に剥離しやすいという問題も生じた。

古いWGの接着面についてスタイキャストを取り除こうと旋盤で削ったところ、バイトの先端がスタイキャストに負けて破壊した状態で強引に接着面のスタイキャストを剥ぎ取るといったことがおこり、接着面に大きな渦巻き状の溝傷が付いてしまった。しかし、基準面は僅かに残っていて使える状況だったのでこの固定枠を試作に用いた。きれいな面のワイヤーは綺麗に剥離したにもかかわらず、渦巻き状の溝が付いた固定枠のWGは剥離しない。わざとワイヤー部分を押ししてみた。普通はこれで簡単に剥離したちワイヤーの緩みを生じるのだが、この試作品はそうした不具合が発生しなかった。

この結果に少々驚いたのだが、冷静になって考えれば当たり前である。要するに、接着面積が2倍程度に増え、接着面が適度に荒れたおかげで剥離がおきにくい構造になった。

写真10に、荒いらせん状の溝が付いた接着部分を示す。

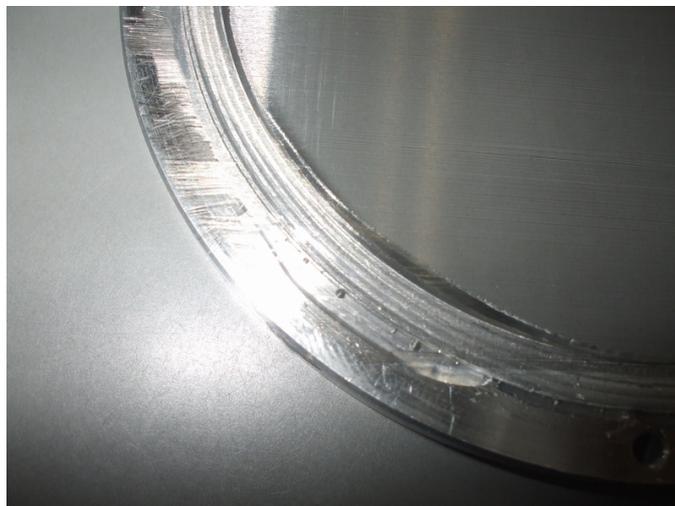


写真10 接着部分の螺旋状溝

### (3) 低温での耐久試験

接着部分の強度が大きく向上したことで、思い切って低温（4 K）まで冷却して使用できるか否かを試すことになった。

有効径40 mmのWG（線径20  $\mu$  m、間隔60  $\mu$  m）で、アラルダイト（ラピッド）とSUスーパーボンド（ウレタン系）各2枚を使い、今まで数回4 Kと300 Kを往復したが、接着剤の表面に割れのような模様が見えるものの、ワイヤー自体はきちんと接着された状態を保っている。

この事例は技術開発の中でも象徴的な出来事である。それまで盲目的に常識と思われていたことが、実は間違っていて、おもいがけず成功してしまったことから大きな前進を得ることがある。

接着剤自身は4 Kというような低温に耐えるものではない。しかし接着面の凸凹とワイヤーの表面がうまくバランスして剥離応力を表面に集中させないことも考えられる。今回の実験で、名古屋方式のWGが低温でも使えることになれば、ALMAなどのテラヘルツ帯受信機で使うWGとして比較的安価に供給できる道も開ける。

## 7、まとめ

テラヘルツ用ワイヤーグリッドの製作方法において、これまで歩留まりが悪く不安定だった問題を整理し、一つ一つ対策を講じることにより、名古屋方式によるWG製作技術を大きく改善できた。

新名古屋方式ともいえる製作方法により、これまでにない完成度の高いワイヤーグリッドを製作できるようになった。

4枚同時にほぼ同じ性能をもつWGを製作できる新名古屋方式により、間隔のばらつきは間隔の10%以内を実現し、ワイヤーの安定した固定方法にも大きな前進を得て、実験室レベルの状況から、製品として出せる程度まで技術的な熟成を遂げたと自負している。

写真11に、ポスター会場でも展示したWGを示す。

今後の課題は、4 Kの受信機内部で使う低温用WGとして使えるものを製作することである。現在STE研究所と協力して、低温における耐久試験を実施している。現在アラルダイトとSUスーパーボンド両方とも数回の耐久試験を合格しており、今後低温で偏波特性を測定する準備を進めることとなった。

写真11 ポスター会場で展示したWG



有効直径 40 mm ワイヤー直径20  $\mu$  m ピッチ 60  $\mu$  m  
使用接着剤 左：アラルダイト（ラピッド）、右：スーパーボンドSUタイプ