

ミリ波・サブミリ波帯偏波素子（ワイヤーグリッド）の製作技術

河合利秀^{A)}

A) 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

ワイヤーグリッド（以後 WG と省略して記す）は細い金属線を等間隔に並べたもので、ミリ波～サブミリ波帯の重要な偏波素子である。WG は金属線のみで構成されているので挿入損失が極めて少ないことが特徴である。天文観測用電波望遠鏡の受信機は極めて微小な電波を扱うため、挿入損失の小さいWG は電波望遠鏡受信機にとって有用な偏波素子である。

電波天文観測に用いるサブミリ波帯受信機では、ミキサーの直前に WG を配置して準光学的な結合回路を構成し、ここに局部発振信号を注入することから、WG には冷却サイクルに対する耐久性が求められる。

私は 1991 年に WG の製作を天文学会で報告して以来、ミリ波・サブミリ波帯 WG の製作を進めてきた。

2007 年には製作方法を大きく見直し、価格、耐久性、ロットの形状・サイズの自由度、製作の容易さ、製作工程における再現性・歩留まりを改善した。この技術を使って、線径 $20\mu\text{m}$ 、間隔 $60\mu\text{m}$ のWG において、ピッチエラー平均 $6\sim 8\mu\text{m}$ を実現し、2008 年の技術研修（ポスター発表）、2008 年秋の天文学会にて報告した。（写真 1、図 1）



写真 1, 2007 年試作のサブミリ波帯WG

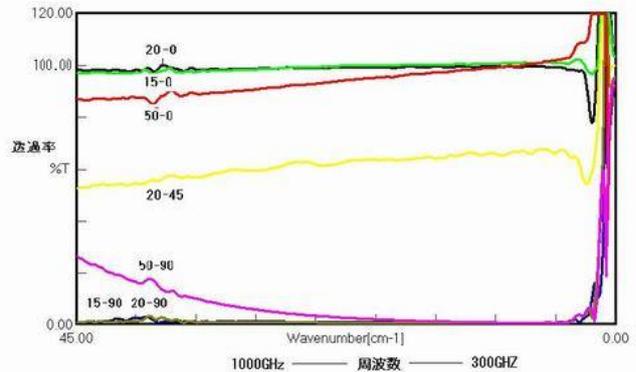


図 1, 試作したWG の偏波特性

その後、ピッチエラーをもう一段改良するため、発想を変えて作成方法を大きく転換したところ、線径 $20\mu\text{m}$ 、間隔 $60\mu\text{m}$ のWG におけるピッチエラーを $2\mu\text{m}$ 程度まで改良できる見通しがたった。

今回は、新たな製作方法によって試作したWG のピッチエラー改善について報告し、その技術的な問題点を紹介する。

1, WG 製作方法の変遷と技術的な課題

私の開発したWG の製作方法は 2008 年度の技術研修会（ポスター発表）にて報告したが、簡単に振り返ってみたい。

1.1 1990 年ミリ波帯 WG の製作を始める

1990 年には、旋盤の自動送り機構を用い、ミリ波帯のWG（線径 $50\mu\text{m}$ 、ピッチ $200\mu\text{m}$ ）を製作、この時点で、ワイヤー張力調整機構、巻き枠にワイヤーを巻き取り接着によって固定枠に移すなど、基本的な方

法を確立，100GHz 帯での弁別比 25db (100GHz) 以上を実現して 1991 年天文学会にて報告した．

ミリ波帯WGは巻き枠のシャフトの上にワイヤーを巻き取る．このシャフトには正確な溝加工を施しており，この溝の精度がワイヤーピッチの誤差を決めている．このときのピッチエラーは 20~25 μm であった．

1.2 1992 年サブミリ波帯 WG の試作

ミリ波帯 WG に成功したので，翌年サブミリ波帯（線径 20 μm ，ピッチ 60 μm ）に挑戦した．

ミリ波帯WGの製作では，汎用旋盤を改造し，ワイヤー巻き取り時の回転速度を 10~30rpm としていた．このときの自動送りの精度はスティックスリップ現象などで 20 μm が限界であることや，自動送りではネジ切のように安定して同じ溝に刃物を入れられないことから，溝加工は実現不可能と考え，巻き枠のワイヤーが乗る部分を円柱のままでそこに直接ワイヤーを乗せることとした．

この方法により，ピッチエラー 20 μm ，WG の弁別比 20db (300GHz) を実現．この結果を 1992 年天文学会に報告．

1.3 1998 年専用巻き取り機を製作

低速回転数での汎用旋盤での送り精度に限界を感じ，旋盤と同じような機能を持つ専用の巻き取り機を製作，サブミリ波帯 WG（線径 20 μm ，ピッチ 60 μm ）の製作に取り掛かる．

自動送りの精度やワイヤー張力調整機構などを調整しながら試作を繰り返し，電波天文の受信機用にサブミリ波帯 WG として依頼を受け多数製作．このときのピッチエラーは 16~20 μm 程度と目標にはまだ届かない．

1.4 2003 年透過特性を測定

国立天文台（三鷹）のフーリエ分光光度計によって透過特性を測定，サブミリ波帯 WG（線径 20 μm ，ピッチ 60 μm ，ピッチエラー 16~20 μm ）のものでも 1 THz 程度まで 20db 以上の弁別比を得られることがわかった．

1.5 2005 年~2007 年製作方法の見直し

産総研などからの製作依頼があり，改めて制作方法を見直した．その結果，ワイヤー繰り出し機構などを改良し，サブミリ波帯 WG（線径 20 μm ，ピッチ 60 μm ）においてピッチエラー 6~8 μm を達成（図 2）した．

この時，新たな問題として接着強度が大きな壁となった．それまではスタイキャスト 2850FT で好結果であったが，新たに製作したWGのワイヤー張力が減少し，WG の性能が劣化することがわかった．この問題は新しい接着剤を試す（写真 2）ことで改善できたが，まだ完全な解決には至っていない．さらに 4 K 程度の低温での用途があるので，まだ試行錯誤の段階にある．

ここまでの技術的な問題点や改良については 2008 年度名古屋大学技術研究会にてポスター発表した．

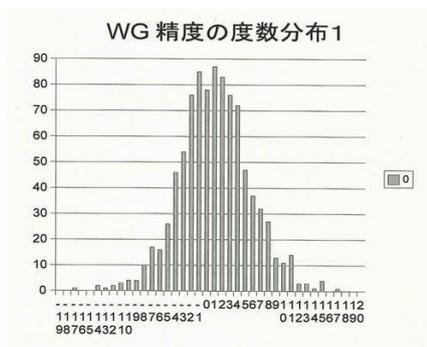


図 2，ピッチエラーの分布



写真 2，冷却後の接着面

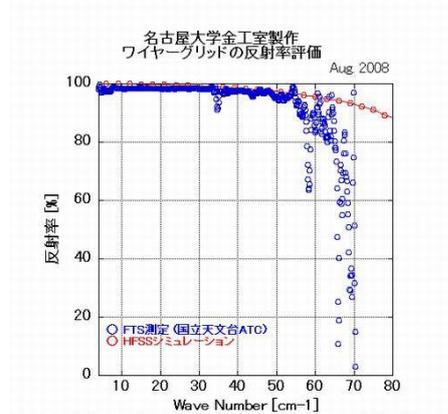


図 3，WG の透過特性

2, 新たな視点による改良

2.1 問題意識

ブミリ波帯の WG (線径 $20\mu\text{m}$, ピッチ $60\mu\text{m}$) を大量に作るうとしたとき, ピッチエラーは大きくなる傾向にある. 先に実現した方法で注意深く作業を進めて到達できるのがやっと $6\sim 8\mu\text{m}$ であり, 悪条件が重なると, 目標の 10% 以内を確保することは難しい. (このときの透過特性: 図 3)

巻き枠にワイヤーを巻いた時と接着剤で固定した時のピッチ精度を比較すると, 接着後の方が確実に誤差は大きい. そのため, 巻き枠にワイヤーを巻いた時点での精度をもっと高くすることが必要だと考えた.

2.2 発想の転換

そこで, 思い切って, 発想の転換を試みることにした.

1990 年代に確立した製作方法に戻り, 巻き枠のシャフトに溝を切る方法の可能性について試すこととした. これまで不可能だと思って試していなかった, 旋盤で $60\mu\text{m}$ のピッチの溝を切り, その溝にワイヤーを入れる方法である. 1992 年にはこの方法は不可能との結論を出したが, 改めて旋盤の送り機構を詳しく観察し, $60\mu\text{m}$ の溝加工を試すことにした.

低速回転では往復台が極めて遅く動くので, 自動送りバーのねじれ剛性が低いことから強いスティックスリップが発生し, 送りピッチの揺らぎがでた. しかし, 旋盤の往復台のような摺動機構は, 直線案内の V - フラット上を滑るため, 早い動きであれば油膜に乗った慣性運動の性格が支配的になるのではないかと考え, 高速回転による自動送りによって溝加工を試みることにした.

2.3 自動送りの問題点

しかし, 問題点がないわけではない. 汎用旋盤の送り機構はタンブラーギアを中継するので, 目標どおりピッタリ $60\mu\text{m}$ のピッチにならない (実測値: $61.3\mu\text{m}$, 写真 5, 赤丸で示す). ことは最初に頭を痛めた問題であった. この問題は後に詳しく述べるが, 巻取り機の送りピッチとずれていることがむしろ好結果を生んだこともあり, とにかく等間隔に溝が切れればよいことがわかった.

2.4 刃物寿命の問題

1.2 でも述べたように, 自動送りでは一回の加工で溝を整形する必要があるため, 溝加工としては大変乱暴なことになる. 直径 20mm 長さ 110mm の丸棒にピッチ 61.3 の溝を切るときの切削距離は約 110m , 少なくとも 4 本加工するので, 440m 以上を安定して加工しなければならない.

旋盤のバイトは刃先に適当な R (ノーズ半径) をつける. 一般的には, ノーズ半径を大きくすることにより面粗さを向上させるとともに, 刃先の熱拡散速度を上げて刃先の温度上昇を防いでいる.

しかし, 今回はワイヤー直径が $20\mu\text{m}$ なので刃先のノーズ半径は $10\mu\text{m}$ が望ましい. しかも一回だけの加工で溝を整形する必要があるので, 刃物先端部分の寿命は厳しいと予測される.

このような悪条件で精度のよい溝を実現するには切削性のよい材料を選ぶ必要がある. 従って, 巻き枠のシャフトを真鍮とした.

2.5 刃物 (バイト) の製作

刃物は, 刃先の先端角 $100\sim 110^\circ$, 逃げ角 10° , すくい角 0° とした. これは真鍮に合わせたもの. この形状にて手砥ぎの超硬バイトを整形, #240, #400, #600 のハンドラッパーにて仕上げた.

このバイトは工具顕微鏡によって刃先の仕上がりを確認した. (写真 3)

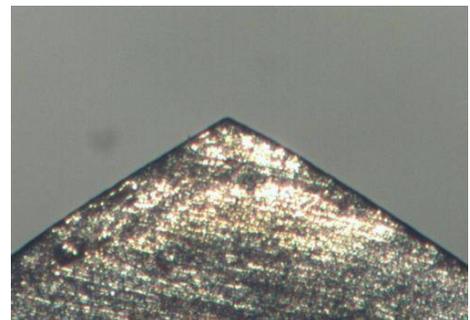


写真 3, バイトの先端

3, 試作

前項による考察により、溝加工式の可能性を確認するため、小さい巻き棒を使って実験的な試作を行った。

3.1 溝加工

まず真鍮シャフト（両端にセンター穴があり、M10のねじがある）の円筒表面を慎重に仕上げしてから溝加工を行う。主軸回転数を1000rpm（最高回転数）として高速回転における刃物と材料の相性を見ておく。自動送りがスムーズにかかることも確認する。もし自動送りにむらがあれば、僅かな凹凸による反射光の干渉によって縞模様が確認できる。仕上げ加工で往復台がスムーズに動けば摺動面に油膜も形成され、その後の溝加工に+となる。

2.2にて解説したように、送り量が0.06mmになるようにタンブラーギアを4番にいれ、バイトの切り込み量を0.025mmとして一気に溝を形成する。（写真4）

加工表面に荒れが残った場合は#2000の耐水ペーパーで軽く研磨しバリを除去する。洗浄後工具顕微鏡で溝形状を確認（写真6、7）。良好だったので刃物寿命がOKなら溝加工は可能と判断した。



写真4, 溝加工

写真5, 自動送りのピッチ表: 60 μmはない



写真6, 溝の形状（シルエット）

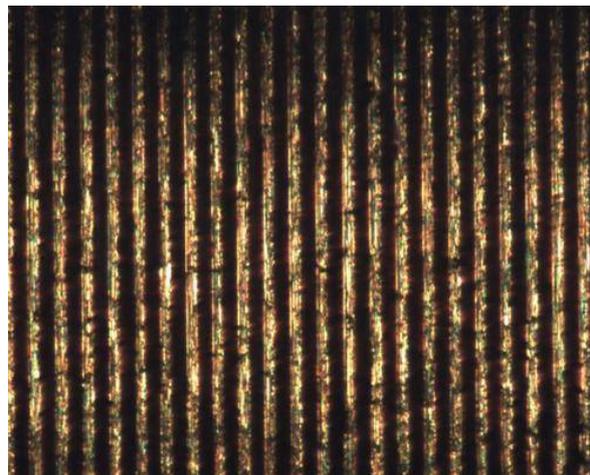


写真7, 溝の形状（表面）

3.2 ワイヤーを巻く - 1

2.3で述べたように、巻き取り機のピッチと溝のピッチが微妙にずれていることがどのような結果になるかを試すため、とにかくピッチの差があることを承知で巻いてみた。

その結果は、3～4mm間隔でワイヤーが二重になる・・・つまり一つの溝に2本ワイヤーが入ってしまうが、他の部分は非常にきれいに溝に収まっている。（写真8）

このワイヤー間隔を工具顕微鏡にて測定した結果，ピッチエラーは $2\ \mu\text{m}$ 以内，統計処理をすると $1 = 1\ \mu\text{m}$ 以下（図4）になることがわかった．

巻き取り機の送りピッチを $61.3\ \mu\text{m}$ に合わせてワイヤーを巻いてみると，意外にも不安定な部分が多く出現（10本程度連続する．写真9）した．これは巻き枠の溝の山～谷の位置と巻き取り機のワイヤー繰り出しの位置が微妙に交差して，不安定領域が面上に現れたと考えられる．溝ピッチと送りピッチを完全に一致させることは不可能なので，ピッチが近いほどこのような不安定領域が広く出現する．

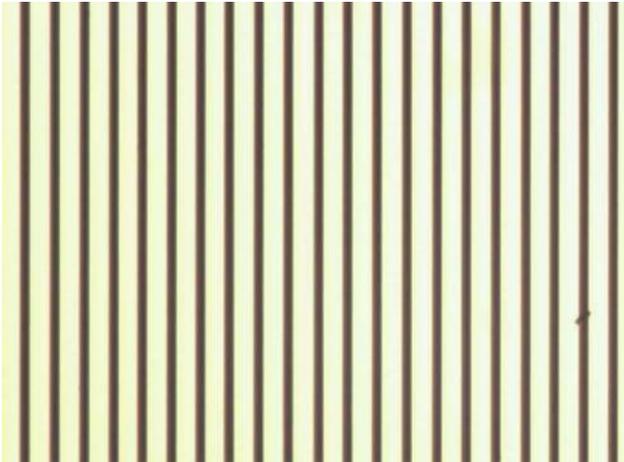


写真8，よく揃った部分

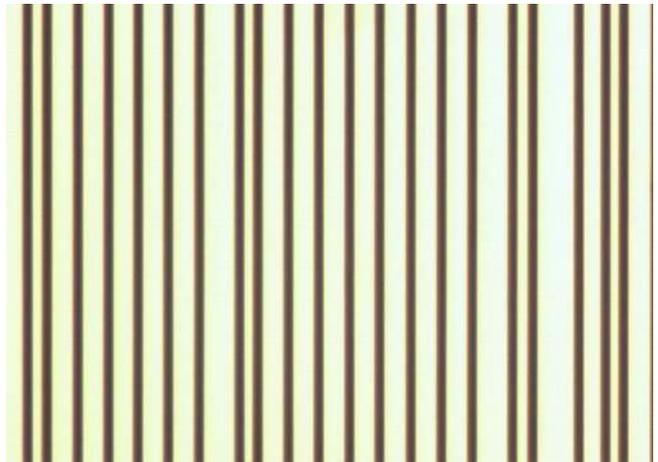


写真9，不ぞろいの部分

このことから，溝ピッチと送りピッチにある程度差があった方が好結果を得られると結論できる．特に溝ピッチ $>$ 送りピッチの場合，数ミリごとに同じ溝にワイヤーが重なって入る方が，WGの偏波性能に影響が少ない．このことはシミュレーションでも確かめられた．

3.3 実際にWGを作ってみる

溝付き巻き枠でよい結果を得たので，実際に使う大きさのWG（有効径 50mm ）の試作を行った．

前の試験同様，巻き枠の4本のシャフトに溝加工する．

この時，シャフト円筒部を全部溝にするのではなく，平坦部と溝の比を50%として加工，巻き作業に入ると，仕上げ部分に乗り上げてしまうワイヤーが何箇所かに出現し，全体のピッチエラーを大きくした．

このときの巻き枠上でのピッチエラーは $1.5\ \mu\text{m}$ ，固定枠に接着して移した後のピッチエラーは $2.2\ \mu\text{m}$ となって，最初の試作としては成功したと考えている．

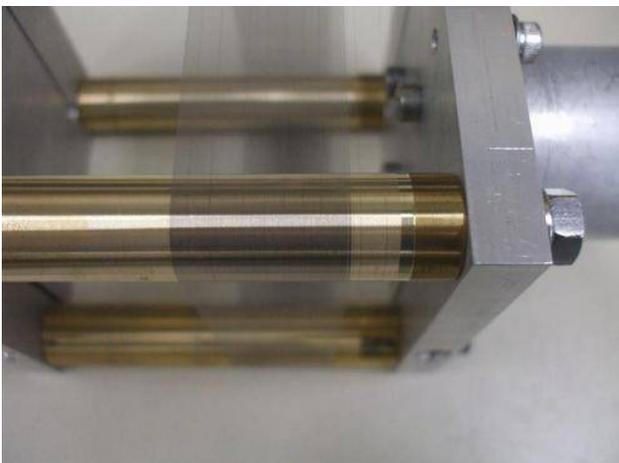


写真10，きれいに揃って巻いたワイヤー



写真11，工具顕微鏡でピッチ測定中のWG

3.4 接着の問題点

2007年の試作で、ウレタン系のSU(小西ボンド)が非常によい結果をだしたので、今回もSUを使ったが、ワイヤー張力の設定を誤って、必要以上に大きな張力で巻いてしまい、固定枠に接着後切り離す段階でワイヤー張力が抜ける部分が発生した。

有効径30~40mmのWGの張力と比較すると、今回の有効径50mmのWGの張力は50%程度大きくしたのだが、ワイヤーの接着部分が滑ったと考えられる。一度滑るとその部分の張力は失われてしまうので、ワイヤー間隔を悪くする原因となる。

4、まとめ

今回の試作により、以下のことが明確になった。

- 汎用旋盤の自動送り機構を高速運転で用いると送り精度を高く保てる
- 超硬バイトによって60 μ mピッチの溝加工が可能である
- 溝のピッチと巻取り機の送りピッチは多少の誤差があるほうがよい結果をもたらす(写真10)
- ワイヤーが緩んだ問題は張力の最適化によって解決できる

以上のことから、巻き枠のシャフトに60 μ mの溝を切る方法はWGのピッチ精度を大幅に改善できる可能性があるかと判断し、今後この方法で試作を繰り返し、ワイヤー張力の最適化を行うこととした。

この結果は、以前に作ったWG(ウレタン系接着剤使用)の4K~300K熱サイクル試験の結果とともに、2009年春の天文学会でポスター発表を予定している。

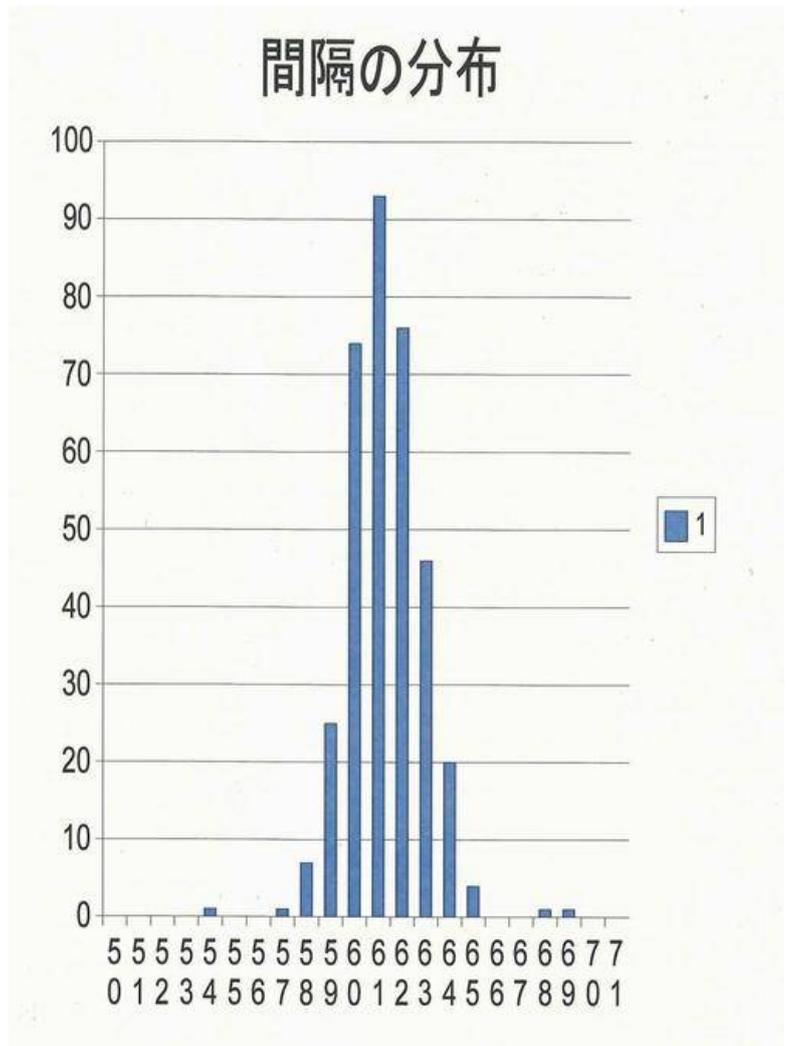


図4、新しい方法によるピッチ分布