

# 新方式の陽電子寿命測定装置による超高感度格子欠陥検出

研究代表者 東京大学総合文化研究科 教授 兵頭 俊夫

## 1. 序

従来の陽電子寿命測定装置は高速のシンチレーターと光電子増倍管(PMT)、Constant Fraction Discriminator(CFD)などのタイミングディスクリミネーター、Time-to-Amplitude Converter (TAC)、マルチチャンネルアナライザー(MCA)により構成されている。通常得られる時間分解能は半値幅で 200ps 程度であった。装置の測定対象である物質中の陽電子寿命は短い物で~100ps 程度であり、またパラポジトロニウムの平均寿命は 125ps であるので、これらと比べて陽電子寿命測定装置の時間分解能は明らかに不十分であった。100ps 台の分解能を持つ装置の報告も少数あるが、そのほとんどは光電子増倍管に耐圧ぎりぎりの高電圧をかけて短時間で測定したものであり、実用的な測定に使用できる安定性はなかった。

陽電子寿命測定装置に使用される PMT は、浜松フォトニクスの H3378 や、Philips の XP2020 が代表的なものであり、出力波形の立ち上がり時間はそれぞれ 0.7ns と 1.5ns (カタログ値) である。最近デジタルオシロスコープの性能が向上し、単発波形に対して 0.5ns 以下のサンプリングレートが得られるようになった。これを用いて光電子増倍管の波形をデジタル化すれば、波形の立ち上がりを捕らえることができるので、陽電子寿命測定装置へ応用できることが期待される。

我々はこれを用いて、新しい陽電子寿命測定装置を開発し、高い性能を得ることに成功した。更にそれを格子欠陥の検出に応用した。これらについて以下に述べる。

## 2. 装置

装置の概略を図 1 に示す。使用したデジタルオシロスコープは LeCroy 社製の Wavepro960 である。このオシロスコープのサンプリング間隔は 0.25ns (4ch 同時) であり、用いた光電子増倍管 (浜松フォトニクス製 H3378) の立ち上がり時間より十分短い。シンチレーターには BaF<sub>2</sub> を用いた。PMT のアノードは 50Ω のケーブルで直接デジタルオシロスコープに接続した。コインシデンスがあった瞬間(100ns 間)だけの信号を記録するために、PMT の波形を FET のボルテージフォロワー(入力インピーダンス 1MΩ、帯域 1GHz) でモニターし、NIM のディスクリミネーターに入力している。このディスクリミネーターとコインシデンスにより、2 本または 3 本 (設定による) の光電子増倍管に同時に信号が入るとデジタルオシロスコープにトリガー信号が送られ、光電子増倍管の波形がデジタルオシロスコープのメモリに記録される。ディスクリミネーターとコインシデンスの処理時間の分だけ、トリガー信号の方が数十 ns だけ遅くなるが、オシロスコープのメモリは cyclic になっており、トリガーから時間レンジ分だけ過去の data(この場合は 100ns 分)を保存す

ることができるので PMT 側の delay ケーブルなしでも問題ない。データは GPIB またはイーサネット でパソコンに転送される。データの最大取り込み速度は 4ch 使用時に 400cps 程度で、陽電子寿命測定には十分な速度である。

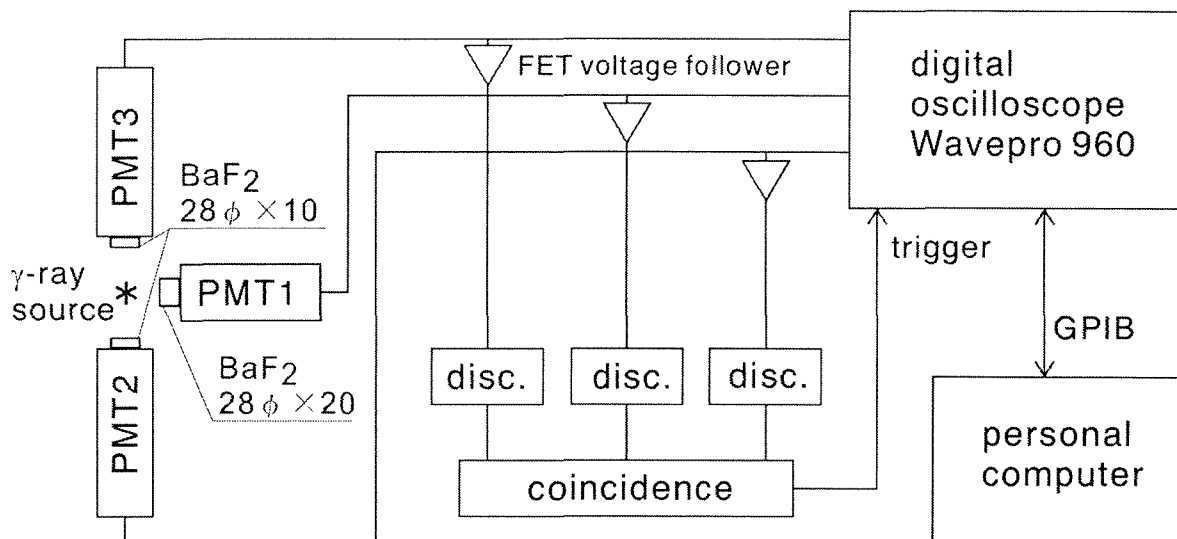


図 1 装置の概略図

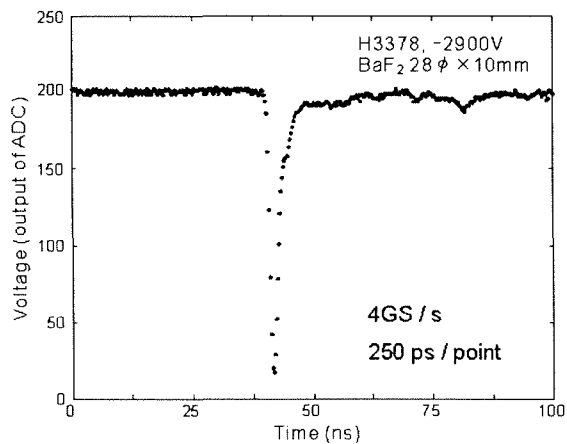


図 2 光電子増倍管の波形

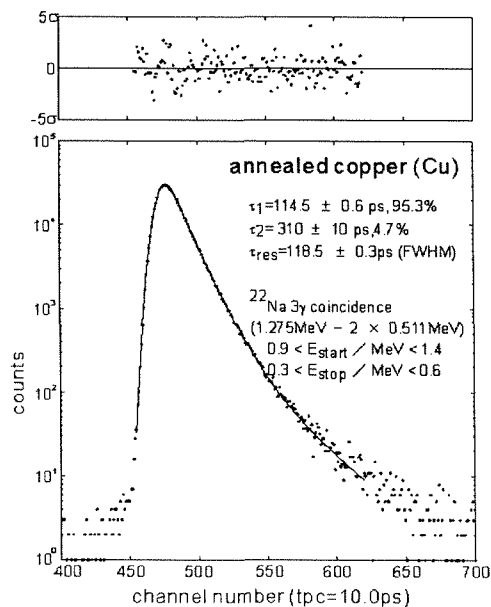


図 3 純銅中の陽電子寿命スペクトル

光電子増倍管の波形を図2に示す。1点が250psであるので、立ち上がり時間はおよそ1nsであり、光電子増倍管のカタログ値0.7nsに近く、オシロスコープの良好なレスポンスを示している。これからタイミング情報を取り出す際は、まず波形を平滑化し、次にピーク値を求め、最後に波形がピーク値の25%をクロスする時刻を求めて、ガンマ線のタイミングとする。

装置のテストのために、 $^{22}\text{Na}$ 線源をアニールした銅の板で挟んだ試料中の陽電子寿命スペクトルを測定した。2本のPMTを（通常の陽電子寿命測定と同様に）用いた時の時間分解能は144ps(FWHM)であった。3本のPMTを用い、スタート信号に1.27MeVの $\gamma$ 線、ストップ信号に2本の陽電子消滅 $\gamma$ 線を捕らえ、消滅 $\gamma$ 線の時刻を平均して寿命スペクトルを求めたところ、119ps(FWHM)の時間分解能が得られた。この時の寿命スペクトルを図3に示す。実用的なサイズの $\text{BaF}_2$ シンチレーター（ $28\phi\times 10\text{mm}$ と $28\phi\times 20\text{mm}$ ）を用い、エネルギーのwindowを広くとりながら、このように良い時間分解能が得られているのは、実際の応用上重要である。エネルギーwindowを狭くとると、カウント数は減るものの110ps程度の時間分解能を得ることができる。

時間分解能の、ガンマ線のエネルギー依存の考察から、本装置の時間分解能は光電子増倍管の光電面における光電子数によって支配されていることがわかっている。分解能をさらに改善するには、 $\text{BaF}_2$ よりfast成分の光量の多いシンチレーターを使用するか、光電面の量子効率を改善するかのどちらかが必要である。今のところfast成分のintensity/decay timeの値が $\text{BaF}_2$ より大きい無機シンチレーターは知られていない。プラスチックシンチレーターを用いたところ $^{60}\text{Co}$ のカスケード崩壊(1.17MeV-1.33MeV)に対して90ps程度の分解能が得られたが、密度が小さいためカウント数が犠牲になり、総合的に $\text{BaF}_2$ より劣った性能しか得られない。新しい高速無機シンチレーターの開発が強く望まれる。

Ge検出器の信号処理に関しては、立ち上がり時間が数百nsと比較的遅いため、デジタル信号処理が1990年代に実用化されている。本研究により、シンチレーション計測器を用いるガンマ線の時間計測もデジタル処理が可能であり性能が大きく向上することが示された。陽電子消滅寿命測定装置は今後全てこの方法に置き換わっていくと思われる。また本研究の方法は、今後TOF-PETや、摂動角相関、時間分解メスバウアー、中性子過剰核などの原子核の研究、素粒子実験などにも広く応用されていくことが期待される。

### 3. 格子欠陥検出への応用

測定した試料は、純鉄(NILACO社製4N)板材、厚さ2mmのものである。切り出し加工後、真空中で歪みとり焼鈍(850 $^{\circ}\text{C}$ , 1h)を行った後に徐冷し、その後、表面を化学研磨(HF、 $\text{H}_2\text{O}_2$ )した。試料のサイズを図4に示す。

試料への疲労は、荷重制御による片振り引張りを正弦波で負荷して行った。負荷条件の詳細は次のとおりである。

最大荷重 $P_{max}(kN)$	最小荷重 $P_{min}(kN)$	最大応力 $\sigma_{max}(MPa)$	最小応力 $\sigma_{min}(MPa)$	応力振幅 $\sigma_a(MPa)$	応力範囲 $\sigma_R(MPa)$	周波数 (Hz)	破断繰返 数 $Nf(cycles)$
5.044	0.252	261	13	124	248	20	2.00E+05

表 1

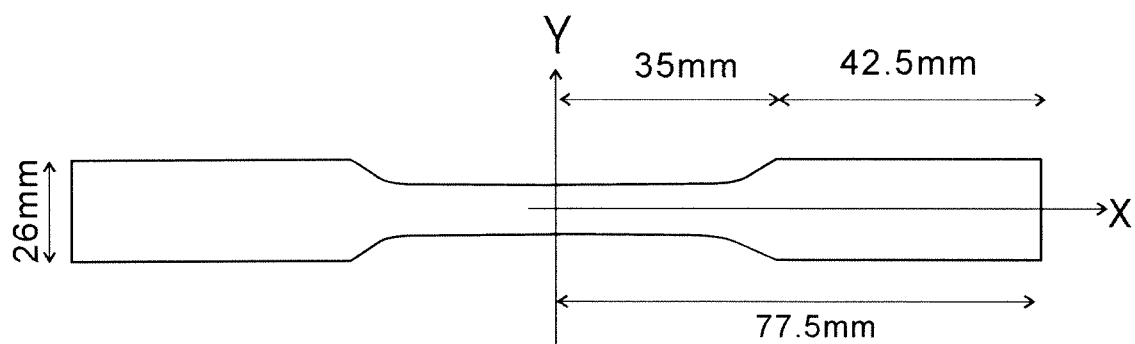


図 4 使用した試験片

この試験片の中心軸（図 4 の X 方向）に沿って、陽電子寿命測定を行った。測定点の位置を図 5 に示す。なお、使用した  $^{22}Na$  線源は KAPTON の foil に挟み込んであり、試料がない側は別の KAPTON で塞いである。このため得られる data は金属の成分と KAPTON の成分が混じったものになる。

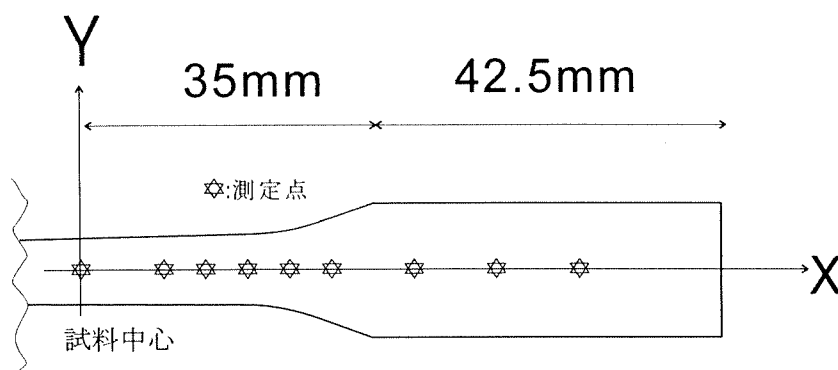


図 5 測定点の位置

陽電子寿命測定の結果を図 6 に示す。また、更に測定点を増やした時の図を図 7 に示す。

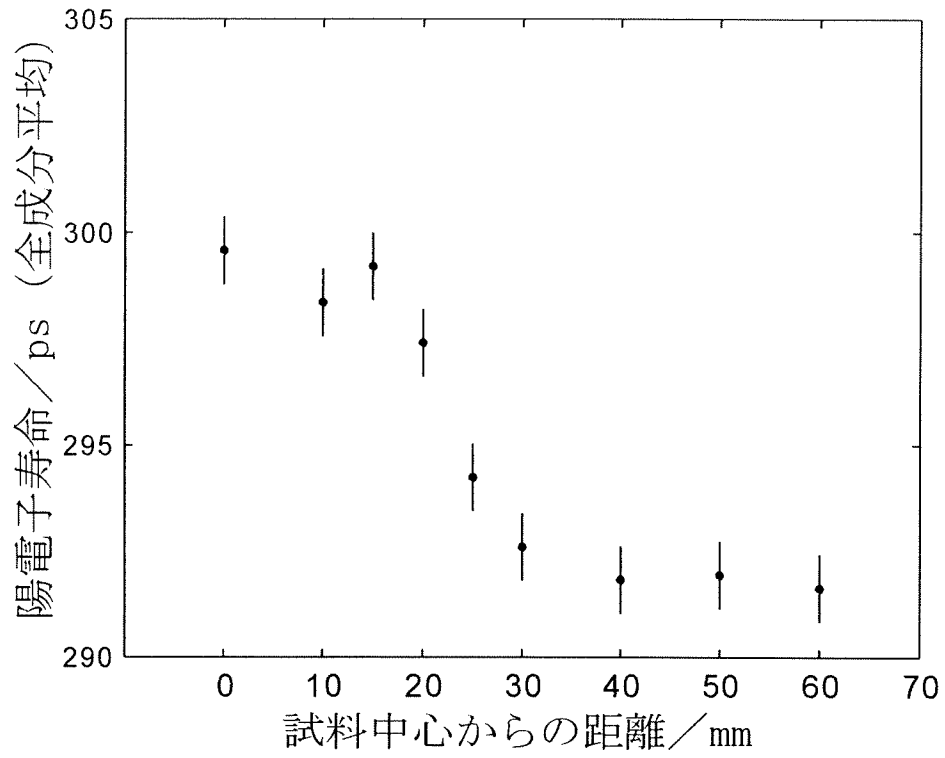


図6 陽電子寿命測定の結果

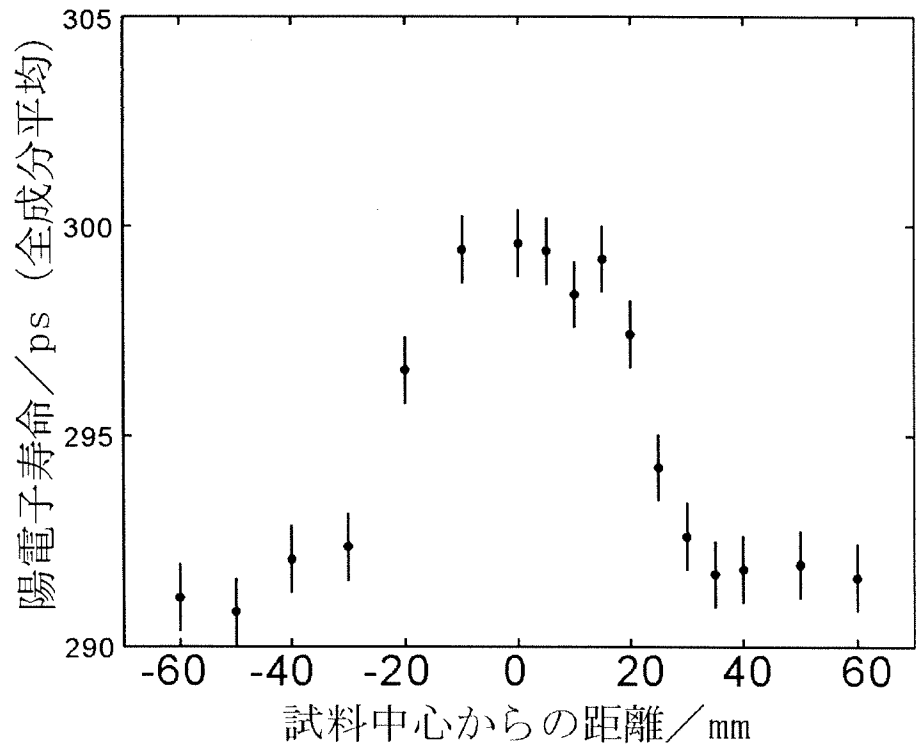


図7 陽電子寿命測定の結果2

図6, 7を見ると、疲労損傷の加わっている部位の陽電子寿命は 300ps 程度となり、加わっていない部分の 292ps 程度より明らかに大きいことが分かる。これにより、陽電子寿命測定によって、疲労損傷による格子欠陥が検出可能なことが分かった。

今後は、対象範囲を更に広げ、実用材料の診断が可能になるように、データベースの整備などを含めた研究を行って行きたい。

#### 4. 結論

デジタルオシロスコープを用いて新しい陽電子寿命測定装置を開発し、高い性能(最高分解能 120ps)を達成した。これを疲労損傷の試験に応用し、金属疲労が検出可能であることを示した。

#### 参考文献

[1] H.Saito, Y.Nagashima, T.Kurihara, and T.Hyodo, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 487 (2002) 612–617.