

マグネット制動付回転陽極X線管

Rotating Anode X-ray Tube with Magnetic Damper

高 野 静 夫*
Shizuo Takano

要 旨

診察用回転陽極X線管の回転寿命を延ばすために、X線管の陽極内に永久磁石を取り付け、X線管自身でX線撮影終了後の陽極の惰性回転を制動できる、マグネット制動付回転陽極X線管を考案して製品化した。このX線管は一般の回転陽極X線管と同様に取り扱うことができることと、X線撮影に使用した場合の回転寿命がいっそう長くなることの特長を持っている。

1. 緒 言

診察用X線装置に多く用いられている回転陽極X線管の回転寿命をいっそう向上した“マグネット制動付回転陽極X線管”を開発したので、その構造効果などについて紹介する。

一般に回転陽極X線管(以下X線管という)は、封じ切りの高真空ガラス容器中に軸受を使用し、回転する陽極をささえているが、この軸受は高真空中でしかも約300℃の高温で使用されるので、その材質の選定、構造ならびに潤滑方法などに高度の技術を必要とする。これらに関しては、今まで各メーカーの研究により、実用的な性能を持つ軸受が得られるようになったが、さらにいっそう回転寿命(軸受が不良になるまでに何回X線撮影ができるかということ)を長くして、X線管の長寿命化を図ることは、きわめて重要である。

回転寿命を長くするために、X線撮影(以下撮影という)終了後の陽極の惰性回転を制動して早く停止させる方法も、従来から一部のX線装置に用いられている。通常、撮影は数秒以下の短時間で終了するが、撮影終了後も陽極は惰性により数分ないし数十分の長い間回転を続ける。そのためこの惰性回転を制動して、回転を早く停止させれば、それだけ軸受の使用寿命を長くすることができる。

この惰性回転を制動する手段として、従来から一般に行なわれているものに、X線管の外部に取り付けたステータコイルに、回転を停止させる方向の電流を流す方法がある。この方法は惰性回転制動の効果を果たすことはできるが、制動回路が複雑になること、制動電流がステータコイルに流れるために、X線管容器に余分な温度上昇をもたらすなどの欠点がある。このような外部回路によらず、X線管自身でなんらかの方法により、惰性回転を制動できる方法があれば、使用上非常に便利である。筆者らは、X線管の陽極の内側にマグネット(永久磁石)を組み込み、これから出る磁力線の影響によって、自動的に陽極の惰性回転を制動することができるマグネット制動付回転陽極X線管(図1参照)を考案し⁽¹⁾、製品として実用化することができた⁽²⁾⁽³⁾。これにより、今まで約20分の惰性回転時間が、1～2分に短縮されたので、撮影に使用した場合の回転寿命は格段と向上した。

2. マグネット制動付回転陽極X線管の構造

2.1 初期の構造

図2にマグネット制動付回転陽極X線管の陽極構造を示す。四極のマグネットを固定軸に取り付け、マグネットのN極およびS極を、小間隔を隔ててロータの磁性部と相対するようにする。このようにした場合、マグネットのN極から出た磁力線は、小間隔を経てロータ磁性部にはいり、そして再び小間隔を経てマグネットのS極

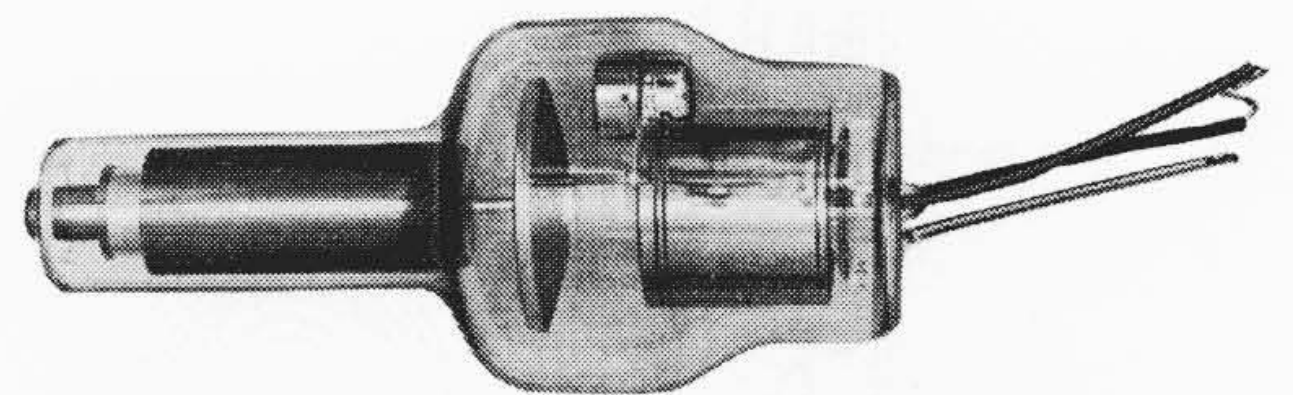


図1 マグネット制動をした回転陽極X線管 H7073

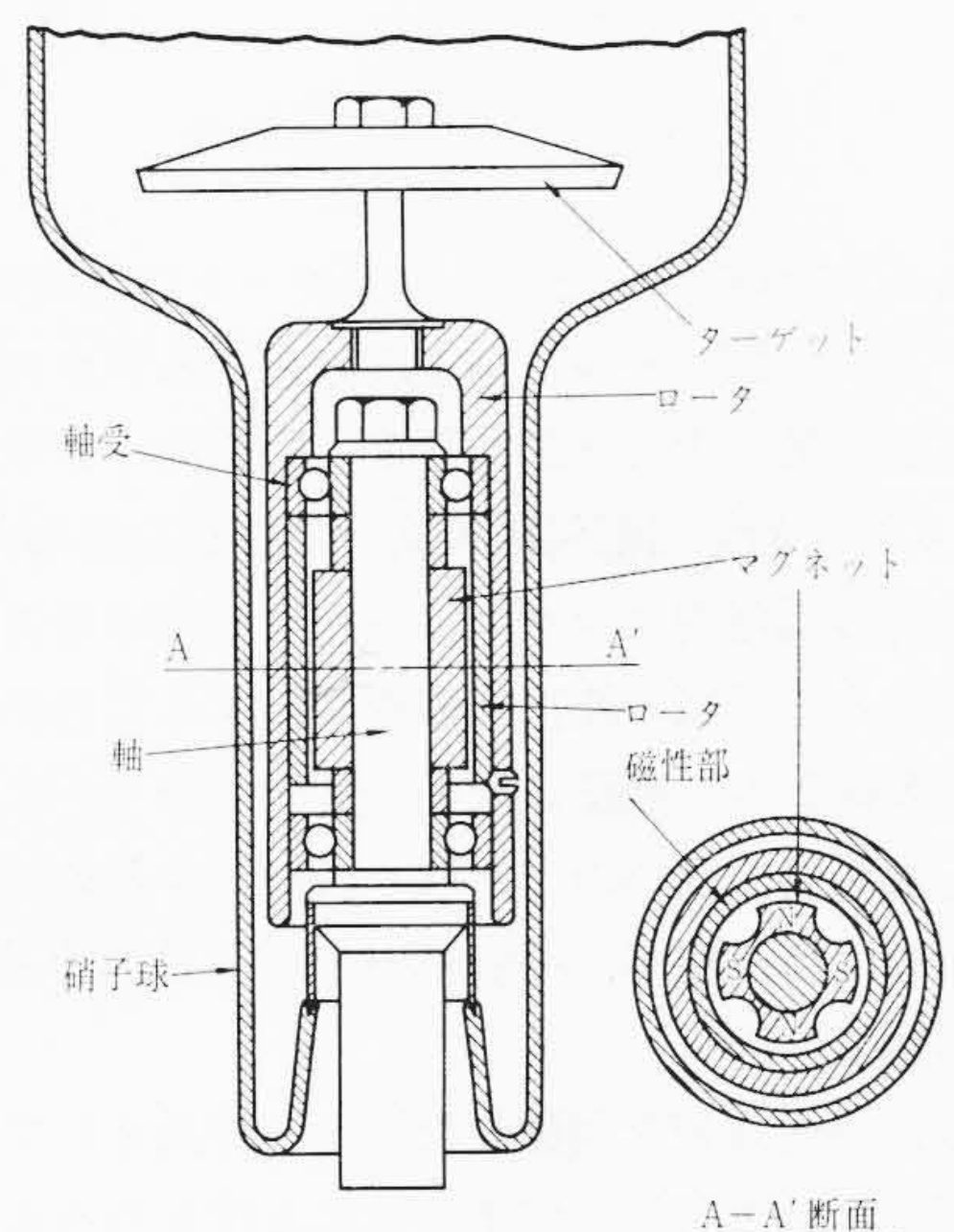


図2 マグネット制動付回転陽極X線管の陽極の構造

に戻ってくる。ロータが回転している場合、ロータ磁性部は上記の磁力線を切って回転するので、磁性部内に渦電流が生じ、その渦電流と磁力線の作用によって、ロータ内に回転と反対方向の電磁力が生じて、惰性回転を制動する。またマグネットの磁極面と、それに相対するロータ磁性部との間に働く単なる磁気力も、惰性回転の制動に一部役だっている。

なお、このマグネットによる制動力は、陽極を回転起動する際も制動力として働くので、回転起動時間(ステータコイルに電流を流し始めてから、陽極が規定の回転数に達するまでの時間)を長引かせることになるが、実験の結果約1秒程度の回転起動時間には、ほとんど影響しないことがわかった。これは惰性回転時間を数十秒程度までに短縮するマグネットの制動力は、ステータコイルの起動トルクに比べて、非常に小さいからである。

ここに使用したマグネットは、X線管を製作中または使用中に約500～300℃の高温に上昇するので、このような場合でも磁性が劣下しないことが必要である。またマグネットは高真空中で使用されるため、ガス放出があってはならない。さらにまた、陽極の惰性回転を制動して1～2分程度で停止させるので、相当大きい磁束密度を

* 日立製作所茂原工場

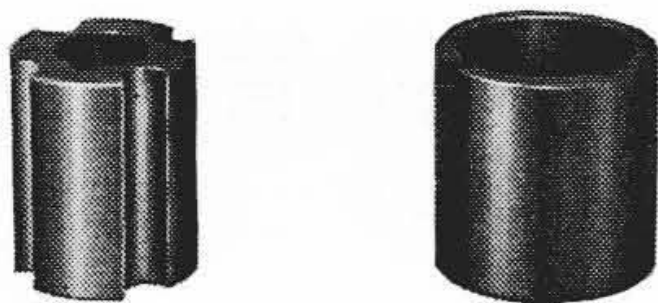


図 3 マグネット

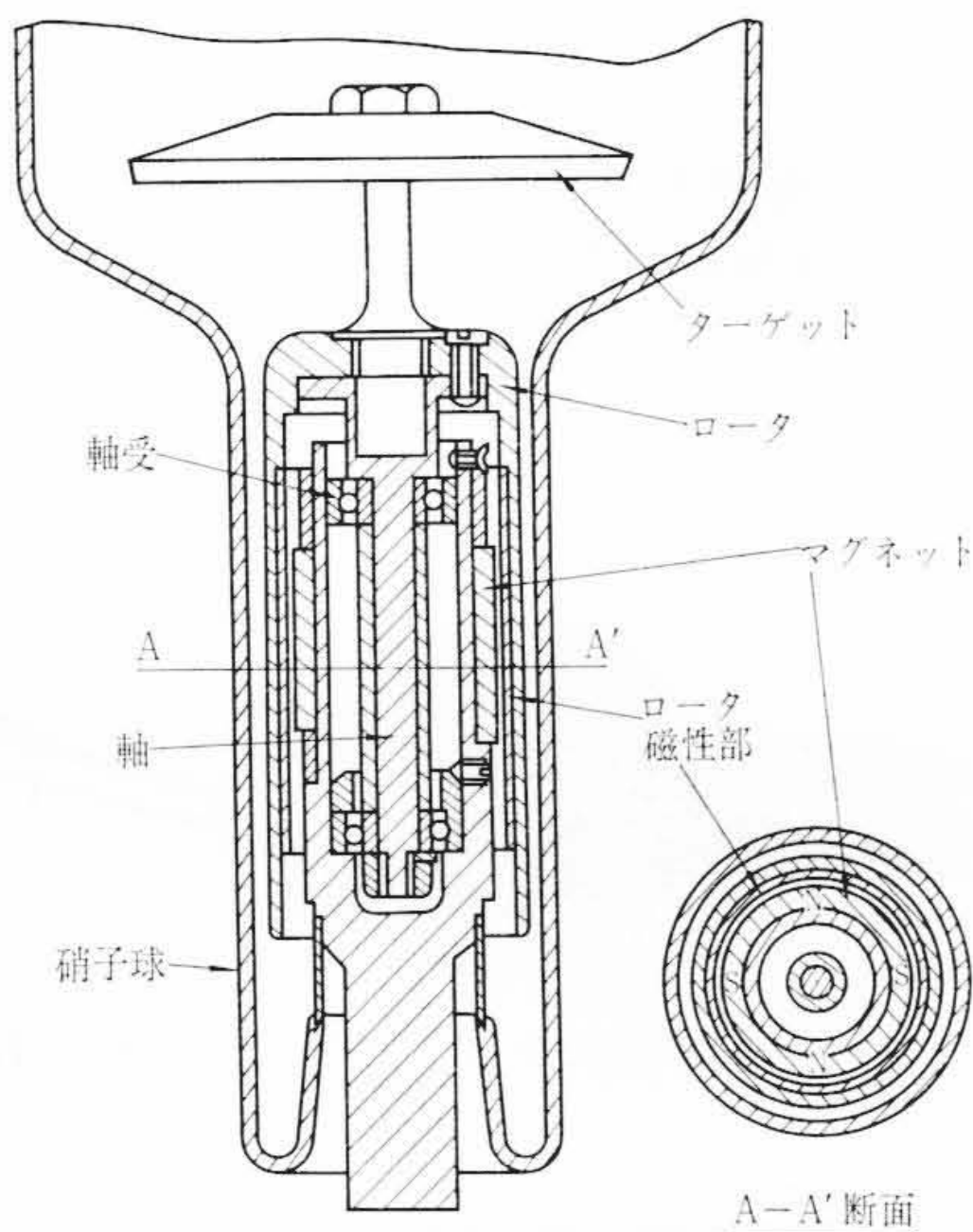


図 4 改良形の陽極構造

持つ必要がある。これらのことからマグネットは鉄のほか、アルミニウム、ニッケルおよびコバルトを主成分とするアルニコ磁石で製作して、その目的を果たすことができた。図 3 にマグネットの写真を示す。マグネット制動付回転陽極 X 線管の特長を改めて列挙すると、

- (1) X 線管の陽極内にマグネットを取り付けることにより、X 線管自身で陽極の慣性回転を制動することができる。このため X 線管外の回路は制動に関係がなく、これについては考える必要がないので、取り扱いがきわめて簡単である。
- (2) 外形および外観が、一般の回転陽極 X 線管と同じで、互換性がある。
- (3) 一般に慣性回転を制動した場合の特長として、撮影の場合の回転寿命が著しく向上することはもちろんであるが、慣性回転の時に生ずる騒音の時間も短くなるので、わずかの騒音もきらう病院には都合が良い。

2.2 改良形の構造

軸受の回転寿命をいっそう向上させるために、さらに改良を加え、現在は図 4 に示す構造が、もっとも実用的なものとして製品化されている。

図 4 の構造が、図 2 と異なるおもなところはつぎのとおりである。

- (1) 軸受の外径が小さくなった。
- (2) 軸受の使用方法が変わった。すなわち、図 2 の場合は軸受の内輪が固定し外輪が回転するが、図 4 の場合は内輪が回転し外輪が固定されている。
- (3) 軸受の変更に伴いマグネットの形状も変わった。すなわち、マグネットは外径は大体同じであるが、形状が円筒形になった。

図 2 の軸受と図 4 の軸受を比較すると、外径寸法が異なるが、大体それに比例して軸受の球および保持器の回転円の直径も異なっている。そのため陽極の回転数を同じとした場合、軸受の球および保持器の回転円周上における速度(周速度とする)は、図 2 の場合より図 4 の場合のほうが小さい。また一般に同じ外径を持つ同じ形状の軸受でも、内輪を固定し外輪を回転する方法で使

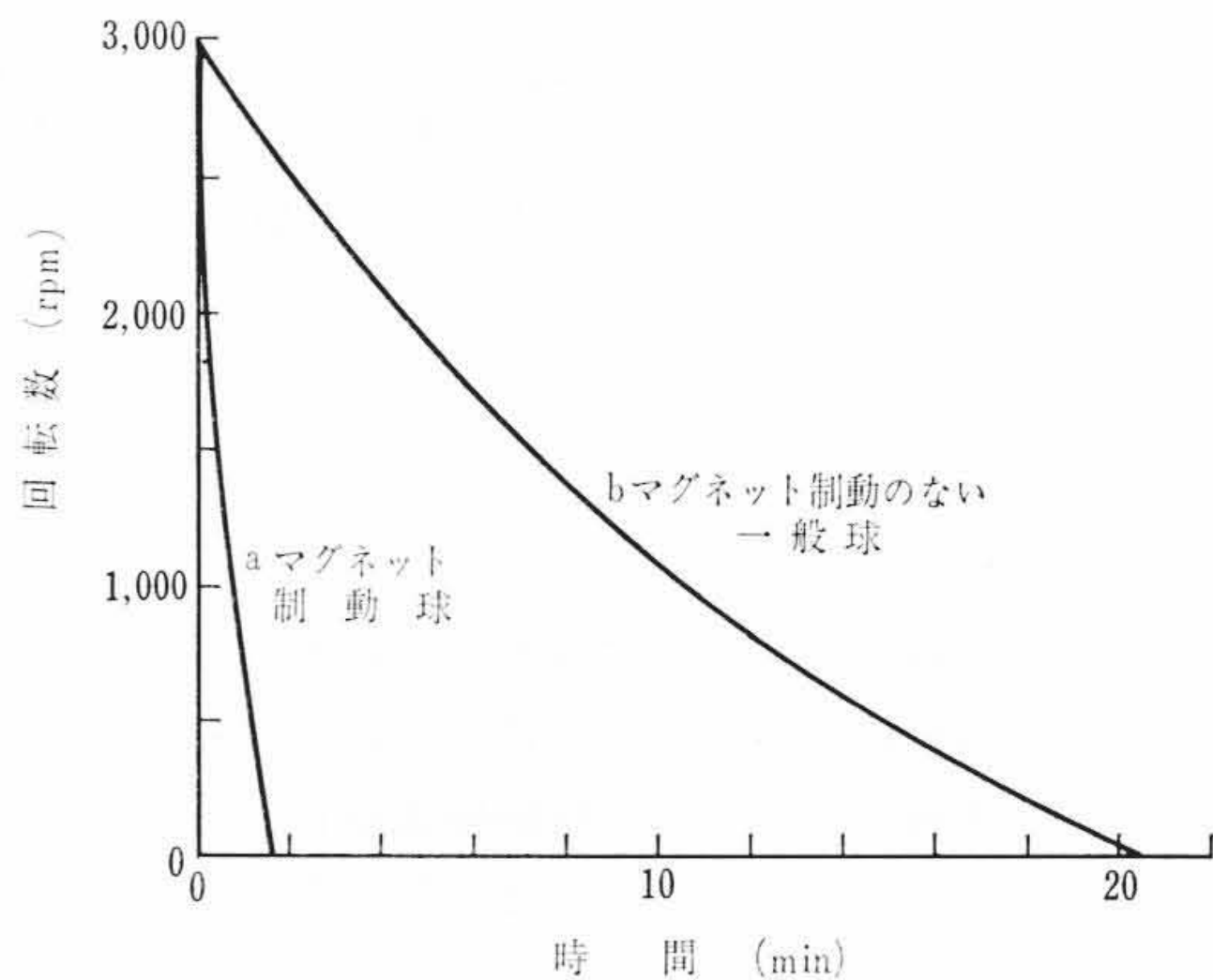


図 5 慣性回転中の回転数変化の比較

輪を固定し内輪を回転する方法で使

つぎにマグネットであるが、軸受の外径を小さくした場合でも、マグネットは制動効果を多く出すために外径がなるべく大きいほうが良い。そのためマグネットの形状を図 2 の場合と異なって円筒状にした。これの着磁方向は図 2 の場合と同様であり、また制動効果も同じである。

3. マグネット制動の効果

3.1 マグネット制動による回転寿命向上の効果

マグネット制動に限らず一般に陽極の慣性回転を制動した X 線管は、制動しないものに比べて、撮影一回当たりの軸受の回転数がなくて済むので、回転寿命が延びる。どのくらい延びるかということ

を、概算してみる。これは X 線管の使用ひん度によって違ってくる問題で、たとえば集団検診の胸部間接撮影のように、毎分 3 人位の割合で引き続き撮影する場合は、慣性回転を制動しても回転寿命はあまり変わらないが、一般の開業医院のように、5~6 分以上たってからつぎの撮影を行なう場合は、制動の効果が大きく出てくる。計算例として 6 分間隔で撮影する場合について計算してみる。

図 5 はマグネット制動した X 線管と、制動しない X 線管のそれぞれ標準品と考えられるものについて、慣性回転中に回転数がどのように下がるかを実測した結果である。マグネット制動球は図 5 の a 曲線のようになり、慣性回転時間が 1 分 30 秒であるが、この図 5 から求めると、1 回の慣性回転で軸受は約 2,000 回転する。1 回の撮影の内には慣性回転のほかに、陽極の回転起動時間約 1 秒と、撮影時間約 0.1~0.2 秒の間の軸受の回転も含むが、このほうは約 50 回転で少ないので省略してもさしつかえない。一方マグネット制動のない普通球の慣性回転は、図 5 の b 曲線のようになり、20.5 分かかって停止する。この曲線から求めると、軸受は慣性回転の始めの 6 分の間に、約 13,700 回転する。すなわち 6 分間隔で撮影した場合、撮影 1 回当たりの軸受の回転数は、マグネット制動球が 2,000 回転であるのに対し、マグネット制動してない球は 13,700 回で、その比は約 1:7 になる。一般の軸受で言われているように、軸受の寿命は総回転数で決まるとすると、X 線管の場合マグネット制動をすることにより、前記の使用ひん度のところでは、回転寿命が約 7 倍

に延びることになる。実際の場合は回転起動のときの急な衝撃も軸受の寿命に影響するので、この分をいくらか割引いて考えなければならぬ。

3.2 慣性回転の計算式

X線撮影の負荷が終わり、ステータコイルの電流が切れた時の陽極の回転の角速度を ω_m 、陽極回転部分の慣性能率を I とすると、

$$E = \frac{1}{2} I \omega_m^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

のエネルギーを持って陽極は回転しているが、制動装置のない場合はこのエネルギーは軸受の摩擦によって消費されて回転は停止する。またマグネット制動のある場合は、このエネルギーの多くはロータ内に生じた電磁力によって消費され、一部分だけが軸受の摩擦によって消費されて回転は停止する。

回転するロータに働く軸受の摩擦トルクを L_1 、またマグネット制動のトルクを L_2 とすると、これらのトルクが $\Delta\theta$ なる小回転の間にした仕事 ΔW は

$$\Delta W = (L_1 + L_2) \Delta\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore \frac{dW}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{d\theta}{dt} \\ = (L_1 + L_2) \omega \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし ω は角速度、 t は時間である。また (1) 式より

$$\frac{dE}{dt} = I\omega \frac{d\omega}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

しかるに

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{dE}{dt} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって (3)、(4) および (5) 式より

$$\frac{d\omega}{dt} = - \frac{L_1 + L_2}{I} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで L_1 は一定

$$L_2 = \alpha \omega \quad \dots\dots\dots (7)$$

とすると、

$$\frac{d\omega}{dt} = - \left(\frac{L_1 + \alpha \omega}{I} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式を解くと

$$\omega = \left(\omega_m + \frac{L_1}{\alpha} \right) e^{-\frac{\alpha}{I} t} - \frac{L_1}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これが慣性回転中の運動方程式である。

回転が停止するまでの時間を t_s とすると、(9)式より

$$t_s = \frac{I}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha}{L_1} \omega_m + 1 \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。

(9)式において、マグネット制動トルクの比例常数 α は、マグネットの形状、磁束密度、ロータ磁性部の電気電導度などに関係する値であるが、この α を求める計算は少し複雑になるので、ここでは省略する。

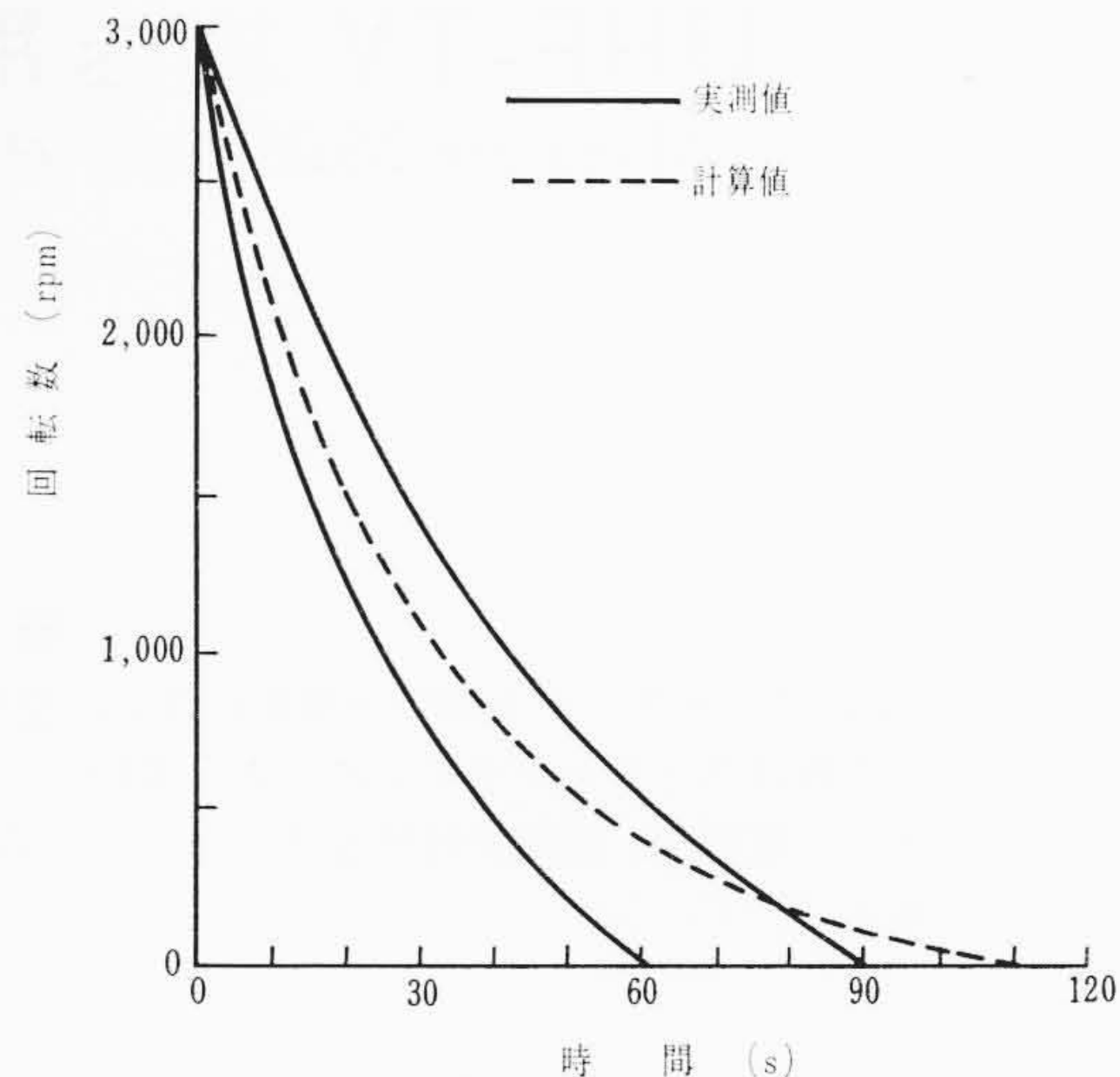


図6 マグネット制動付回転陽極X線管の慣性回転中の回転数変化

図6はマグネット制動付回転陽極X線管が、慣性回転中に回転数がどのように下がるかを示す。実線は実測値で、慣性回転時間が60秒と90秒の二つの例を掲げた。また点線は計算値で、(9)式の α の値に一つの例を与えて求めた値である。実測値と計算値の曲線の形状を比較すると、回転数(角速度)が多いうちは似ているが、回転数が少なくなると計算値のほうが制動が効いていないことがわかる。これは計算に際し、マグネットによる制動力は回転数に比例するとしたが、実際の場合はそのほかにマグネットとロータの間で引き合う単なる磁気力も加わるので、回転数が少なくなっても制動効果があるものと考えられる。

4. 結 言

以上マグネット制動付回転陽極X線管の構造および効果などについて説明したが、このX線管は管球自身で陽極の慣性回転を制動できる特長を持っているので、取扱上きわめて便利である。日立製作所の回転陽極X線管は、軸受に潤滑剤を特によくきかせてあるので、撮影終了後の慣性回転時間が一般に長い。これにマグネット制動を実施することにより、回転寿命向上の効果を顕著に出すことができた。このマグネット制動付回転陽極X線管の製品は、すでに顧客に使用され、良好な成績を納めている。

終わりに、本X線管の開発にあたり種々有益なご意見を賜ったユーザー各位、ご協力いただいた東北金属工業株式会社、住友特殊金属株式会社および日立金属株式会社熊谷工場の関係者各位ならびに日立製作所中央研究所谷口主任研究員に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 特許第407924号(日立)
- (2) 高野：第20回日本放射線技術学会総会講演，(昭39-5)
- (3) 高野：第23回日本放射線技術学会総会講演，(昭42-4)