

# Gd-Coアモルファス薄膜の磁気光学カー効果

## Magneto-optical Kerr Effect of Gd-Co Amorphous Films

南川裕行\*

内山 晋\*\*

Hiroyuki MINAMIKAWA Susumu UCHIYAMA

The magneto-optical Kerr effect of Gd-Co films prepared by rf magnetron sputtering is investigated for films with Gd concentration from about 10% to 50% within a wavelength range of 400~1000 [nm]. The Kerr rotation  $\theta_K$  is well approximatd by a formura  $\theta_K = C_{Co} |M_{Co}| + C_{Gd} |M_{Gd}|$  within a compositional range studied, where  $C_{Co}$  and  $C_{Gd}$  are Kerr rotation coefficients depending only on the wavelength and  $M_{Co}$  and  $M_{Gd}$  are subnetwork magnetizations of Co and Gd, respectively. The spectra for  $C_{Co}$  and  $C_{Gd}$  are determind, which depend only slightly on the wavelength with values of about -0.3 [deg/T] for  $C_{Co}$  and -0.045 [deg/T] for  $C_{Gd}$  at 600 [nm]. It is also found that the magneticmoment of Co atom in the Gd-Co alloy decreases very slowly with increasing Gd concentration, the fact which is far different from the cases of other RE-Co films of RE=La, Ce, Pr, Nd, Sm, Tb, Dy, Ho, Er, and Tm.

### 1. はじめに

Gd-Co 薄膜を基板に負のバイアスをかけながらスパッタリング法で作製すると、磁化が膜面に垂直となるいわゆる垂直磁化膜が実現される。1970~1980年代、磁気バブルメモリが超高密度補助メモリとして脚光を浴び、これに磁性ガーネット膜が使用されていたが、基板のGGGが高価なため、より安価な材料としてGd-Coが注目された<sup>1)</sup>。しかし、バブルメモリは価格の面でも密度でも半導体の追上げに敗退して、Gd-Coを用いたバブルメモリも実用化には至らなかった。代わって光磁気メモリ媒体としての利用研究が始まったが、ここでは同系統の希土類(RE)-鉄族(TM)アモルファス膜であるTb-Feにその立場を奪われて<sup>2),3)</sup>、工学的研究の場から去ることとなった。しかしながら、同じRE-TM薄膜の中で、Gd-Coは他の材料と少し違った特性を示し、物理的には興味深いものがある。その一つは、RE-Co合金では、Coの原子磁気モーメントがREの組成の増加と共に急速に減少するのに対して、Gd-Coの場合には事情が違うので

はないかと推測される点である。また、磁気光学カー効果において、Gdを除く重RE-TM膜では、REとTM両副格子磁化からの寄与の符号が異なるのに対して、Gdでは同じと推定されている点でも特異である<sup>4)</sup>。本研究は、このようなGd-Co薄膜の特異性を、従来とは別の角度から明らかにすることを目的として始められた。

### 2. 実験の方法

#### 2・1 薄膜作製法

本研究に使用したGd-Co薄膜は、直径10[cm]のCo円盤ターゲット上に10×10[mm<sup>2</sup>]の金属Gdチップを並べた複合ターゲットを用い、本学超薄膜作製室の高周波二極スパッタリング装置を用いて作製された。スパッタ条件の詳細は、別の報告に記載したので<sup>5)</sup>、ここでは省略する。

#### 2・2 カー回転角測定法

カー回転角は、分光垂直カー効果測定装置(日本科学エンジニアリング(株)製造)を用いて測定した。この装置の測定系のブロック図は、図1に示すようである。ハロゲンランプから出た光は、モノクロメータによって単色化され、ポラライザーを

\* 愛知工業大学大学院電気電子工学専攻学生

\*\* 愛知工業大学情報通信工学科 (豊田市)

経て直線偏光となり, 試料面で反射された後アナライザに達する。ここで光の約半分は反射されて参照光Bとなる。残りの光はアナライザを通過して, カー回転角に比例した光強度の変化を受け, この信号をAとする。光A, B共に光検出器によってその強度に比例した電気信号に変換され, 差動増幅器から割算器につながる。差動増幅器は信号(A-B)を増幅するが, これはカー回転角に丁度比例するように光量A, Bを調節しておく。すなわち, 磁化のないときに出力(A-B)が0となるように調節する。もう一つの差動増幅器では信号(A+B)を増幅し, 割算器で(A-B)/(A+B)を計算する。(A+B)で割るのは, 光源の強度変動や試料表面の反射率の変化による出力信号の変化など, 各種の雑音を打ち消すためである。カー回転角の絶対値は, アナライザを実際に回転して校正する。

### 3. 実験結果

#### 3・1 膜の結晶性

膜の結晶性はX線回折により調べたが, Gd~13%以上では, 結晶性を示すピークは全く現われず, アモルファス材料に特徴的なハローパターンのみが観察され, X線的にはアモルファスであることが確かめられている。

#### 3・2 磁化曲線

図2に, 本研究で使用したGd-Coアモルファス

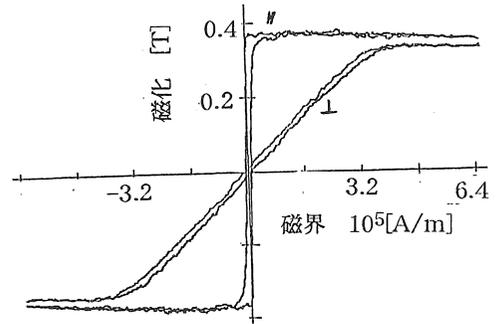


図2 Gd-Co薄膜の磁化曲線の例

膜の磁化曲線の代表的な例を示した。膜面に平行に磁界を加えた場合の||で示す磁化曲線は, 磁化容易軸方向に磁界を加えた場合に軟磁性膜で見られる典型的な形である。磁化反転は磁壁移動により行われ, その保磁力が約0.5kOe= $4 \times 10^4$ [A/m]であるのが見られる。この特性は, 磁界が膜面内であれば, その向きには関係なく, 面内では異方性が小さいことを示した。磁界を膜面に垂直に加えた場合は, 記号⊥で示したような磁化曲線が得られるが, これは一軸磁気異方性を持った材料で, 困難軸(容易軸に平行)方向に磁界を加えた場合に観測されるこれも典型的な磁化曲線である。

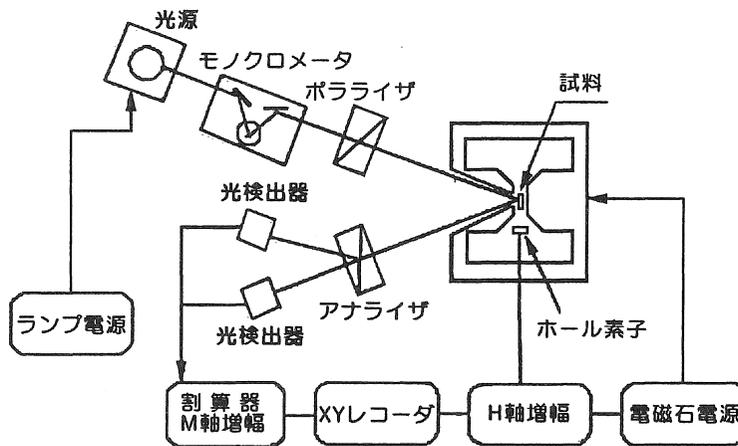


図1 極カー効果測定装置のブロック図

つまりこの図は、測定試料が膜面を容易面、膜法線を困難軸とする一軸異方性膜であることを示している。磁化が膜面に垂直となるいわゆる垂直磁化膜では、 $\parallel$ と $\perp$ の形が反転する。Gd-Coでは、基板に負のバイアスを加えてスパッタした補償組成近傍の膜で垂直磁化膜が得られるが、ここでは基板にバイアスを加えなかったため、すべての膜が面内磁化膜であった。

### 3・3 飽和磁化の組成依存性

この研究で作製したGd-Co薄膜が、他の研究室の試料と同じであるか否かを確かめる目的で、室温における飽和磁化の組成依存性を測定したが、その結果を示したのが図3である。ここで、黒丸●で示したのが本実験の結果で、白丸○で示すのがChaudhariら及びTaylorらの結果である<sup>1)6)</sup>。Gd-Coの飽和磁化は、Gd組成が増すにつれてその濃度に対して直線的に減少し、ある組成(本実験では約28%)でほとんど0の極小を示した後、再び直線的に増加する。しかし、この増加は間もなく鈍ってGd~40%のところで極大を示し、その後は再び減少に転ずる。ここで、飽和磁化が0となるのは、Gd-CoではGdとCoの原子磁気モーメントが反平行に向いていて、GdとCoの副格子磁化が打ち消し合うためであり、この組成を補償組成と呼んでいる。本実験と文献における補償組成の相違については後に考察する。

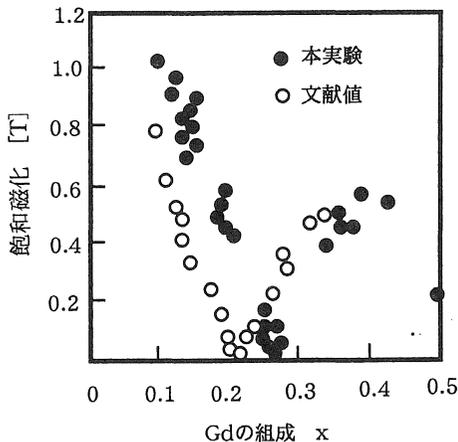


図3  $Gd_xCo_{1-x}$  膜の飽和磁化の組成依存性

## 3・4 磁気光学カー効果

### 3・4・1 カーヒステリシスループ

カー回転角は磁性膜に加える磁界に依存するが、この関係は通常カーヒステリシスループと呼ばれている。図4に示すのは、磁界を膜面に垂直に加えた場合のカーヒステリシスループであるが、原点付近に現われるヒステリシスループは小さく原点付近を拡大しないと見えない。使用した装置では、光は膜法線より7.5度ずれていて、この影響のために本来飽和を示す部分、つまり磁界の絶対値がおよそ5[kOe]= $4 \times 10^5$ [A/m]以上である傾きを持っているのが見られる。この部分をコンピュータによって水平に補正し、飽和カー回転角を決定した。このカーヒステリシスループの形状は、先に示した磁界を膜面に垂直に加えた場合の磁化曲線と相似形になる。つまり、カー回転角は磁化に比例している。しかしながら、飽和カー回転角は、飽和磁化に比例しないことが昔から指摘されていて、このことは考察の項で触れる。物理的にも工学的にも興味があるのは物質定数である飽和カー回転角であり、しばしば断わりなしに飽和カー回転角から飽和の文字を削って、単にカー回転角と呼ぶ。本論文でも、今後書かれているカー回転角は飽和値を示すものとして了解して頂きたい。それも、実験装置から明かなように、磁化が膜面に垂直となる極モードの飽和カー回転角である。

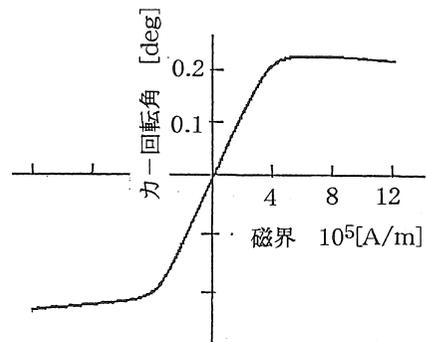


図4 カーヒステリシス曲線の例  
(試料は $Gd_{0.19}Co_{0.81}$ )

3・4・2 カースペクトル

カー回転角は光の波長に依存し, この波長依存性はカースペクトルと呼ばれる。図5は, 波長400~1000 [nm] のGd-Co薄膜のカースペクトルである。波長の短いところで絶対値が増加の傾向を見せてはいるが, 波長依存性が少ないのがGd-Coの特徴とも言える。ちなみに, ここには示されていないが, Tb-TM膜の場合には, 短波長側で著しいカー回転角の減少が見られ, 光磁気メモリ媒体としては, 短波長光を利用した高密度記録の障害となっているのと対照的である。

図中の種々の記号は膜組成の違いに対応しているが, Gd26.5%まではその符号が-で, 35.9%となると突然符号が+に変わっているが, この点の詳細は次の項および考察で触れることとする。注目点としては, このカー回転角の符号の反転は, 補償組成を境としていることである。

3・4・3 組成依存性

前項で指摘したように, Gd-Co薄膜のカー回転角は, 補償組成を境に反転するので, この点を明かにするために, 図5のデータを組成依存性にプロットし直したのが図6である。ここで, カー回転角の符号は, 通常はTMに対して-としているので, ここでもその慣習に従っている。つまり, Gdの組成の小さいところでは, カー効果への寄与はほとんどCoから来ているのでその符号を-としている。そして, Gdの組成が補償組成を越えてさらに増えると, その符号は+に変わる。しかし, 図3に示した飽和磁化のように0点を經由することなく, 大きさは不変のまま符号だけが突然変わるのが注目され

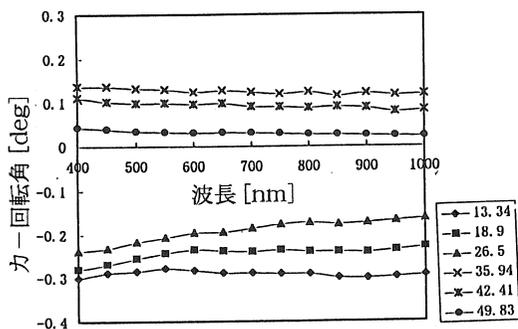


図5 Gd-Co薄膜のカースペクトル (右側凡例の数字は組成[at%])

る。この説明についても, 考察の項で述べる。

符号を別にしてその絶対値に注目すると, カー回転角はGd濃度に対して単調に減少している。このことは, カー回転角に及ぼすGdの効果がCoに比べて非常に小さいことを示唆するものである。

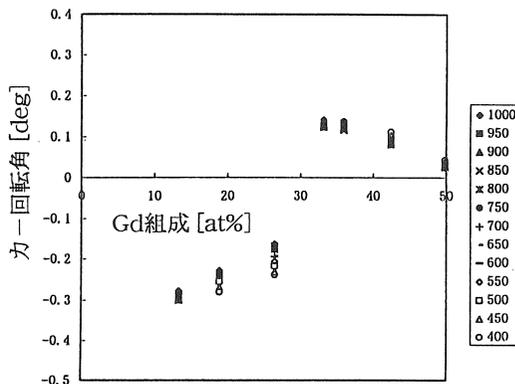


図6 カー回転角の組成依存性 (凡例の数字は測定波長)

3・4・4 酸化保護膜の効果

RE-TM膜は酸化し易い材料であるので, 当初はGd-Co成膜直後に, 優れた酸化保護膜と言われていた窒化シリコンSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜をスパッタ蒸着して, 基板側および保護膜側からカー効果を測定し, Gd-Co膜の性質を算出しようとした。しかし, 基板側からの測定では, ガラスによるファラデー効果の寄与が非常に大きくて, Gd-Coの寄与の推定に大きな誤差が含まれることが分かった。(この方法はカー回転角の大きなMnBiの場合には困難でなかったものである) また, 保護膜側からの測定では, 図7に例を示すように, 多重反射によるカー効果増強が行われ, これを解析してGd-Co膜の特性を推定することも厄介な仕事であることが分かった。そこで, 表面の酸化効果は避け難いものとして, 成膜後できるだけ素早くカー効果を測定したのが, 図4の結果である。この保護膜の効果についても, 後に若干の考察を行う。

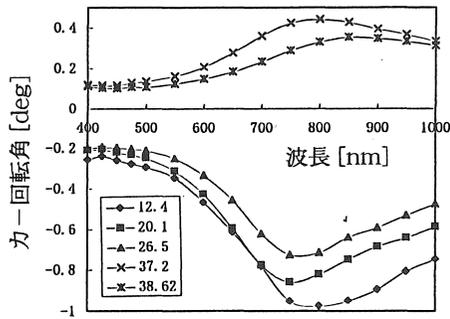


図7 表面に保護膜のある場合のカースペクトル (保護膜は $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 厚さ100[nm], 厚さが変わるとピーク位置はシフトする。)

#### 4. 考察

##### 4.1 飽和磁化の組成依存性

図3に示したGd-Co薄膜における飽和磁化の組成依存性は、次のように説明されている<sup>7)</sup>。この物質はフェリ磁性体で、Coの副格子磁化とGdの副格子磁化が反平行に向いているので、測定される飽和磁化の値 $M_s$ は次式で与えられることになる。

$$M_s = N | (1-x)\mu_{\text{Co}} - x\mu_{\text{Gd}} | \quad (1)$$

ここに、 $N$ は単位体積当たりの原子数、 $x$ はGdの原子組成、 $\mu_{\text{Co}}$ と $\mu_{\text{Gd}}$ はそれぞれCoとGdの原子磁気モーメントである。 $x$ が小さいときには、(1)式右辺の第1項が優先して、 $x$ の増加と共に $M_s$ は $x$ に対して直線的に減少し、 $(1-x)\mu_{\text{Co}} = x\mu_{\text{Gd}}$ となったときに $M_s = 0$ となる。これが補償組成である。 $x$ が補償組成より大きくなると、今度は $M_s$ は $x$ に対して直線的に増加することになる。ここで、 $\mu_{\text{Gd}}$ を理論値の $7.0\mu_B$ 、 $\mu_{\text{Co}}$ を $2.2\mu_B$  ( $\mu_B$ はボーア磁子)とすると、 $M_s$ が0となるのは $x = 0.24$ となる。これは絶対零度における話で、室温ではGdの副格子磁化はかなり下がる。この効果を平均場の理論によって計算し、室温の飽和磁化が0となる補償組成を  $x = 0.23$  と合わせるためには、 $\mu_{\text{Co}}$ や $\mu_{\text{Gd}}$ の値を上述の値より若干変える必要がある。

本実験では、補償組成が文献値よりずれているが、これはGdの部分酸化によるものと推定してい

る。別の報告<sup>5)</sup>に示したように、Yb-Co薄膜の組成の深さ分布測定では、かなりの酸素が膜中に含まれていることから、このように推定した。酸素の含まれない膜の作製に努力したが、この実験で用いたスパッタリング装置は他研究室と共同使用をしており、あるグループでは酸素を積極的に導入して酸化物超伝導体薄膜を作製しているので、このときに真空槽内に吸着された酸素を完全に取り除くことは与えられたマシンタイム内では無理なことから、止むを得ず実験を続けたものである。この補償組成のずれからGdの酸化の割合を推定すると約20%であり、Yb-Co膜のXPS分析と大体一致するものである<sup>5)</sup>。

補償組成より右側のGd磁化優勢の領域では、Gd組成が40%付近に極大が現われ、その後減少に転じるが、この部分についての説明はこれまで行なわれていない。すなわち、平均場の理論によって室温の飽和磁化の組成依存性を計算すると、Gd40%近傍までは理論と実験を合わせられるが、それよりGd濃度の高い部分については、交換積分の値を組成によって変えないと説明されず、不自然なものとなっている。

##### 4.2 カー回転角の組成依存性

カー回転角は磁化に比例するが、飽和カー回転角は飽和磁化に比例しないことは古くから注目され、色々議論されたが、現在の定説は次のようである。垂直磁化膜では、磁界依存性においては、磁化の値(図2)もカー回転角の値(図4)も磁界に平行な磁区と反平行な磁区の体積比=面積比に比例するので、相似形の特性を示すことになる<sup>8)</sup>。しかし、飽和回転角は、Gdの副格子磁化に比例する寄与と、Coの副格子磁化に比例する寄与の和であるとする、組成依存性も、ここには示されていないが温度依存性も共に良く説明される。これを式で表わすと

$$\theta_K = C_{\text{Co}} |M_{\text{Co}}| + C_{\text{Gd}} |M_{\text{Gd}}| \quad (2)$$

$$= N C_{\text{Co}} \{ (1-x)\mu_{\text{Co}} + x C_{\text{Gd}} \mu_{\text{Gd}} \} \quad (3)$$

となる。ここに $C_{\text{Co}}$ および $C_{\text{Gd}}$ はいずれも波長には依存するが磁化には依存しない定数で、 $| |$ は磁化の絶対値であることを注意するために書いたものである。この式を用いて補償組成を挟んでの

カー一回転角の符号の反転を説明すると、次のようである。さきに3・4・3項で述べたように、Gdからの寄与は小さく、 $C_{Gd} \ll C_{Co}$ と推定されるところから、簡単のためにGdからの寄与を無視して説明する。補償組成よりGdが少ない側では、磁界に平行な飽和磁化はCoの副格子磁化と平行で、カー一回転角の符号の約束により-である。補償組成より右側では、Gdの副格子磁化が優勢となり、これが磁界と平行になるので、Co副格子磁化は磁界と反平行に変わり、カー一回転角の符号が+に変わることになる。

4・3 カー効果に及ぼす副格子磁化寄与の分離

前項の組成依存性の説明は現在定説となっているものであるが、(2)式は補償組成付近におけるカー一回転角の組成依存性、あるいは補償温度を挟んでのカー一回転角の温度依存性を定性的に説明するものの、広い組成範囲にわたって成立する式か否かは未だ明らかにされていなかった。その理由は、これまでのRE-TM系材料のカー効果の研究が、補償組成であるRE≒20%近傍の膜に限られていて、その他の組成の膜に関するデータがほとんど存在しないところから来ている。本項では、(2)式に与えられている係数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ の決定を試みた結果について述べる。

(2)式によれば、二つの異なる組成における副格子磁化の値が分かれば、直ちに係数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ を決められるが、この推定が容易ではない。すでに述べたように、平均場の理論によって副格子磁化、したがって飽和磁化が計算され、実験結果を非常に良く説明できることが知られているが、この計算には五つのフィッティングパラメータがあり、同じ実験データの説明を異なるパラメータの組み合わせですることができる。詳しい議論を本論文でするスペースがないが、その一例を図8に示した。

さて、五つのパラメータのうち、RE-RE間の交換積分 $J_{GdGd}$ は、 $\sim 10^{-23}$ [J]またはそれ以下の値を仮定すれば計算にほとんど関係しない。 $J_{CoCo}$ は主にキュリー温度によって決まるので、高温のデータがあればかなり正確に決められる。そして、Gd-Coのような補償温度の現われる組成では、 $J_{GdCo}$ がこの温度によって決まる。このように見ると、交換積分は一義的に決められるようであるが、実

はキュリー温度近傍ではアモルファス材料特有の交換積分のゆらぎが温度依存性に利いてくるので、 $\pm 10\%$ あるいはそれ以上の不確定さが残る。 $J_{GdCo}$ は補償温度で決められるとは言っても $J_{CoCo}$ の影響を受けるので、やはり不確定さが残る。あと二つのパラメータは、 $\mu_{Co}$ と $\mu_{Gd}$ であるが、後者を理論値の $7.0 \mu_B$ とすれば、極低温での磁化測定値より $\mu_{Co}$ も定まる。しかしながら、 $\mu_{Co}$ がRE組成により変わることがその後知られるようになり、再検討する必要があるが、本報告のように広い組成にわたる極低温の飽和磁化のデータは報告されていないので、この依存性をどのように推定するかが最初の難問となった。

今回のこの研究では、交換積分については、RE-Co全般に渡って解析を行なった前報告<sup>9)</sup>より内挿法で決めた。 $\mu_{Co}$ の組成依存性については、一つは組成に依存しないとする古いモデル、もう一つは他の多くのRE種について成立するFriedel則に基づいた理論式

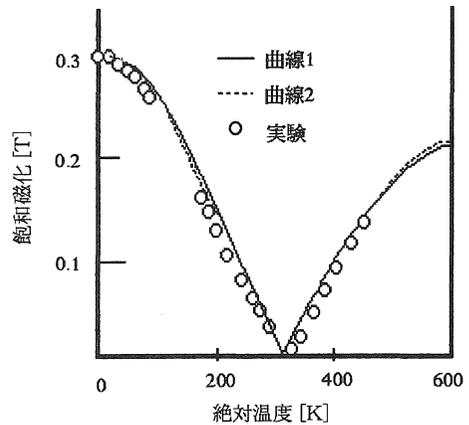


図8 平均場の理論による飽和磁化の温度依存性と実験との比較：曲線1と2はほとんど重なっているが、用いたパラメータは表1に示すように異なっている。この膜の組成はGd 22.5[at%]

表1 平均場理論計算に使用したパラメータの例

パラメータ	$\mu_{Co}$	$\mu_{Gd}$	$J_{CoCo}$	$J_{CoGd}$	$J_{GdGd}$
単位	[ $\mu_B$ ]	[ $\mu_B$ ]	$10^{-21}$ [J]	$10^{-22}$ [J]	$10^{-23}$ [J]
曲線1	1.465	7.00	1.50	2.33	2.00
曲線2	1.304	6.425	2.00	2.45	2.00

$$\mu_{Co}(x)/\mu_B = (1.9 - 4x)/(1-x) \quad (4)$$

を用いるモデルの二つについて計算した。そして、計算された結果を用いて測定された室温の飽和磁化とカー回転角をどの程度良く説明できるかで、どちらのモデルが信頼できるかを判断することとした。

次にこの判断方法について述べる。カー回転角の測定は、Gdが13.3, 18.9, 26.5, 33.2, 35.9, 42.4, 49.8%の7種類の試料について行なわれたので、これらの組成に対応する室温の副格子磁化を、 $\mu_{Co}$ を除くパラメータを同じとして平均場理論によって計算し(もちろんその差は室温の飽和磁化に一致する)、これを用いて異なる二つの組成の組み合わせ合計7×6/2=21組のすべてについて係数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ を計算する。(2)もしくは(3)式と(4)式が正しく、副格子磁化の計算も正確であれば、求められた $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ は同じでなければならない。実際には、実験誤差などもあるので、求められた $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ の値にはばらつきがでるが、その分散の大きさを信頼性を判断した。実際、(4)式を用いて計算した結果は非常に分散が大きかったので、この仮定は採用しないこととした。次に、 $\mu_{Gd}$ の大きさを一定でなく少しGd組成に依存して変わると仮定をゆるめて、計算を進めた。以下は最終結論とは言えないが、これまでに得られたベストの結果を示す。用いたパラメータは、 $J_{CoCo} = 1.5 \times 10^{-21}$  [J]、 $J_{CoGd} = 2.33 \times 10^{-22}$  [J]、 $J_{GdGd} = 2 \times 10^{-23}$  [J]、 $\mu_{Gd}$

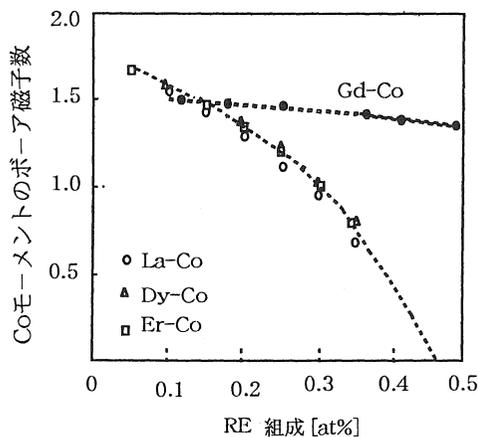
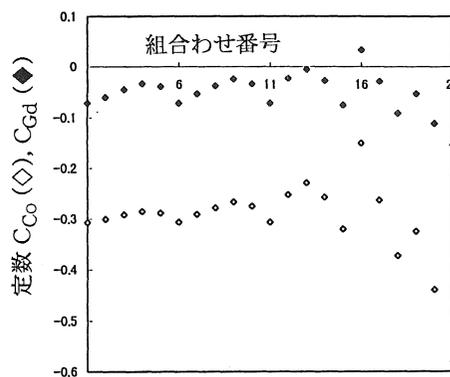


図9 計算に用いた $\mu_{Co}/\mu_B$ のGd組成依存性

$= 7.0 \mu_B$ で、 $\mu_{Co}/\mu_B$ は図9に示すような組成依存性を持つものとした。図10は、こうして計算された副格子磁化の室温の値を用いて、種々の組成の組み合わせから計算された $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ を示したものである。組成の近い、それもカー回転角の小さな高いGd濃度の膜同志の組み合わせでは大きなバラツキを見せているが、図10の組み合わせ番号1以下ではデータのばらつきは少なく、かなり信頼しても良いのではないかと判断される。図11は、同様の計算を種々の波長について行ない、大きく平均値より離れたデータは棄却し、残されたデータを平均して、その波長依存性を描いたものである。この結果によると、 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ 共に波長に対してわずかな変化を示すだけである。その符号はいずれも負であり、Gdの寄与はCoの寄与に加算的であることが分かる。しかし、その大きさは $C_{Co}$ が $-0.3$  [deg/T]であるのに比べて、 $C_{Gd}$ は $-0.05$  [deg/T]と約一桁も低い。図12は、以上で求めた $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ の値を用いて、カー回転角の組成依存性を計算したもので、当然のことながら、実験値を良く再現している。



x軸の値	組み合わせ	x軸の値	組み合わせ
1	13.30% 18.90%	12	26.50% 33.20%
2	13.30% 26.50%	13	26.50% 35.94%
3	13.30% 33.20%	14	26.50% 42.41%
4	13.30% 35.94%	15	26.50% 49.83%
5	13.30% 42.41%	16	33.20% 35.94%
6	13.30% 49.83%	17	33.20% 42.41%
7	18.90% 26.50%	18	33.20% 49.83%
8	18.90% 33.20%	19	35.94% 42.41%
9	18.90% 35.94%	20	35.94% 49.83%
10	18.90% 42.41%	21	42.41% 49.83%
11	18.90% 49.83%		

図10 異なる二つの組成の膜のカー回転角を用いて計算した定数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ のばらつき  
図の下に示す数表はx軸の数と組成の組み合わせの関係を示す

## 5. 討議

磁気光学効果は、現象論的に言って誘電率テンソルの非対角要素から生じるので、GdとCoのGd-Co合金内における誘電率テンソルを求めて、それぞれの寄与を論じなければならない。しかし、テンソル成分を全て求めるためには、カー回転角、カー楕円率、反射および透過係数の四つの量を、波長と組成を変えて測定する必要があり、極めて限られた研究室でないと実行は難しい。それに比べて、(2)の近似式が使えるとすれば、測定はカー回転角だけとなるので、光磁気記録媒体を開発している研究室であれば必ず備えている装置であり、係数 $C_{TM}$ 、 $C_{RE}$ の決定は可能である。この研究は、(2)式がかなり広い組成範囲にわたって成立することを明らかにしたもので、それなりの意義があるものと考えている。

少し問題となるのは、今回測定に使用した薄膜では、Gdが一部酸化されているという点で、折角解析したカー効果の副格子磁化寄与に関する係数が、そのまま利用できない可能性にある。著者らは、Gdの酸化物からの寄与はないものとして、単にGdの組成を変換するだけで実用に供せられると推定しているが、確かめは未だ行っていない。

成膜後速やかに測定したと言っても、表面に酸化層が作られていることは確実で、その効果もここでは調べられていない。カー効果のスペクトル

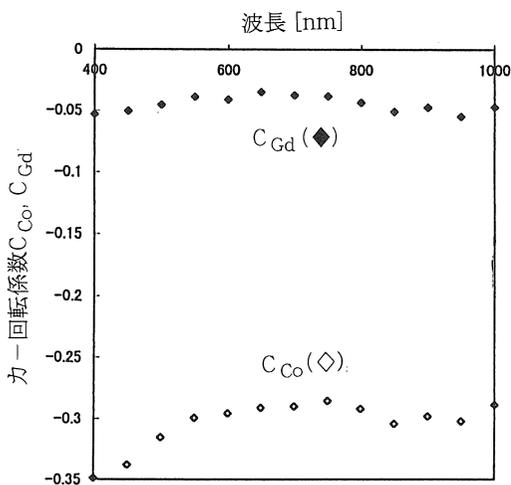


図11 カー一回転係数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ の波長依存性

は、大きな違いはないものの、論文毎に微妙な違いがあるのはこの所為ではないかと思われる。

この研究の結果得られたもう一つの大きな成果として、著者の一人がかねてから疑問に思っていたこと、それはGd-Coでは、Coの原子磁気モーメントがGdの添加によって他のREの場合のように急には減少しないのではないかという点について、今回図9に示す結果を得た。Gdの4f電子軌道は球形であり、磁気異方性に寄与しないという点でGdは他のREと異なっているということは理解し易いが、Coの磁気モーメントにあまり影響を与えないという結論はどのように説明できるか、今後の興味ある課題であるように思う。

酸化保護膜の窒化シリコンによるカー効果の増強は、この論文では説明を割愛したが、これまでの多くの論文で指摘されている通り、古典的な光学の理論でほとんど完全に説明される。この解析から判明したことは、作られた窒化シリコン膜の屈折率がおよそ1.8とかなり大きいことである。この保護膜は実際に光磁気メモリに実用化されているもので、その屈折率もすでに発表されているものと考え、本論文ではあえて触れることを避けた。

## 6. まとめ

本研究では、比較的研究の少ない、とくに幅広い組成にわたっての研究のないGd-Coアモルファス薄膜の磁気光学カー効果を詳細に調べた。その

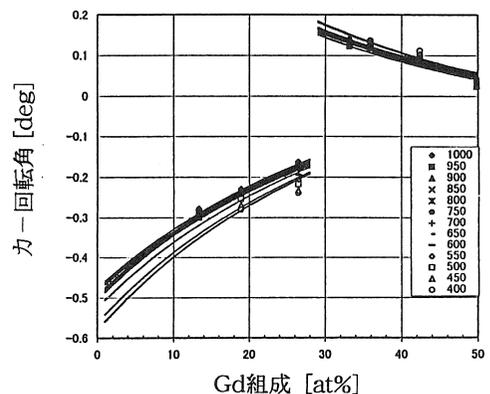


図12 カー一回転係数 $C_{Co}$ 、 $C_{Gd}$ を用いて計算したGd-Co薄膜のカー一回転角の組成依存性

結果, 補償組成及び補償温度近傍におけるカー回転角の符号変化を説明する近似式

$$\theta_K = C_{Co} |M_{Co}| + C_{Gd} |M_{Gd}|$$

が, Gdがおよそ10%~50%といった広い範囲にわたっても成り立つことを確かめ, 係数 $C_{Co}$ ,  $C_{Gd}$ のスペクトルを明らかにした。

また, ほとんどの希土類-鉄族アモルファス合金では, 鉄族の原子磁気モーメントが希土類の濃度に依存して変化するのに対して, Gdの場合にはほとんど依存しないと言う特異な性質を示すことを明らかとし, 物理的な問題を提示した。

#### 謝辞

本研究の遂行に当たり, 卒業研究の学生, 島崎浩史, 藤田茂の両君に試料作製, カー効果の測定, 実験結果の解析などにわたって多大の協力を頂いたことに感謝します。試料の磁気測定は名古屋大学工学部網島研究室の装置に依って行なわれました。測定の指導を頂いた同研究室の皆様には謝意を表します。膜の組成は, 同じく名古屋大学工学部材料機能工学科のEPMAによって分析された

もので, 担当された安達技官に深く感謝します。

最後に, 本研究に使用した磁気光学カー効果測定装置は, 文部省科学研究費補助金平成7年度一般研究(B)により作製されたもので, 平成8年度は基盤研究(B)の援助によって行なわれたものである。

#### 参考文献

- 1) P.Chaudhari, J.J.Cuomo, and R.J.Gambino: IBM J. Res.Dev., 17 (1973) 66
- 2) S.Matsushita, K.Sunago, and Y.Sakurai: Jpn.J.Appl.Phys., 15 (1976) 713
- 3) Y. Mimura, N.Imamura, and T.Kobayashi: IEEE Trans.Magn., MAG-12 (1976) 779
- 4) S.Uchiyama, X.Y.Yu, and S.Tsunashima: J.Phys.Chem.Solid, 56 (1995) 1557
- 5) 谷合徹也, 内山晉: 愛知工業大学研究報告, 32B (1995) ページ未定
- 6) R.C.Taylor and A.Gangulee: J.Appl.Phys., 47 (1977) 4666
- 7) J.Orehotsky and K.Schroder: J.Appl.Phys., 43 (1973) 2413
- 8) 内山晉: 愛知工業大学研究報告, 30B (1995) 81
- 9) R.Hasegawa: J.Appl.Phys., 45 (1974) 3109

(受理 平成9年3月21日)