

岩石磁気特性の測定と モデル計算との比較

東京工業大学 地球惑星科学科

指導教官 綱川秀夫

95-0261-9

伊藤理子

目次

概要	-----	1
1 序論	-----	2
2 モデル計算		4
2.1 磁気履歴曲線の作成		4
2.1.1 SD の計算	-----	4
2.1.2 MD の計算	-----	7
2.1.3 SP の計算	-----	8
2.1.4 合成	-----	9
2.2 H _{cr} の求め方		10
2.2.1 SD の残留磁化	-----	10
2.2.2 MD の残留磁化	-----	10
2.2.3 SD+MD の H _{cr}	-----	11
2.2.4 SP+SD の H _{cr}	-----	11
3 ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定	-----	12
4 結果		13
4.1 モデル計算の結果	-----	13
4.2 ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定結果	-----	14
5 考察		15
5.1 モデル計算		15
5.1.1 磁気履歴曲線	-----	15
5.1.2 Day Plot	-----	15
5.2 ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定	-----	16
5.3 測定とモデル計算との比較		17
5.3.1 1960 年溶岩	-----	17
5.3.2 1970 年溶岩	-----	18
5.3.3 1995 年溶岩	-----	18
5.3.4 1972,79 年溶岩	-----	19
5.3.5 1955 年溶岩	-----	19
6 まとめ	-----	20
7 謝辞	-----	22
8 参考文献	-----	23
9 図 A, B	-----	24
10 図 1~94	-----	25

概要

岩石磁気特性を測定して残留磁化のキャリアーを同定し、岩石の磁化の由来を明らかにすることは、古地磁気学測定結果の解釈において大変重要である。

この岩石磁気特性は磁区構造の影響を強く受ける。実験データに基づき 1977 年に Day が提唱した $M_r/M_s-H_c/H_c$ グラフ(通称 Day Plot)を用いて磁区構造を推定できるとされているが、その理論的背景がはっきりとしていない。例えば、この Plot によると岩石に含まれる磁性粒子は多くの場合、PSD(疑似単磁区)領域に入る。しかし、これが実際に PSD なのか、SD(単磁区)と MD(多磁区)との混合なのかはよくわからない。

本研究では、この PSD 領域にくるハワイ島火山岩試料の測定結果を、主に SD+MD、または SP(超常磁性)+SD の 2 種類の磁性粒子の混合で説明することを試みた。具体的には、SD、MD、SP のいくつかのパラメータを仮定してモデル計算をおこない、その磁気履歴曲線と Day Plot 上の混合曲線を作成し、ハワイ島溶岩試料の実測値と比較した。

溶岩試料は、ハワイ島の 1955,1960,1970,1972,1979,1995 年噴出溶岩であり、1960 年溶岩と 1970 年溶岩は massive な部分から、それ以外は表層の部分からとってきたものである。1960 年溶岩からは 25 本のコアサンプルについて、それ以外は 3~7 個のブロックサンプルについて、各々から 5 つの小さなチップを取り、VSM で磁気特性を測定した。

モデル計算では、磁性鉱物の化学組成は 1 種類であると仮定した。SD の場合、粒子の形状は細長い回転楕円体で一軸形状異方性をとると仮定し、回転楕円体の寸法比をパラメータにした。MD の場合、残留磁化 M_r/M_s 、反磁場係数 ξ 、および H_c/H_c をパラメータにした。さらに、SD の寸法比 q の関数 $\ln(q-1)$ と、MD の残留磁化 M_r/M_s 、反磁場係数 ξ のばらつきを考慮した。計算結果から得られた SD+MD 混合の磁気履歴曲線の特徴は、中央が膨らみ、両端が細長く伸びるというように、中央に SD の特徴を、両端に MD の特徴を強く出す形となった。その Day Plot 上での特徴は、SD に MD が少量混合すると M_r/M_s が急減し、MD が多くなってくると H_c/H_c が増大するために、全体的として下に強く凸の形になる。そのために混合曲線は PSD 領域の左端と下半分しか通らない。SP+SD 混合の磁気履歴曲線は、SP が増えると縦に細長くなり、wasp-waisted の傾向が出てくる。また、その Day Plot の混合曲線は、SP の混合によって H_c/H_c が大きくなり PSD 領域の上部に Plot される。

ハワイ溶岩の実測値をこれらのモデルで検討してみたところ、1960,1970 年溶岩は SD+MD 混合で、他の試料は SP+SD 混合でかなりの説明がつく。これは、massive な部分の試料では冷却が遅く、MD サイズにまで成長したチタノマグネタイトとその高温酸化によってできた SD サイズのマグネタイトから成ると推定でき、一方、他の溶岩は表層部分の試料であるために急冷されて SD、SP サイズの粒子が含まれていると推定できた。

1 序論

岩石には磁性粒子が含まれており、磁場 H をかけると磁化 M を生じる。磁場 H の大きさを変化させると、磁化と外部磁場とのグラフ M - H 曲線は磁気履歴曲線のループを描く (図 1)。この曲線は岩石中に含まれる磁性鉱物の種類、量、大きさ、形状などによって決まる。したがって、このような岩石磁気特性を測定して残留磁化のキャリアーを同定することが可能である。そのようにして岩石の磁化の由来を明らかにすることは、古地磁気学測定の基本であるだけでなく、古地磁気測定結果の解釈において決定的な役割を果たすこともある。

この岩石の磁気特性を表すパラメータには、次のようなものがある。十分強い磁場をかけ、磁性体の磁化がそれ以上増えない (飽和した) ときの磁化の大きさである飽和磁化 (M_s)、磁性体を飽和させたあと外部磁場を 0 にしたときに残る磁化の大きさである飽和残留磁化 (M_{rs})、磁性体を飽和させたあと外部磁場を 0 にしさらに逆向きの磁場をかけて磁化が 0 になったときの外部磁場の大きさである保磁力 (H_c)、引き続き逆磁場を強くしたときに残留磁化が 0 になったときの磁場の値である残留保磁力 (H_{cr}) である。

これらの岩石磁気特性パラメータは、岩石中の磁性鉱物の磁区構造と密接な関係をもつ。磁区とは、物質が一様に磁化する最小の単位をいい、磁性粒子 1 個につき、磁区を一つしか持たないものを単磁区 (SD: single domain)、二つ以上持つものを多磁区 (MD: multi domain) という。一般に、SD 粒子は保持力が大きく、MD 粒子は小さい。磁区構造は、理論的には粒子の大きさから想定できるが、MD と思われる大きさにもかかわらず保磁力が比較的大きい粒子として疑似単磁区 (PSD: pseudo single domain) 粒子とよばれるものがある。PSD 粒子は、岩石磁気において重要な役割を果たしているのではないかともいわれている。また、SD よりもさらに小さく、常温で保磁力を持たないものを、超常磁性 (SP: super paramagnetism) 粒子という。

磁性鉱物の磁区構造が SD か MD か (または PSD か) ということは、データの信頼度に関して重要な問題である。Day et al. (1977) は、粒子サイズから磁区構造が推定できる磁性粒子試料を使って磁気特性を測定し、それらの岩石磁気パラメータの特徴をまとめた。その結果の一つが、 M_{rs}/M_s - H_{cr}/H_c グラフ (通称 Day Plot) である。これは縦軸に M_{rs}/M_s 、横軸に H_{cr}/H_c をとり、磁区構造によって Plot される位置が区分されることから、逆にサイズのわからない試料の岩石磁気パラメータを実測して Day Plot 上で磁区構造を推定しようというものである (図 2)。

この Plot によると、岩石に含まれる磁性粒子は多くの場合 PSD 領域に入るが、果たしてこれが実際に PSD なのか、SD と MD の混合なのかは、よくわかっていない。特に火山岩の場合、MD サイズのチタノマグネタイトは高温酸化を受けて SD サイズのマグネタイトを析出することが多く、MD・SD 粒子の混合があると考えられる。本研究では、主に SD+MD、または SD+SP の 2 種類の磁性粒子の混合で、Day Plot の PSD 領域にくる火

山岩試料測定結果の説明を試みた。具体的には、SD、MD、SP のいくつかのパラメータを仮定してモデル計算をおこなってその磁気履歴曲線と Day Plot 上の混合曲線を作成し、ハワイ島の 1955,1960,1970,1972,1979,1995 年噴出溶岩試料の実測値と比較した。

2. モデル計算

2.1. 磁気履歴曲線の作成

Day Plot は、磁気履歴曲線のパラメータを使って描くので、まず、磁気履歴曲線を計算する。今回は、磁性鉱物の化学組成が一種類（例：magnetite）であることを仮定し、単位体積あたりの飽和磁化 M_s が一定であるとする。そして、磁気履歴曲線の縦軸は、磁化 M を飽和磁化 M_s で規格化した値 M/M_s をとることとする。

2.1.1 SD の計算

SD 粒子には磁化しやすい方向があり（磁気異方性）、これを磁化容易軸という。これは主に形状と結晶構造で決まる。今回はモデルを単純化するため、SD の形状として断面が円であるような回転楕円体を仮定し、その一軸形状異方性を考え、かつ、磁化ベクトルの反転はスピンのコヒーレントな回転で行われるとする。回転楕円体の寸法比を、<長軸の長さ>/<断面の直径>= $q(q>1)$ とする（図 3）。測定される磁化は、外部磁場方向の成分である。

① SD 粒子 1 個の磁気履歴曲線

一様な磁場 H 中において磁化 M を持つ SD 粒子の単位体積あたりのポテンシャルエネルギー E_H は、磁化容易軸と外部磁場 H との間の角度を ϕ 、磁化方向と磁化容易軸との間の角度を θ として（図 4）、次式で表される。

$$E_K = -MH \cos(\phi - \theta) \quad (1)$$

一方、このときの磁化 M は外部磁場 H によって生じるので、そのときの回転楕円体の表面には図 5 のように磁極が生じ、この磁極のために内部に H と逆向きの磁場（反磁場） H_d^{SD} が生じる。 H_d^{SD} の大きさは一般に磁化 M に比例し、その比例係数は粒子の形状に依存する。そこで、磁性体の内部に働いている磁場を H_I とすると、これは外部磁場と反磁場との和で表される。

$$H_I = H - H_d^{SD} = H - NM \quad (2)$$

ここで、比例係数 N は反磁場係数という。この反磁場係数の垂直 3 成分 N_x 、 N_y 、 N_z の間には、

$$N_x + N_y + N_z = 1 \quad (3)$$

という関係がある。今考えているモデルは一軸異方性なので磁化容易軸方向を z 方向とすると、

$$N_x = N_y = \frac{1}{2}(1 - N_z) \quad (4)$$

z 軸から磁化ベクトルまでの角度は θ なので、反磁場係数 N は、

$$\begin{aligned} N &= N_x \cos^2(\theta) + N_z \sin^2(\theta) \\ &= \frac{1}{2}(1 - 3N_z) \sin^2(\theta) + \text{const.} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、回転楕円体の反磁場係数 N_z は R.M.Bozorth (1951)により、

$$N_z = \frac{1}{q^2 - 1} \left\{ \frac{q}{\sqrt{q^2 - 1}} \ln(q + \sqrt{q^2 - 1}) - 1 \right\} \quad (6)$$

したがって、この SD 粒子を磁化させるのに必要なエネルギーは次のように求まる。SD 粒子の単位体積あたり磁化が M から $M+dM$ に増えたとすると、SD 粒子の内部では、磁極を反磁場に逆らって表面に運ぶので、SD 粒子体積を v 、の長さを l_z 、表面の磁極を p_m とすると、

$$\mu_0 M v = l_z p_m \quad (7)$$

単位体積あたりの必要な仕事 W は、 μ_0 を真空の透磁率として、

$$\begin{aligned} W &= \frac{H_d^{SD} l_z}{v} dp_m \\ &= \mu_0 H_d^{SD} dM \end{aligned} \quad (8)$$

すると、単位体積あたりの全エネルギー (= 静磁エネルギー) E_K は、

$$\begin{aligned} E_K &= \mu_0 \int_0^{M_s} H_d^{SD} dM \\ &= \mu_0 N \int_0^{M_s} M dM \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 N M_s^2 \end{aligned} \quad (9)$$

よって、(5)、(9)より、

$$\begin{aligned} E_K &= \frac{1}{2} \mu_0 (1 - 3N_z) M_s^2 \sin^2(\theta) + \text{const.} \\ &= \mu_0 \xi M_s^2 \sin^2(\theta) + \text{const.} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、

$$\xi \equiv \frac{1}{2}(1 - 3N_z) \quad (11)$$

とする。よって、(1)、(10)より、SD の単位体積あたりのエネルギー E は、次ようになる。

$$\begin{aligned}
E &= E_H + E_K \\
&= -M_s H \cos(\phi - \theta) + \frac{1}{2} \mu_0 \xi M_s^2 \sin^2(\theta) + const \\
&= -M_s H \cos(\phi - \theta) + K_u \sin^2(\theta) + const
\end{aligned} \tag{12}$$

ここで、

$$K_u \equiv \frac{1}{2} \mu_0 \xi M_s^2 \tag{13}$$

とおき、 K_u を形状異方性係数とよぶ。ここでは形状異方性を考えたが、そのほかに結晶磁気異方性など様々な異方性係数を考えても同様である。

磁場 H を変えると、この E が最小の値をとるように角度 θ は動くので、ある ϕ におけるひとつの SD 粒子の磁気履歴曲線は、

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \quad , \quad \frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} \geq 0 \tag{14}$$

を解くことで求まる (図 6)。

ここで、 $\phi=0$ の時に、磁化が反転する外部磁場の大きさを H_k とおくと、

$$H_k = \xi \cdot M_s \tag{15}$$

となり、エネルギー E は、

$$E = \frac{M_s}{2} \left\{ -\frac{2H}{H_k} \cos(\phi - \theta) + \sin^2(\theta) \right\} + const. \tag{16}$$

こうして、磁気履歴曲線は、 H/H_k の関数になることがわかる。

② q 一定の SD 粒子が均等に分布しているときの全体の磁気履歴曲線

たくさんの SD 粒子が一定の寸法比 q をもって、磁化容易軸方向が等方的になるように分布し、お互いに相互作用がない場合を考える (図 7)。

ある外部磁場 H で、 $\phi = \phi_i$ のとき、 $\theta = \theta_i(H)$ とするならば、このときの SD 粒子 1 個の磁化 $m_i(H)$ は、 $m_x (=M_s v; v$ は粒子 1 個あたりの体積) を SD 粒子 1 個がもつ磁化の大きさとすると、

$$m_i(H) = m_x \cos(\phi_i - \theta_i(H)) \tag{17}$$

この SD 粒子の磁化容易軸が、 ϕ_i が $[0, \pi/2]$ の範囲で等方的に分布しているとする、 $m_i(H)$ の合計 $S_m(H)$ は、

$$\begin{aligned}
dA &= 2\pi \sin(\phi_i) d\phi_i \\
d\phi_i &= \phi_{i+1} - \phi_i
\end{aligned} \tag{18}$$

として、

$$\begin{aligned}
S_m(H) &= \sum_i m_i(H) dA_i \\
&= 2\pi \sum_i m_x \cos(\phi_i - \theta_i(H)) \sin(\phi_i) d\phi_i
\end{aligned} \tag{19}$$

一方、全体の飽和磁化 S_{mx} は、すべての粒子が H 方向を向いたときの値なので、

$$\begin{aligned} S_{mx} &= \int_0^{2\pi} m_x dA \\ &= 2\pi m_x \int_0^{2\pi} \sin(\phi) d\phi \\ &= 2\pi m_x \end{aligned} \quad (20)$$

よって、SD 粒子全体の磁化 $m^{SD}(H)$ は、

$$m^{SD}(H) = S_m(H) / S_{mx} = \sum_i \cos(\phi_i - \theta_i(H)) \sin(\phi_i) d\phi_i \quad (21)$$

こうして、 q が一定の SD 粒子の磁気履歴曲線が求まる (図 8)。

③ q の分散を考慮したときの全体の磁気履歴曲線

ここで扱う SD の大きさは単位体積とする。 $q > 1$ より、 q の平均値 q_m と $\ln(q-1) \equiv l$ の分散 σ_l^2 を与え、 $l_m = \ln(q_m - 1)$ として、SD 粒子集団は正規分布 $N(l_m, \sigma_l^2)$ に従うするものとする。すると、確率密度分布関数 $f(l)$ は、

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left\{-\frac{(l-l_m)^2}{2\sigma_l^2}\right\} \quad (22)$$

よって、外部磁場 H における SD の磁化の合計 $M^{SD}(H)$ は、次式の通りになる。

$$M^{SD}(H) = \int_{-\infty}^{+\infty} m^{SD}(H) f(l) dl \quad (23)$$

2.1.2 MD の計算

① MD 粒子 1 個の磁気履歴曲線

MD は、内部磁場 $H_i(H)$ に対して図 9 のような磁気履歴曲線を示し、 $H_i(H) = \pm h_c$ ($B \sim C$ 、 $D \sim A$ の範囲) では次式で表される反磁場 $H_d^{MD}(H)$ を生じる、と仮定する。

$$H_d = -\frac{\zeta \cdot m^{MD}(H)}{\mu_0} \quad (24)$$

ここで、 ζ は MD の反磁場係数、 $m^{MD}(H)$ は MD 粒子 1 個の磁化の大きさを飽和磁化で規格化したものであり、 $H_d^{MD}(H)$ は $m^{MD}(H)$ に比例する。

また、MD 粒子の内部にできる磁場 $H_i(H)$ は、この反磁場 $H_d^{MD}(H)$ と外部磁場 H の合成である。

$$\begin{aligned} H_i(H) &= H + H_d^{SD}(H) \\ &= H - \frac{\zeta \cdot m^{MD}(H)}{\mu_0} \end{aligned} \quad (25)$$

よって、MD 粒子 1 個あたりの磁気履歴曲線は、図 10 のようになる。SD の場合には磁化の大きさ $m_x (=M_x/\nu)$ は外部磁場によらず一定のままつりあいの位置に回転したが、MD では磁壁（磁区を区切る壁）が外部磁場に応じて移動するので磁化 $m^{MD}(H)$ は H によって変化する。よって、MD の磁化 $m^{MD}(H)$ は、飽和しないときに次のように表せる。

$$m^{MD}(H) = \mu_0 \frac{H - H_I(H)}{\zeta} \quad (26)$$

縦軸の M_r/M_s を a 、保磁力を h_c 、磁気履歴曲線のループが閉じる外部磁場の値を h_e とすると、 h_c 、 h_e は、

$$h_c = a \cdot \zeta \quad (27)$$

$$h_e = (1+a)\zeta \quad (28)$$

$$\begin{aligned} m^{MD}(H) &= \frac{\mu_0}{\zeta} H \pm a \\ &= a \left(\mu_0 \frac{H}{h_c} \pm 1 \right) \end{aligned} \quad (29)$$

ただし、 $-1 < m^{MD}(H) < 1$ 。

② MD 粒子集団の磁気履歴曲線

MD の磁気履歴曲線は、 ζ と a によって決まるので、それぞれの平均値 ζ_m 、 a_m と分散 σ_ζ^2 、 σ_a^2 を与え、これらが正規分布 $N(\zeta_m, \sigma_\zeta^2)$ 、 $N(a_m, \sigma_a^2)$ に従うものとする。ある ζ 、 a にお

$$f(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\zeta} \exp \left\{ -\frac{(\zeta - \zeta_m)^2}{2\sigma_\zeta^2} \right\} \quad (30)$$

$$f(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \exp \left\{ -\frac{(a - a_m)^2}{2\sigma_a^2} \right\} \quad (31)$$

けるそれぞれの確率密度分布関数 $f(\zeta)$ 、 $f(a)$ は、

外部磁場 H における磁化の合計 $M^{MD}(H)$ は、

$$M^{MD}(H) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m^{MD}(H) f(\zeta) f(a) d\zeta da \quad (32)$$

ただし、実際には $0 < \zeta < 1$ 、 $0 < a < 1$ であることを考慮して計算した。

2.1.3 SP の計算

磁気モーメント νM_s を持ち、外部磁場 H とのなす角が α である SP 粒子 1 個が H の方向に向く確率 $q(\alpha)$ は熱攪乱を考慮すると、

$$q(\theta) \propto \exp\left(-\frac{\nu M_s H \cos(\alpha)}{k_b T}\right) \quad (33)$$

ただし、 k_b はボルツマン定数 ($=1.38 \times 10^{-23}$)、 T は絶対温度である。上記の粒子 N 個が H 方向に向く確率 $p(\alpha)$ は、

$$p(\alpha) = \frac{q(\alpha) \sin(\alpha)}{\int_0^\pi q(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha} \quad (34)$$

SP 粒子が等方的に分布しているとする、磁化の H 方向成分 $J(H)$ は、

$$\begin{aligned} J(H) &= N\nu M_s \int_0^\pi p(\alpha) \cos(\alpha) d\alpha \\ &= N\nu M_s \frac{\int_0^\pi e^{-\frac{\nu M_s H \cos(\alpha)}{kT}} \sin(\alpha) \cos(\alpha) d\alpha}{\int_0^\pi e^{-\frac{\nu M_s H \cos(\alpha)}{kT}} \sin(\alpha) d\alpha} \end{aligned} \quad (35)$$

ここで、

$$\frac{\nu M_s}{kT} H \equiv \kappa(H), \quad \cos(\alpha) \equiv x \quad (36)$$

とすると、

$$\begin{aligned} J(H) &= N\nu M_s \frac{\int_{-1}^1 e^{\kappa(H)x} x dx}{\int_{-1}^1 e^{\kappa(H)x} dx} \\ &= N\nu M_s \left(\frac{e^{\kappa(H)} + e^{-\kappa(H)}}{e^{\kappa(H)} - e^{-\kappa(H)}} - \frac{1}{\kappa(H)} \right) \\ &= N\nu M_s \left(\coth(\kappa(H)) - \frac{1}{\kappa(H)} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

よって、SP の磁化を飽和磁化で規格化した値 $M^{SP}(H)$ は、ランジュバン関数で与えられる。

$$M^{SP}(H) = \coth(\kappa(H)) - \frac{1}{\kappa(H)} \quad (38)$$

2.1.4 混合

① SD+MD

SD 全体と MD 全体の体積の比を SD : MD = k : $1-k$ とすると、SD+MD の磁化の合計 $M^D(H)$ は、

$$M^D(H) = M^{SD}(H) \cdot k + M^{MD}(H) \cdot (1-k) \quad (39)$$

② SP+SD

SP と SD 全体の体積の比を SP : SD = p : $1-p$ とすると、SP+SD の磁化の合計 $M^S(H)$ は、

$$M^S(H) = M^{SP}(H) \cdot p + M^{SD}(H) \cdot (1-p) \quad (40)$$

2.2. H_{cr} の求め方

SD と MD を混合した粒子集団の $H_{cr} \equiv h_{cr}^D$ を求めるには、ある外部磁場 H におけるそれぞれの残留磁化 $M_r(H)$ を求め、

$$M_r^{SD}(H_{cr}) + M_r^{MD}(H_{cr}) = 0 \quad (41)$$

となる $H=H_{cr}$ をさがす。

SP と SD の混合では、SP の $H_{cr} \equiv h_{cr}^{SP}=0$ なので、SD の $H_{cr} \equiv h_{cr}^{SD}$ のみ考えればよい。

2.2.1 SD の残留磁化 M_r^{SD} 及び h_{cr}^{SD}

ここでは $q=$ 一定の場合を考える。

SD の残留磁化は、飽和した状態から逆磁場をかけたときに、いくつの粒子が反転したかで決まる。逆磁場を大きくしていくと、この反転は、磁化容易軸と \mathbf{H} 方向との間の角度 ϕ が 45 度であるもの (45 度の円錐状の方向に相当) から起きはじめ、順に、この面に関して対称的な角度をもつ軸方向の粒子について起こる。よって、ある外部磁場 H においてはじめて反転する粒子の容易軸の角度を ϕ ($\phi < 45$ 度) とすると、残留磁化 $m_r^{SD}(H)$ は、

$$m_r^{SD}(H) = \int_{\phi}^{90-\phi} -m_x \cos(\phi) d\phi + \int_0^{\phi} m_x \cos(\phi) d\phi + \int_{90-\phi}^{90} m_x \cos(\phi) d\phi \quad (42)$$

右辺第一項は反転した粒子の残留磁化、第二、三項は反転していない粒子の残留磁化で、それぞれ 0 度に近い側、90 度に近い側の粒子の成分である。これを、正規分布 $N(l_m, \sigma_l^2)$ に従う SD 集団について考えると、SD の残留磁化 M_r^{SD} は、

$$M_r^{SD}(H) = \int_{-\infty}^{+\infty} m_r^{SD}(H) \cdot f(l) dl \quad (43)$$

従って、SD 粒子集団の場合、形状異方性の分布パラメータを与えれば、 m_{rs}^{SD} 、 $m_r^{SD}(H)$ 、 h_{cr}^{SD} 、 h_c^{SD} は計算できる。

2.2.2 MD の残留磁化 $M_r^{MD}(H)$ 及び h_{cr}^{MD}

MD 粒子 1 個の $H_{cr} \equiv h_{cr}^{MD}$ はその粒子固有の値で、ここで採用したモデルでは理論的には求められない。よって、実測値を参考に、 $h_{cr}^{MD}/h_c^{MD} \equiv b$ の値を与えることにする。

これより、

$$\begin{aligned} h_{cr}^{MD} &= h_c^{MD} \cdot b \\ &= ab\zeta \end{aligned} \quad (44)$$

ここから、MD 粒子 1 個の $m_r^{MD}(H)$ を近似的に求める。(図 11)

① $H > h_{cr}^{MD}$ のとき

$H = h_{cr}^{MD}$ のとき、 $m_r^{MD}(H) = 0$

$H=h_e$ のとき、 $m_r^{MD}(H)=a$ となることより、その間の比をとって、

$$h_e - h_{cr}^{MD} : H - h_{cr}^{MD} = a : m_r^{MD}(H) \quad (45)$$

$$\begin{aligned} m_r^{MD}(H) &= \frac{H - h_{cr}^{MD}}{h_e - h_{cr}^{MD}} a \\ &= \frac{H\zeta - ab}{1 + a + ab} a \end{aligned} \quad (46)$$

② $H < h_{cr}^{MD}$ のとき

$H=0$ のとき $m_r^{MD}(H)=-a$

$H=h_{cr}^{MD}$ のとき $m_r^{MD}(H)=0$ となることより、その間の比をとって、

$$\begin{aligned} H : h_{cr}^{MD} &= a - m_r^{MD}(H) : a \\ m_r^{MD}(H) &= \frac{h_{cr}^{MD} - H}{h_{cr}^{MD}} a \\ &= \frac{ab\zeta - H}{b\zeta} \end{aligned} \quad (47)$$

これらの粒子が正規分布 $N(\zeta_m, \sigma_\zeta^2)$ 、 $N(a_m, \sigma_a^2)$ に従うものとして、 $m_r^{MD}(H)$ の合計 $M_r^{MD}(H)$

$$M_r^{MD}(H) = \int_{-\infty}^{+\infty} m_r^{MD}(H) f(\zeta) f(a) d\zeta da \quad (48)$$

を求める。

2.2.3 SD+MD の $H_{cr} \equiv h_{cr}^D$

以上より、SD:MD= $k:1-k$ として、各々の $M_r(H)$ を足して 0 となるような $H=h_{cr}^D$ をさがす。

$$M_r^{SD}(H) \cdot k + M_r^{MD}(H) \cdot (1-k) = 0 \quad (49)$$

2.2.4 SP+SD の $H_{cr} \equiv h_{cr}^S$

SP の $h_{cr}^{SP}=0$ より、 $h_{cr}^D=h_{cr}^{SD}$ となる H を探す。

3. ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定

岩石試料は、ハワイ島の1955、1960、1970、1972、1979、1995年噴出溶岩を用いた(図12)。1960年はコアサンプル、それ以外はブロックサンプルである。試料の不均質を考慮して、各ブロック、コアから3~6個ずつチップをとった。ブロックサンプルとコアサンプルの数は以下の通り。

噴出年	1955	1960	1970	1972	1979	1995
ブロックまたはコア数	4	295	5	7	3	6

サンプルの採取場所と特徴は、

60年溶岩は表層から約3m下で、massiveな部分から、70年溶岩は表層から約2m下でmassiveな部分から、それ以外は、パホエホエ溶岩の表層または表層近くのものである。

測定は、Princeton Measurements社のMode13900 Micro Mag TM Vibrating Sample Magnetometer (VSM)を使用した。約2(mm)四方の試料を、外部磁場をかけた状態で振動させ、磁化の振動による誘導電流により測定する。磁気履歴曲線の測定では、外部磁場を1(T)⇒-1(T)⇒1(T)と、4(mT)ごとにかけた。Hcrの測定では、はじめに1(T)までかけた試料に対して、逆磁場を0から2(mT)ずつかけていき、残留磁化が0(T)になったときの逆磁場をHcrとした。

磁気履歴曲線で、通常は約300(mT) (magnetiteが飽和する外部磁場)以上のところで磁化が増える場合、それを常磁性体の影響と考え、磁気履歴曲線を補正した。常磁性体の磁化は外部磁場に比例するので、測定結果の0.7(T)から1(T)までの直線の傾きを差し引いた(図13)。ただし、hematiteが含まれている場合には飽和しないので注意を要する。

4. 結果

4.1. モデル計算の結果 (図 14~34)

Day Plot では、原則として、 $H_{cr}/H_c=5$ 、 $k=0,0.01,0.05,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0$ とした。SD の q_-, q_+ は、それぞれ、 1σ における寸法比 q の値である。SP の計算では、 $T=300(K)$ とした。以下に、パラメータをまとめ、磁気履歴曲線と Day Plot の例を示す。

磁気履歴曲線									
MD	a_m	σ_a	ζ_m	σ_ζ	SD	q_m	σ_1	q_-	q_+
図 14	0.10	0.01	0.3 0.5 0.7	0.1	図 18	1.5	0.05	1.48	1.53
図 15	0.10	0.01	0.5	0.5 0.1 0.2	図 19	1.5	0.10	1.45	1.55
図 16	0.05 0.10 0.15 0.20	0.01	0.5	0.1	図 20	1.5	0.50	1.30	1.82
図 17	0.10	0.01 0.05	0.5	0.1	図 21	1.5	1.0	1.18	2.36
					図 22	1.5	2.0	1.07	4.69
					図 23	1.1	1.0	1.04	1.27
					図 24	1.5	1.0	1.18	2.36
					図 25	2.0	1.0	1.37	3.72
					図 26	5.0	1.0	2.47	11.9

Day Plot	MD				SD			
	a_m	σ_a	ζ_m	σ_ζ	q_m	σ_1	q_-	q_+
図 28	0.10	0.01	0.3 0.5 0.7	0.1	1.5	0.50	1.30	1.82
図 29	0.10	0.01	0.5	0.5 0.1 0.2	1.5	0.50	1.30	1.82
図 30	0.05 0.10 0.15 0.20	0.01	0.5	0.1	1.5	0.50	1.30	1.82
図 31	0.10	0.01 0.05	0.5	0.1	1.5	0.50	1.30	1.82
図 32	0.1	0.01	0.5	0.1	1.5	0.05 0.1 0.5 1.0 2.0	1.48 1.45 1.30 1.18 1.07	1.53 1.55 1.82 2.36 4.69
図 33	0.1	0.01	0.5	0.1	1.1 1.5 2.0 5.0	1.0	1.04 1.18 1.37 2.47	1.27 2.36 3.72 11.9

4.2. ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定結果 (図 35~51)

55 年溶岩のうち、三つのブロックサンプルは、磁化が弱すぎて測定できなかったため、細かく粉砕して重量をかせいで測定した。しかし、これらは、ほとんどのサンプルの H_{cr} が測定できず、できても非常に大きい値となり、Day Plot 上にのせられなかった。

1960 年溶岩は、25 本のコアの相対位置がわかっているが、その位置関係と Day Plot 上での相関をみたところでは、表層に近いサンプルほど、SD よりの領域に来る傾向があった (図 35~45)。

一つのコアやブロックサンプルから、3~6 個ずつチップを取って測定したが、それらの中でのばらつき具合は、全体に影響を与えるほど大きなものではなかった (図 36~40)。

5. 考察

5.1. モデル計算

5.1.1. 磁気履歴曲線

図 14 : MD の反磁場係数を変化させた磁気履歴曲線。

MD の反磁場係数 ζ は傾きの逆数なので、 ζ が大きくなるほど傾きが小さい曲線になり、保磁力が大きくなる。

図 15 : MD の反磁場係数の分散を変化させた曲線。

分散が大きいほど、磁気履歴曲線の閉じ方がなめらかになってゆく。

図 16 : MD の残留磁化の大きさを変化させた曲線。

残留磁化の大きさに合わせて変化し、磁気履歴曲線の閉じ具合に影響はない。

図 17 : MD の残留磁化の分散を変化させた曲線。

分散が小さいせいか、分散による違いは全く見られなかった。

図 18~図 22 : SD の分散を変化させた曲線。

分散が大きくなるにつれ、保磁力は小さくなっていく。これは、寸法比 $q \neq 1$ の SD が増え、磁気履歴曲線では SP のようになってくるためである。しかし、 q が 1 に近づくほど形状異方性の影響は小さくなるので、その分、結晶磁気異方性の影響を考えなければならぬ。そのため、分散が大きくなるほど現実にはそぐわなくなっていると思われる。

図 23~図 26 : SD の寸法比 q を変化させた曲線。

q が大きいほど、保磁力が大きくなっているのがわかる。

以上をまとめると、次のことがいえる。

MD については、

- ① 反磁場係数が大きいほど、保磁力は大きくなる。
- ② 反磁場係数の分散が大きいほど曲線はなめらかになり、現実的な磁気履歴曲線を描く。
- ③ 残留磁化が大きいと、保磁力も大きくなる。
- ④ 残留磁化の分散は、ほとんど曲線に影響を与えない。

SD では、

- ① 寸法比 q が大きくなる=粒子が細長くなるほど保磁力は大きくなる。
- ② しかし、分散は大きすぎるとかえって非現実的な曲線になる。

5.1.2. Day Plot

図 28 : MD の反磁場係数を変化させた Day Plot。

MD の反磁場係数が小さいほど、Day Plot は右にずれて、なめらかな曲線になった。これは、反磁場係数が小さいほど傾きが大きくなり、保磁力が小さくなったためである。

図 29 : MD の反磁場係数の分散を変化させた Day Plot。

ほとんど変化はなかった。

図 30 : MD の残留磁化を変化させた Day Plot。

残留磁化が小さいときは右にずれ、大きいときは左にずれた。残留磁化が小さい場合は、 $H_{cr} < h_c/2$ である。図 A より、ある MD 粒子 1 個の H_{cr} が大きいものの方が、小さいものより $H_{cr} \cdot M_{rs} \cdot M_s$ 曲線の傾きが大きくなり、合計の H_{cr} が大きくなるので Day Plot は右にずれた。残留磁化が小さい場合は、 $H_{cr} > h_c/2$ となり、図 A と逆のことが起きている(図 B)。残留磁化が大きくなりすぎると、MD の保磁力が SD の保磁力より大きくなってしまいうので、MD が多いときは右上がりの曲線になってしまっている。しかし、MD の保磁力が SD の保磁力より大きくなることは現実的にはおこりづらい。

図 31 : MD の残留磁化の分散を変化させた Day Plot。

分散が大きい方が右にずれるが、MD が多いときにしか影響はでていない。分散が大きいほど、MD 粒子の H_{cr} 値の範囲が大きくなるので、図 A のような効果が大きくなる。

図 32 : SD の分散を変化させた Day Plot

分散が大きいほど右にずれる。SD の分散が大きいほど保磁力は小さくなるが、 H_{cr} にはあまり影響がないため、Day Plot は右にずれた。

図 33 : SD の寸法比 q を変化させた Day Plot。

SD が多いところでは、 q が小さいほど右にずれた。MD が多いところでは、 q が小さいものを除けば、大体同じ Plot をとる。分散が一定の場合、 q が小さいほど(粒子が丸いほど)分散の影響は大きくなるので、その分、Day Plot は右にずれた。 $q=1.1$ のときは、SD の保磁力より MD の保磁力の方が大きくなってしうという、本来あり得ない値をとった。その結果、MD が多くなると、 H_{cr} があまり変化せずに保磁力が大きくなり、右ずれの Day Plot となった。

図 34 : $H_{cr}/H_c=b$ を変化させた Day Plot。

右ずれの傾向がある。 H_{cr}/H_c を大きくすると、PSD 領域内では、曲線がまるくなるので、残留磁化を大きくする代わりに H_{cr}/H_c を大きくしても、同じような効果が望めるかもしれない。

以上より、次のことがいえる。

SD+MD の Day Plot 曲線では、だいたい SD と PSD の境界からほぼ垂直に落ち、PSD 領域の下半分に Plot される。急激に変化するのは MD の飽和残留磁化を変えたときと、SD の寸法比 q の分散を変えたときで、それ以外ではあまり変化は見られない。実際に、MD の飽和残留磁化は 0.1 より大きい値をとりにくいので、Day Plot を大きく左右するのは SD の分散といえる。少なくとも、PSD 領域の上部に Plot を持ってくるには、他に方法がなさそうである。

5.2. ハワイ島歴史溶岩試料の岩石磁気特性の測定 (図 35~51)

60 年溶岩は、すべて PSD 領域におさまった。一部を除いて、だいたい左上から右下にか

けての曲線にのっているように見える。70年溶岩もすべて PSD の領域におさまった。これも 60年溶岩と同様の特徴が見られる。95年溶岩と 55年溶岩の一部は、SD の領域から右下に直線的に Plot された。72年と 79年は、範囲が広がってはいるがだいたい 95年溶岩と同じところに Plot されている。

このように溶岩表層から離れているところからとった岩石 (60年、70年溶岩) では PSD 領域の下部に、表層の岩石では SD と PSD の境界上に Plot される傾向がでた。

5.3. 測定とモデル計算との比較

ハワイの実測値にあうような SD+MD または SP+SD の Day Plot 曲線を作成し、重なる部分の磁気履歴曲線を求めて、比較検討した。

5.3.1. 1960年溶岩

① 磁気履歴曲線について

◆ 1960年溶岩(A) (図 52~56)

計算結果では、中央が太く先が細長く平行になって飽和するのが遅い。これに対し実測では、中央が太く平行で端ではすぐに飽和し、しぼんでいる。ループの中央が平行で直線的というところは似ているが、端の閉じ方が違う。

◆ 1960年溶岩(B) (図 57~61)

計算結果では、中央が少々くびれた形で端にいくにつれて細く長くなってゆく。実測値では、1960年溶岩(A)と同じような形をしていてあまり似ていない。

◆ 1960年溶岩(C) (図 62~67)

計算結果では(A)と同様、中央が太く端にいくにつれて細く長くなっていく特徴がある。形としては、図 65 が端の閉じ方がなめらかで実測値に近い。少し飽和するのが遅い。

計算結果と実測値は、大まかに見て似ているといえるだろう。Day Plot ではよくあっているし、磁気履歴曲線も 2成分を足しあわせた単純なモデルの割には近い形ができています。つまり、これらの岩石は SD と MD の混合で考えられるということである。これは次のよう考えられる。

岩石が冷却してそのまま固まり、その後何の変化も受けなかった場合、SD と MD ができて PSD ができないとは考えにくい。PSD がなく SD と MD だけできるとすると、titanomagnetite の高温酸化が考えられる。これは、一度成長した titanomagnetite が高温中 (500度以上) で酸化し、粒子中に ilmenite のラメラと magnetite の結晶を作る反応である。この場合は、もともと MD サイズの粒子しかなければ、高温酸化は SD と MD だけで PSD ができない可能性もある。

60年溶岩は massive な岩石なので、ゆっくり冷えて固まったと思われる。こういう場合は普通、結晶がよく成長して MD がたくさんでき SD がほとんど残らなく、大きい保磁力を

持たないと推測される。60年溶岩は大きい保磁力を持つので、その点からただ冷えて固まったのではなく、高温酸化を起こしている可能性が高い。

細かい点については、以下のとおり。

計算による磁気履歴曲線は実測値に比べて、

① 飽和するのが遅い。

② ループの閉じ方が急。

③ 曲線があまりなめらかにならない。

①については、MDの傾きが小さいためなのでMDの傾きを大きくする=反磁場係数 ξ を小さくする、とよくなると思われる。

②については、図15より、分散 σ_{ξ}^2 を大きくすると、閉じる場所がもっとなめらかになる。今回は、平均値 ξ 、分散 σ_{ξ}^2 を正規分布に従うようにしたため分散を大きくとれなかったが、これを、対数などをとって分散が無限大にとれるようにすれば、ずっとなめらかな曲線が作れるようになるだろう。

③については、中央にSDの、両端にMDの特徴が色濃くでてしまっているため、これは2種類の磁気履歴曲線を単純に足しあわせたことからくるものである。よって、曲線をなめらかにするには、足しあわせる曲線の種類を増やすと良い。

5.3.2. 1970年溶岩について(図68~74)

モデルの磁気履歴曲線ではSDが多い場合は大きく膨らみ(図69)、細くなっている実測値(図73)とは、あまり似なかった。しかし、MDが増えるにつれてモデルの曲線は細くなってゆき、一方、実測値は太くなってきて、よく似た曲線になっている(図72、図74)。SDの含まれる量によって特徴があわなくなるところをみると、Day PlotでのSD+MDという近似には少し無理があるかもしれないが、もう少しSDを改良(SPを加えるなど)すれば、良くなるかもしれない。

ただ、このDay Plotの曲線はSDの寸法比とMDの残留磁化が異常に大きく、SD+MDで表せるDay Plotのほぼ上限なので、その点では厳しい。PSD領域の中央に来るようなPlotで、SD+MD以外の、SP+SD+MD等を考えなければいけないかもしれない。

5.3.3. 1995年溶岩について(図75~84)

SD+MDの磁気履歴曲線では、SDの特徴がよくでて全体的にとても丸く太くなった。端の閉じ方は似ているが、実測値では、真ん中はやや細めになるので、ちょっと似ていない。Day Plot(図75)は、SD+MDで実測値の曲線にのるものを見つけられず、一番近い形を出した。これは、前節でてきたPlotと同じもので、SD+MDで表せるDay Plotの上限である。このPlotにもものらないところを見ると、95年溶岩はSD+MDでは表すことはできないだろう。

しかし、SD+SPのDay Plotには、よくあう。磁気履歴曲線では、中央が細くなっていない

が、ほぼ平行で、SD+MD の磁気履歴曲線よりは似ていると思われる。図 84 では、中央のへこみ具合も近いものがある。実測値より飽和するのが早い。

このように、1955 年の結果は SP+SD に大変よく似ている。この場合、この岩石が表層から採取されたこともあわせると、急冷して磁性鉱物が成長する時間がなく、SP と SD だけできたと考えるのが、もっともらしいと思う。

5.3.4. 1972 年、79 年溶岩 (図 88~91)

Day Plot 上で曲線 (直線) 性を持たなかったので、2 種類の磁区構造の混合で表すことができなかった。しかし、磁気履歴曲線は 95 年溶岩と同じ特徴を持ち、Day Plot で Plot されている位置も 95 年溶岩とほぼ同じところなので、SP+SD の曲線がいくつか重なったものという可能性がある。ただし、72 年溶岩では、 M_r/M_s が 0.5 を大きく上回るので、一軸形状異方性以外の、結晶磁気異方性などを、考えなければならず (magnetite の結晶磁気異方性では、 $M_r/M_s = 0.866$ までとれる。)、このモデルに単純にあわせられなくなってきている。

5.3.5. 1955 年溶岩 (図 92~94)

普通に測定できたサンプルの試料については、95 年溶岩と同じ特徴を持つ。だが、粉碎して測定したサンプルは、磁気履歴曲線が 1(T)に達しても飽和せず大きいループを描き、 H_{cr} も測定できないものがほとんどであった。これは、少なくとも、飽和するときの外部磁場が大きい、titanomagnetite 以外の鉱物が含まれていると思われる。 M_r/M_s や H_{cr} が正確に測定できなかったことと、titanomagnetite 以外の鉱物 (例えば hematite) が含まれている可能性が高いことから、今回のモデルには、あわせられなかった。

6. まとめ

今回のモデル計算では、磁性鉱物の化学組成が1種類であることを仮定した。

- ① SD のモデル計算では、SD 粒子の形状として細長い回転楕円体を仮定し、一軸形状異方性を考え、磁化ベクトルの反転はスピンのコヒーレントな回転で行われるものとした。回転楕円体の寸法比を変数とすると、その反磁場係数によって H_c/H_c は決まるが、 M_r/M_s は常に一定の値をとった。
- ② MD のモデル計算では、残留磁化 M_r/M_s 、反磁場係数 ξ 、および、 H_c/H_c をパラメータとしてあたえて磁気履歴曲線を計算した。
- ③ SD の寸法比 q の関数 $\ln(q-1)$ と、MD の残留磁化 M_r/M_s 、反磁場係数 ξ 、に分散を持たせて計算したところ、各々の磁気履歴曲線はなめらかになり、より実測に近いものになった。
- ④ SD と MD の混合を考え、磁気履歴曲線と Day Plot を計算した。その磁気履歴曲線の特徴は、中央が膨らみ、両端が細長く伸びるというように、中央に SD の特徴を、両端に MD の特徴を強く出す形となった。Day Plot の特徴は、SD が多い場合は、 M_r/M_s が急減して垂直に落ちるような曲線を取り、MD が多い場合は、 H_c/H_c が増大して右斜め下に向かう傾向を取り、全体的に下に凸の形を取った。範囲としては、PSD 領域の左端と下半分に Plot された。
- ⑤ SP と SD の混合を考え、磁気履歴曲線と Day Plot を計算した。その磁気履歴曲線の特徴は、SD と同じような形を取り、SP が増えると、左上と右下に垂直な直線が入り、縦に細長くなる。Day Plot の特徴は、SP の混合によって H_c/H_c が大きくなり SD の点から急激に右にずれてゆき、PSD 領域上部にのみ Plot された。
- ⑥ ハワイ溶岩の実測値をこれらのモデルで説明できるか検討してみたところ、SD+MD ないし SP+SD でかなり説明できることがわかった。SD+MD は、1960,1970 年溶岩の massive な部分の試料であり、主に、MD サイズに成長した titanomagnetite とその高温酸化によってできた SD サイズの magnetite から成ると推定できる。一方、他の溶岩は表層部分の試料であり、急冷されて SD, SP サイズの粒子が含まれていると推定される。しかしながら、1970 年試料の一部の結果は、SP+SD+MD の混合ないし PSD の存在を考える必要があるかもしれない。

今回のモデルは単純なので、将来的にはもっとパラメータを増やし、現実的なものを作るべきであろう。モデルを進める上での今後の課題は以下の通りである。

- SD の反磁場係数として、直方体の形状を考える。
- SD の寸法比 q が小さい（粒子が球に近い）場合、形状異方性が弱くなるので、結晶磁気異方性などを考える。

- MD の反磁場係数や残留磁化の分散を大きくとれるように、対数や tangent をとった分布を考える。
- MD の H_{cr}/H_c の値を固定せず、もっと大きな値をとったり、分散させて平均をとってみる。
- 複数の磁性鉱物をくみあわせて、飽和磁化の値が違う磁気履歴曲線の合成を考える。
- 実測値のデータ数を増やす。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、優しく、厳しく、とことん面倒を見てくださった綱川教授には、本当にお世話になり、心から感謝いたします。また、忙しい中、いやな顔ひとつせず質問に答えてくださった同研究室の後藤巖氏、志村興一郎氏、山本裕二氏、廣嶋友継氏、パソコンについていろいろ教えてくださった本蔵研究室の佐藤淳子氏、今坂尚登氏、中西無我氏、高橋太氏、そして、いつも愚痴を聞いてくれた本蔵研究室の高橋優志氏、同研究室の久保知美氏、望月伸竜氏にも、とてもお世話になりました。本当にどうもありがとうございました。

8. 参考文献

R.Day, M.Fuller and V.A.Schmidt(1977). Hysteresis properties of titanomagnetites : Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*,13,260-267.

David J. Dunlop and Ozden Ozdemir. *Rock Magnetism : Fundamentals and frontiers*. Cambridge university press(1997).

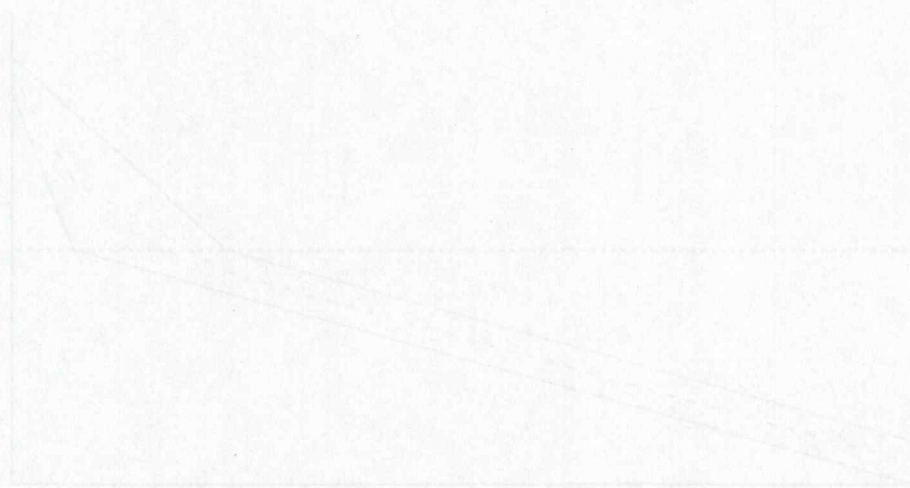
R.M.Bozorth(1951).*Ferromagnetism*. D.van Nostrand Co.

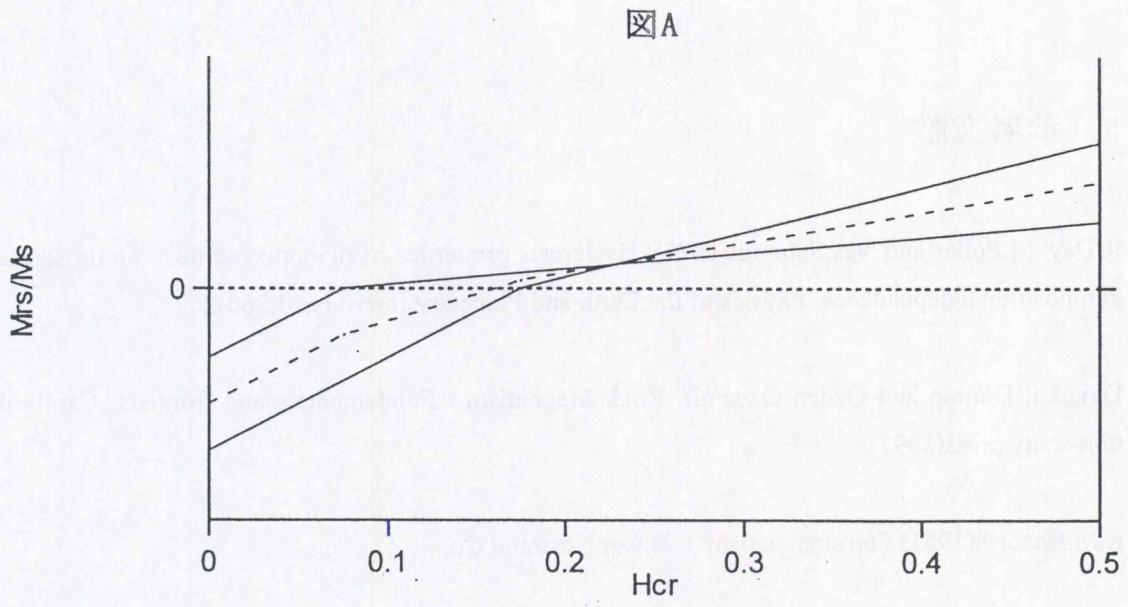
小嶋稔 小嶋美都子 岩石磁気学 (共立全書 190) 共立出版(1972)

河野長 岩石磁気学入門 (UP アース・サイエンスシリーズ 8) 東京大学出版会(1982)

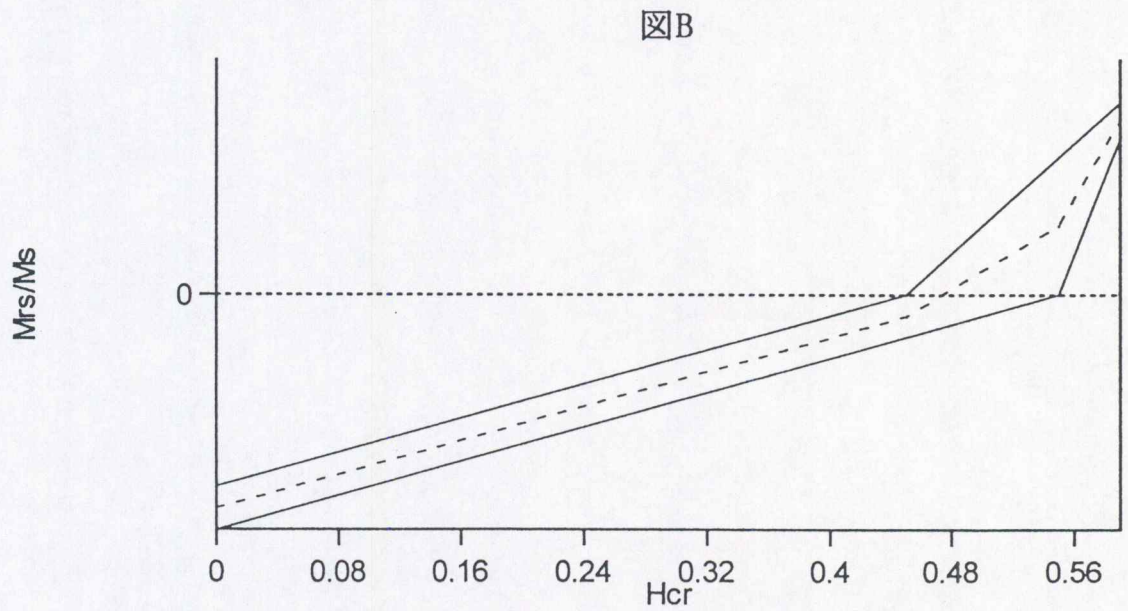
近角聡信 強磁性体の物理(上)-物質の磁性- (物理学選書 4) (1978)

近角聡信 強磁性体の物理(下)-磁気特性と応用- (物理学選書 18) (1984)





点線は実線の中線。Mrs/Msが0になるところ (Hcr) では、
点線は実線の中点よりも右にくる。



☒Aに同じ。ここでは点線のHcrは実線の中点よりも左にくる。

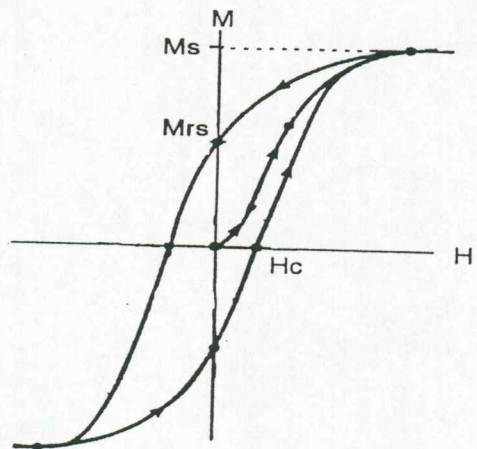


図 1 磁気履歴曲線

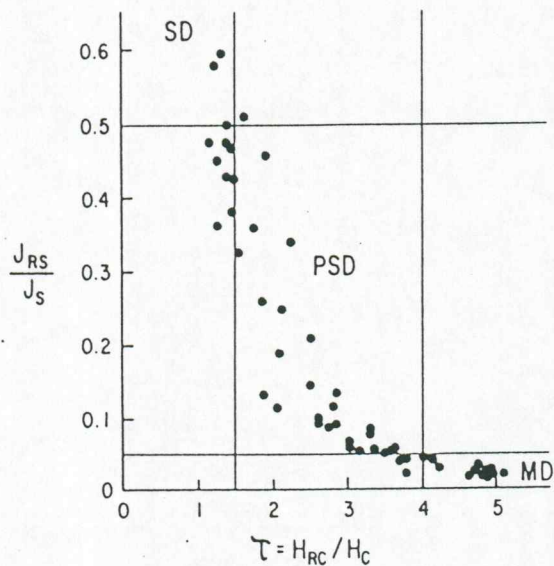


図 2 Day Plot (Day et al., 1977)

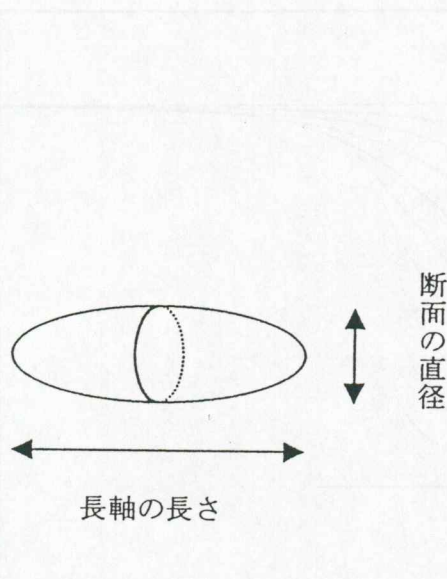


図 3 SD 粒子の寸法比

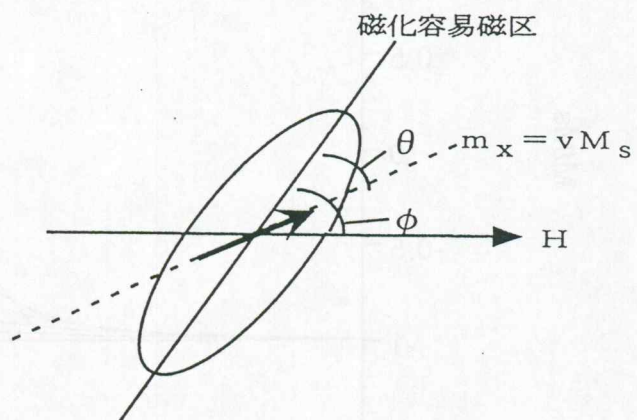


図 4 SD 粒子の角度 θ 、 ϕ

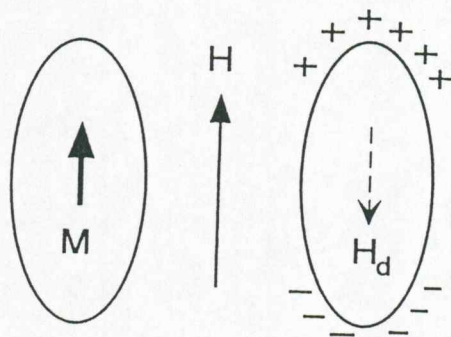


図 5 反磁場

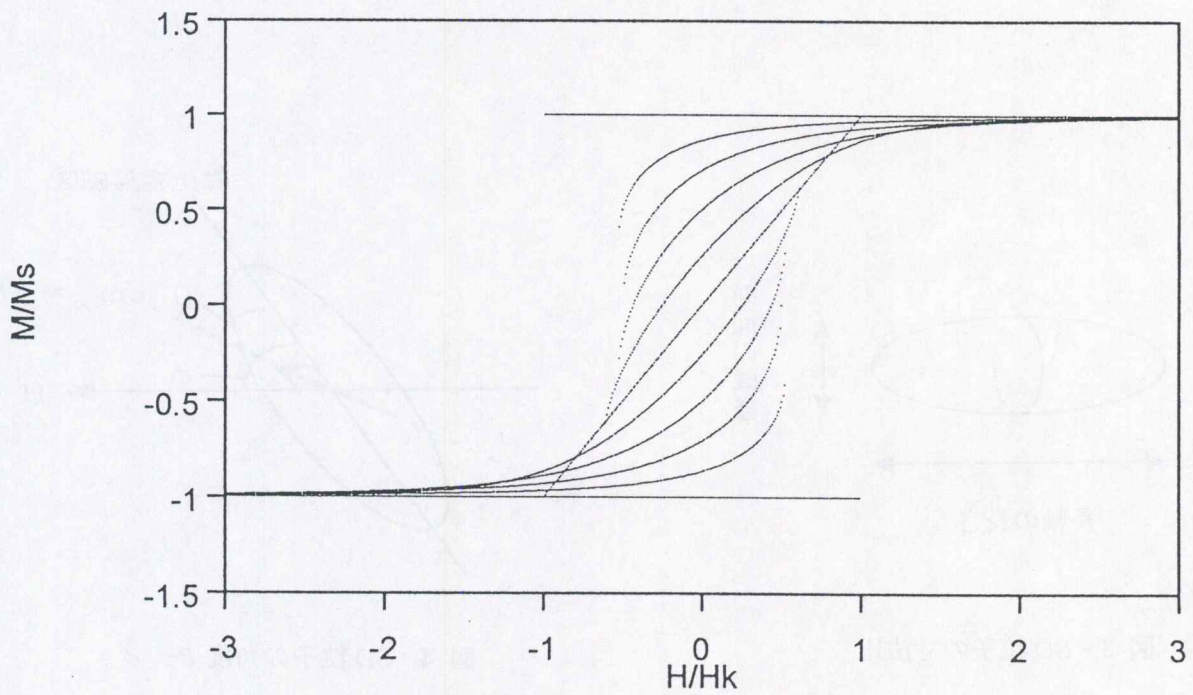


図 6 SD の磁化容易軸と外部磁場の間角度 ϕ を、
 0,15,30,45,60,75,90 度にしたときの磁気履歴曲線。

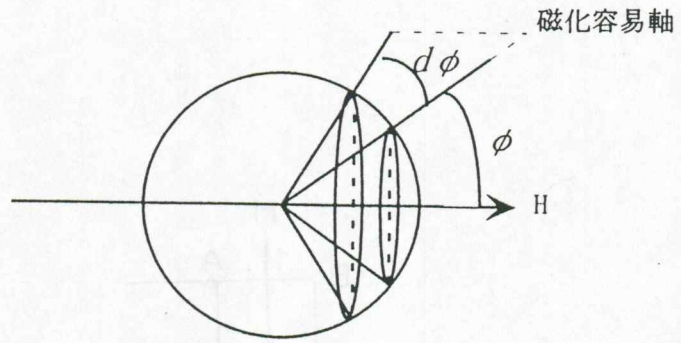


図 7 SD 粒子の分布

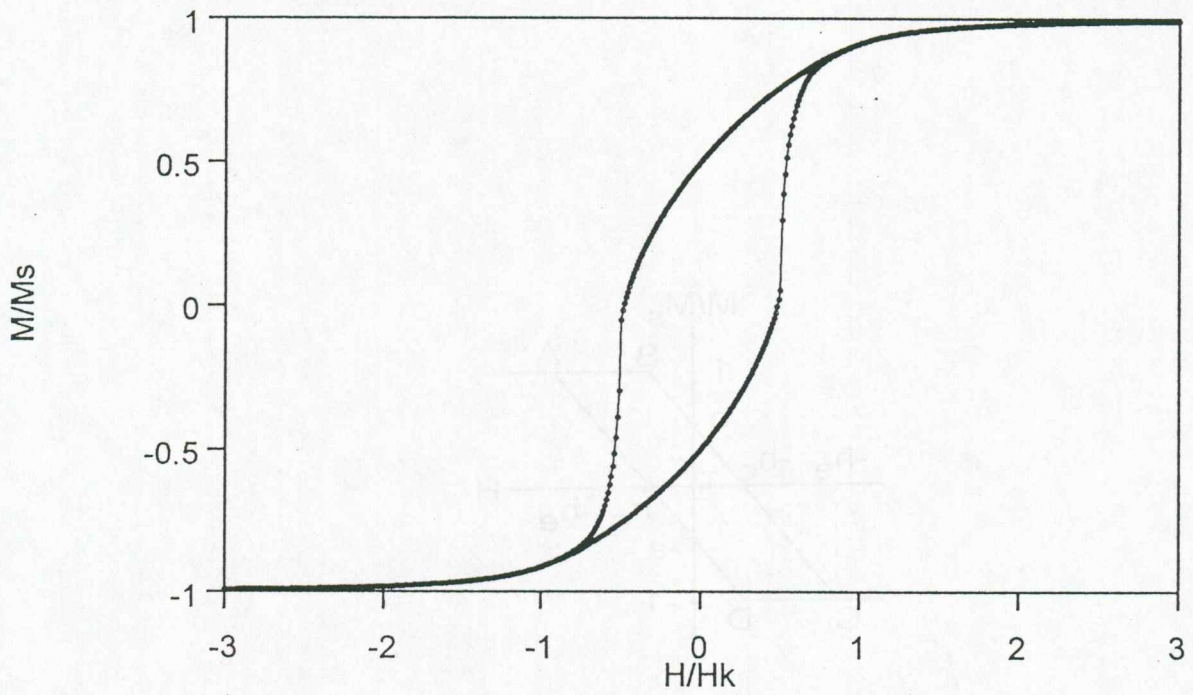


図 8 q が一定である SD 粒子が等方的に分布しているときの磁気履歴曲線

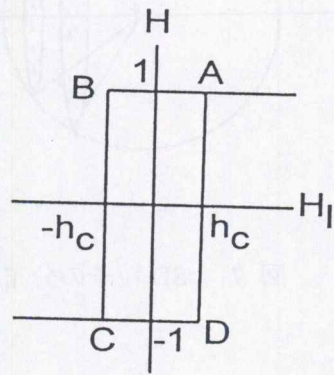


図 9 内部磁場の磁気履歴曲線

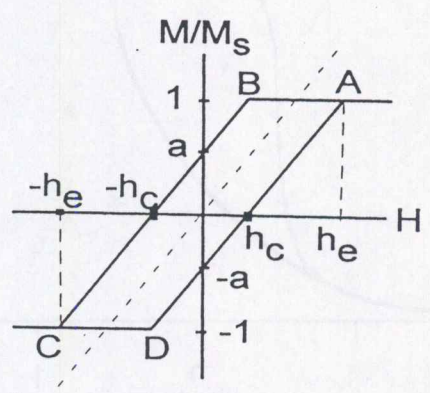


図 10 多磁区粒子の磁気履歴曲線

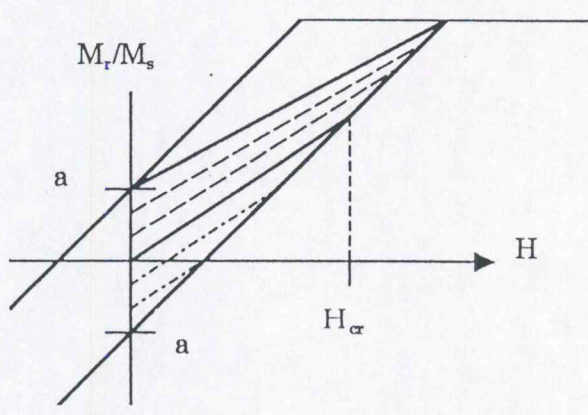
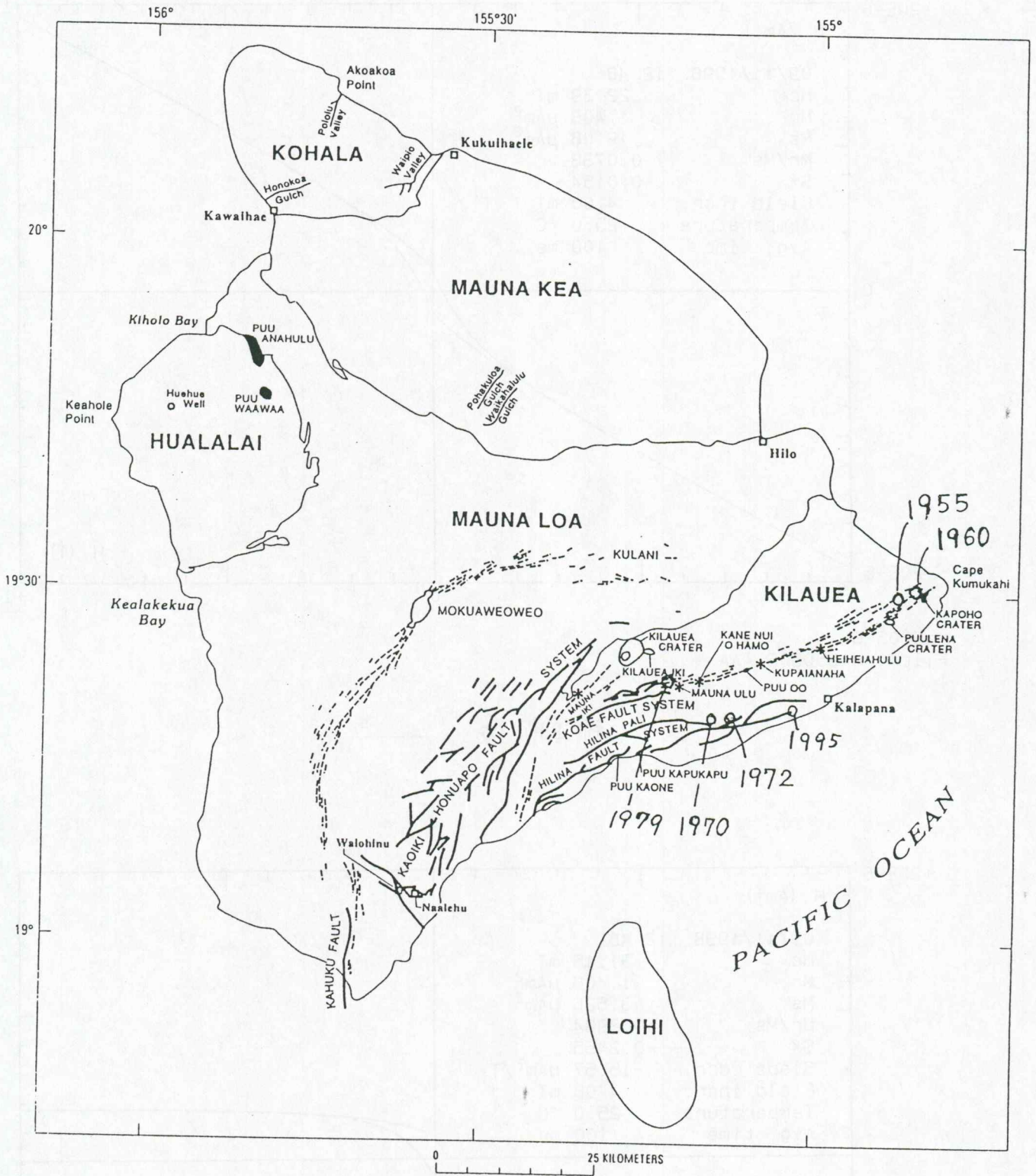


図 11 MD の H_{cr}

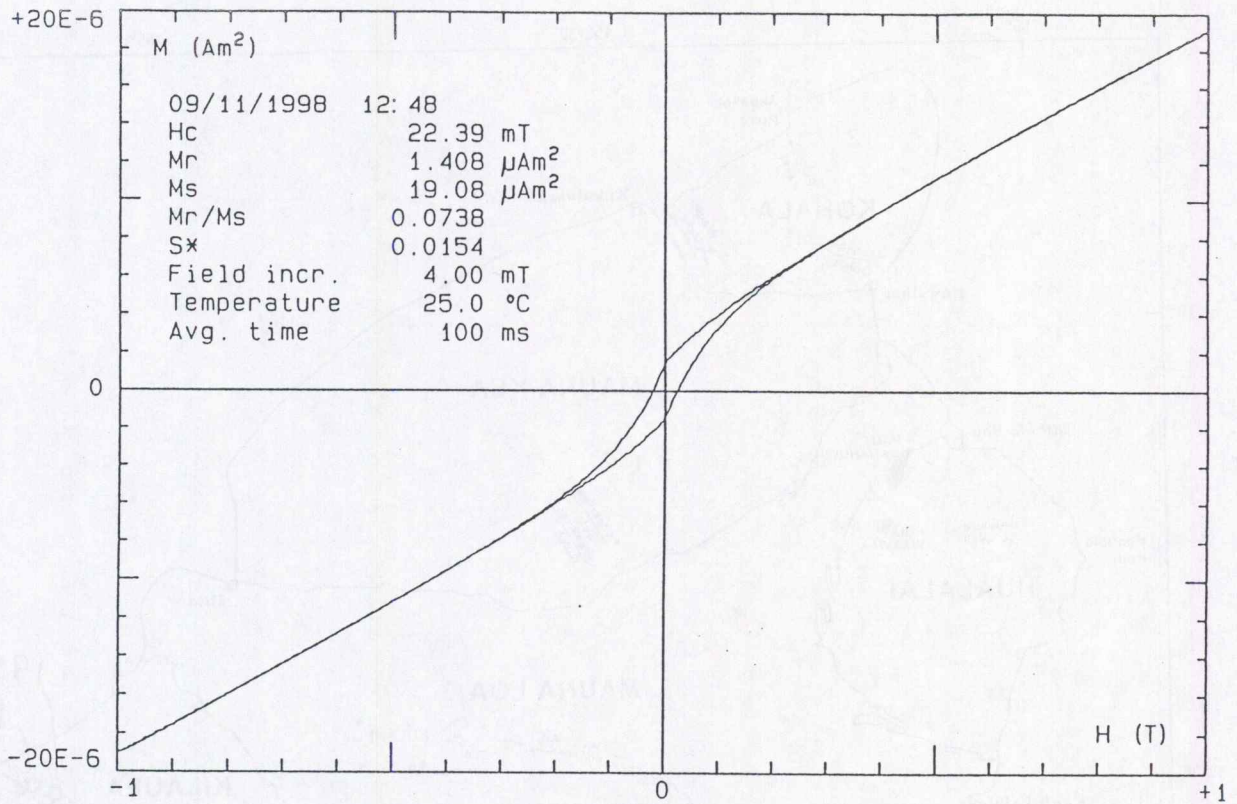


EXPLANATION

- | | | | |
|---------|---|---|--------------------------------------|
| — | Fault | * | Crest of lava shield |
| - - - - | Generalized distribution of eruptive vents in rift zones of Kilauea and Mauna Loa | ○ | Caldera or crater identified in text |
| ● | | ■ | Pyroclastic cones or prominent ridge |

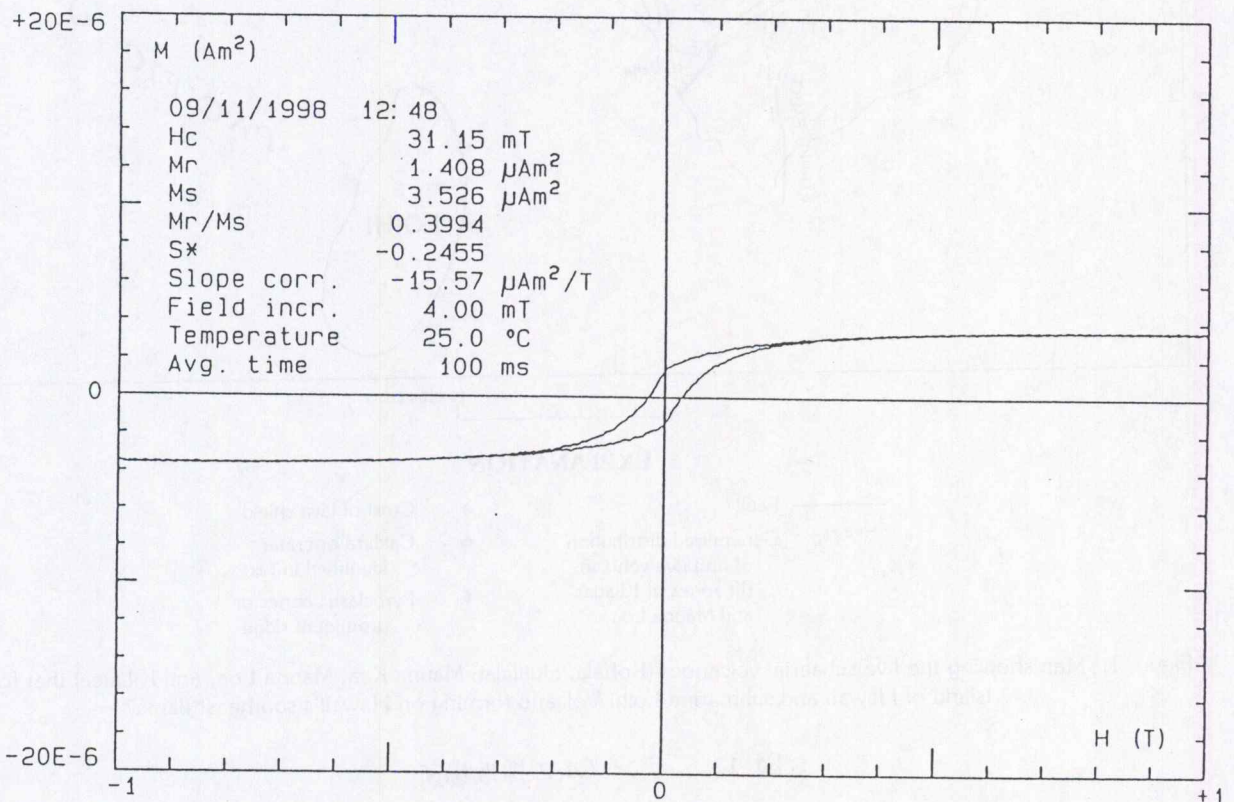
Figure 1. Map showing the five subaerial volcanoes (Kohala, Hualalai, Mauna Kea, Mauna Loa, and Kilauea) that form the Island of Hawaii and submarine Loihi Volcano forming on Hawaii's southeast flank.

図 12 サンプルの採取場所



ha9505-6
File: HA950506.AAA

補正前後



ha9505-6
File: HA950506.AAA 2.327 図 13 補正前後の磁気履歴曲線

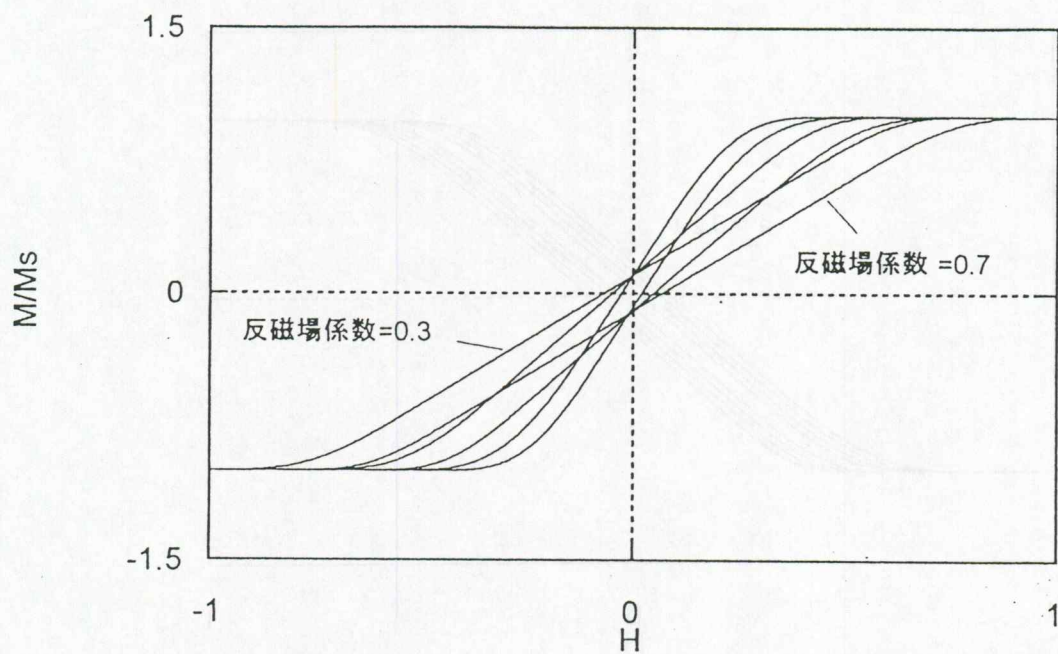


図 14 MD の磁気履歴曲線 : $am=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.3, 0.5, 0.7$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

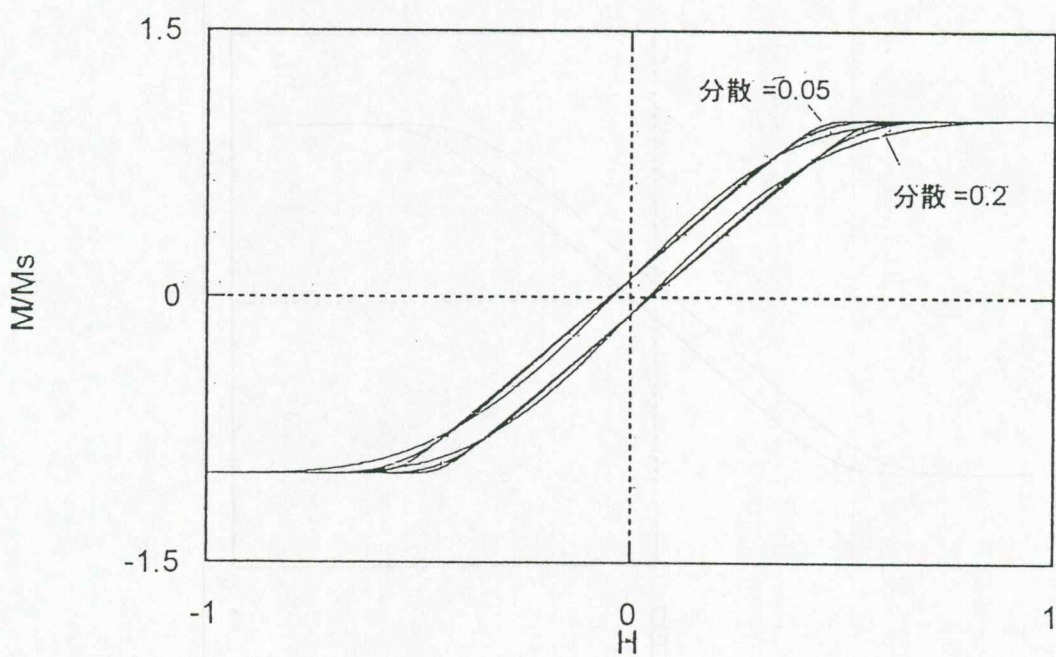


図 15 MD の磁気履歴曲線 : $am=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.05, 0.1, 0.2$

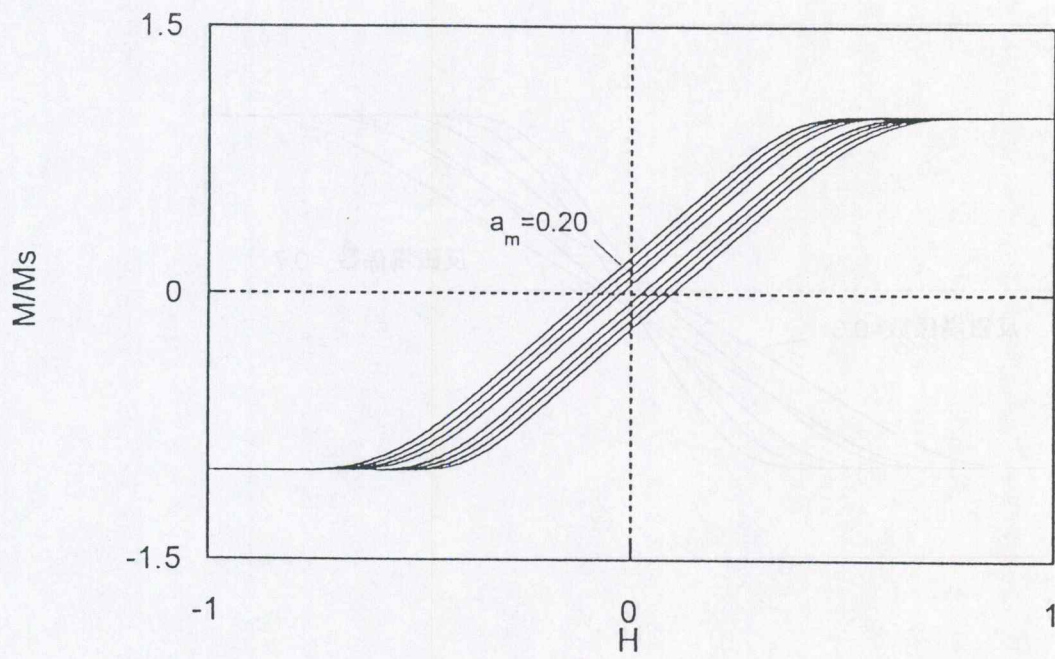


図 16 MD の磁気履歴曲線 : $a_m=0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

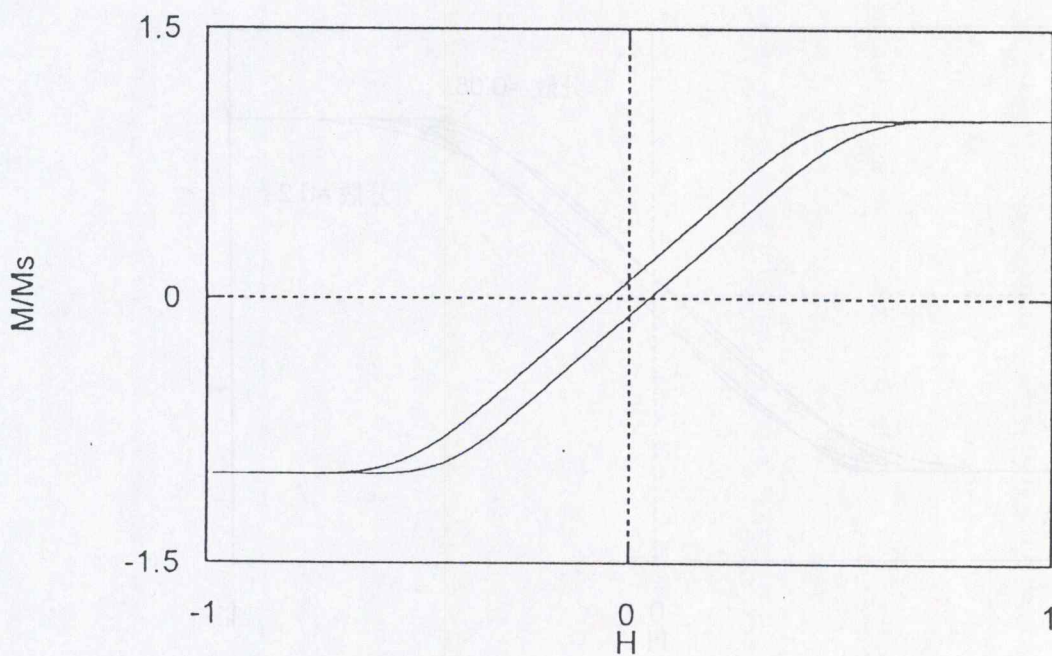


図 17 MD の磁気履歴曲線 : $a_m=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01, 0.05$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

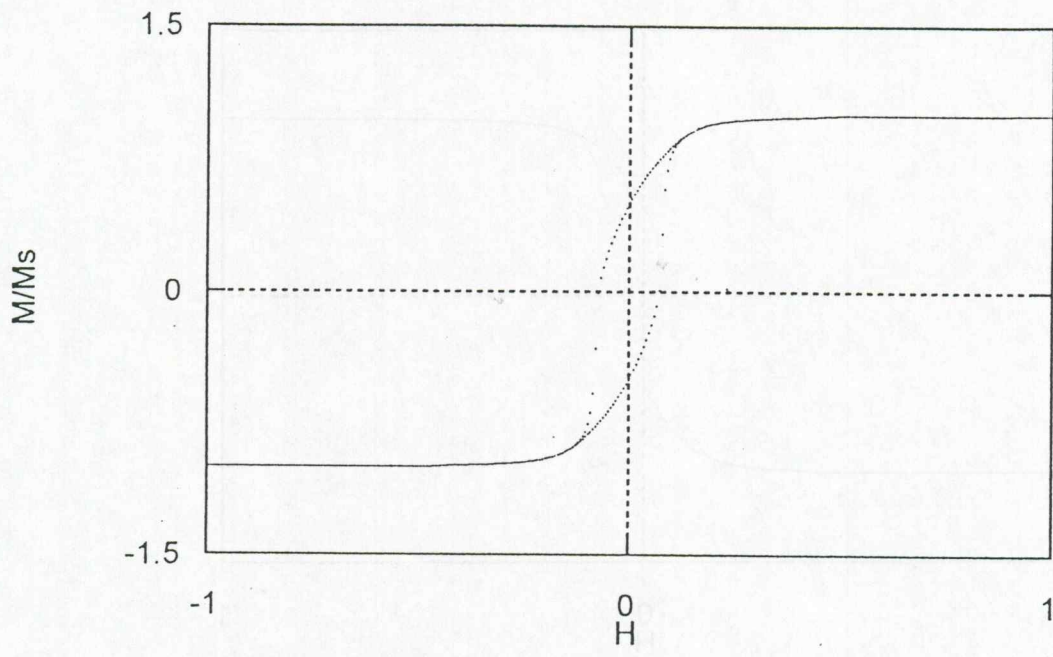


図 18 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_l=0.05$ 、 $q_-=1.48$ 、 $q_+=1.53$

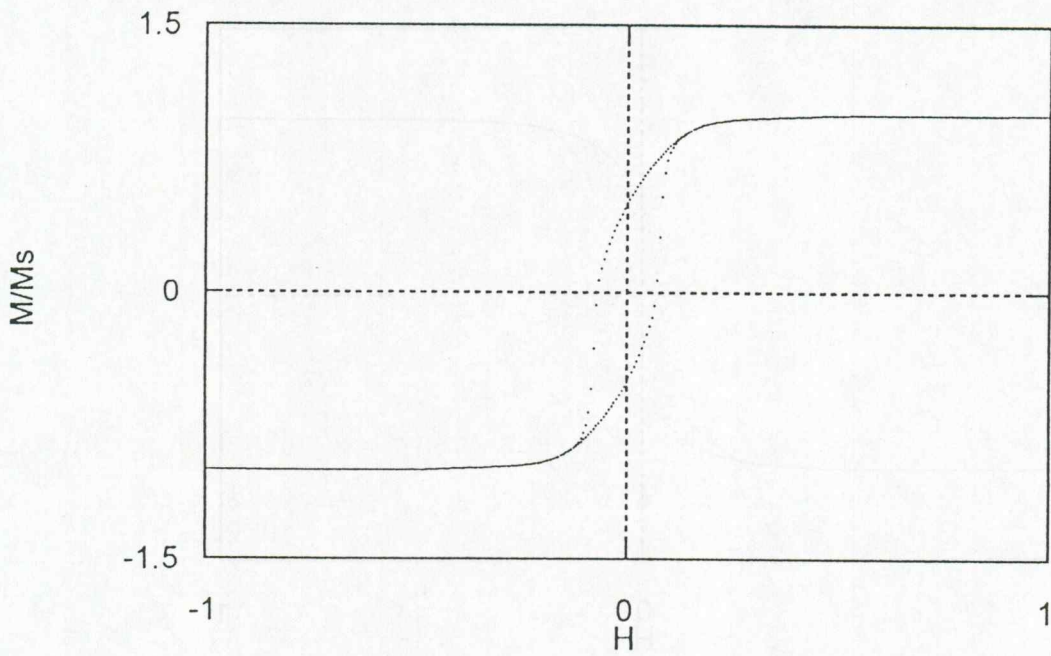


図 19 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_l=0.10$ 、 $q_-=1.45$ 、 $q_+=1.55$

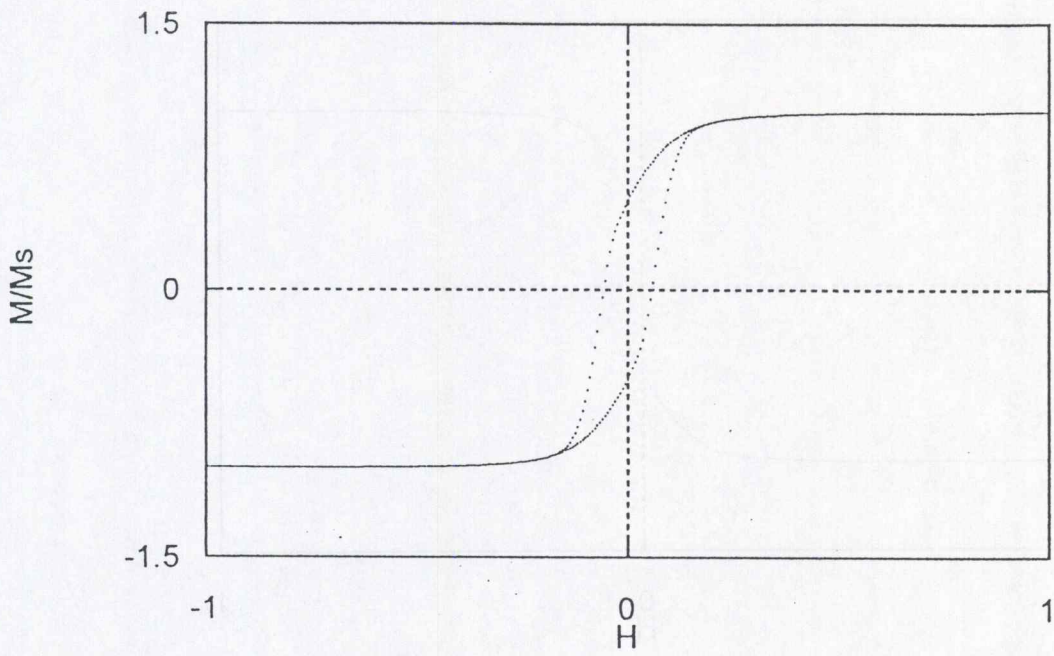


図 20 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_f=0.50$ 、 $q=1.30$ 、 $q_+=1.82$

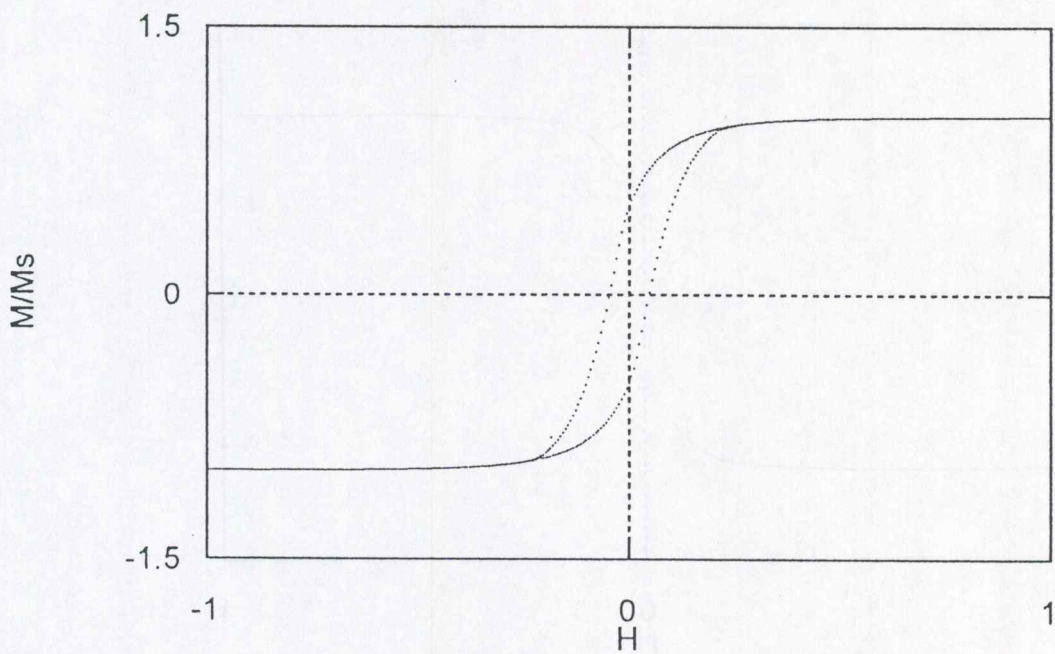


図 21 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_f=1.0$ 、 $q=1.18$ 、 $q_+=2.36$

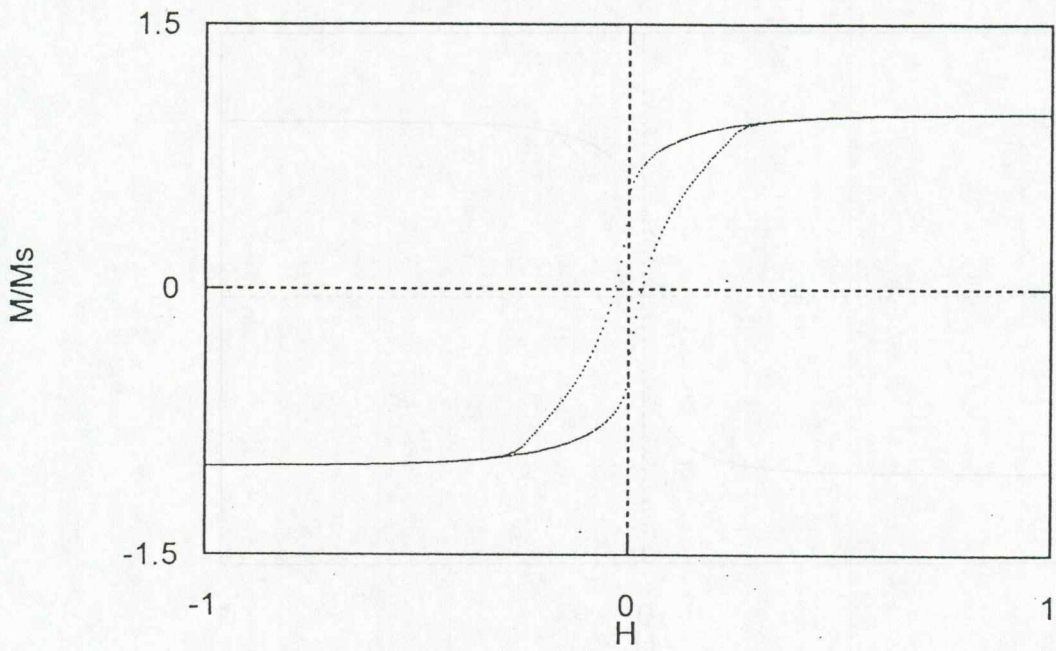


図 22 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_r=2.0$ 、 $q_-=1.07$ 、 $q_+=4.69$

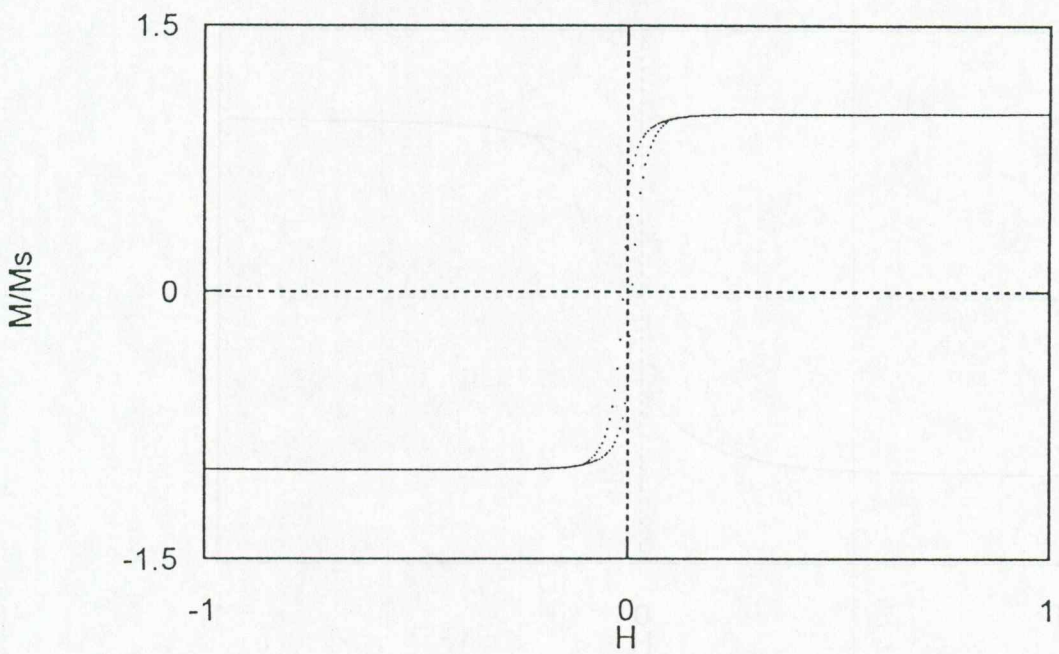


図 23 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.1$ 、 $\sigma_r=1.0$ 、 $q_-=1.04$ 、 $q_+=1.27$

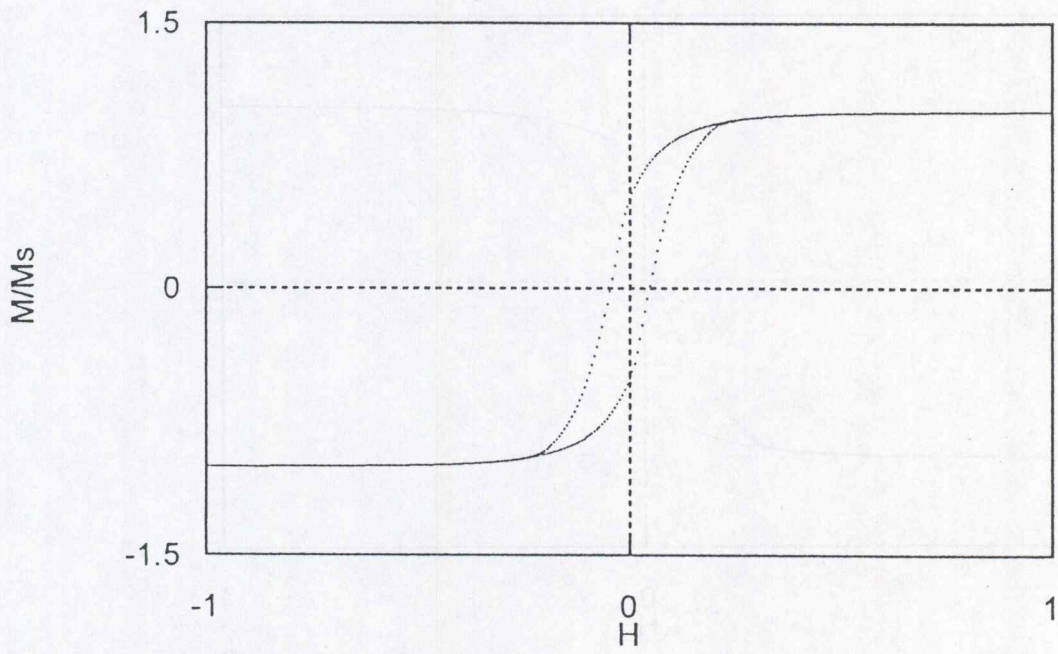


図 24 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_I=1.0$ 、 $q=1.18$ 、 $q_+=2.36$

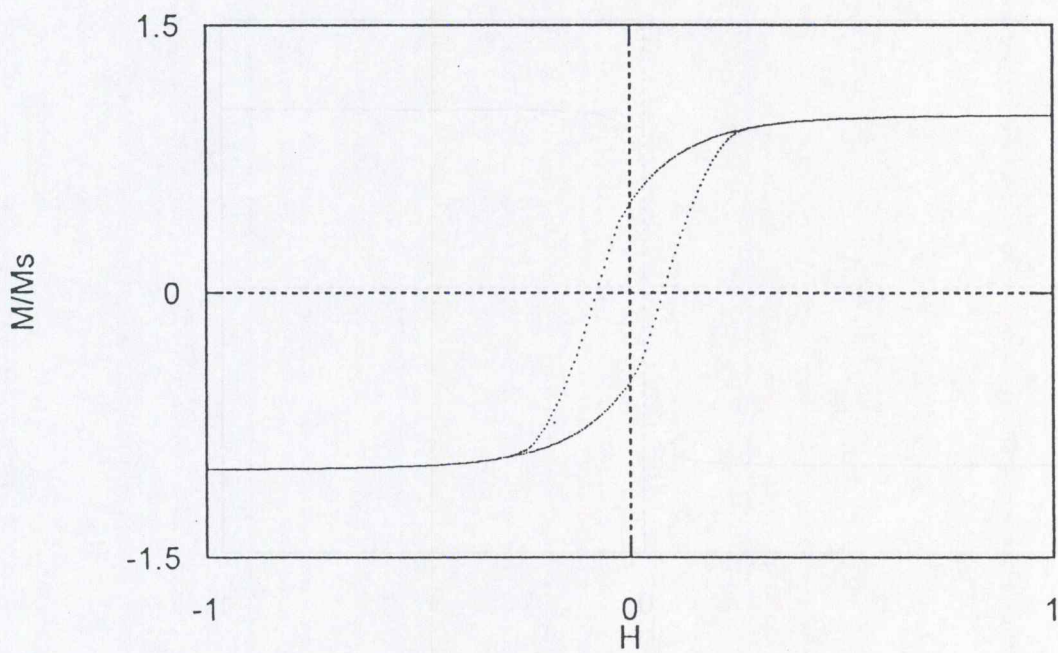


図 25 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=2.0$ 、 $\sigma_I=1.0$ 、 $q=1.37$ 、 $q_+=3.72$

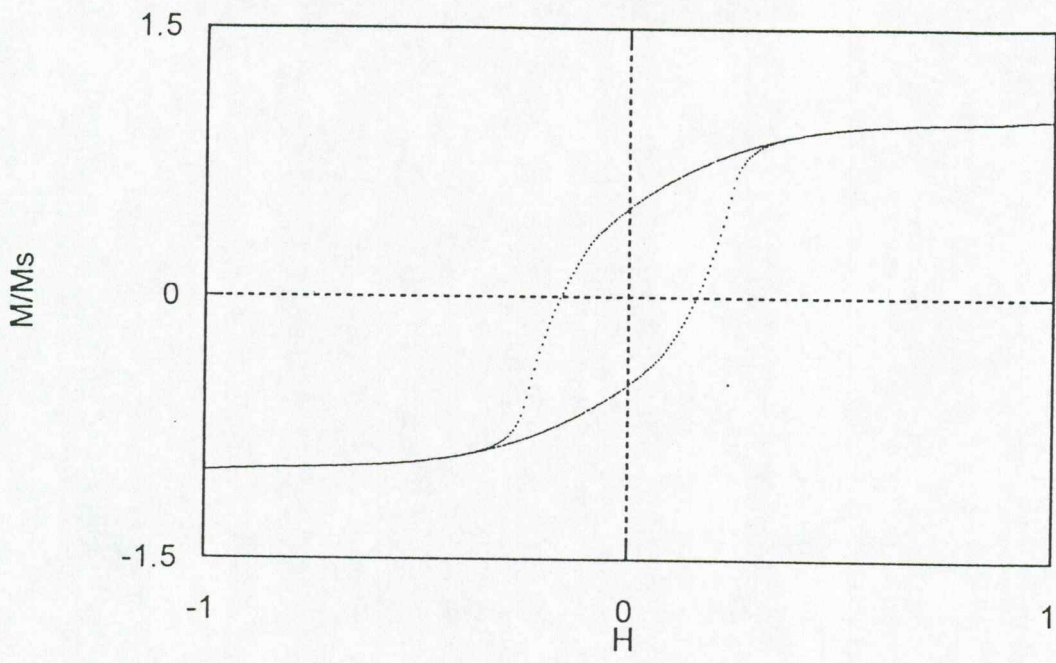


図 26 SD の磁気履歴曲線 : $q_m=5.0$ 、 $\sigma_l=1.0$ 、 $q_-=2.47$ 、 $q_+=11.9$

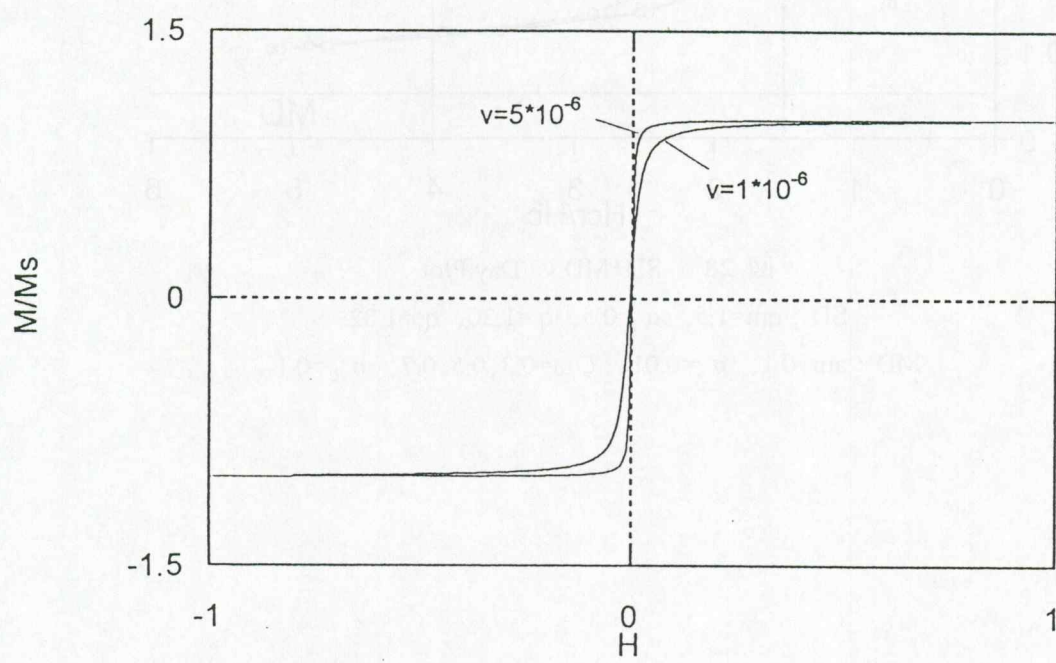


図 27 SP の磁気履歴曲線 : $v=1 \times 10^{-6}$ 、 5×10^{-6} (μm^3)、 $T=300(K)$

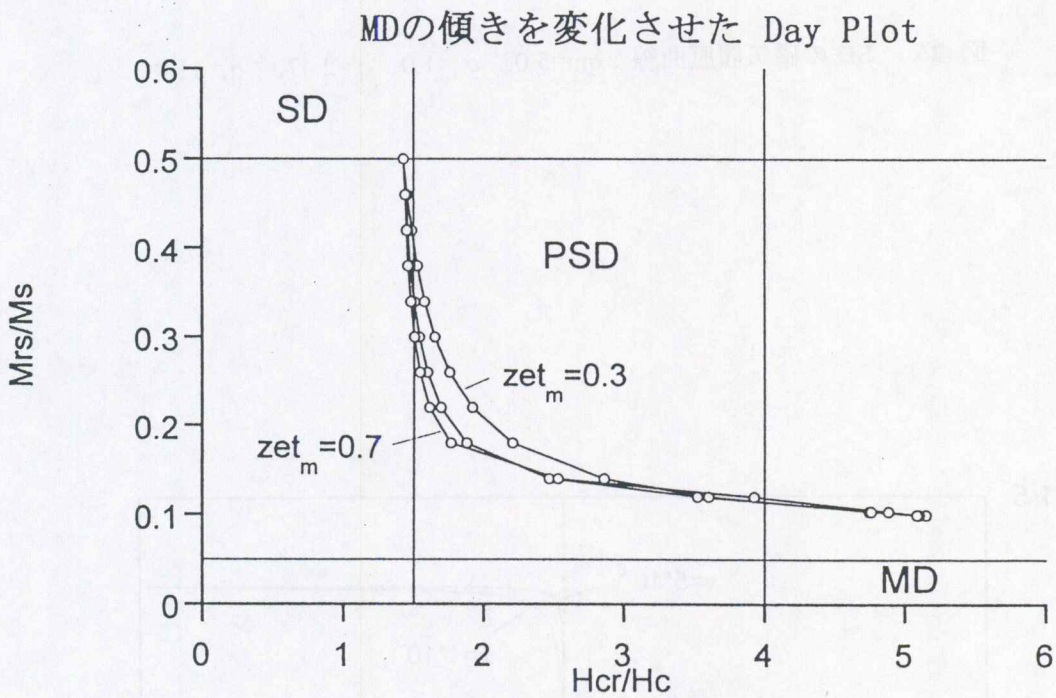


図 28 SD+MD の Day Plot

SD : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_1=0.5$ 、 $q_-=1.30$ 、 $q_+=1.82$

MD : $a_m=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.3, 0.5, 0.7$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

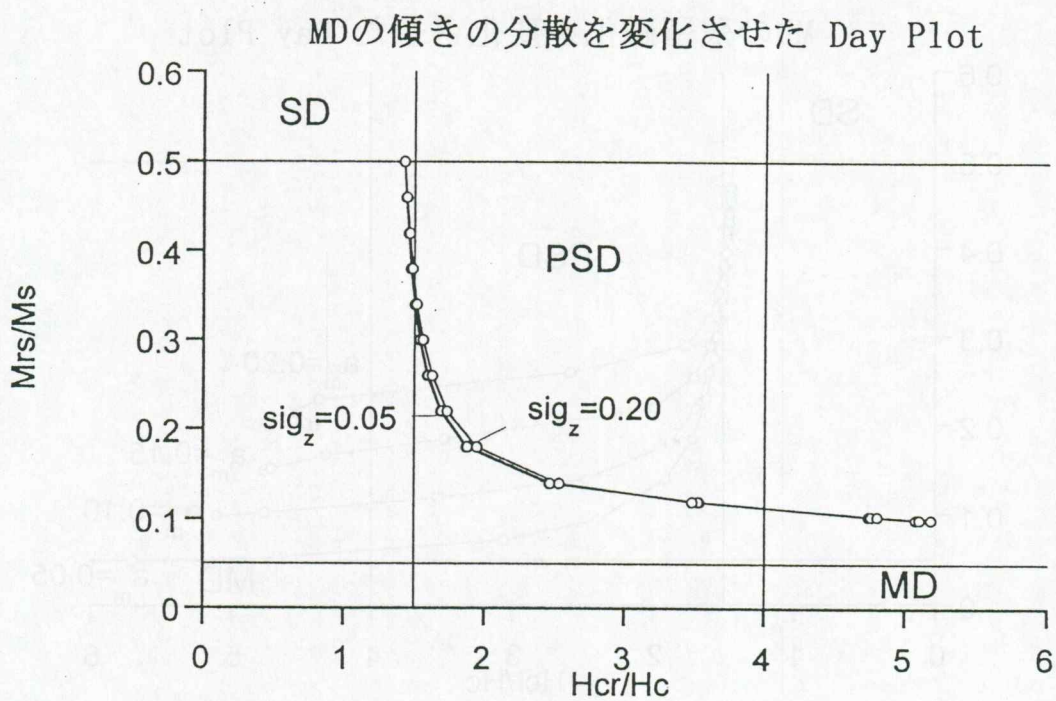


図 29 SD+MD の Day Plot

SD : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_r=0.5$ 、 $q_-=1.30$ 、 $q_+=1.82$

MD : $a_m=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.05, 0.1, 0.2$

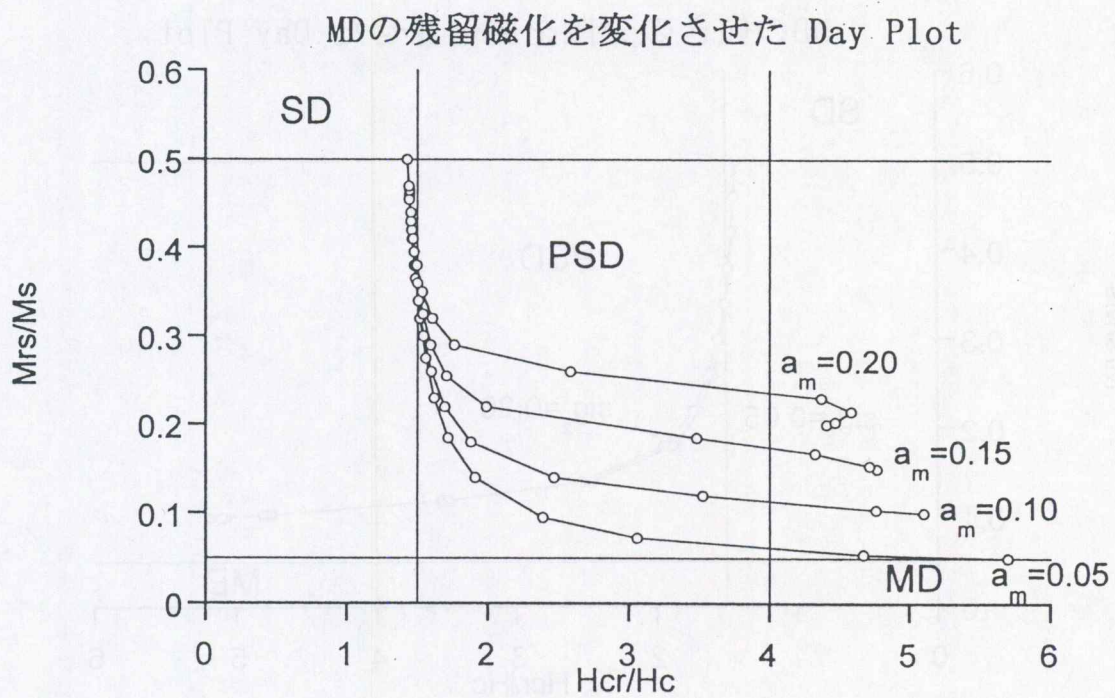


図 30 SD+MD の Day Plot

SD : $q_m=1.5$ 、 $\sigma_l=0.5$ 、 $q_-=1.30$ 、 $q_+=1.82$

MD : $a_m=0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

MDの残留磁化の分散を変化させた Day Plot

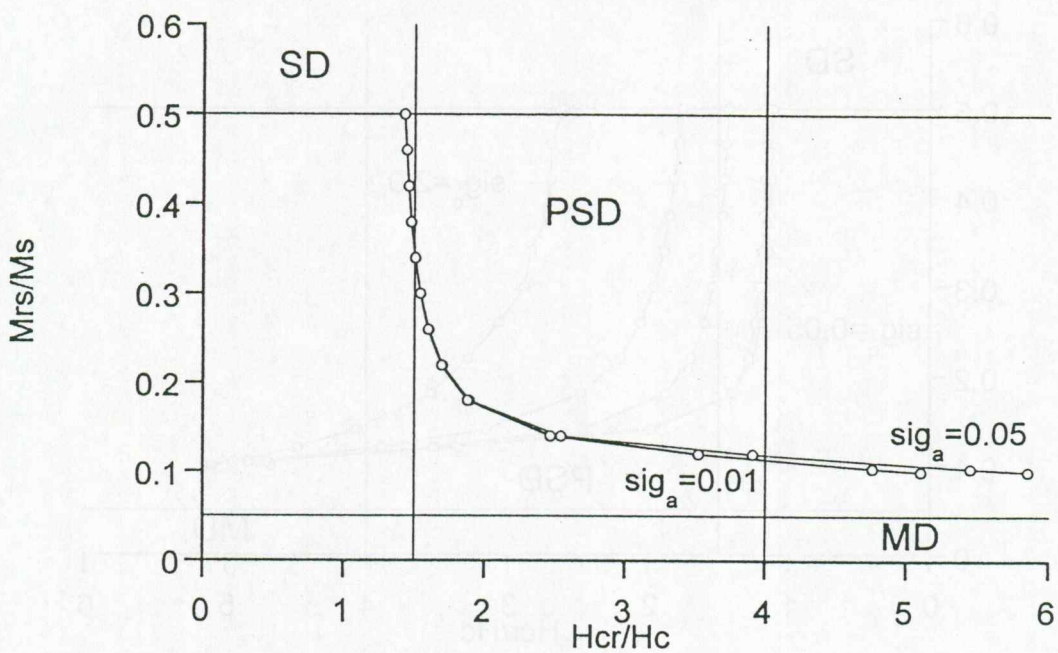


図 31 SD+MD の Day Plot

SD : $q_m=1.5$, $\sigma_l=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$

MD : $a_m=0.1$, $\sigma_a=0.01, 0.05$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$

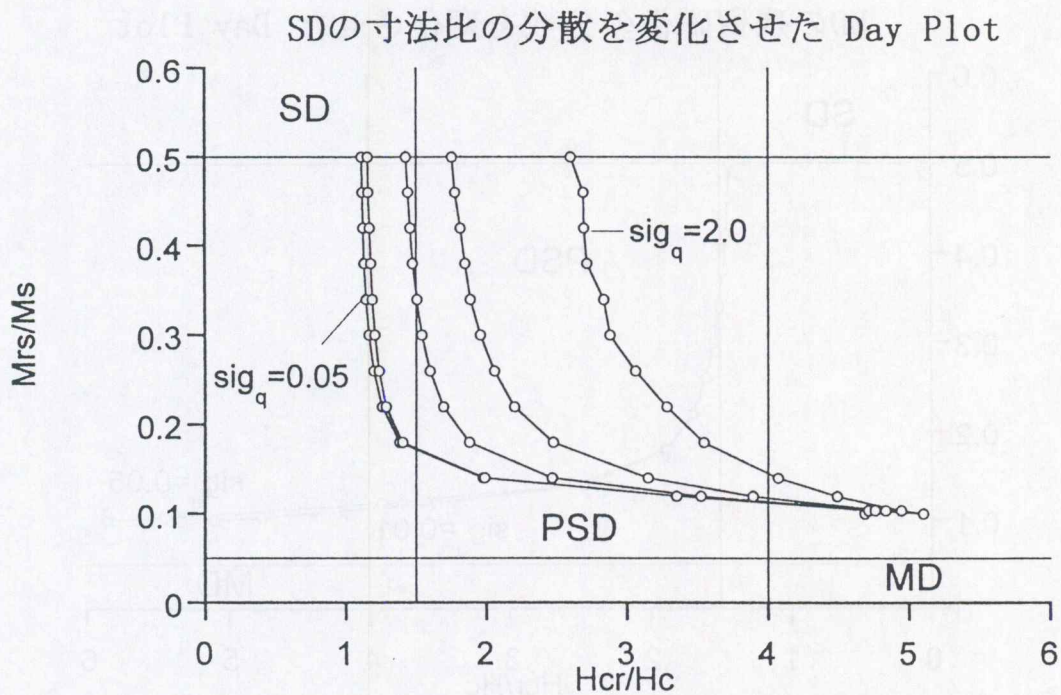


図 32 SD+MD の Day Plot

SD : $q_m=1.5$ 、 $(\sigma_b, q_-, q_+)=(0.05, 1.48, 1.53)$ 、 $(0.1, 1.45, 1.55)$ 、 $(0.5, 1.30, 1.82)$ 、 $(1.0, 1.18, 2.36)$ 、 $(2.0, 1.07, 4.69)$

MD : $a_m=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

SDの寸法比を変化させた Day Plot

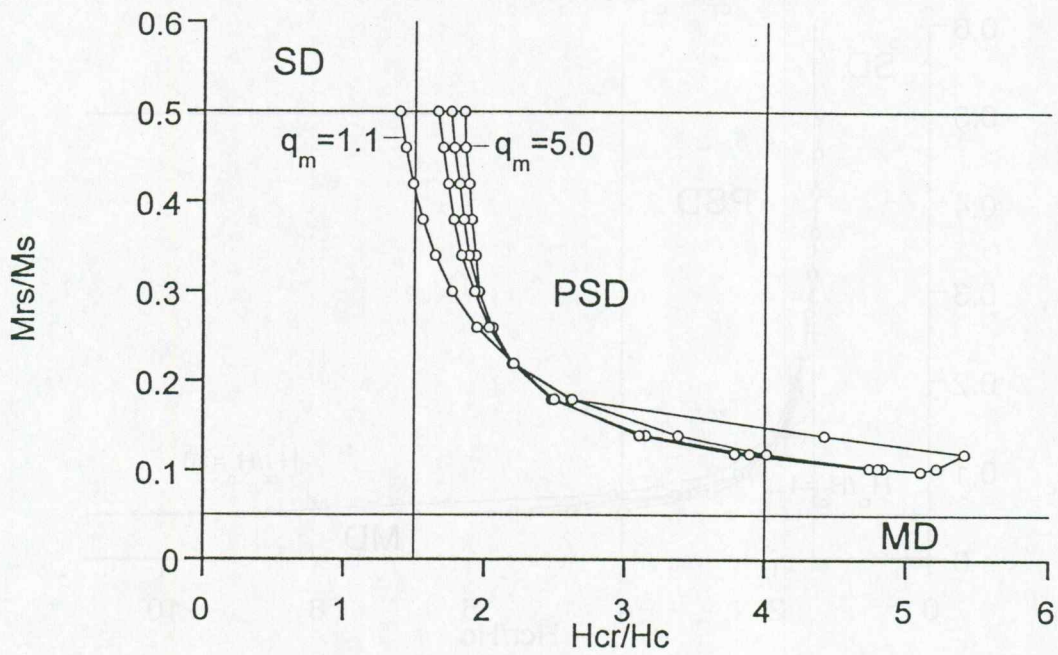


図 33 SD+MD の Day Plot

SD : $\sigma_1=1.0$ 、 $(q_m, q_-, q_+)= (1.1, 1.04, 1.27)$ 、 $(1.5, 1.18, 2.36)$ 、 $(2.0, 1.37, 3.72)$ 、 $(5.0, 2.47, 11.9)$

MD : $a_m=0.1$ 、 $\sigma_a=0.01$ 、 $\zeta_m=0.5$ 、 $\sigma_\zeta=0.1$

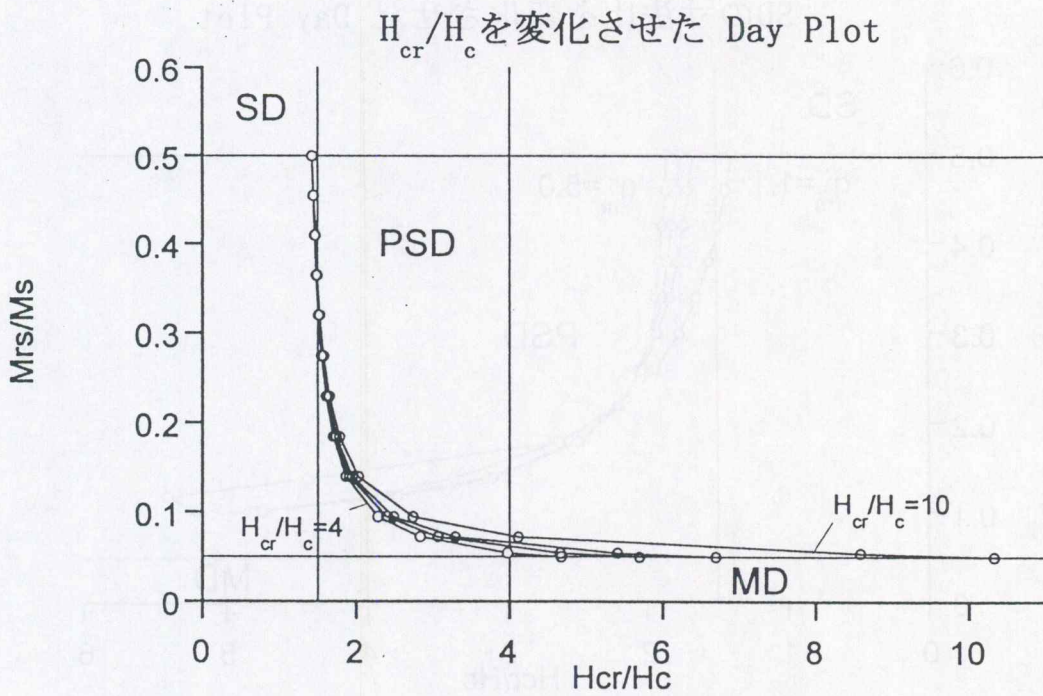


図 34 SD+MD の Day Plot

SD : $qm=1.5$, $\sigma_1=0.5$, $q_1=1.30$, $q_2=1.82$

MD : $H_{cr}/H_c=4, 5, 6, 10$, $am=0.05$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$

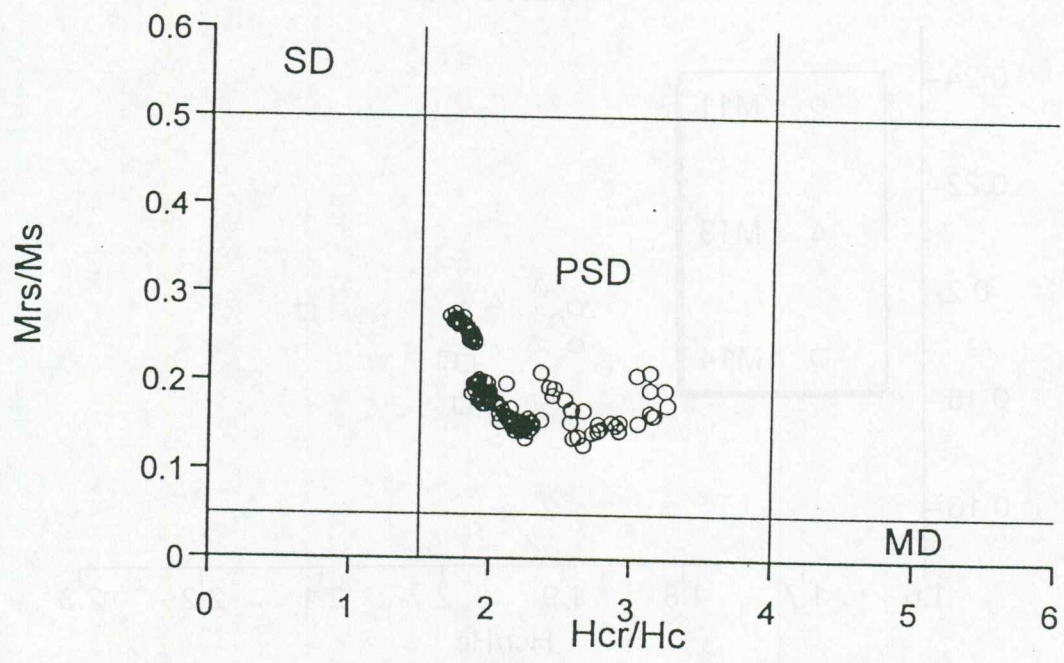


図 35 ハワイ 1960 年噴出溶岩

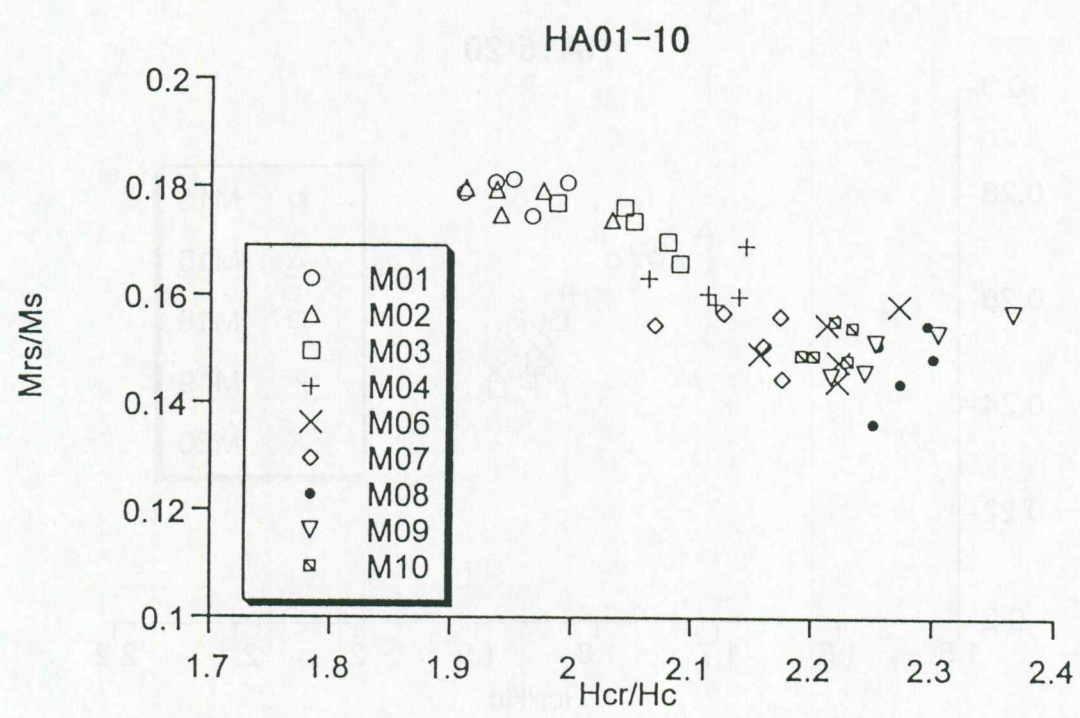


図 36 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 1

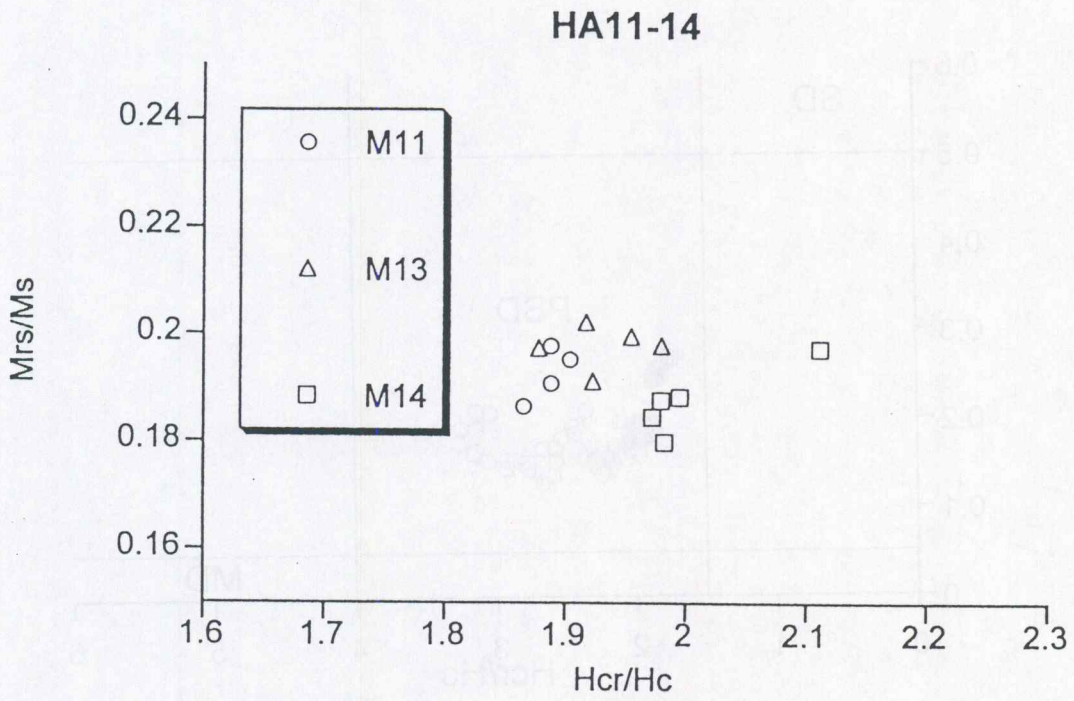


図 37 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 2

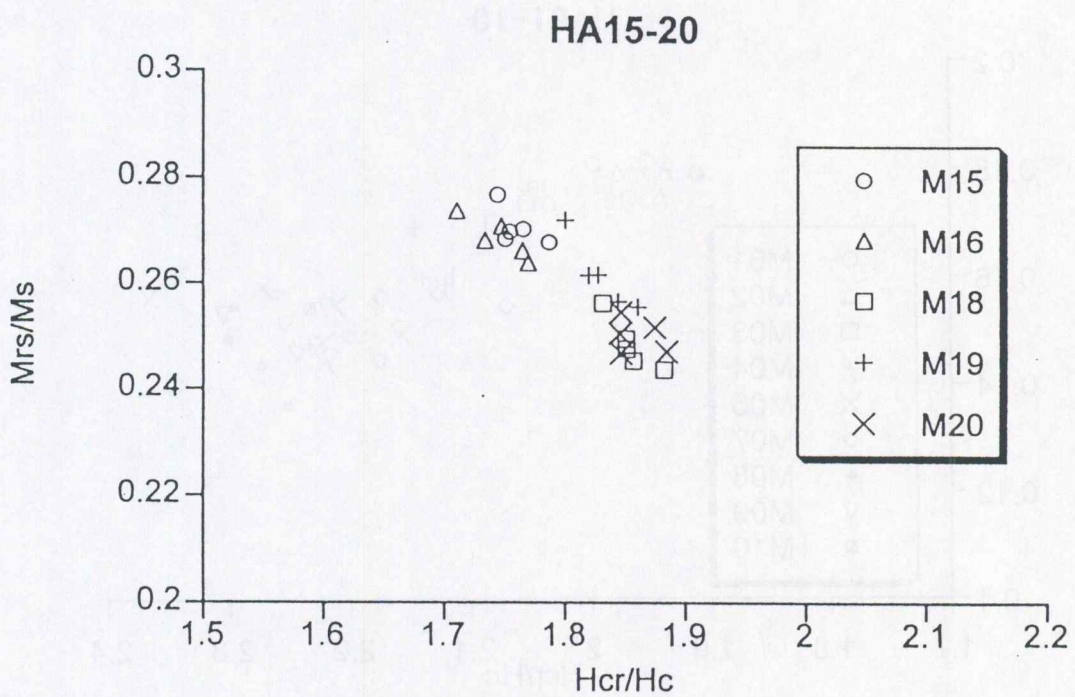


図 38 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 3

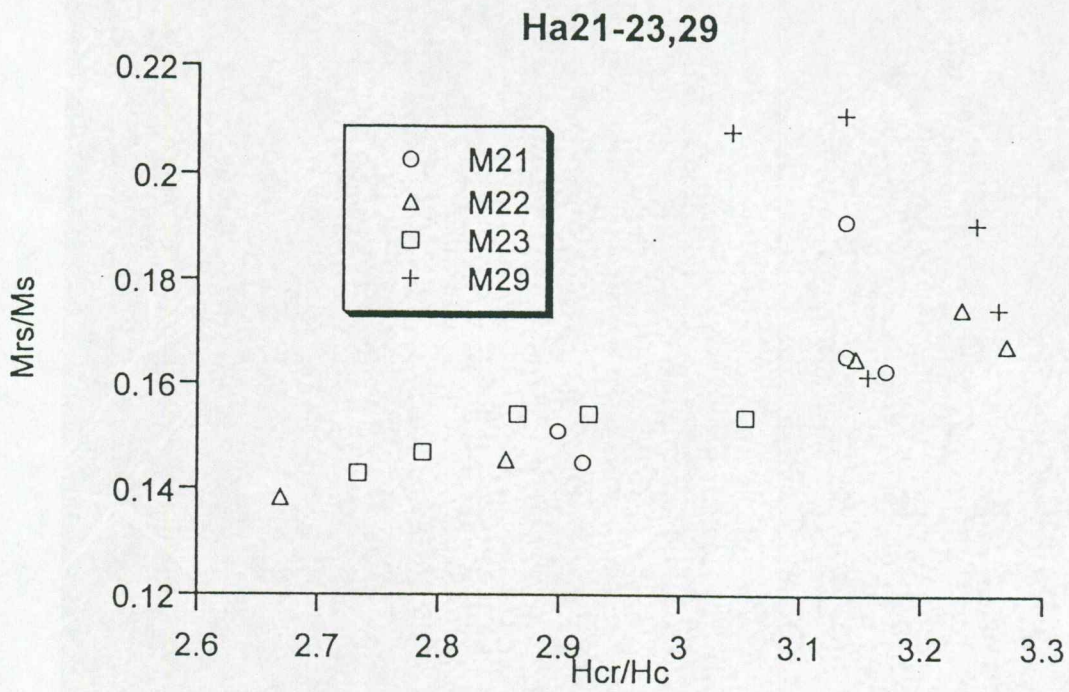


図 39 ハワイ 1960年噴出溶岩 サイト4

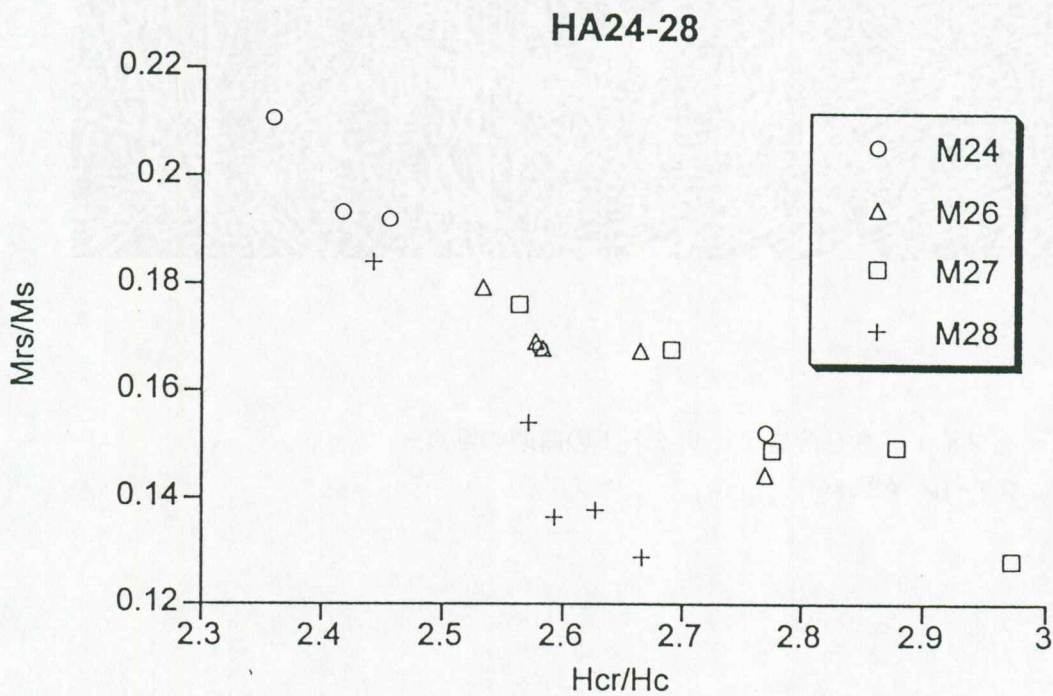


図 40 ハワイ 1960年噴出溶岩 サイト5

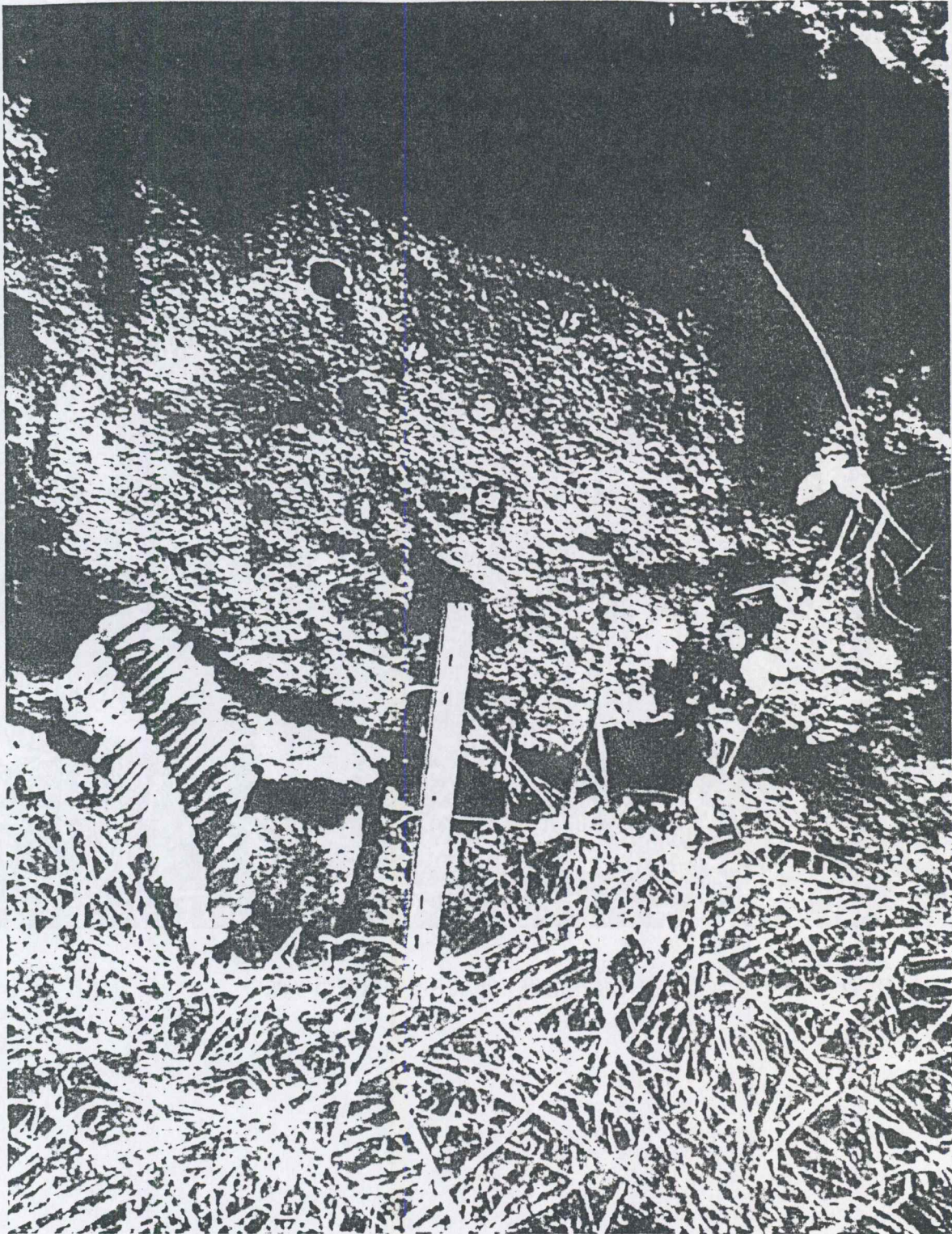


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

図 41 ハワイ 1960 溶岩 サイト 1 の露頭の写真
スケール 30cm



図 42 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 2 の露頭の写真

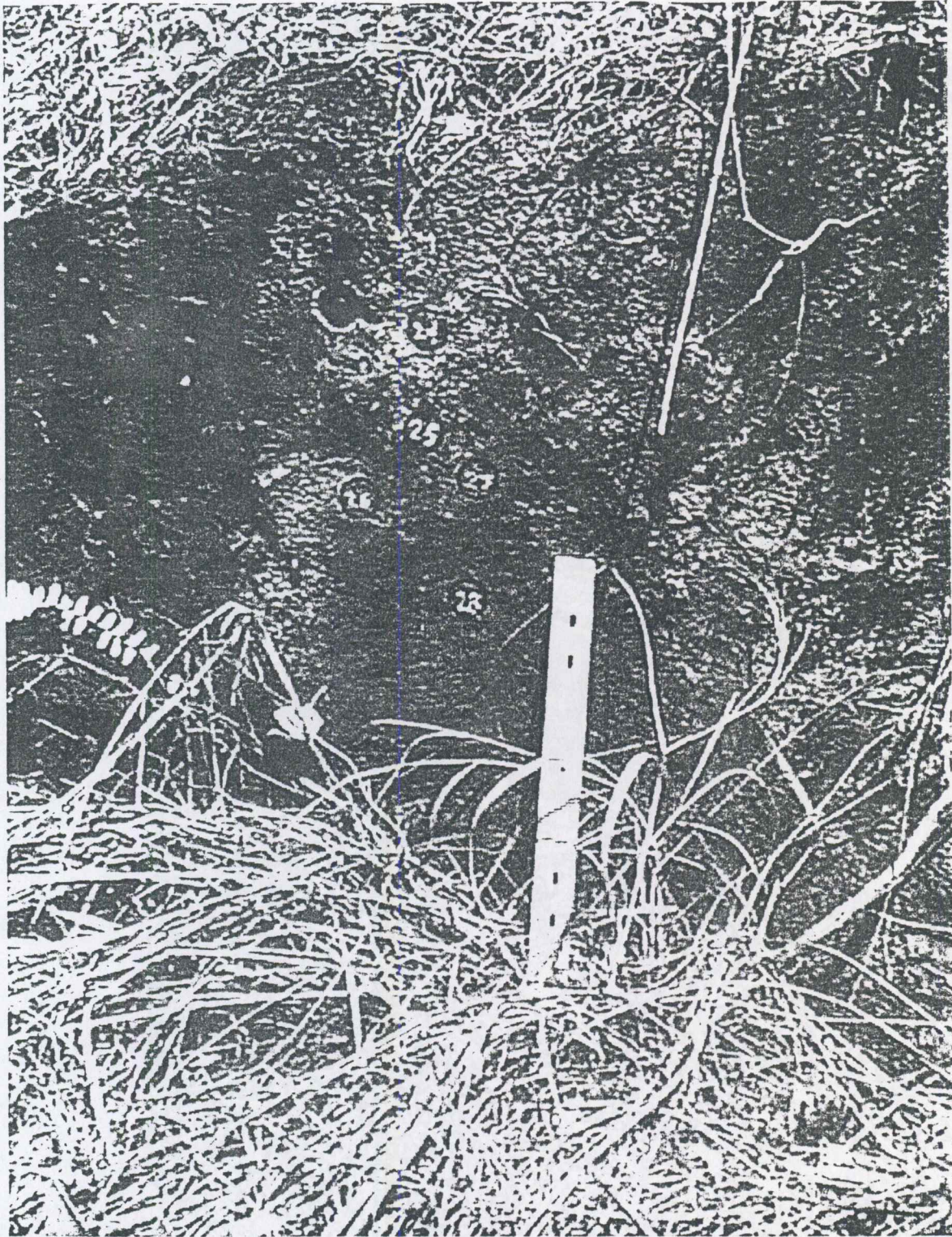


- (15)
- (16)
- (17)
- (18)
- (19)
- (20)

図 43 ハワイ 1960 年噴山溶岩 サイト 3 の露頭の写真



図 44 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 4 の露頭の写真



- (24)
- (25)
- (26)
- (27)
- (28)

図 45 ハワイ 1960 年噴出溶岩 サイト 5 の露頭の写真

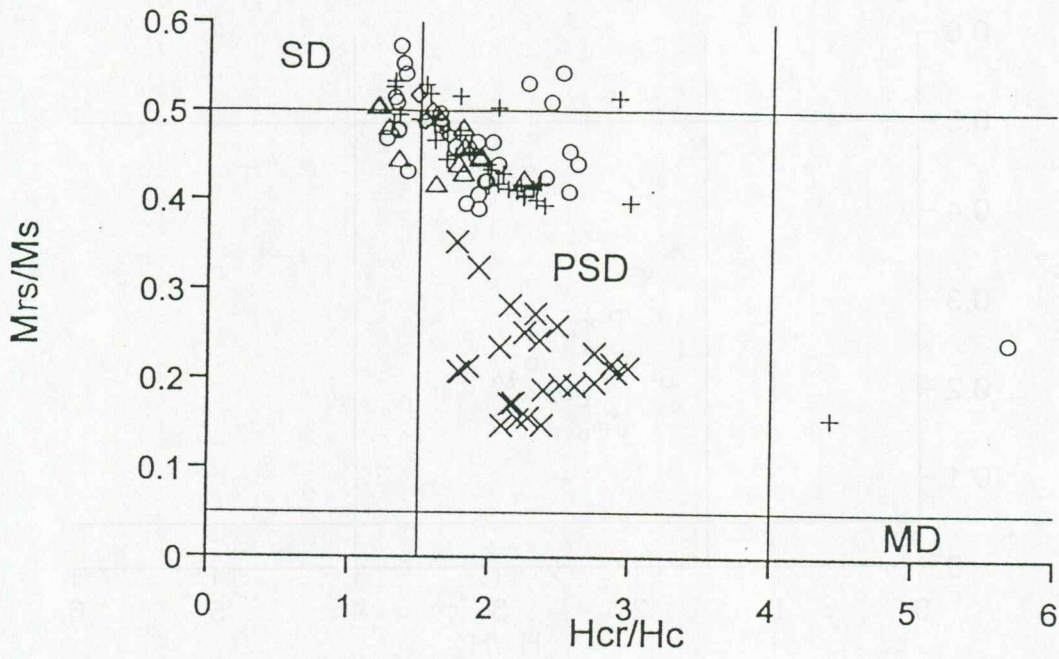


図 46 ハワイ 1955,70,72,79,95 年噴出溶岩

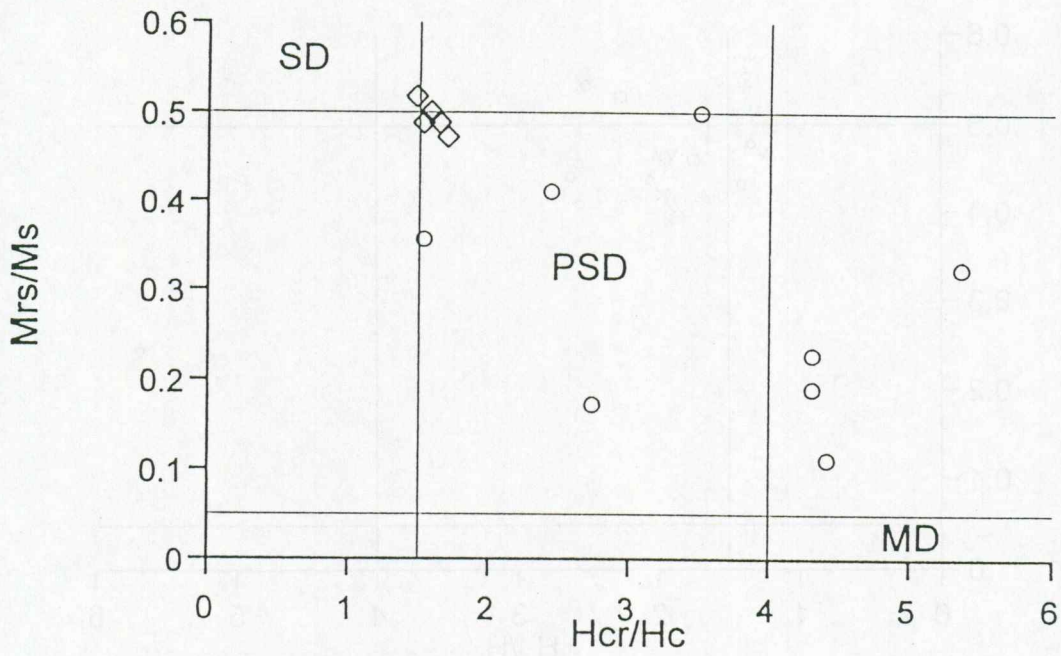


図 47 ハワイ 1955 年噴出溶岩

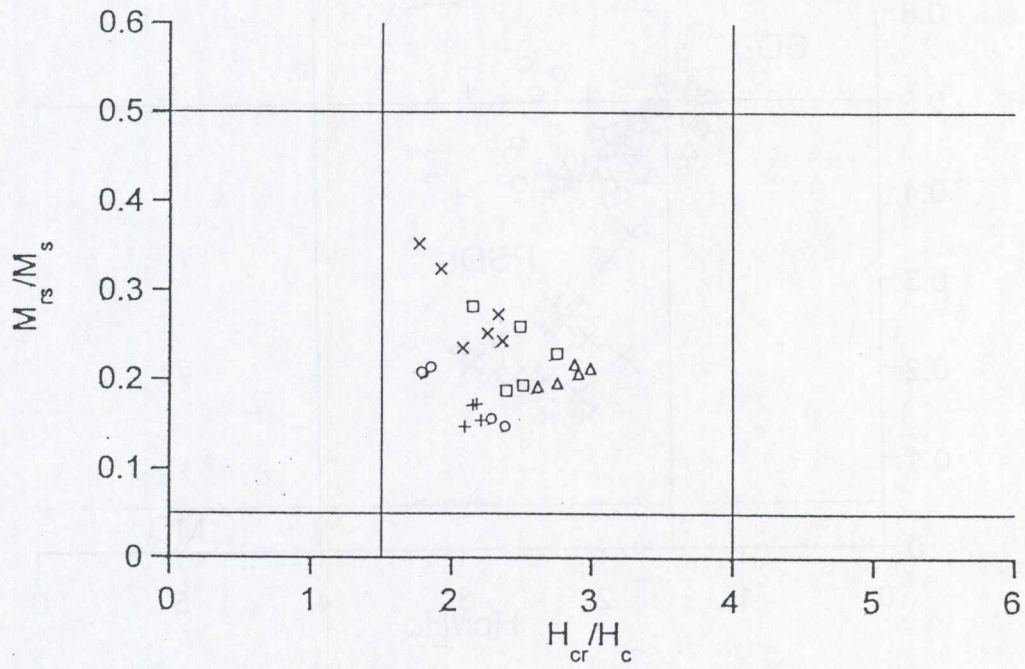


図 48 ハワイ 1970 年噴出溶岩

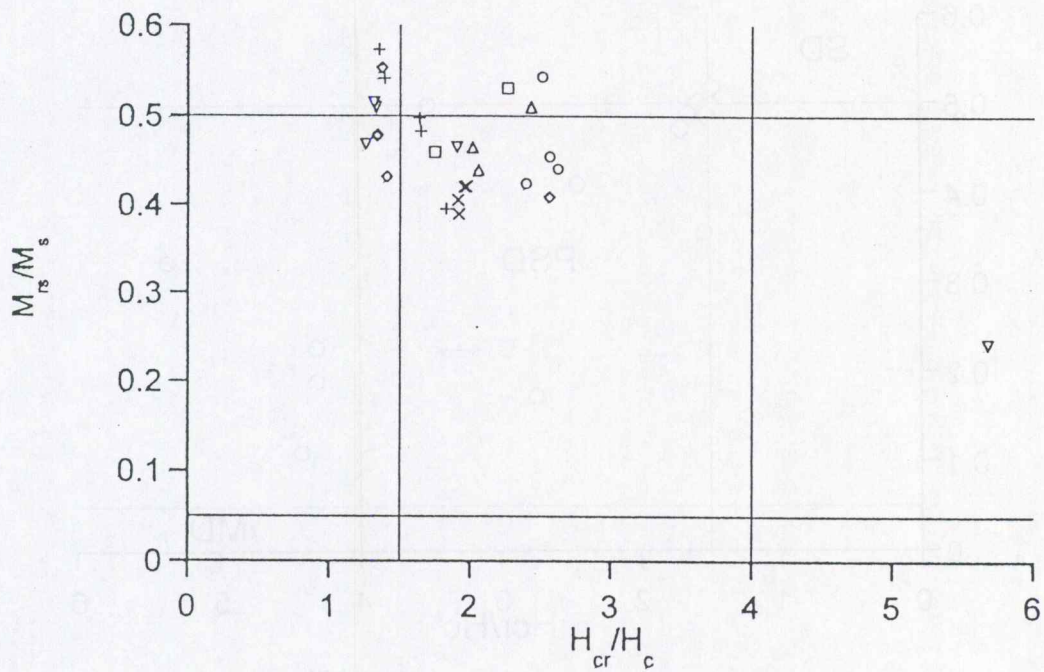


図 49 ハワイ 1972 年噴出溶岩

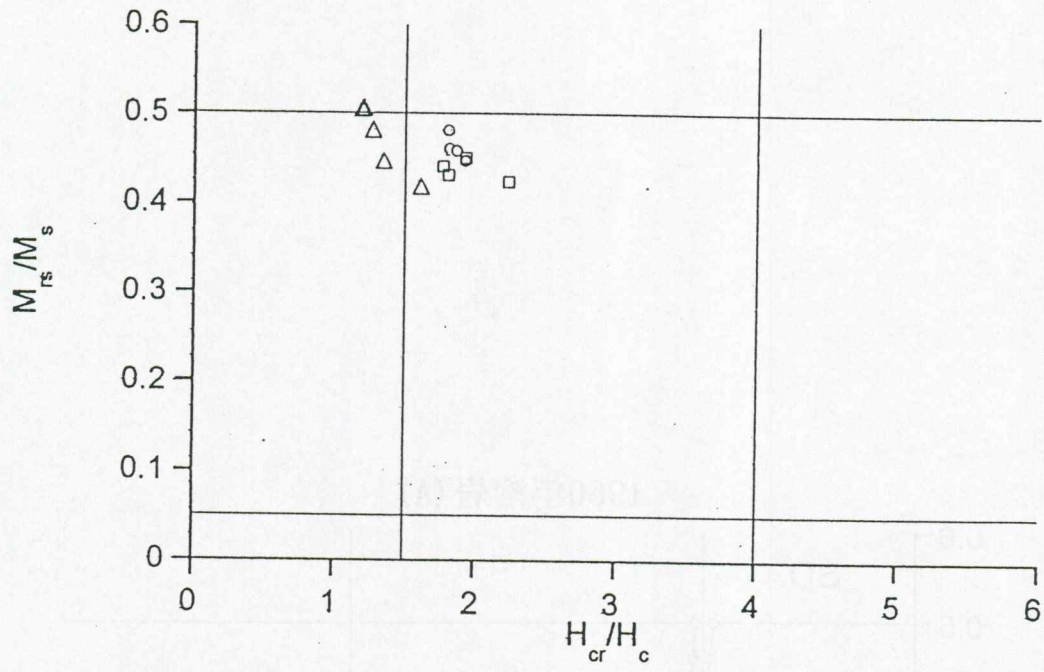


図 50 ハワイ 1979 年噴出溶岩

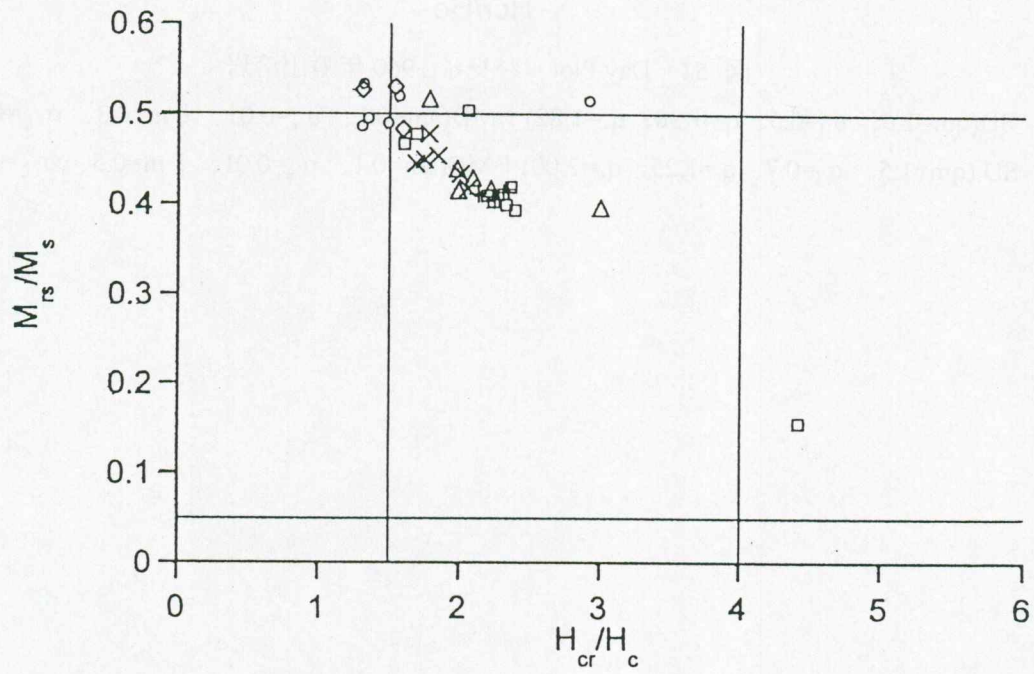


図 51 ハワイ 1995 年噴出溶岩

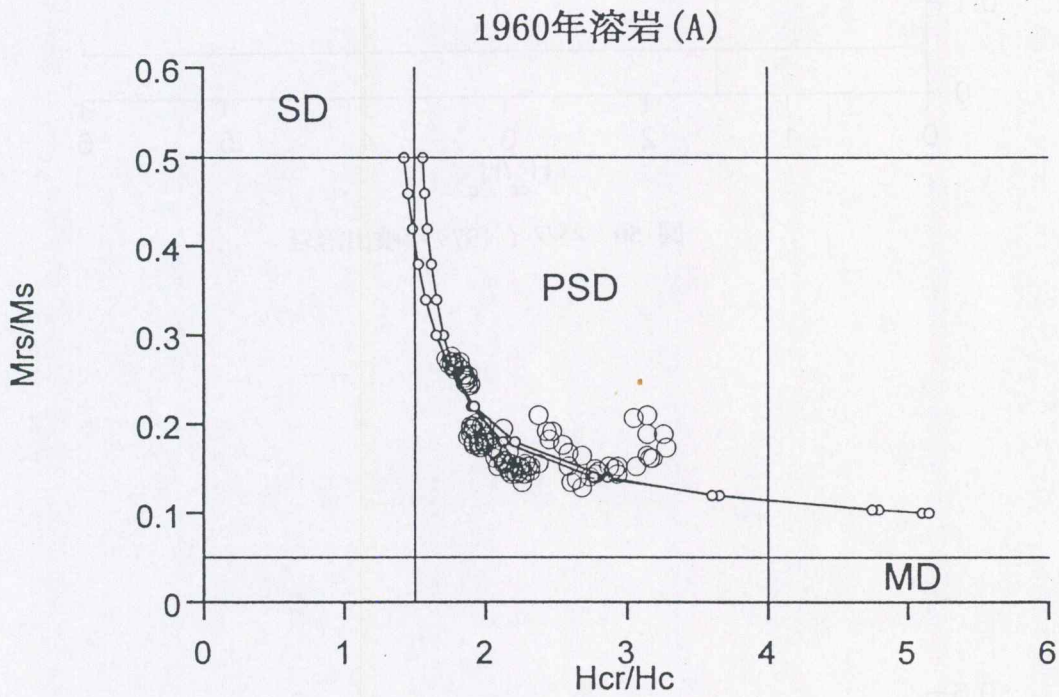
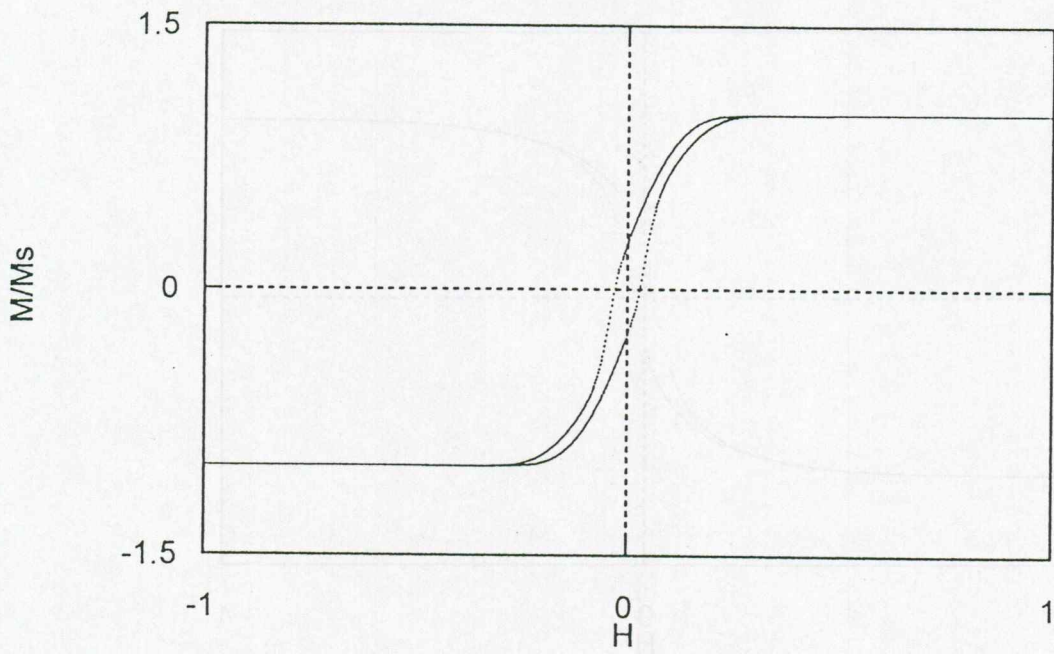
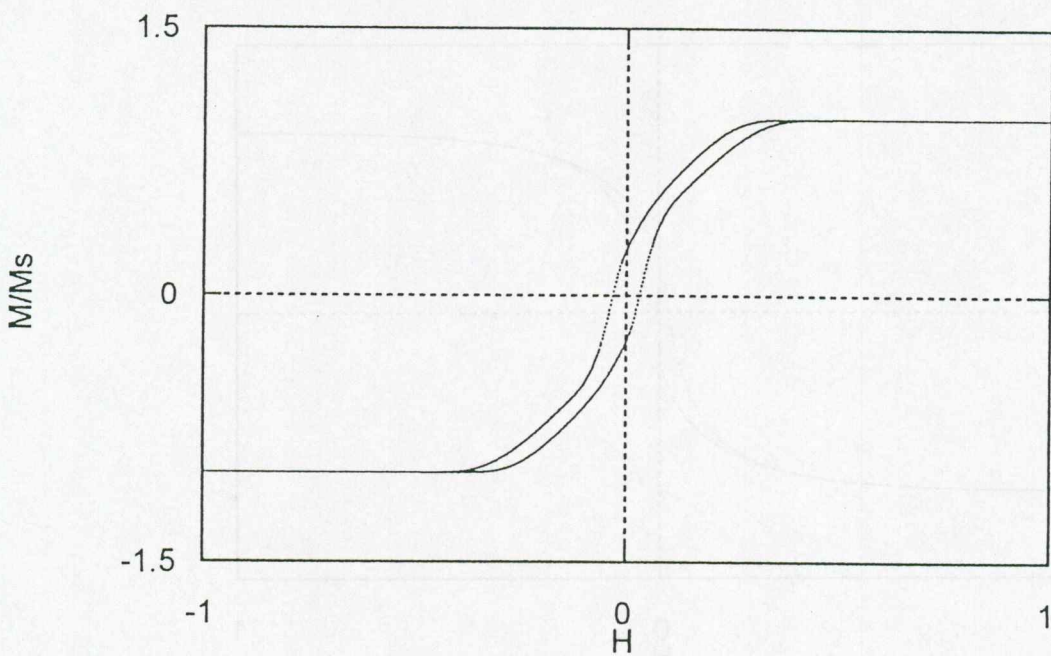


図 52 Day Plot ハワイ 1960 年噴出溶岩

SD($q_m=1.5$, $\sigma_l=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 SD ($q_m=1.5$, $\sigma_l=0.7$, $q_-=1.25$, $q_+=2.00$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$)



☒ 53 SD($q_m=1.5$, $\sigma_l=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.4$



☒ 54 SD($q_m=1.5$, $\sigma_l=0.7$, $q_-=1.25$, $q_+=2.00$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.4$

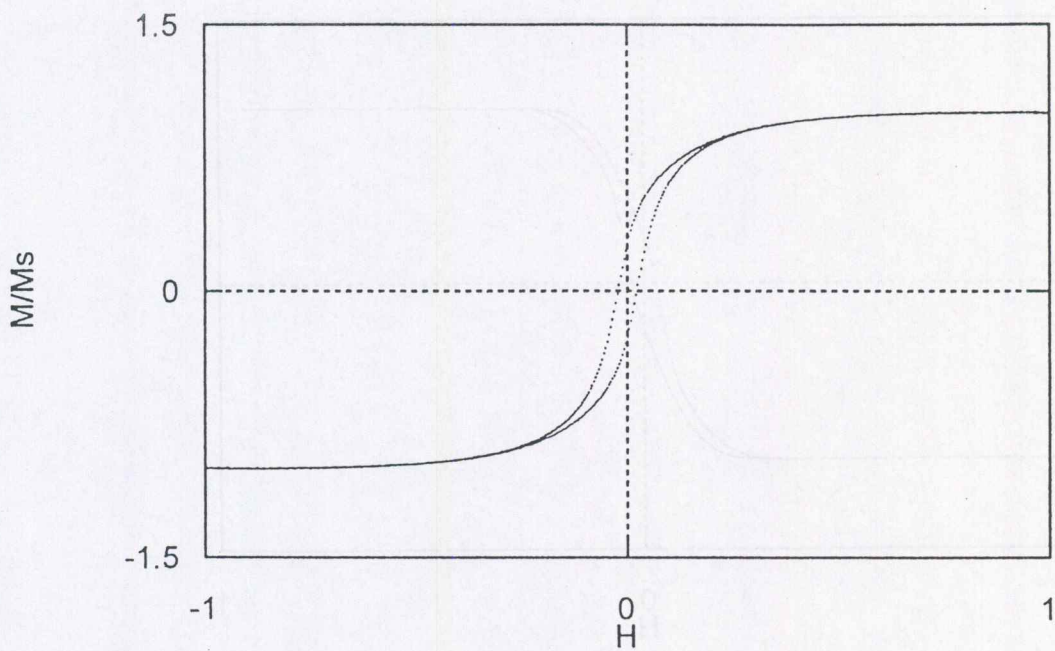


図 55 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 1

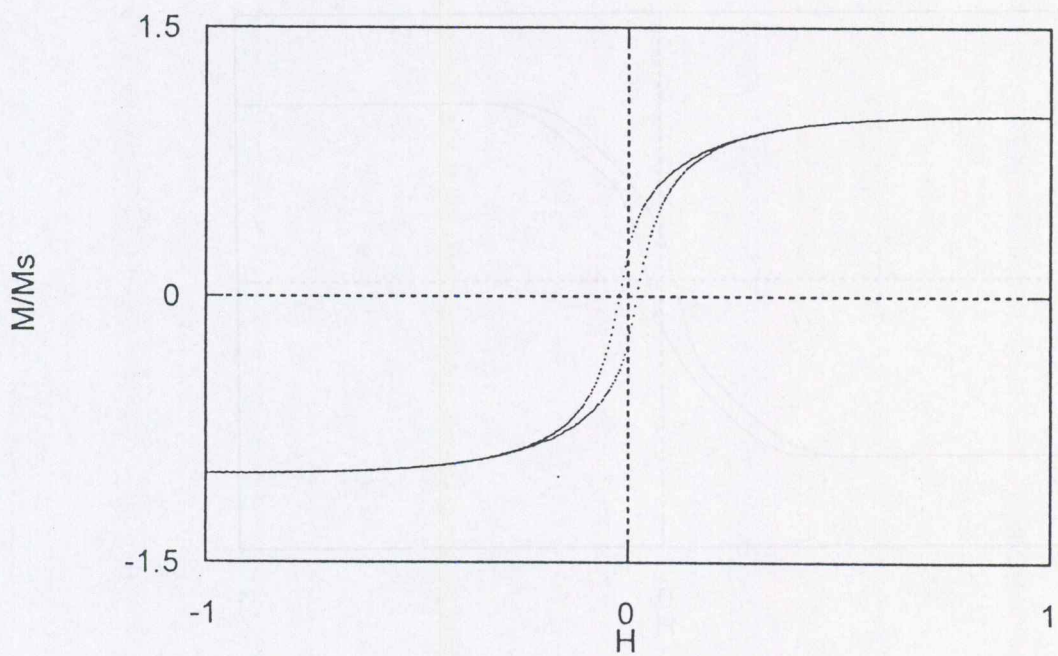


図 56 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 2

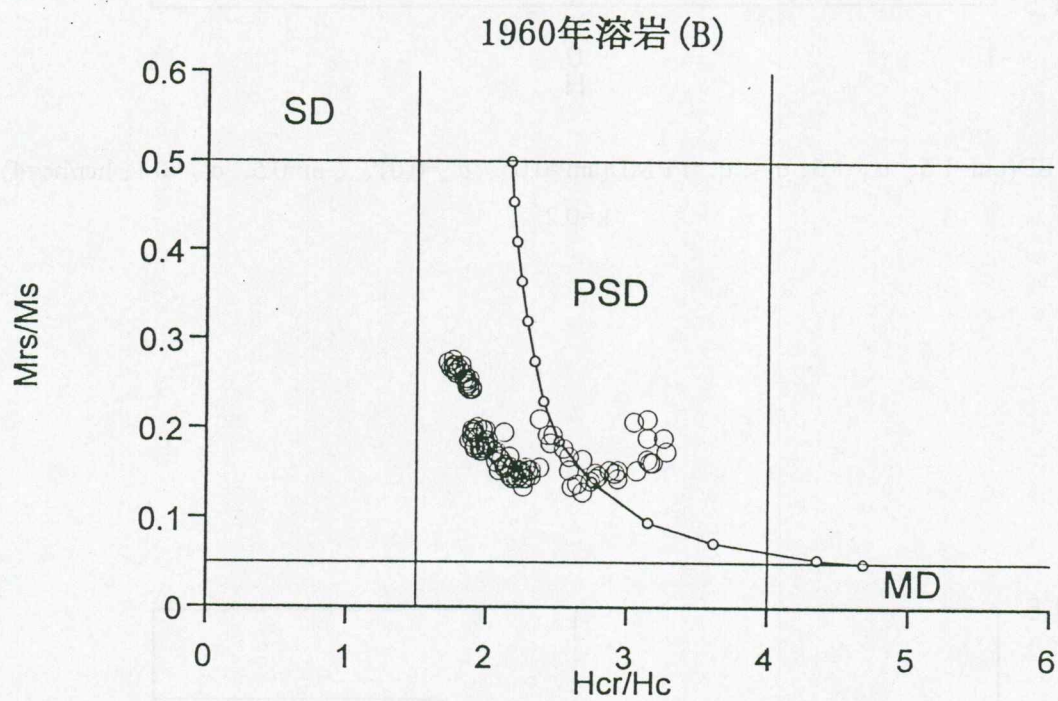
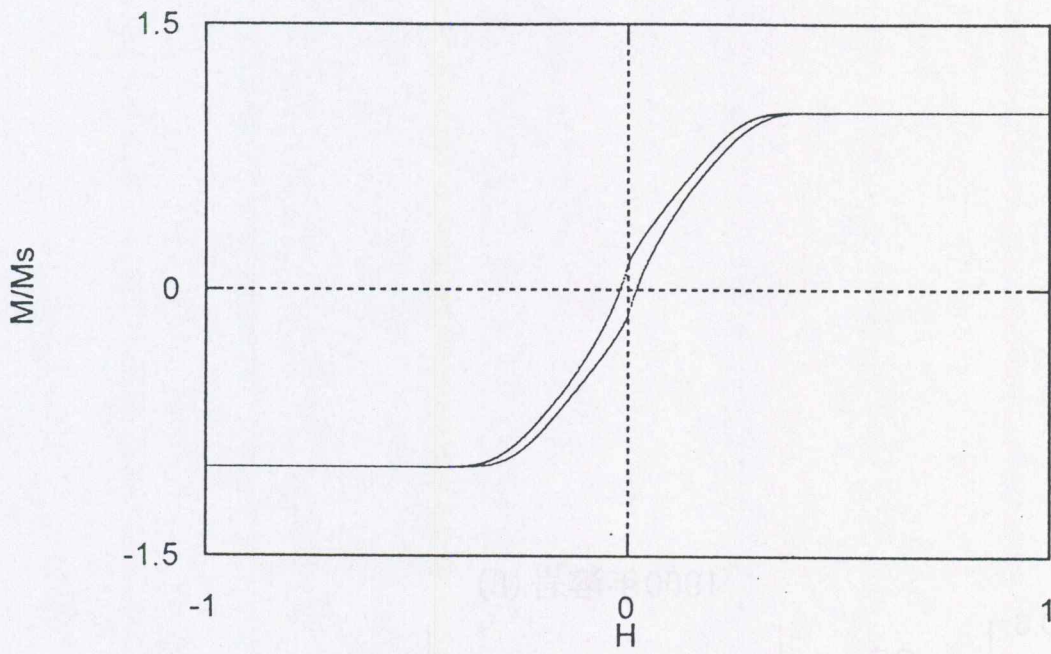
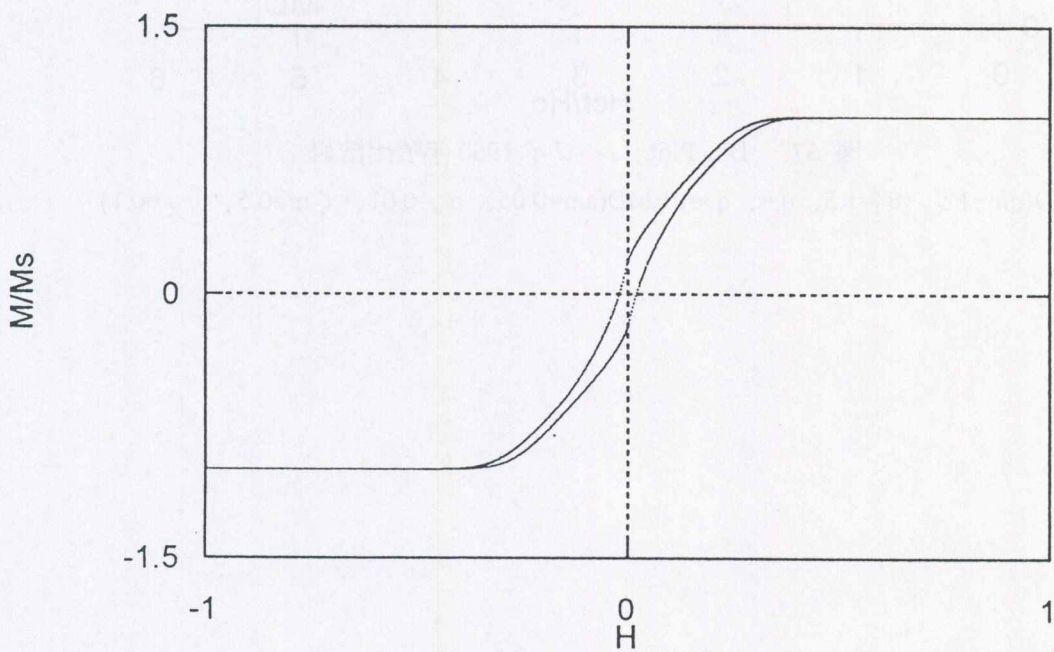


図 57 Day Plot ハワイ 1960年噴出溶岩
 SD($q_m=1.5$, $\sigma_1=1.5$, $q_-=$, $q_+=$) + MD($am=0.05$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$)



☒ 58 $SD(q_m=1.5, \sigma_f=1.5, q_-, q_+) + MD(am=0.05, \sigma_a=0.01, \zeta_m=0.5, \sigma_\zeta=0.1, hcr/hc=4)$
 $k=0.2$



☒ 59 $SD(q_m=1.5, \sigma_f=1.5, q_-, q_+) + MD(am=0.05, \sigma_a=0.01, \zeta_m=0.5, \sigma_\zeta=0.1, hcr/hc=4)$
 $k=0.3$

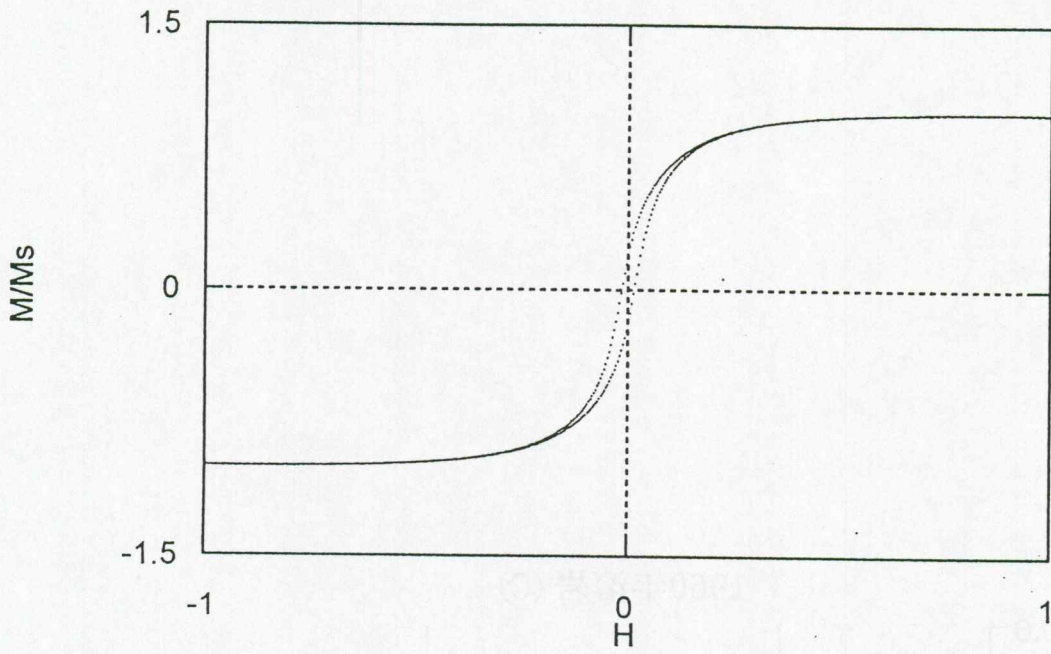


図 60 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 3

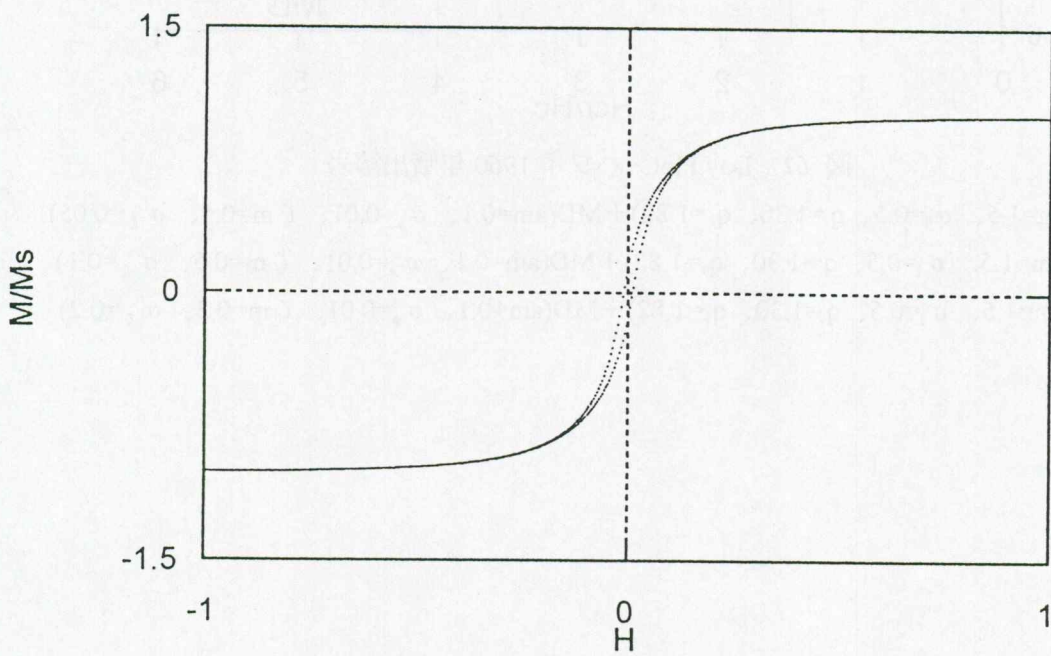


図 61 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 4

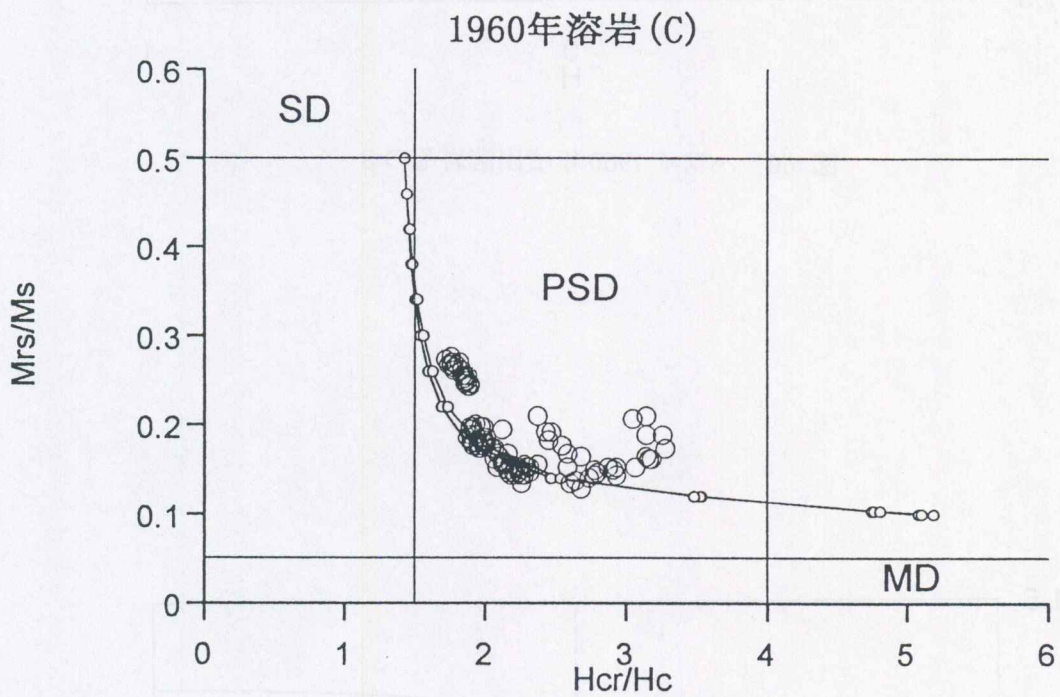
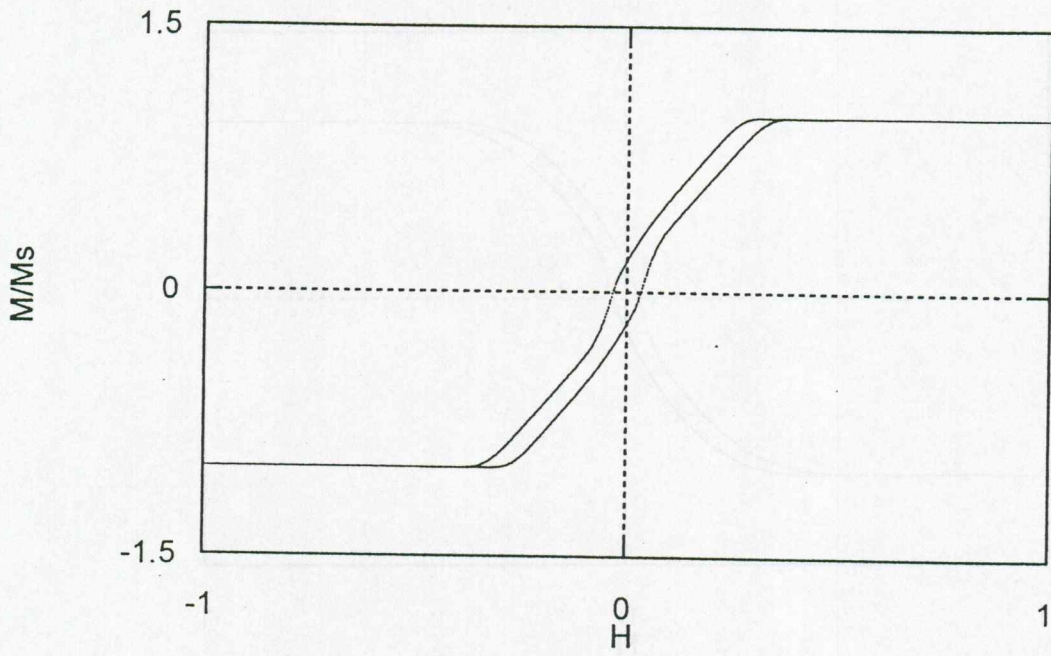


図 62 Day Plot ハワイ 1960 年噴出溶岩

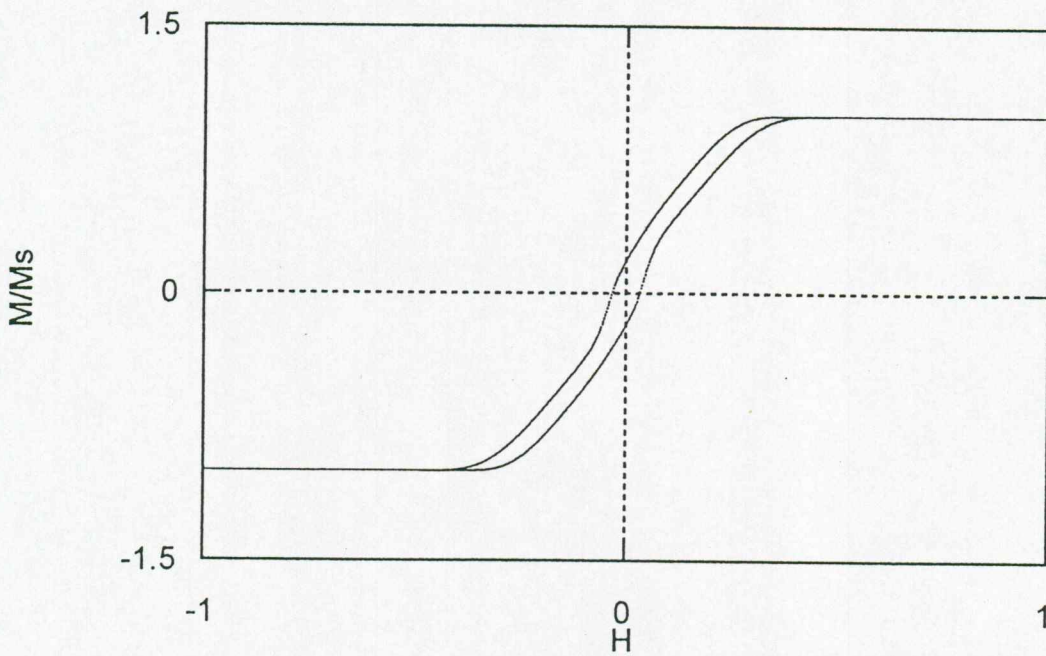
SD ($q_m=1.5$, $\sigma_1=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.05$)

SD ($q_m=1.5$, $\sigma_1=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$)

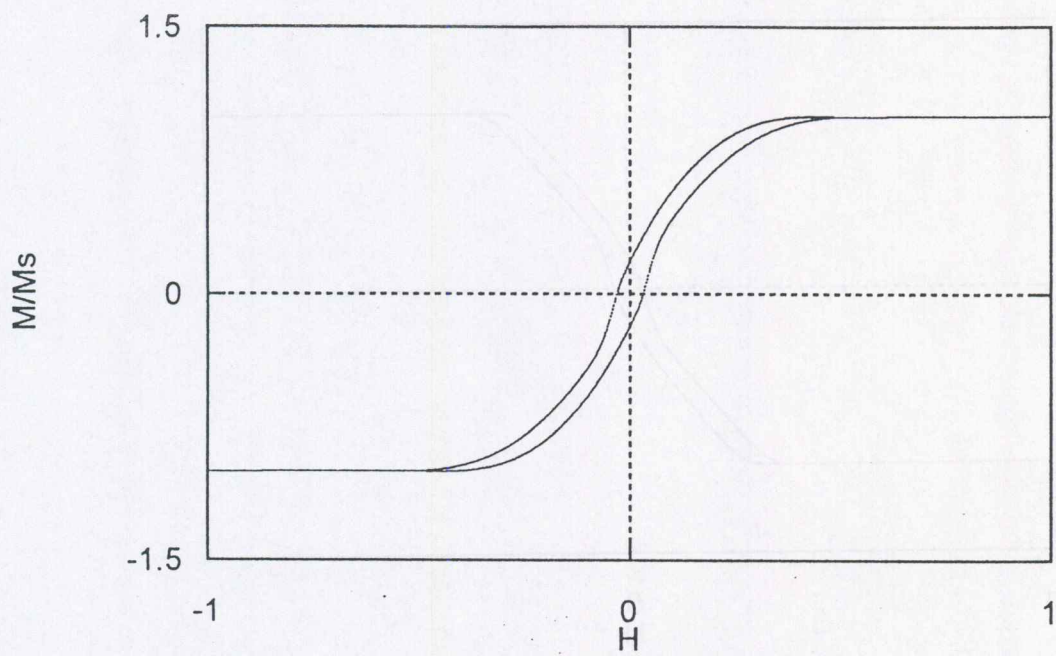
SD($q_m=1.5$, $\sigma_1=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.2$)



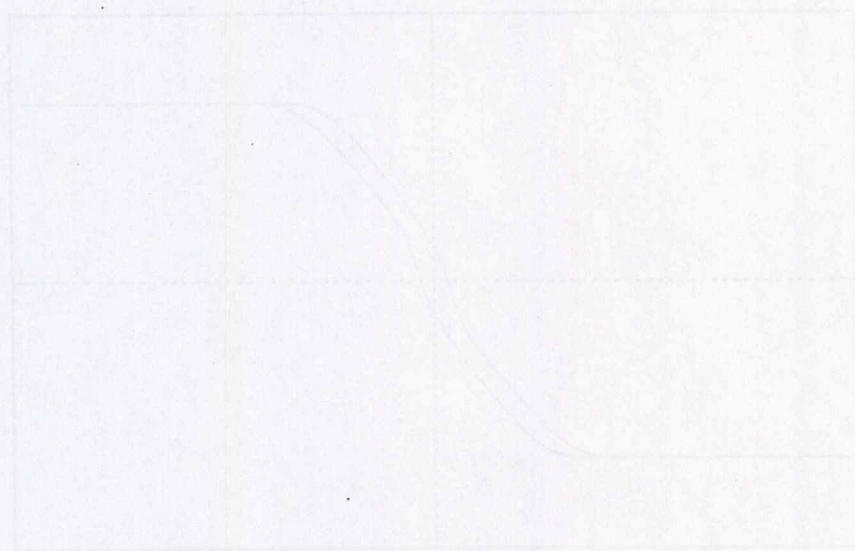
☒ 63 SD($q_m=1.5$, $\sigma_f=0.5$, $q_r=1.30$, $q_r=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.05$)
 $k=0.2$



☒ 64 SD($q_m=1.5$, $\sigma_f=0.5$, $q_r=1.30$, $q_r=1.82$)+MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.2$



☒ 65 SD($q_m=1.5$, $\sigma_r=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$) + MD($am=0.1$, $\sigma_a=0.01$, $\zeta_m=0.5$, $\sigma_\zeta=0.2$)
 $k=0.2$



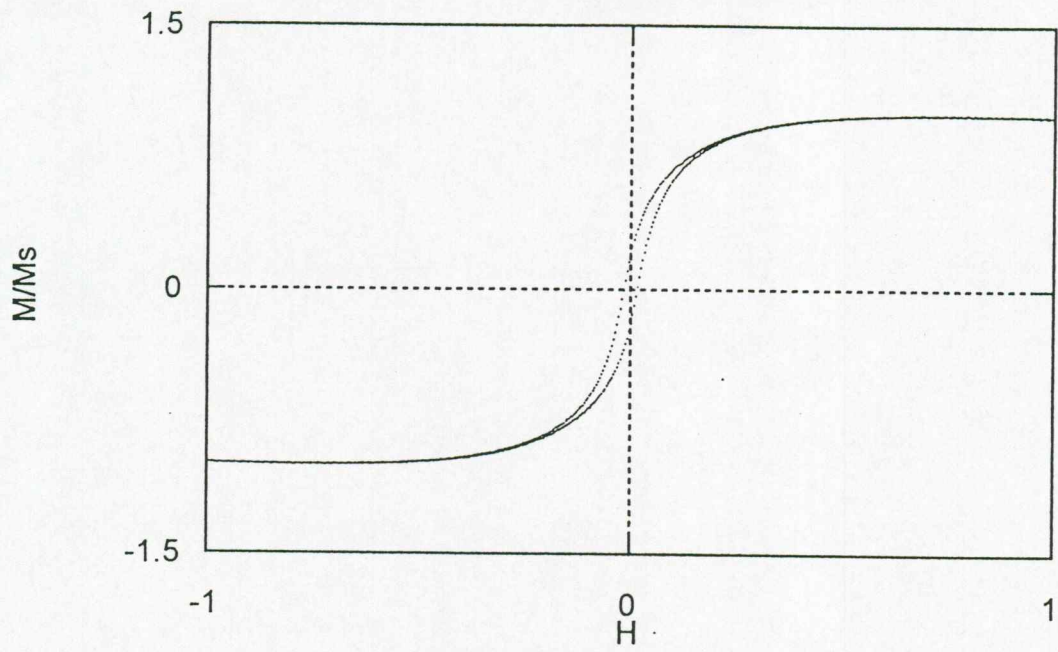


図 66 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 5

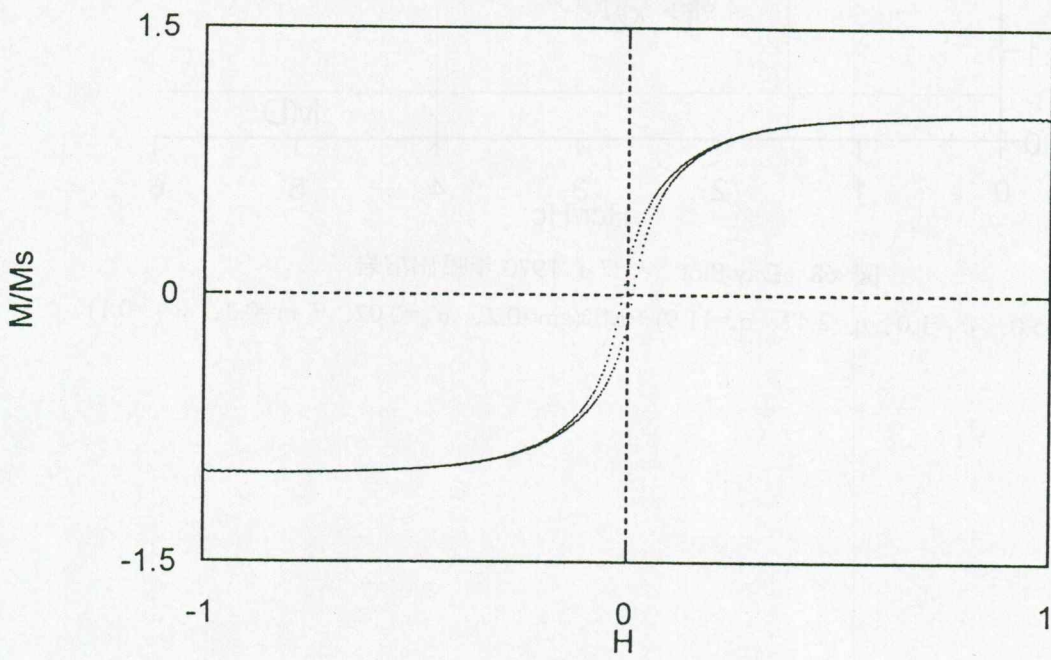


図 67 ハワイ 1960 年噴出溶岩その 6

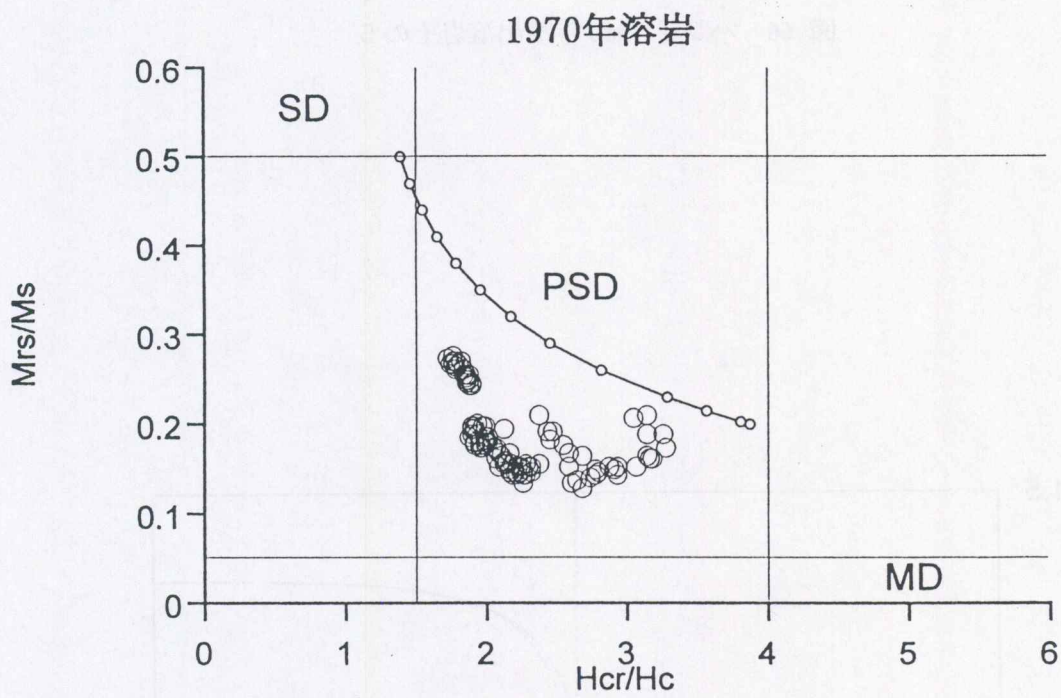
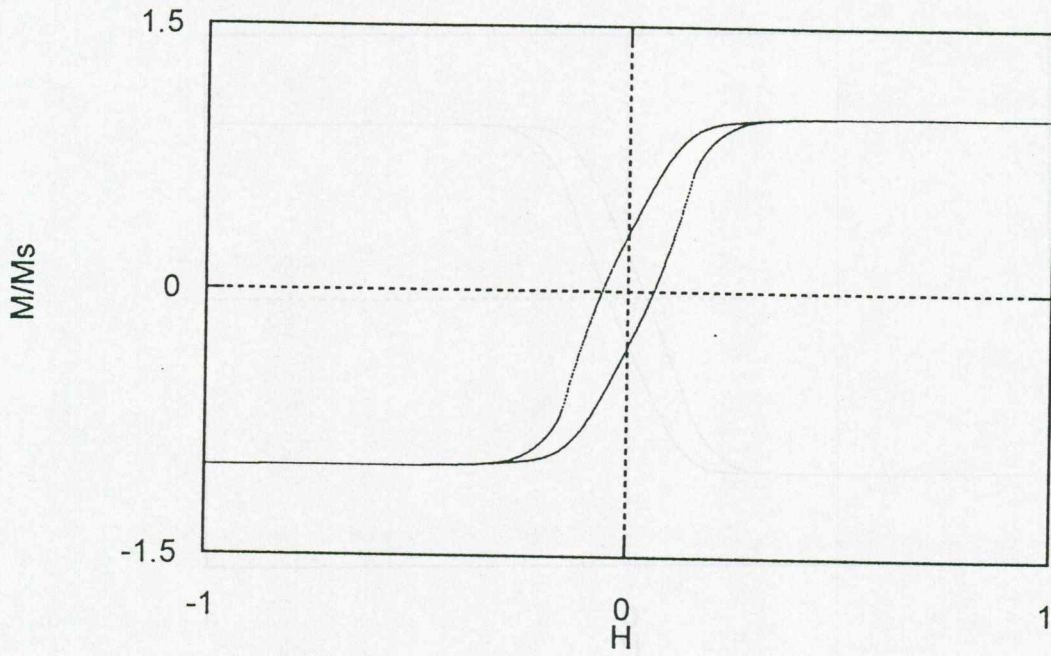
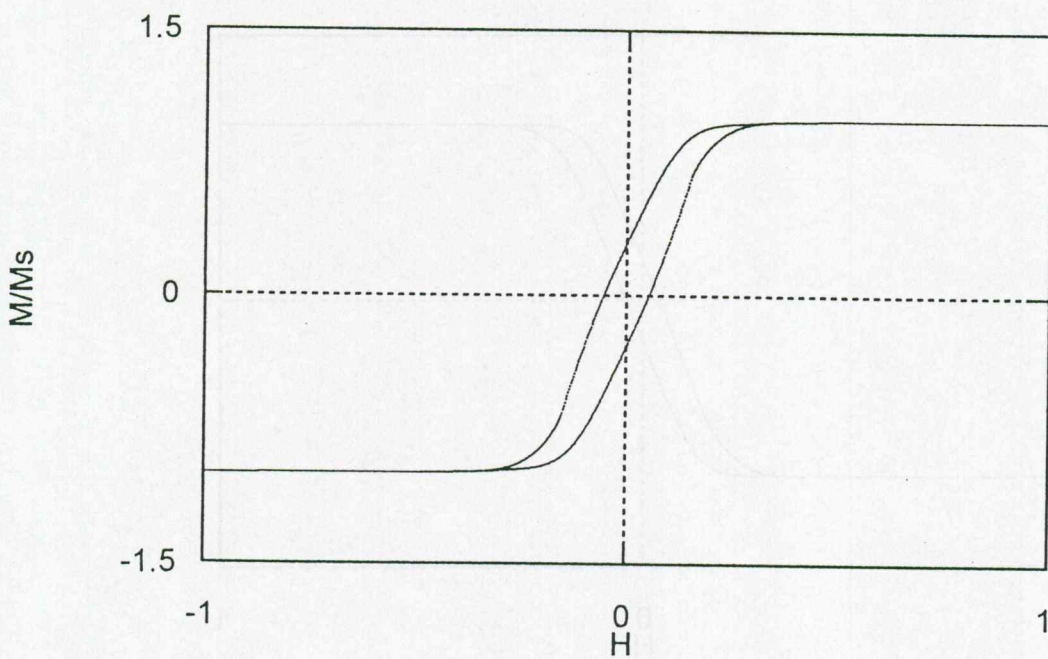


図 68 Day Plot ハワイ 1970 年噴出溶岩

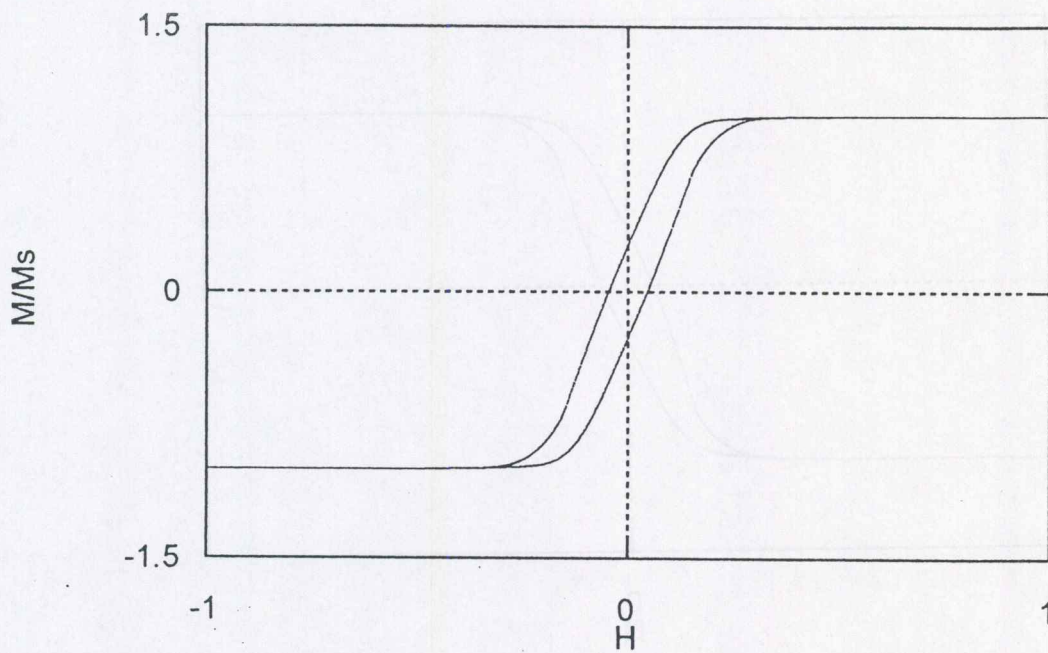
SD($q_m=5.0$, $\sigma_l=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$)+MD($am=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)



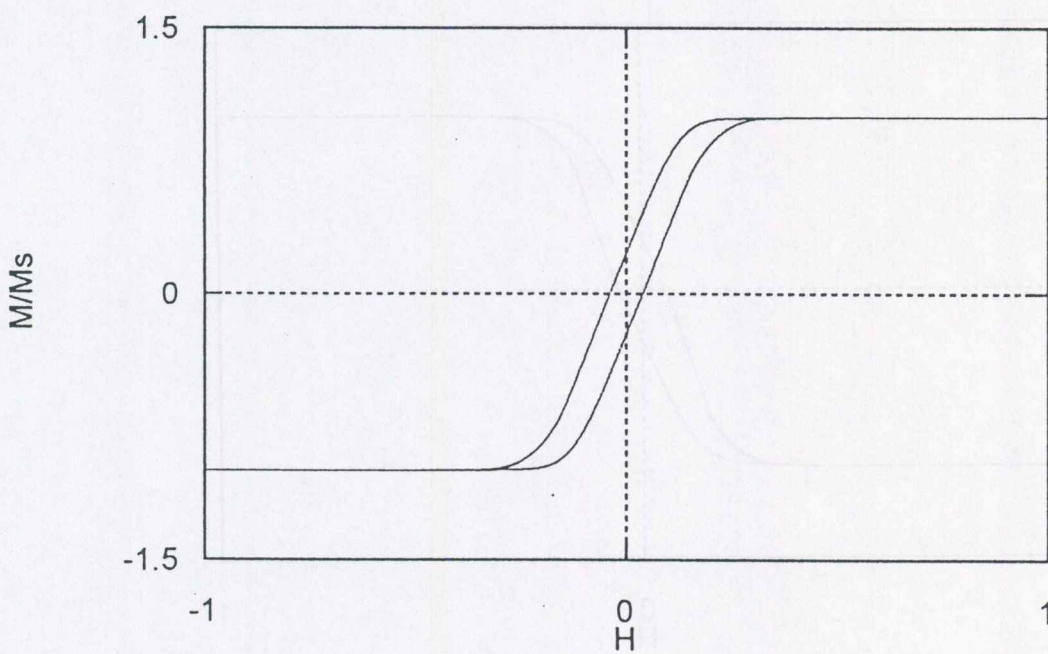
69 SD($q_m=5.0$, $\sigma_l=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($a_m=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.4$



70 SD($q_m=5.0$, $\sigma_l=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($a_m=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.3$



☒ 71 SD($q_m=5.0$, $\sigma_f=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($a_m=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.2$



☒ 72 SD($q_m=5.0$, $\sigma_f=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($a_m=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.1$

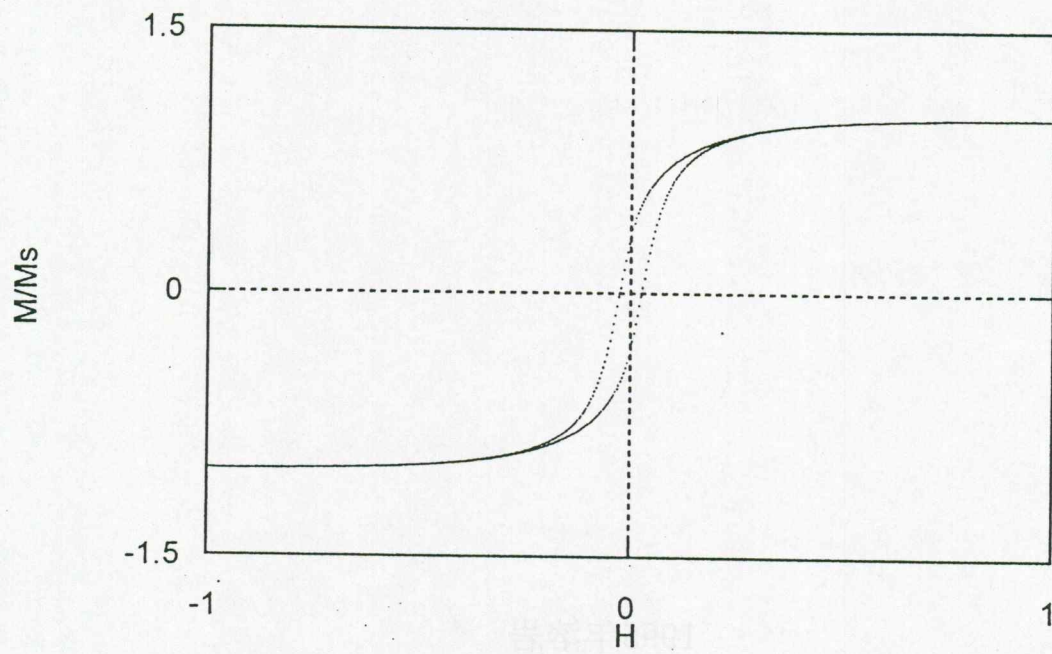


図 73 ハワイ 1970 年噴出溶岩その 1

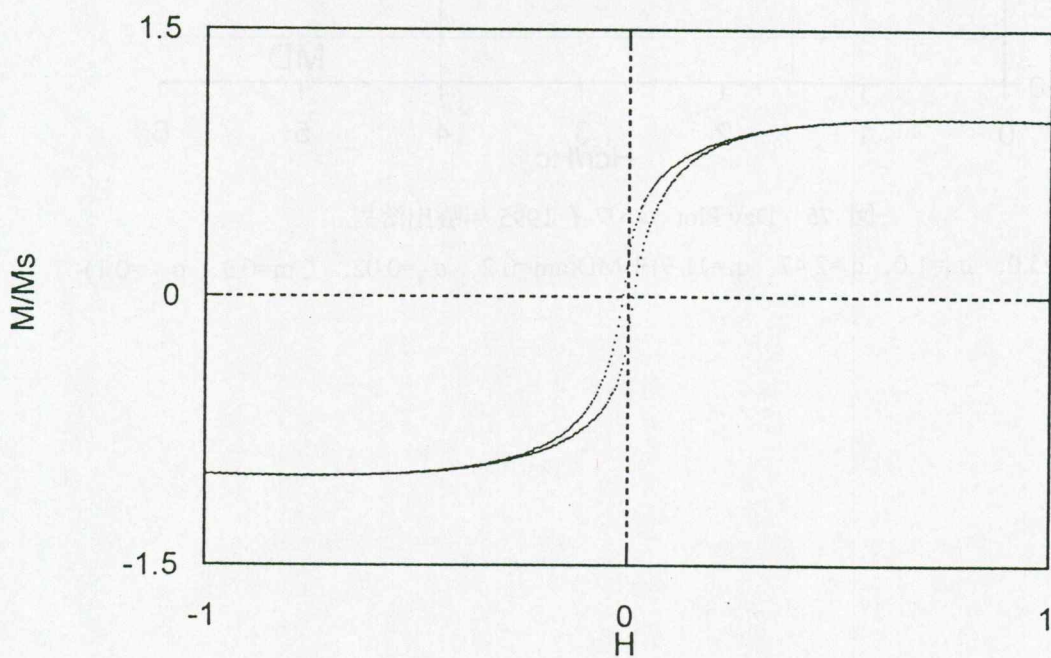


図 74 ハワイ 1970 年噴出溶岩その 2

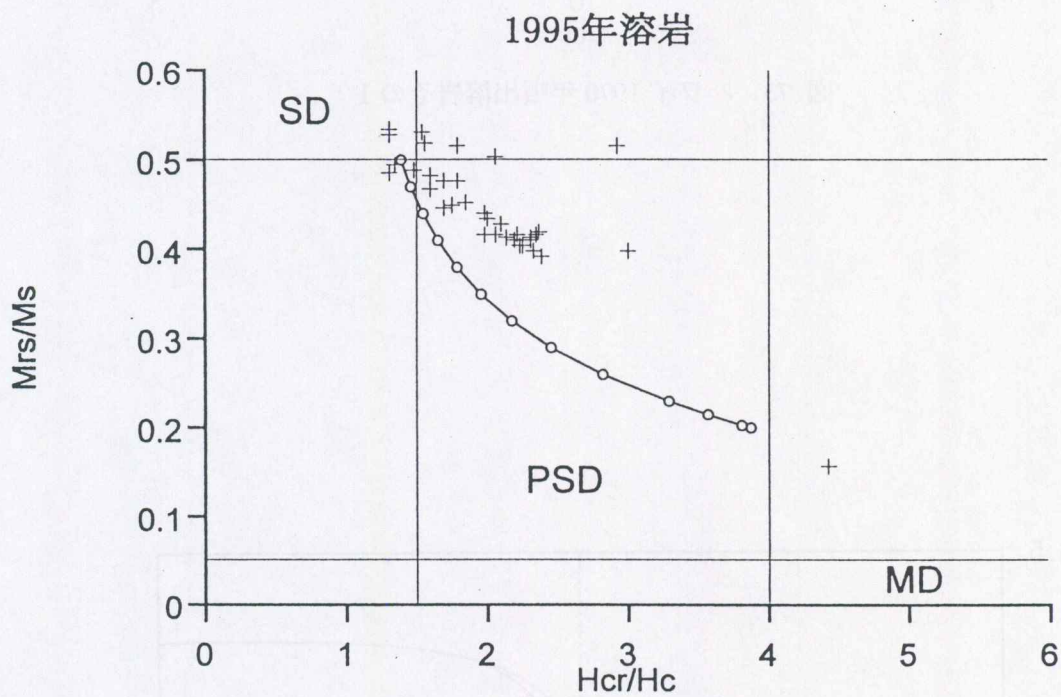


図 75 Day Plot ハワイ 1995 年噴出溶岩

SD($q_m=5.0$, $\sigma_f=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($am=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)

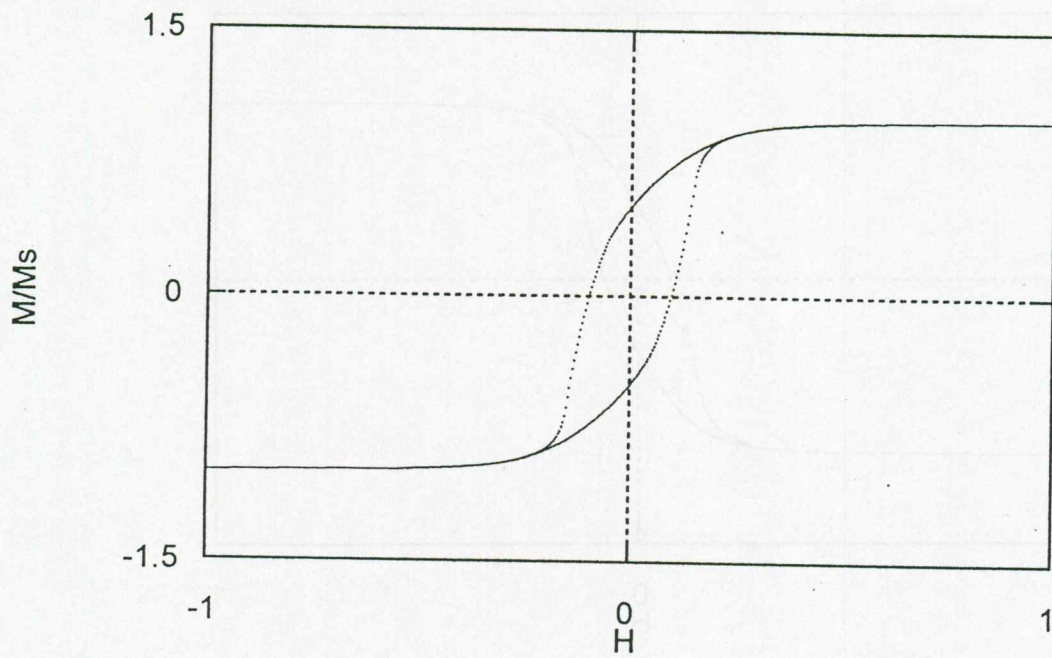


图 76 SD($q_m=5.0$, $\sigma_f=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$)

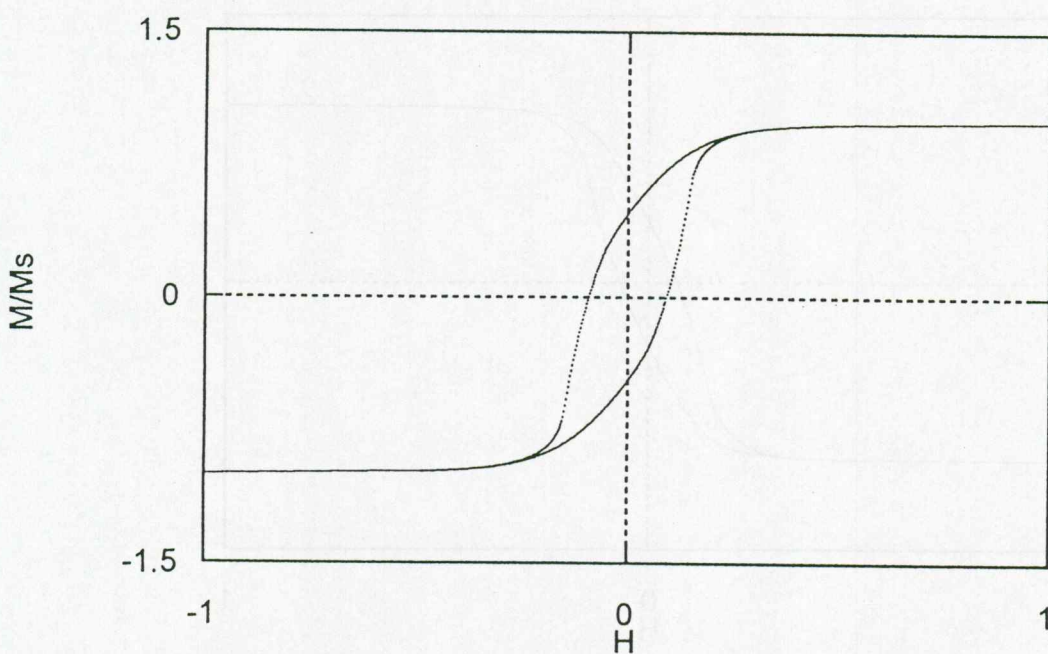


图 77 SD($q_m=5.0$, $\sigma_f=1.0$, $q_-=2.47$, $q_+=11.9$) + MD($am=0.2$, $\sigma_a=0.02$, $\zeta_m=0.3$, $\sigma_\zeta=0.1$)
 $k=0.1$

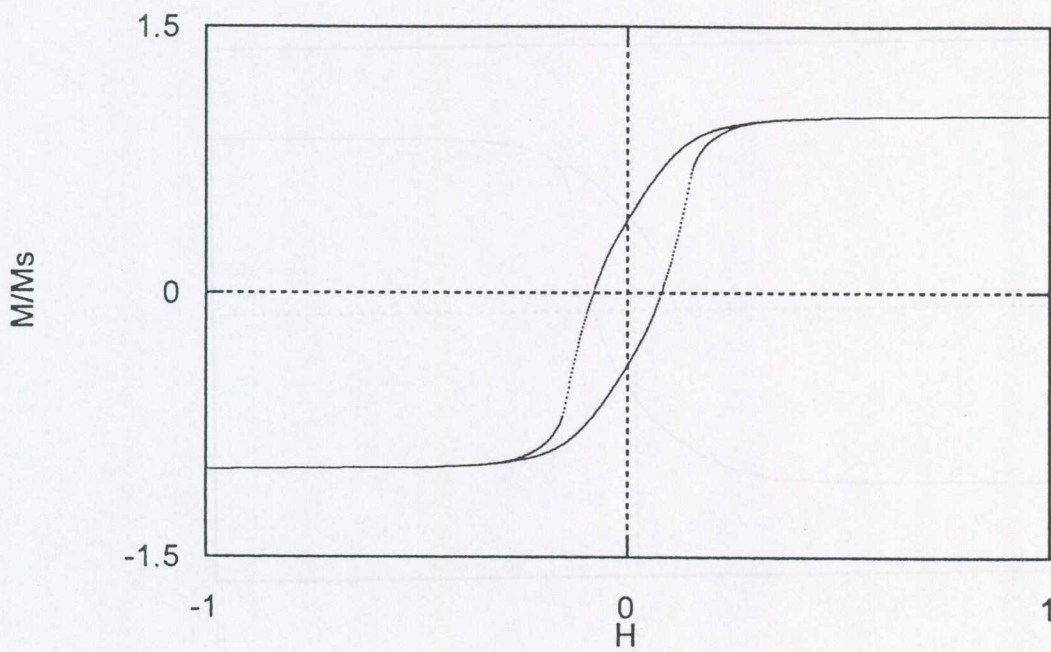


图 78 $SD(q_m=5.0, \sigma_l=1.0, q_-=2.47, q_+=11.9)+MD(am=0.2, \sigma_a=0.02, \zeta_m=0.3, \sigma_\zeta=0.1)$
 $k=0.3$

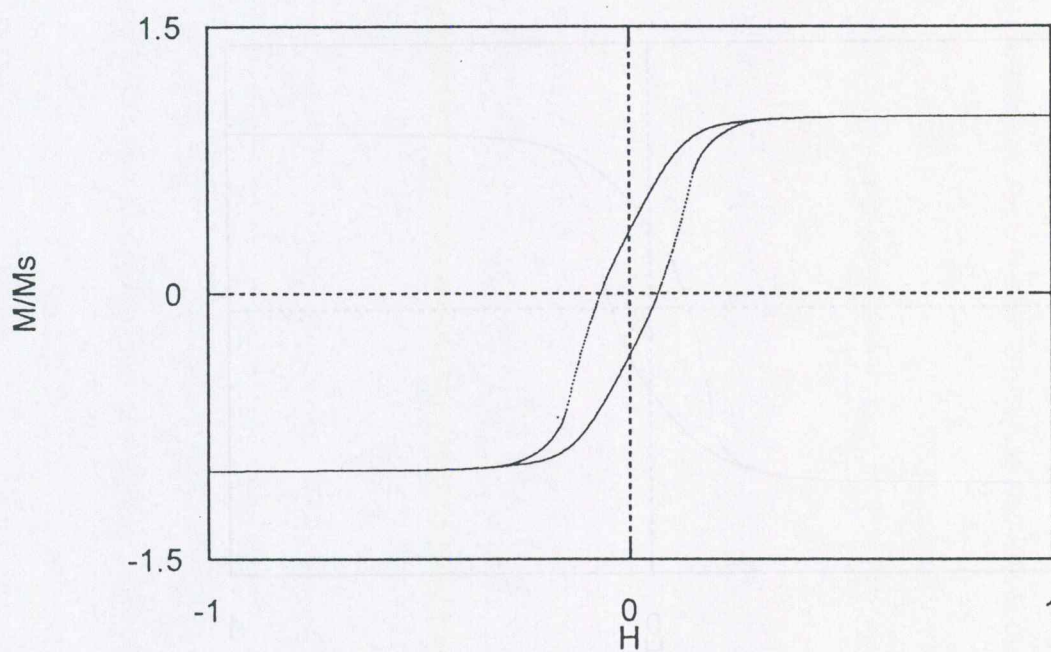


图 79 $SD(q_m=5.0, \sigma_l=1.0, q_-=2.47, q_+=11.9)+MD(am=0.2, \sigma_a=0.02, \zeta_m=0.3, \sigma_\zeta=0.1)$
 $k=0.5$

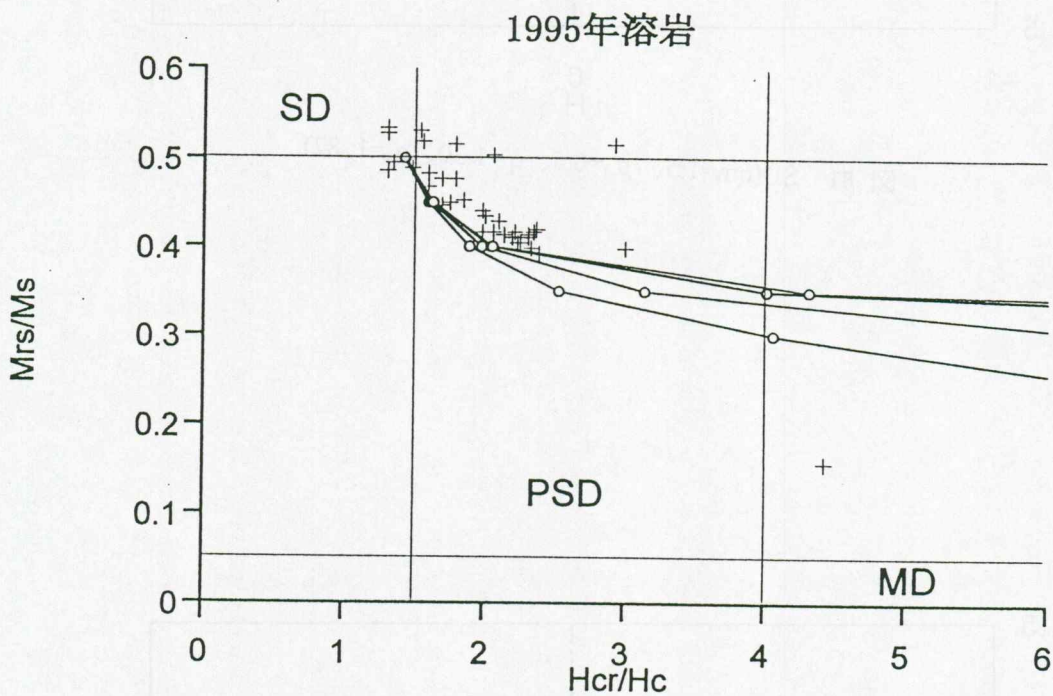
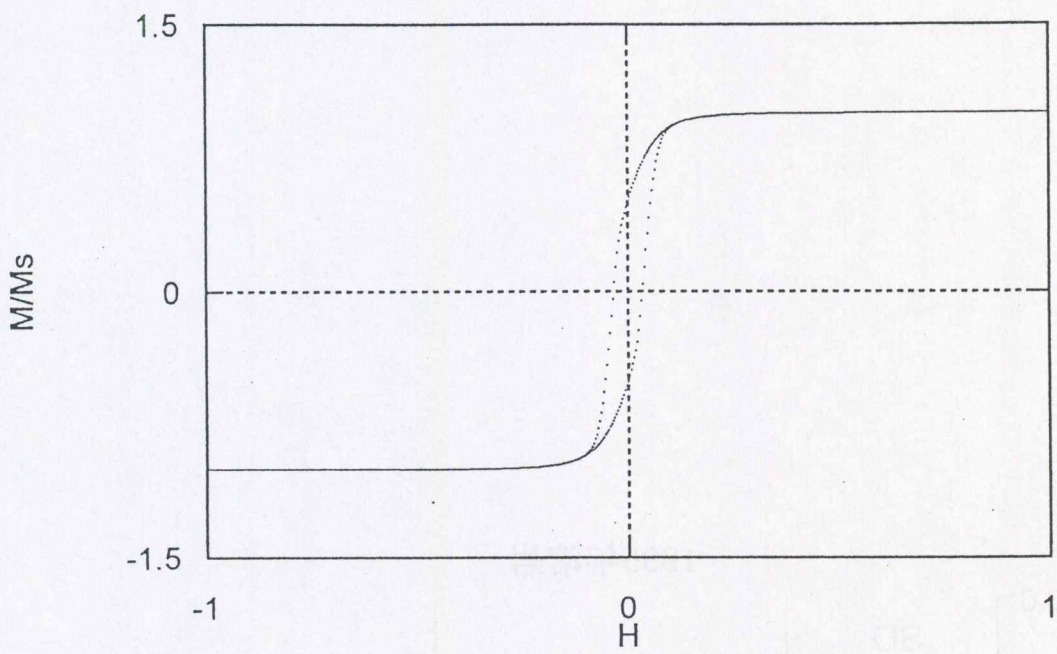
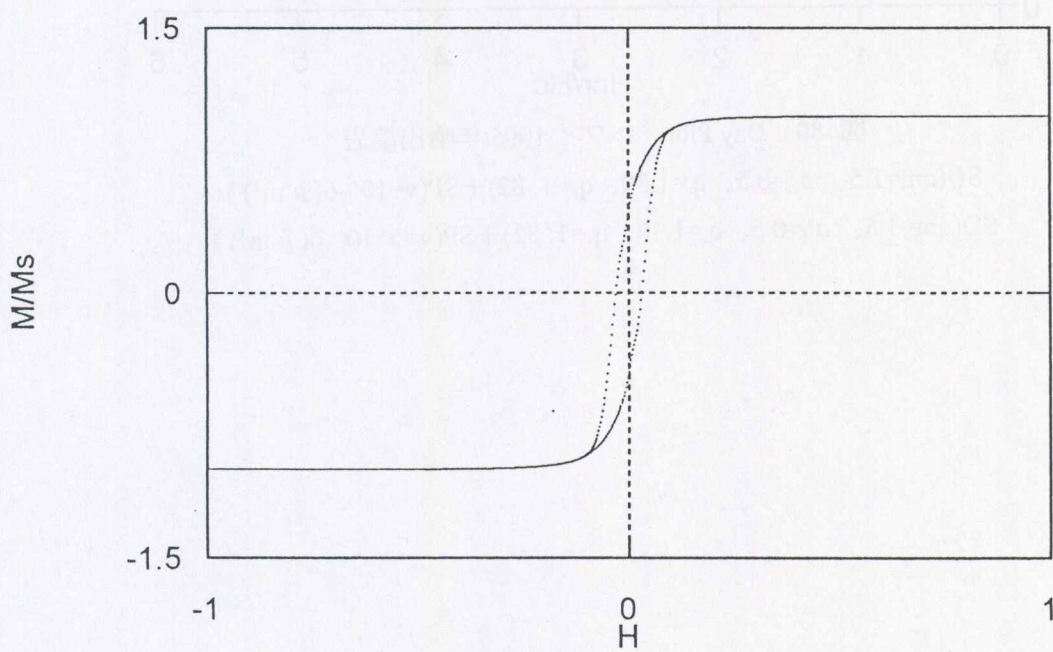


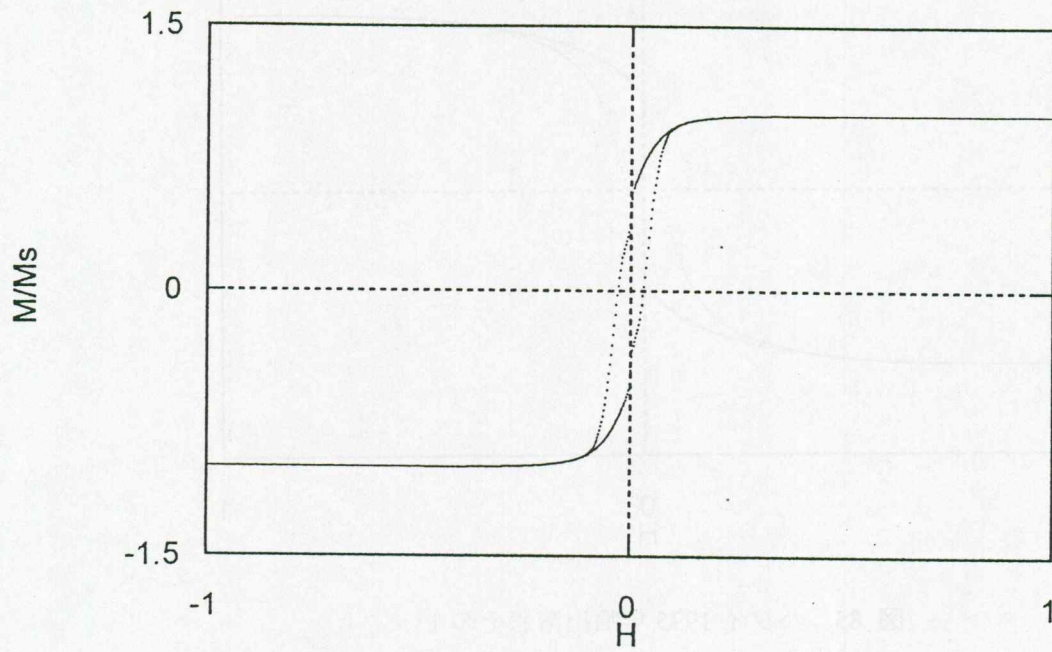
図 80 Day Plot ハワイ 1995 年噴出溶岩
 $SD(q_m=1.5, \sigma_1=0.5, q_-=1.30, q_+=1.82) + SP(v=10^{-6}(\mu m^3))$
 $SD(q_m=1.5, \sigma_1=0.5, q_-=1.30, q_+=1.82) + SP(v=5 \cdot 10^{-6}(\mu m^3))$



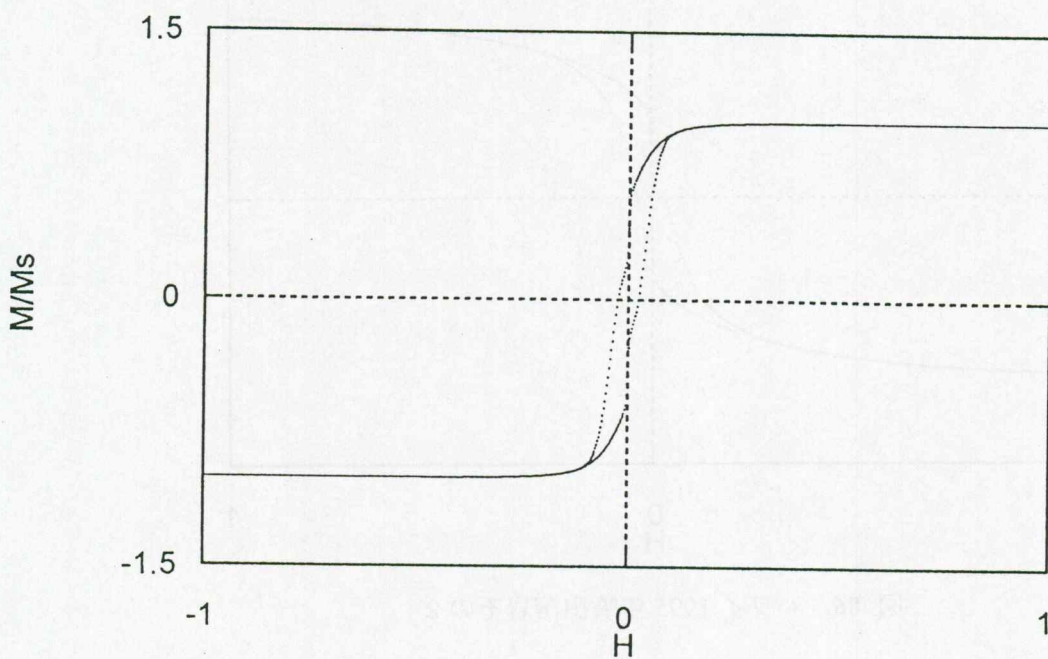
☒ 81 SD($q_m=1.5$, $\sigma_r=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$)



☒ 82 SD($q_m=1.5$, $\sigma_r=0.5$, $q_-=1.30$, $q_+=1.82$) + SP($v=1 \times 10^{-6} (\mu m^3)$), $p=0.9$



☒ 83 $SD(q_m=1.5, \sigma_r=0.5, q_-=1.30, q_+=1.82) + SP(v=5 \times 10^{-6} (\mu m^3)), p=0.9$



☒ 84 $SD(q_m=1.5, \sigma_r=0.5, q_-=1.30, q_+=1.82) + SP(v=5 \times 10^{-6} (\mu m^3)), p=0.8$

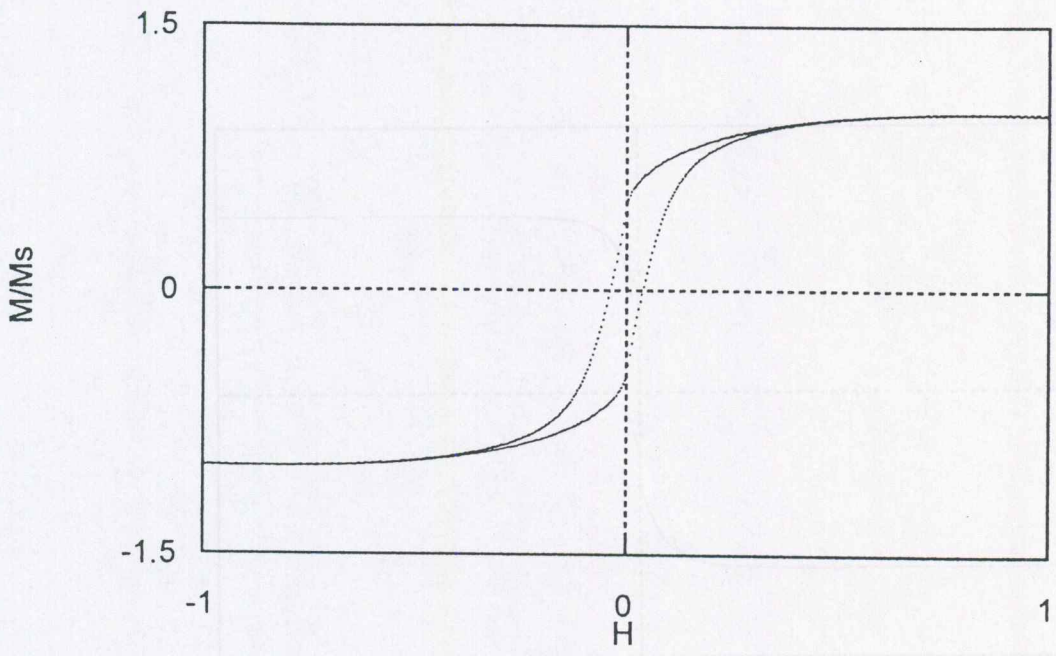


図 85 ハワイ 1995 年噴出溶岩その 1

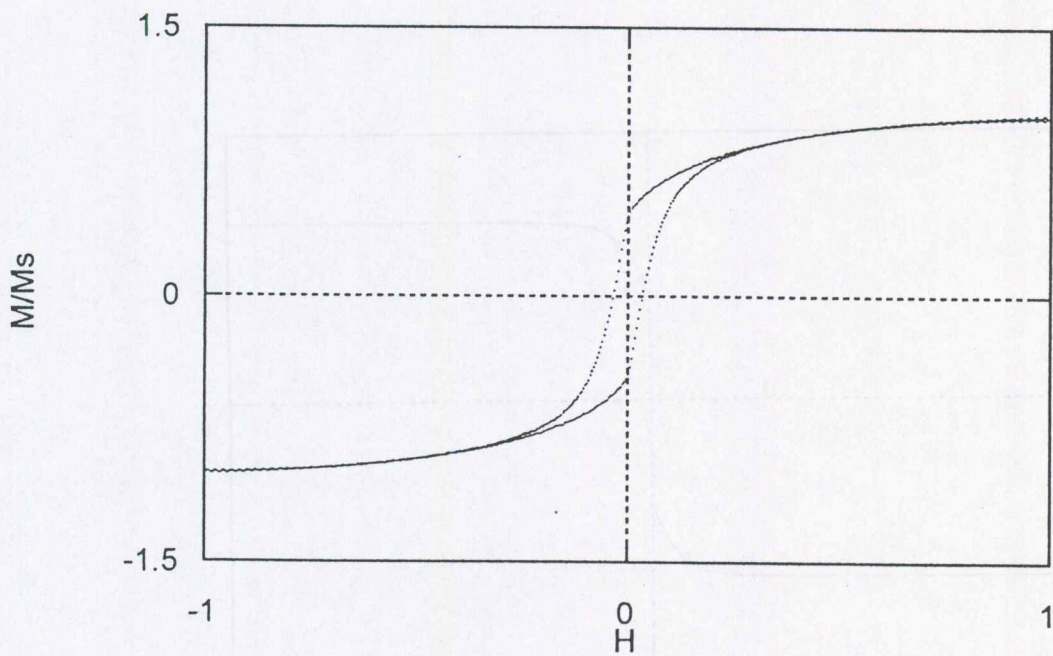


図 86 ハワイ 1995 年噴出溶岩その 2

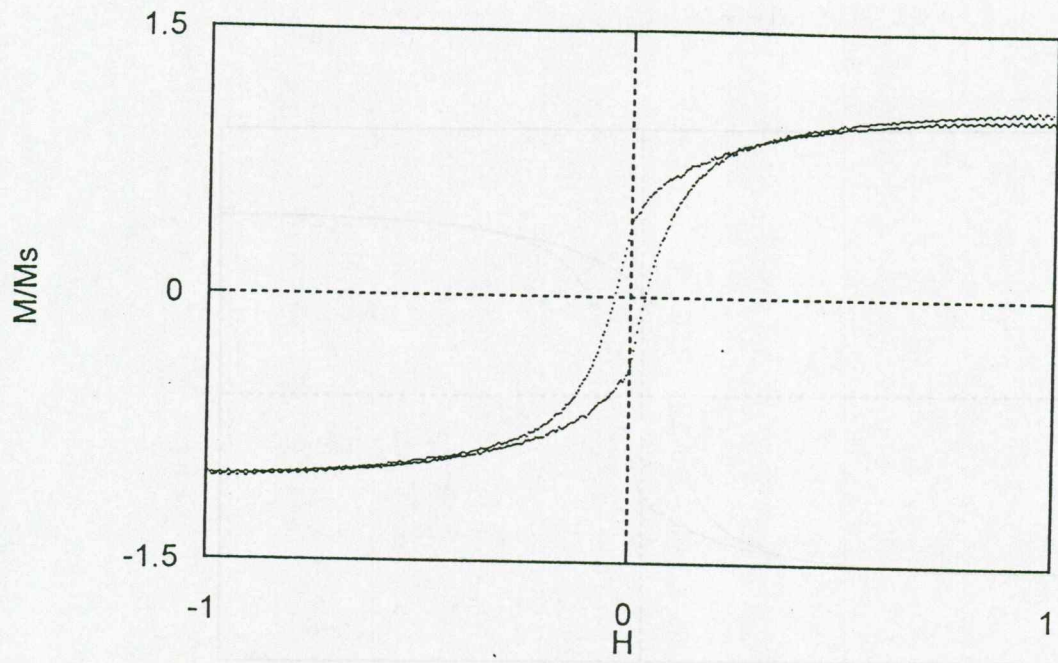
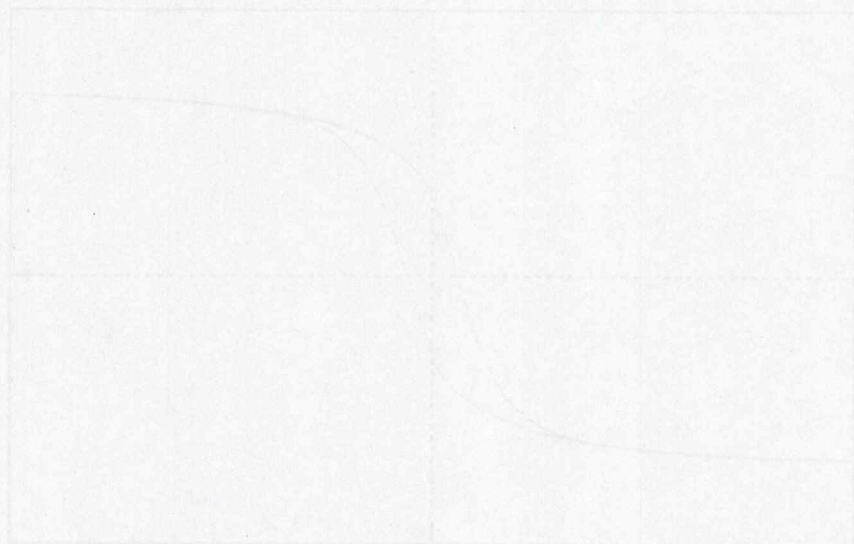


図 87 ハワイ 1995 年噴出溶岩その 3



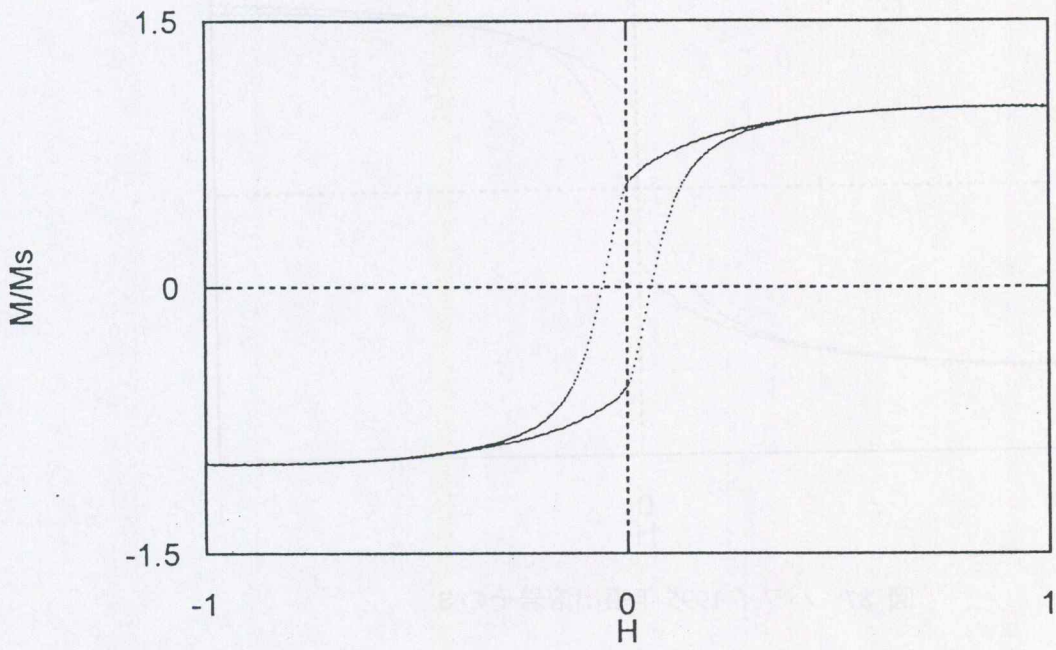


図 88 ハワイ 1972 年噴出溶岩その 1

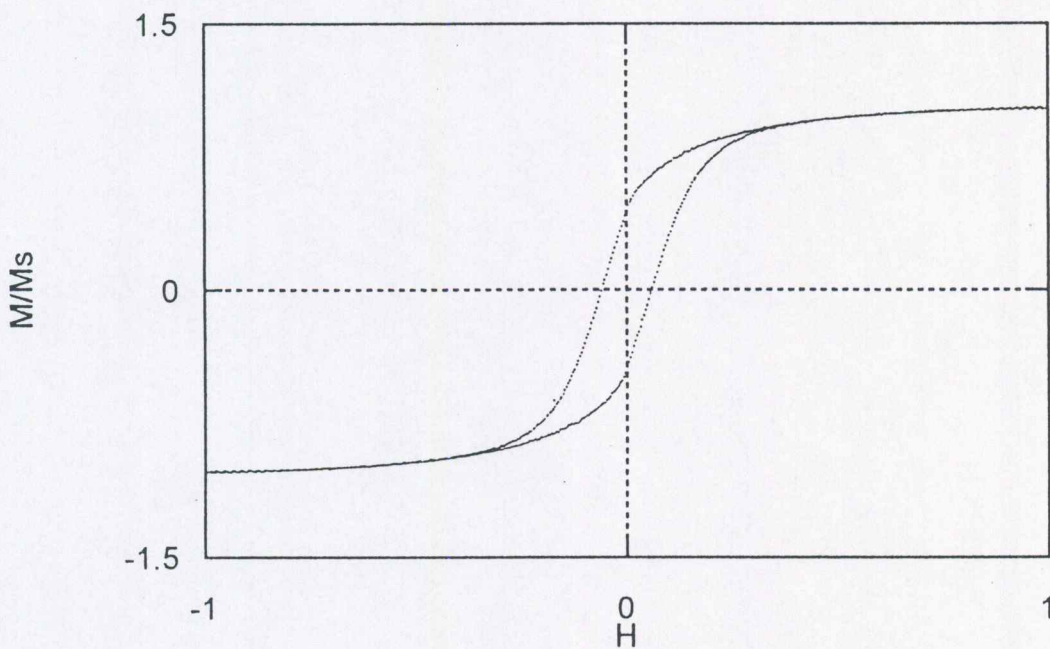


図 89 ハワイ 1972 年噴出溶岩その 2

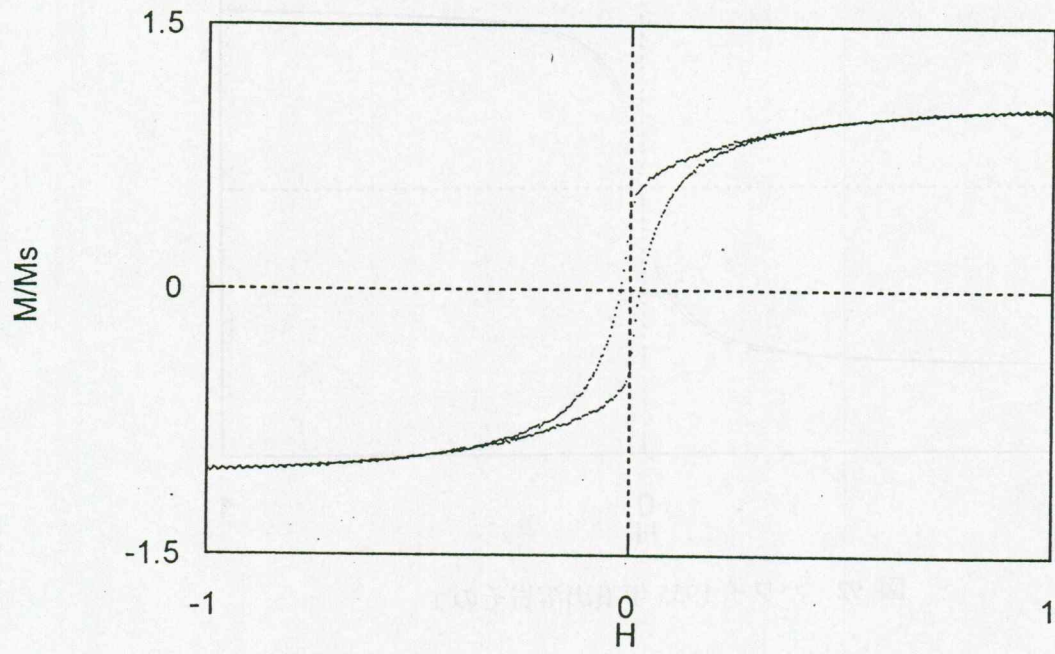


図 90 ハワイ 1979 年噴出溶岩その 1

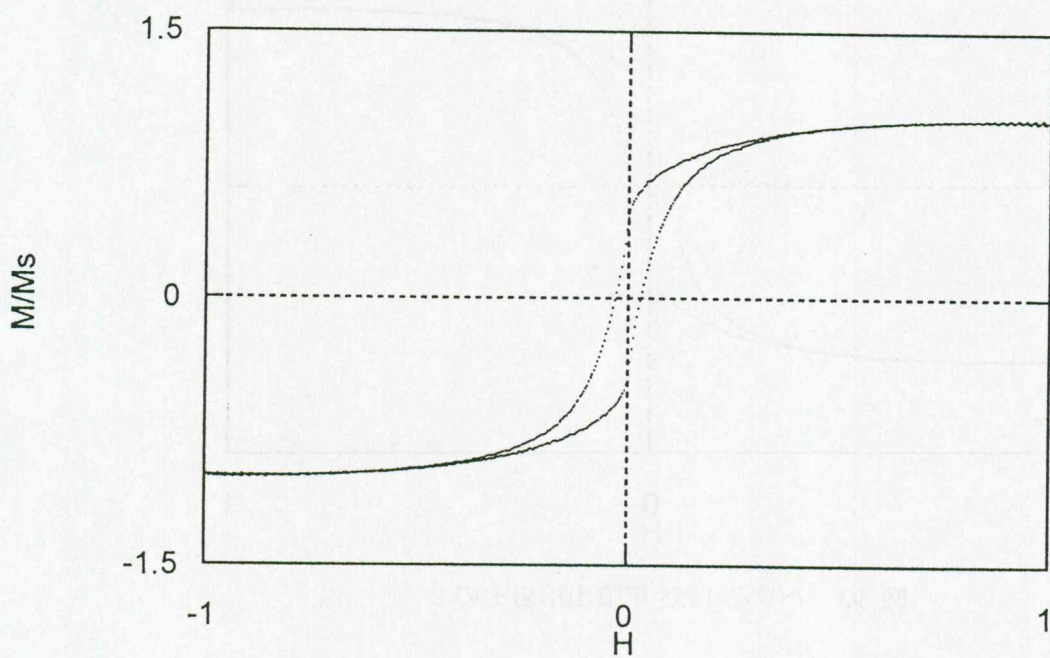


図 91 ハワイ 1979 年噴出溶岩その 2

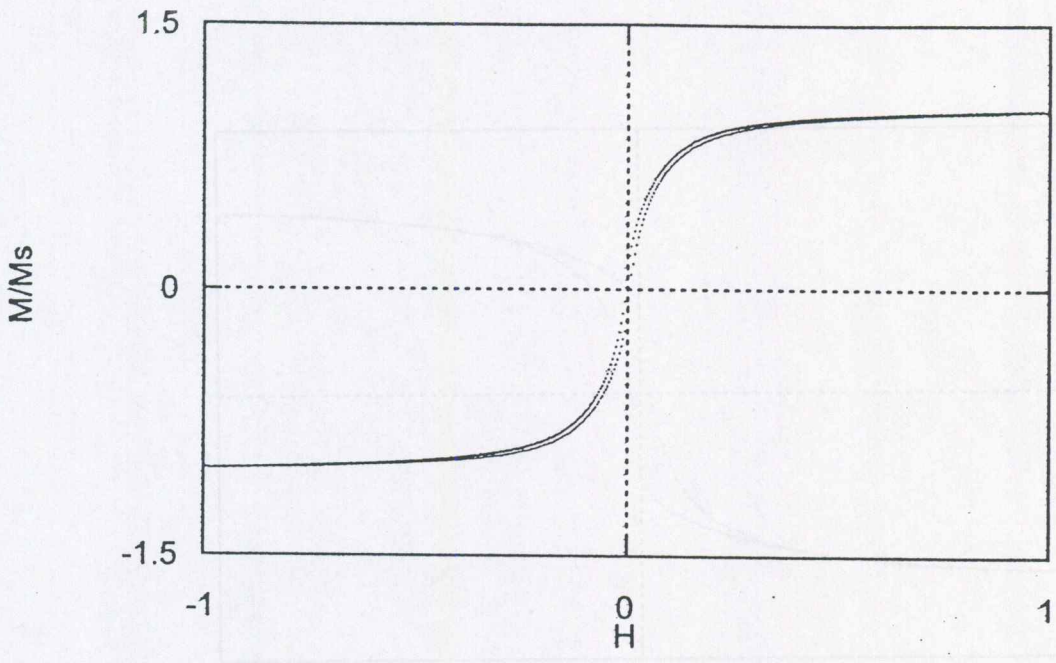


図 92 ハワイ 1955 年噴出溶岩その 1

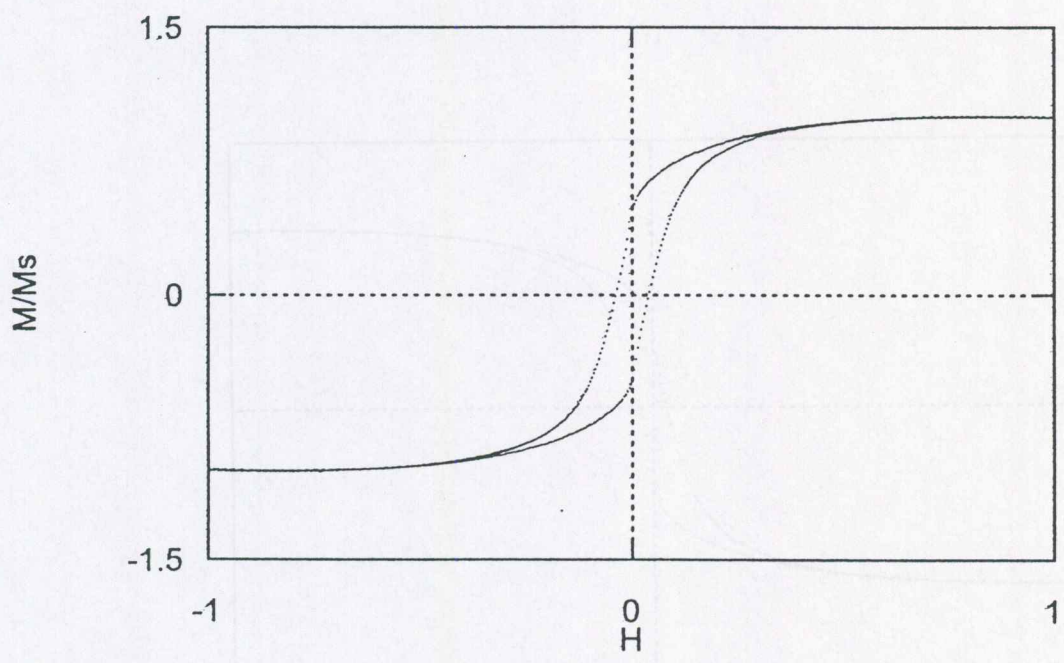


図 93 ハワイ 1955 年噴出溶岩その 2

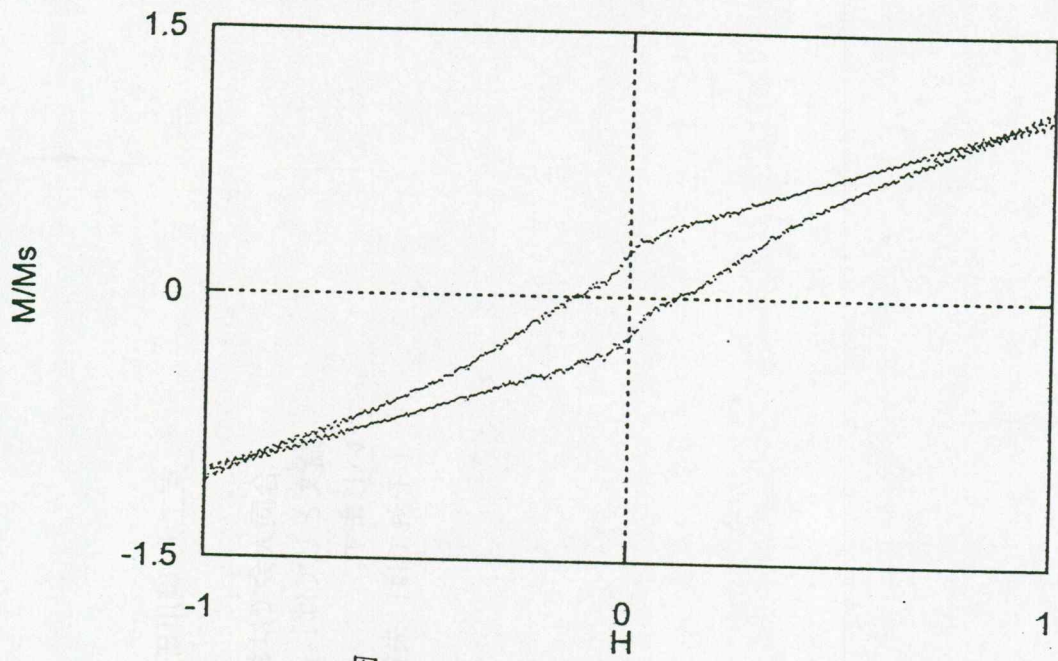


図 94 ハワイ 1955 年噴出溶岩その 3

*補正なし