

遺伝的アルゴリズムを用いた超伝導 パラメータ推定手法の検討

南潤

平成22年2月7日

情報システム専攻

目次

第1章	序章	1
1.1	はじめに	1
1.2	磁束ピンニング	1
1.3	不可逆磁界	2
1.4	磁束クリープ・フローモデル	3
1.4.1	磁束クリープ	3
1.4.2	磁束クリープによる電界	5
1.4.3	磁束フローによる電界	7
1.4.4	ピン・ポテンシャル U_0	8
1.4.5	磁束クリープ・フローモデル	9
1.5	遺伝的アルゴリズム	11
1.6	遺伝子操作	12
1.7	評価関数	13
1.7.1	実数値 GA	14
1.7.2	分散 GA モデル	16
1.7.3	世代交代モデル	17
1.8	研究目的	18
第2章	解析	19
2.1	概要	19
2.2	解析手順	19
第3章	結果及び考察	22
3.1	GA を用いたパラメータ解析	22

3.2	評価値に対するヒストグラム	26
3.3	考察	29
3.3.1	実験データを用いた計算	36
第4章	結論	39
	参考文献	41

第1章 序章

1.1 はじめに

超伝導現象とは、1911年に Heike Kamerlingh Onnes によって発見されたもので、「水銀を液体ヘリウムで冷却していったとき、温度4.20 Kで突然電気抵抗が下がり4.19 Kではほぼゼロの10万分の1以下になる」ということである。後にスズや鉛などでも超伝導現象になることが分かった。1986年に Bednorz と Muller によって30 Kを超える銅酸化物超伝導体が発見され、その後続々とより超伝導への転移温度の高い銅酸化物超伝導体が発見されていった。超伝導への転移温度が液体窒素の温度(77 K)を超えるものを高温超伝導体という。そして、超伝導から常伝導に転移する温度、磁場をそれぞれ臨界温度(T_c)、臨界磁場(B_c)と呼ぶ。現在、超伝導体はリニアモーターや、SMES(Superconductive Magnetic Energy Storage:超伝導電力貯蔵システム)などに使用されている。また、超伝導ケーブルへの実用化が検討されたりと色々な応用も考えられている。ビスマス基板やレアアース基板のような銅酸化物高温超伝導体は超伝導状態になる温度が高いため電力デバイスに期待されている。銅酸化物高温超伝導体では磁束クリープの効果が重要となり、高温と高磁場下での臨界電流密度の特性を表すことが重要となる。

1.2 磁束ピンニング

超伝導体の特性は電気抵抗がゼロであることと完全反磁性を示すことである。超伝導体は磁性的な振る舞いの違いから、第1種超伝導体と第2種超伝導体に分けられる。第1種超伝導体は臨界磁界(B_c)まで Meissner 効果を示すが、それ以上磁界が増加すると超伝導状態ではなくなる。一方、第2種超伝導体は第1種超伝導体と同様にある磁界までは Meissner 効果を示

す。しかしそれ以上の磁界を加えると量子化された磁束の侵入を許すものの、超伝導状態を保とうとする。この超伝導体内に磁束が侵入しつつ超伝導を維持している状態を混合状態と呼ぶ。第1種超伝導体における Meissner 効果を示さなくなる磁界を下部臨界磁界 (B_{c1})、さらに磁界を増加させ超伝導状態を保てなくなる磁界を上部臨界磁界 (B_{c2}) という。第1種超伝導体の B_c に比べ第2種超伝導体の B_{c2} は遥かに高い。そのため工学的応用に関して主に第2種超伝導体が混合状態で用いられる。混合状態下では超伝導電流の影響により磁束線が Lorentz 力を受ける。超伝導体内に流れる電流密度を J 、超伝導体内に侵入した磁束線の磁束密度を B とすると、磁束線が受ける Lorentz 力は $F_L = J \times B$ と表すことができる。磁束線が F_L の駆動力を受け速度 v で動いたとする。電磁誘導により、 $E = B \times v$ の電界が生じ、電気抵抗が生まれることにより損失が発生してしまう。実際にはこの磁束線の運動を妨げるため Lorentz 力と反対の向きにピン力という力が働く。この作用のことをピンニングといい、格子欠陥や常伝導析出物、結晶界面などピンニングに作用するものをピンニング・センターと呼ぶ。単位体積当たりのピン力密度を F_p といい、 JB が F_p を超えなければ電界が発生しない。このことから電気抵抗が発生せずに流せる最大の電流密度 J_c は $J_c = F_L/B$ と表せ、これを臨界電流密度という。超伝導の応用において T_c や B_{c2} とともに J_c も重要なパラメータである。 T_c や B_{c2} は材料によって決定されるが、 F_p は後天的に決まる。ピンニング・センターの導入によって F_p を強くすることによってより大きな J_c を得ることができる。

1.3 不可逆磁界

現在実用化されている超伝導体は、高磁界下まで超伝導状態を維持できる第2種超伝導体である。ピンニング相互作用は超伝導状態が消失する B_{c2} までまで存続すると考えられるので、不可逆性は B_{c2} まで存続すると考えられる。しかし、実際には B_{c2} の近くではピンニングは有効でなくなり、磁化は可逆となる。この $J_c = 0$ と $J_c \neq 0$ の境界の磁界を不可逆磁界といい、図

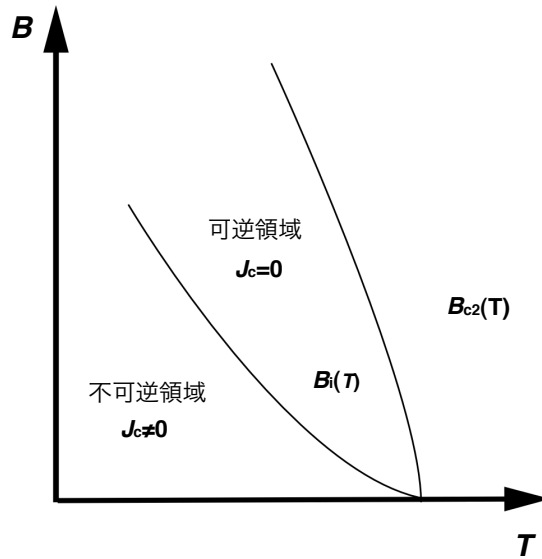


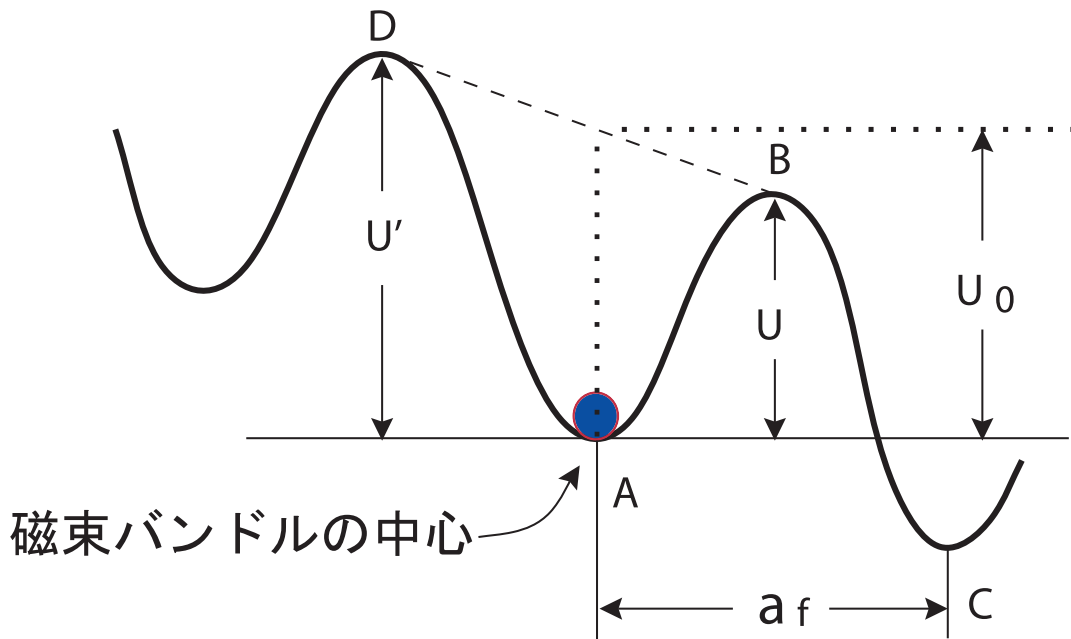
図 1.1: 磁束バンドルの位置に対するエネルギー変化の概念

1.1 に示すように、磁界-温度平面上において不可逆磁界を連ねた曲線 $B_i(T)$ を不可逆曲線 (irreversibility line) と呼ぶ。

1.4 磁束クリープ・フローモデル

1.4.1 磁束クリープ

磁束クリープとは、ピンニングをもたらす欠陥に捕まった磁束線が熱振動によってある確率でピンポテンシャルからはずれてしまう磁束線の運動のことである。理論上では、超伝導体に流れる電流は外部環境が変わらなければ減衰しないと考えられるが、実際に超伝導体試料の直流磁化を長時間にわたって測定すると磁化の減衰が見られる。外部環境が一定の状態では遮蔽電流が時間とともに減衰しており、これはピンニングによる超伝導電流が真の永久電流でないことを示している。これは磁束線がピン止めされた状態が、エネルギーの局所的な極小に対応した準安定状態でしかなく、真の平衡状態でないことを示している。そのため遮蔽電流のない真の平衡状



磁束クリープ

図 1.2: 磁束バンドルの位置に対するエネルギー変化の概念

態へ向かうため緩和、すなわち、遮蔽電流の減衰が起こる。前述したピン止めされた磁束線は何本かの集団になって運動すると考えられ、これを磁束バンドルと呼ぶ。電流が流れている状態での1つの磁束バンドルを考えると、その磁束バンドルを Lorentz 力の方向に仮想的に変位させていった場合のエネルギー変化は図 1.2 のようになると考えられる。図の谷の部分（点 A、点 C）は磁束バンドルがピン止めされている状態である。図が全体として右下がりになっているのは Lorentz 力による仕事を考慮しているためである。磁束バンドルがピン止された状態からはずれるためには、点 B のエネルギー・バリアを越えなければならない。熱振動がなければ磁束バンドルが動くことがないため、この図の状態が安定である。

熱エネルギー $k_B T$ (k_B は Boltzmann 定数) がエネルギー・バリア U よりも十分小さい場合は、このバリアを越える確率は Arrhenius の式 $\exp(-U/k_B T)$ で与えられる。この U を活性化エネルギーという。磁束バンドルが磁束線格子間隔 a_f だけ変位すると、ほぼ元の状態に戻ると予想されるので、 a は a_f 程度の量であると考えられる。よって磁束バンドルのエネルギーはほぼ

磁束線格子間隔 a_f の周期で周期的になっていると予想される。このことから磁束バンドルが磁束クリープを起こして一度に飛ぶ距離は磁束線格子間隔 a_f 程度であるとしてよいと考えられる。したがって磁束バンドルの熱振動周波数を ν_0 とすると Lorentz 力方向の平均の磁束線の移動速度 ν_+ は

$$\nu_+ = a_f \nu_0 \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right) \quad (1.1)$$

となる。Lorentz 力とは逆方向の平均の磁束線の移動速度を考慮して、全体としての平均の磁束線の移動速度 ν は

$$\nu = a_f \nu_0 \left[\exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{U'}{k_B T}\right) \right] \quad (1.2)$$

となる。 U' は Lorentz 力と逆方向の運動に対する活性化エネルギーである。また、クリープの際の磁束バンドルの振動周波数 ν_0 は

$$\nu_0 = \frac{\zeta \rho_f J_{c0}}{2\pi a_f B} \quad (1.3)$$

となる。 ζ はピンの種類に依存する定数であり、点状ピンの場合は $\zeta \simeq 2\pi$ 、非超伝導粒子の場合は $\zeta = 4$ であることが知られている。 ρ_f はフロー比抵抗、 J_{c0} は 1.4.2 節で説明する仮想的な臨界電流密度である。したがって $E = B \times \nu$ の関係より、生じる電界の大きさは

$$E = B a_f \nu_0 \left[\exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{U'}{k_B T}\right) \right] \quad (1.4)$$

となる。(1.4) 式は超伝導体に電気抵抗があることを示し、この抵抗による遮蔽電流の減少が磁化の緩和の原因である。

1.4.2 磁束クリープによる電界

磁束クリープにより発生する電界は (1.4) 式のように与えられる。一般的には、磁束バンドル位置に対するエネルギーの変化は、図 1.2 のようなポテンシャルで近似的に与えられる。このポテンシャルを

$$F(x) = \frac{U_0}{2} \sin(kx) - fx \quad (1.5)$$

のように正弦的なものと仮定する。 $U_0/2$ はポテンシャルの振幅、 $k = 2\pi a_f$ はポテンシャルの周期、 $f = JBV$ はローレンツ力の傾きを表し、 V は磁束バンドルの体積である。また、 x は磁束バンドルの中心位置である。

磁束バンドルが平衡位置にあるときを $x = -x_0$ とし、 $x = x_0$ のときのエネルギーが極大となる。つまり、それぞれの位置でのエネルギー変化はゼロになるので、 $F'(x)$ は0となる。これより

$$x_0 = \frac{a_f}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{fa_f}{U_0\pi} \right) \quad (1.6)$$

が求まる。図1.2からエネルギー・バリア U は $U = F(x_0) - F(-x_0)$ で与えられるので

$$\begin{aligned} U &= U_0 \sin \left[\cos^{-1} \left(\frac{fa_f}{U_0\pi} \right) \right] - \frac{fa_f}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{fa_f}{U_0\pi} \right) \\ &= U_0 \left[\left\{ 1 - \left(\frac{2f}{U_0k} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{2f}{U_0k} \cos^{-1} \left(\frac{2f}{U_0k} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.7)$$

と表される。ただし $\sin(\cos^{-1}(x)) = \sqrt{1-x^2}$ を使い、 $k = a_f/2\pi$ とする。熱振動がなければ、 $U = 0$ となる理想的な臨界状態となり、 $2f/U_0k = 2J_{c0}BV/U_0k = 1$ の際にこの条件を満たす。このとき $J = J_{c0}$ となることから一般に

$$\left(\frac{2f}{U_0k} \right) = \frac{J}{J_{c0}} \equiv j \quad (1.8)$$

の関係が得られる。 j は規格化電流密度である。また、 J_{c0} はクリープがないと仮定したときの仮想的な臨界電流密度であり、経験的に

$$J_{c0} = A \left[1 - \frac{T}{T_c} \right]^m B^{\gamma-1} \left(1 - \frac{B}{B_{c2}} \right)^\delta \quad (1.9)$$

と表現できる。 A, m, γ, δ はピンニング・パラメータである。これより(1.7)式は

$$U(j) = U_0[(1 - j^2)^{1/2} - j\cos^{-1}j] \quad (1.10)$$

となる。また、 $k = 2\pi a_f$ 及び (1.8) 式より

$$U'(j) \simeq U + fa_f = U + \pi U_0 j \quad (1.11)$$

となる。これらより (1.4) 式を整理すると

$$E = Ba_f v_0 \exp\left[-\frac{U(j)}{k_B T}\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi U_0 j}{k_B T}\right)\right] \quad (1.12)$$

のように求まる。

1.4.3 磁束フローによる電界

磁束フローとは、磁束クリープ状態からさらに電流を流したとき、ピン力が Lorentz 力を支えきれなくなりすべての磁束線が連続的に運動している状態である。超伝導体に電流が流れていて、外部磁界が加わっているとき単位体積の磁束線に働く Lorentz 力は $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ で与えられる。一方、磁束線がこの力で超伝導体内を動こうとすると磁束線は逆向きの力を受ける。Lorentz 力の方向の単位ベクトルを $\delta = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$ とすると、静的釣り合いが取れる場合、つまり $J < J_c$ の場合は釣り合いの式は

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} - \delta F_p = 0 \quad (1.13)$$

となる。 F_p はピン力の強さである。 $|J| = J_c$ の時 F_p は最大となり、 $J_c = F_p/B$ の関係が得られる。一方、 $J > J_c$ となると粘性力が働き、それを考慮した釣り合いの式は

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} - \delta F_p - \frac{\mathbf{B}}{\phi_0} \eta \mathbf{v} = 0 \quad (1.14)$$

となる。 ϕ_0 は量子化磁束、 η は粘性係数である。この式を $J_c = F_p/B$ 、 $\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ の関係を用いて \mathbf{J} について解くと

$$\mathbf{J} = J_c + \frac{\mathbf{E}}{\rho_f} \quad (1.15)$$

となる。 $\rho_f = B\phi_0/\eta$ はフロー比抵抗である。(1.15)式を E について整理すると、磁束フローにより発生する電界は

$$E = \rho_f(J - J_{c0}) \quad (1.16)$$

となる。

1.4.4 ピン・ポテンシャル U_0

磁束クリープによる超伝導電流の緩和率や、不可逆曲線を決定する上で重要なピン・ポテンシャル・エネルギー U_0 は磁束バンドルの体積 V 、 ζ を用いて次のように表される

$$U_0 = \frac{1}{2\zeta} J_{c0} B a_f V \quad (1.17)$$

a_f は ϕ_0 を磁束量子として $(2\phi_0/\sqrt{3}B)^{1/2}$ となる。(1.17)式から、ピンニング力だけでなく超伝導体の磁束バンドルの体積が、 U_0 を決定する上でも非常に重要なことが分かる。ここで、磁束バンドルを図1.3のようなモデルで考える。縦方向の磁束バンドルサイズを L 、横方向の磁束バンドルサイズを R 、超伝導体の厚さを d とすると、 L と d の大小関係によって磁束バンドルのサイズ V が異なる値をとる。それぞれの場合に応じて L 、 R 、 d を与えることで、対応した U_0 を理論的に計算することが可能であり、以下のようになる。 R は磁束線格子間距離 a_f 程度かその数倍であると考えられており、

$$R = g a_f \quad (1.18)$$

のように表す。 g^2 は磁束バンドル中の磁束の本数である。 L は

$$L = \left(\frac{C_{44}}{\alpha_L} \right)^{1/2} = \left(\frac{B a_f}{\zeta \mu_0 J_{c0}} \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

で求めることができる。 $C_{44} = B^2/\mu_0$ は磁束線の曲げの歪みに対する弾性定数、 α_L は Labusch パラメーターである。磁束バンドルのサイズは $V = R^2 L$ から求められるが、超伝導体の厚さ d が縦方向の磁束バンドルサイズ L より大きい場合(図1.3の左図)は

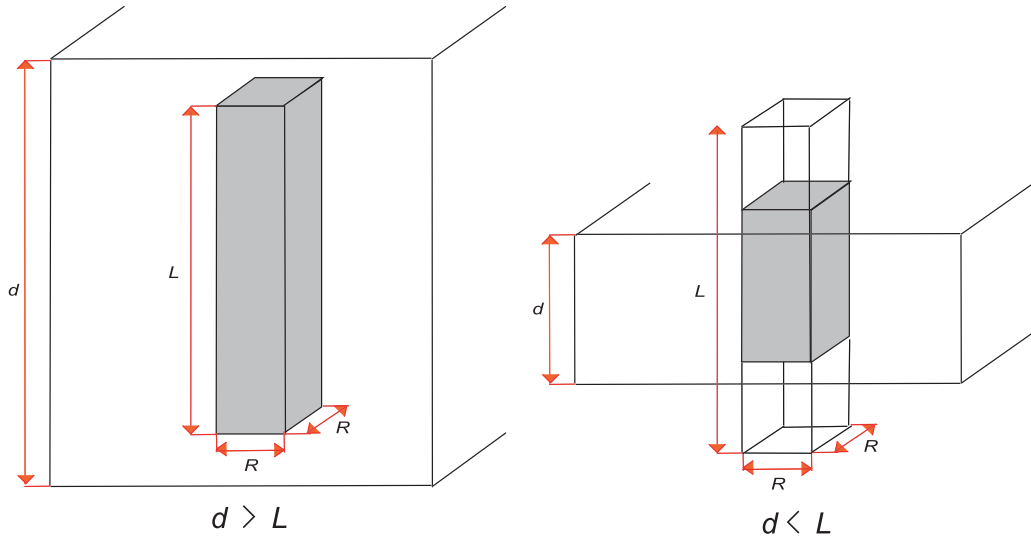


図 1.3: 縦方向の磁束バンドルサイズ L と超伝導体の厚さ d の関係の模式図。 L と d の大小関係により U_0 の表す式が異なる。

$$U_0 = \frac{0.835g^2k_B J_{c0}^{1/2}}{\zeta^{3/2} B^{1/4}} \quad (1.20)$$

となり、 d が L より小さい場合 (図 1.3 の右図) は

$$U_0 = \frac{4.23g^2k_B J_{c0}d}{\zeta B^{1/2}} \quad (1.21)$$

となる。

1.4.5 磁束クリープ・フローモデル

このように超伝導体では磁束クリープ、磁束フローにより電界が発生する [1]。これらはそれぞれの場合において以下の式で求めることができる。

- クリープ状態 ($j < 1$)

$$E_{\text{cr}} = Ba_f v_0 \exp\left[-\frac{U(j)}{K_B T}\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi U_0 j}{k_B T}\right)\right]$$

$$E_{\text{ff}} = 0$$

- フロー状態 ($j \geq 1$)

$$E_{\text{cr}} = Ba_f v_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi U_0}{k_B T}\right)\right]$$

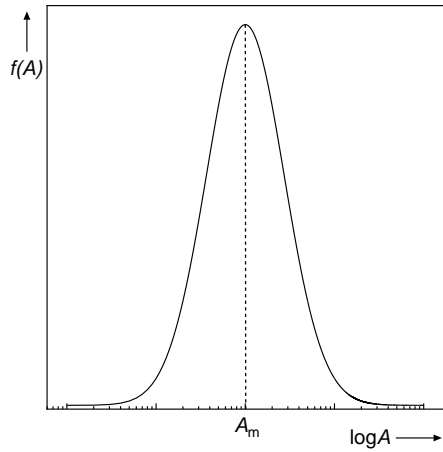


図 1.4: A の分布の概形

$$E_{\text{ff}} = \rho_f(J - J_{c0})$$

これらから発生する電界 E は

$$E = (E_{\text{cr}}^2 + E_{\text{ff}}^2)^{1/2} \quad (1.22)$$

となる。

一般に酸化物超伝導体は超伝導体内の不均一さが著しく、また弱結合などもあってピン力密度が広く分布する。(1.9)式のピン力の強さを表すパラメータ A の分布を以下のような式で表現すると、その概形は図 1.4 のようになる。

$$f(A) = K \exp \left[-\frac{(\log A - \log A_m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1.23)$$

K は規格化定数、 σ^2 は分布幅を表すパラメータ、 A_m は A の最頻値である。このような A の分布を考慮にいと、発生する全体の電界は

$$E(J) = \int_0^{\infty} E f(A) dA \quad (1.24)$$

と表される。

以上の内容より計算に必要なパラメータは A_m 、 σ^2 、 m 、 γ 、 g^2 であり、これらを遺伝的アルゴリズムを用いて計算することとなる。

これらパラメータの意味を以下にまとめる。

- A_m : ピン力の最頻値を表す。この値が大きくなれば臨界電流密度 J_c は低下し、 E は上昇する。
- σ^2 : ピンの分散を表す。この値が大きくなれば J_c は上昇し、 E は低下する。
- γ : クリープがないと仮定したときの仮想的な臨界電流密度 J_{c0} の磁場依存性を示す。この値が大きくなれば低磁場における J_{c0} の磁場依存性が小さくなる。0~1の範囲をとる。
- m : J_{c0} の温度依存性を示す。この値が大きくなれば低磁場における J_{c0} の温度依存性が大きくなる。
- g^2 : 磁束バンドル内の磁束数を示す。1より大きな値をとる。

1.5 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) とは、1975年にミシガン大学の John Henry Holland によって提案された近似解を探索するメタヒューリスティックアルゴリズムである [2]。メタヒューリスティックとは、どのような問題でも汎用的に対応できるように設計されたアルゴリズムである。遺伝的アルゴリズムは、データを遺伝子で表現し、その遺伝子群を個体として表現する。この個体が、生物の進化の過程を模倣したような選択、交叉、突然変異といった遺伝的操作を行い、解の探索を行う。様々な最適化問題に応用でき、数学や工学、生物学、医学、遺伝子学など様々な分野で用いられている。

アルゴリズムの例を以下に示す。初めに、個体設定した個数作成する。次に、個体群に対して評価関数を用いて評価値を計算する。すべての個体群に対して評価値計算を1回ずつ行い、遺伝的操作まで行う一連の計算処理を世代という。評価値は評価関数によって与えられ、データとの適応度を意味する。適応度計算回数は個体数と計算する世代数との積で表せられ、

例えば、個体数が50個で100世代まで計算を行うとすると、適応度計算回数は5000回となる。

1. 初期個体集団を作成
2. 任意の評価関数を用いて個体の評価値を計算
3. 集団に対し遺伝的操作を行う
4. 2-3を規定回数行う

1.6 遺伝子操作

GAは遺伝子操作を行うことによって、解の計算を行う。遺伝子操作には、選択、交叉、突然変異といった操作がある。この節では、これらの操作について説明を行う。

選択

この操作は、生物の自然淘汰化をモデルにしたものである。評価関数によって算出された適合度を元に次世代に残す個体を選択する操作のことをいう。選択には次のようなものがある。

ルーレット選択

個体の評価値に応じた確率を割り当てるものである。その個体の評価値から個体の評価値の総和を割ったものがその個体の選択される確率となる。最も有名な選択方法であるが、適応度が著しく高いとその個体を選択される確率が大変高くなり、初期収束に陥る可能性もある。適合度をスケールリングして用いることもある。

ランキング選択

ランキング選択は各個体の適合度によって、最も良いものからあらかじめ選択される確率を決めておくものである。

エリート選択

ルーレット選択やランキング選択とは別に適合度の高い個体を一

定個数、次世代に残す選択。この選択を行うことで、適合度が悪化するのを防ぐ反面、解の多様性が失われる可能性もある。

交叉

交叉（組み換え）は生物の交配をモデル化したものである。実際の操作としては、個体の遺伝子（各データのパラメータの一部）を入れ替える操作である。交叉の例としては、次のようなものがある。

一点交叉

任意の2つの個体があったとき、ある点を境にして交叉させる。

個体 A : 1010110|**010**→1010110|**101**

個体 B : 0100110|**101**→0100110|**010**

多点交叉

任意の2つの個体があったとき、それぞれの点を決めて交叉させる。

個体 A : 10|**10**|110|**010**→10|**00**|110|**101**

個体 B : 01|**00**|110|**101**→01|**10**|110|**010**

突然変異

この操作は、生物に見られる遺伝子の突然変異をモデル化したものである。実際の操作では、個体の遺伝子の一部（設定値の一部）を変化させる操作である。局所解を防ぐ効果が期待できるが、突然変異の確率を高すぎると、解の収束に影響が出てしまう。

1.7 評価関数

評価関数を用いて評価値を出す。評価値は計算結果と元データとの適合度を表し、遺伝的操作である選択で用いられる。値が低いほど計算結果と元データとの適合度が高いことを示す。今回は、評価値として

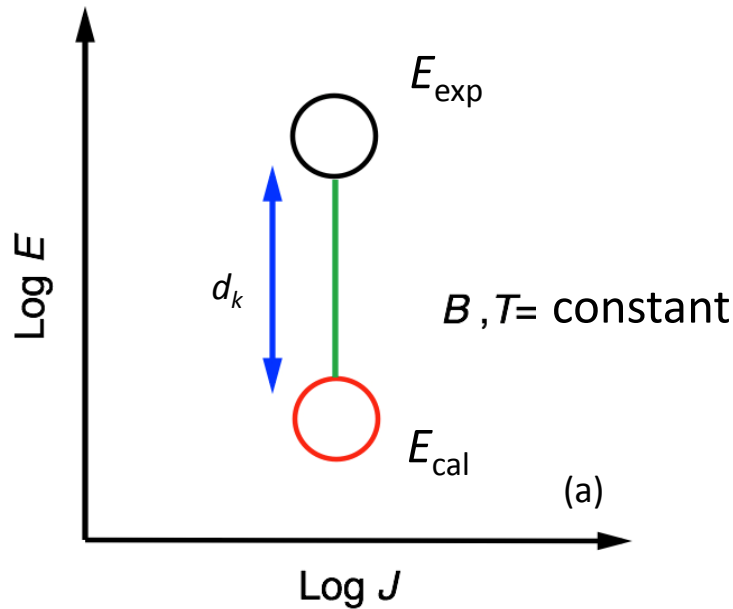


図 1.5: d_k の定義。同じ磁場、温度、臨界電流 J で、実験データの電界 E_{exp} と計算結果 E_{cal} の差を定義している。

$$P = \sum_{k=1}^N d_k \quad (1.25)$$

を用いた [7]。P は評価値で d_k は図 1.5 で示すように、同じ臨界電流 J での実験データでの電界 E_{exp} と計算値による電界 E_{cal} の距離を定義している。

1.7.1 実数値 GA

前節で説明した遺伝子操作は個体のもつ遺伝子がビット形式で表現される場合で、実際の数値計算に用いる場合には、実数を用いるほうが扱いやすい。ここではそのために用いられるアルゴリズムを示す。

選択

この操作はビット形式の GA の場合と基本的には同じでよい。

交叉

アルゴリズムとしてブレンド交叉 (BLX- α)、単峰性正規分布交叉 (UNDX)、シンプレックス交叉 (SPX) などが知られている。以下では今回の実験で用いたシンプレックス交叉 (SPX) の説明を行う [3]。

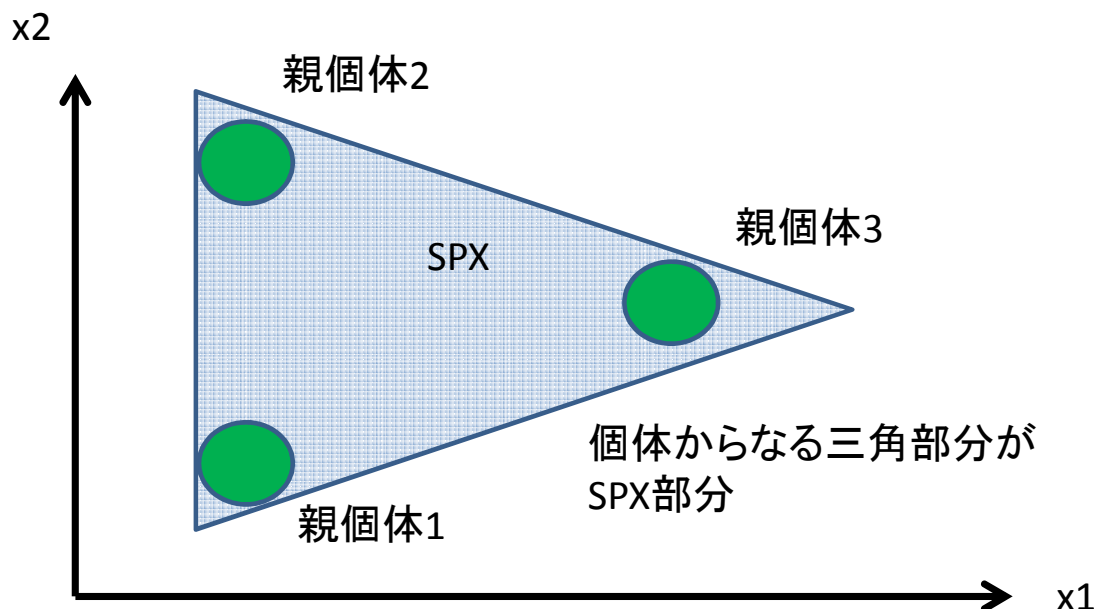


図 1.6: シンプレックス交叉 (SPX)。この図では 2 次元平面なので 3 つの個体からなる三角形がシンプレックスとなる。

SPX は実数値 GA の交叉方法の一つ。SPX では $n+1$ 個の親個体を頂点とするシンプレックスを拡張してその内部に一様に子個体を生成するものである。図 1.6 は SPX 部分を示したものである。

突然変異

一様突然変異と境界突然変異という 2 種のアプローチが知られている。 $0 \leq X \leq 10$ の範囲内での計算を行っている場合、一様突然変異はこの範囲内から一様に実数値を生成する。これに対して境界突然変異は 0 若しくは 10 が発生する乱数となる。境界突然変異は前述の交叉により発生しにくい、変数の許容範囲の境界線上の値を持つ個体を生成するために用いられる。

1.7.2 分散 GA モデル

分散 GA モデルとは、個体群をいくつかの部分個体群に分割して、それぞれの部分個体群に対して遺伝的操作が行われる方式である [4]。その中で分散 GA モデルの方法の1つとして島モデルをここでは説明する [5]。島モデルとは個体を島と呼ばれる個体群に分け、それぞれの島の中で遺伝的操作を行う。そして一定の世代に達したとき、ある一定の確率で島ごとに個体の交換を行うものである。図 1.7 は島の様子を表したものである。島モデルを用いることによって、初期収束に陥りにくく、個体の多様性を高く持つことが期待される。

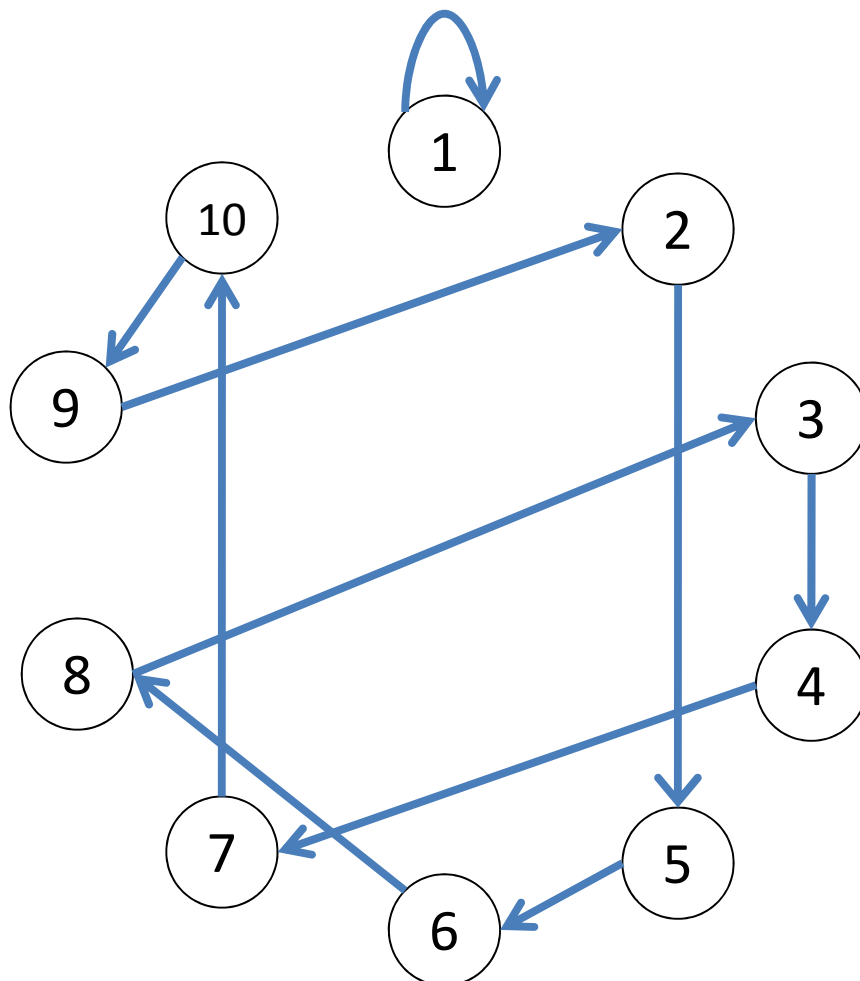


図 1.7: 島モデル。ここでは10個島から成り立っている。島の番号が1番のものは、移住が行われていない様子を表している。

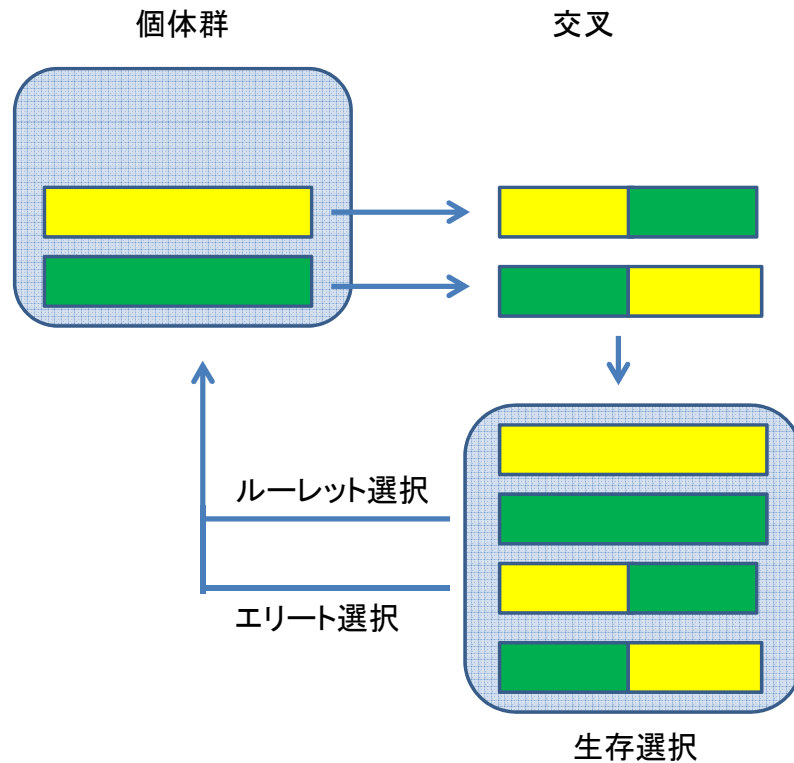


図 1.8: MGG モデル。ここでは、個体群から 2 個体を選び出し、それらに交叉を行う。選び出した個体と交叉を行った計 4 つの個体からエリート選択とルーレット選択をし、それぞれの方法で選択した個体を個体群に戻す。

1.7.3 世代交代モデル

世代交代モデルとは現世代から次世代に世代を移行するに当たり、親子個体を合わせた集団から次世代に残す個体を選択する方法。個体群から個体を複数選択、子の生産、生存選択といった一連の操作を行う。SimpleGA (単純 GA) や Minimal Generation Gap (MGG) 等の種類がある。SimpleGA とは、ルーレット選択や一般的な突然変異 (遺伝子をランダムに変更する) を用いた GA モデルを指す。MGG[6] とは、探索序盤における初期収束を回避するとともに、後半の探索においても集団内に多種多様な個体を生存させやすくしたものである。親の選択としては、個体集団からランダムに個体を選び、それらの子の生産として、それぞれ親の個体を交叉させる。そして最後に生存選択では、エリート選択とルーレット選択を用いて、元の親の個体数と同じになるように決定する。このモデルの様子を図 1.8 のように表す。

1.8 研究目的

磁束クリープ・フローモデルを用いた超伝導体の計算において、最適なパラメータを決定する必要がある。現在はパラメータの決定を経験を頼りに手動で行っているため、非常に手間がかかってしまう。前々年度では、GAを用いることにより磁束クリープ・フローモデルのパラメータ決定の自動化が可能となった。これまでの研究で、いくつかの評価関数の面から、評価関数によって、解の精度の向上や探索時間の短縮を検討した。その結果、評価関数を変更することで、解の精度の向上や探索時間の短縮を伺った。ここでは、MGGモデルについて注目し解の精度の改善を行う。

第2章 解析

2.1 概要

1章で述べたように、磁束クリープ・フローモデルを用いて解析する際には、解析するのに必要なパラメータを適切に設定する必要がある。現在は、このパラメータの設定は手動で経験に頼って決定されており、非常に手間がかかる。本研究では事前に設定したパラメータと、そのパラメータをもとに算出した E - J 特性のデータに対して、GAを用いてパラメータを探索させ最適な組み合わせを求めることを目的とする。

2.2 解析手順

超伝導体の E - J 特性は前章で解説したように (1.24) 式を用いて表すことができる。しかし、この式を用いるためには、パラメータを事前に設定する必要がある。事前に設定したパラメータを設定値とし、設定したパラメータをもとに算出した E - J 特性のデータを便宜上実験データと呼ぶことにする。実験データでの E と解析による E を比較することで解析時のパラメータの正当性を検証し、適切な値を決定していく。今回、設定した設定値や解析時のパラメータの範囲を表 2.1 のようにし、実験データは図 2.1–2.3 に示すように、温度 20 K、25 K、30 K のそれぞれ磁界 1–6T の場合の E - J 特性のデータを任意に設定しておいたピンニングパラメータを用い導出した。

表 2.1: 解析時のパラメータの範囲

	設定値	最小値	最大値
A_m	3.8×10^{11}	1.0×10^{11}	1.0×10^{12}
σ^2	7.2×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}
γ	6.2×10^{-1}	1.0×10^{-2}	1.0
m	2.4	1.0	1.0×10^1
g^2	1.0	1.0	1.0

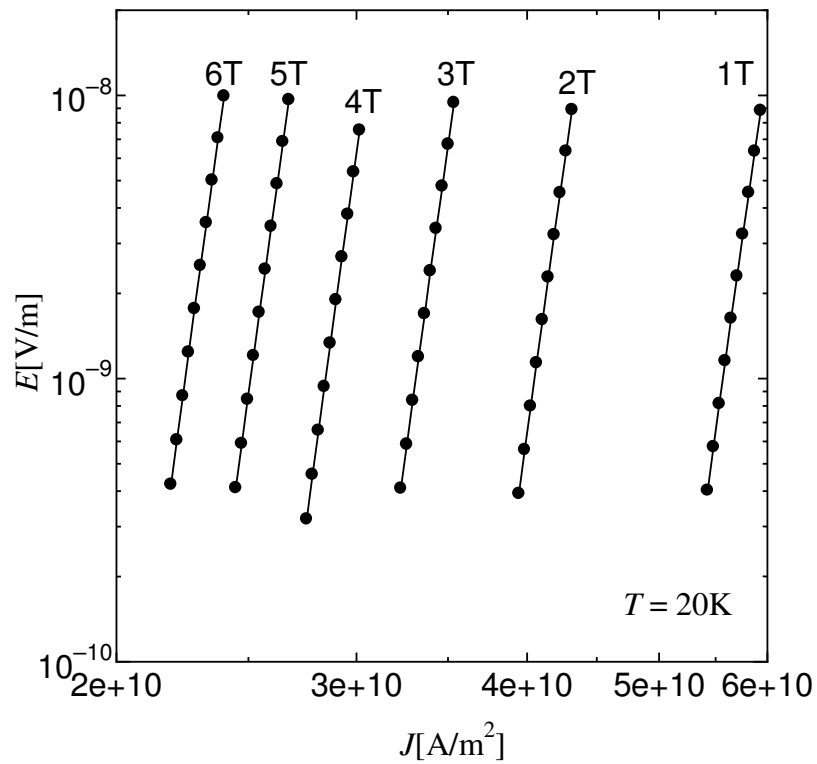


図 2.1: 20 K の E - J 特性のデータ。1-6 T の磁場範囲で各磁場 10 点ずつデータがある。

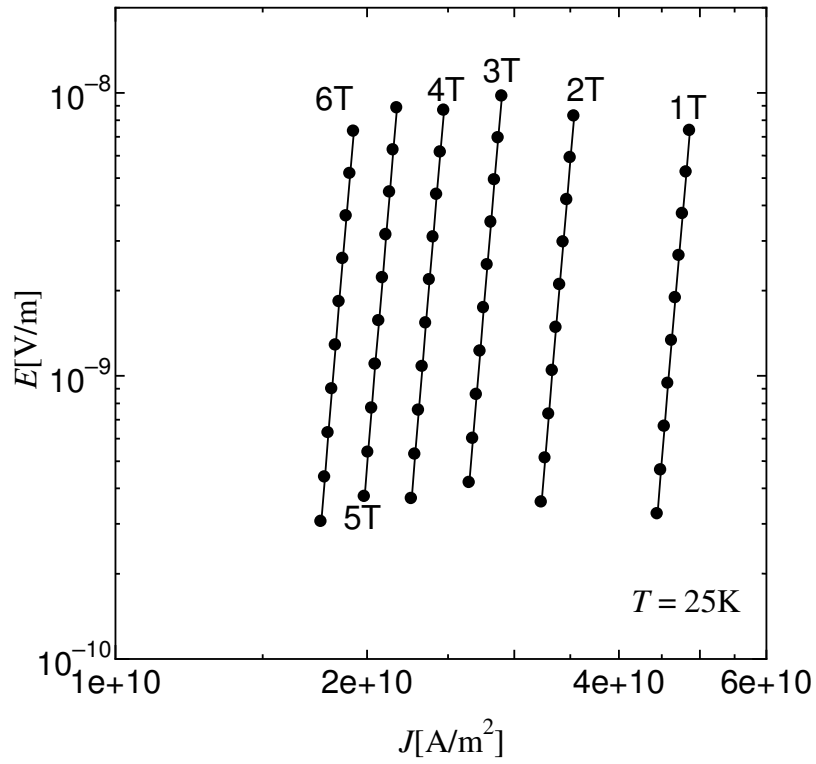


図 2.2: 25 K の E - J 特性のデータ。1-6 T の磁場範囲で各磁場 10 点ずつデータがある。

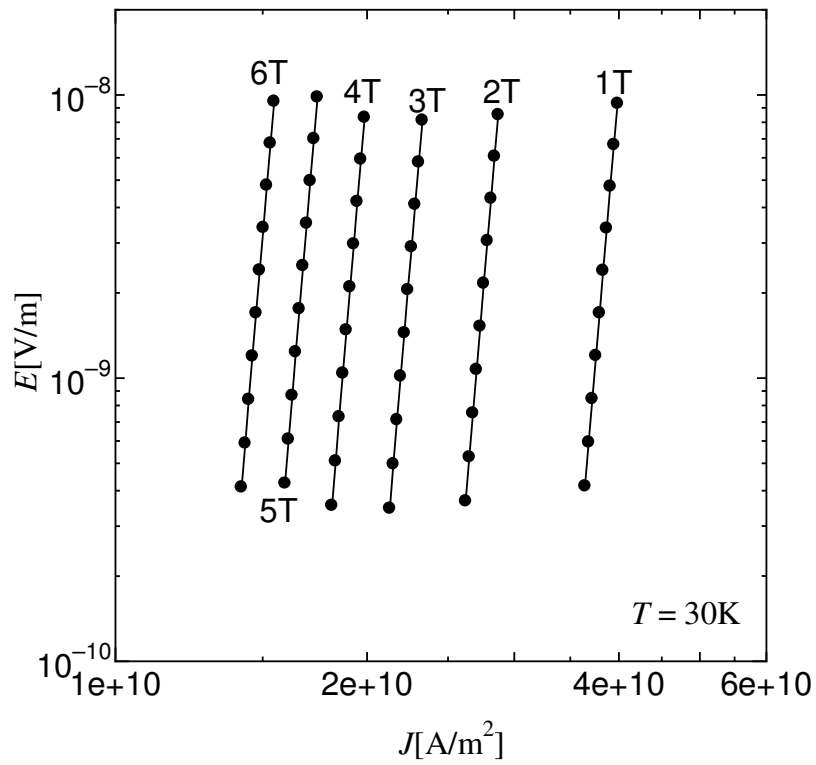


図 2.3: 30 K の E - J 特性のデータ。1-6 T の磁場範囲で各磁場 10 点ずつデータがある。

第3章 結果及び考察

3.1 GAを用いたパラメータ解析

ここでは、これまで用いていたGAプログラムと今回新たに作成したMGGモデルを用いたGAプログラムで、設定値に対してどのくらい設定値に近づいたかを見た。解析に用いた各パラメータ幅を表2.1、計算データを図2.1–2.3に示す。解析は、個体数を100、適応度計算回数を10,000(すなわち、世代数を100に設定していることと同等)の条件で50回の試行を行った。図3.1にMGGモデルの50回解析の結果を示す。

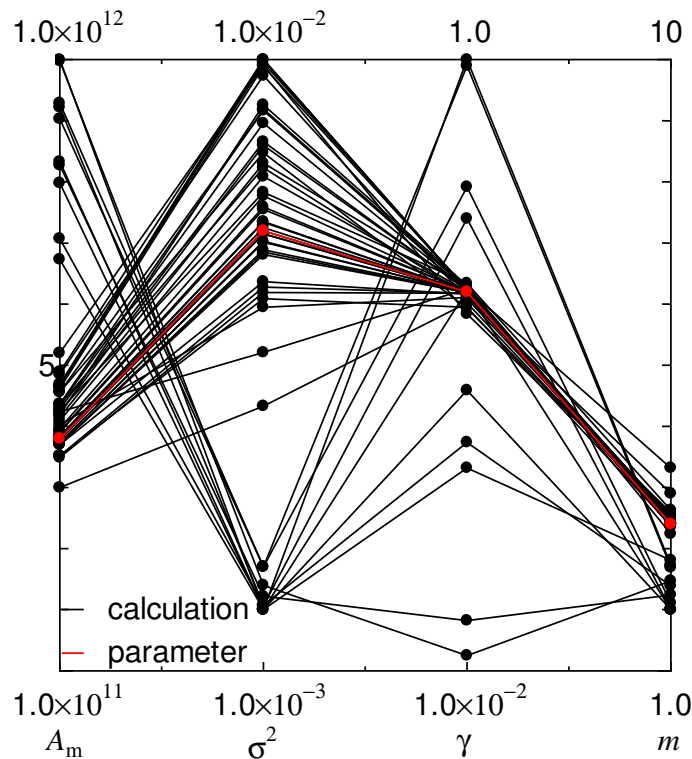


図 3.1: MGG モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表し、黒線 1 本 1 本が計算結果を表している。

図3.1に示すグラフを平行座標プロットという。平衡座標プロットは、多くの変数を持つデータ群を視覚化するのに有用な統計グラフの1つである。変数間の関連性を線を結んで表し、結ばれたデータの組み合わせが1回の解析の結果となっている。図3.1より、設定したパラメータに個体群の多くが収束していることがわかる。

さらに、50回解析の中から、良い結果の例、悪い結果の例を図3.2–3.3に示す。良い結果では、図3.2より、設定値とほぼ同じ値を得ることが出来ている。

次に、同じ*E-J*データに対して、単純GAモデル、分散GAモデルを用いて50回解析した結果をそれぞれ図3.4–3.5に示す。

図3.1、3.4、3.5を比較すると、MGGモデルを利用した場合が、単純GA、分散GAを利用した場合に比べて、設定したパラメータに近い解析結果を多く得ていることが分かる。

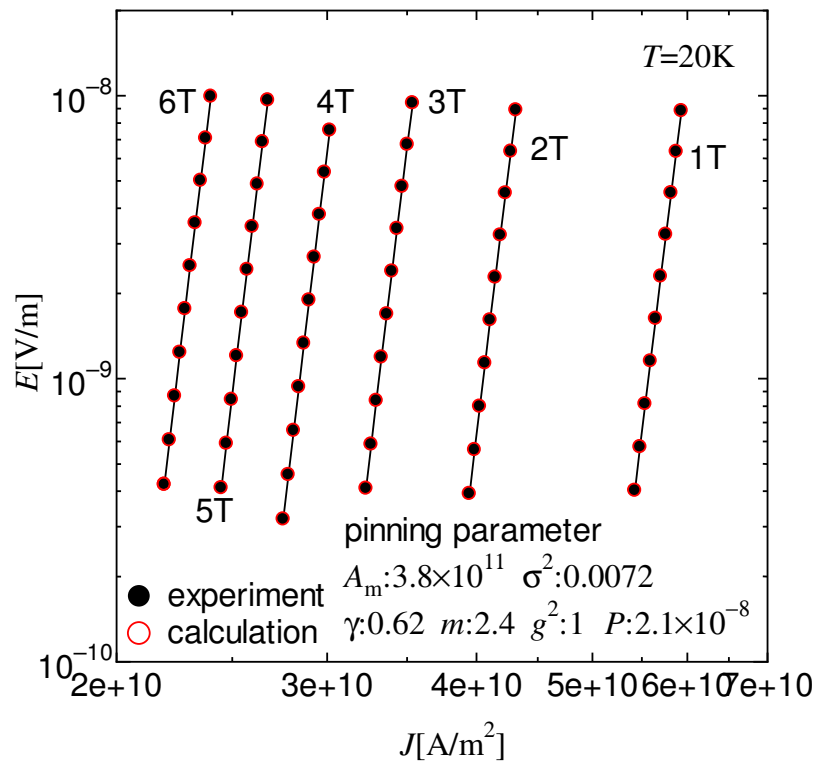


図 3.2: MGG モデルでの良い結果の例。黒丸が実験データを表し、赤丸が計算結果を表す。ここでは、2つの結果がほとんど同じになってるため、ほぼ重なっている。

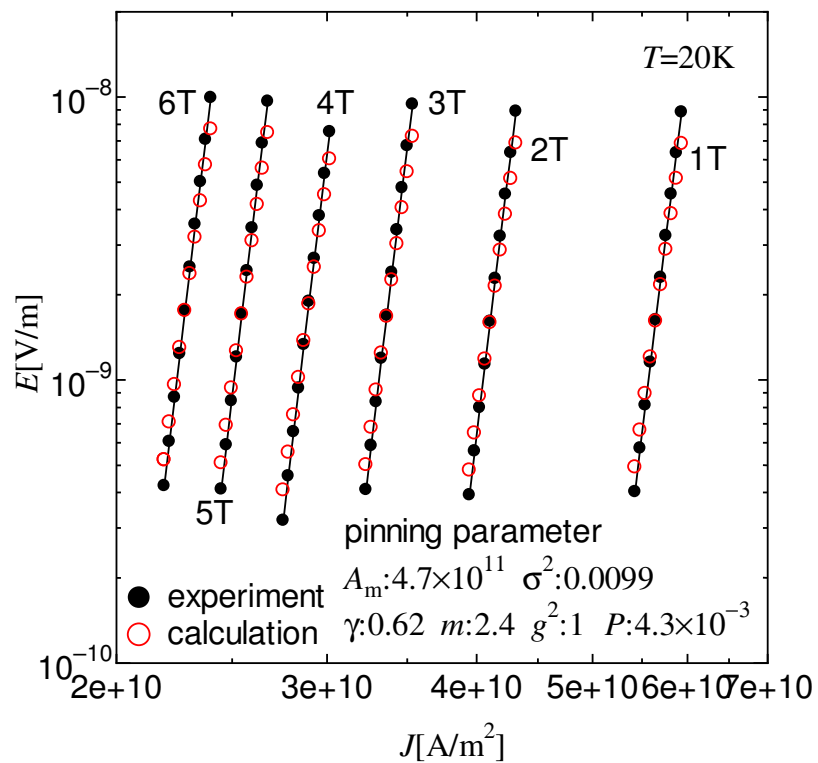


図 3.3: MGG モデルでの悪い結果の例。黒丸が実験データを表し、赤丸が計算結果を表す。

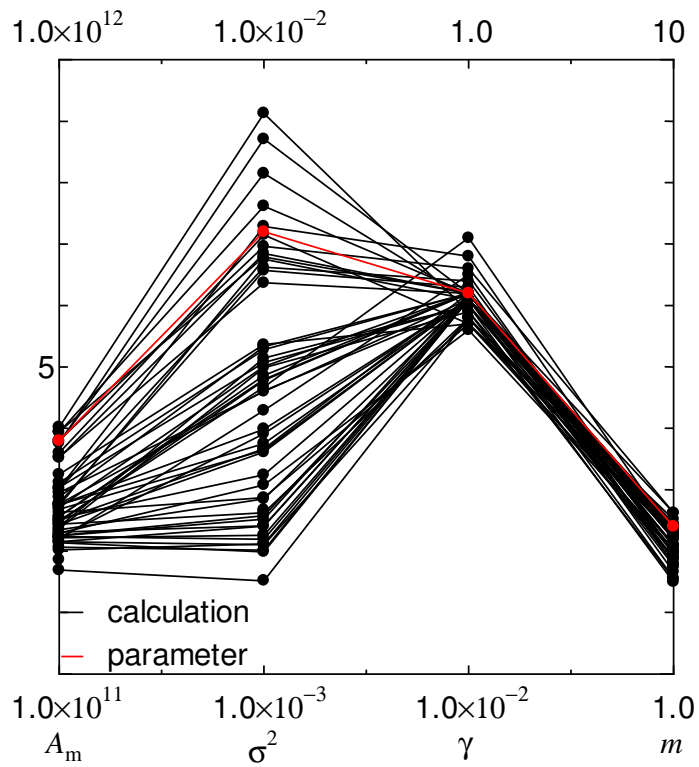


図 3.4: 単純 GA モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表し、黒線 1 本 1 本が計算結果を表している。

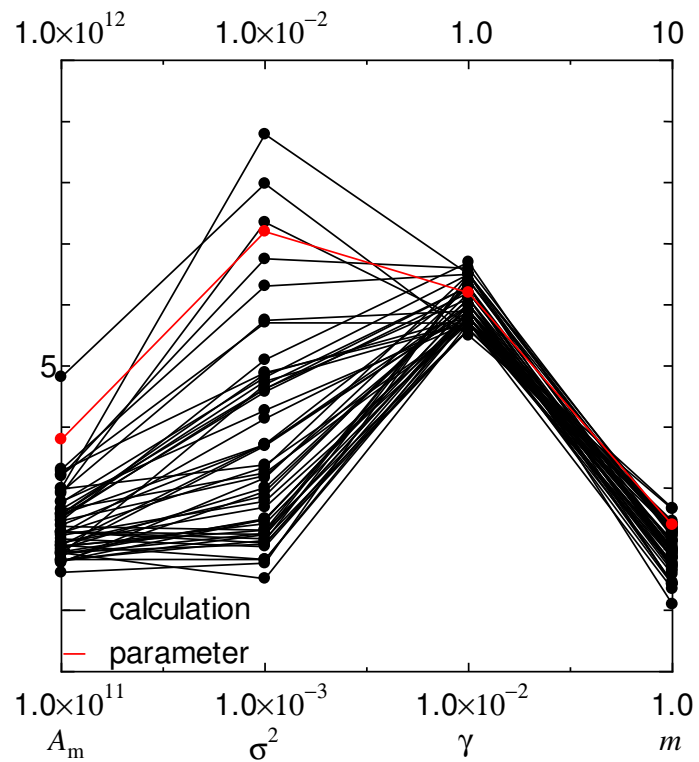


図 3.5: 分散 GA モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表し、黒線 1 本 1 本が計算結果を表している。

3.2 評価値に対するヒストグラム

3つのGAモデルを50回解析して得られた結果の図に対して、評価値の値を範囲に応じて色で分けたものを、図3.6–3.8に示す。図3.8より、MGGモデルを利用した場合、他の2つのGAモデルより、小さい評価値を得ていることがわかる。また、図3.8より、評価値が 10^{-3} 未満の場合、設定したパラメータ付近に解析結果が固まっていることが分かる。

次に、それぞれのGAモデルに対し評価値の値を範囲に応じて分けたものをヒストグラムにまとめたものを図3.9–3.11に示す。図3.9–3.11より、MGGモデルは他のGAモデルより設定したパラメータを得やすいことがわかる。

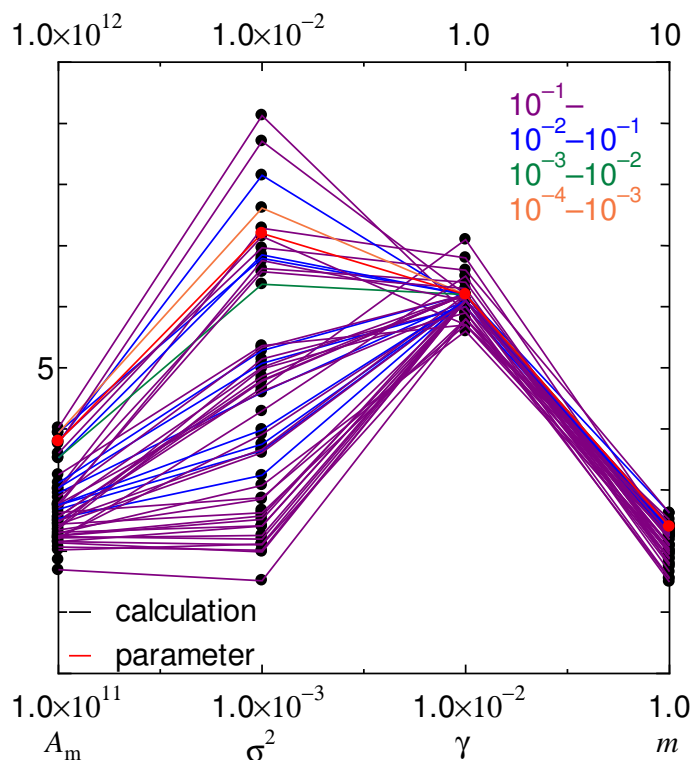


図 3.6: 評価値により色分けした単純 GA モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表す。

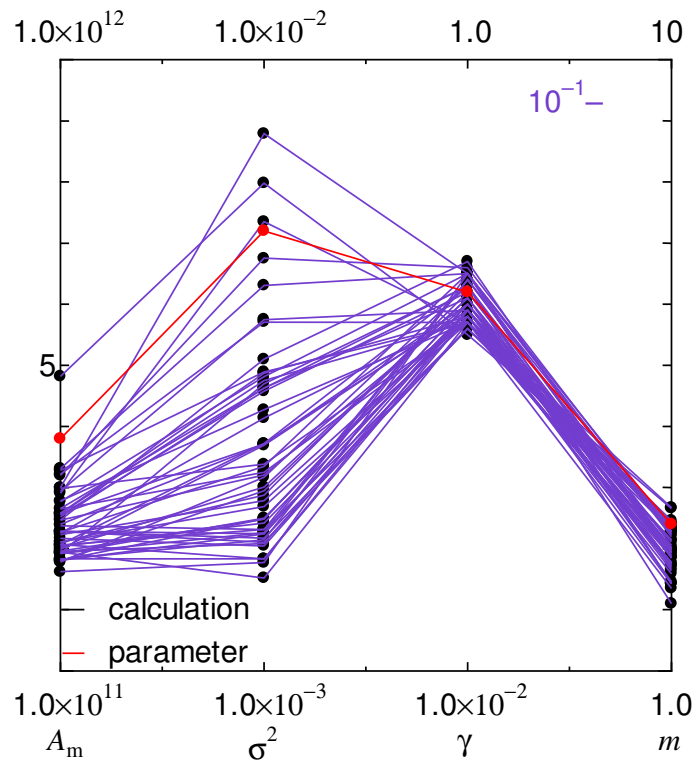


図 3.7: 評価値により色分けした分散 GA モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表す。

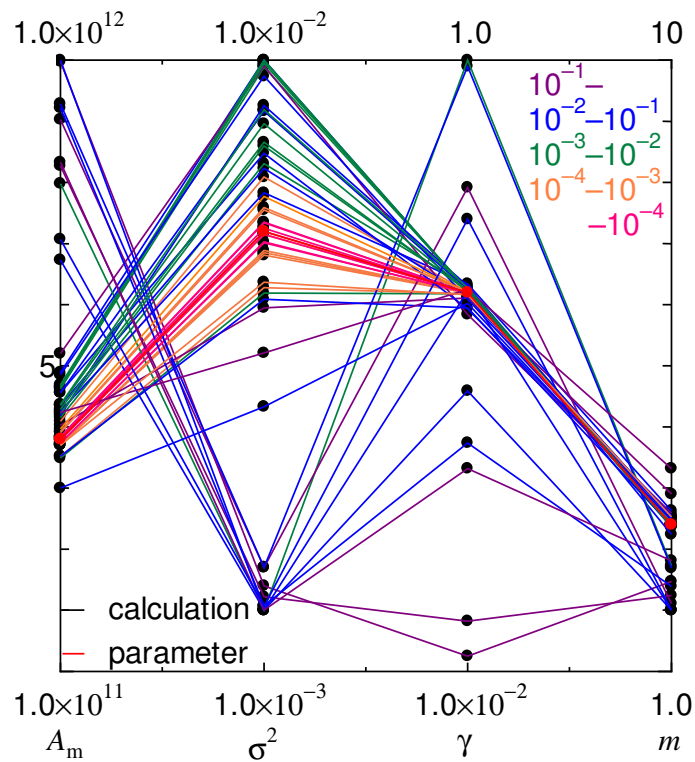


図 3.8: 評価値により色分けした MGG モデルの 50 回解析。赤線が設定値を表す。

単純GAモデルの個数分布

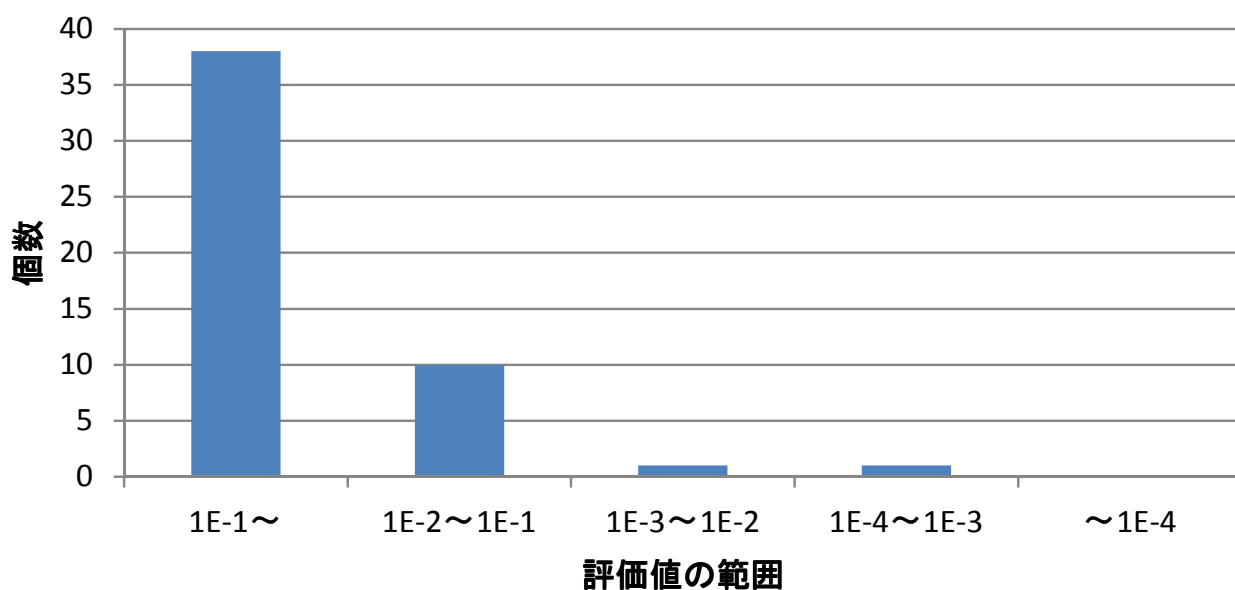


図 3.9: 単純 GA モデルを 50 回解析したときの評価値の分布。評価値の良い値が少し取れていることが分かる。

分散GAモデルの個数分布

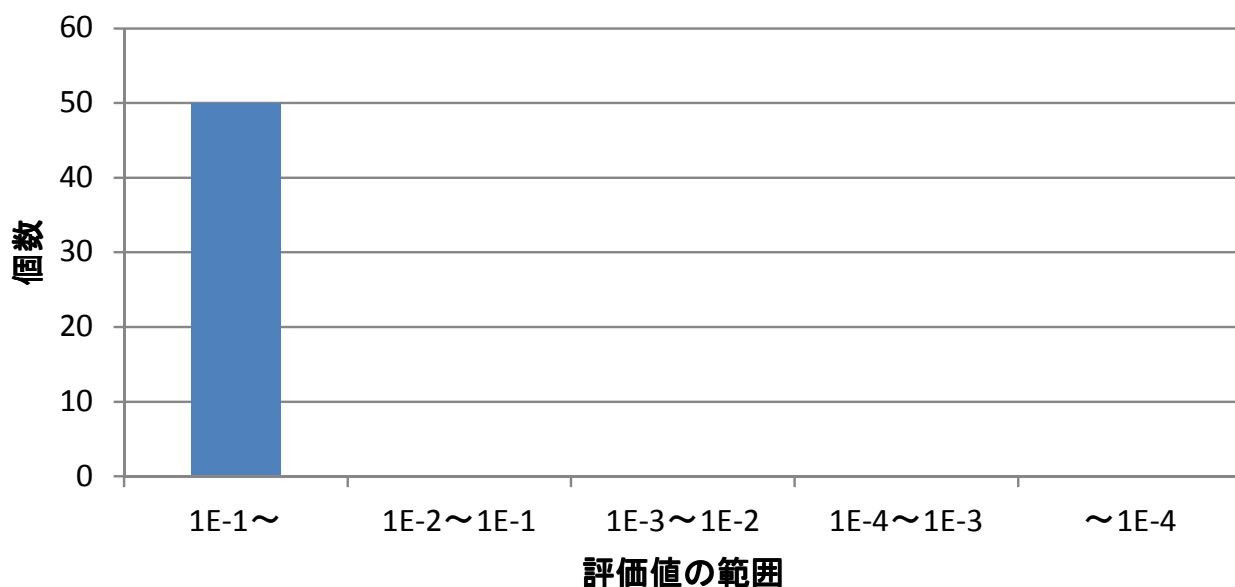


図 3.10: 分散 GA モデルを 50 回解析したときの評価値の分布。評価値の良い値が取れていないことが分かる。

MGGの個数分布

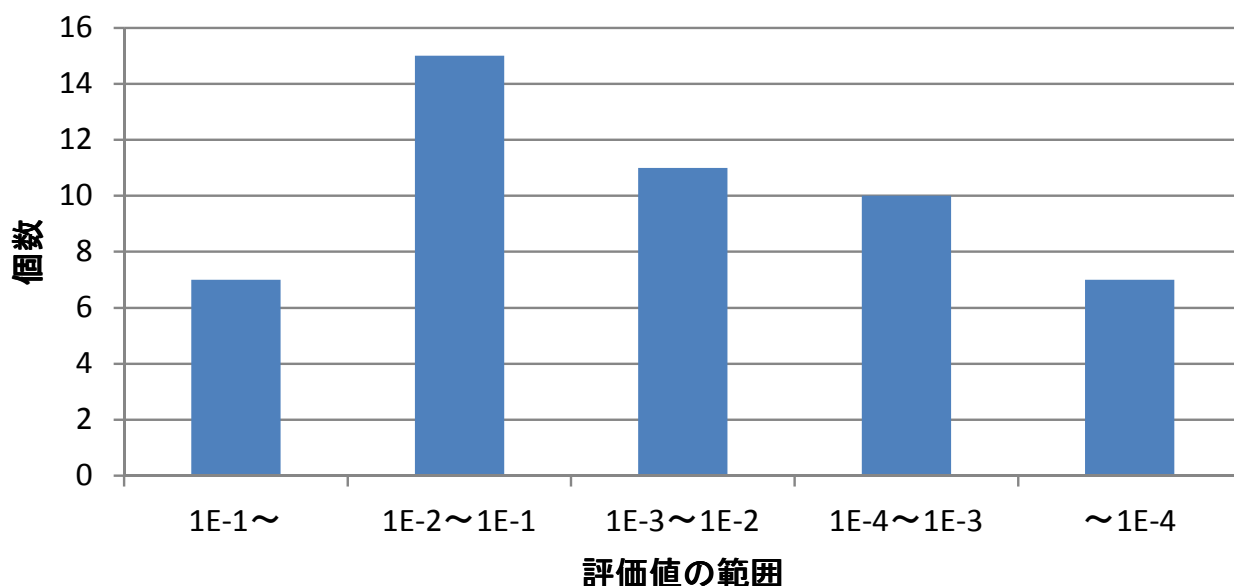


図 3.11: MGG モデルを 50 回解析したときの評価値の分布。単純 GA や分散 GA に比べて多くの良い評価値が取れていることが分かる。

3.3 考察

図 3.6–3.8 を比較すると、MGG モデルが特に、小さい評価値を得ていることがわかる。また、図 3.8 より、評価値が 10^{-3} 未満だと、どのパラメータも設定したパラメータに近い値を得ていることがわかる。ヒストグラムより、評価値が 10^{-3} 未満の数について、単純 GA モデルでは 50 個のうち 1 個得られ、分散 GA モデルでは 1 つも得られなかった。MGG モデルでは 17 個と他の GA モデルより多くの近い値を得ることが出来た。このことから、MGG モデルが他の GA モデルよりも収束度が大変良くなっていることがわかる。

次に、 γ と m を固定して、 A_m と σ の値を変えることで評価値がどのように変わるか見る。評価値が 1 以下を示す 3 次元グラフを図 3.12、その時の評価値の分布を 2 次元グラフで表示したものを図 3.13 に示す。そして、評価値が 0.1 以下を示す 3 次元グラフを図 3.14、その時の評価値の分布を 2 次元グラフで表示したものを図 3.15 に示す。さらに、評価値が 0.01 以下を示す 3 次元グラフを図 3.16 その時の評価値の分布を 2 次元グラフで表示したものを図 3.17 に示す。

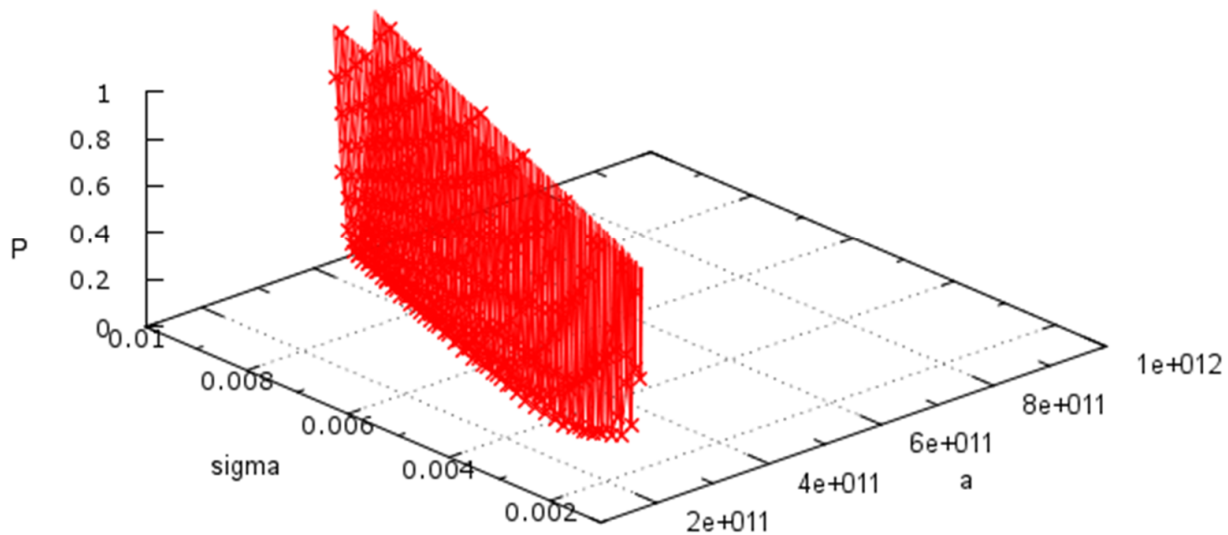


図 3.12: 評価値が1以下を示すの3次元グラフ。x軸、y軸は a と σ 。z軸は設定値 P としている。

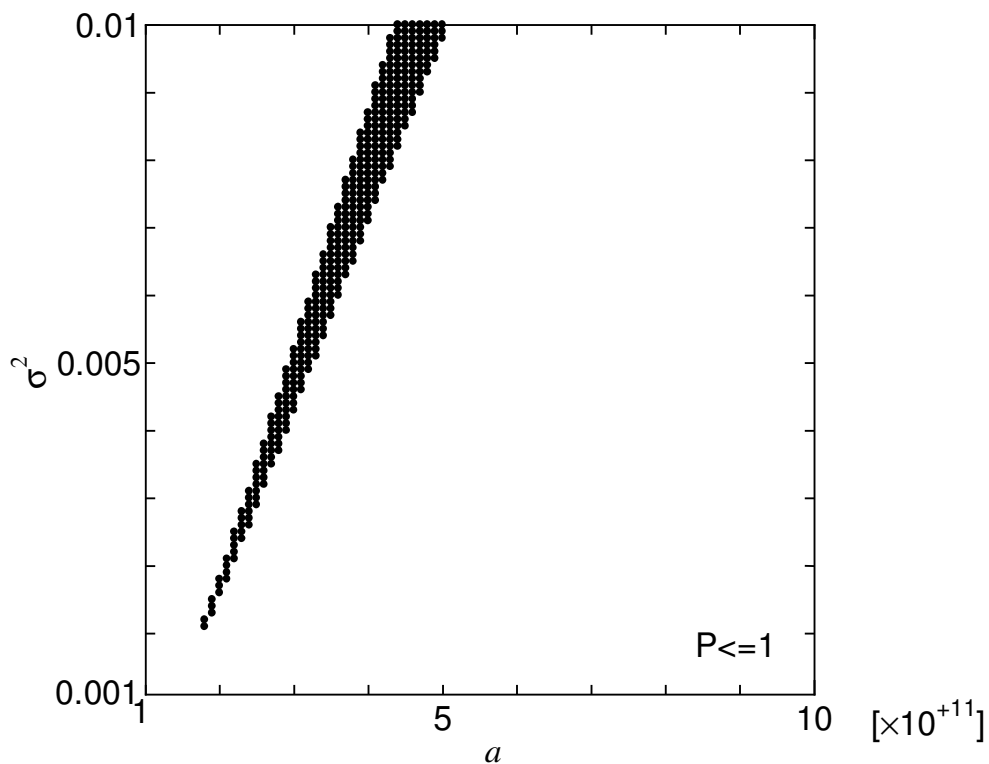


図 3.13: 評価値が1以下の分布を示す2次元グラフ。黒点で敷き詰められている部分が、評価値1以下である部分を示している。

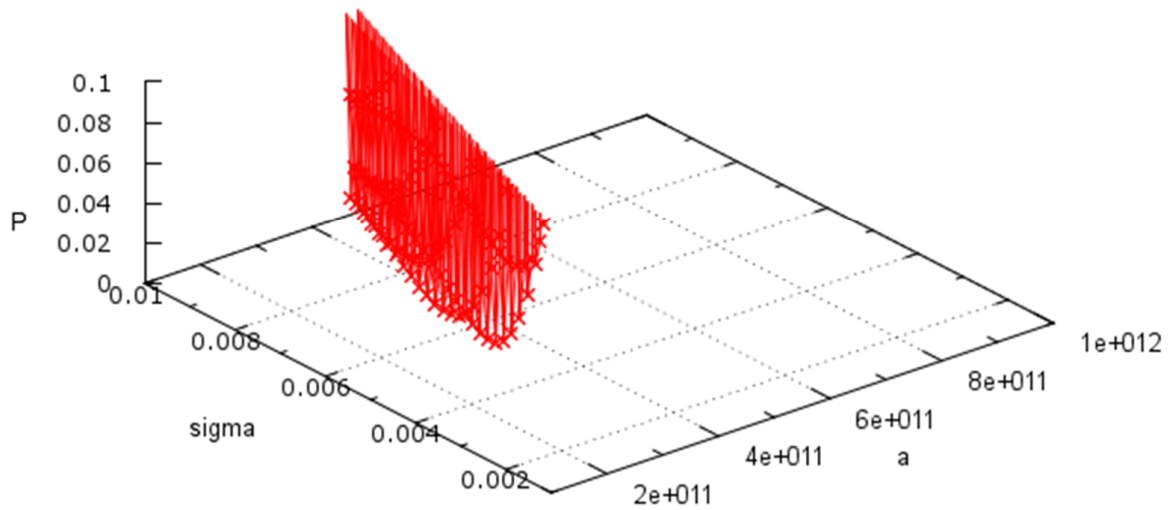


図 3.14: 評価値が0.1以下を示すの3次元グラフ。x軸、y軸は a と σ 。z軸は設定値 P としている。

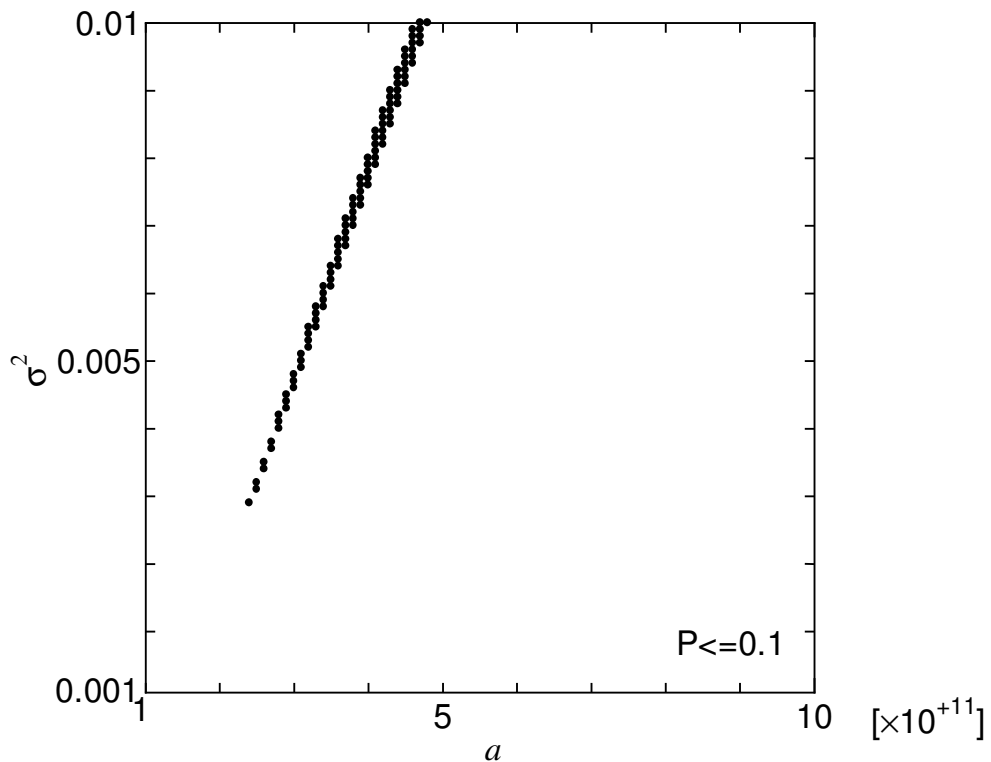


図 3.15: 評価値が0.1以下の分布を示す2次元グラフ。黒点で敷き詰められている部分が、評価値1以下である部分を示している。

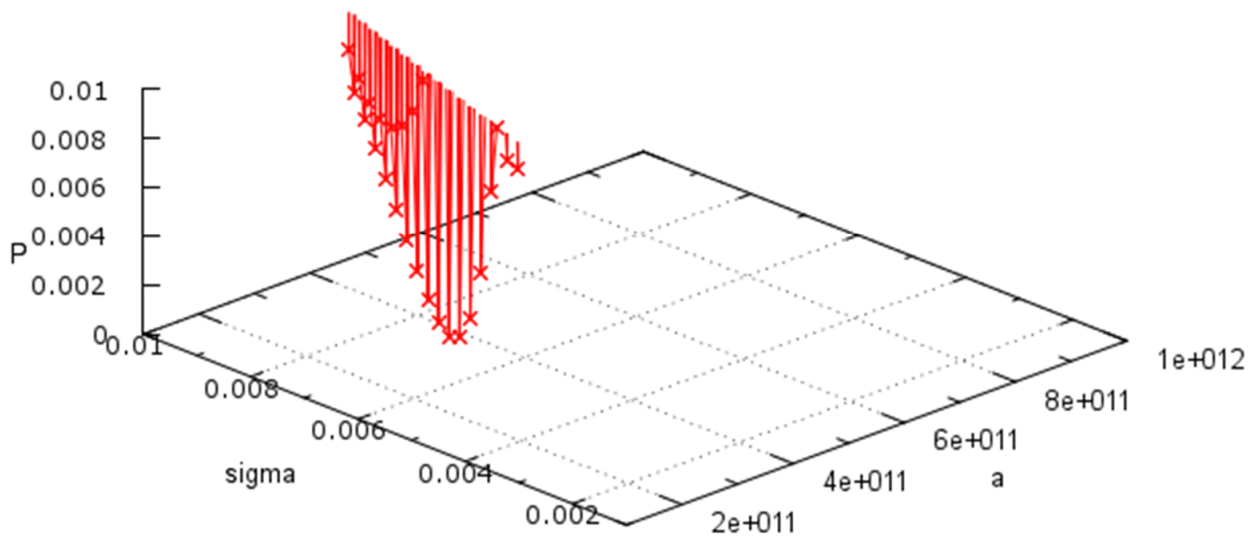


図 3.16: 評価値が0.01以下を示すの3次元グラフ。x軸、y軸は a と σ 。z軸は設定値Pとしている。

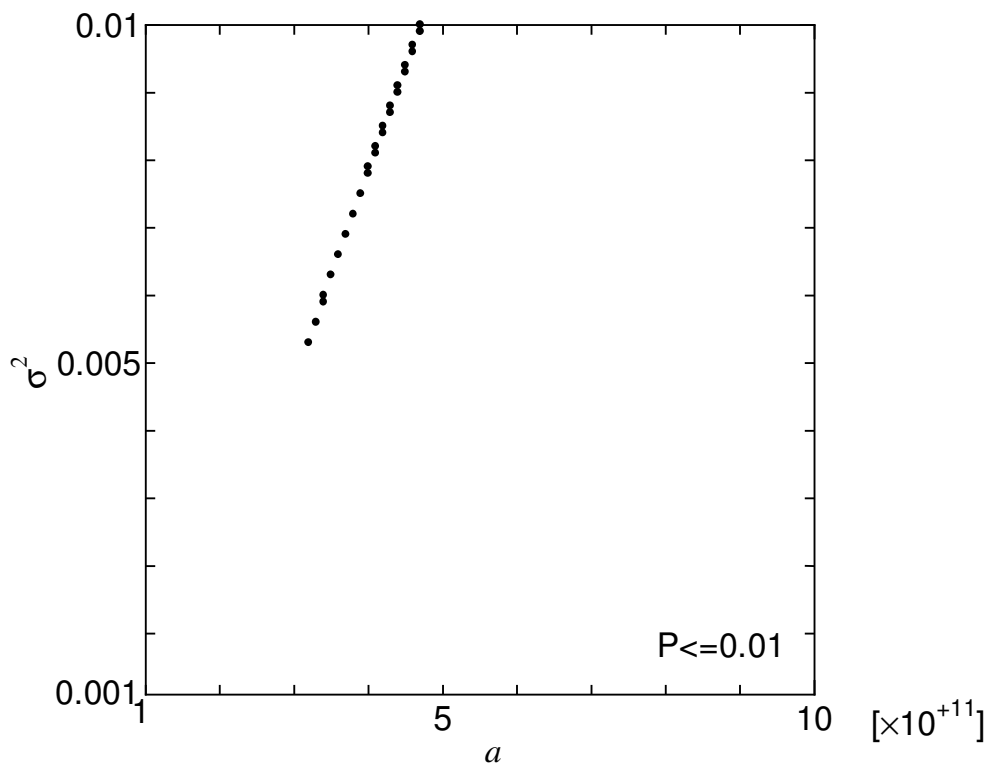


図 3.17: 評価値が0.01以下の分布を示す2次元グラフ。黒点で敷き詰められている部分が、評価値1以下である部分を示している。

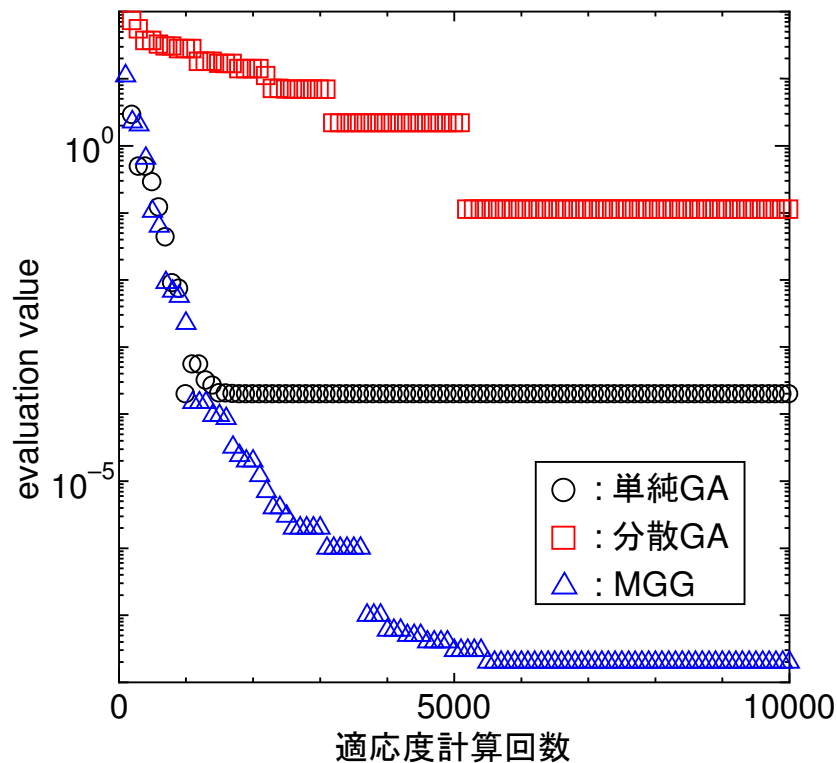


図 3.18: それぞれの GA モデル評価値の推移。適応度計算回数が 10,000 回の部分でのそれぞれの評価値は、単純 GA では 1.96×10^{-4} 、分散 GA では 1.11×10^{-1} 、MGG モデルだと 2.11×10^{-8} である。

図3.12–図3.17より、評価値が1以下だと広く評価値が1以下である部分が存在する。特に σ に関しては、値が0.002以上の部分で評価値が1以下である可能性があることが図3.13より分かる。このことより、得られた結果のほとんどが0.1辺りまでしか収束しなかった単純GAや分散GAでは、図3.6や図3.7のように、広く σ が分布してしまったということが考えられる。分散GAでは、1島の個体が少なかったがために、遺伝的操作が十分に発揮できなかったことが考えられる。そして、図3.16、図3.17より、評価値が0.001辺りになると設定したパラメータ周辺しか評価していないことが分かる。このことと図3.8より、評価値が0.001を下回ると、設定したパラメータに近い値が結果として出てくることがわかる。

さらに、評価値と適応度計算回数との関係を図3.18に示す。

図3.18の評価値の推移はそれぞれ評価値の優れている解析結果を選択してグラフにしたものである。MGGモデルの評価値が他のGAモデルに対

して大変小さい値を得ていることが図3.18より分かる。また、単純GAとMGGモデルの評価値推移を比べた時、単純GAでは適応度計算回数が1,000回辺りからほとんど収束しなくなったのに対し、MGGモデルでは適応度計算回数が5,500回辺りまで収束を続けている。このことから、MGGモデルでは、急速に解を収束するのではなく、徐々に解を収束していったことが考えられる。また、全部のパラメータが設定したパラメータと同じ場合、評価値は 3.5×10^{-12} である。なので、MGGモデルが大変良い結果を得ていることが図3.18からわかる。

MGGモデルでの評価値の推移を図3.19–図3.21に示す。緑のプロットは個体を示している。適応度計算回数が200の時、図3.19よりどの個体もばらばらに存在しているが、適応度計算回数が1,300になると、図3.20のように、大半の個体が、評価値0.01を下回っている。さらに、適応度計算回数が10,000になると、図3.21からどの個体も1点に収束した状態になる。

図3.18–図3.21から適応度計算回数を10,000回しなくても、3,000回ほどの計算により、おおよそ設定したパラメータに近い値を得ることが出来ると考えられる。

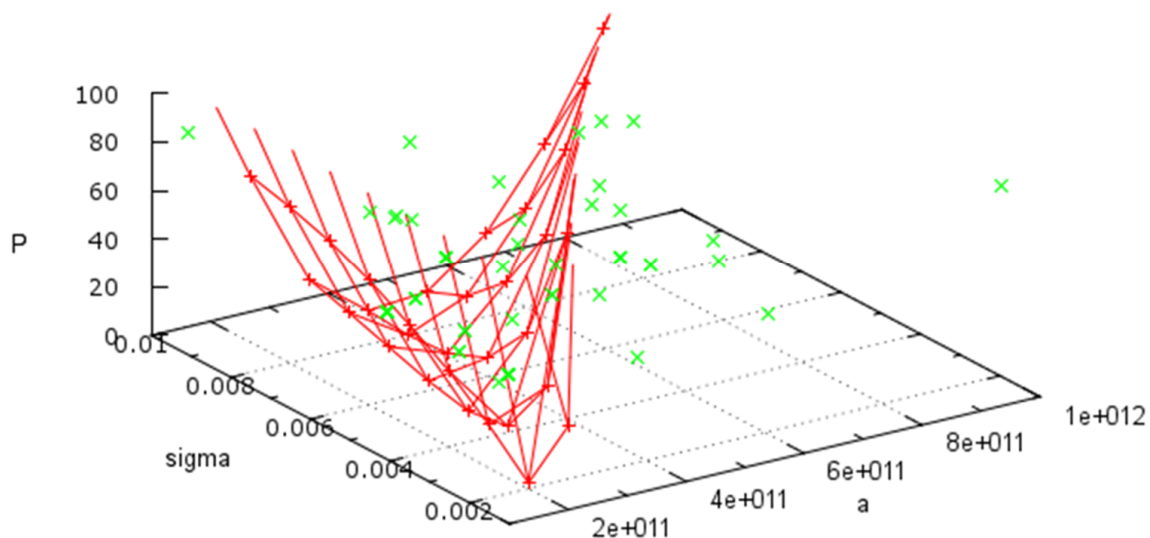


図 3.19: 適応度計算回数が200の時のMGGモデル評価値の推移。緑点が各個体を示し、赤線が a と σ に対する評価値を示す。

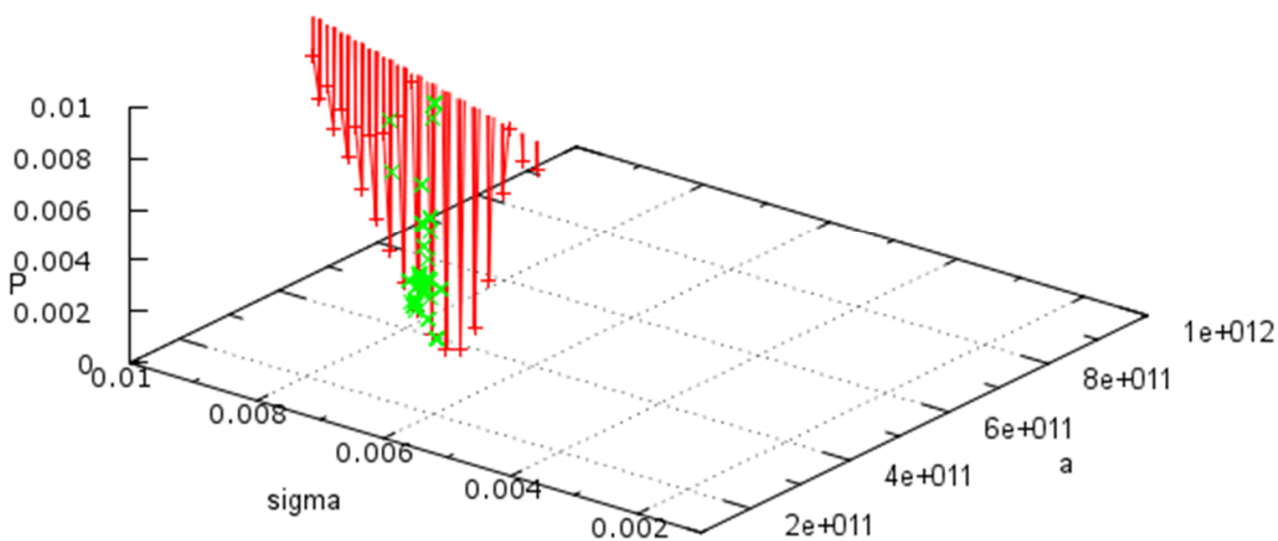


図 3.20: 適応度計算回数が 1,300 の時の MGG モデル評価値の推移。緑点が各個体を示し、赤線が a と σ に対する評価値を示す。

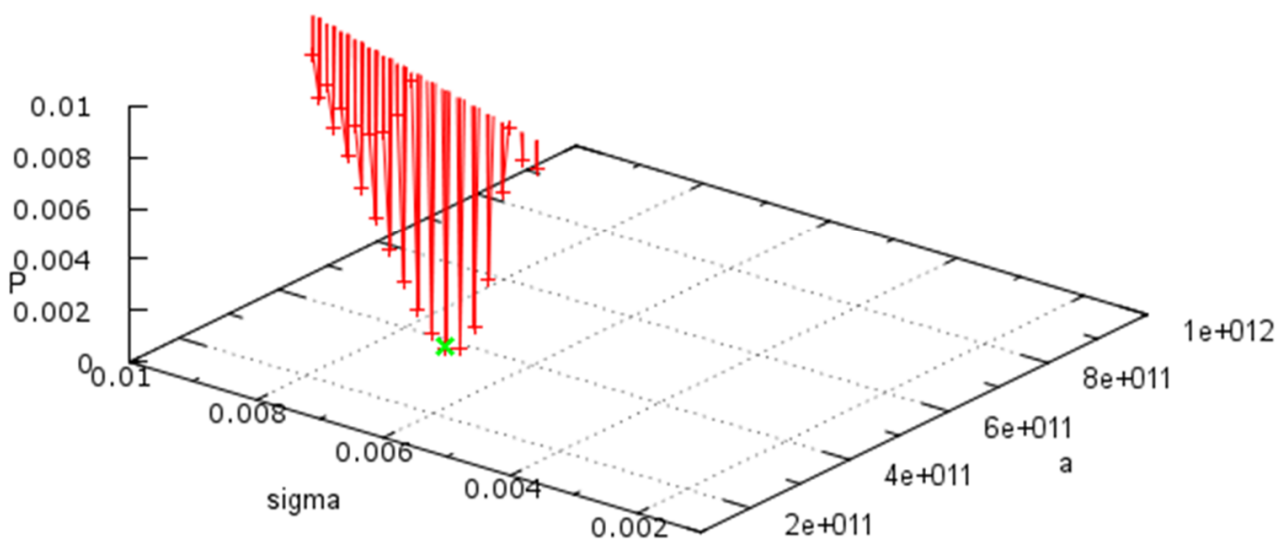


図 3.21: 適応度計算回数 10,000 の時の MGG モデル評価値の推移。緑点が各個体を示し、赤線が a と σ に対する評価値を示す。

3.3.1 実験データを用いた計算

ここでは、実際にこのプログラムを使用する状況を踏まえて、SQUIDによる実験データを用いた計算を行う。実際に使用する状況を考え、プログラムを10回計算する。その結果から、実験データとの適合具合や、手計算によるデータとの比較を行った。実験データは、YGdBCOコート線材にBZOナノ粒子を導入した試料をSQUID(Superconducting QUantum Interference Device：超伝導量子干渉計)で E - J 特性を評価したものをを用いた。結果は図3.23に示す。また、手計算によるパラメータの結果とGAプログラムによる計算でのパラメータの結果を表3.1に示す。さらに、それぞれの結果に対する評価値も表3.1に示す。

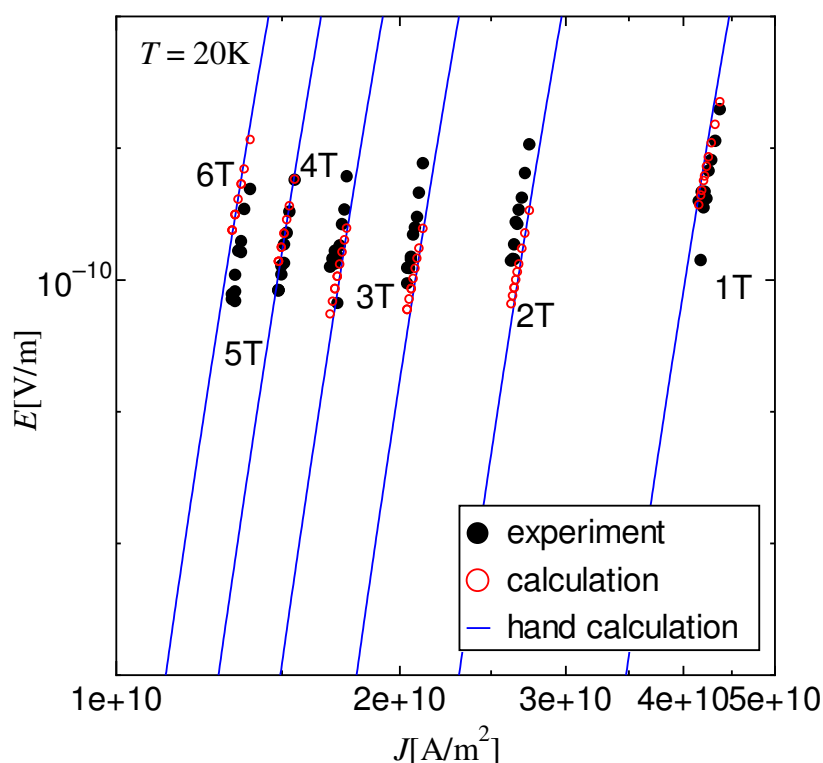


図 3.22: 実験データに対して手計算による結果と GA プログラムによる計算による結果を付加したもの。20 K の場合と 30 K の場合の 2 つを用いたが、これは 20 K のデータを示す。黒丸が実験データ、赤丸が GA プログラムによる計算結果、青線が手計算による結果を示す。

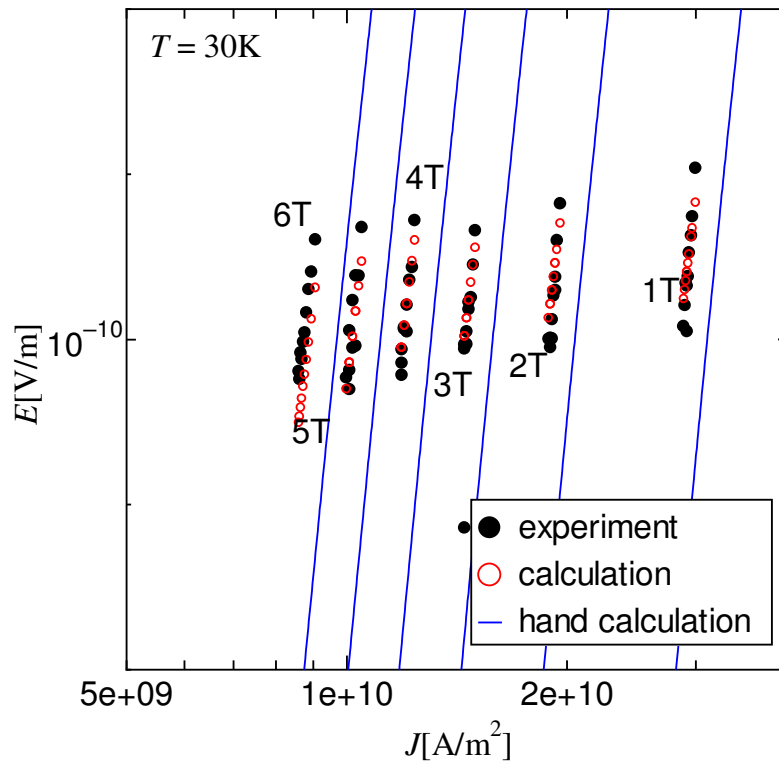


図 3.23: 実験データに対して手計算による結果と GA プログラムによる計算による結果を付加したもの。20 K の場合と 30 K の場合の 2 つを用いたが、これは 30 K のデータを示す。黒丸が実験データ、赤丸が GA プログラムによる計算結果、青線が手計算による結果を示す。

表 3.1: それぞれの計算によるパラメータの結果

	手計算による結果	GA プログラムによる結果
A_m	1.80×10^{11}	2.59×10^{11}
σ^2	4.7×10^{-3}	7.08×10^{-3}
γ	0.47	0.47
m	1.5	2.00
g^2	1.0	1.0
評価値	8.53×10^{-1}	7.86×10^{-2}

図3.23、表3.1より、GAプログラムで計算したもののほうが、評価値が良いことがわかる。また、GAプログラムは、Core2DuoT7500を積んだCPUで1計算で約10分の速度で処理をした。今回は10回計算を行ったので、計100分くらいの計算時間だった。以上のことから、約100分で手計算で行うよりも評価値の良いデータが得られるということはわかる。手計算では、熟練した人が行っても1日ほどかかってしまうことも多い。故に、約100分で評価値の良い結果が得られるこのGAのプログラムは非常に有効だと考えられる。

第4章 結論

今回の遺伝的アルゴリズムでは、MGGという世代交代モデルから精度の改善を行うことが出来た。今までは図3.4や図3.5のように解析結果が設定したパラメータに収束したとは言えず、 σ に至っては、幅広い範囲で結果が分布してしまい、まだまだ精度が甘かった。しかし、今回のモデルを用いることによって、図3.8のように設定したパラメータに近い解析結果を多く得ることが出来た。これにより、実際に使用するにあたって、不明なピンニングパラメータを実験データを用いて自動解析を行うということが出来るようになるのではないかと考える。図3.18より、今回適応度計算回数は10,000と設定したが、適応度計算回数を減らすことで1回の処理時間の短縮も見込むことが出来る。さらなる精度の向上に向けて、今後は遺伝的操作であるシンプレックス交叉での生成される子個体を調整するということを考える。これにより、今回のように50回解析を行って設定したパラメータを推定するのではなく、より少ない解析回数で設定したパラメータを解析できるのではないかと考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、様々な面から多大な御指導及び御助言を賜りました小田部荘司教授、GAプログラムについて多くの御指導及び御助言を承りました大西圭准教授、GAプログラム以外の面からも御助言を承りました木内勝准教授、に深く感謝を致します。さらに、様々な支援を頂いた小田部研究室、木内研究室の皆様には感謝の意を表します。そして、ここまで体調や生活面などを支えてくださった家族に多くの感謝を致します。皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Matsushita T. Flux Pinning in Superconductors. Springer, Berlin 2006; p. 333.
- [2] Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press 1975.
- [3] 喜多 一、「遺伝的アルゴリズムによる最適化の現状」、若手研究者・学生向けに最新技術をわかりやすく紹介する講演会「確率的アルゴリズムによる情報処理」、2003年
- [4] 電気学会 GA 等組合せ最適化手法応用調査専門委員会、「遺伝アルゴリズムとニューラルネット：スケジューリングと組合せ最適化」、コロナ社、1998年
- [5] 枝本 剛典、「遺伝的アルゴリズムを用いた磁束クリーブ・フローモデルのパラメータ解析」、2009年度九州工業大学情報工学部電子情報工学科卒業論文、2009年
- [6] 佐藤 浩、小野 功、小林 重信、「遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価」社団法人人工知能学会、1997年
- [7] 瓜生 幸太郎、「遺伝的アルゴリズムを用いた磁束クリーブ・フローモデルのパラメータ解析における評価方法の検討」、2010年度九州工業大学情報工学部電子情報工学科卒業論文、2009年