辺有限要素解析におけるマルチグリッド法のロバスト性について

正員 渡辺 浩太* 正員 五十嵐 一*

正員 本間 利久*

On Robustness of Multigrid Method for Edge-Based Finite Element Analysis

Kota Watanabe*, Member, Hajime Igarashi*, Member, Toshihisa Honma*, Member

The dependence of the multigrid-finite element method solving three dimensional magnetostatic fields on the quality of the finite element mesh is reported. It is shown that the convergence of the multigrid method is strongly influenced by the mesh quality. Moreover, the multigrid method with ICCG-smoother is shown to be more robust against mesh distortion than that with Gauss-Seidel and SOR smoothers.

キーワード: マルチグリッド法, 辺要素, 有限要素法, ICCG

Keywords: multigrid method, edge elements, finite element method, ICCG

1. まえがき

数値解析手法の代表的手法である有限要素法では、係数行列が大規模疎行列である連立方程式を解く必要があり、解析時間の大部分はこの計算に費やされる。従来、この連立方程式の解法に前処理付き共役勾配法の一つである ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method) 法が広く使われてきた。これは、ICCG 法が他の反復法に比べて収束性がよくかつ種々のパラメータ変動に対してロバストであることによる。近年、この連立方程式の解法としてマルチグリッド法が注目されている⁽¹⁾。マルチグリッド法は、連立方程式の未知数 n に対して $o(n)$ で計算できることが知られており、将来の大規模解析において非常に有力な解法となる可能性がある。その計算方法の概略を説明すると以下ようになる。まず、粗密の異なる複数のメッシュを用意する。そして、一番細かいメッシュに対する連立方程式をガウスザイデル法等の反復解法を用いて解を求める。その際、解が収束するまで反復を行うのではなく、数回～数十回程度反復計算したところで計算を打ち切り近似解を得る。ガウスザイデル法には、誤差の空間的高周波成分が反復の初期段階で速やかに収束する一方、低周波成分の収束は非常に遅い性質がある。従って、この近似解に含まれる誤差は低周波成分のみが残っている。このことからこの反復計算を数回行う操作を Smoothing と呼んでおり、

Smoothing に用いられるガウスザイデル法等の反復解法を Smoother と呼んでいる。

つぎに Smoothing で得られた近似解に対する残差を粗いメッシュに投影する。細かいメッシュから見ると低周波に見える誤差も粗いメッシュから見ると高周波に見える。従って、粗いメッシュ上に対して同様に Smoothing を行えば、残った誤差を速やかに取り除くことができる。以上がマルチグリッド法の基本的なアイデアである。この説明からもわかるようにマルチグリッド法には Smoother に用いる反復解法やその反復回数等により、様々なバリエーションを考えることができる。しかしながら、メッシュの中に歪んだ形状の要素や扁平な要素があるとマルチグリッドの収束が悪くなることが指摘されている⁽²⁾⁽³⁾。そこで本報告では、辺要素有限要素を用いた 3 次元静磁場解析にマルチグリッド法を適用し、要素形状が収束性に与える影響を、種々の Smoother において比較検討を行ったので報告する。

2. 定式化

〈2・1〉有限要素法の定式化 本報告では、マルチグリッド法の適用例として電気学会 3 次元静磁場検証モデル⁽³⁾の有限要素法解析にマルチグリッド法を適用した。解析領域を図 1 に示す。中心に比透磁率 1000 の磁性体がありその周りに 2000 AT の電流が流れるコイルがある。磁性体とコイルの周りは空気領域であり、解析では対称性を考慮して 1/8 モデルを考え、中心から 200 mm までを解析領域としている。

支配方程式は以下のとおりである。

* 北海道大学工学研究科

〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

Division of Systems and Information Engineering Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Kita 13, Nishi 8, Kita-ku Sapporo 060-8628

図1 解析領域
Fig. 1. Analytic region.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots\dots\dots (3)$$

ここで μ は透磁率である。まず (2) 式を満足させるために磁束密度 $\vec{B}$ を磁気ベクトルポテンシャルで表す。

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \dots\dots\dots (4)$$

(3), (4) 式を (1) 式に代入することで次式を得る。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J} \dots\dots\dots (5)$$

ここで方程式の両立性から (5) 式の右辺は次式を満たさなければならない。

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

そこで電流ベクトルポテンシャル $\vec{T}$ を用いて (5) 式の右辺に代入する。

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{J} \dots\dots\dots (7)$$

さらに (5) 式の弱形式を考え、辺有限要素法で離散化することで連立方程式

$$[K]\{a\} = \{b\} \dots\dots\dots (8)$$

を得る。ここで係数行列 $[K]$ は微分演算子 $\text{rot}(1/\mu) \text{rot}$ を離散化したものに相当し、メッシュ形状と透磁率に依存している。未知数である磁気ベクトルポテンシャルはよく知られているように任意のスカラー関数の勾配だけの任意性があり、それを反映して係数行列 $[K]$ は特異行列である。境界条件としては、 $x = 0$ および $y = 0$ 平面では磁場と面が平行であるから $\vec{A} \times \vec{n} = 0$ を課した。また、 $x = 0.2, y = 0.2, z = 0.2$ [m] 平面にも同様に $\vec{A} \times \vec{n} = 0$ を課した。さらに $z = 0$ の面では磁場が面と垂直であるから $(\nabla \times \vec{A}) \times \vec{n} = 0$ を課した。要素には 4 面体 1 次辺要素を用いた。

図2 マルチグリッド V サイクル
Fig. 2. Multigrid V-cycle.

(2・2) マルチグリッドの定式化 マルチグリッド法は、解析を行う対象領域をメッシュ分割する際に、細かさの異なるいくつかのメッシュを用意する。この方法は特に幾何マルチグリッド法と呼ばれている。それに対して、細かいメッシュのみを用意して、粗いメッシュに対応する係数行列を代数的に求める方法があり、これは代数マルチグリッド法と呼ばれる。代数マルチグリッド法は複数のメッシュを用意する必要がある反面、粗いメッシュに対応する係数行列を生成する計算が必要なために計算量が増える欠点がある。本報告では幾何マルチグリッド法により解析を行った。

幾何マルチグリッド法にもいくつかのバリエーションがあるが、最初に最も基本的な 2 段階 V サイクルマルチグリッド法について説明する⁽⁵⁾。この方法による計算の流れを図 2 に示す。2 段階 V サイクルマルチグリッド法では粗密の異なる 2 種類のメッシュを用意する。解くべき連立方程式は細かいメッシュに対するものであり、(8) 式をつぎのように書き直す。

$$[K_f]\{x_f\} = \{b_f\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、添え字の f は細かいメッシュから生成されたことを示す。以下、図 2 に従ってマルチグリッドの各計算過程を説明する。

Step 1 (Pre-smoothing)

(9) 式に対し前章で説明した Smoothing 操作を行い、近似解 $\{x_f\}$ を得る。この操作により近似解に含まれる誤差の高周波成分が消え、低周波成分のみが残っている。

Step 2 (残差の計算)

Step 1 で得られた近似解に対する残差 $\{r_f\}$ を次式に基づいて計算する。

$$\{r_f\} = \{b_f\} - [K_f]\{x_f\} \dots\dots\dots (10)$$

Step 3 (Restriction)

Step 2 で得られた残差を粗いメッシュに射影して、粗いメッシュでの残差 $\{r_c\}$ を生成する。この操作で用いるのが Restriction 行列 $[R]$ であり、細かいメッシュでの未知

数を n_f , 粗いメッシュでの未知数を n_c とすると, $[R]$ は $n_c \times n_f$ の行列である。

$$\{r_c\} = [R]\{r_f\} \dots\dots\dots (11)$$

節点要素において, $[R]$ 行列は細かいメッシュでのそれぞれの節点に対して, その節点を含む粗いメッシュの要素の内挿関数で補間することで算出される。しかし辺要素の場合, 辺に与えられる未知変数が内挿したいベクトル場の辺上での線積分に相当することから, $[R]$ 行列の i 行 j 列成分 R_{ij} は次式の線積分によって求められる。

$$R_{ij} = \int_{E_j^f} \vec{w}_i^c \cdot d\vec{l} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, E_j^f は細かいメッシュにおける j 番目の辺を表し, $\vec{w}_i^c$ は粗いメッシュの i 番目の辺に関する辺要素内挿関数である。

Step 4 誤差の算出

粗いメッシュにおける残差方程式

$$[K_c]\{e_c\} = \{r_c\} \dots\dots\dots (13)$$

を解き, Step 3 で得られた残差 $\{r_c\}$ に対応する誤差 $\{e_c\}$ を計算する。この (13) 式は粗いメッシュに対する方程式であり, 未知数の数が少ないので計算時間は少なくて済む。また係数行列 $[K_c]$ は細かいメッシュの係数行列 $[K_f]$ と Restriction 行列 $[R]$ と後述の Prolongation 行列 $[P]$ から

$$[K_c] = [R][K_f][P] \dots\dots\dots (14)$$

により生成することができる。本研究では粗いメッシュに対して (5) 式に基づく有限要素法の計算により $[K_c]$ を求めた。このことからわかるように $[K_c]$ も特異行列であり, 直接法では (13) 式を解くことができない。そこで, 本研究では ICCG 法を用いた。

Step 5 (Prolongation)

ここでは Step 4 で得られた粗いメッシュ上での誤差 $\{e_c\}$ を細かいメッシュに補間して, 細かいメッシュ上での誤差 $\{e_f\}$ を算出する。

$$\{e_f\} = [P]\{e_c\} \dots\dots\dots (15)$$

ここで用いる Prolongation 行列 $[P]$ は Restriction 行列 $[R]$ の転置行列とするのが一般的である。

Step 6 解の補正

Step 5 で得られた誤差 $\{e_f\}$ を用いて Step 1 で得られた近似解 $\{\bar{x}_f\}$ の補正を行う。

$$\{x_f\} = \{\bar{x}_f\} + \{e_f\} \dots\dots\dots (16)$$

Step 7 (Post-smoothing)

(16) 式で得られた補正解に対して Step 1 と同様に Smoothing 操作を行う。その後収束判定を行い, 解が収束していれば計算を終了し, 収束条件に達していなければ, Step 2 に戻って計算を行う。

図3 ネステッドメッシュ

Fig. 3. Nested mesh.

図4 R_{ij} の生成例

Fig. 4. Example of constructed R_{ij} .

以上が2段階 V サイクルマルチグリッドの計算手順である。3 段階以上の V サイクルは, Step 5 の残差方程式を解くときに上記 V サイクルを再帰的に呼び出すことにより計算される。

〈2・3〉 Restriction 行列の算出 一般にマルチグリッド法には, 粗いメッシュの各要素を特定の規則により分割することで細かいメッシュを生成するネステッドメッシュ (図 3 参照) と, 両者のメッシュに相関を持たせないノンネステッドメッシュがある⁽⁵⁾。前者のネステッドメッシュでは, 粗いメッシュの形状が細かいメッシュに影響を与えてしまう問題があるが, (12) 式による Restriction 行列の生成が容易であるという利点がある。一方, 後者のノンネステッドメッシュでは, メッシュ間で相関を持たせる必要がないために, 自由な分割数でメッシュ生成が可能である反面, (12) 式の積分区間が複数の要素にまたがってしまうために (12) 式の計算が困難になる。そこで本研究では, ネステッドマルチグリッド法を採用し, 図 3 に示すように粗いメッシュのそれぞれの 4 面体要素に対して, 辺の中点を用いて 8 分割し細かいメッシュを生成した⁽⁶⁾。このとき Restriction 行列の成分 R_{ij} は $\pm 0.5, \pm 0.25, 0$ のいずれかの値となり, 粗いメッシュの i 番目の辺 E_i^c と細かいメッシュの j 番目の辺 E_j^f との位置関係から決定できる。図 4 にその一例を示す。今, 1 つの粗い要素とそれを分割して生成した 8 個の細かい要素を考える。辺 E_i^c が図 4(a) に示した位置にあり, 細かい要素の辺の番号と向きが図 4(b) のように与えられているとする ($R_{ij} = 0$ となる辺は省略した)。このとき, Restriction 行列の成分 R_{ij} の図 4 に示し

た辺に関する成分は、

$$R_{ij} = \begin{cases} 0.5 : j = 1, 2 \\ 0.25 : j = 4, 6 \\ -0.25 : j = 3, 5, 7, 8, 9 \\ 0 : \text{上記以外の辺} \end{cases} \quad (17)$$

となる。上記操作を粗いメッシュの全ての要素に対して行うことにより Restriction 行列 [R] を生成できる。

このように図 3 の示すネステッドメッシュを採用することで (12) 式の積分を行う必要がなくなり、高速に Restriction 行列を生成することができる。

3. 解析例

(3・1) メッシュと扁平率の定義 前節までの定式化に基づき図 1 のモデルの有限要素解析で得られた連立方程式に対してマルチグリッド法を適用した。メッシュは粗いメッシュから図 3 に示したネステッドメッシュ分割を 2 回繰り返すことで計 3 段のメッシュを作成した。マルチグリッド法ではメッシュの中に扁平な要素があると収束が遅くなることが報告されている。そこで、要素の扁平率が異なる 3 種類のメッシュを用意した。ここで扁平率を表すために異なる 2 つの指標を使った。1 つは要素の最長辺 $l_{\max}$ と最短辺 $l_{\min}$ の比 $l_{\max}/l_{\min}$ であり (指標 1)、もう 1 つは最長辺 $l_{\max}$ と、頂点から対向する面におろした垂線の長さの最小値 $d_{\min}$ との比 $l_{\max}/d_{\min}$ である (指標 2)。前者では細長い要素、後者では扁平な要素を特徴づけられる。これらの指標を用いて各メッシュの全ての要素に対して扁平率を計算し、その最大値および平均値を取ったものを表 1 に示す。

メッシュ A は 3 種類のメッシュの中で最も扁平率が小さく、メッシュ B はメッシュ A の節点を移動させることで扁平率の平均値をほとんど変えずに最大値を大きくしたものである。メッシュ C はメッシュ B と比較して指標 2 で表される扁平率が小さく、指標 1 で表される扁平率を大きくしたものである。ただし、メッシュ C はメッシュ生成ソフトの都合により、他の 2 つのメッシュと比較して未知数の数が約半分である。

(3・2) ICCG 法による解析結果 マルチグリッド法

表 1 有限要素の扁平率

Table 1. Flatness of finite element.

メッシュ	未知数	扁平率 (最大値/平均値)	
		指標 1	指標 2
A	粗	7768	1.63/1.63
	中	59696	1.91/1.71
	密	468064	2.58/1.79
B	粗	7768	2.50/1.61
	中	59696	3.55/1.73
	密	468064	4.01/1.83
C	粗	4227	3.45/1.89
	中	29934	4.91/1.97
	密	224580	5.72/2.05

と比較するために、現在、有限要素解析で主流となっている ICCG 法を用いて、前節で説明した 3 種類のメッシュに対する連立方程式を計算した。その結果を表 2 に示す。収束判定には残差ノルムと右辺ベクトルのノルムの比を用い、それが 10^{-6} 以下となったときに収束したと判断した。また、係数行列を不完全コレスキー分解する際に対角項に乗じる加速係数は 1.05 とした。なお、表 2 の計算時間には不完全コレスキー分解に要した時間を含んでいる。

結果を比較すると、メッシュ A と B はほとんど反復回数が変わらなかったが、メッシュ C は未知数が A と B の半分にもかかわらず約 1.5 倍の反復回数を要した。

ICCG 法において、収束に必要な反復回数は係数行列の最小固有値と最大固有値の比で与えられる条件数の増加に伴って増えることが知られている⁽⁷⁾。このことからメッシュ A と B の条件数はほぼ同じであると考えられるが、メッシュ C は条件数が大きくなっていると考えられる。扁平率と収束性との関係を見てみると、指標 2 で定義した扁平率の最大値がメッシュ A と B では約 3 倍と大きく異なっているにもかかわらず反復回数がほぼ同じであった。このことから指標 2 による扁平率の最大値と ICCG 法の収束性には相関が無いと考えられる。つぎにメッシュ B と C を比較すると、指標 2 による扁平率は平均値、最大値ともにメッシュ C の方が小さいが、指標 1 による扁平率は逆にメッシュ C の方が大きい。メッシュ C の方が要した反復回数が多いことを考え合わせると、やはり指標 2 と ICCG 法の収束性には相関が無く、指標 1 と収束性には正の相関が認められる。以上のことから、ICCG 法の収束性の指標には指標 1 を用いるのが妥当だと思われる。

(3・3) マルチグリッド法による解析結果 マルチグリッド法

マルチグリッド法における、Smoothing の反復回数と計算時間との相関を図 5 に示す。図中の点線は通常の ICCG 法による計算時間を示す。Smoother としてガウスザイデル法 (GS-smoother)、SOR 法 (SOR-smoother)、ICCG 法 (ICCG-smoother) の 3 種類を試した。SOR-smoother の加速係数は 1.5 とした。一般に、マルチグリッド法では Smoothing の反復回数を減らすと V サイクルの反復回数が増加し、また Smoothing の反復回数を増やすと V サイクルの反復回数が減少するが、各 V サイクルの計算時間が増加するので、総計の計算時間は増加する。よって Smoothing の反復回数には最適値が存在する。図 5 はそのことを明確に表している。表 3 に最適な Smoothing 回数における V サイクルの回数および計算時間を掲げた。Smoothing 回数は数回程度

表 2 ICCG 法による計算時間

Table 2. Calculation time of ICCG method.

Mesh	Number of unknowns	Number of iterations	CPU time [s]
A	468064	209	129.3
B	468064	198	123.8
C	224580	319	97.6

CPU: PentiumIII-S 1.26GHz
Memory: 1.5GB

(a) Mesh A

(b) Mesh B

(c) Mesh C

図5 マルチグリッド法の計算時間

Fig.5. Calculation time in multigrid method

で十分であるとの報告が多いが、本報告ではどのメッシュにおいても、10回以下のSmoothing回数では収束性が悪かった。これは扁平率の高い要素がどのメッシュにも含まれているのが原因であると考えられ、扁平な要素を含まないメッシュでは数回のSmoothing回数で良好な収束性を示すことを確認している。以下、各メッシュに対する結果を詳細に述べる。

メッシュAでは、最適なSmoothing回数において、どのSmootherを用いてもICCG法よりも高速に計算ができていた。しかしながら、最適なSmoothing回数よりもSmoothing回数を減らすと急激に計算時間が増加する。逆に最適なSmoothing回数よりも回数を増やした場合の計算時間の増加は緩やかである。

表3 最適Smoothing回数での計算時間

Table 3. Shortest calculation time of smoothing.

Mesh	Smoother	Iteration of smoothing	Number of V-cycles	CPU time[s]
A	GS	26	6	49.2
	SOR	19	6	38.3f
	ICCG	10	5	52.5
B	GS	42	7	92.3
	SOR	37	6	71.4
	ICCG	17	4	69.6
C	GS	30	642	2917
	SOR	80	240	2794
	ICCG	90	4	163.1

メッシュBでは、メッシュAと比較して最適なSmoothing回数がどのSmootherでも増えており、計算時間も長くなっている。しかしICCG法よりも高速に計算できている。

メッシュCでは、GS-smoother、SOR-smootherとも非常に収束が遅く、最適なSmoothing回数でさえも計算時間がICCG法の10倍以上となった。そのため、図5(c)にはICCG-smootherの結果のみを掲載した。そのICCG-smootherによるマルチグリッド法でも、ICCG法よりも計算時間が長く、最短の場合でICCG法の1.6倍程度である。

各メッシュにおける計算時間と要素の扁平率の相関を見ると、マルチグリッド法においてもICCG法と同様、指標1で定義した扁平率と計算時間には正の相関があることがわかる。従って、指標1はマルチグリッド法の収束性の指標としても使えることがわかる。

本報告のような辺要素有限要素法に対するマルチグリッド法ではブロックガウスザイデル法をSmootherに用いると良好な収束性を示すとの報告⁽⁶⁾があるが、我々が試した限りでは効果を認められなかった。またブロックガウスザイデル法では係数行列をブロック小行列に分解するための処理に計算機資源を消費するため、大規模問題には適さないと考えられる。

4. むすび

本報告では、大規模数値解析における連立方程式の有力な解法と期待されるマルチグリッド法を取り上げ、特に要素形状が収束性に与える影響を調べた。その結果、マルチグリッド法で一般に用いられるガウスザイデルSmootherやSOR-smootherではメッシュの中に扁平な要素を含まない場合にはICCG法と比較して数倍程度高速に計算できる。しかし、メッシュの中に扁平な要素が含まれていた場合に急激に収束性が悪くなり、実用に耐えられないことがわかった。このようにこれらのSmootherを用いたマルチグリッド法にはロバスト性に難点がある。一方、ICCG-smootherを用いた場合は要素が扁平な場合に収束性が悪くなったが、ガウスザイデルSmootherやSOR-smootherほどの急激な収束性の悪化は見られない。

どのSmootherを用いた場合でも、Smoothing回数には

最適値が存在し、その最適値よりも少ない Smoothing 回数では急激に収束が遅くなることがわかった。またその最適な Smoothing 回数にも要素の扁平率と相関があることがわかった。

扁平率の指標には要素の最大辺と最小辺の比を用いるのが妥当であることもわかった。この扁平率は容易に算出できるため、マルチグリッド法で解く際に、Smoother の選択や Smoothing 回数を決定する際の指標として使うことができる。

今後、ロバスト性の向上のために新しい Smoother の開発、最適な Smoothing 回数を事前に決定する方法の確立などが必要である。

最後に、本研究の全般に渡って様々な助言を頂いたサイエンスソリューションズ (株) の亀有昭久氏に感謝の意を表わします。

(平成 14 年 5 月 7 日受付, 平成 14 年 7 月 1 日再受付)

文 献

- (1) W.L. Briggs: "Multi-Grid Methods and Applications", Springer-Verlag, Berlin (1985)
- (2) K. Watanabe, H. Igarashi, and T. Honma: "Convergence of Multigrid Method in Finite Element Method", *Tech. Report of IEE Japan*, SA-01-9, RM-01-77, pp.49-53 (2001) (in Japanese)
渡辺浩太・五十嵐一・本間利久:「有限要素法におけるマルチグリッド法の収束性について」, 電気学会静止器回転機合同研資 SA-01-9 RM-01-77, pp.49-53 (2001)
- (3) A. Kameari: "Application of Geometrical Multigrid Method to Electromagnetic Computation by Finite Element Method", *Tech. Report of IEE Japan*, SA-01-11, RM-01-79, pp.61-66 (2001) (in Japanese)
亀有昭久:「幾何マルチグリッド法の電磁場数値解析への適用」, 電気学会静止器回転機合同研資 SA-01-11 RM-01-79, pp.61-66 (2001)
- (4) 電気学会三次元電磁界計算技術調査専門委員会「三次元静電界数値計算技術」, 電気学会技術報告 II, No.286 (1988)
- (5) K. Tsubota, S. Noguchi, and H. Yamashita: "The speed-up of Finite Element Analysis Using Non-nested Multigrid Method", *Tech. Report of IEE Japan*, SA-99-4, RM-99-58, pp.19-24 (1999) (in Japanese)
坪田克己・野口 聡・山下英生:「ノンネステッドマルチグリッド法を用いた有限要素解析の高速化」, 電気学会回転機静止器合同研資 SA-99-4 RM-99-58, pp.19-24 (1999)
- (6) M. Schinnerl, J. Schoberl, and M. Kaltenbacher: "Nested Multigrid Methods for the Fast Numerical Computation of

3D Magnetic Fields", *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 4, pp.1557-1560 (2000)

- (7) H. Igarashi: "On the property of Curl-Curl Matrix in Finite Element Analysis with Edge Elements", *IEEE Trans. Magn.*, **37**, pp.3129-3132 (2001)

渡 辺 浩 太 (正員) 1972 年 2 月 18 日生まれ。1997 年北海道大学工学研究科システム情報工学専攻修了。同年日立電線 (株) 入社。主としてネットワーク機器の研究開発に従事。1999 年北海道大学工学研究科助手。主に電磁界解析, Java 言語等のオブジェクト指向言語による数値解析に関する研究に従事。International COMPUMAG Society 会員。

五十嵐 一 (正員) 1959 年生まれ。1984 年 3 月北海道大学大学院工学研究科修了。1984 年キャノン (株) 入社。1989 年北海道大学工学部助手。1999 年香川大学工学部助教授, 2001 年北海道大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る。1995 年から 1997 年までベルリン工科大学フンボルト財団研究員。工学博士。主として電磁界解析, 逆問題に関する研究に従事。IEEE, International COMPUMAG Society, 電子情報通信学会, 日本シミュレーション学会, 日本計算数理学会, 日本 AEM 学会会員。

本 間 利 久 (正員) 1947 年生まれ。1976 年 9 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1975 年北海道大学工学部助手, 1979 年北海道大学工学部講師, 1980 年同工学部助教授, 1987 年同工学部教授, 1997 年同大学院工学研究科教授となり現在に至る。1994 年から 1995 年までマサチューセッツ工科大学 (MIT) 客員教授。工学博士。主としてプラズマ理工学, 宇宙輸送推進工学, 計算電磁気学に関する研究に従事。日本 AEM 学会 (理事), 日本物理学会, 日本原子力学会 (幹事), 境界要素法研究会 (運営委員), IEEE, International COMPUMAG Society (運営委員), 日本シミュレーション学会, 日本計算工学会会員。