

# 目次

<b>1</b>	<b>計算電磁気学入門</b>	<b>1</b>
1.1	有限要素法とは	1
1.1.1	補 間	1
1.1.2	重みつき残差法による離散化	4
1.1.3	全体行列をつくる	7
1.1.4	有限要素方程式を解く	12
1.1.5	ベクトル電磁場の解析	13
1.1.6	有限要素行列の性質	15
1.2	電磁場の双対メッシュによる表現	19
1.2.1	擬ベクトルと擬スカラー	19
1.2.2	双対メッシュ	24
1.2.3	有限要素方程式	27
	参考文献	28
<b>2</b>	<b>電磁場の辺有限要素解析</b>	<b>29</b>
2.1	場の有限要素表現	29
2.1.1	場について	29
2.1.2	ベクトル・テンソル代数と微分形式	30
2.1.3	場の関連 (勾配, 回転, 発散)	32
2.1.4	構成方程式	34
2.1.5	有限要素表現	35

2.2	電流場 (非発散場) の有限要素表現	36
2.2.1	2次元電流場の有限要素表現	36
2.2.2	3次元電流場の有限要素表現	40
2.2.3	電流ベクトルポテンシャルの不定性	46
2.2.4	木構造によるゲージ固定	48
2.2.5	発散ゲージによる固定	53
2.2.6	空洞や穴が開いている導体内の電流	54
2.2.7	直流電流場の解析	56
2.2.8	コイル電流の表現	61
2.3	辺要素形状関数	65
2.3.1	辺要素形状関数の性質	65
2.3.2	4面体要素	66
2.3.3	6面体要素	67
2.3.4	3角柱要素	68
2.4	渦電流を含む電磁場解析	69
2.4.1	解析体系	69
2.4.2	Maxwell 方程式と構成方程式	69
2.4.3	準静磁場方程式	70
2.4.4	$A-\Phi$ 法と $T-\Omega$ 法	72
2.4.5	ガラーキンの弱定式化	74
2.4.6	行列方程式	75
2.4.7	ICCG 法の収束	77
2.5	外部回路系との結合	79
2.5.1	コイル電流・電圧関係	79
2.5.2	バルク導体回路	81
2.5.3	2ポテンシャル法によるソース	82
2.5.4	有限要素と結合した一般的な電流・電圧関係	86
2.6	面要素	87
2.6.1	面要素形状関数	87
2.6.2	形状関数間の関係	88
2.6.3	離散系の構成方程式	90
	参考文献	91

<b>3</b>	<b>電磁場と等価回路</b>	<b>93</b>
3.1	はじめに	93
3.2	部分領域と接合	94
3.3	直交基底関数の採用	99
3.4	グリーン関数と固有関数展開	100
3.5	圧電振動	105
	参考文献	112
<b>4</b>	<b>電気-機械結合系</b>	<b>115</b>
4.1	電磁力と電磁応力テンソル	115
4.1.1	荷電粒子に作用するローレンツ力	115
4.1.2	物質に作用する電磁力	117
4.1.3	応力ベクトルと応力テンソル	118
4.1.4	釣合条件式	120
4.1.5	仮想仕事の原理	122
4.1.6	電磁応力	124
4.1.7	物体に作用する合力および合モーメント	125
4.2	有限要素法による電磁力およびモーメントの計算	129
4.2.1	局所力と合力	129
4.2.2	等価節点力	129
4.2.3	節点力法	131
4.2.4	節点力法による合モーメントの計算	132
4.2.5	数値解析例	135
4.2.6	節点力法以外の電磁力計算法	137
4.3	運動・変形する物体の電磁連成	138
4.3.1	電磁場と構造の運動および変形	138
4.3.2	物体の運動と変形の記述	139
4.3.3	物体の応力	142
4.3.4	変形する物体について成立する保存則	143
4.3.5	種々の時間変化率	145
4.3.6	基準形状に関するマクスウェル方程式	147
4.3.7	ポテンシャルの物質フレーム表示	150

4.3.8	釣合方程式の弱形式	151
4.3.9	マクスウェル方程式の弱形式 [30,31]	152
4.3.10	構成方程式	154
4.4	運動・変形する物体の電磁連成の数値解法	154
4.4.1	運動する物体の電磁場解析	154
4.4.2	物体の変形解析	156
4.4.3	変形に依存する荷重の取り扱い	161
4.4.4	電磁構造連成問題の数値解法	163
4.4.5	静磁場問題への適用	164
4.5	微分形式による表現	166
4.5.1	微分形式の基本事項	167
4.5.2	押し出し (push-forward) と引き戻し (pull-back)	169
4.5.3	微分形式の幾何学的意味	172
4.5.4	微分形式によるマクスウェル方程式の表現	174
4.5.5	基準形状におけるマクスウェル方程式の表現	175
4.5.6	微分形式による釣合方程式の表現	177
	参考文献	178
<b>5</b>	<b>一般化された差分法 - 電磁場問題の離散化</b>	<b>183</b>
5.1	準備 - ユークリッド空間	183
5.1.1	アフィン空間	184
5.1.2	区分的になめらかな多様体	189
5.1.3	向き	191
5.1.4	チェイン, 境界作用素	199
5.1.5	計量概念	202
5.2	マクスウェル方程式の書き換え	206
5.2.1	積分: 循環, フラックス, 他	206
5.2.2	微分形式と関連する物理量	210
5.2.3	ストークスの定理	215
5.2.4	微分 2 次形式としての磁界	218
5.2.5	ファラデーとアンペール	220
5.2.6	ホッジ作用素	222

5.2.7	マクスウェル方程式: 議論	223
5.3	離散化	231
5.3.1	モデル問題	231
5.3.2	主メッシュ	233
5.3.3	双対メッシュ	237
5.3.4	離散キット	241
5.3.5	キットの利用 - 全マクスウェル	245
5.3.6	キットの利用: 静磁界の場合	248
5.3.7	キットの利用: その他	251
5.4	有限要素法	254
5.4.1	整合性	256
5.4.2	安定性	260
5.4.3	時間依存の場合	262
5.4.4	ホイットニー形式	263
5.4.5	より高次の形式	271
5.4.6	単体以外に対するホイットニー形式	275
	参考文献	283