様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：１３９０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2013～2014
課題番号：２５６３００３５

研究課題名（和文）電磁波エナジー・ハーベスティングのためのアンテナ形状トポロジー最適化法

研究課題名（英文）Topology optimization study of antenna shapes for electromagnetic energy harvesting

研究代表者
松本　敏郎（Matsumoto, Toshiro）

名古屋大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：１０２０９６４５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、アンテナなどの導体や誘電体等の散乱体の最適形状をコンピュータによる数値計算を駆使して求める方法論の基礎の確立を目的とし、次のような成果が得られた。(1)ブロックSS法に境界要素法を組み込み、高精度に固有振動数の計算ができることを示した。 (2)2次元の電磁波散乱問題のトポロジー導関数の導出と境界要素法の定式化を行い、観測点における磁場強度を最大にする散乱体のトポロジー最適化問題に適用した。(3) 3次元のマックスウェルの方程式に対して、境界要素法による電磁波動散乱問題の境界積分方程式の定式化を行い、真空中に無限小の誘電体が発生する際の目的関数のトポロジー導関数を導出した。

研究成果の概要（英文）：An effective numerical technique for calculating the eigen frequencies by means of the block SS method and the boundary element method (BEM). Next, for two-dimensional electromagnetic field, a BEM has been formulated. A typical objective functional has been defined and the rigorous mathematical expression of the topological derivative of the objective functional has been derived. It has been used for the topology optimization procedure based on the level set method. The effectiveness of the present approach has been demonstrated through numerical experiments. For a more general three-dimensional problems, a BEM for solving Maxwell’s equations has also been derived. For an objective functional appropriately defined, the topological derivative for emergence of an infinitesimal scatterer has been derived and applied to the topology optimization of calculating the optimum distribution of the scatterers.

研究分野：工学

キーワード：設計工学

１．研究開始当初の背景

(1) 我々の生活空間は、様々な機器から発せられる電磁波で満ちている。近年、このエネルギーを回収して、大規模地震発生等の天災時の最低限の通信手段確保のための充電手段として、電磁波エネルギーを高効率に回収する技術の開発が望まれている。それには高効率アンテナ技術、検波回路技術、電源回路構成技術の研究開発などが同時に必要となる。ところがそのアンテナの構造や配置に関しては、薄膜状の形状が試行錯誤で決定されており、必ずしも物理的に最適な形状が求められているわけではない。このような形状を効率的に見出すには、コンピュータによる数値シミュレーションが極めて有効である。電磁波に関する波動問題の解析手法は、FDTD 法や、有限要素法が用いられている場合が多い。一般に多くの電磁波解析は、無限空間に対して行う必要があり、アンテナ等の形状設計問題の解析手法としては、開領域を厳密に扱うことができる境界要素法が断然有利である。

(2) 数値解析手法として無限領域を厳密に取り扱うことが可能な境界要素法が最も適している。形状設計には誘電体や胴体の形状を変更しながら電磁場解析を多数回繰り返す必要があるが、境界要素法はその際の要素分割も容易である。また、境界要素法は大規模な解析のための高速解法の開発も容易であり、境界要素法の利点を生かした様々なトポロジー最適化問題への応用も進んでいる。しかしながら、電磁波問題のトポロジー最適化は、無限領域中の３次元空間内に置かれた形状の最適トポロジーを同定する問題であり、その解法の方法論はまだ確立されていない。

２．研究の目的

(1) 本研究では、アンテナ等の導体や誘電体の最適な形状を求めるための境界要素法による高速な電磁場解析法と、電磁場のトポロジー最適化のアルゴリズムの開発を短期的な目的とする。

(2) 電磁場解析の基礎として、まず境界要素法による固有振動数の解析法を確立する。境界要素法では、波数が基本解中に含まれているため、アンテナの共振周波数を境界要素法で計算するには、非線形の固有値問題を解く必要がある。本研究では、この問題の経路積分による非線形固有値解析法を、新しく開発する。さらに、基本的なヘルムホルツ方程式に基づく高速解法およびマックスウェル方程式に基づくトポロジー導関数の計算法の確立をめざす。次に，アンテナ形状設計のための基本アルゴリズムを確立するために，電場強度や磁場強度を最大化するトポロジー最適化を，レベルセット関数による形状表現と境界要素法を用いた方法により行う.

３．研究の方法

(1) 本研究は、計算機による大規模かつ多数回の計算を伴う方法の開発であり、研究方法の主たる部分は解析に必要な数学的理論の導出、計算アルゴリズムの開発、解析ソフトウェアの開発、数値実験による検証による。その過程で、高速で大容量の計算機を多用する方法で研究を行う。

(2) 境界要素法による固有振動数解析に対しては、経路積分を用いた方法を開発する。境界要素法では、波数が非線形の被積分関数に含まれているために、得られる固有値問題は非線形の固有値問題となってしまう。これに対して一般の非線形固有値問題を波数の複素平面における経路積分で計算する方法がいくつか提案されている。本研究では、境界要素法をこの方法で用いるための理論式の展開と数値実験による有効性の検証を行う。

(3) 電磁波動問題におけるトポロジー最適化問題の定式化と電磁場中に無限小の散乱体が発生したときの目的関数の変化率であるトポロジー導関数を数学的に導出する。さらに、その定式化に基づく境界要素法を用いた随伴問題とトポロジー導関数の計算アルゴリズム、およびレベルセット関数を用いた形状表現によるトポロジー最適化アルゴリズムとソフトウェア開発、数値実験による検証を行う。

４．研究成果

(1) 境界要素法による固有振動数解析法を確立するには、マックスウェルの方程式やヘルムホルツ方程式よりも、振動モードの確認が容易で精度上の要求が厳しい動弾性方程式に対して行った方がよいと考え、それに対するブロック SS 法の定式化と数値実験を行い，有効性を検証した。まず、境界要素法における固有値問題の係数行列を，次式のように波数を与えて積分した形の非線形の固有値問題に帰着させた。

$$\mathbf{A}(k)\mathbf{x} = \mathbf{0}$$

これにブロック SS 法を適用すると、この非線形固有値問題は次のようなハンケル行列の小規模な一般化固有値問題に帰着する。

$$\mathbf{H}^{<}_{Kl} - \lambda \mathbf{H}_{Kl} = \mathbf{0}$$

固有振動数の厳密解がわかっている図１のような矩形領域の固有振動数を本方法で求めた結果を表１に示す。

表 1 矩形領域に対して得られた固有振動数と誤差

固有振動数の番号	得られた固有振動数	誤差
1	65.1034	4.215×10^{-3}
2	70.0517	2.149×10^{-2}
3	71.3134	3.513×10^{-2}

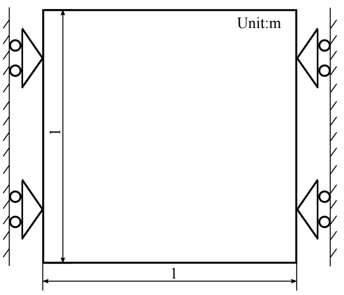

図１　矩形領域の例題

表 1 で示すように，本方法できわめて高精度に固有振動数の計算が可能となった。

(2) 2 次元電磁散乱問題の境界要素法の定式化とトポロジー導関数の導出、およびレベルセット法を用いたトポロジー最適化のアルゴリズムを開発した。図 2 に示すように無限領域 D^1 中に散乱体 D^2 があり、D^1 に入射波 u^{in} が入ってくる場合を考え、境界要素法を定式化した。この場合、未知関数は磁場の x^3 成分のみとなり、支配方程式はヘルムホルツ方程式となり、境界要素法で用いる境界積分方程式が次のように得られた。

$$\begin{pmatrix} u^{\mathrm{in}} \\ w^{\mathrm{in}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(D^1+D^2) & (\varepsilon_1 S^1+\varepsilon_2 S^2) \\ -\left(\dfrac{N^1}{\varepsilon_1}+\dfrac{N^2}{\varepsilon_2}\right) & (D^{1T}+D^{2T}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix}$$

ただし、w は u の外向き法線方向勾配、$D^1, D^2, S^1, S^2, N^1, N^2, D^{1\mathrm{T}}, D^{2\mathrm{T}}$ などは積分作用素である。

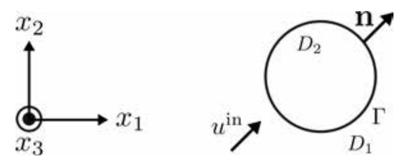

図２　２次元無限領域中の散乱体と座標系

この境界積分方程式を用いて最適化を行うために、最適化問題の設計領域と磁場の観測点を図 3 のように設定した。

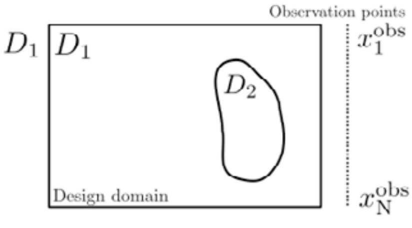

図３　設計領域と観測点

目的関数は次式のように定義した。

$$\max_{D_1,D_2} J = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{obj}}} \left| f(x_i^{\mathrm{obj}}) \right|^2$$

また、制約条件として次の弱形式を与えた。

$$W = \sum_{i=1}^{2} \int_{D_i} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \nabla\tilde{u}\cdot\nabla u + \omega^2 \tilde{u} u \right) d\Omega$$

このとき、D^1 中の点 x^0 に無限小散乱体が発生するときのトポロジー導関数として次式が得られた。

$$T(x^0) = \mathrm{Re}\left[\frac{2(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_1(\varepsilon_1+\varepsilon_2)} \nabla\tilde{u}(x^0)\cdot\nabla u(x^0) \right]$$

境界の形状は、次のレベルセット関数で制御するレベルセット法を用いた。

$$\begin{cases} 0 < \phi(x) \le 1 & x \in D_1 \\ \phi(x) = 0 & x \in \Gamma \\ -1 \le \phi(x) < 0 & x \in D_2 \end{cases}$$

このとき、固定設計領域および散乱体の初期位置とサイズを図 4 のように設定した。

図 5 には本研究で開発したトポロジー最適化法によって得られた散乱体の最適な分布を示す。また、図 6 にはこのときの固定設計領域内及びその外部の磁場強度分布を示す。本研究の方法により、散乱体の最適な分布を得ることが可能となった。

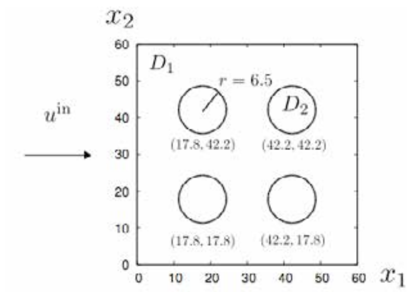

図 4 固定設計領域と散乱体の初期分布

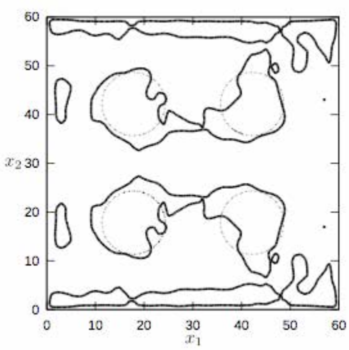

図 5 トポロジー最適化によって得られた散乱体の最適分布

(3) 3 次元の電磁波動問題に対して境界要素法を用いたトポロジー感度解析とレベルセット法に基づく構造最適化への応用を行った。ここでは、マックスウェルの方程式を直接扱う。すなわち、

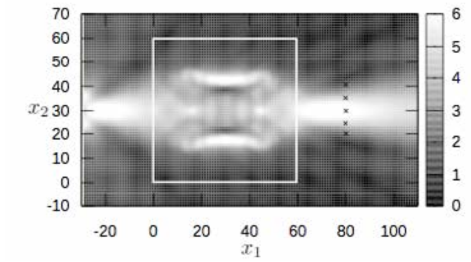

図 6　最適な散乱体の分布における磁場強度分布

$$\nabla\times\mathbf{E}(x)=j\omega\mu_i\mathbf{H}(x)$$
$$\nabla\times\mathbf{H}(x)=-j\omega\varepsilon_i\mathbf{E}(x)$$

このとき、境界要素法で用いる境界積分方程式は次のように得られる。

$$\mathbf{n}(x)\times\sum_{i=1}^{2}\left[(L_i\mathbf{J})(x)-(K_i\mathbf{M})(x)\right]=\mathbf{n}(x)\times\mathbf{E}^{inc}(x)$$
$$\mathbf{n}(x)\times\sum_{i=1}^{2}\left[(K_i\mathbf{J})(x)+\frac{\varepsilon_i}{\mu_i}(L_i\mathbf{M})(x)\right]=\mathbf{n}(x)\times\mathbf{H}^{inc}(x)$$

ただし、$\mathbf{E}^{\mathrm{inc}}$, $\mathbf{H}^{\mathrm{inc}}$ はそれぞれ入射電場と入射磁場である。また、$\mathbf{n}$ は法線ベクトル、$\mathbf{J}$, $\mathbf{M}$ はそれぞれ次のように定義される表面電流密度および表面磁流密度である。

$$\mathbf{J}=\mathbf{n}\times\mathbf{H},\qquad \mathbf{M}=\mathbf{E}\times\mathbf{n}$$

また、L_i, K_i は以下で定義される微積分作用素である。

$$(L_i\mathbf{X})(x)=\int_\Gamma\Big[-j\omega\mu_i\mathbf{X}(y)+\frac{1}{j\omega\varepsilon_i}\nabla_x\nabla_{S_y}\cdot\mathbf{X}(y)\Big]G_i(x-y)dS_y$$

v

ただし、$\mathbf{X}$ は $\mathbf{J}$ または $\mathbf{M}$ を表し $G_i(x-y)$ は次式のように定義される。

$$G_i(x-y)=\frac{\exp(jk_i|x-y|)}{4\pi|x-y|}$$

目的関数は、次のように定義する。

$$\max_{D_1,D_2} J=f+\mathrm{Re}\left[\sum_{i=1}^{2}\int\tilde{\mathbf{E}}\cdot(\nabla\times(\alpha_i\nabla\times\mathbf{E})-\beta_i\mathbf{E})d\Omega\right]$$

ただし、f は観測点の電場の強度 2 乗和であり、次のように定義される。

$$f=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{M}\left|\mathbf{E}(x_i^{\mathrm{obs}})\right|^2$$

また、$\alpha_i=\frac{1}{\mu_i}$、$\beta_i=\omega^2\varepsilon_i$ である。

本研究では、$\alpha_1=\alpha_2$ とし、真空領域 Ω_2 に微小な球状の誘電体領域 Ω_2 が出現したときのトポロジー導関数を求めると次式のようになる。

$$T=\frac{3\beta_2(\beta_1-\beta_2)}{\beta_1+2\beta_2}\tilde{\mathbf{E}}^0\cdot\mathbf{E}^0$$

ただし $\tilde{\mathbf{E}}^0$ は考えている点の随伴電場である。
　このトポロジー導関数を次元の電磁波動問題のトポロジー最適化で用いたトポロジー最適化のアルゴリズムに組み込んだ。解析例として、無限領域中に図 7 に示すような立方体形状の固定設計領域を考え、固定設計領域の下側から入射波が入射する場合を考える。

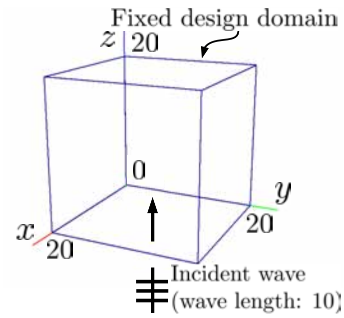

図 7　3 次元問題における固定設計領域

　このとき、固定設計領域の左右両側に観測点を複数置き、それらの点における電場強度を最大化する問題を解析した。得られた最適な散乱体の配置を図 8 に、固定設計料記の中心断面を含む面の電場強度分布を図 9 に示す。

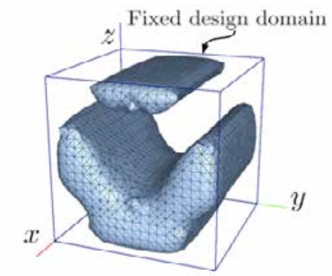

図 8　3 次元問題における固定設計領域

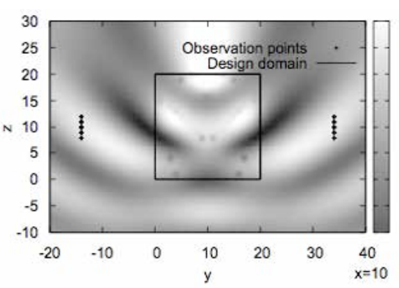

図 9　固定設計領域の右側に観測点を置いた場合の電場強度分布

以上のように、従来なされていなかった 2 次元および3次元の電磁場において境界要素法を用いて電場強度や磁場強度をコントロールする最適な散乱体の分布を計算することが可能となった。

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計４件）

① 興梠洋一、飯盛浩司、高橋徹、山田崇恭、松本敏郎、3 次元電磁波動問題における境界要素法を用いたトポロジー感度解析とそのレベルセット法に基づく構造最適化への応用について、計算数理工学論文集、査読有、Vol.13、2013 年, pp.55-60.

② 阿部史昌、飯盛浩司、高橋徹、松本敏郎、レベルセット法と境界要素法を用いた二次元電磁波動問題における トポロジー最適化について、計算数理工学論文集、Vol.13、2013、pp.37-42.

③ Isakari, H., Kuriyama, K., Hanada, T., Takahashi, T., Matsumoto, T., A topology optimisation for three-dimensional acoustics with the level set method and the fast multipole boundary element method, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.1, 2014, CM0039.

④ Haifeng Gao, Jiawei Xiang Changjun Zheng, Yongying Jiang, Toshiro Matsumoto, BEM-based analysis of elastic banded material by using a contour integral method, Engineering Analysis with Boundary Elements, 査読有, Vol.53, 2015, pp.56-64.

〔学会発表〕（計４件）

① 阿部史昌、飯盛浩司、高橋徹、松本敏郎、レベルセット法と境界要素法を用いた二次元領域における電磁デバイスのトポロジー最適設計、日本機械学会第 23 回設計工学・システム部門講演会、2013 年 10 月 23 日～2013 年 10 月 25 日、沖縄県中頭郡読谷村

② 興梠洋一、飯盛浩司、高橋徹、山田崇恭、松本敏郎、境界要素法を用いた 3 次元電磁場問題におけるトポロジー導関数に基づく構造最適化手法、日本機械学会第 26 回計算力学講演会、2013 年 11 月 2 日～2013 年 11 月 4 日、佐賀市

③ 飯盛浩司、高橋徹、松本敏郎、高速直接境界要素法を用いた 2 次元電磁波動問題のトポロジー感度解析について、日本機械学会第 27 回計算力学講演会、2014 年 11 月 22 日～2014 年 11 月 24 日、岩手大学

④ 北林達也、飯盛浩司、高橋徹、松本敏郎、境界要素法とレベルセット法を用いた 2 次元電磁波動問題における多目的トポロジー最適化、日本機械学会第 27 回計算力学講演会、2014 年 11 月 22 日～2014 年 11 月 24 日、岩手大学

〔図書〕（計０件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計０件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究代表者
松本　敏郎（MATSUMOTO, Toshiro）
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10209645

(2)研究分担者
山田　崇恭（YAMADA, Takayuki）
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30598222

飯盛　浩司（ISAKARI, Hiroshi）
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50638773

(3)連携研究者
（　　　）

研究者番号：