



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A02:計画研究工

「周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理」

研究分担者 西村 直志 (京都大学)

まず簡単な自己紹介から始めたい。私は元々土木工学の出身で、京都大学の小林昭一教授の研究室で、工学に現れる力学の問題を積分方程式に帰着して数値的に解く研究に取り組んだのが研究者としての出発点である。この手法は今では境界要素法とかモーメント法とか呼ばれるものであるが、当時はまだこれらの名前はなく、境界積分(方程式)法と呼ばれていた。この方法が波動問題に向いていることに注目されたことは小林教授の慧眼であったと思う。我々のグループは主として弾性波動における境界要素法の研究で、世界的にもある程度知られた存在となることが出来たようである。そういった研究の繋がりから Maxwell 方程式の有限要素法で有名な Nédélec 教授と親しくなり、1989年に彼の研究室に滞在する機会を得たことが私の Maxwell 方程式の研究との最初の接点であった。この経験は私にとっては非常に実りの多いもので、高速多重極法に関する Rokhlin の研究^[1]もこの間に知ることとなった。

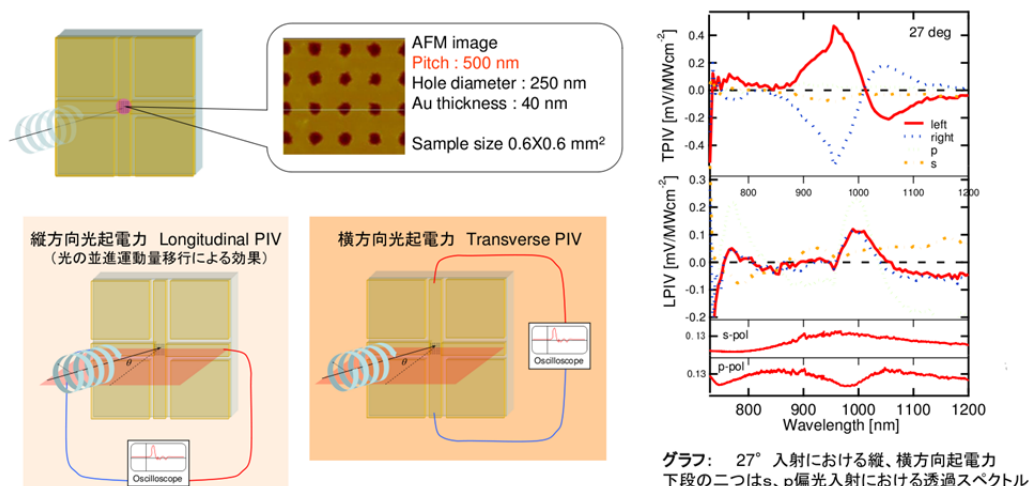
境界要素法は波動問題の非常に強力なツールではあるが、問題が大規模になると計算時間が長くなるという大きな欠点を持っている。この問題を最初に本質的に解決したのが、Rokhlin によって考案され、Greengard によって広く知られるようになった高速多重極法(fast multipole method, FMM)^[2]である。FMM は 20 世紀を代表する 10 のアルゴリズムの一つにも数えられ^[3]、積分方程式の高速解法に留まらず、多体問題をはじめとする多くの応用を有している。その方法はしばしば電話線に例えられ、従来の積分方程式の数値計算法が、すべての電話の間に電線を引いたネットワークであるならば、FMM はいくつかの中継局を設けることによって効率を向上したネットワークであると考えることが出来る。我々は 1990 年代の終頃から力学の問題における FMM の研究に本格的に取り組んだ。最初は多くの欠陥を含む材料や複合材料の強度への応用に関心を持っていたが、均質化法の研究を通して周期問題の研究へ、そして周期波動問題へと興味が移っていった。そうするうちに Maxwell 方程式の周期問題への応用を考える機会を与えていただくことができ、結果的には Maxwell 方程式の周期波動問題の FMM による解法を世界に先駆けて開発することができた^[4]。それがメタマテリアルの研究に役立つそうだとということで、お声をおかけ頂く幸運を得、新学術領域「電磁メタマテリアル」の計画研究分担者にも加えていただいている。その間に私の所属も、計算機センターを経て情報学(数理工学)

に変わり，本来の関心事である積分方程式そのものの研究に，より近い位置に移動した。

2 周期多重極法のメタマテリアル研究への適用

境界要素法は，考える問題を等価な積分方程式に変換したのちにこれを数值的に解く方法である．その特徴として，未知数が考える領域の境界にしか現れないことがあげられる．このため，FDTD 法や有限要素法などの領域型の解法に比べて一般に未知数の数が少なく，問題規模を小さくできる．また，波動散乱問題に適した解法であると考えられるのは，無限領域に対する問題が容易に解けるからである．このため，境界要素法は光学の問題の数値計算法として有望である．さらに，周波数域の解法であるので，時間域の解法のように CFL 条件の制約を受けず，特に興味のある部分のみ特に細かいメッシュを用いるなどの工夫が容易であること，材料特性の取扱いが比較的容易であることなどの利点も有している^[5]．さらに，境界要素法の最大の欠点であった大規模問題における効率の悪さも高速多重極法に代表される高速解法によりほぼ解決されつつあることも前述の通りである．

周期多重極法の詳細や他の応用は文献を見て頂くこととして^[4, 6, 7]，以下ではメタマテリアルに関わる数値計算例を紹介したい．具体的には，光誘起起電力問題を取り上げる．Hatano 等^[8]は石英基板上の厚さ 40nm の金の薄膜に，500nm 間隔で格子状に直径 240nm 程度の円孔を作製し，円偏光を斜入射したところ，入射面に対して横方向に起電力が発生する事を発見した(図 1)．



この現象を説明すべく，周期多重極法による数値計算を行った．図 2 は，入

射波の波長が 1000nm, 入射角が 27° のときの金の内部の Poynting vector の面内成分を示している. 矢印は方向を, 色が強度を表している. なお, 金属表面の電場強度の分布と光誘起起電力の間には相関があることが見出されている^[9]

なお, 現在我々は 2 重漁網構造の最適設計に取り組んでいる. 具体的には, 周期多重極法と非線形計画法を用いて, 見かけの屈折率が負, かつロスの少ないメタマテリアルの構造設計を行っている. さらに, 多重極法に現れる線型方程式において, 反復法の反復回数を減らすための前処理法について研究を行っている. 具体的な結果については今後順次ご報告して行きたい.

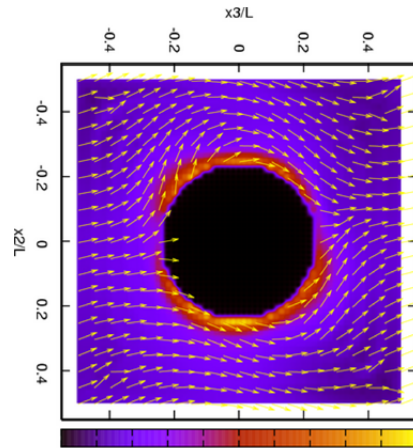


図 2: Poynting ベクトル

参考文献

- [1] V. Rokhlin, Rapid solution of integral equations of classical potential theory, *J. Comput. Phys.*, 60, 187–207 (1985)
- [2] N. Nishimura, *Appl. Mech. Rev.*, 55, 299–324 (2002)
- [3] J. Board and K. Schulten, The fast multipole algorithm, *IEEE Comput. Sci. Eng.*, 2(1), 76–79 (2000)
- [4] Y. Otani and N. Nishimura, *J. Comp. Phys.*, 227, 4630–4652, (2008)
- [5] 石原照也(監修): *メタマテリアル – 最新技術と応用 –*, シーエムシー出版 (2007)
- [6] Y. Otani and N. Nishimura, *Waves Random Complex Media*, 19, 80–104, (2009)
- [7] 大谷佳広, 倉見洋輔, 西村直志, *シミュレーション*, 28, 112–118 (2009)
- [8] T. Hatano, T. Ishihara, S.G. Tikhodeev and N.A. Gippius, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 103906 (2009)
- [9] 畑野敬史, 金属フォトニック結晶スラブにおける光誘起起電力, 東北大学学位論文, 2009