

CIP法の並列計算による大規模電波伝搬解析

Large-scale Analysis of Electromagnetic Wave Propagation
using Parallel Computation of CIP Method古賀 雅典[†]

Masanori Koga

園田 潤[‡]

Jun Sonoda

1. はじめに

近年, UWB(Ultra Wide Band)を用いた新しい無線通信システムの利用が検討されているが, 電波伝搬特性やシステム最適設計において未解決な問題は多い。そこで, 室内UWBパルス伝搬のような大規模電波伝搬問題に適用できる高精度かつ低コストな時間領域解析法の開発が求められている。電波伝搬の数値解析手法の主流として, FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法[1]があるが, 近年, 数値流体力学において, CIP(Constrained Interpolation Profile)法[2]が提案され, CIP法を用いた電磁界解析やその数値誤差の検討が行われている[3, 4]。しかしながら, 大規模電波伝搬解析において必要となるCIP法の並列計算に関する検討や, 数値誤差と計算コストに関する検討は報告されていない。そこで本稿では, 電波伝搬解析におけるCIP法の並列計算特性と大規模解析における数値誤差と計算コストを検討する。

2. CIP法による電波伝搬解析と並列計算特性

CIP法は移流方程式を3次多項式による補間を利用して計算する方法であり, 補間の際, 格子点上の関数値だけでなく, その空間微分も考慮することで精度を高めるのが特徴である[2]。CIP法を用いた電波伝搬解析では, 例えばTM波($\mathbf{E} = (0, 0, E_z)$, $\mathbf{H} = (H_x, H_y, 0)$)を考えると, Maxwellの方程式を x 方向と y 方向に方向分離することにより得られる連立移流方程式(1),(2)をCIP法で計算する(M型CIP法[3])。式(1),(2)において, v は伝搬速度 $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$, Z は特性インピーダンス $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ である。

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_z \mp ZH_y) \pm v \frac{\partial}{\partial x}(E_z \mp ZH_y) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_z \pm ZH_x) \pm v \frac{\partial}{\partial y}(E_z \pm ZH_x) = 0 \quad (2)$$

解析領域が波長の数十倍以上の大規模解析では多くのメモリを必要とし, 計算時間が膨大となるが, 任意の位置における移流値 $E_z \mp ZH_y$, $E_z \pm ZH_x$ を独立に計算できるため, 解析領域を分割することで並列計算が行える。図1に示すように, 解析領域を y 方向に1次元分

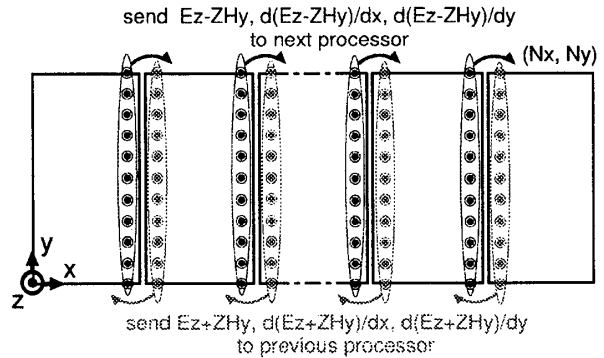


図1: 解析領域の分割と並列計算におけるデータ送受信

割し, 各々の領域を複数の計算機に分配することを考える。計算機間の境界において, 式(1)の x 方向のCIP計算では, 隣接するPCが保有する移流値を必要とするため, 図1のように計算機毎に1ステップあたり $12N_y$ 個のデータ送受信を行うが, 式(2)の y 方向のCIP計算では, データ送受信を行う必要はない。

CIP法の並列計算によりTM波の電波伝搬を解析する際の速度向上について述べる。解析モデルとして大きさ (N_x, N_y) が $(600, 600)$ および $(1200, 1200)$ の自由空間を考え, 時間ステップ数を1000とした。電界 E_z およびその空間微分 $\frac{\partial E_z}{\partial x}$, $\frac{\partial E_z}{\partial y}$ の初期値として式(3)($\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$, $x_0 = N_x \Delta x / 2$, $T = N_x \Delta x / 20$)を与えた。

$$E_z(x, y) = \alpha \exp \left\{ -(x - x_0)^2 / T^2 \right\} \quad (3)$$

図2に表1のPCクラスタを用いて並列計算を行った際に得られた速度向上比を示す。12台使用により速度向上比11.6が得られた。 $N = 600$ では速度向上が若干低下しているが, 全体の計算時間に占める通信時間の割合は p/N (p :計算機台数, N :領域の大きさ)のオーダーであり, 計算機台数を増やすほど, 領域を小さくするほど計算の効率は低下する。

3. CIP法による大規模電波伝搬解析と計算コスト

CIP法の並列計算により大規模電波伝搬解析を行なう際に, 計算精度を保つために必要なパラメータ(セルサイズ Δs , 時間ステップ Δt)および計算コストについて述べる。表2に示す大規模自由空間モデルを計算機10台に

[†]仙台電波工業高等専門学校 専攻科 電子システム工学専攻[‡]仙台電波工業高等専門学校 電子工学科

表 1: PC クラスターの仕様

number of PCs	12 (Pentium 4 3.0 GHz, 1 GB)
OS	Linux (kernel 2.4.20)
network	1000 Base-T
parallelize	MPI (mpich-1.2.6)

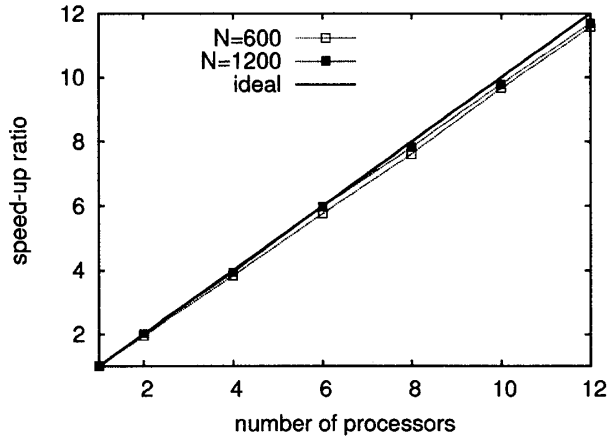


図 2: 計算機台数による計算速度向上比

よる並列計算により解析した。線状電流源 J_z として gaussian パルスを (10m, 12.5m) の位置に設置し, -10dB の周波数で定義される最大周波数 f_{max} を $f_{max}=1$ GHz とした。この場合, 波長は $\lambda = 0.3$ m となり, セルサイズ Δs を波長 λ の $1/20$ とすれば, 3340×1680 個の格子点を使用し, メモリ約 400 MB を要するが, 10 台の計算機に分配することで計算機 1 台あたりメモリ約 40 MB にまで少なくでき, 並列計算により計算時間も短縮される。図 3 にクーラン数 $CN = c\Delta t/\Delta s$ を $CN = 0.5$, セルサイズを $\Delta s = \lambda/10$ および $\Delta s = \lambda/20$ としたときの, 伝搬距離 100λ , 伝搬角 0° の観測点における電界 E_z の時間応答を示す。セルサイズ $\Delta s = \lambda/10$ では振幅の低下が見られるが, $\Delta s = \lambda/20$ ではより解析解と一致する。しかし, 計算精度を向上させるには表 3 に示すようにより多くの計算コストを要する。また, FDTD 法で CIP 法 ($\Delta s = \lambda/20$) と同程度の精度を得るためには, セルサイズを $\Delta s = \lambda/60$ 程度にする必要があり, CIP 法の方がより低コストで解析できる。

4. まとめ

本稿では, 大規模電波伝搬解析を低コストで行なうことを目的とし, 新しい数値計算法である CIP 法の並列計算により電波伝搬解析を行なう手法を示した。計算機 12 台による並列計算により速度向上比 11.6 が得られ, 計算機 1 台あたりの計算コストを大幅に削減できることを示した。また, CIP 法を用いた伝搬距離 100λ の大規模電

表 2: 大規模解析モデルとパラメータ

analysis model	free space (TM)
analysis region	$50\text{m} \times 25\text{m}$ ($167\lambda \times 84\lambda$)
current source J_z	Gaussian Pulse ($\lambda = 0.3\text{m}$)
propagation distance	$R = 30\text{m}$ (100λ)
cell size $\Delta s (= \Delta x = \Delta y)$	$\lambda/20 = 0.015\text{m}$
time step width Δt	$0.25 \times 10^{-10}\text{s}$ ($CN = 0.5$)
total cells	3340×1680
number of time steps	6000
number of PCs	10

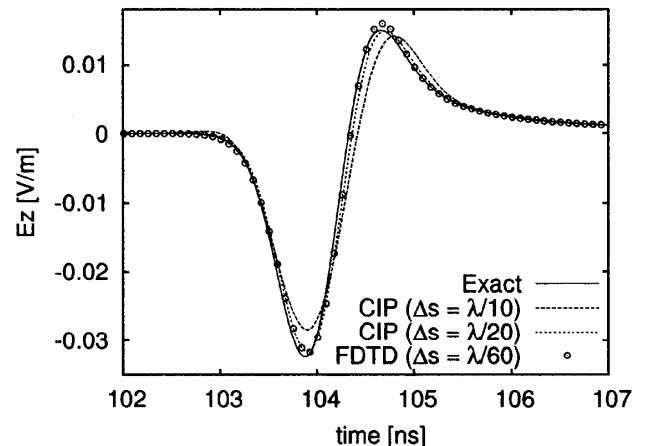
図 3: 伝搬距離 100λ , 伝搬角 0° における電界の時間応答

表 3: パラメータと計算機 1 台あたりの計算コスト

	parameter		computational cost / proc.	
	Δs	CN	time [s]	memory [MB]
CIP	$\lambda/10$	0.5	736.5	10.0
	$\lambda/20$	0.5	5413.4	40.0
FDTD	$\lambda/60$	0.5	8961.7	120.2

波伝搬解析において, 計算精度を保つために必要なパラメータとその解析に要する計算コストの実際を明らかにした。今後は, 数値誤差のセルサイズおよびクーラン数依存性を定量的に評価することや, 散乱体の存在も考慮し実際の室内 UWB パルス伝搬解析への適用を行なう。

参考文献

- [1] K. S. Yee, *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, **14**, 2, pp. 302-307 (1966-5)
- [2] T. Yabe, T. Aoki, *Comput. Phys. Commun.*, **66**, pp.219-232, 1991.
- [3] 吉田 雄一, 大久保 寛, 竹内 伸直, 信学技報, AP2006-36, June 2006.
- [4] 古賀 雅典, 園田 潤, 平成 18 年電気学会全国大会講演論文集 [1] 基礎, 1-130, p.162 March 2006