

オンラインセミナー

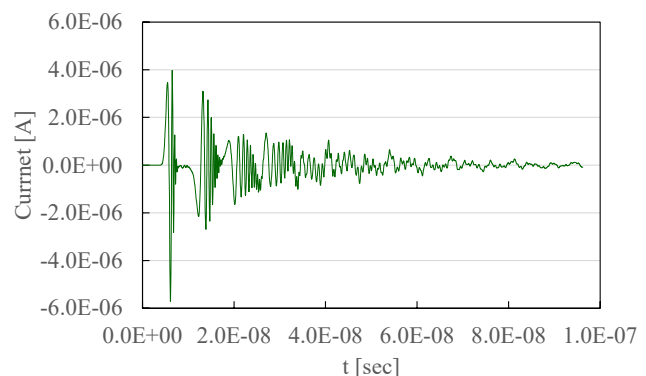
アドバンスソフトの電磁波、 半導体デバイス解析のご紹介セミナー ～IoTを支える数値解析シミュレーションのご紹介～

2020年8月25日(火)開催

プログラム

1.	電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave のご紹介	1
2.	電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave の事例紹介	9
3.	半導体デバイス 3次元 TCAD システム Advance/TCAD のご紹介	27
4.	導入をご検討のお客様へ	※資料は非公開です
5.	(参考資料) アドバンスソフト株式会社のご紹介	45

配線の電流



電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWaveのご紹介

アドバンスソフトの電磁波、半導体デバイス解析のご紹介セミナー
～IoTを支える数値解析シミュレーションのご紹介～

2020年 8月25日 (火)

アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

目次

1. ParallelWaveの特徴
2. FDTD法の概要と定式化
3. FDTD計算の設定手順と出力結果
4. GUI (直交格子生成ソフトウェアAdvance/ParallelGrid)
5. 並列計算
6. TCADとの連成解析
7. まとめ



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

ParallelWaveの特長

- ◆ アドバンスソフトが開発した電磁波解析ソフトウェア
- ◆ FDTD法でMaxwell方程式を3次元的に解く
- ◆ MPI並列計算に対応している。大規模解析を想定
- ◆ CADデータをインポート。複雑な形状のモデルに対応可能
- ◆ TCADとの連成解析
- ◆ 幅広い適用対象
 - ・ マイクロ波デバイスやアンテナの高周波特性
 - ・ 電子機器からの漏洩電磁界
 - ・ 電子機器への静電気放電
 - ・ レーダの散乱断面積
 - ・ 自動車や電車の周囲および内部の電磁界
 - ・ 人体や生体の周囲および内部の電磁界
 - ・ 落雷による過渡電磁界
 - ・ 光の透過、反射、吸収、干渉、回折

FDTD法の概要①

- ◆ 基礎方程式はMaxwell方程式の2つの回転の式

アンペア・マクスウェルの法則：

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) = \text{rot } \vec{H}(\vec{r}, t)$$

ファラデーの法則：

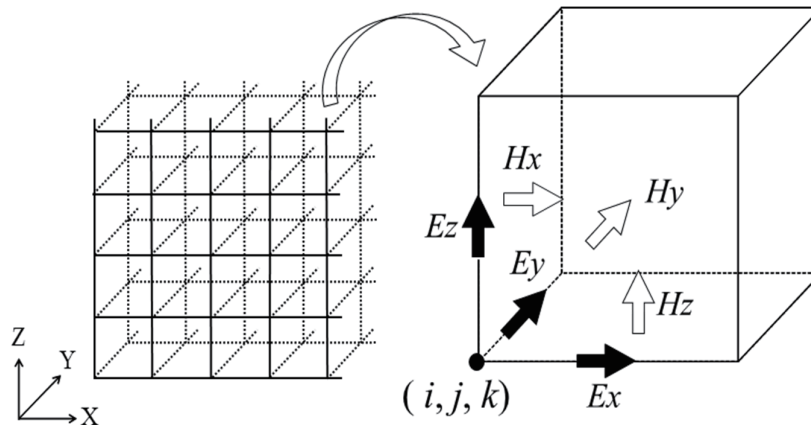
$$\mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t)$$

\vec{E}	電界ベクトル
\vec{H}	磁界ベクトル
\vec{r}	空間座標
t	時刻、時間
ε	誘電率
σ	導電率（電気伝導率）
μ	透磁率

- ◆ FDTD法は、これらの式を時間と空間について差分法で解く
- ◆ Maxwell方程式の2つの発散の式は自動的に満足される

FDTD法の概要②

- ◆ 差分法で解くために3次元空間を直交格子で分割
- ◆ 格子間隔は不均一でも構わない
- ◆ 電磁界成分を差分格子上にスタッガード配置 (Yee格子)
- ◆ 媒質定数 (誘電率、導電率、透磁率) は各格子に設定

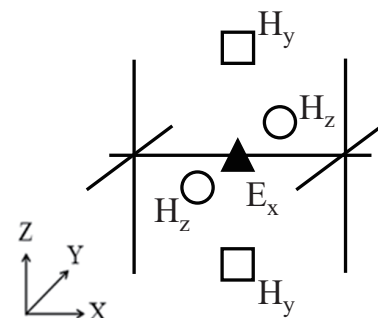


FDTD法の定式化①

$$\epsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) = \text{rot } \vec{H}(\vec{r}, t) \Rightarrow \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}$$

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = \frac{2\epsilon(i, j, k) - \sigma(i, j, k)\Delta t}{2\epsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t} E_x^n(i+1/2, j, k) + \frac{2\Delta t}{2\epsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t} \left(\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y(j)} - \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z(k)} \right)$$

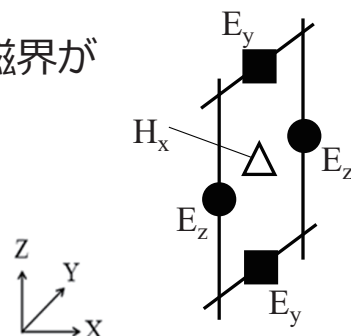
格子点(i+1/2, j, k)上の時刻n+1の電界が
 同じ格子点上の時刻nの電界と
 隣接する格子点上の時刻n+1/2の磁界により
 更新される



$$\mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \Leftrightarrow \quad \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) = H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu} \left(\frac{E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k)}{\Delta z(k)} - \frac{E_z^n(i, j+1, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2)}{\Delta y(j)} \right)$$

格子点(i, j+1/2, k+1/2)上の時刻n+1/2の磁界が
 同じ格子点上の時刻n-1/2の磁界の値と
 隣接する格子点上の時刻nの電界によって
 更新される



FDTD計算の設定手順

CADデータインポート*1 & 材質設定

No	設定項目(光波)
1	屈折率
2	消費係数

No	設定項目(電波)
1	比誘電率
2	電気伝導率

*1 STLファイルをインポートします。
*2 ドルーデモデルとローレンツモデルも設定することができます

境界条件

No	設定項目
1	Mur吸収境界*1
2	PML吸収境界*2
3	電氣的完全導体境界
4	磁氣的完全導体境界
5	周期境界

*1 G. Mur, 1981
*2 J. Berenger, 1994

光源設定

No	設定項目	No	設定項目
1	光源位置	6	電界強度
2	光源の種類 (soft/hard)	7	位相
3	励振開始時刻	8	強度分布 (uniform/Gauss)
4	励振終了時刻	9	ガウス幅
5	正弦波周期	10	角度(θ, φ)

出力設定

No	設定項目(3D出力)
1	出力間隔

No	設定項目(2D出力)
1	出力間隔
2	出力面

No	設定項目(点出力)
1	出力間隔
2	出力点

計算条件

No	設定項目
1	計算時間
2	時間刻み
3	収束判定値

FDTD計算実行！

出力結果

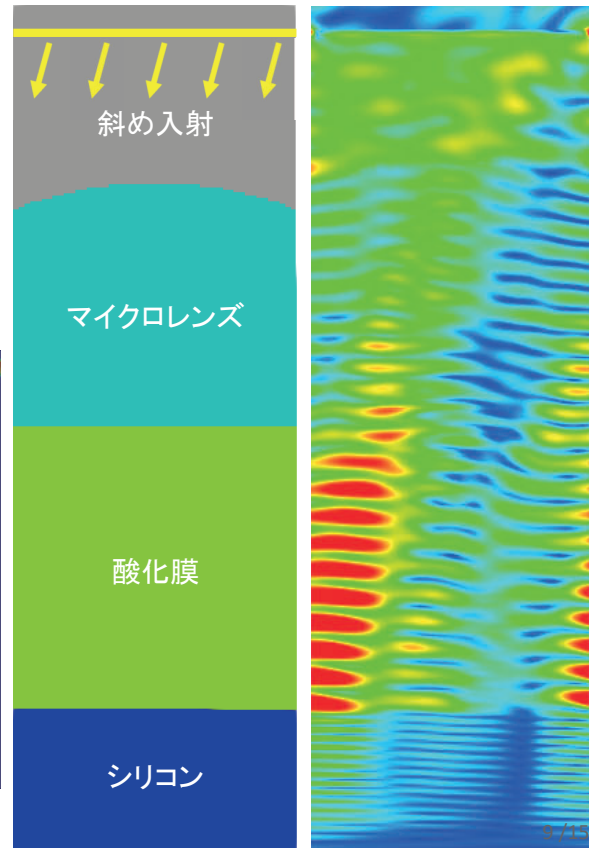
- 点出力 (Ex, Ey, Ez, Hx, Hy, Hz)
- 2D出力 (Ex, Ey, Ez)
- 3D出力 (強度 $|E|^2$ 、吸収 $\sigma|E|^2$)

* 2D/3D出力はVTK形式です。3D描画フリーソフトウェア ParaView(<https://www.paraview.org/>)で可視化、編集することができます。

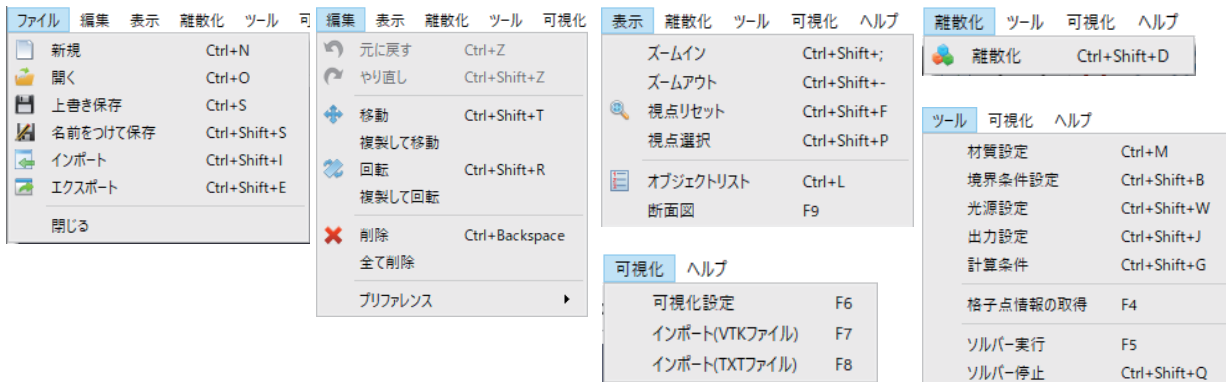
2D/3D/アニメーション描画設定画面



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



GUI (直交格子生成ソフトウェアAdvance/ParallelGrid)

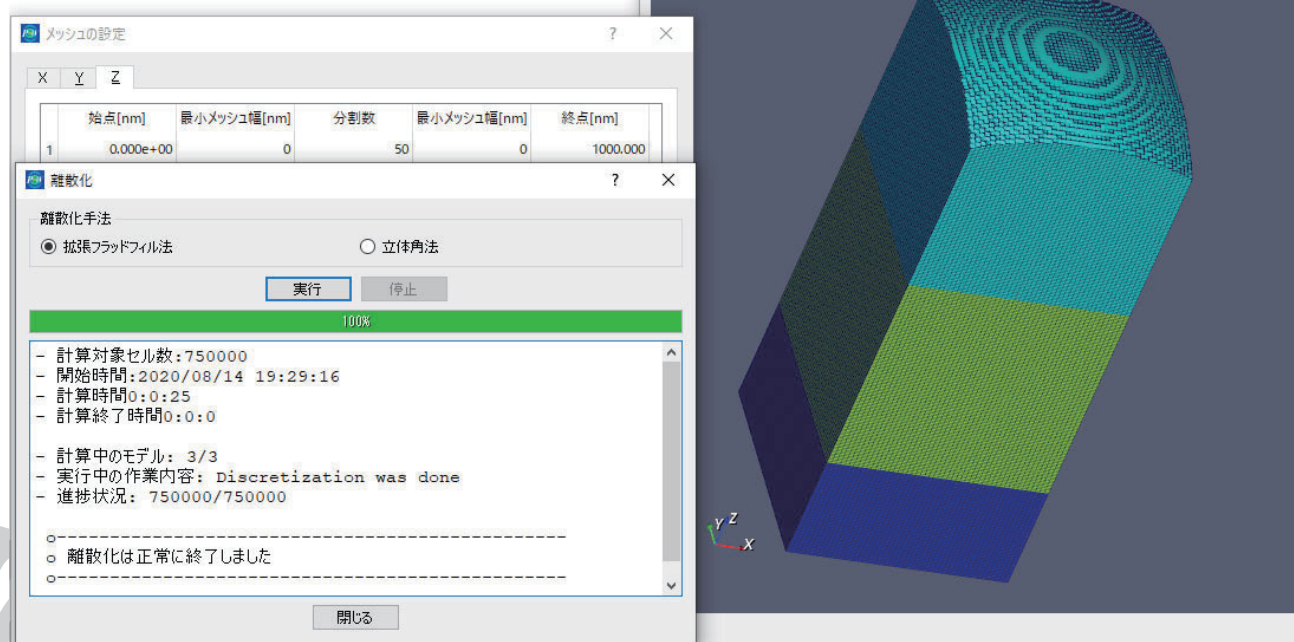


- GUI上でFDTD計算条件の設定から計算実行まで行えます。
- 表示操作機能(回転、移動、ズーム)とオブジェクト編集機能(回転、移動、複製)を備えています。
- 充実した計算結果の可視化機能を備えています。

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

格子分割

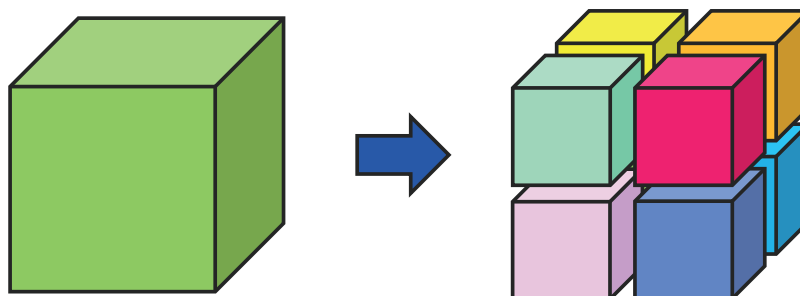
- 3D-CADデータをインポートします。このため、複雑な形状のモデルでも容易に作成することができます。



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/ParallelWave の並列計算

- 領域分割法とMPI(Message Passing Interface)による並列化



元のシミュレーション領域

領域分割(8分割)

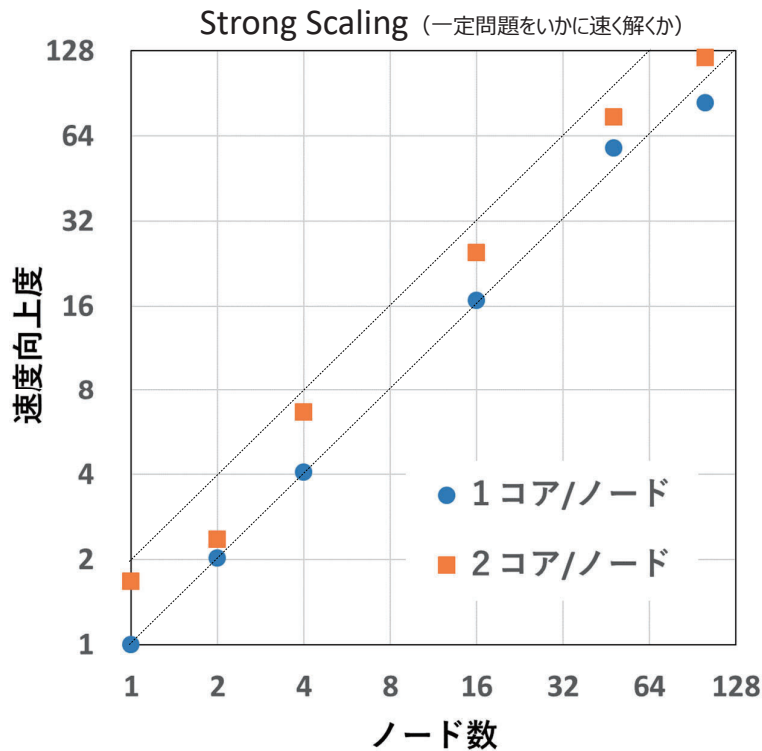
指定した並列数に従って、シミュレーション領域を自動分割

各領域をそれぞれのプロセッサが担当し並列計算する
(領域間での情報の授受はMPIを用いて行われる)

並列化により、1プロセッサが扱う計算量・メモリが減り、
大規模・高速計算が可能になる

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/ParallelWave の並列計算性能



MPIによる並列化

* 点線は速度向上度の傾きが"1"の線

計算モデル

差分格子数 : 1000 × 1000 × 1000

計算機環境

CPU : Xeon D-1541-2.1GHz

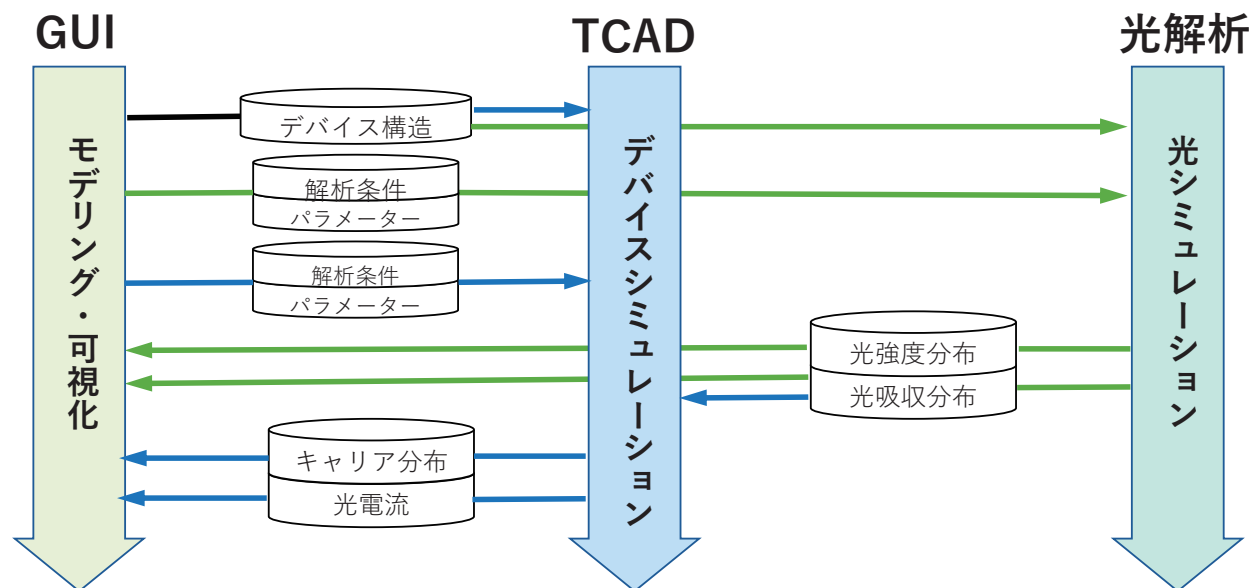
NW : シャーシ間 40Gbs

シャーシ内ノード間 10Gbs×2

(34ノード/シャーシ)

※ ご協力 計算科学振興財団 様

TCADとの連成解析



- 解析対象はCCD/CMOSイメージセンサーや太陽電池などの受光デバイス
- 受光デバイスに照射された光のシミュレーションを行い、発生する光電流をデバイスシミュレーションにより算出

まとめ

- ParallelWaveはアドバンスソフトが開発した電磁波解析ソフトです。FDTD法でMaxwell方程式を3次元的に解きます。
- 電磁波解析を行う上で必要な基本機能を備えています。電波の領域から光波の領域まで、幅広い分野でご使用頂くことができます。
- GUI上でFDTD計算条件の設定から計算実行まで行えます。基本的な表示操作機能、オブジェクト編集機能、充実した計算結果の可視化機能を備えています。CADデータをインポートするので、複雑な形状のモデルに対応可能です。
- 大規模解析を想定して、MPI並列計算に対応しています。
- TCADとの連成解析を行うことで、受光デバイスを解析できます。



電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWaveの事例紹介

アドバンスソフトの電磁波、半導体デバイス解析のご紹介セミナー
～IoTを支える数値解析シミュレーションのご紹介～

2020年 8月25日 (火)

アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

目次

1. 垂直色分離センサー(光とTCADの連成解析)
2. アンテナ特性の評価
3. 回路のノイズ解析
4. ベクトル型スパコンNEC SX-Aurora Tsubasaでの高速化性能
5. まとめ



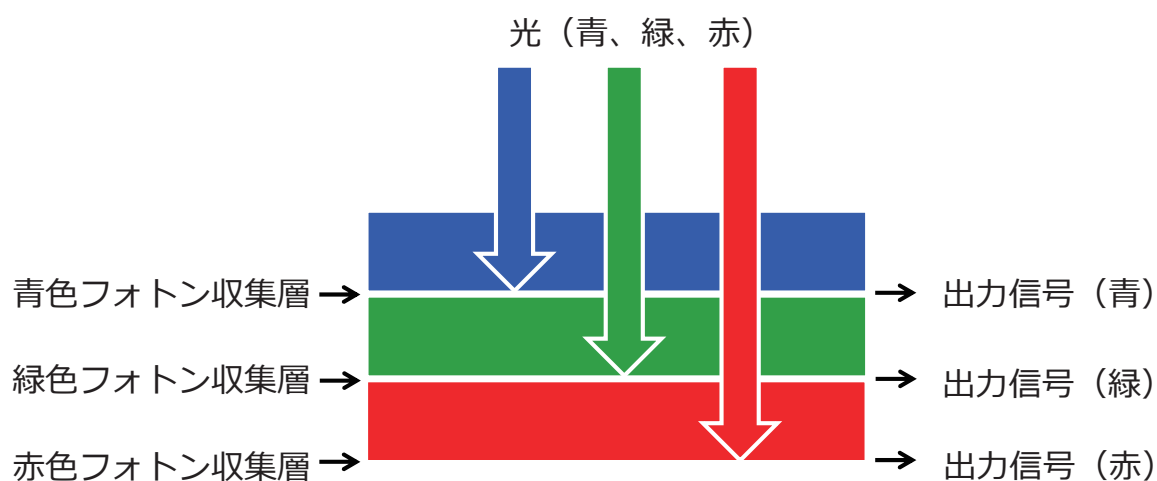
Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事例紹介

垂直色分離センサー



垂直色分離センサー

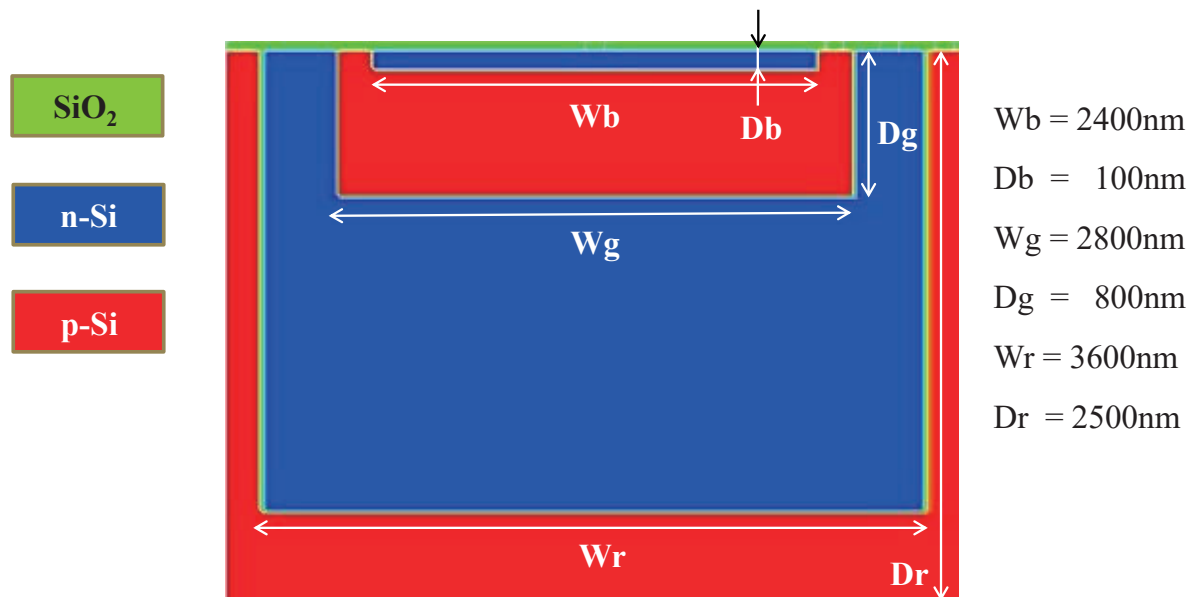


United States Patent, No. 5,965,875, "COLOR SEPARATION IN AN ACTIVE PIXEL CELL IMAGING ARRAY USING A TRIPLE-WELL STRUCTURE", Oct. 12, 1999

Si垂直色分離センサーに青、緑、赤の光を照射し
発生する光電流をシミュレーションする

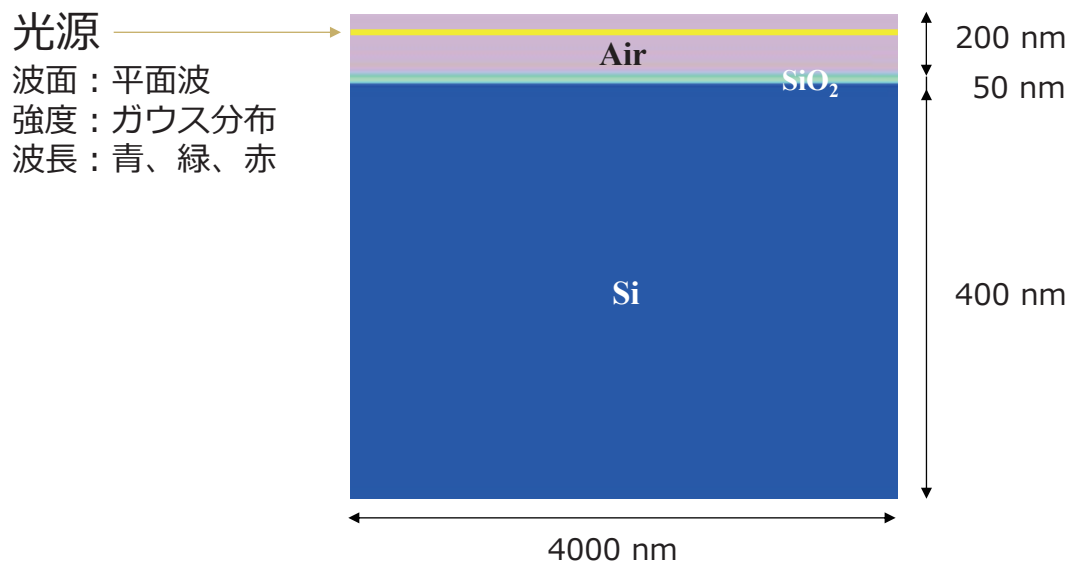


計算モデル (デバイスシミュレーション用)



United States Patent, No. 5,965,875, "COLOR SEPARATION IN AN ACTIVE PIXEL CELL IMAGING ARRAY USING A TRIPLE-WELL STRUCTURE", Oct. 12, 1999

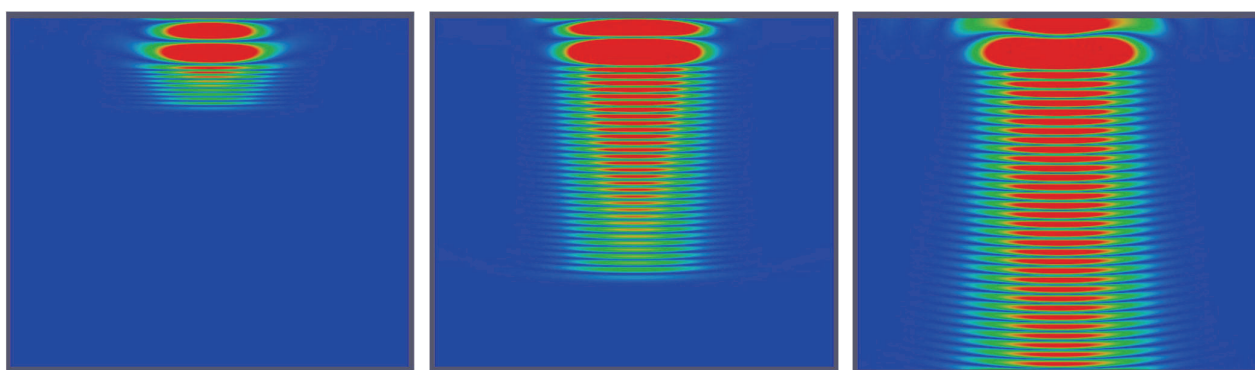
計算モデル (光シミュレーション用)



※領域終端の境界条件
垂直方向：吸収境界
水平方向：周期境界

※奥行き 4000 nm

光の伝搬



青色光

緑色光

赤色光

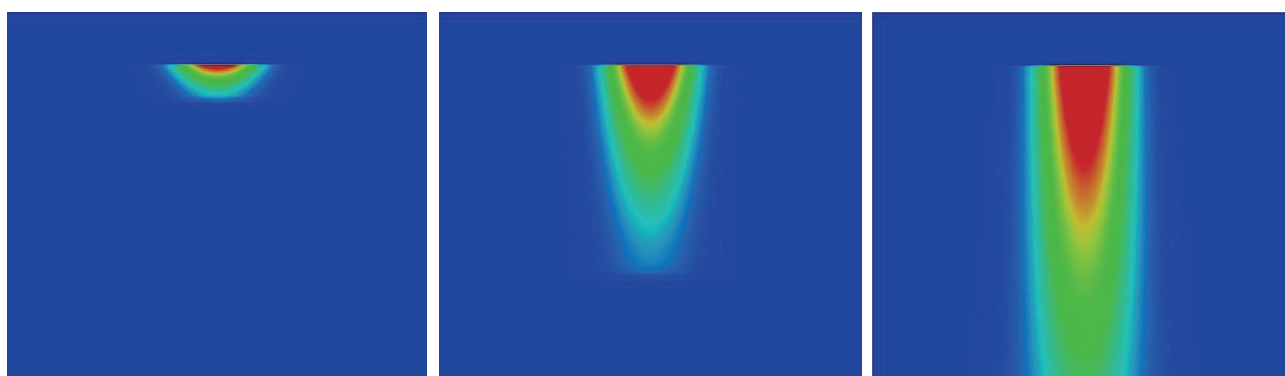
λ	437 nm
n	4.831
k	0.185

λ	546 nm
n	4.089
k	0.044

λ	700 nm
n	3.778
k	0.012

※ λ : 光の波長、 n : Si の屈折率、 k : Si の消衰係数

光の吸収分布 (定常値)



青色光

緑色光

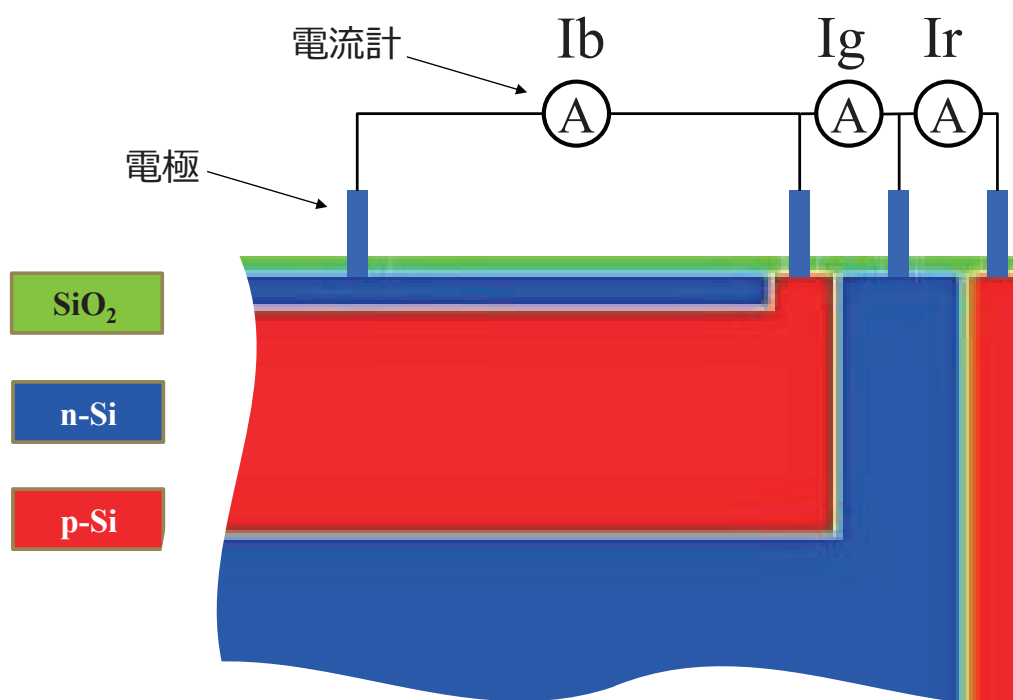
赤色光

λ	437 nm
n	4.831
k	0.185

λ	546 nm
n	4.089
k	0.044

λ	700 nm
n	3.778
k	0.012

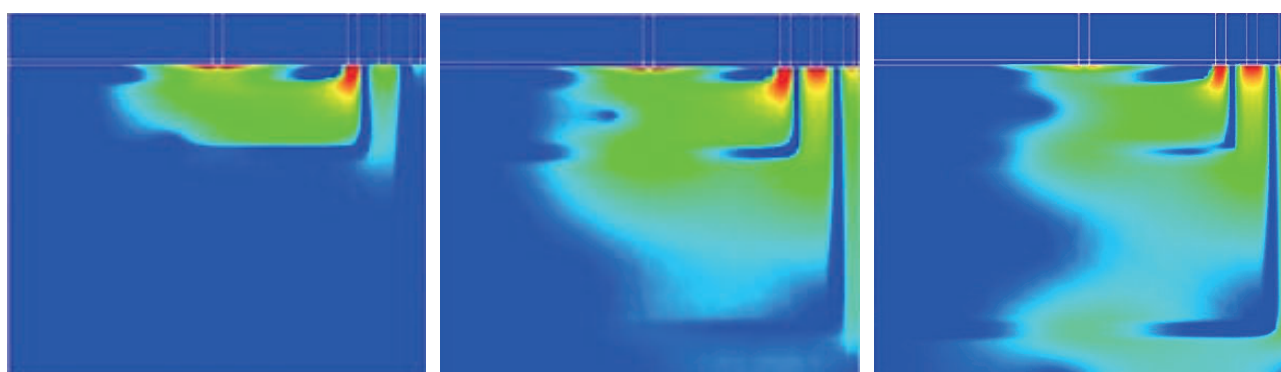
※ λ : 光の波長、 n : Si の屈折率、 k : Si の消衰係数



United States Patent, No. 5,965,875, "COLOR SEPARATION IN AN ACTIVE PIXEL CELL IMAGING ARRAY USING A TRIPLE-WELL STRUCTURE", Oct. 12, 1999g / 34

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Si内部の電流密度と発生した光電流



青色光

緑色光

赤色光

Ib	3.800×10^{-17}
Ig	0.180×10^{-17}
Ir	0.012×10^{-17}

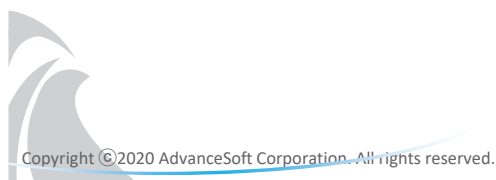
Ib	2.300×10^{-17}
Ig	2.600×10^{-17}
Ir	0.640×10^{-17}

Ib	0.770×10^{-17}
Ig	1.500×10^{-17}
Ir	1.500×10^{-17}

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

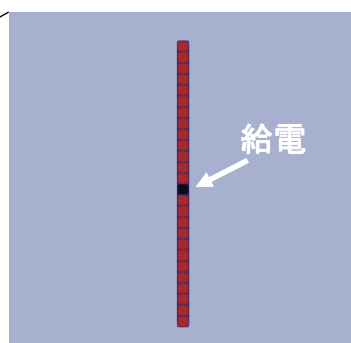
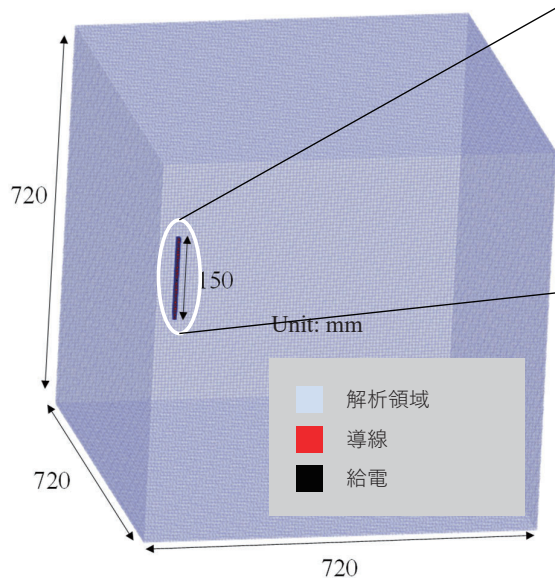
事例紹介

アンテナ特性の評価



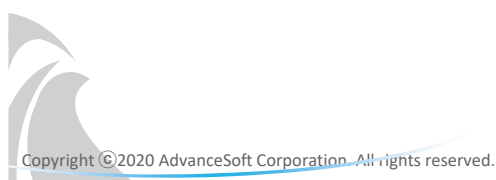
アンテナ特性の評価：モデル

モデル：ダイポールアンテナ

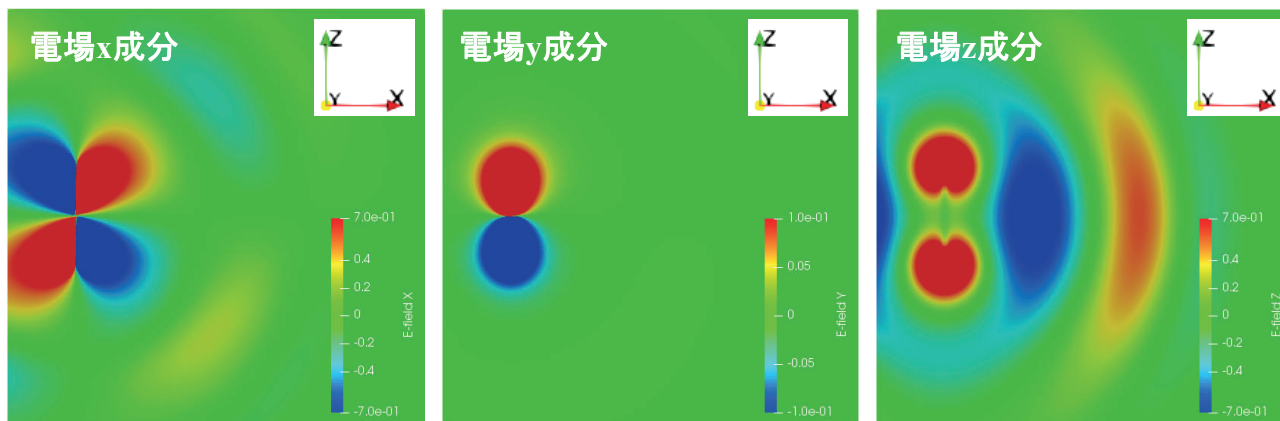


FDTD計算条件

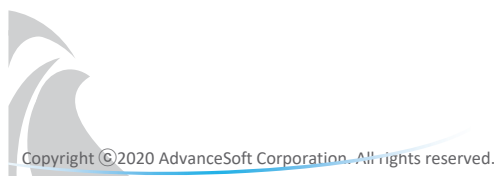
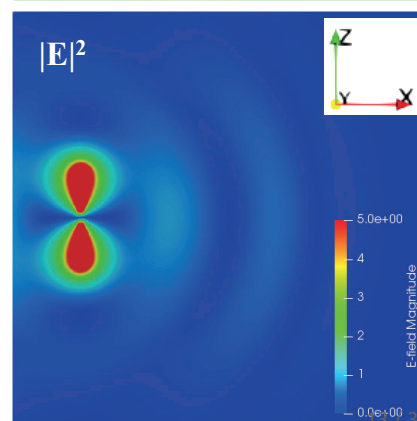
項目	設定値
給電	ガウスパルス
メッシュサイズ	6 μm
時間刻み	11.5550 psec
計算時間	~11.5 nsec (1,000 steps)
境界条件	吸収境界(x, y, z方向)



アンテナ特性の評価：電場分布

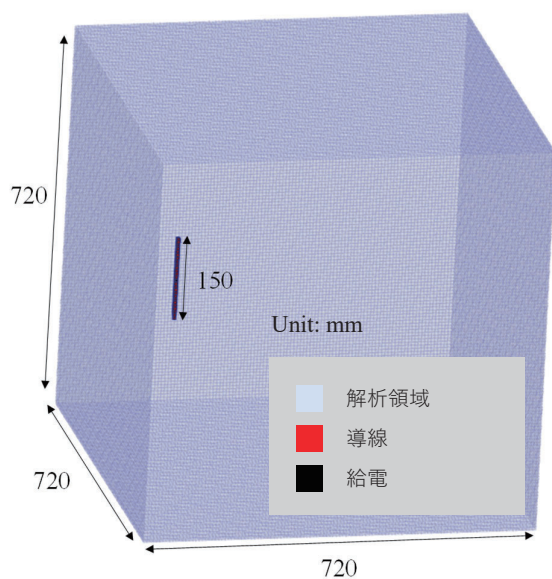


- ダイポールアンテナが配置しているy断面の電場分布(x, y, z成分)と $|E|^2$ 分布を示している。

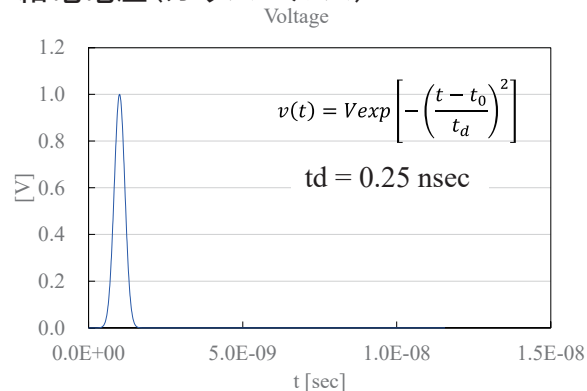


アンテナ特性の評価：給電電圧と電流

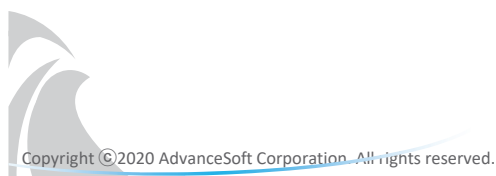
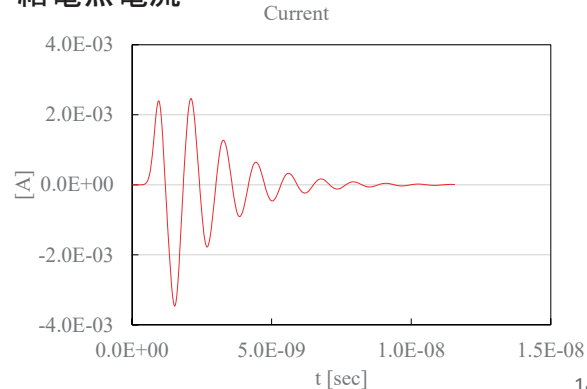
モデル：ダイポールアンテナ



給電電圧(ガウスパルス)

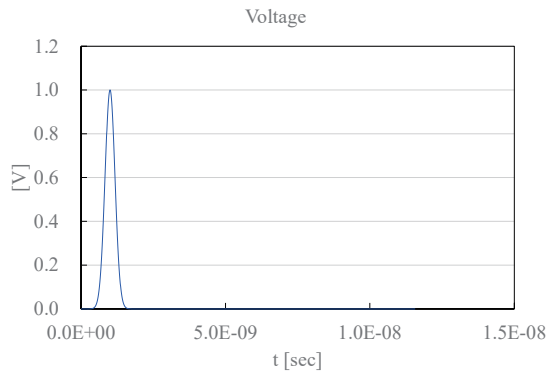


給電点電流

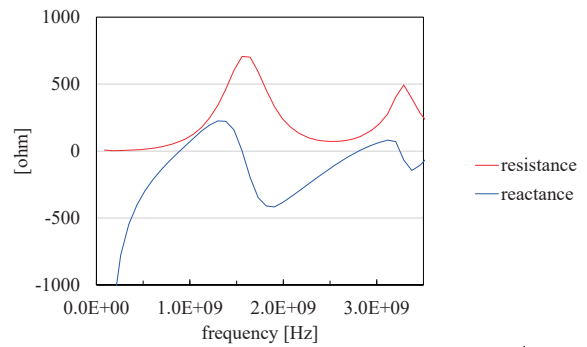


アンテナ特性の評価： Z_{in} & Y_{in}

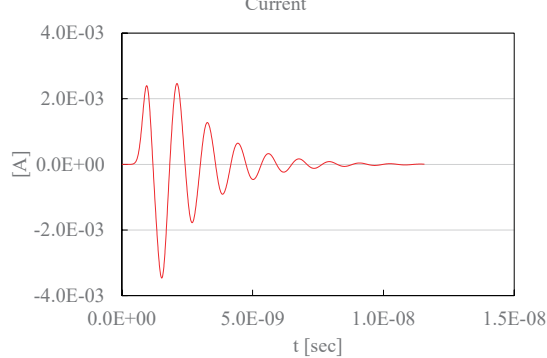
給電電圧(ガウスパルス)



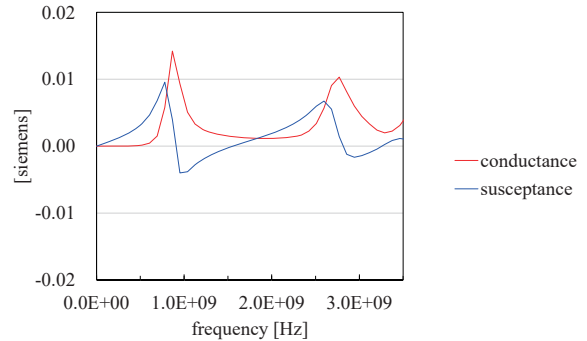
入力インピーダンス $Z_{in}(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}$



給電点電流

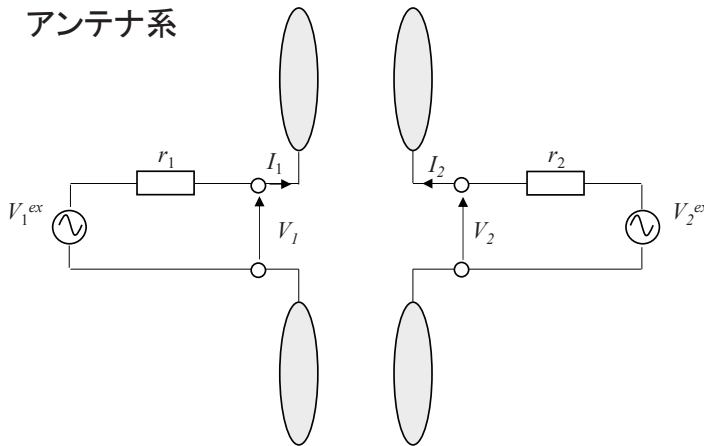


入力アドミッタンス $Y_{in}(\omega) = \frac{1}{Z_{in}(\omega)}$



アンテナ特性の評価：伝達特性

アンテナ系



アドミッタンス行列

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

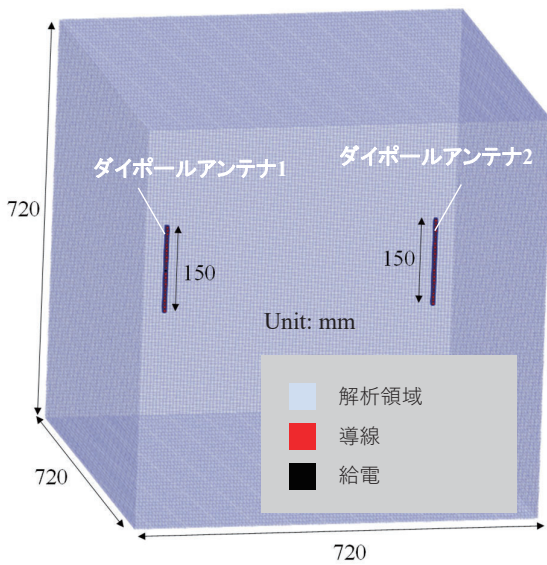
- $Y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0}$: アンテナ1の入力アドミッタンス
- $Y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0}$: 入力端短絡伝達アドミッタンス
- $Y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0}$: 出力端短絡伝達アドミッタンス
- $Y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0}$: アンテナ2の入力アドミッタンス

伝達特性(S21)

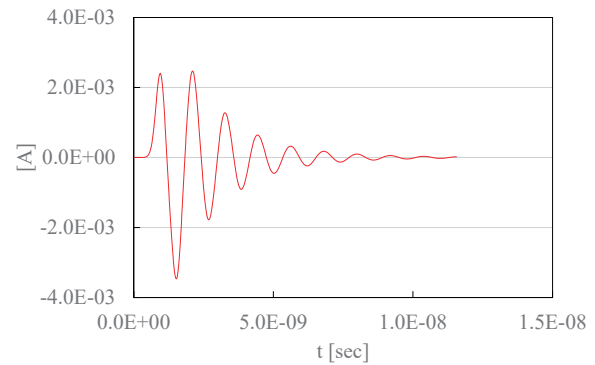
$$S_{21} = \frac{-2 \times Y_{21}}{(1 + Y_{11}) \times (1 + Y_{22}) - Y_{12} \times Y_{21}}$$

- 2本のアンテナの給電電圧と電流からアドミッタンス行列を計算する
- アドミッタンス行列から2本のアンテナ間の伝達特性(S21)を求める

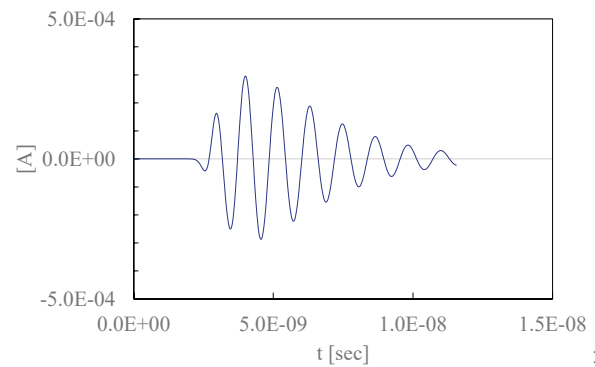
アンテナ特性の評価：2本のアンテナモデル



ダイポールアンテナ1を流れる電流
Current

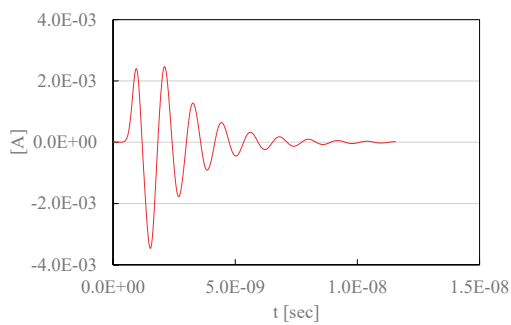


ダイポールアンテナ2を流れる電流
Current

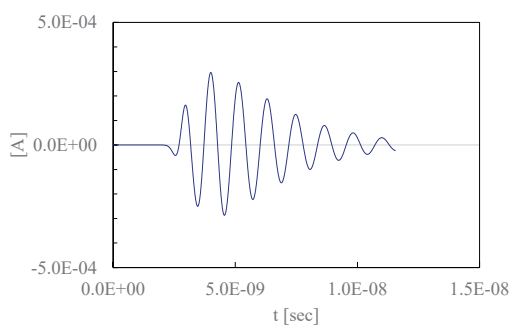


アンテナ特性の評価：伝達特性

ダイポールアンテナ1を流れる電流
Current

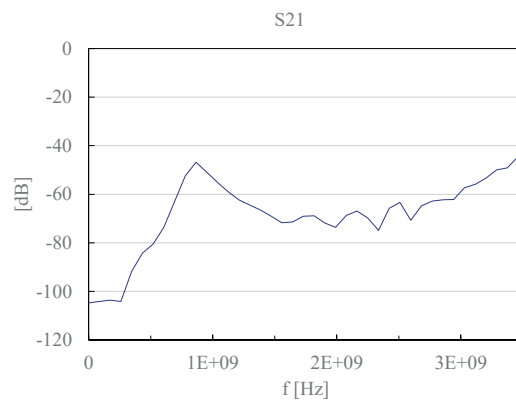


ダイポールアンテナ2を流れる電流
Current



伝達特性(S21)

$$S_{21} = \frac{-2 \times Y_{21}}{(1 + Y_{11}) \times (1 + Y_{22}) - Y_{12} \times Y_{21}}$$



- アドミタンス行列から2本のアンテナ間の伝達特性(S21)を計算した

事例紹介

回路のノイズ解析

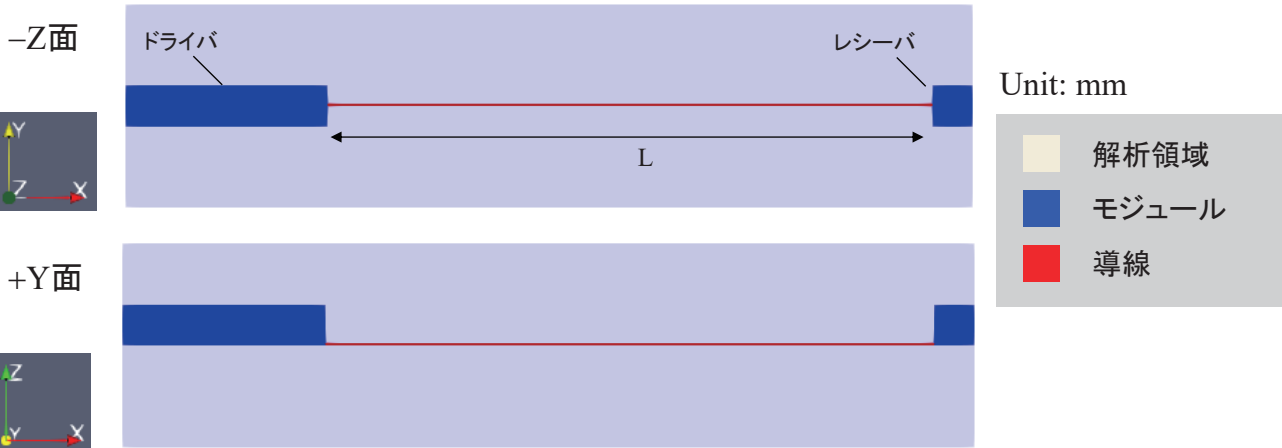


回路のノイズ解析

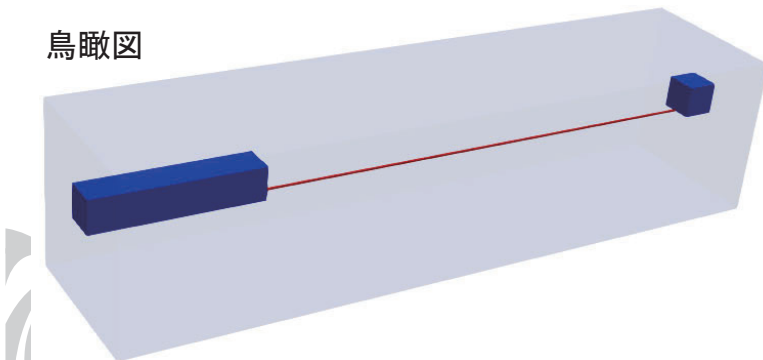
- 配線に含まれる寄生インダクタンス、寄生容量が原因で配線の電圧、および電流にリングングが生じる。
- リングングの周波数、あるいはその高調波成分がノイズの原因になる場合がある。
- 本事例では、電磁波解析を行い、配線で生じるリングングの周波数特性を検証した結果について紹介する。



回路のノイズ解析：モデル

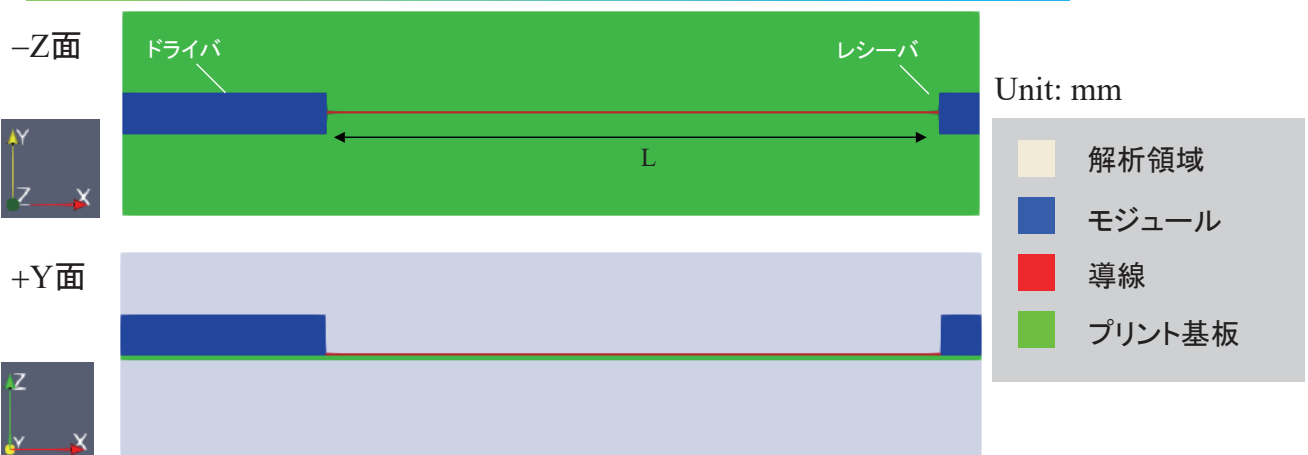


鳥瞰図

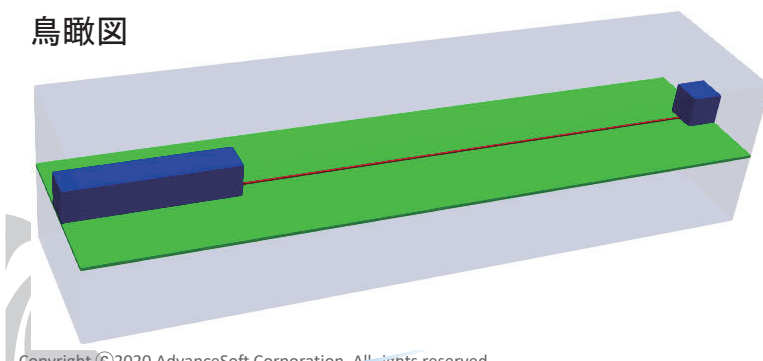


- 配線として単線の導線モデルを使用。
- ドライバで給電する。電磁波は導線に沿って伝搬する。
- ドライバとレシーバ間の多重反射を計算する。

回路のノイズ解析：モデル



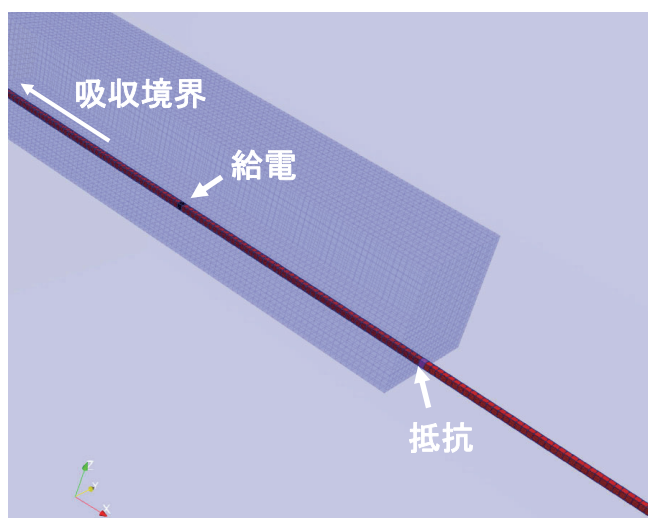
鳥瞰図



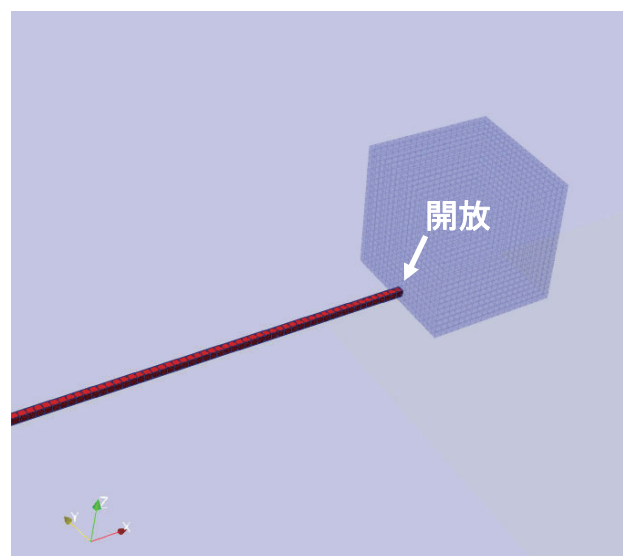
- 配線として単線の導線モデルを使用。
- ドライバで給電する。電磁波は導線に沿って伝搬する。
- ドライバとレシーバ間の多重反射を計算する。

回路のノイズ解析：モデル

ドライバ部分拡大



レシーバ部分拡大



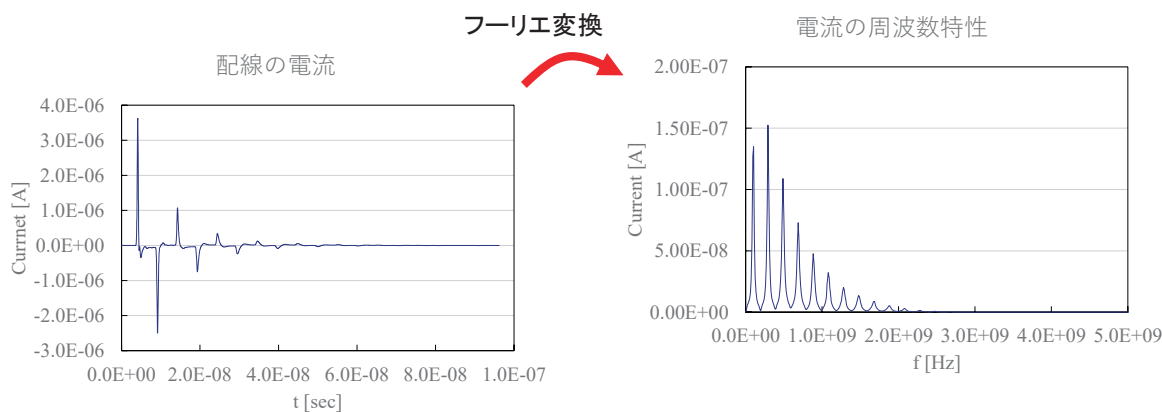
- 給電箇所ではガウスパルスを与える。
- ドライバと配線の接続部に抵抗を装荷。
- レシーバ部に寄生する静電容量のため電磁波は反射する。今回は開放条件とした。

回路のノイズ解析：計算条件

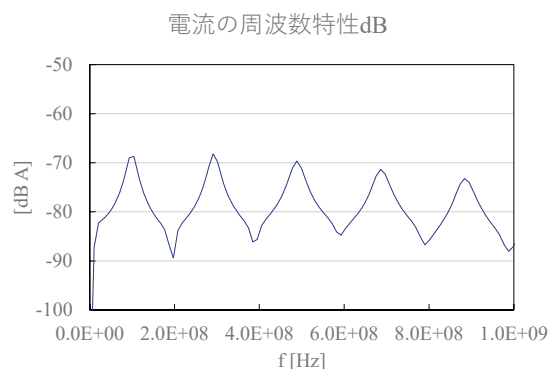
項目	設定値
メッシュサイズ	5 mm
メッシュ数	4,200,000
時間刻み(クーラン条件)	9.62E-12 sec
境界条件	吸収境界 (x, y, z方向)
給電波形	ガウスパルス
計算時間	100 nsec (10,000ステップ)

- 2種類の線路長を計算した。
- プリント基板ありなしの2種類の条件で計算した。
- 線路長Lは、リングングの周波数が100 MHzになるように設定した。

回路のノイズ解析：周波数特性

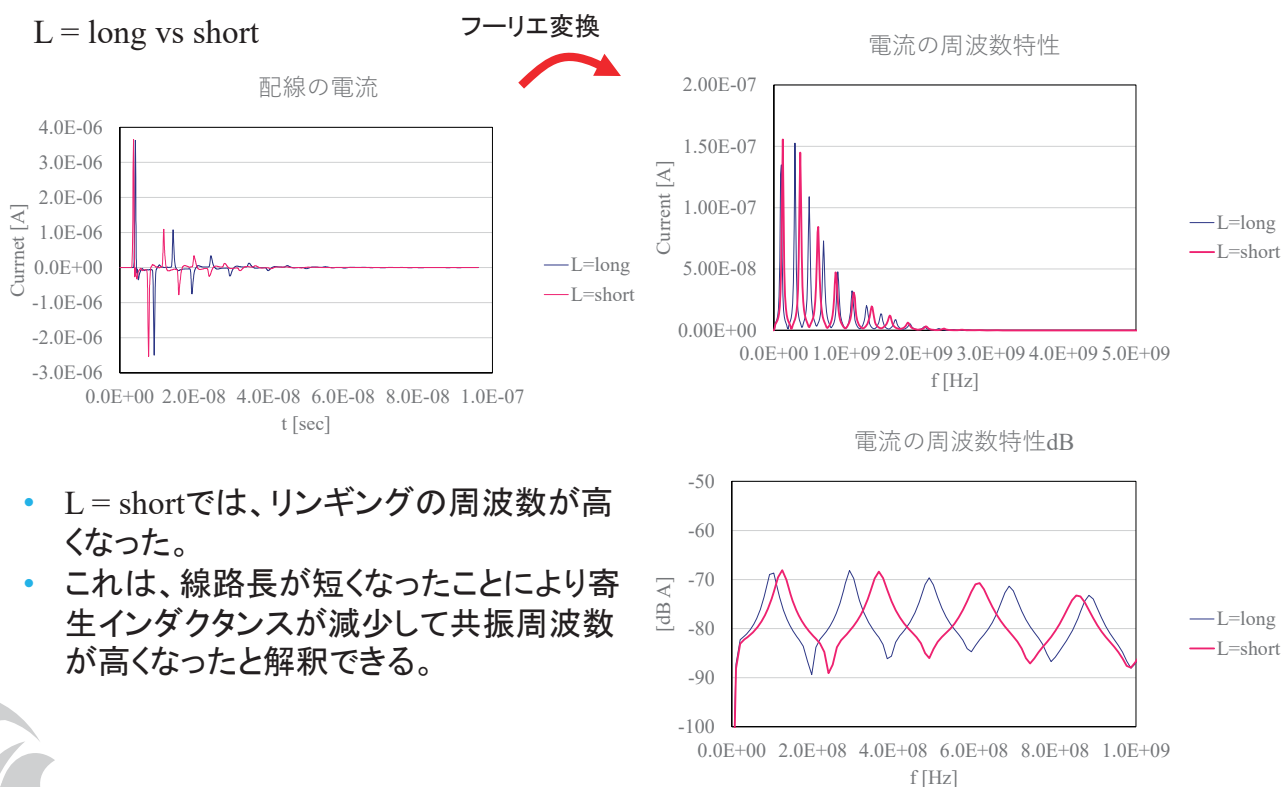


- 電磁波がドライバとレシーバ間を多重反射することにより、導線を通る電流ではリングングが生じる。
- リングング波形から共振周波数を計算した。
- 基本周波数約100 MHzとその高調波成分のピークを確認できる。



回路のノイズ解析：周波数特性

L = long vs short



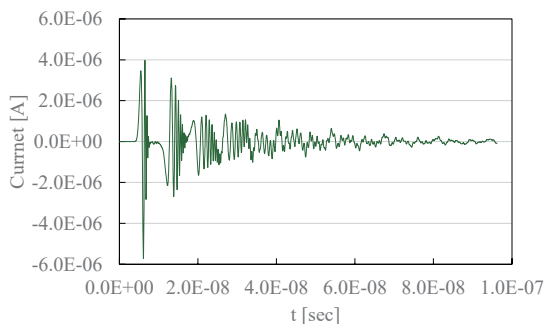
- L = shortでは、リングングの周波数が高くなった。
- これは、線路長が短くなったことにより寄生インダクタンスが減少して共振周波数が高くなったと解釈できる。

回路のノイズ解析：周波数特性

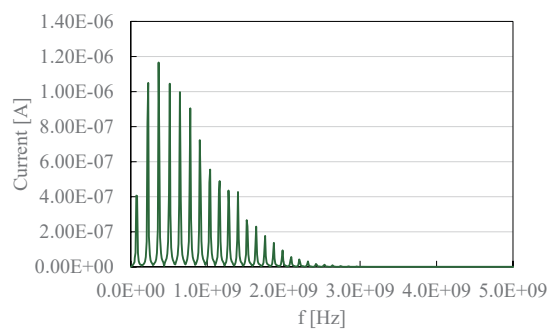
プリント基板を追加

フーリエ変換

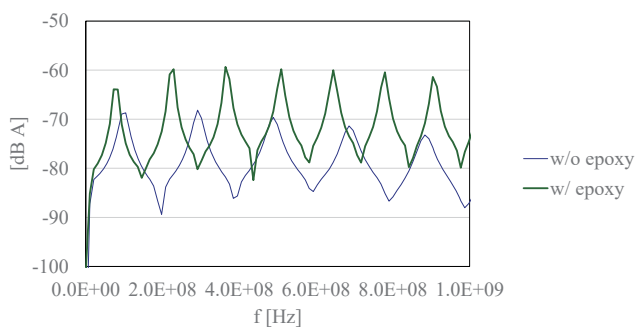
配線の電流



電流の周波数特性



電流の周波数特性dB



- プリント基板がある場合、電流波形にプリント基板由来の波形が重畳する。
- リンギングの周波数が低くなる。
- これは、プリント基板がある場合、電磁波の伝搬速度が遅くなっていることを示している。

ベクトル型スパコン NEC SX-Aurora Tsubasa での高速化性能




NEC SX-Aurora Tsubasaとは？


SX-Aurora TSUBASAの特長

SX-Aurora TSUBASA


SX-ACE
(従来のスパコン)




ベクトルエンジン



タワー



ラック



POINT 1 高性能
ベクトル技術で大量データの一括処理を実現し、Xeon比10倍以上の性能を実現

POINT 2 使いやすさ
C/C++/Fortranで記述されたプログラムをコンパイルして実行するだけで高い性能を享受可能

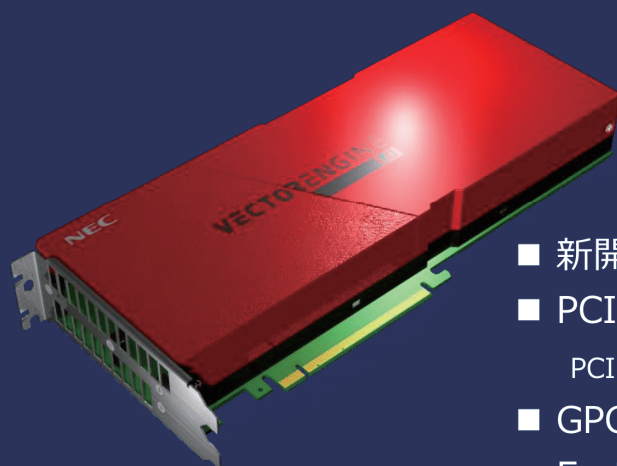
POINT 3 フレキシブル
お客様ニーズに従い、サーバ/エンジン構成選択可能、C/P最適化、適応市場拡大

3
© NEC Corporation 2018
Orchestrating a brighter world **NEC**



NEC SX-Aurora Tsubasaとは？

PCIeカード型ベクトルエンジン (VectorEngine)



- 新開発ベクトルプロセッサ
- PCIe規格準拠
 - PCI Express Gen3. x16
- GPGPUと異なる実行モデル、Fortran/C/C++の標準環境
- 演算性能：
 - 2.45TF(倍精度), 4.91TF(単精度)
- メモリ帯域 1.22TB/s
- メモリ容量 48GB

2

© NEC Corporation 2018

Orchestrating a brighter world **NEC**

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

30 / 34

FDTD法とベクトル化・並列化

- もともとFDTD法はベクトル化・並列化に適している

コアとなる電磁場の更新部分の例(電場の場合：磁場も同様)

```

do k = ks_grid_owned_only(bound, 2), ke_grid_owned_only(bound, gnT_z-1)
  do j = js_grid_owned_only(bound, 2), je_grid_owned_only(bound, gnT_y-1)
    do i = is_cell(bound, 1), ie_cell(bound, cnT_x)
      ex(i,j,k) = cx(i,j,k)*ex(i,j,k) + gx(i,j,k)*( hz(i,j,k) - hz(i,j-1,k)
        - hy(i,j,k) + hy(i,j,k-1) )
    enddo
  enddo
enddo
    
```

MPI版 ParallelWaveソースコード(オリジナル)

注意点

オリジナルプログラムでは、doループの初期値、最終値が関数になっており、少々複雑

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

31 / 34

ベクトル化チューニング

リストベクトルを用いたベクトル化

```

n = 0
do k = ks_grid_owned_only(bound, 2), ke_grid_owned_only(bound, gnT_z-1)
do j = js_grid_owned_only(bound, 2), je_grid_owned_only(bound, gnT_y-1)
do i = is_cell(bound, 1), ie_cell(bound, cnT_x)

    n = n + 1
    iiiex(n) = i
    jjjex(n) = j
    kkkex(n) = k
} リストベクトル

enddo
enddo
enddo
nmaxex = n
    
```

リストベクトルの作成

```

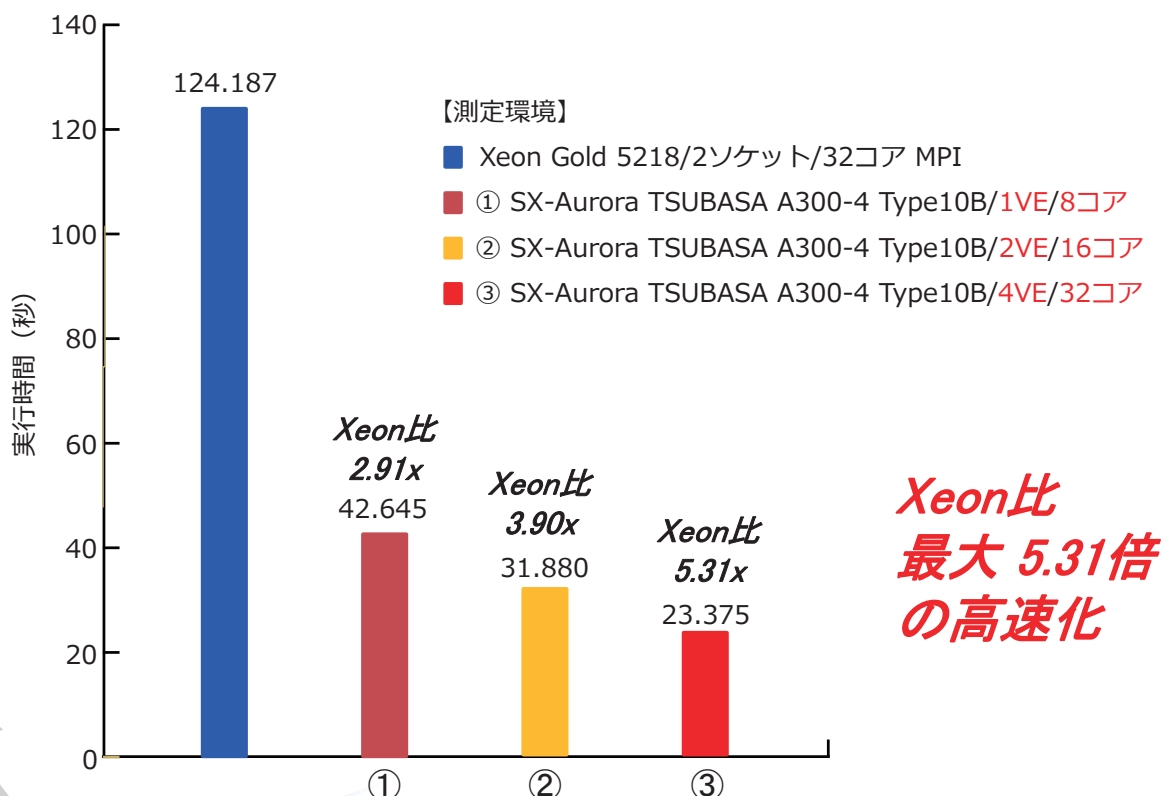
35: !NEC$ IVDEP
36: v-----> do n = 1, nmaxex
37: |           i=iiiex(n)
38: |           j=jjjex(n)
39: |           k=kkkex(n)
40: |           G ex(i,j,k) = cx(i,j,k) * ex(i,j,k) + gx(i,j,k) * ( hz(i,j,k) - hz(i,j-1,k) - hy(i,j,k) + hy(i,j,k-1) )
41: v----- enddo
    
```

コンパイラ指示行の挿入

ベクトル化指示行の設定によりベクトル化（1重ループ化）

リストベクトルによる1重ループ化により、ベクトル演算率 99.90%、及びベクトル長の長大化(256以上)を達成

NEC SX-Aurora Tsubasa での高速化性能



まとめ

垂直色分離センサー(光とTCADの連成解析)

- 深さ方向に複数のp/n接合を持つ垂直色分離センサーモデルを作成して光とTCADの連成解析を行った。
- 入射光の波長と光電流が発生する深さの関係をシミュレーションした。

アンテナ特性の評価

- ダイポールアンテナの給電電圧と電流から入力インピーダンス、入力アドミタンスを計算した。
- 2本のダイポールアンテナを配置して伝達特性(S21)を計算した。

回路のノイズ解析

- 回路のノイズとなるリングングの周波数特性を解析した。
- 回路の線路長を変えたり、プリント基板を追加することによりリングングの周波数特性が変化することを確認した。

ベクトル型スパコンNEC SX-Aurora Tsubasaでの高速化性能

- NECのベクトル型スパコンであるSX-Aurora TsubasaはLinuxが動作する汎用のx86サーバで動作する。Fortran/C/C++を標準環境としている。
- ParallelWaveのベクトルチューニングを行った結果、Xeon比として最大5.31倍の高速化が得られた。



3次元TCADシステム Advance/TCADのご紹介

アドバンスソフトの電磁波解析、半導体デバイス解析のご紹介セミナー
～IoTを支える数値解析シミュレーションのご紹介～

2020年8月25日（火）

アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/TCADとは...

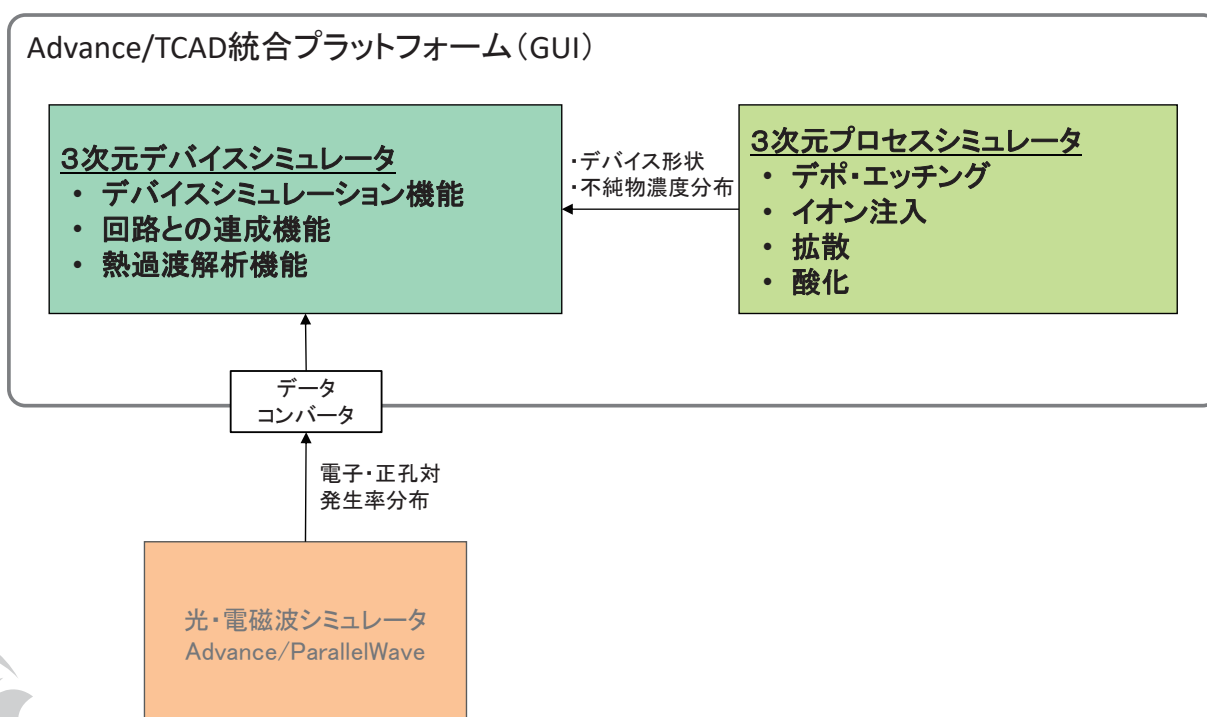
超微細半導体デバイスからパワーデバイスまでの解析において、デバイスシミュレーション、プロセスシミュレーションの基本機能はもちろん、**光・電磁波との連成解析、複数デバイスや外部回路との一括解析、熱解析**等、IoT時代のデバイス開発で必要とされる各種機能を備えています。

アドバンスソフトがソースコードレベルから**自社開発**しており、客さまのご要望に臨機応変に対応できる国産の3次元TCADシステムです。



Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

Advance/TCADのシステム構成



3次元プロセスシミュレータ

➤ デポ・エッチング

テトラメッシュを使用した幾何学的な処理により、等方、異方デポ・エッチ、平坦化デポ・エッチを再現。

➤ イオン注入

結晶材料とアモルファス材料の両方に対応した3次元モンテカルロ法によるイオン注入シミュレーション。

➤ 拡散

非平衡反応拡散モデルと平衡拡散モデルによる拡散機能。

➤ 酸化

粘弾性モデルによる酸化-変形解析機能。

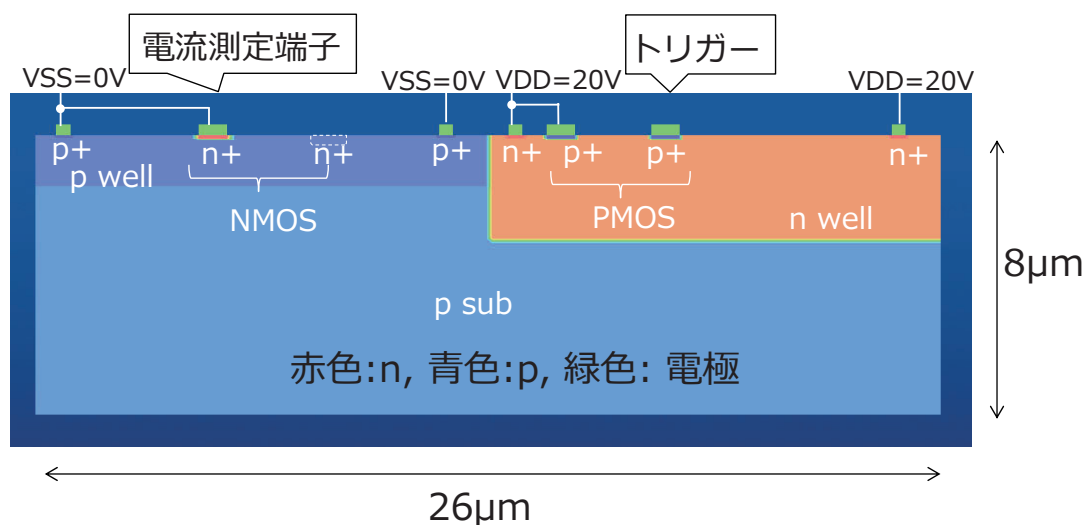
3次元デバイスシミュレータ

項目	特徴
使用可能な材質 (※材料定数を変更することで別材質も設定可能。)	半導体: Si, poly-Si, Ge, Si _x Ge _{1-x} , GaAs, AlAs, Ga _x Al _{1-x} As, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, GaN, GaAl _x N _{1-x} , AlN 絶縁体: SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ , Air 金属: Cu, Al, Ti, Ta, Mo, W, TiN
基本物性のモデル	•誘電率、電子親和力、質量モデル、バンドギャップモデルなど
移動度モデル	•MOS反転層モデル、折れ線近似、指数飽和型、定数型など
生成・再結合モデル	•SRH、Auger、直接再結合、深い準位や界面準位による再結合、二準位間再結合、GIDL、衝突電離など
解析機能	<ul style="list-style-type: none"> •電子・正孔密度の移流拡散方程式 + ポアソン方程式 •定常解析、過渡解析機能 •不純物モデル(浅い準位から深い準位までに対応) •界面準位モデル(界面再結合, 界面電荷を考慮。連続準位の設定が可能)。 •ヘテロ接合に対応。 •量子効果補正(Feynmanの実効ポテンシャル、直接トンネリング) •電極特性(オーミック, ショットキー接合に対応)。 •光・電磁波解析による電子・正孔対生成率分布の読み込み機能。 •複数デバイスや外部回路との一括解析機能。 •熱解析機能



CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

2次元CMOS (電極とネットドーピング分布)



不純物濃度値 [cm⁻³]

n+ : 2.5E20, p+ : 1.0E20

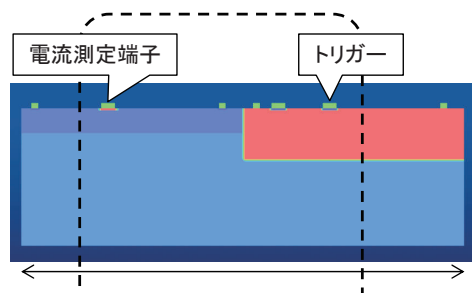
n well: 3E16, p well: 2E16

sub: 7E+14



CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

構造A



横方向長さ
26μm

抵抗大

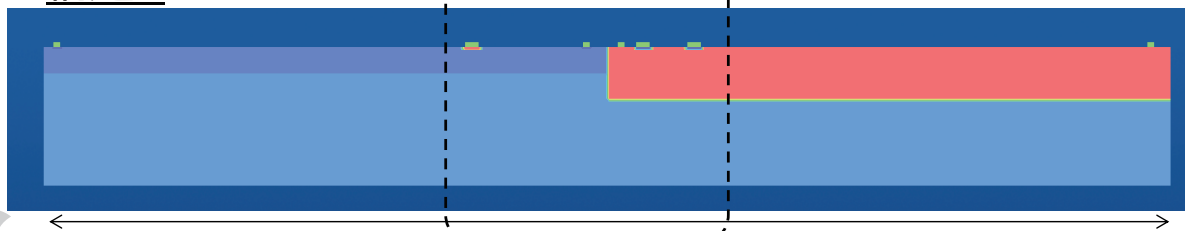
構造B



46μm

抵抗小

構造C



66μm

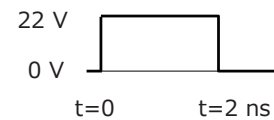
※点線内同じ構造

CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

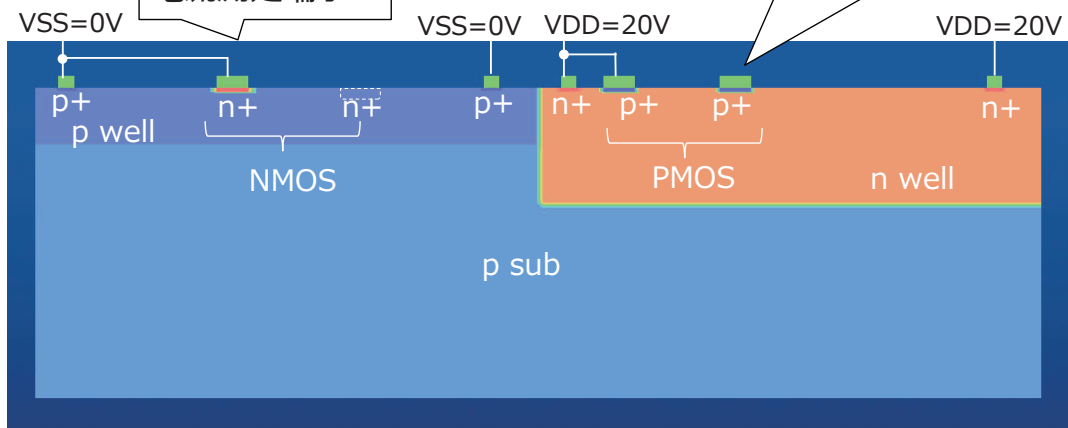
トリガーのバイアス条件

t = 0 ns 0V→22 V
(過渡計算)

t = 2 ns 22V→0V
(過渡計算)

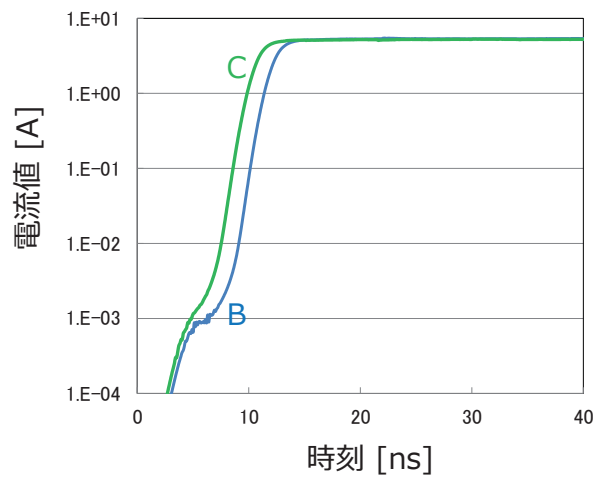
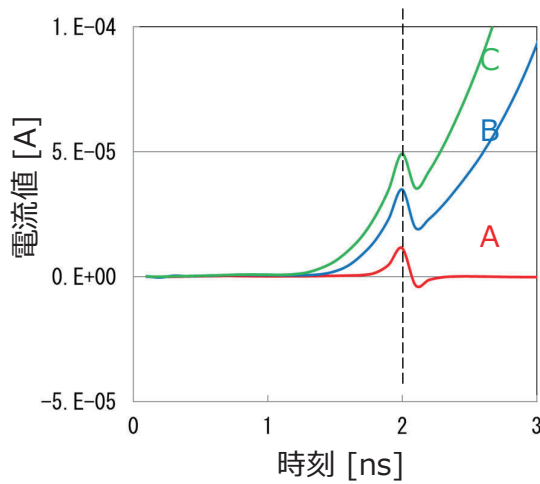


電流測定端子

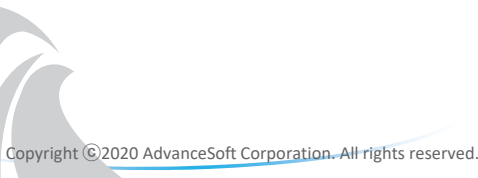
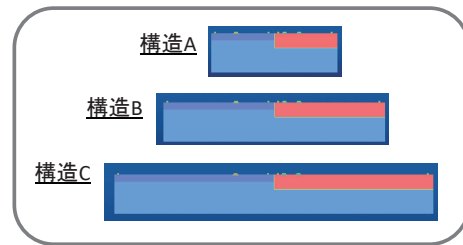


CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

電流値時間変化 (左: 線形表示、右: 対数表示)

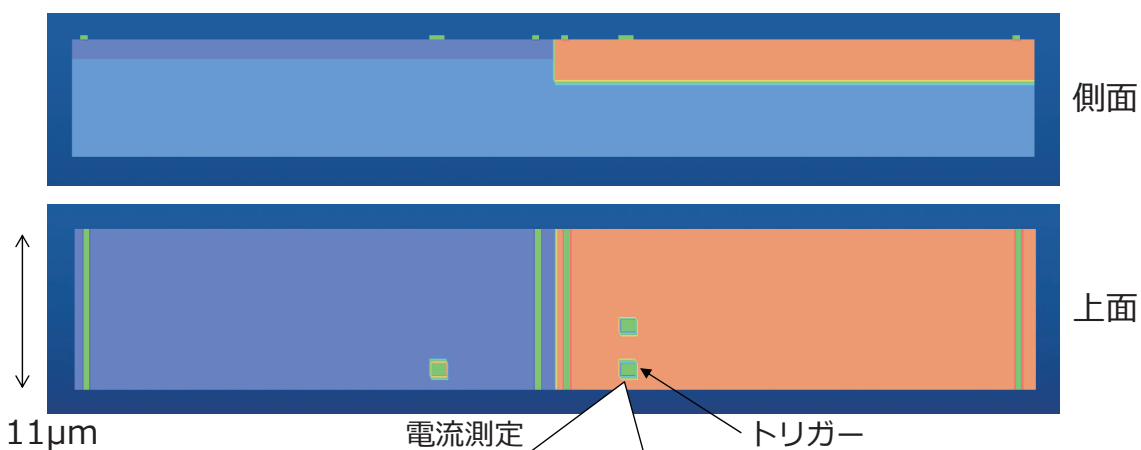


構造BとCでPNPN接合がONして電流が流れ続けた (ラッチアップ発生)。



CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

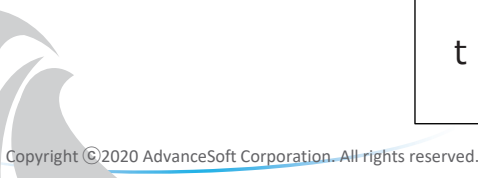
3次元CMOS(例:構造C)



トリガーのバイアス条件

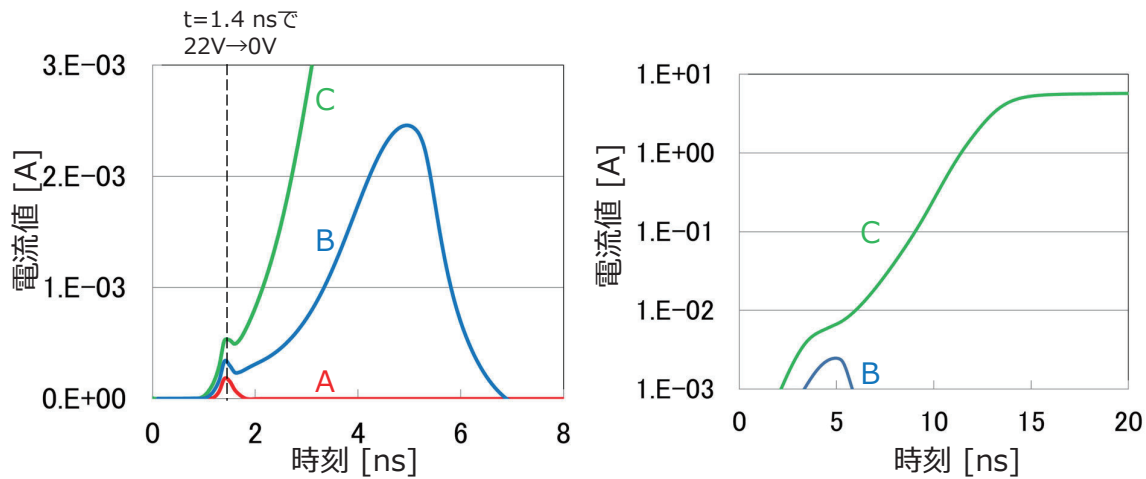
$t = 0 \text{ ns}$ 0V → 22 V (過渡計算)

$t = 1.4 \text{ ns}$ 22V → 0V (過渡計算)

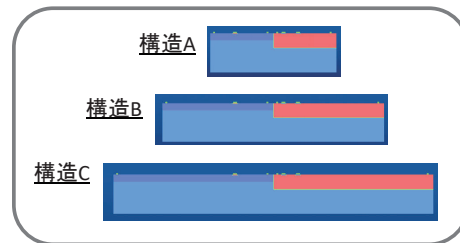


CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

電流値時間変化 (左: 線形表示、右: 対数表示)

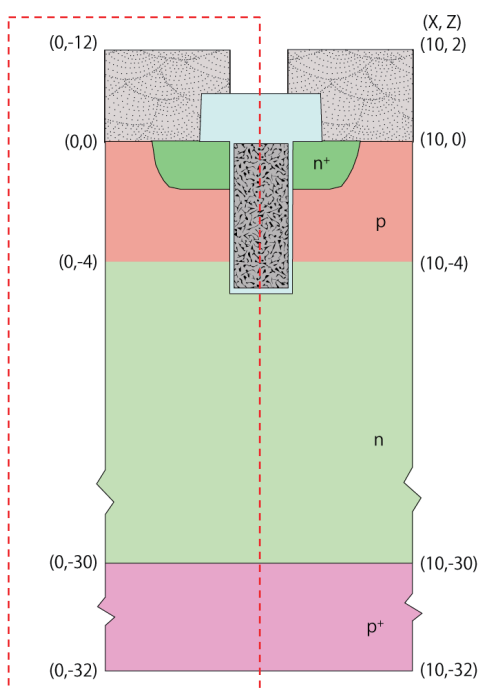


- 構造Cでのみラッチアップが発生。
- 構造Bでは、2次元の計算と異なりラッチアップは発生しなかった。

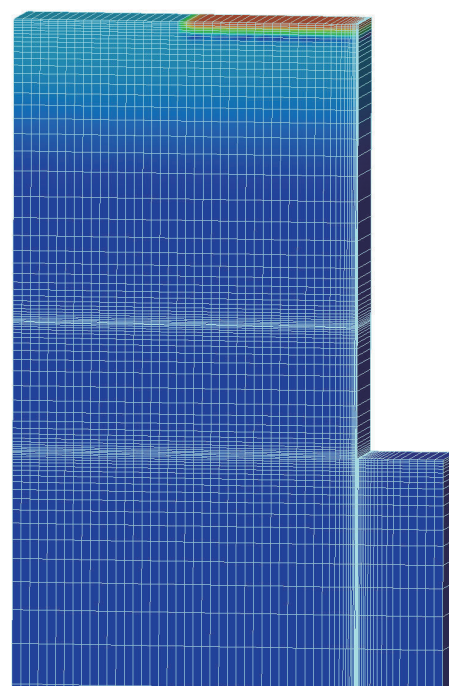


Si-IGBTのデバイスシミュレーション

IGBT断面構造



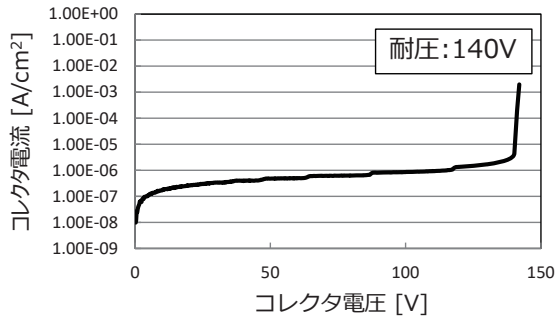
デバイスシミュレータ用メッシュ
(上部のみ拡大)



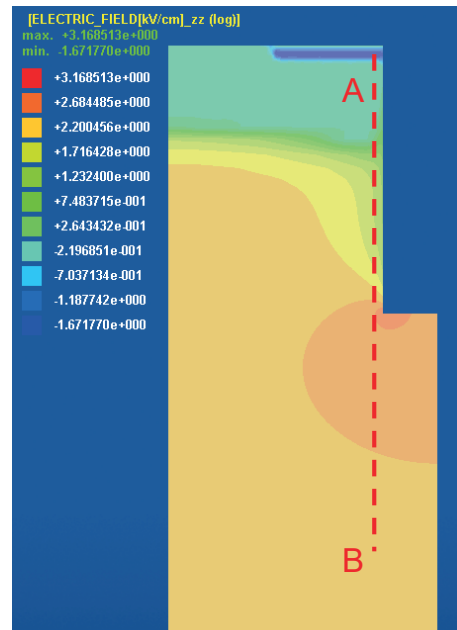
左右対称なので、反射境界条件により片側領域のみで計算。

Si-IGBTのデバイスシミュレーション

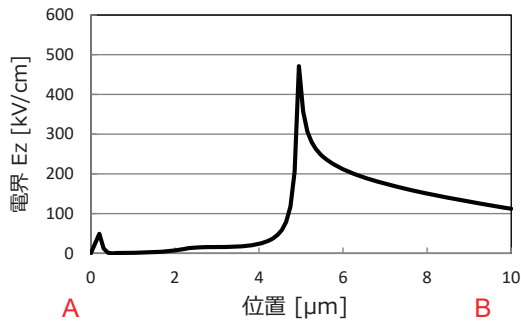
Si-IGBT耐圧計算結果



コレクタ電圧140Vのときの深さ方向電界分布



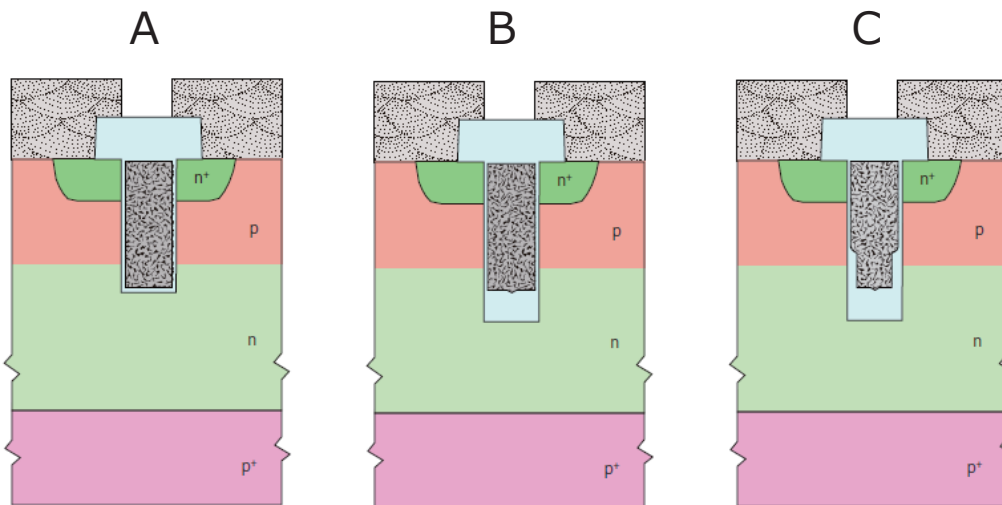
深さ方向電界（絶対値）分布



Si-IGBTのデバイスシミュレーション

Si-IGBT耐圧のトレンチゲート構造依存性調査

トレンチゲート電界が緩和されると予想



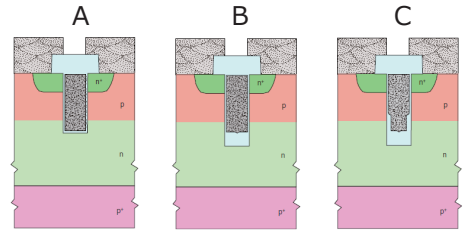
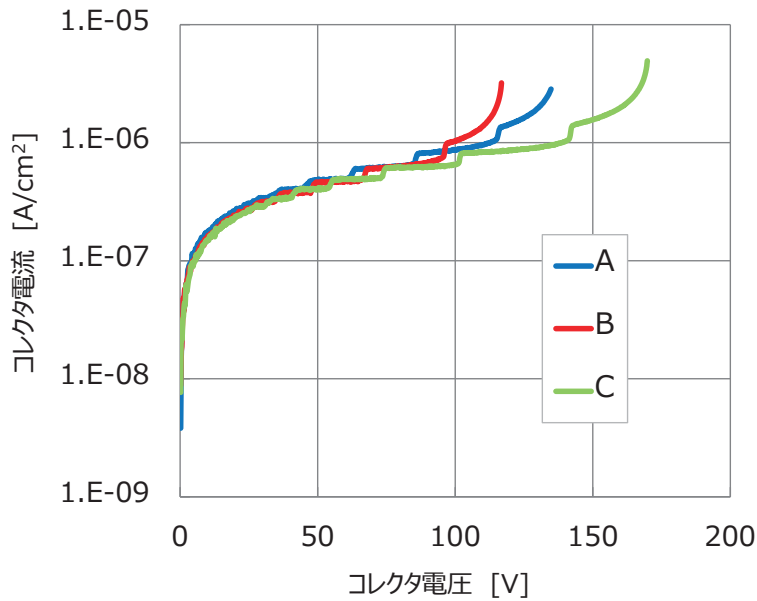
※トレンチを深くした。

※トレンチを深くし、ポリシリコンに段差を設けた。

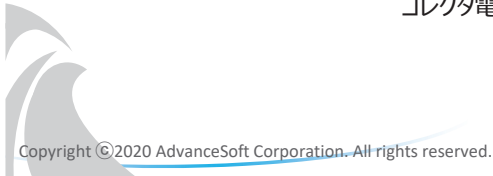
Si-IGBTのデバイスシミュレーション

Si-IGBT耐圧のトレンチゲート構造依存性調査

耐圧計算結果

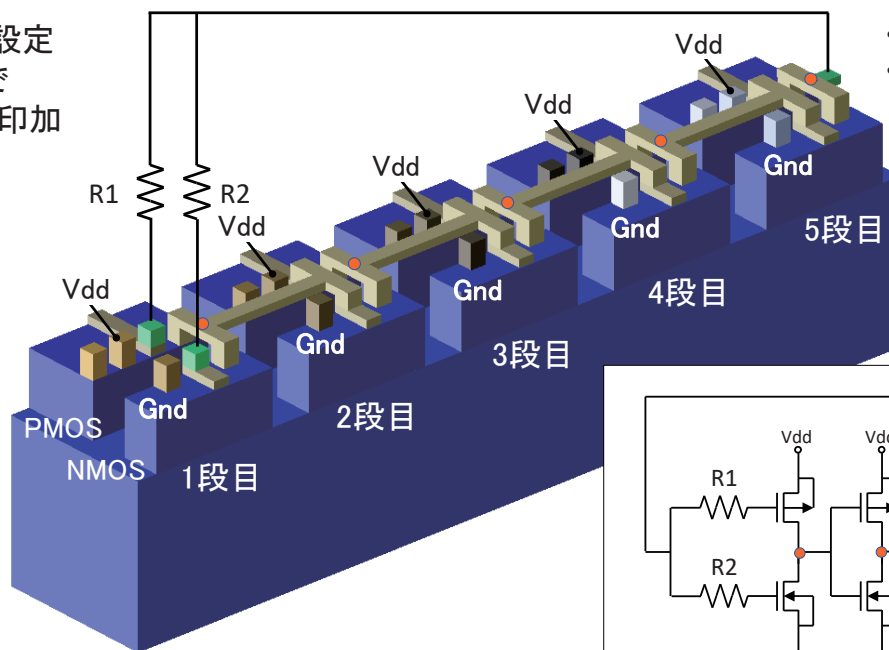


- 構造Cは構造Aよりも耐圧向上した。
- 構造Bは構造Aよりも耐圧が悪化した。

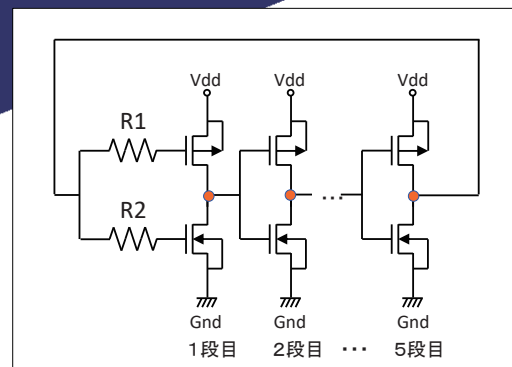


5段CMOSリングオシレータの過渡解析

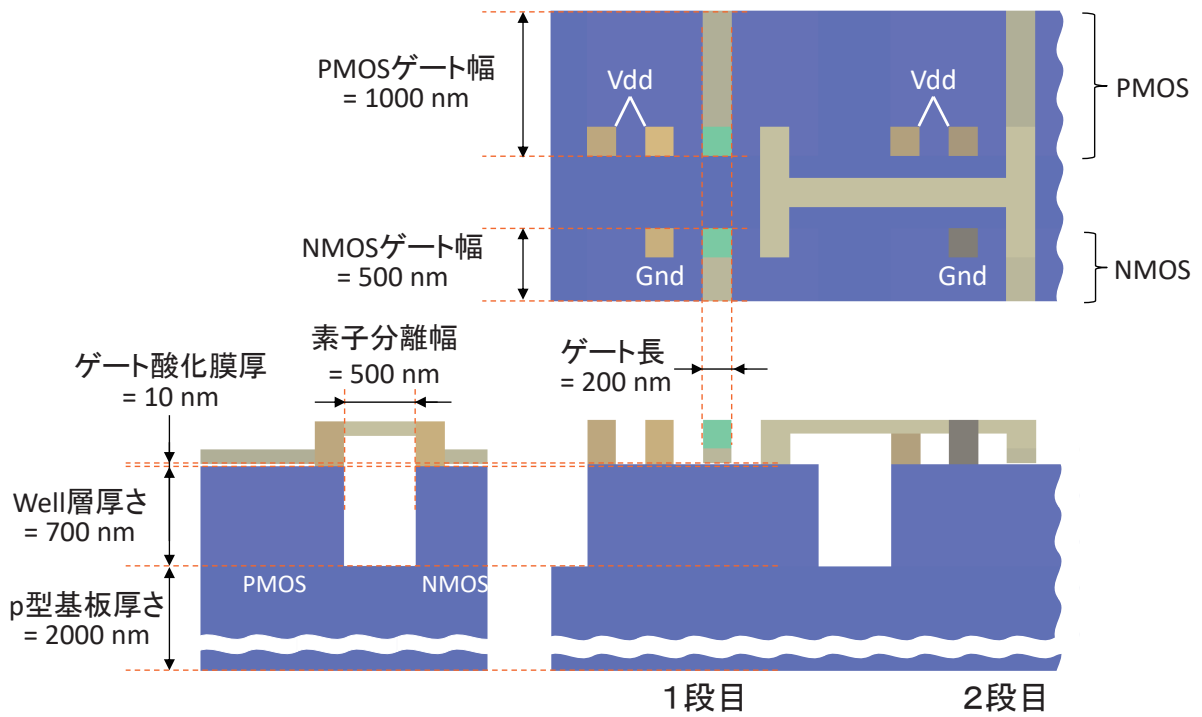
バイアス設定
時刻t=0で
Vdd = 2 V印加



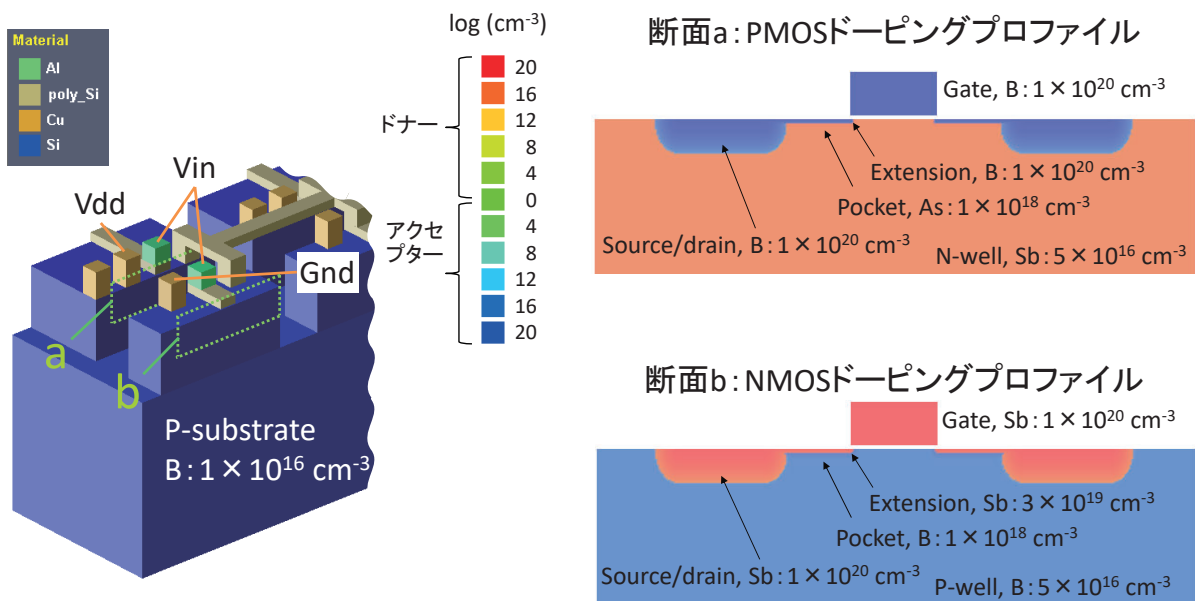
- SiO₂は非表示。
- ● は電位測定点



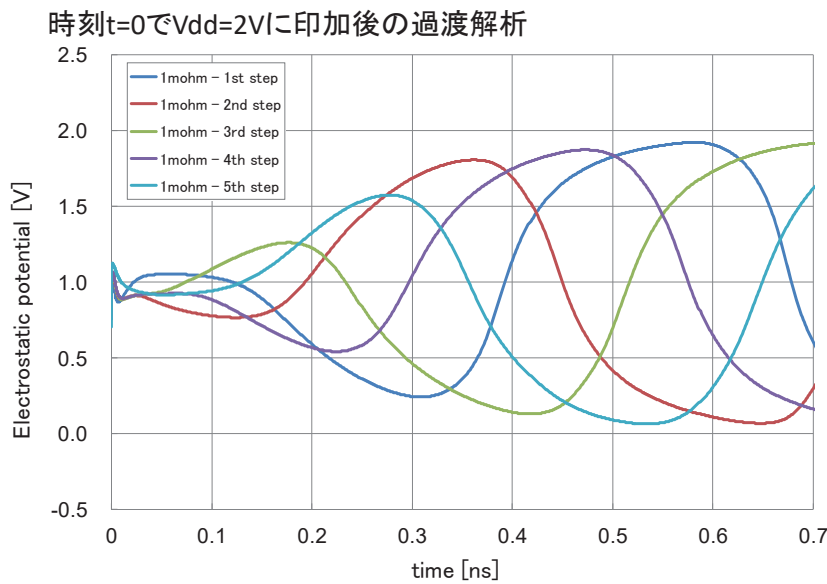
5 段CMOSリングオシレータの過渡解析



5 段CMOSリングオシレータの過渡解析



5段CMOSリングオシレータの過渡解析

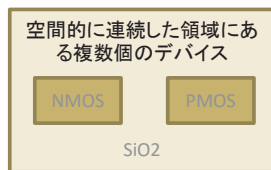


※静電ポテンシャルはゼロバイアス時の値からの相対値

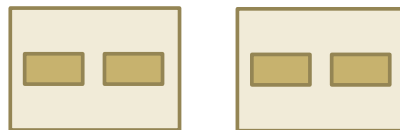
複数段CMOSリングオシレータの一括解析が可能。

回路と複数デバイスの連成解析例

デバイスシミュレーション
解析対象の基本単位

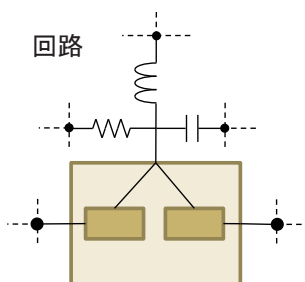


複数デバイス解析機能

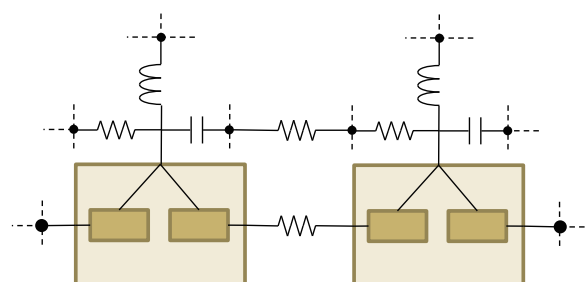


空間的に隔離された
複数個のデバイスシミュレーション領域

回路との連成解析機能



回路+複数デバイスの連成解析機能



回路と複数デバイスの連成解析例

デバイスシミュレータ入力ファイル

デバイスシミュレータソルバー

- デバイスシミュレーション機能
- 熱過渡解析機能

回路シミュレーション機能 (spice3f5)

コントロールファイル

メッシュファイル

回路との連成解析機能入力ファイル

回路ファイル
(spice3f5形式)
回路を定義

接続情報ファイル
デバイスsim.の電極と回路のノードの接続関係を定義

複数デバイス解析機能入力ファイル

コントロールファイル

メッシュファイル

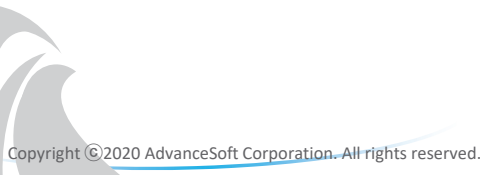
コントロールファイル

メッシュファイル

...

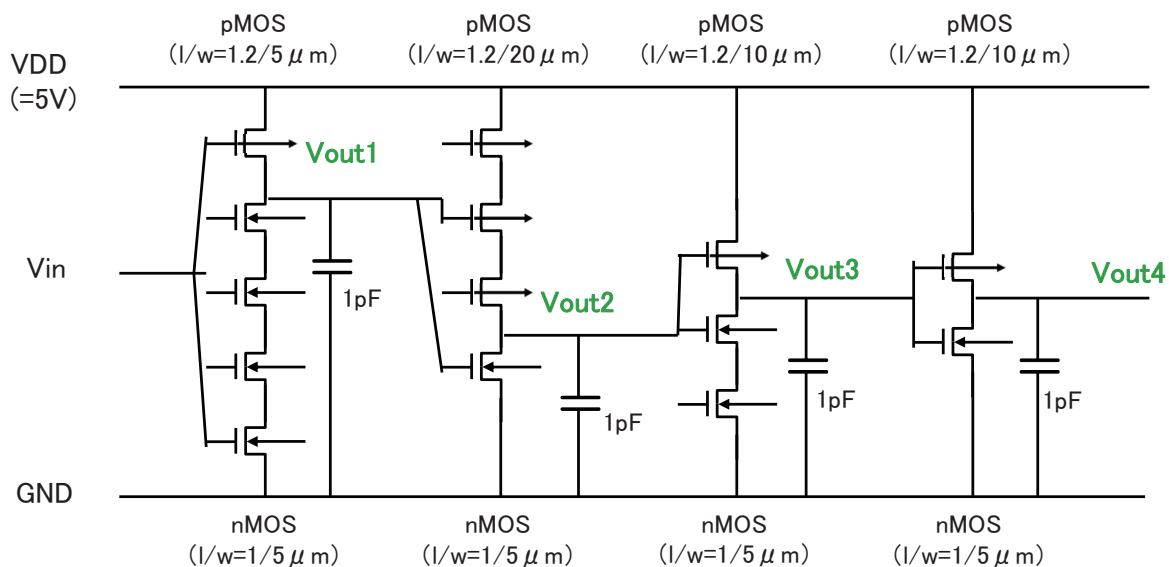
...

リストファイル
追加したデバイス領域に対応するメッシュファイルとコントロールファイルのリスト

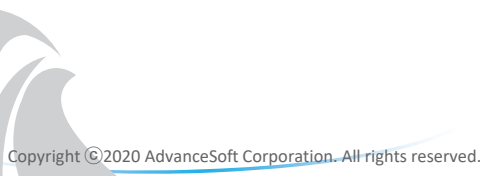


回路と複数デバイスの連成解析例

解析対象回路:4段CMOSインバータ (※spice3f5 に内包のモデルから抜粋)

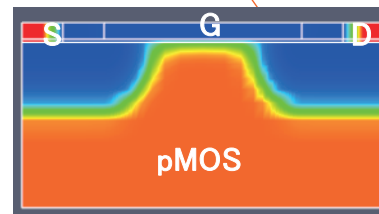
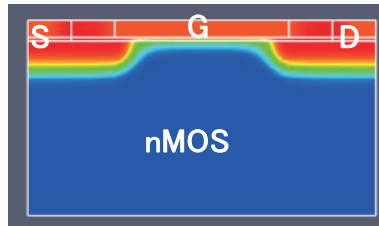
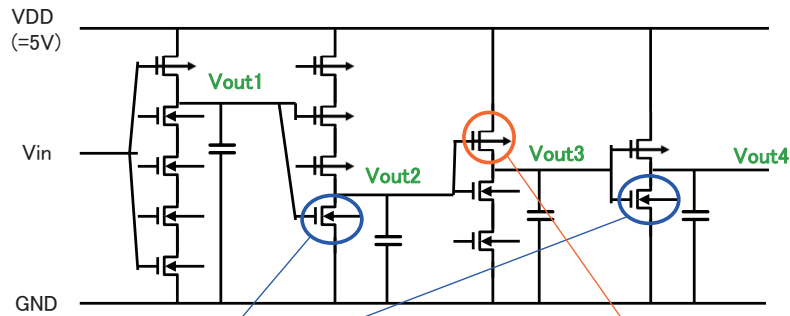


nMOS共通: $T_{ox} = 19.8\text{nm}$ 、 $V_{th} = 0.69486\text{V}$
 pMOS共通: $T_{ox} = 19.8\text{nm}$ 、 $V_{th} = -0.60865\text{V}$



回路と複数デバイスの連成解析例

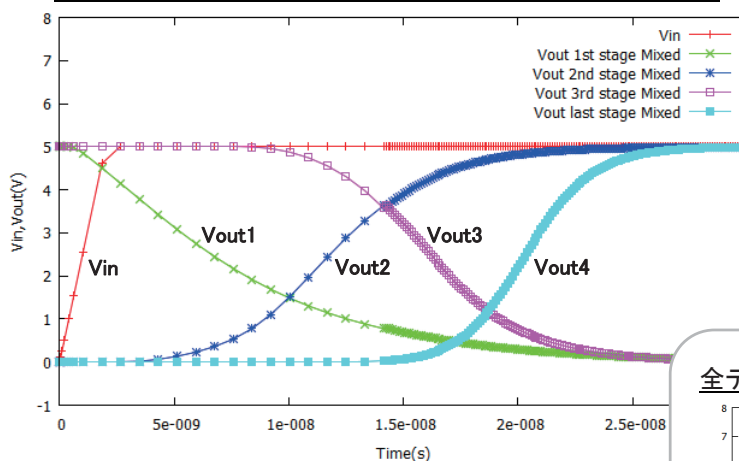
バイアス条件:
時刻0~2nsの間にVinをGNDからVDD(=5V)に時間按比例して上げる。



2、4段目のnMOSと3段目のpMOSをデバイスシミュレーションモデルとして置き換え、それ以外を回路モデルのまま連成解析を実施。

回路と複数デバイスの連成解析例

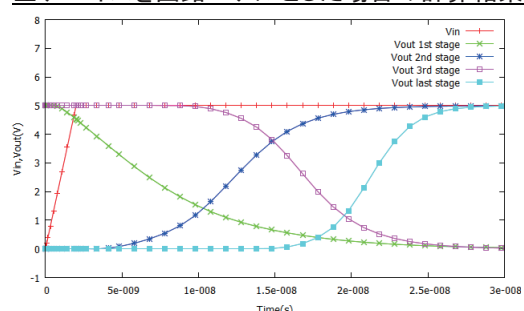
2、4段目nMOSと3段目pMOSを
デバイスシミュレーションモデルとした場合の計算結果



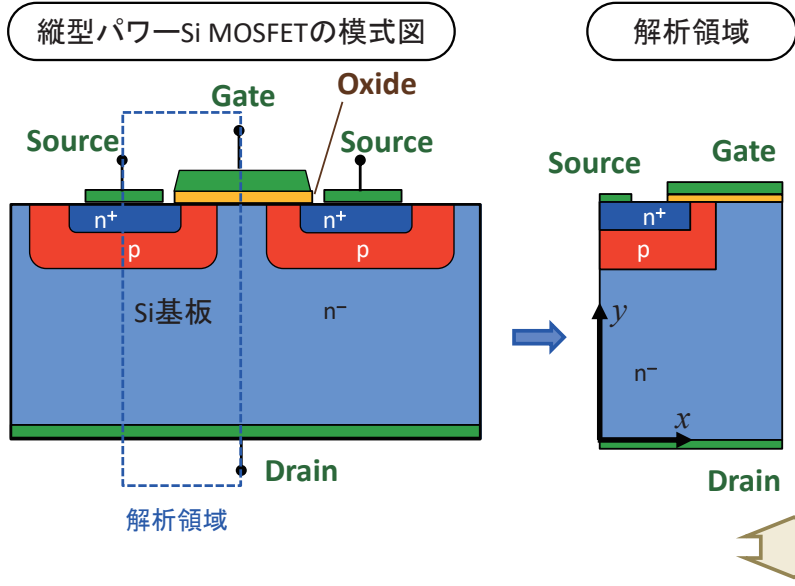
バイアス条件:
時刻0~2nsの間にVinをGNDからVDD(=5V)に時間按比例して上げる。

- インバータ動作を再現した。
- 回路モデルのみを使用した結果とも一致した。

全デバイスを回路モデルとした場合の計算結果



縦型パワーSi MOSFETの熱解析事例



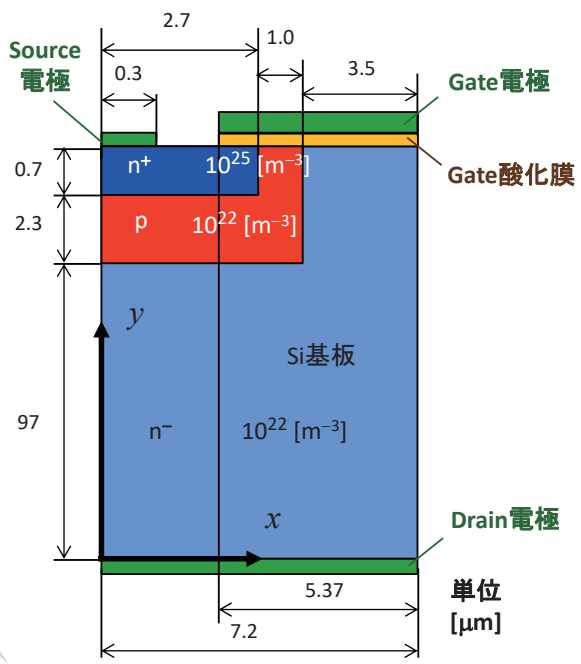
縦型パワーSi MOSFETの発熱特性(温度変化、I-V特性変化)をAdvance/TCAD デバイスシミュレータで3次元解析する。

温度変化については下記論文と比較する。
(※形状、解析条件を極力一致させた)

比較対象論文(2次元計算)
Kibushi, Risako, et al. "Calculation of Temperature Distribution of Power Si MOSFET with Electro-Thermal Analysis: The Effect of Boundary Condition." Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging 7.1 (2014): 52-57.
内容：自作プログラムによる2次元半導体デバイスの熱・電気連成解析

縦型パワーSi MOSFETの熱解析事例

デバイスシミュレーション形状、不純物設定、解析条件



● 電極電圧 Gate電極 V_G 20 [V]
Drain電極 V_D 5~15 [V]
Source電極 V_S 0 [V]

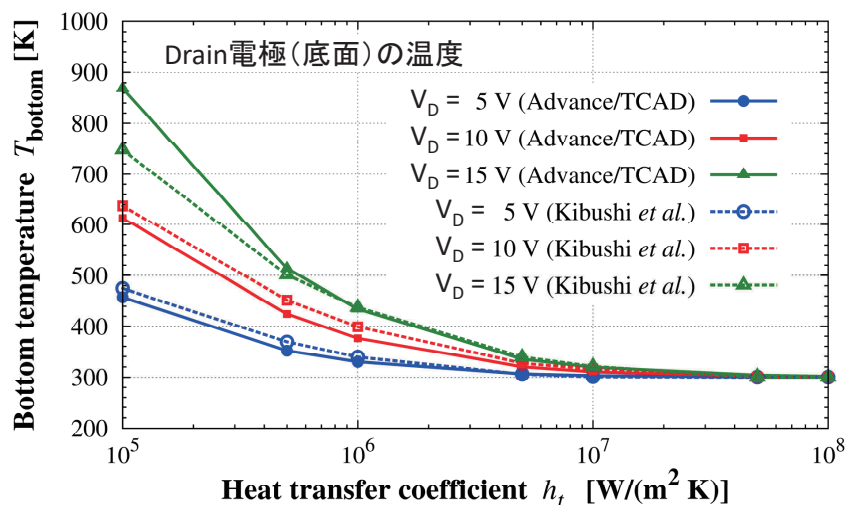
● 格子の熱伝導率の温度依存性(冪乗則)
$$\kappa_L = 154.86 \times \left(\frac{T_L}{300}\right)^{-4/3} \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$$

● Drain電極(底面)の境界条件:
熱抵抗条件: $q_b = h_t (T_L - T_{outer})$
熱伝達率 $h_t = 10^5 \sim 10^8 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$
外気温度 $T_{outer} = 300 \text{ [K]}$
(※ 他の面の境界条件は、断熱条件)

縦型パワーSi MOSFETの熱解析事例

デバイス底面温度のドレイン電圧および熱伝達率依存性

(※点線は論文の計算結果)

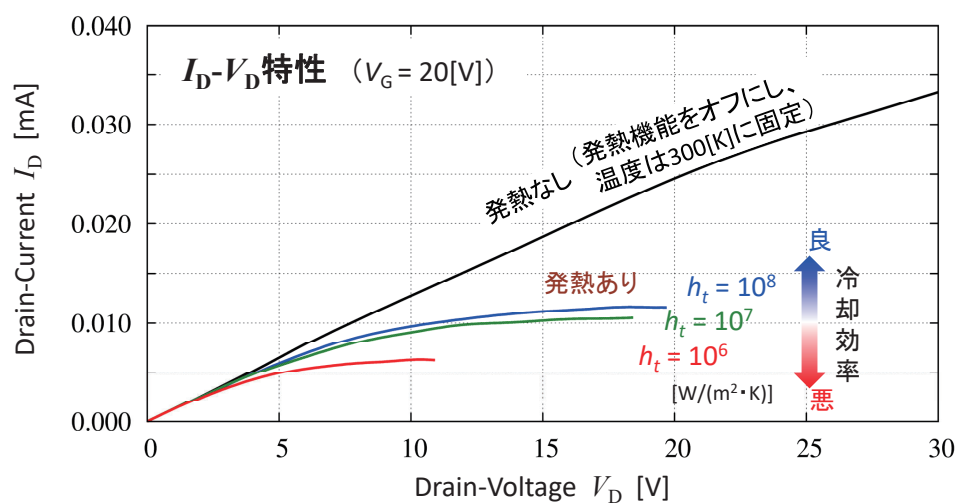


- ドレイン電圧の増加に伴い、温度が上昇する。
- 熱伝達率の低下に伴い、温度が上昇する。



縦型パワーSi MOSFETの熱解析事例

電流-電圧 (I_D - V_D) 特性の熱伝達率依存性

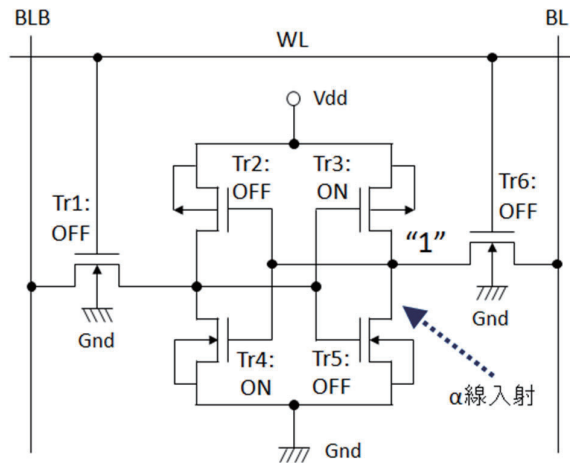


- V_D が2V以下の定電流領域では、“発熱なし”と“発熱あり”で、 I_D - V_D 特性は、ほぼ一致。
- V_D が2V以上では、“発熱あり”の場合に熱伝達率 h_t が小さくなると、電流値が低下する。



SRAMソフトウェア解析例

SRAMソフトウェアの原理

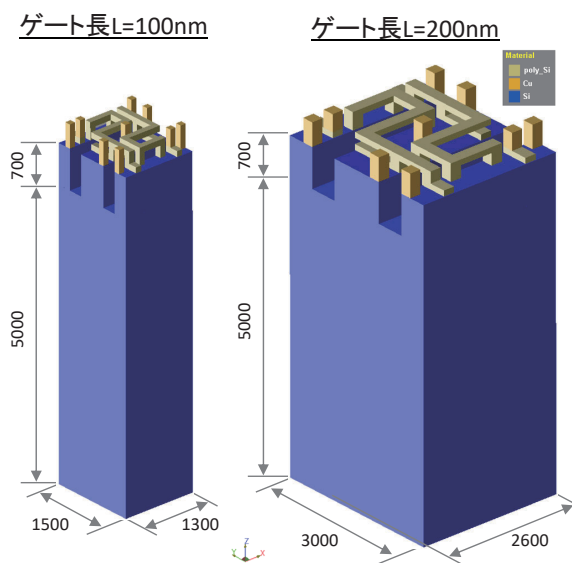


※各トランジスタのON、OFFはアルファ線入射前の初期状態を表す。

- ① SRAMのインバータ出力部の拡散層付近にα線が入射し、電子・正孔対が発生する。
- ② pnジャンクション近傍で発生した電子と正孔は、ドリフト・拡散により、それぞれn型とp型領域に移動する。
- ③ インバータの出力部に移動してくる電子や正孔による電位でビットが反転した場合、ソフトウェアとなる。図ではビット“1”が“0”に反転する。

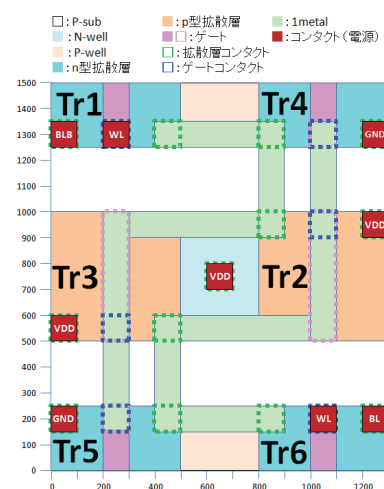
SRAMソフトウェア解析例

SRAM解析モデル(構造2種類)



L=100nmモデルのレイアウト

(※L=200nmモデルは寸法が2倍)



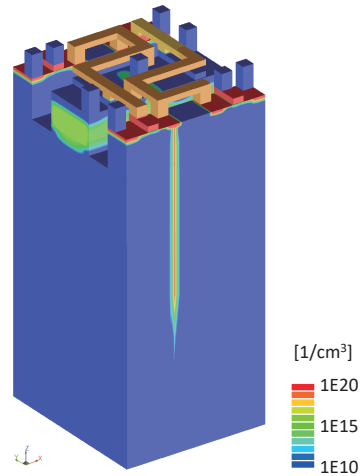
- 6個のトランジスタと2本の配線を1つのデバイスシミュレーションモデルとして作成した。
- L=100nmとL=200nmのゲート酸化膜厚は、それぞれ5nmと10nmとした。
- L=100nmのモデルの基板、p-well、n-wellの不純物濃度はL=200nmのモデルの2倍に設定した。

SRAMソフトエラー解析例

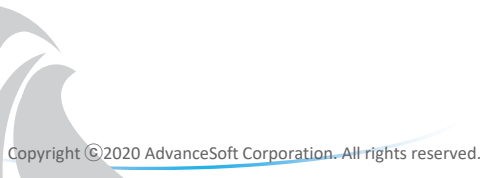
α線入射条件

解析条件	解析モデル	α線の入射エネルギー[MeV]
1	L=100nm	0.057
2		0.696
3	L=200nm	0.696
4		0.865

α線入射直後の電子密度分布
(L=200nm、E=0.696MeV)



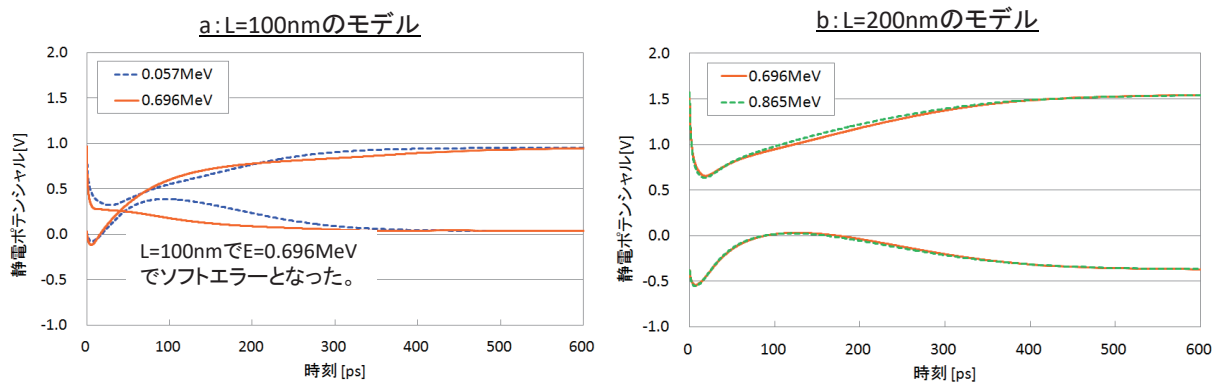
- α線がTr5のドレイン側拡散層に真上から入射したと仮定し、入射エネルギーに応じて電子・正孔対を配置した。
- 一对の電子・正孔対を発生させるのに3.6eVが必要であるとして発生個数を概算した。
- Siの電子的阻止能を 2.094×10^3 (MeV/cm)として、α線の侵入深さを概算した。



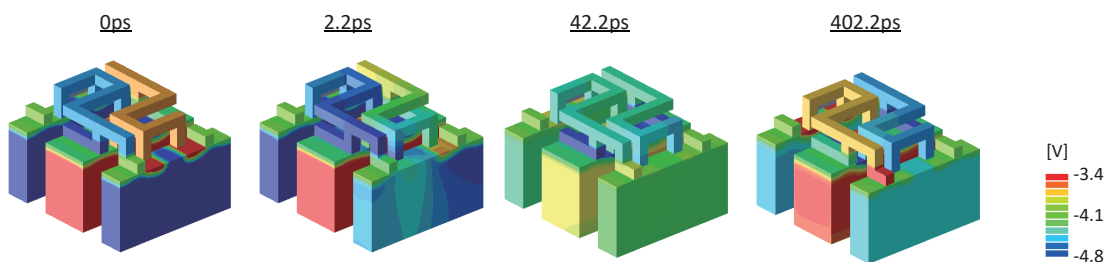
SRAMソフトエラー解析例

解析結果

α線入射後のインバータ間配線の静電ポテンシャルの時間変化



L=100nmでE=0.696MeVの場合(ソフトエラー発生)の静電ポテンシャル分布の時間変化



まとめ

- Advanct/TCADはIoT時代のデバイス開発で必要とされる以下のような機能を備えています。
 - ・光・電磁波との連成解析
 - ・複数デバイスや外部回路との一括解析
 - ・熱解析
- アドバンスソフトが自社開発しており、ライセンス販売だけではなく、受託解析、機能追加等、お客さまのご要望に臨機応変に対応いたします。

ご清聴ありがとうございました。



(参考資料)

アドバンスソフト株式会社のご紹介

アドバンスソフトの電磁波解析、半導体デバイス解析のご紹介セミナー
～IoTを支える数値解析シミュレーションのご紹介～

2020年8月25日（火）

アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

会社概要

事業部	部	業務概要
総合企画部		全社方針の策定、コンサルティングサービス・受託解析サービスの提供などを行っています。
研究開発部門	研究開発センター	地球科学を中心とした事業を企画・推進します。
	リスク研究開発センター	原子力分野に関するPRAを中心としてリスク研究開発に係る事業を企画・推進します。
	熱流動エンジニアリングセンター	原子力、管路系、気液二相流等の熱流動エンジニアリング事業を推進・拡大します。
	原子力安全工学センター	原子力分野に関する安全工学に係る事業を推進・拡大します。
第1事業部	ナノシミュレーション研究開発センター	先端的なナノシミュレーション事業および関連する国プロを企画・推進します。
	技術第1部	ナノ材料分野に係る第一原理計算の開発および解析と合わせパッケージの販売に関する事業、また、分子動力学計算・量子化学計算などを行っています。
	技術第2部	プリポストシステム開発、連成システム開発、構造・音響解析などのエンジニアリング、構造解析ソルバーの開発などを行っています。
	技術第6部	次世代TCADシステムの開発およびそれを利用した半導体解析を中心とした電機分野に関する事業を行っています。また、バイオ分野の業務も実施しています。
	技術第8部	材料設計統合システムの開発、および、関連する先端的なナノ分野の事業展開を行います。
第2事業部	技術第4部	燃焼・爆轟に係る流体解析ソルバー開発、混相流に係る次世代流体解析システム開発、流体解析ソルバーの受託開発・カスタマイズなどを行っています。
第3事業部	技術第3部	乱流・燃焼・化学反応等に係る次世代流体解析システム開発、次世代流体解析システムの保守・販売サポートなどを行っています。
	技術第7部	中性子に関する実験支援サービス、AI、制御システム開発、および、モデルベース設計に関する事業などを行っています。
第4事業部	技術第5部	シビアアクシデントおよびPRAを中心とした原子力安全解析に関する事業などを行っています。
	技術第9部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析などを行っています。
関西支店		西日本地区での活動拠点であり、営業活動およびナノシミュレーションを中心とした研究開発を含む業務全般を行っています。
東海事業所		研究開発を含む業務全般を行っています。

名称 アドバンスソフト株式会社
(AdvanceSoft Corporation)

本社 〒101-0062
東京都千代田区神田駿河台4-3
新お茶の水ビル17階
TEL: 03-6826-3970
FAX: 03-5283-6580

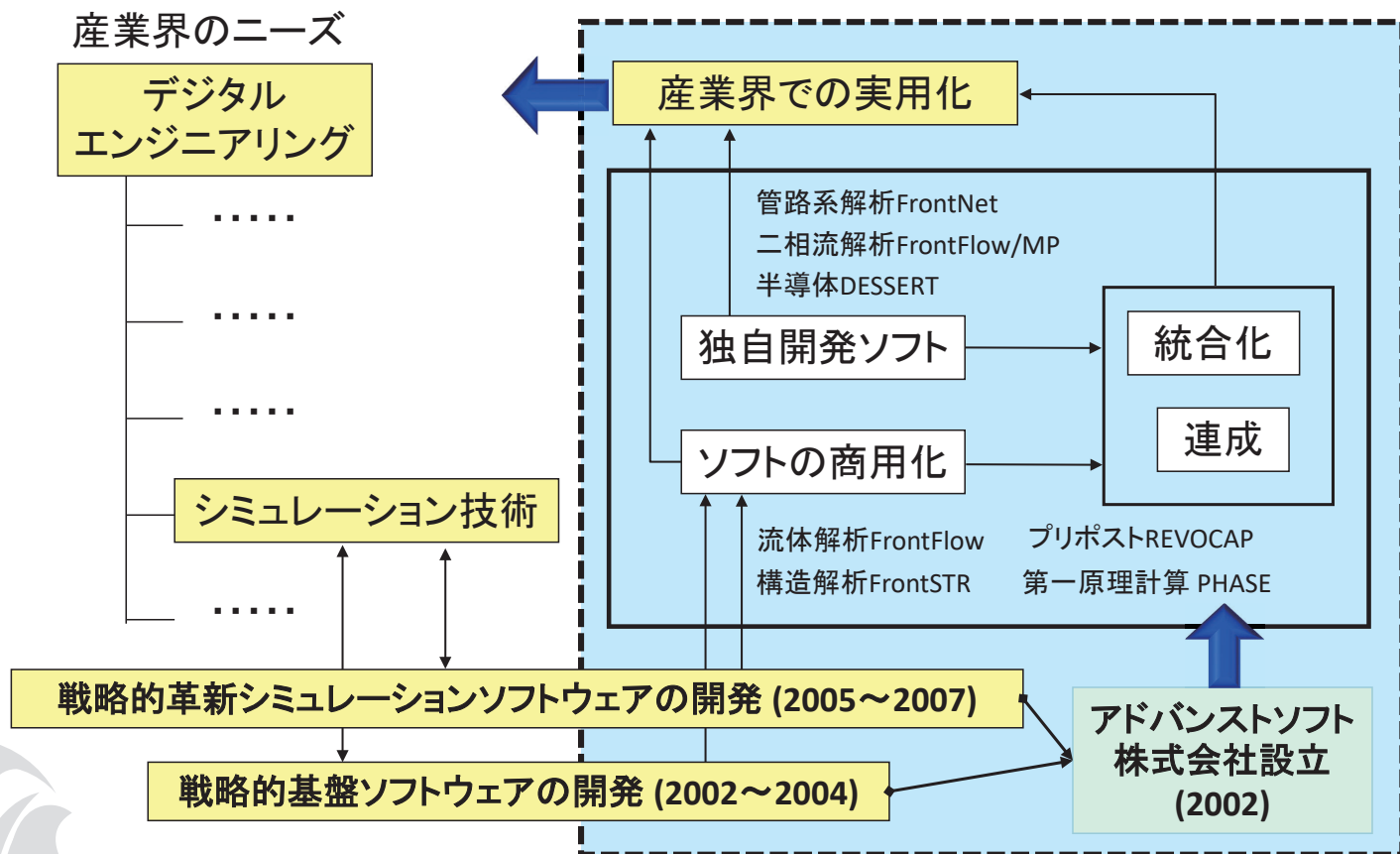
設立 2002年(平成14年)4月24日

資本金 3,724万円

社員数 104名(2020年8月20日時点)

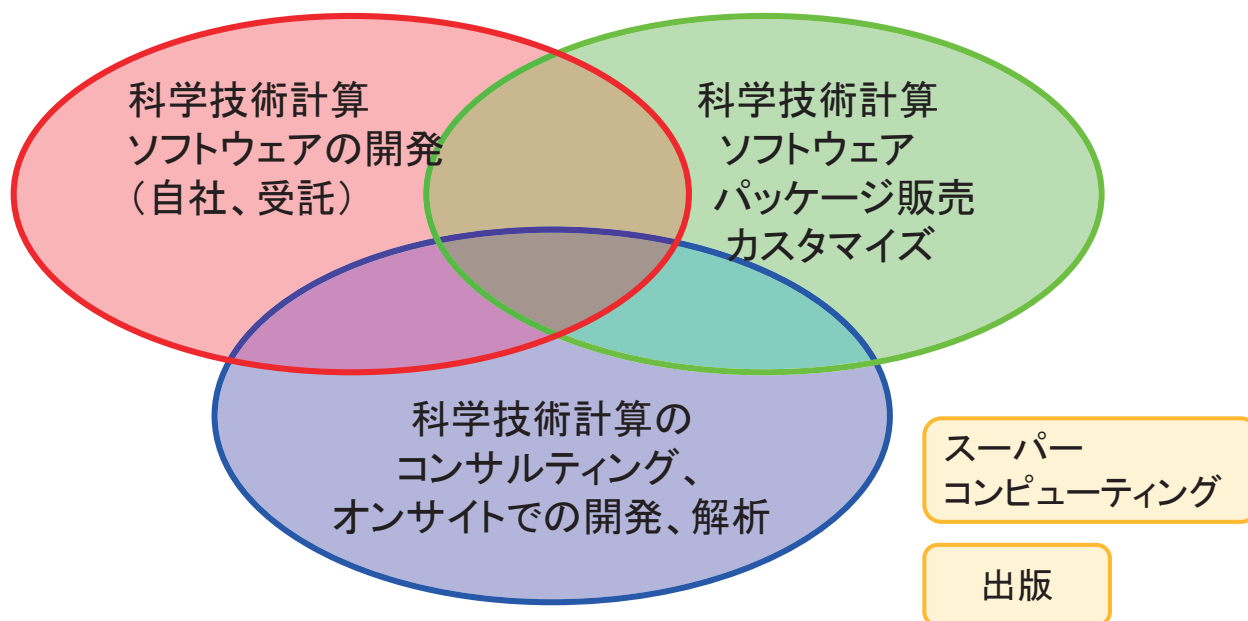
Copyright ©2020 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

アドバンスソフトとは



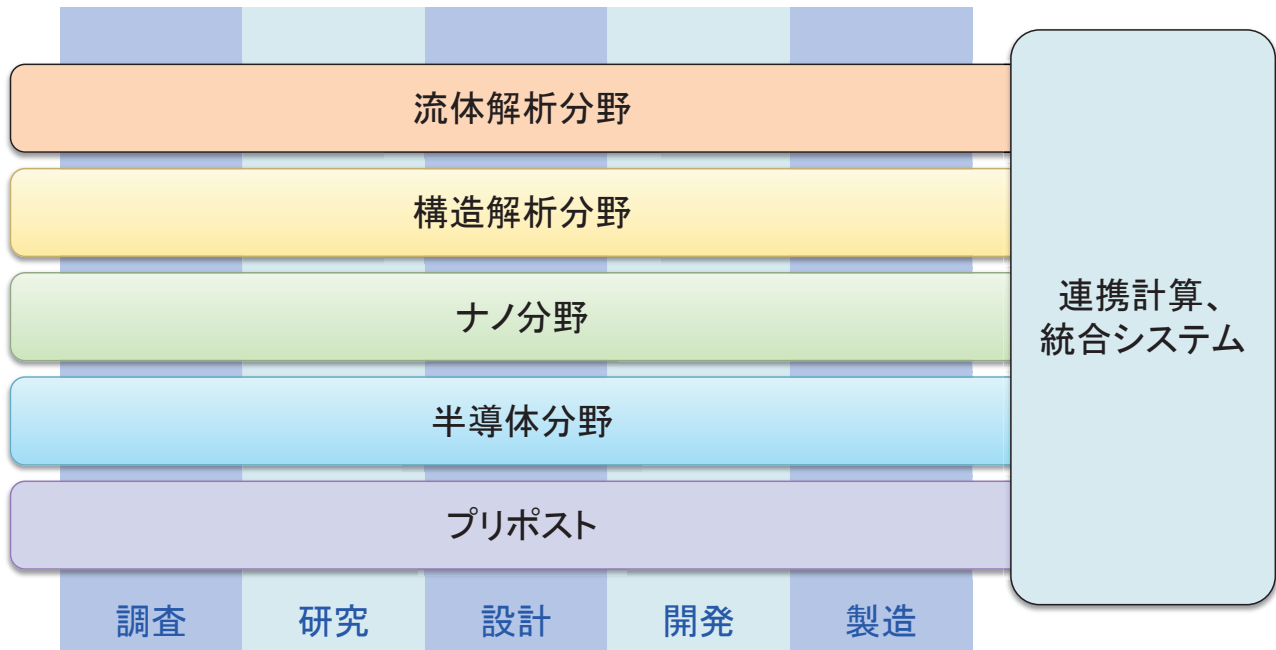
事業内容

アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、科学技術計算によるソリューションをご提供します。

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE Advance/NanoLabo</p>	<p>構造・音響</p> <p>Advance/FrontSTR Advance/FrontNoise</p>	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red Advance/FrontFlow/FOCUS</p> <p>Advance/FrontFlow/MP</p> <p>Advance/FrontNetシリーズ</p>	
<p>半導体・光／電磁波</p> <p>Advance/TCAD Advance/ParallelWave</p>	<p>プリポスト</p> <p>Advance/REVOCAP</p>		

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP(www.advancesoft.jp)をご参照ください。

パッケージソフトウェアの解析事例

解析事例Webページをご覧ください。

アドバンスソフト 事例集

検索

<http://case.advancesoft.jp>

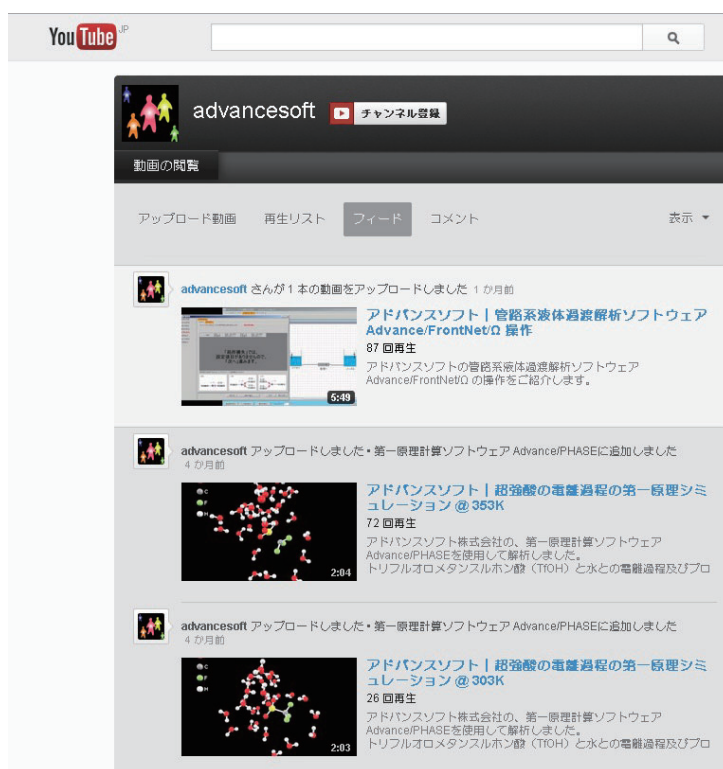
- ソフトウェア名からだけでなく、産業分野別、解析分野別の検索が可能となりました。
- 最新の事例を掲載しました。今後も逐次最新事例を紹介します。

産業分野別	解析分野別
自動車・運輸	流体
材料・化学	爆発・燃焼
産業機械	構造
航空宇宙	振動音響
エレクトロニクス	ナノ・バイオ
建設土木	プリポスト
原子力	半導体デバイス
エネルギー	光・電磁波
環境・防災	

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>





警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。