

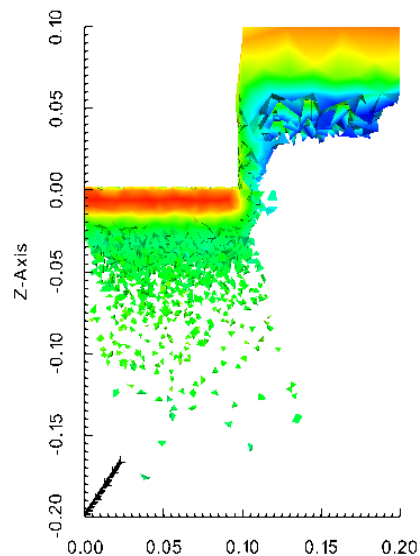
オンラインセミナー

アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介 ～DX、グリーンイノベーションを加速する数値解析シミュレーション～

2022年11月17日(木) 開催

プログラム

- | | | |
|----|---------------------------------------------------|----|
| 1. | アドバンスソフト株式会社のご紹介 主催者あいさつ | 1 |
| 2. | 半導体デバイス 3次元 TCAD システム Advance/TCAD のご紹介 | 5 |
| 3. | 電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave のご紹介 | 35 |
| 4. | 電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave の高速化技術のご紹介 | 43 |
| 5. | 関連サービスのご紹介 | 53 |



アドバンスソフト株式会社のご紹介

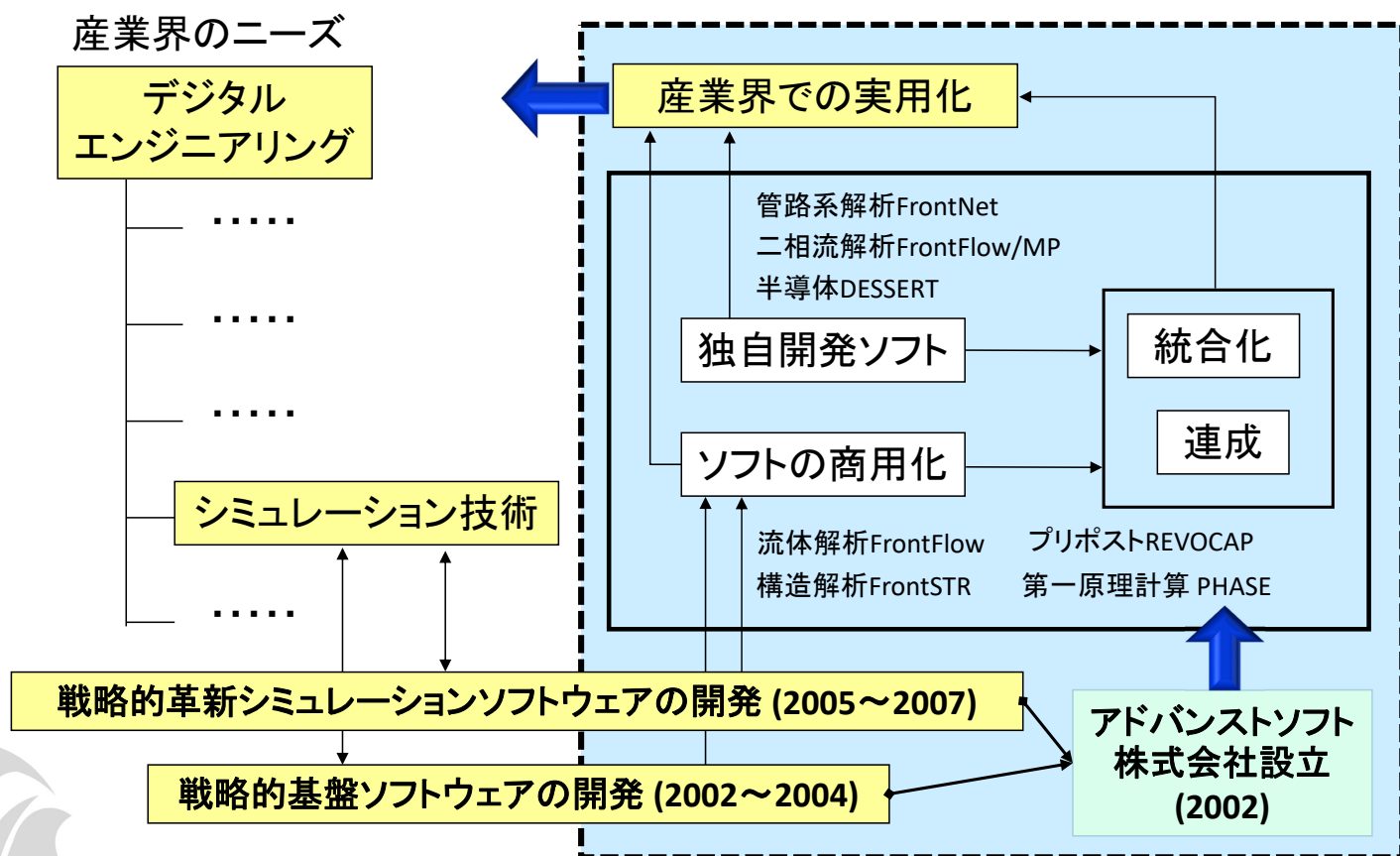
アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介セミナー
～ DX、グリーンイノベーションを加速する

数値解析シミュレーションのご紹介 ～

2022年11月17日（木）開催

アドバンスソフト株式会社

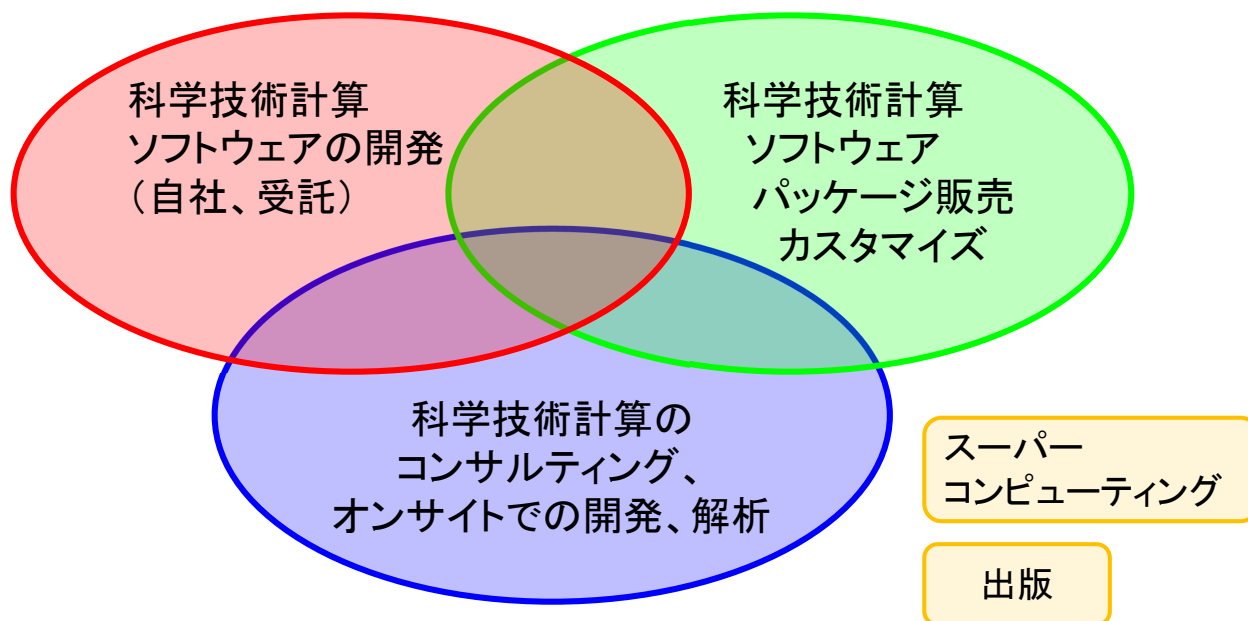
アドバンスソフトとは





事業内容

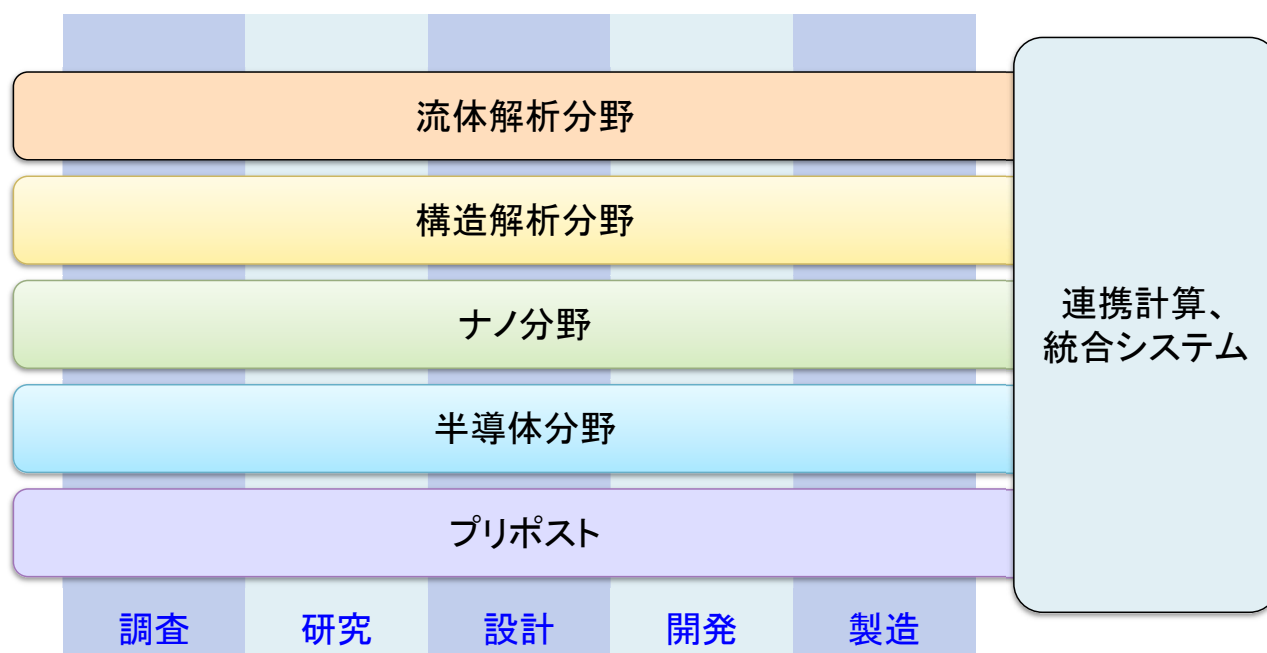
アドバンスソフトがご提供するサービス



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。

ソフトウェアご紹介

<p>第一原理計算ソフトウェア Advance/PHASE</p> <p>密度汎関数理論に基づき、物質の性質を原子・分子レベルから解析する第一原理計算ソフトウェアです。</p>	<p>ナノ材料 GUI 付属</p> <p>ナノ材料解析統合 GUI Advance/NanoLabo</p> <p>ナノ材料 プリポスト</p> <p>材料解析ソフトウェア QuantumESPRESSO と LAMMPS に対応した統合 GUI です。</p>	<p>流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red</p> <p>非圧縮性から圧縮性流れまで、広範囲で複雑な流れに対応した汎用 3 次元流体解析ソフトウェアです。</p>	<p>圧縮性流体解析ソルバー Advance/FOCUS-i</p> <p>非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーです。特に遷音速や超音速の流れに適しており、高い並列化効率で計算出来ます。</p>
<p>大規模 3 次元 TCAD システム Advance/TCAD</p> <p>超微細半導体デバイスからパワーデバイスまで、高度な機能と使いやすい GUI を備えた 3 次元 TCAD システムです。</p>	<p>半導体デバイス GUI 付属</p> <p>ニューラルネットワーク分子動力学システム Advance/NeuralMD</p> <p>ナノ材料 AI・機械学習</p> <p>Neural Network Potential に基づいた分子動力学のソフトウェアです。第一原理計算の結果を教師データとして分子力場を作成します。</p>	<p>気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP</p> <p>沸騰と凝縮を伴う気液二相流の流動特性や伝熱特性を 3 次元で解析するソフトウェアです。</p>	<p>管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet</p> <p>配管や流体機器から成る管路系内流体に対する 1 次元過渡解析の実用的なソフトウェアです。</p>
<p>大規模電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave</p> <p>マクスウェル方程式を FDTD 法で 3 次元的に解く電磁波解析ソフトウェアです。アンテナの電波解析から光の干渉や回折を考慮した光波解析まで幅広く適用できます。</p>	<p>光波・電磁波</p> <p>構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR</p> <p>構造</p> <p>固体の変形や熱伝導を、有限要素法を用いた 3 次元で解析するソフトウェアです。</p>	<p>大気拡散影響予測システム Advance/Emerg</p> <p>大気拡散物質の挙動予測と影響評価のためのソフトウェアシステムです。</p>	<p>AI・機械学習</p> <p>深層学習用ツール Advance/iMacLe</p> <p>機械学習のうち、ニューラルネットワークによる深層学習に特化、最小限度の機能に絞込んだ比較的軽いツールです。</p>
<p>汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP</p> <p>解析の一連の流れをスムーズに行う事を実現した汎用プリポストプロセッサです。</p>	<p>プリポスト</p> <p>音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise</p> <p>音響</p> <p>環境騒音、機器内の共振等における音場を有限要素法を用いた 3 次元で解析するソフトウェアです。</p>	<p>自社による開発 (国プロ含む) 開発チームによる質の高いサポートサービス カスタマイズや機能追加も応相談 並列数無制限 (追加料金なし)</p>	

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いたします。

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>



3次元TCADシステム Advance/TCADのご紹介

- 半導体業界をとりまく環境の動向
- Advance/TCADのご紹介

アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介セミナー
～DX、グリーンイノベーションを加速する数値解析シミュレーションのご紹介～
2022年11月17日（木）
アドバンスソフト株式会社

半導体業界をとりまく 環境の動向

グリーンイノベーション

2015年9月：国連サミットにてSDGs持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）が全会一致で採択。

2020年10月：政府が「2050年カーボンニュートラル（温室効果ガスの排出を実質ゼロ）」を宣言。

2020年12月：経済産業省が「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定し、NEDOに「グリーンイノベーション基金事業（～2030年で2兆円）」を立ち上げ。

2022年2月：NEDOプロジェクト「次世代デジタルインフラの構築（～2030年度で1410億円）」が採択。

NEDOプロジェクト「次世代デジタルインフラの構築」

事業概要

本事業では、カーボンニュートラル社会の実現に不可欠なデジタルインフラの省エネ化・高性能化に向けた研究開発・社会実装を進めるため、以下のテーマに取り組めます。

【研究開発項目1】次世代パワー半導体デバイス製造技術開発

【研究開発項目2】次世代パワー半導体に用いるウェハ技術開発

【研究開発項目3】次世代グリーンデータセンター技術開発

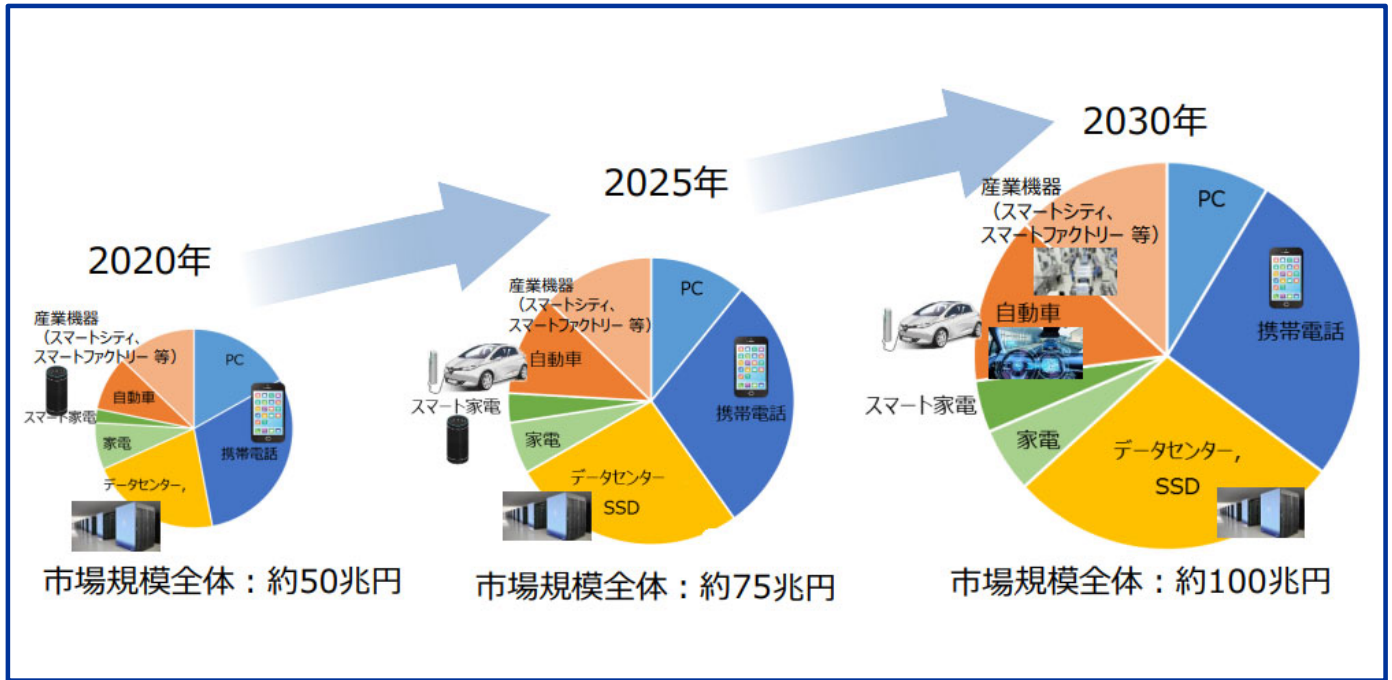
研究開発内容[1]光エレクトロニクス技術の開発

研究開発内容[2]光に適合したチップ等の高性能化・省エネ化技術の開発

研究開発内容[3]ディスプレイアグリゲーション技術の開発

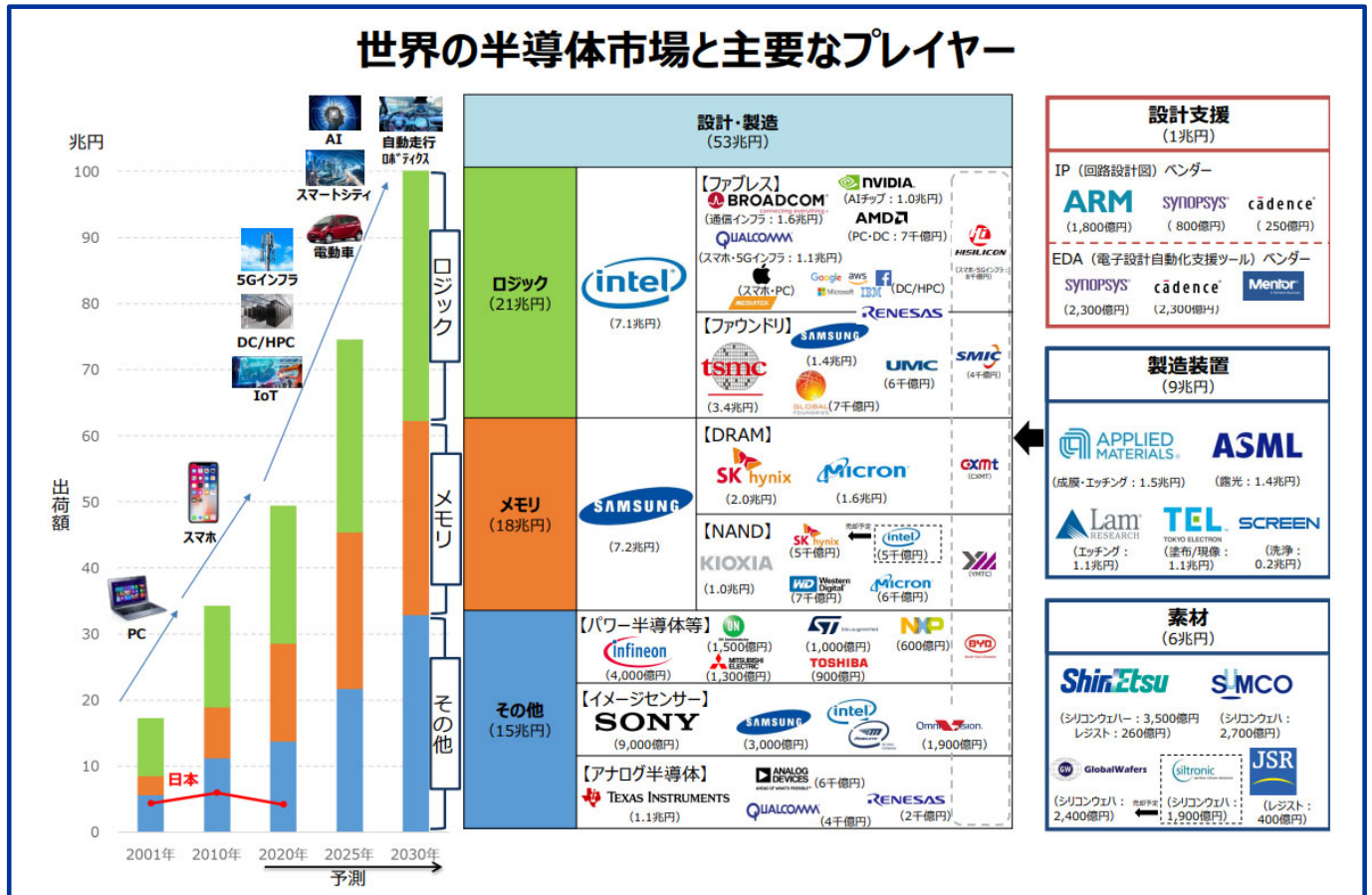
NEDOウェブサイトより抜粋 (https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100207.html)

DXに必要なIoT用半導体の市場規模



経済産業省資料より抜粋 (<https://www.meti.go.jp/press/2022/11/20221111004/20221111004-1.pdf>)

現在の主要プレイヤー



総務省資料より抜粋

(https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0001/05.pdf)

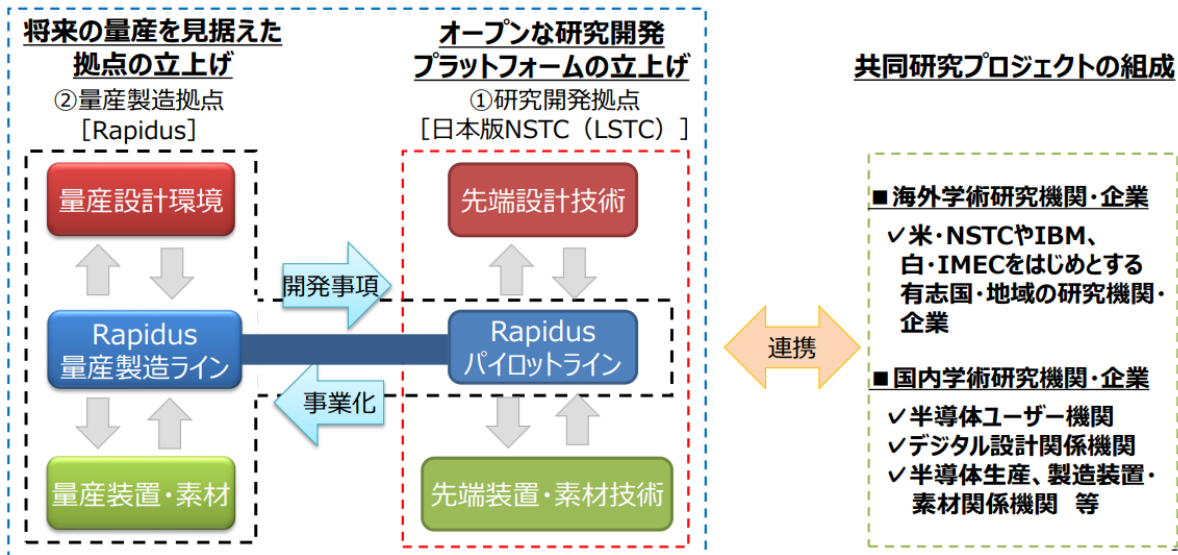


11/11: ニュース

次世代半導体を国産化(日経新聞記事) トヨタやNTT、新会社に出資 政府が700億円支援

次世代半導体プロジェクトの体制

- 次世代半導体 (Beyond 2nm) の短TAT量産基盤体制の構築実現に向け、
 - ① 先端設計、先端装置・素材の要素技術に係るオープンな研究開発拠点を立ち上げる。
[日本版NSTC (LSTC) ※] ※Leading-edge Semiconductor Technology Center
 - ② 将来の量産体制の立上げを見据えた量産製造拠点を立ち上げる。[Rapidus (株)]



経済産業省資料より抜粋 (<https://www.meti.go.jp/press/2022/11/20221111004/20221111004-1.pdf>)



半導体業界をとりまく環境の動向

- グリーンイノベーション推進のために、パワー半導体の開発が促進されようとしている。
- DX推進によるIoT向け半導体への継続的な需要増加に対応すべく、国内での次世代半導体開発が促進されようとしている。

アドバンスソフトは。。。

皆様の半導体開発の一助となれるように、サポートしてまいります。

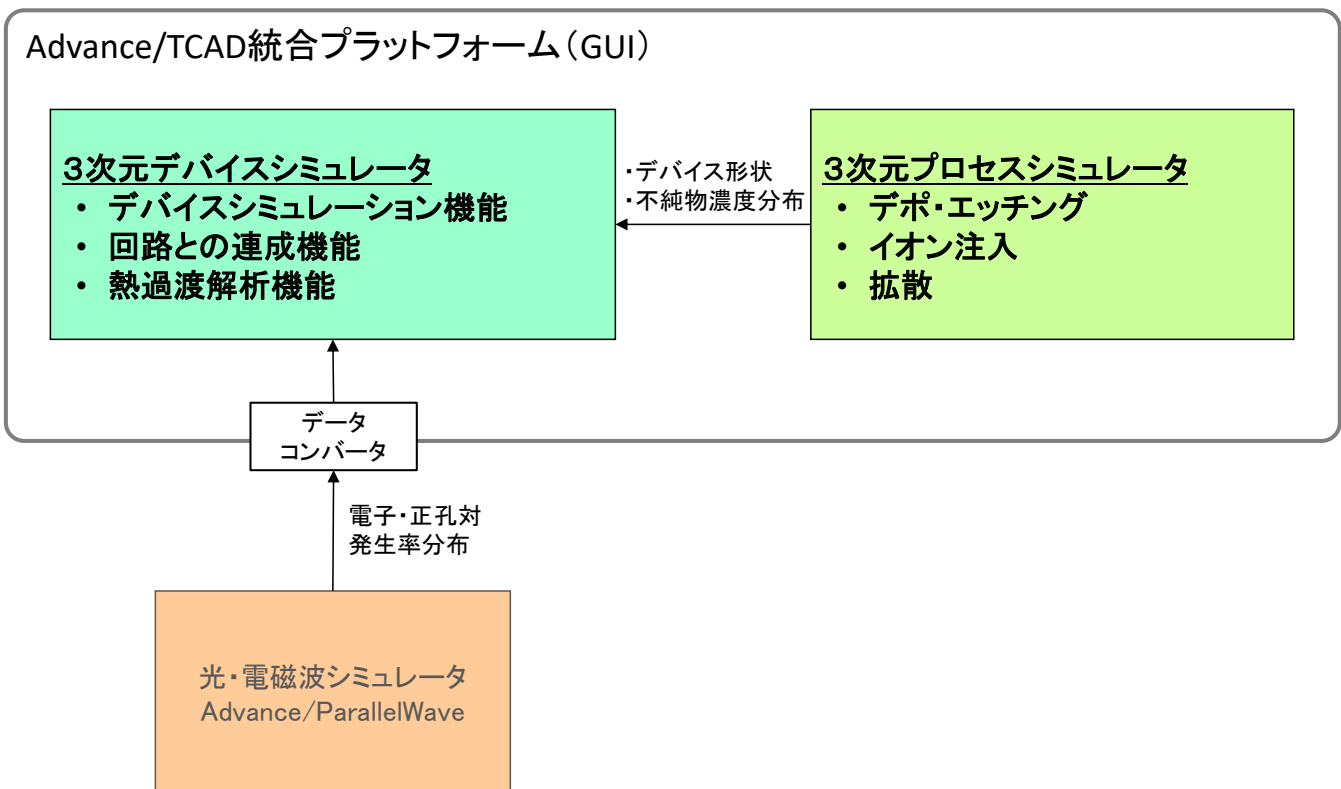
Advance/TCADのご紹介

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。

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

➤ イオン注入

➤ 拡散

3次元プロセスシミュレータ

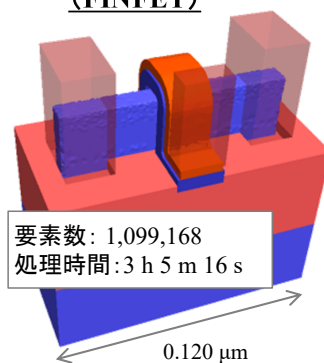
➤ デポ・エッチング

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。

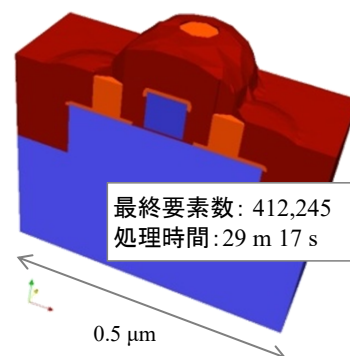
➤ イオン注入

➤ 拡散

**FIN構造作成事例
(FINFET)**

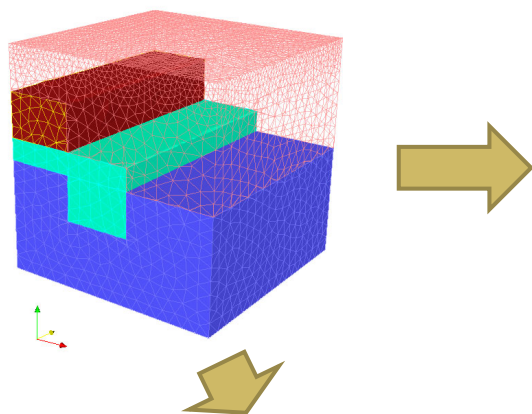


**プレーナ構造作成事例
(STI MOSFET)**



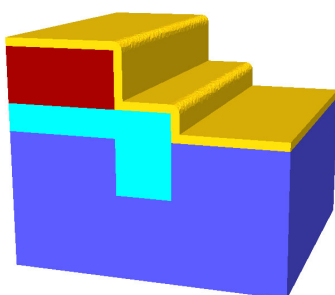
3次元プロセスシミュレータ

➤ デポ・エッチング

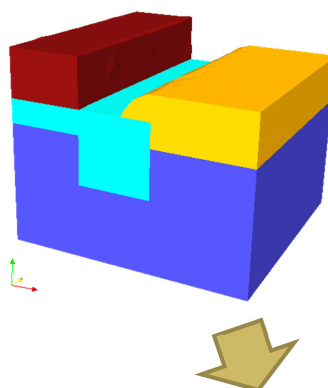


等方性デポジション

表面に等方的に堆積させる。縦横比の調節が可能。

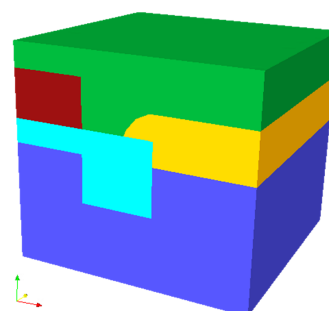


**特定材質への
等方性デポジション**



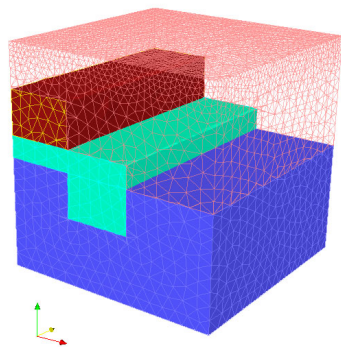
平坦化デポジション

ある高さまで平坦に積み上げる



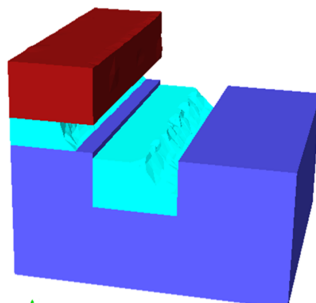
3次元プロセスシミュレータ

➤ デポ・エッチング



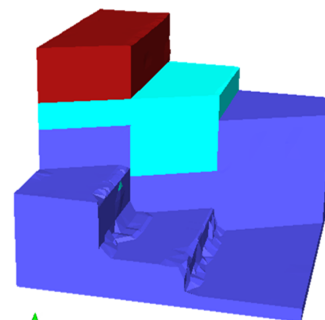
等方性エッチング

等方的に削り取る。
材質指定可能。

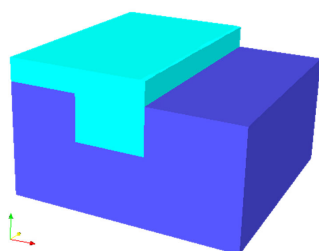


異方性エッチング

マスクパターンで指定した領域を垂直方向に、異方的に削り取る。

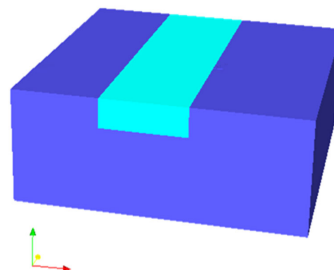


指定材質の除去



平坦化エッチング

ある高さまで平坦化する。



3次元プロセスシミュレータ

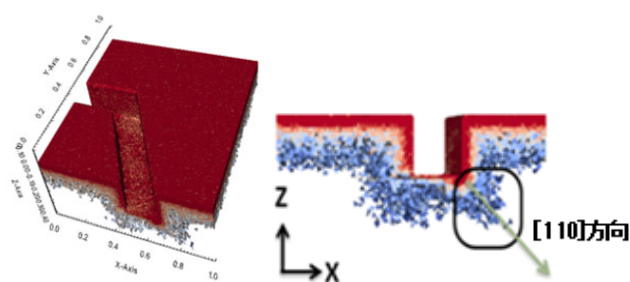
➤ デポ・エッチング

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

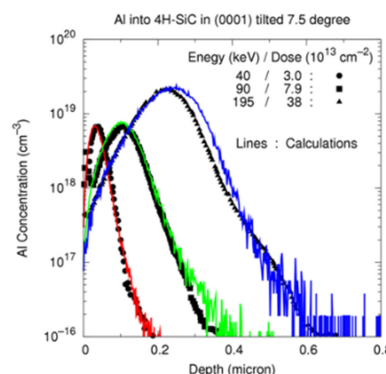
結晶材料とアモルファス材料の両方に対応した3次元モンテカルロ法によるイオン注入シミュレーション。

3次元イオン注入計算事例 (六角トレンチ構造 (Si基板))



➤ 拡散

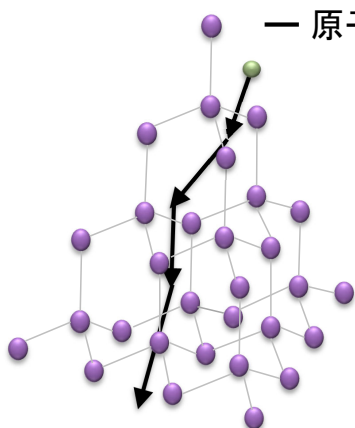
実験値との比較例 (4H-SiC基板へのAl注入)



3次元プロセスシミュレータ

➤ イオン注入 モンテカルロ法

- 注入イオンと材質構成原子との散乱を直接取り扱う
- 3次元の多様な構造に対しシミュレーション可能
- 対応固体材料
 - ◆ アモルファス材質 : 平均自由行程モデル
 - ◆ 結晶材質 : 周期的に並べた単位胞内で衝突原子を探索
 - 結晶破壊モデル : Kinchin-Peace モデル
 - 熱振動モデル : Debyeモデルによる熱振動振幅
- 2体衝突近似
 - 原子間相互作用 : ZBL ポテンシャル
 - 原子・電子間相互作用 : LSS, Firsov モデル ← アモルファス材質
VIENNA モデル ← 結晶材質



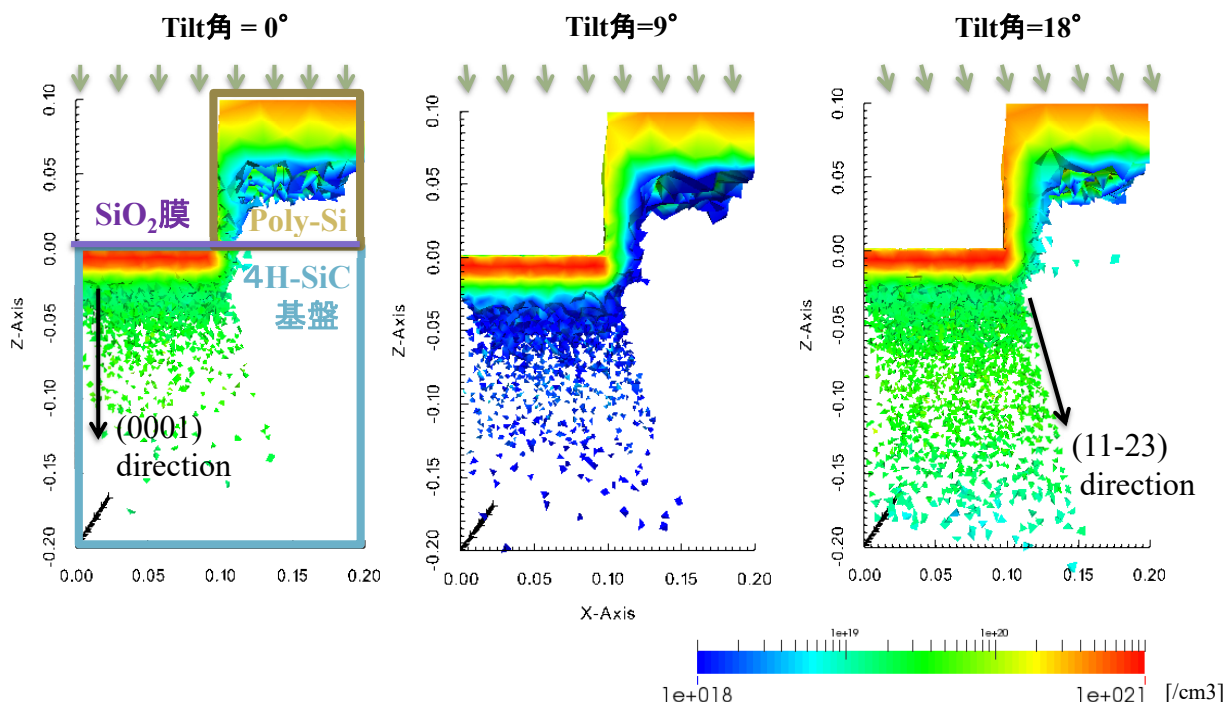
・結晶構造を正確に反映した2体散乱を取り扱う
 ・対応可能結晶系: **立方晶**(Si, 3C-SiC),
六方晶(4H-SiC, 6H-SiC, GaN)

3次元プロセスシミュレータ

➤ イオン注入

4H-SiC MOSFET extension注入

Aluminum, 5.0keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, into (0001) 4H-SiC



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。

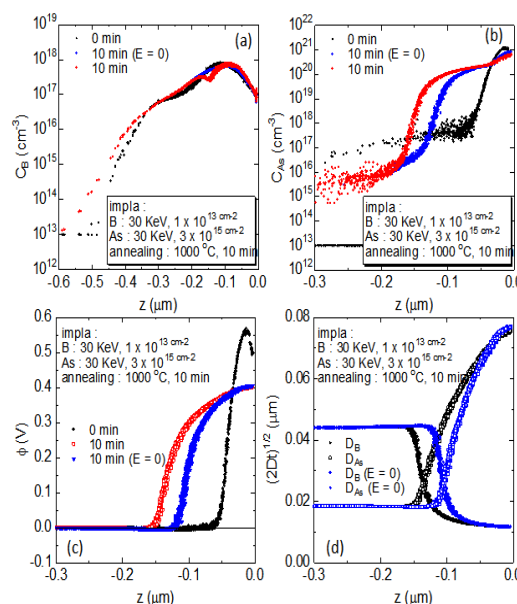
➤ イオン注入

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。

FERMIモデルを用いた AsおよびBの拡散解析例



(a) Asおよび(b)Bの深さ方向の濃度依存性($z=0$ がSi-SiO₂界面)依存性、(c)ポテンシャルの深さ依存性、(d)拡散長の深さ依存性(※青丸は電界分布がゼロ($E=0$)の場合、黒丸は初期分布。)

3次元プロセスシミュレータ

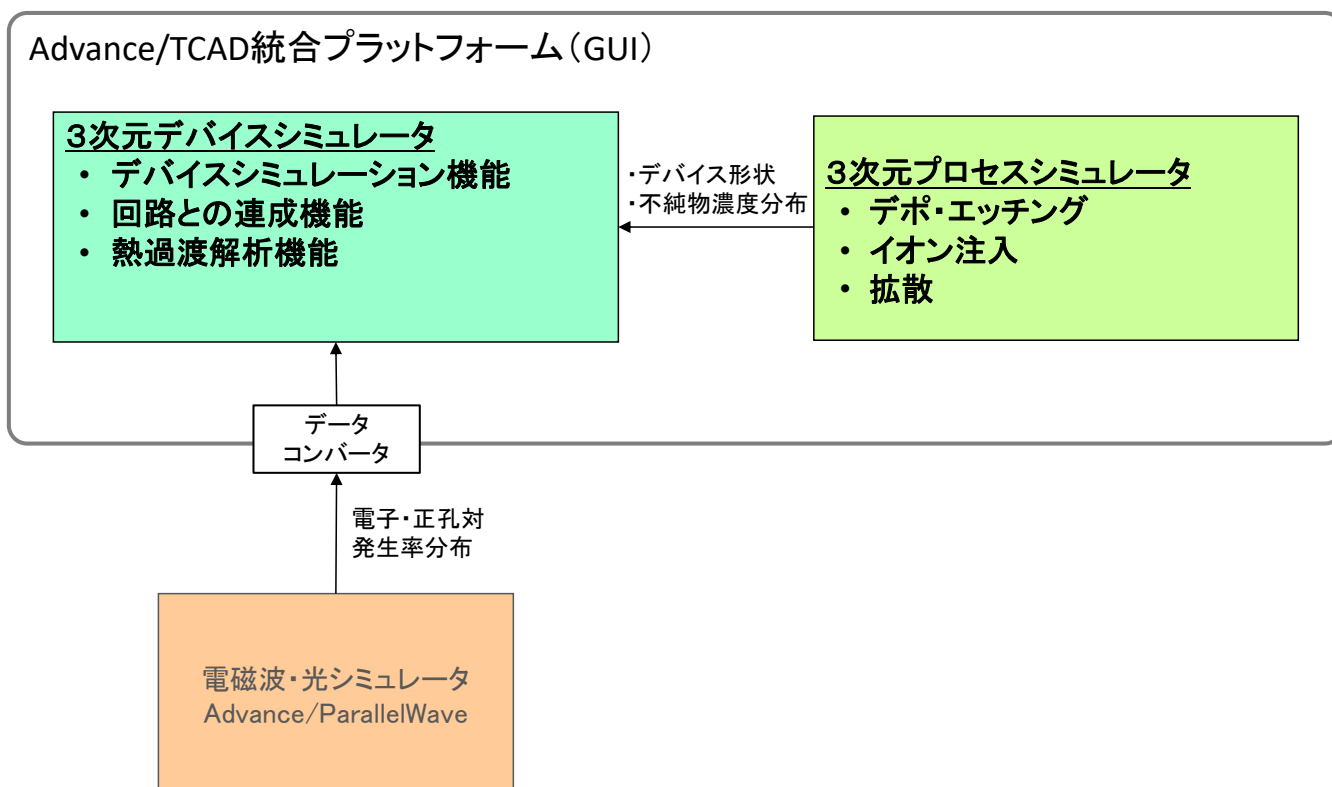
➤ 拡散

- ① 要素中心コントロールボリューム法を利用
- ② ニュートン法による非線形解析
- ③ 行列ソルバは汎用ライブラリLISを利用
- ④ 拡散モデル は非平衡反応拡散モデル及び平衡拡散モデル(フェルミモデル)
 - 点欠陥、不純物反応
 - 点欠陥クラスタ反応
 - 不純物不活性化反応

3次元プロセスシミュレータ

機能	特徴
➤ デポ・エッチング	<ul style="list-style-type: none"> 格子密度制御機能付き非構造四面体メッシャー テトラメッシュ使用。 距離関数を用いた幾何学処理。 等方、異方、平坦化のデポ・エッチング。
➤ イオン注入	<ul style="list-style-type: none"> 平均自由行程モデル(アモルファス材質)。 原子間相互作用: ZBLポテンシャル。 原子・電子間相互作用: LSS、Firsov、VIENNAモデル。 熱振動モデル: Debyeモデルによる熱振動振幅。 結晶破壊モデル: Kinchin-Peaceモデル。
➤ 拡散	<ul style="list-style-type: none"> 非平衡反応拡散モデル。 Fermiモデル。

Advance/TCADのシステム構成



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, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, GaAs, AlAs, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, GaN, $\text{GaAl}_x\text{N}_{1-x}$, AlN 絶縁体: SiO_2 , Si_3N_4 , Ta 2O_5 , Al 2O_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

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, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, GaAs, AlAs, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, GaN, $\text{GaAl}_x\text{N}_{1-x}$, AlN 絶縁体: SiO_2 , Si_3N_4 , Ta 2O_5 , Al 2O_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
	<ul style="list-style-type: none"> • 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

- ベースとなる材料を基にユーザーによる任意の物性値の設定が可能。
- ワイドギャップ半導体に対応 (SiC、GaNの物性値を装備)。



3次元デバイスシミュレータ

項目	特徴
	<ul style="list-style-type: none"> 不完全イオン化不純物に対応。 界面の連続準位に対応。 二準位間再結合モデルにより超低電流での安定計算が可能。
生成・再結合モデル	<ul style="list-style-type: none"> 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



3次元デバイスシミュレータ

項目	特徴
使用可能な材質	半導体: Si, poly-Si, Ge, Si-Ge, GaAs, AlAs, Ga-Al-As, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC
	<ul style="list-style-type: none"> 計算手法はガンメル法とカップル法から選択可能。 過渡解析機能を搭載(タイムステップ制御、任意入力波形に対応)。 並列計算を用いた大規模計算が可能(Linux版)。 トンネル電流を考慮したショットキー接合の計算が可能。
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

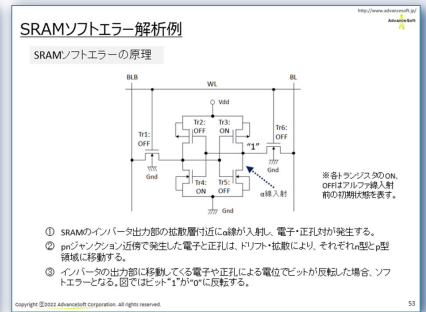
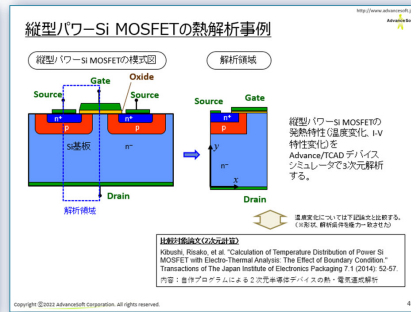
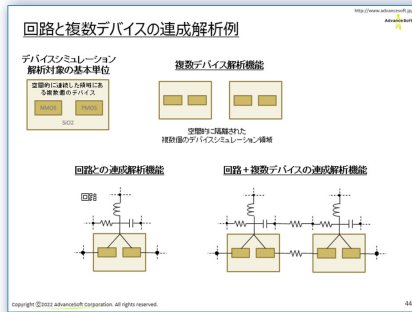
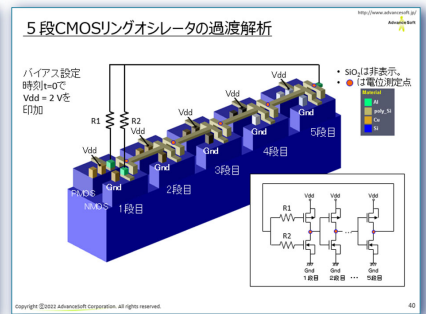
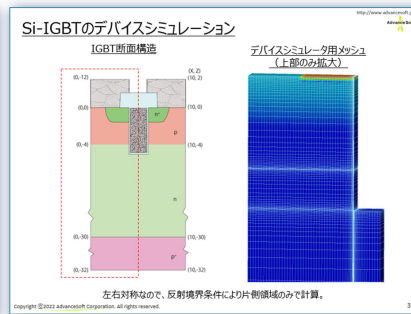
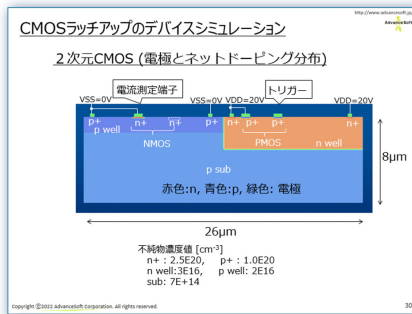
3次元デバイスシミュレータ

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)	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
<ul style="list-style-type: none"> 光・電磁波による電子・正孔対生成を考慮した計算が可能。 複数デバイスと回路を行列レベルで一括した高速連成計算が可能。 熱過渡解析機能。 	
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

3次元デバイスシミュレータ

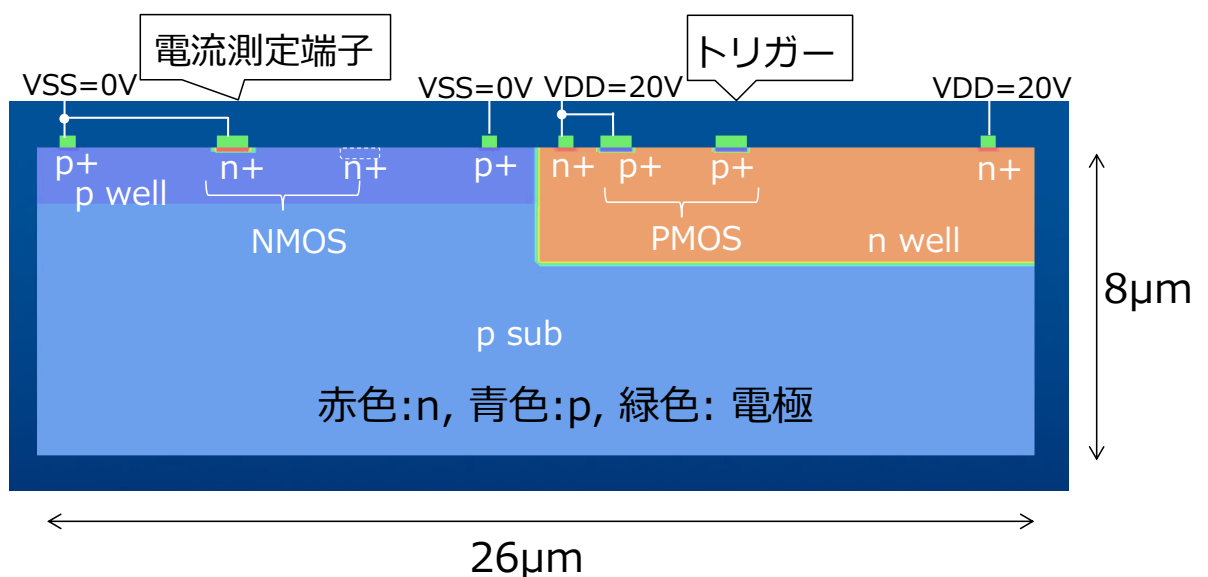
項目	特徴
使用可能な材質 (※材料定数を変更することで別材質も設定可能。)	半導体: Si, poly-Si, Ge, Si _x Ge _{1-x} , GaAs, AlAs, Ga _x Al _{1-x} As, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, GaN, GaAl _x N _{1-x} , AlN 絶縁体: SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ , Air 金属: Cu, Al, Ti, Ta, Mo, W, TiN
基本物性のモデル	・誘電率、電子親和力、質量モデル、バンドギャップモデルなど
移動度モデル	・MOS反転層モデル、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

デバイスシミュレーション解析事例



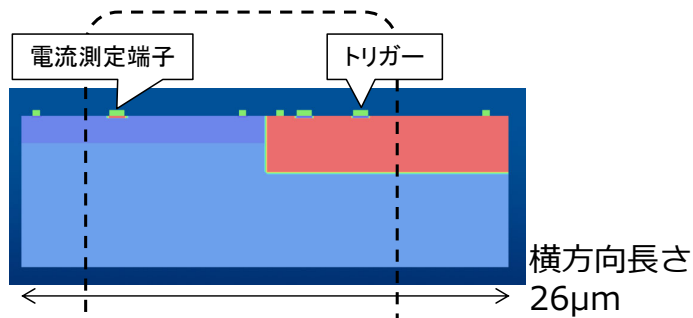
CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

2次元CMOS (電極とネットドーピング分布)



CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

構造A



構造B

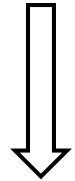


構造C



抵抗大

抵抗小



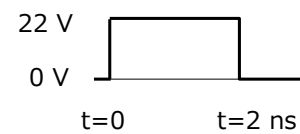
※点線内同じ構造

CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

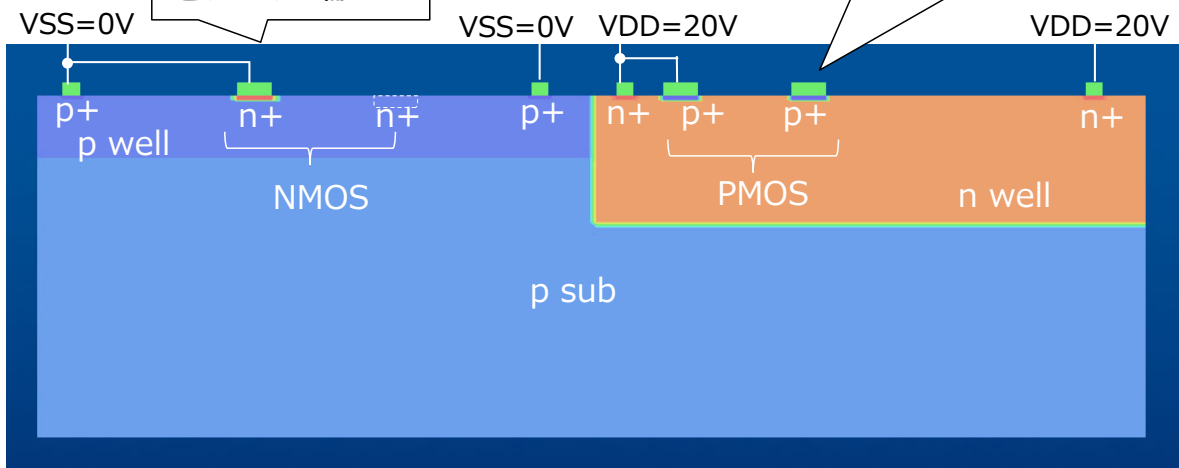
トリガーのバイアス条件

t = 0 ns 0V→22 V
(過渡計算)

t = 2 ns 22V→0V
(過渡計算)

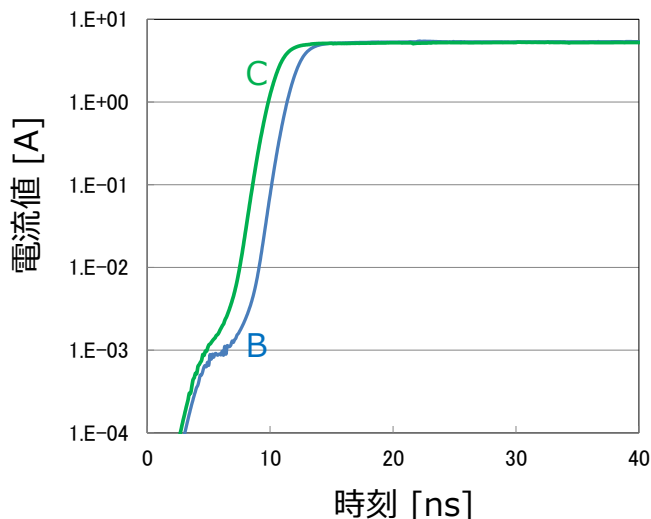
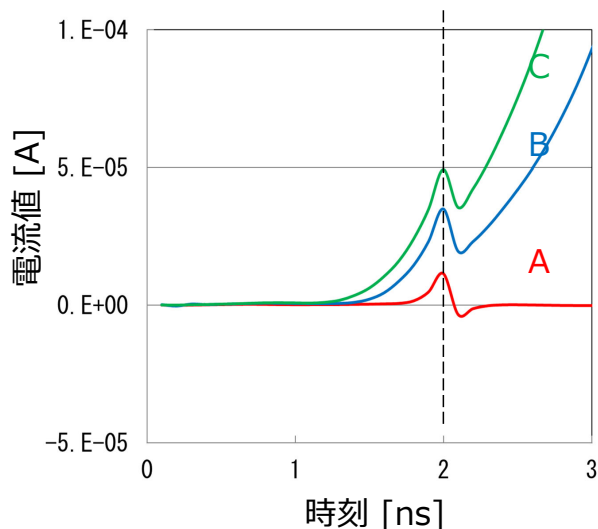


電流測定端子

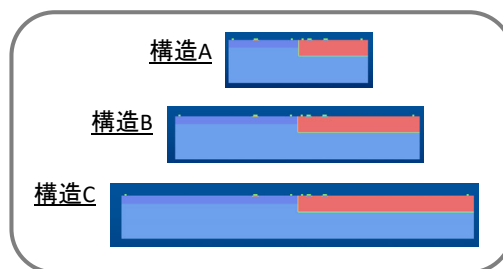


CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

電流値時間変化 (左: 線形表示、右: 対数表示)

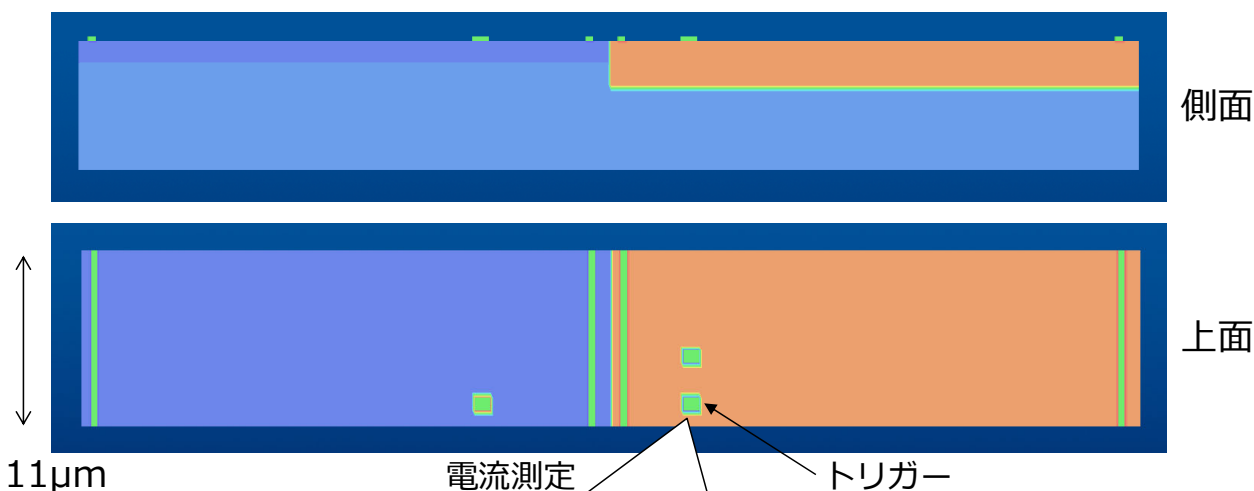


構造BとCでPNPN接合がONして電流が流れ続けた (ラッチアップ発生)。



CMOSラッチアップのデバイスシミュレーション

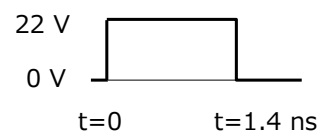
3次元CMOS(例:構造C)



トリガーのバイアス条件

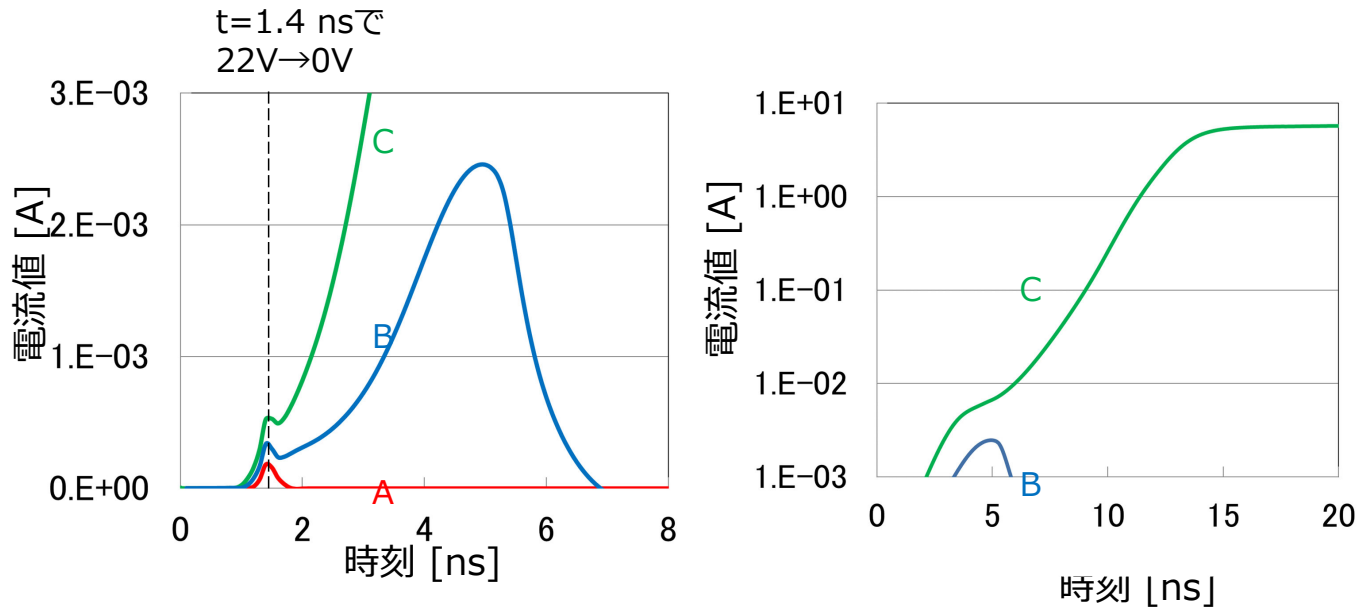
$t = 0 \text{ ns}$ 0V → 22 V
(過渡計算)

$t = 1.4 \text{ ns}$ 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

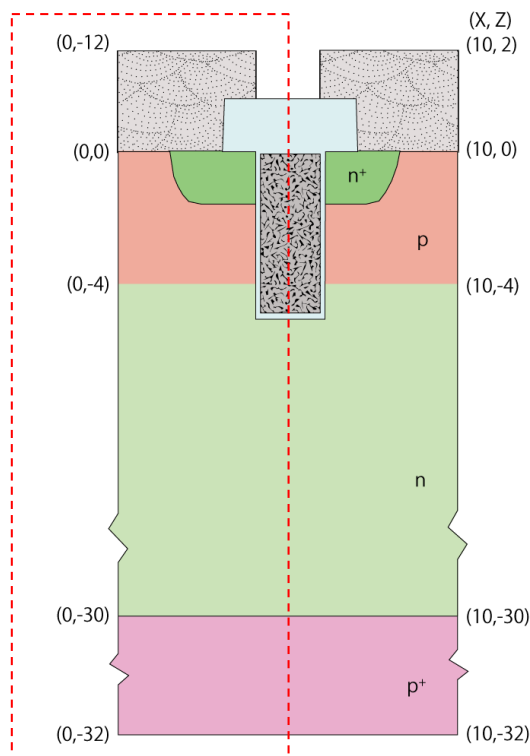
電流値時間変化（左：線形表示、右：対数表示）



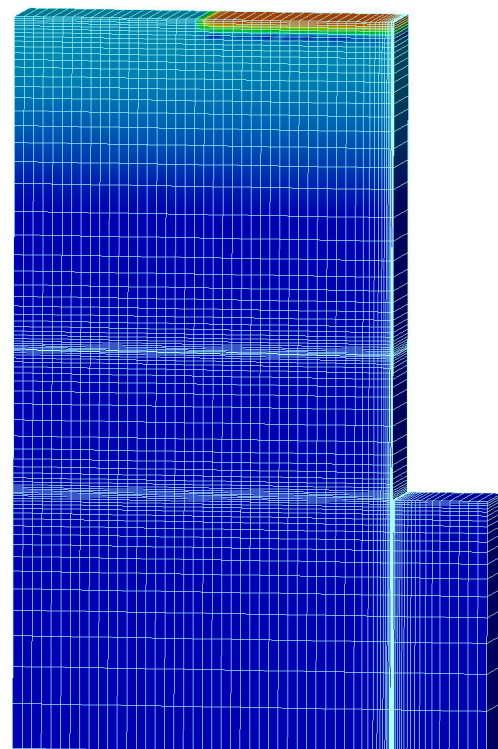
- 構造Cでのみラッチアップが発生。
- 構造Bでは、2次元の計算と異なりラッチアップは発生しなかった。

Si-IGBTのデバイスシミュレーション

IGBT断面構造



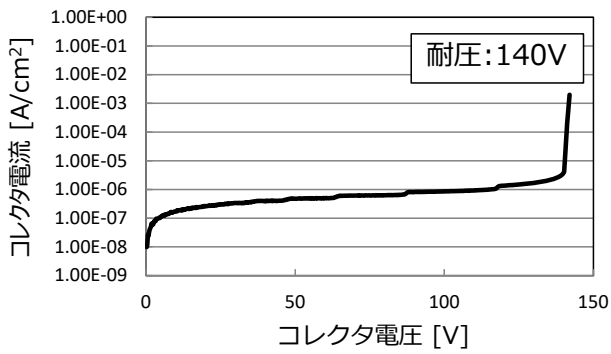
デバイスシミュレータ用メッシュ
(上部のみ拡大)



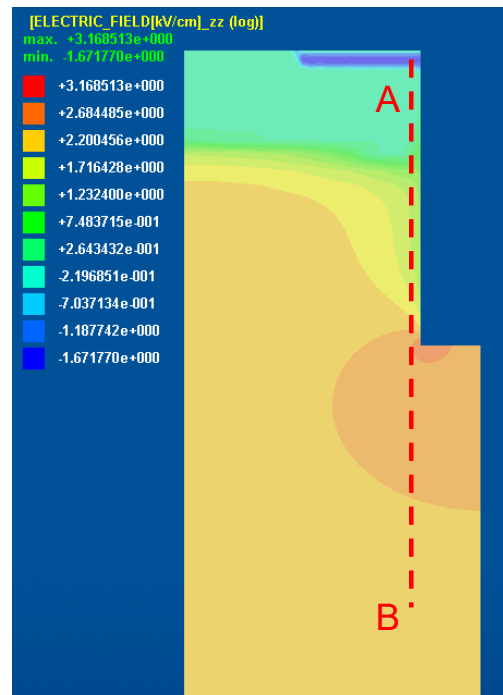
左右対称なので、反射境界条件により片側領域のみで計算。

Si-IGBTのデバイスシミュレーション

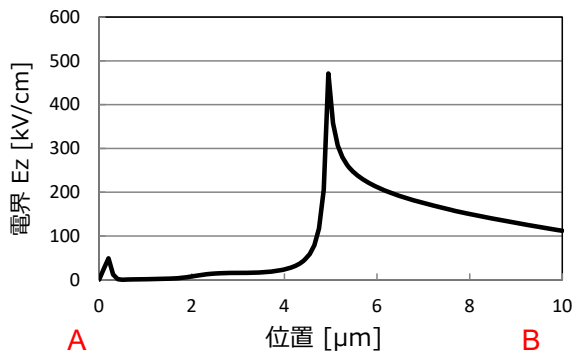
Si-IGBT耐圧計算結果



コレクタ電圧140Vのときの深さ方向電界分布



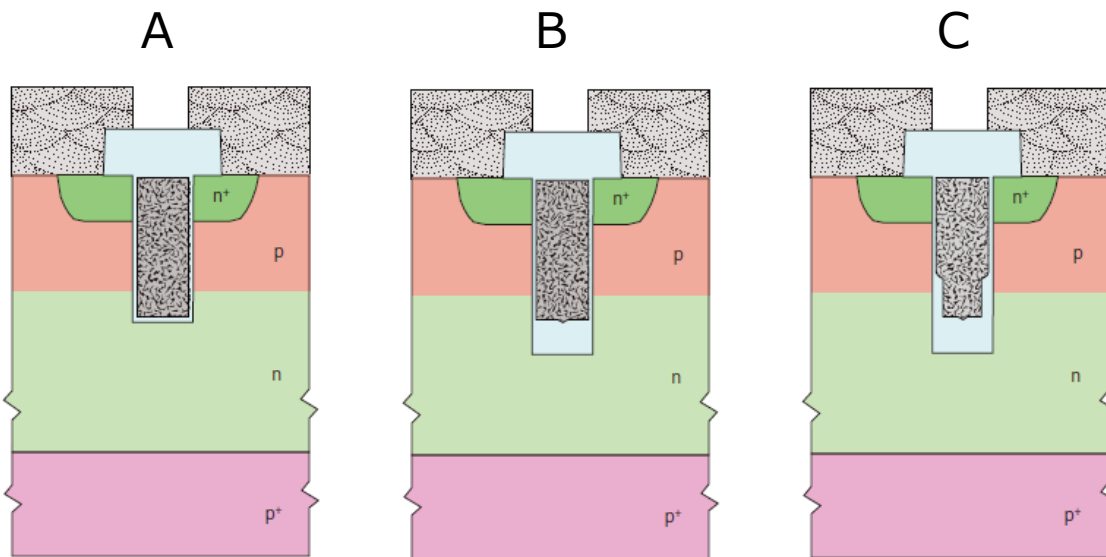
深さ方向電界（絶対値）分布



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



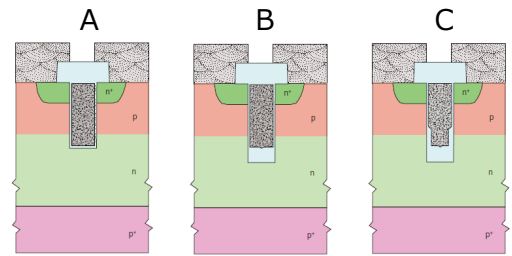
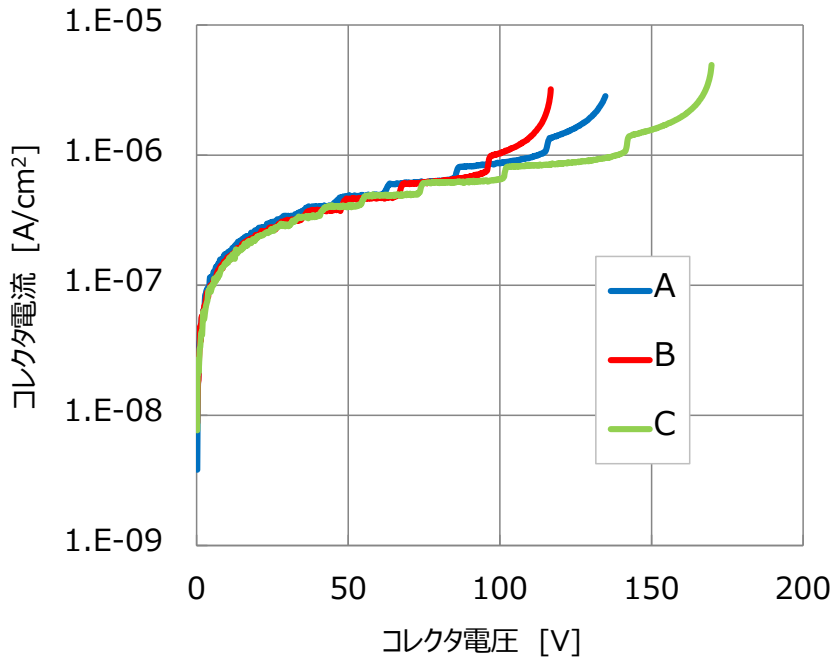
※トレンチを深くした。

※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

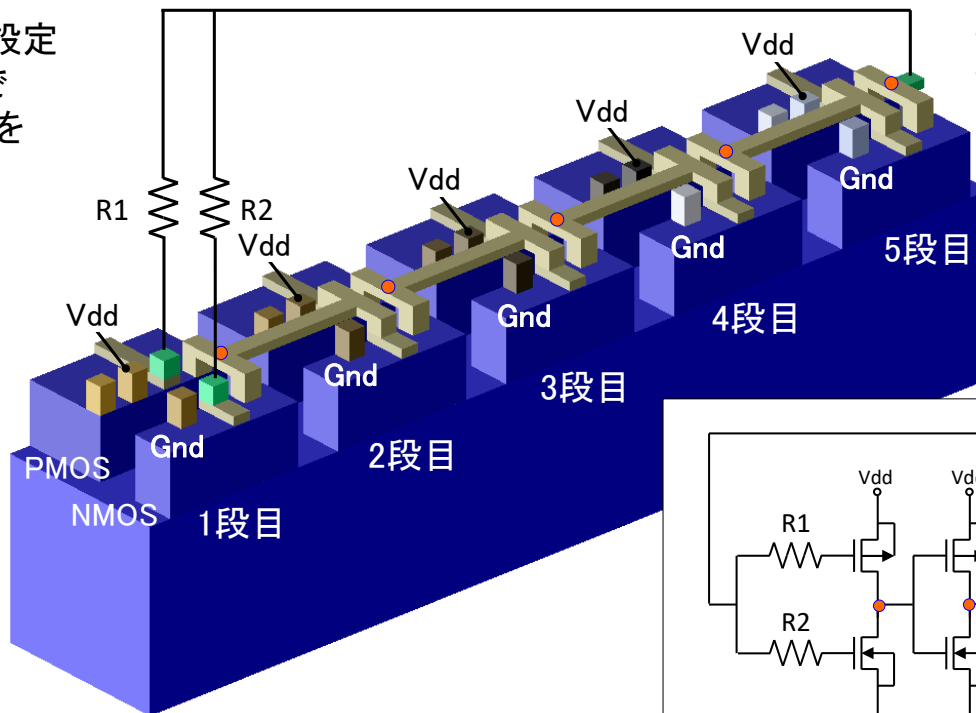
耐圧計算結果



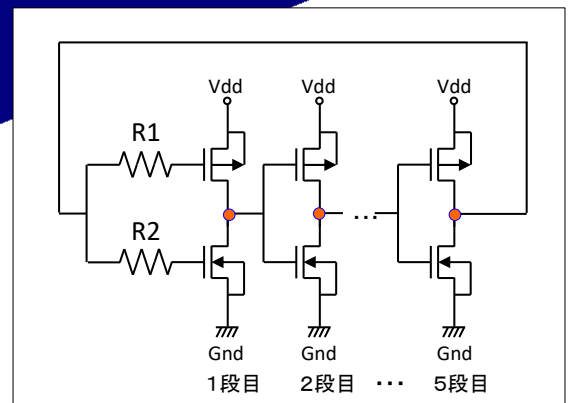
- 構造Cは構造Aよりも耐圧向上した。
- 構造Bは構造Aよりも耐圧が悪化した。

5 段CMOSリングオシレータの過渡解析

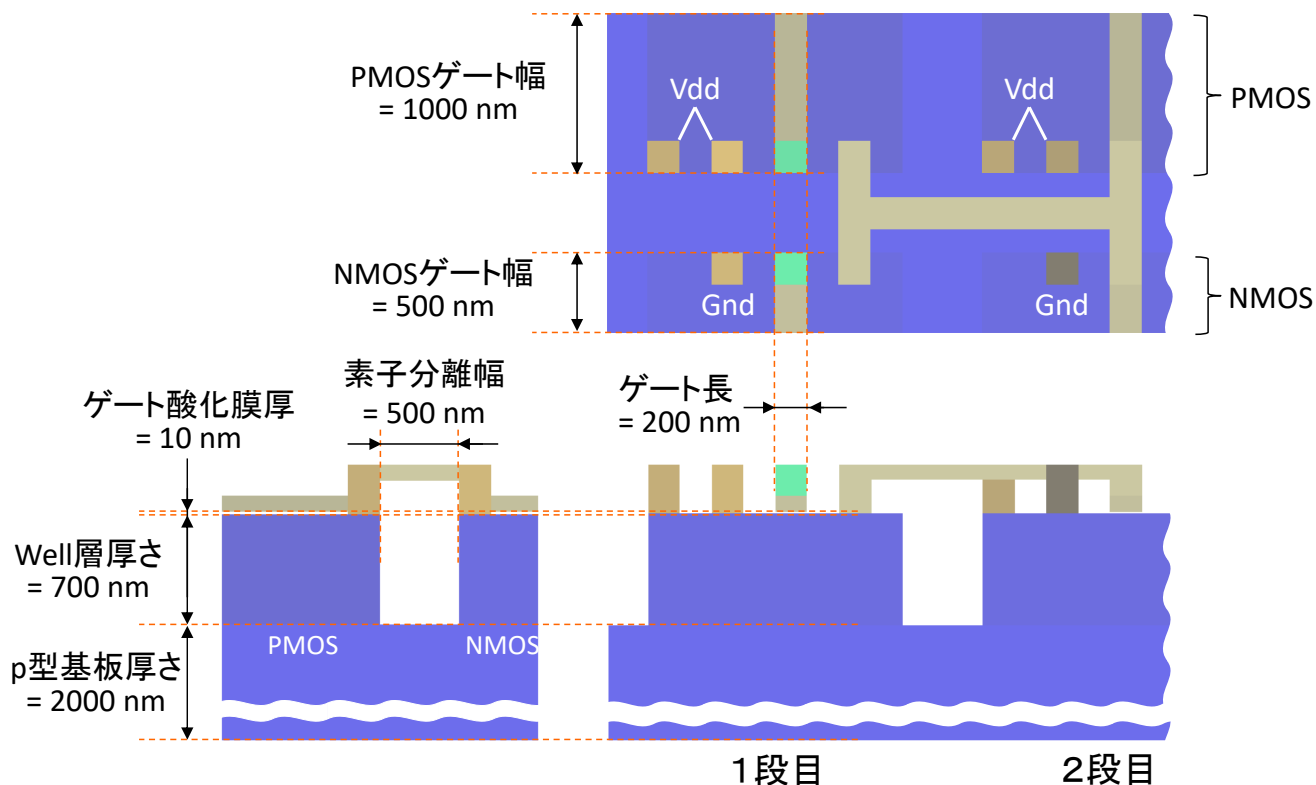
バイアス設定
時刻t=0で
Vdd = 2 Vを
印加



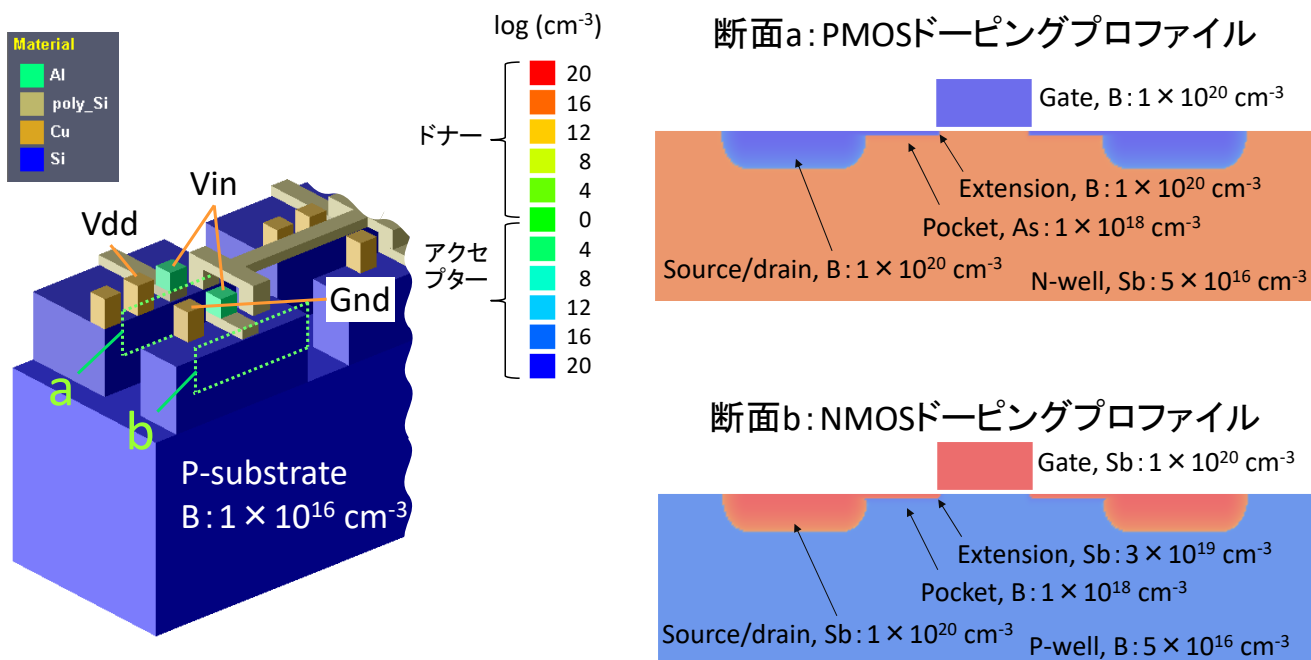
- SiO₂は非表示。
- ● は電位測定点



5 段CMOSリングオシレータの過渡解析

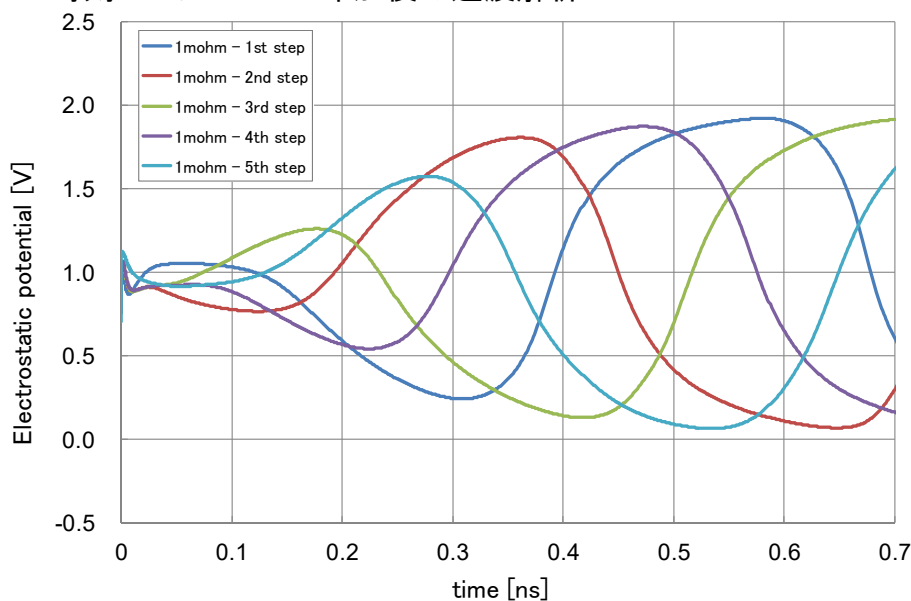


5 段CMOSリングオシレータの過渡解析



5 段CMOSリングオシレータの過渡解析

時刻t=0でVdd=2Vに印加後の過渡解析

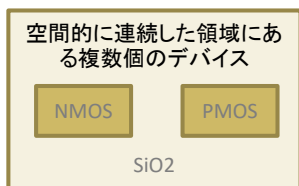


※静電ポテンシャルはゼロバイアス時の値からの相対値

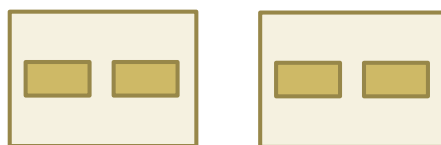
複数段CMOSリングオシレータの一括解析が可能。

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

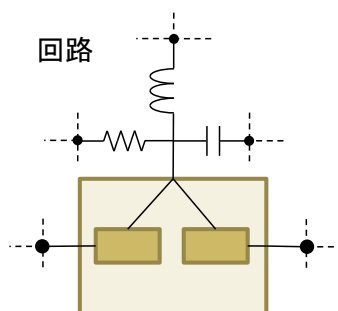


複数デバイス解析機能

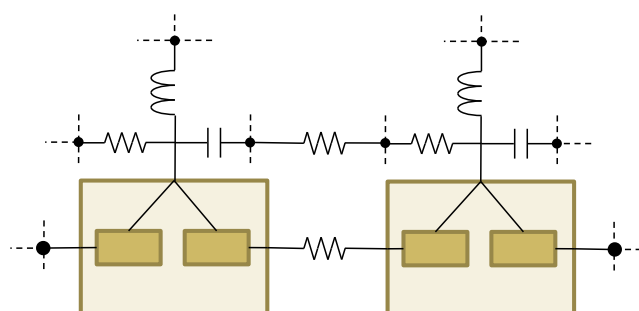


空間的に隔離された複数個のデバイスシミュレーション領域

回路との連成解析機能



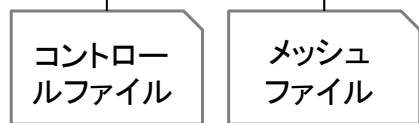
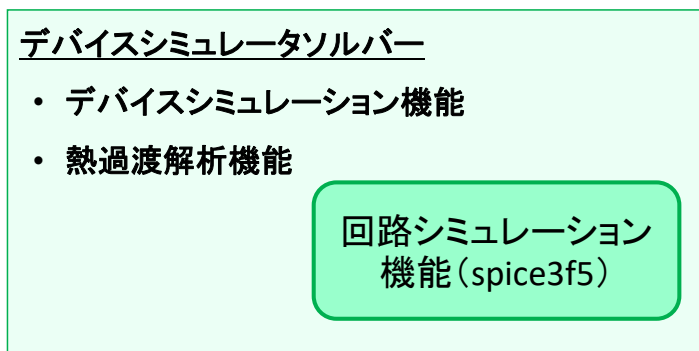
回路+複数デバイスの連成解析機能



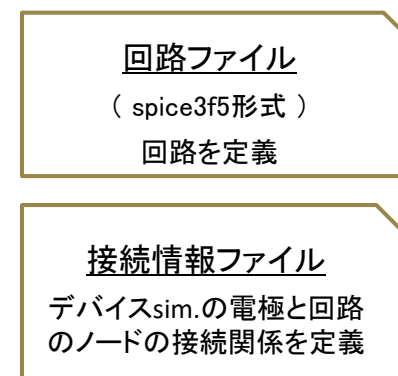


回路と複数デバイスの連成解析例

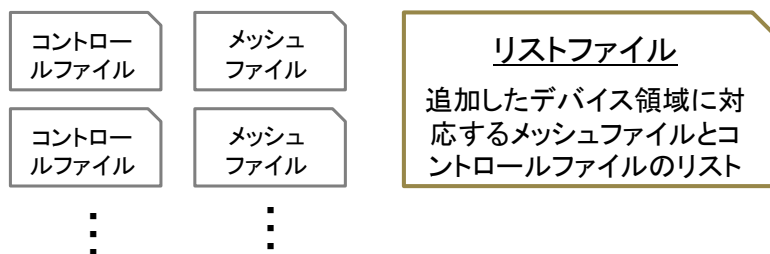
デバイスシミュレータ入力ファイル



回路との連成解析機能入力ファイル

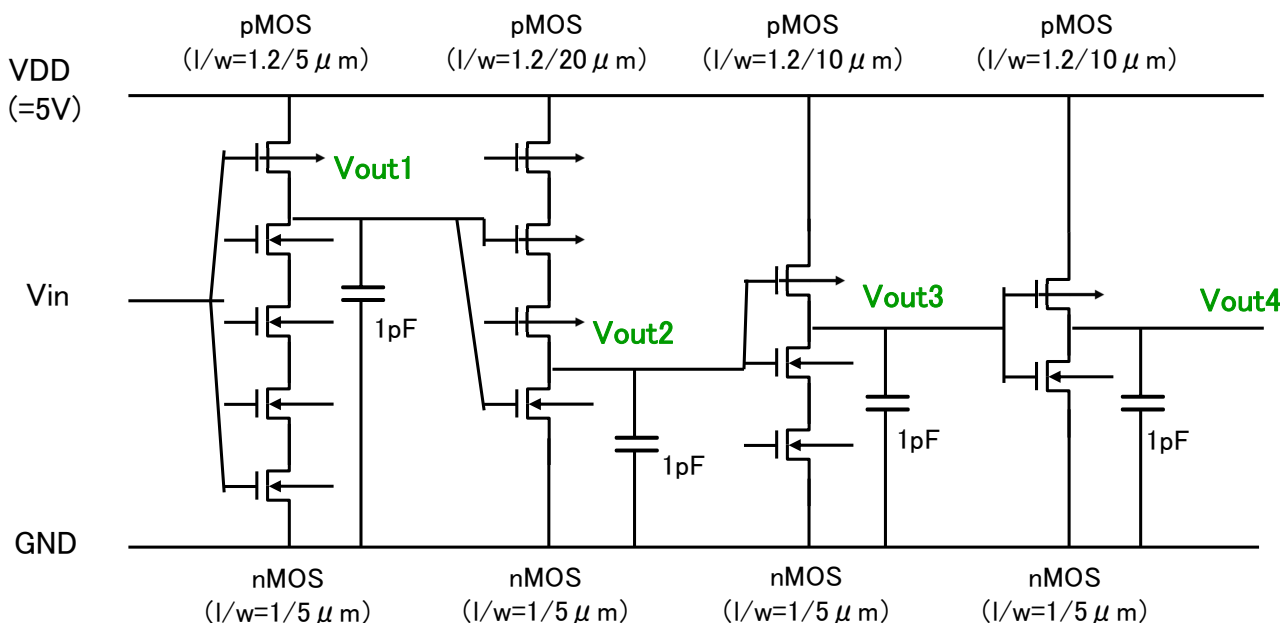


複数デバイス解析機能入力ファイル



回路と複数デバイスの連成解析例

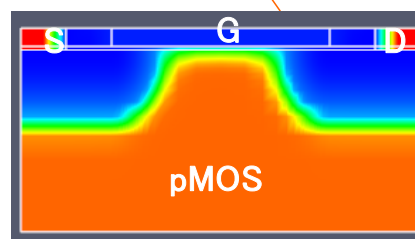
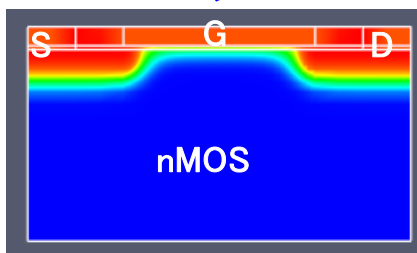
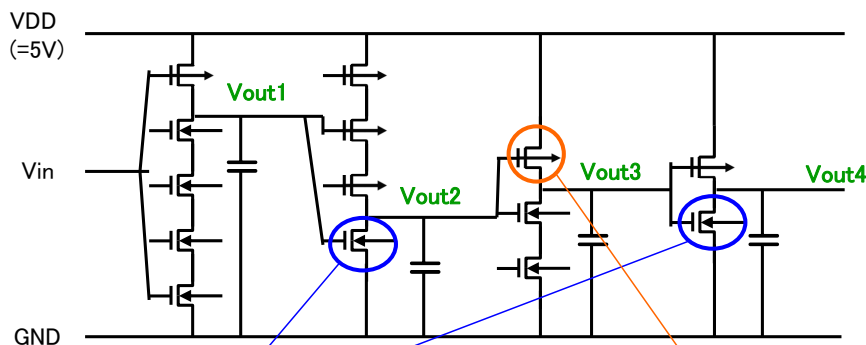
解析対象回路:4段CMOSインバータ (※spice3f5 に内包のモデルから抜粋)



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

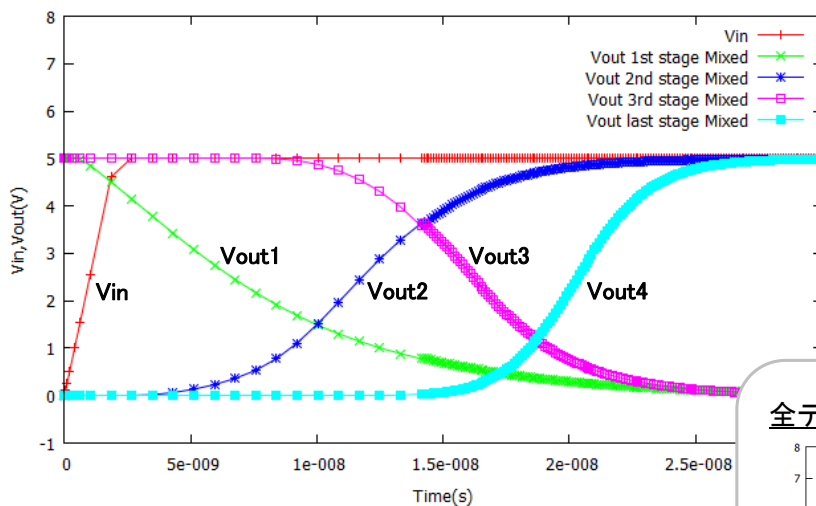
バイアス条件:
時刻0~2nsの間にVinをGNDからVDD(=5V)に時間に比例して上げる。



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

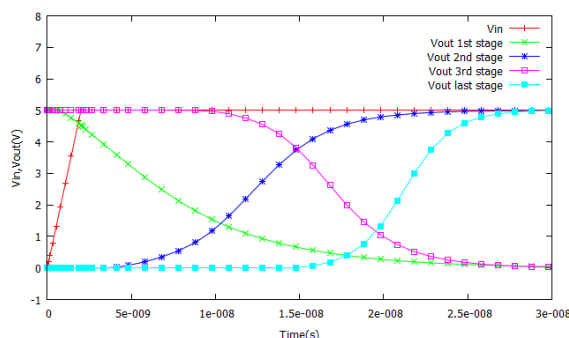
2、4段目nMOSと3段目pMOSを
デバイスシミュレーションモデルとした場合の計算結果



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

- 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。

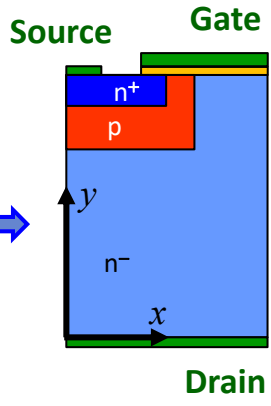
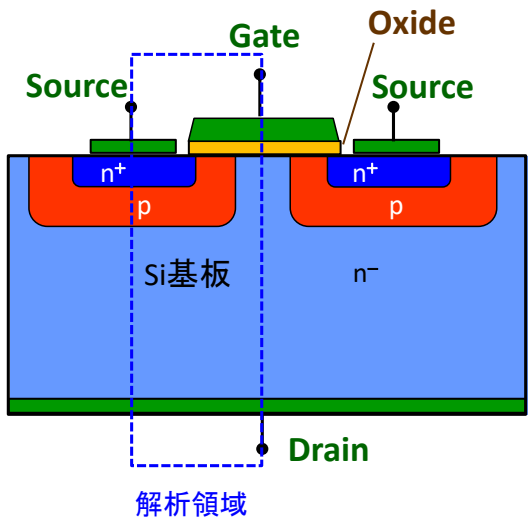
全デバイスを回路モデルとした場合の計算結果



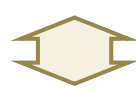
縦型パワー-Si MOSFETの熱解析事例

縦型パワー-Si MOSFETの模式図

解析領域



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。



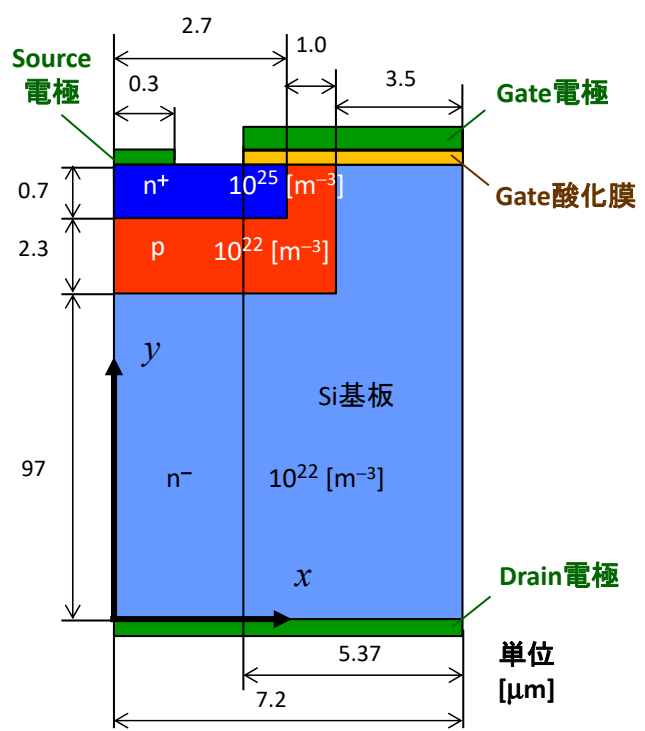
温度変化については下記論文と比較する。(※形状、解析条件を極力一致させた)

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)

$$\kappa_L = 154.86 \times \left(\frac{T_L}{300}\right)^{-4/3} \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

- Drain電極(底面)の境界条件:

熱抵抗条件: $q_b = h_t (T_L - T_{\text{outer}})$

熱伝達率 $h_t = 10^5 \sim 10^8 \text{ [W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$

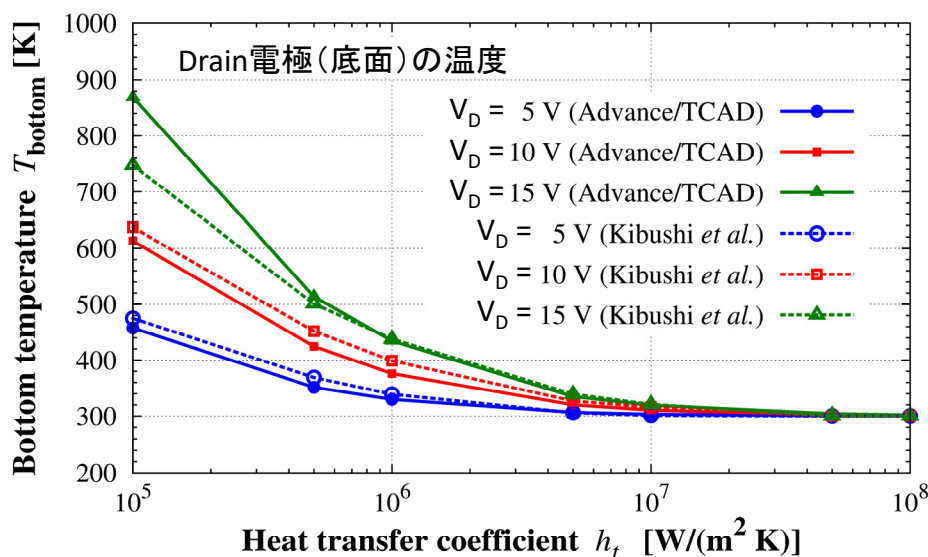
外気温度 $T_{\text{outer}} = 300[\text{K}]$

(※ 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

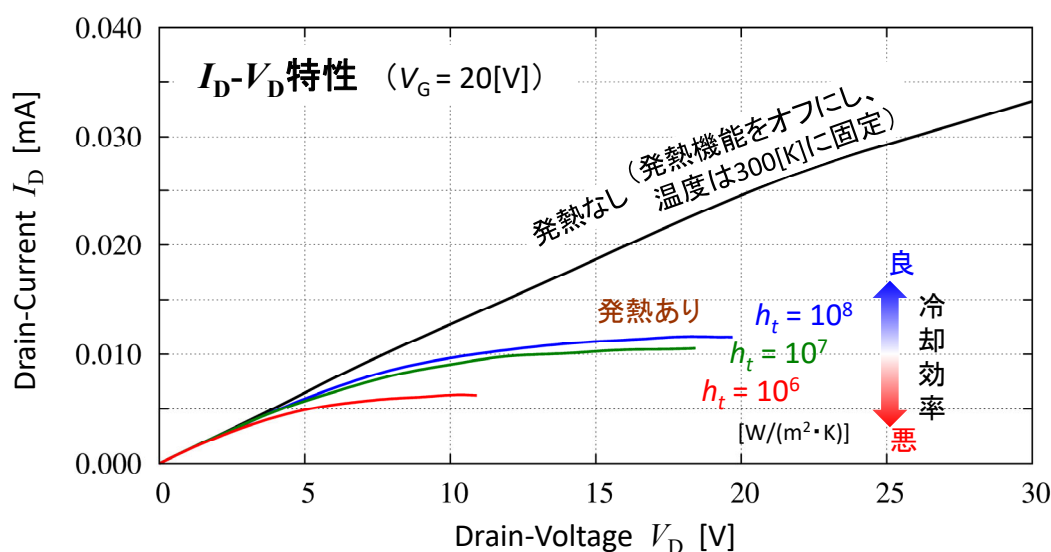
(※点線は論文の計算結果)



- 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

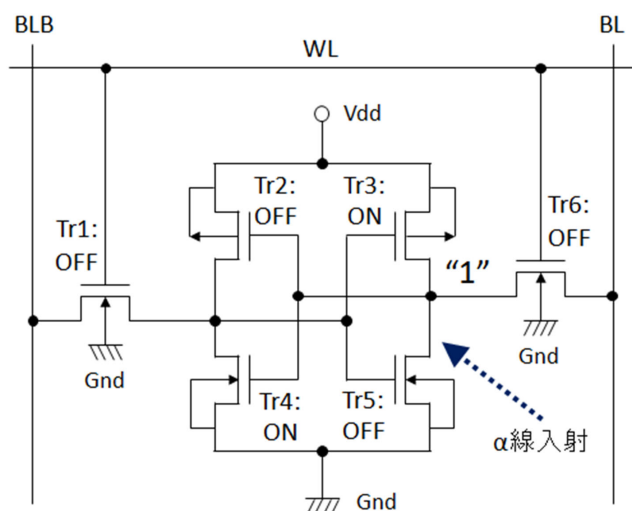
電流－電圧(I_D - V_D)特性の熱伝達率依存性



- 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。

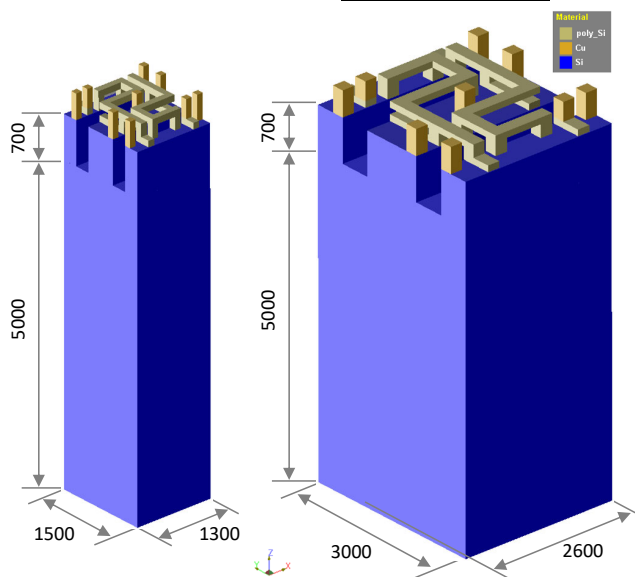
- ① SRAMのインバータ出力部の拡散層付近にα線が入射し、電子・正孔対が発生する。
- ② pnジャンクション近傍で発生した電子と正孔は、ドリフト・拡散により、それぞれn型とp型領域に移動する。
- ③ インバータの出力部に移動してくる電子や正孔による電位でビットが反転した場合、ソフトウェアエラーとなる。図ではビット“1”が“0”に反転する。

SRAMソフトウェア解析例

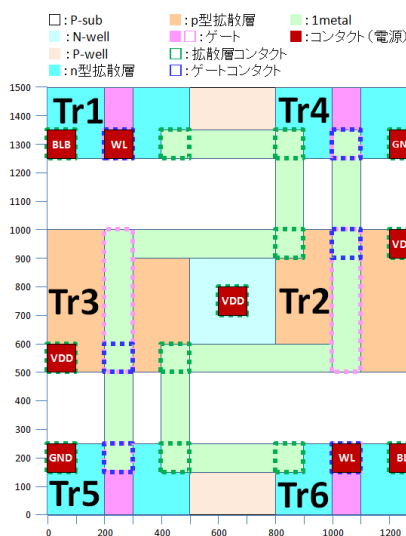
SRAM解析モデル(構造2種類)

ゲート長L=100nm

ゲート長L=200nm



L=100nmモデルのレイアウト
(※L=200nmモデルは寸法が2倍)



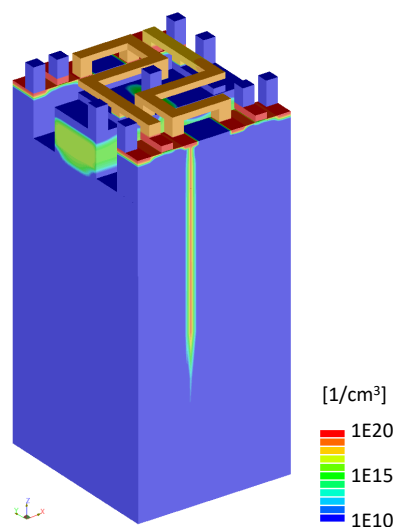
- 6個のトランジスタと2本の配線を1つのデバイスシミュレーションモデルとして作成した。
- L=100nmとL=200nmのゲート酸化膜厚は、それぞれ5nmと10nmとした。
- L=100nmのモデルの基板、p-well、n-wellの不純物濃度はL=200nmのモデルの2倍に設定した。

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)

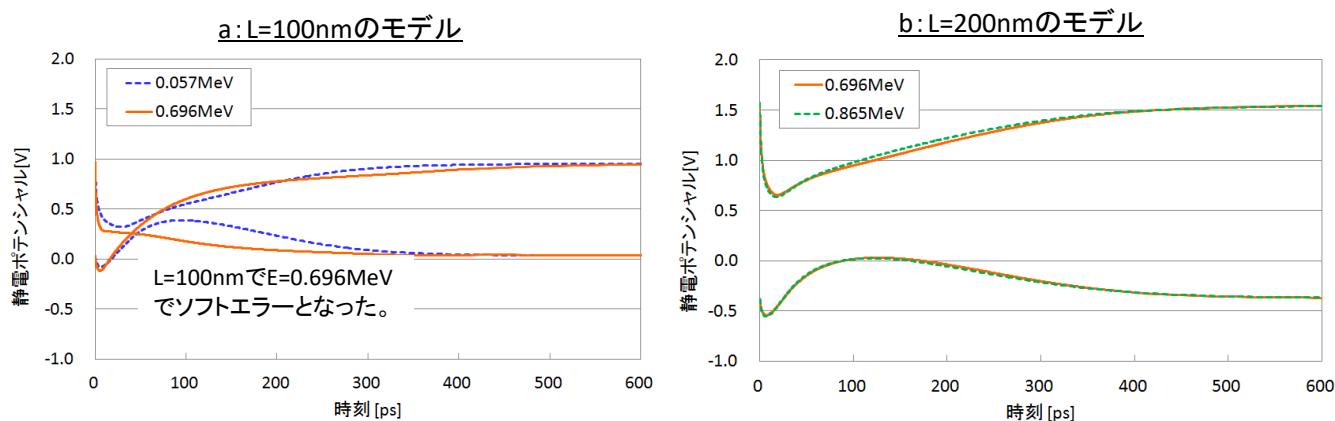


- α線がTr5のドレイン側拡散層に真上から入射したと仮定し、入射エネルギーに応じて電子・正孔対を配置した。
- 一对の電子・正孔対を発生させるのに3.6eVが必要であるとして発生個数を概算した。
- Siの電子的阻止能を 2.094×10^3 (MeV/cm)として、α線の侵入深さを概算した。

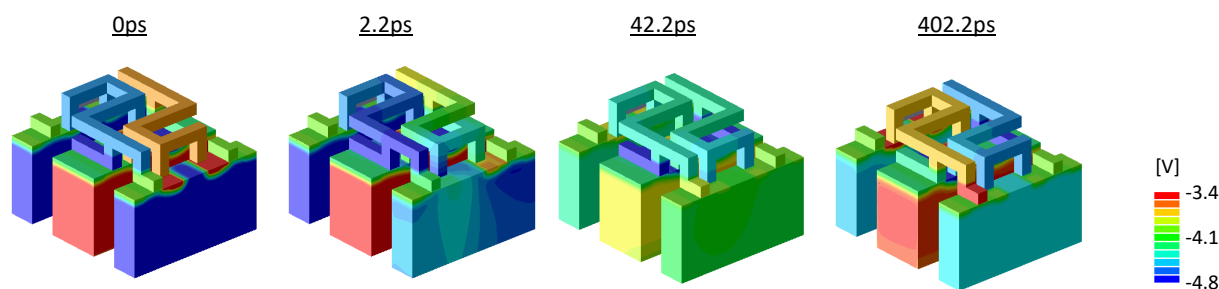
SRAMソフトエラー解析例

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



今後の開発

グリーンイノベーション推進、DX推進による半導体開発のさらなる促進に応えるべく、Advance/TCADの機能強化を検討中。

開発候補

- 計算手法の選択肢を増やす。
 - NEGF(非平衡グリーン関数)法
 - モンテカルロ法
- 対応できる形状を増やす。
 - 直方体以外の形状に対応させる。

時期、優先順位等は社内開発費等の兼ね合いで決定。

(※カスタマイズ開発等のご要望ございましたら、別途ご相談ください)

まとめ

本日は以下の内容についてお話をさせていただきました。

- 半導体業界をとりまく環境の動向
- Advance/TCADのご紹介

Advance/TCADは弊社にて自社開発しています。ライセンス販売だけではなく、受託解析、機能追加、新規ソフトの受託開発など、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。

電磁波解析ソフトウェア Advance / ParallelWaveのご紹介

アドバンスソフト株式会社

アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介セミナー
～DX、グリーンイノベーションを加速する
数値解析シミュレーションのご紹介～
2022年11月17日（木）

Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

目次

1. ParallelWaveの特徴
2. 解析事例
3. FDTD法の概要
4. 高速化（並列化とベクトル化）
5. オールインワンプラットフォーム
6. GUI (直交格子生成ソフトウェアAdvance/ParallelGrid)
7. 解析事例（アンテナ特性）
8. まとめ

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

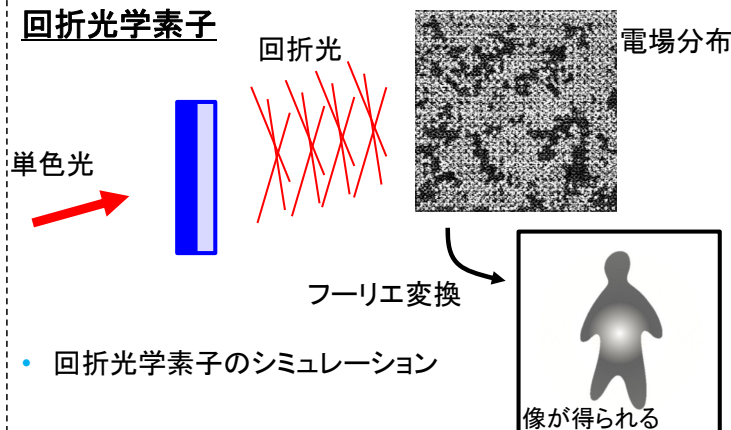
解析事例

EMC解析(自動車)



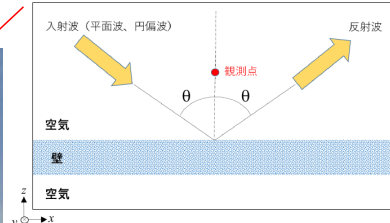
- ・ デジタル機器増加 → 信号がノイズ化
- ・ 自動運転など重要機器へ影響
- ・ ノイズ(電磁波)の伝搬経路を計算

回折光学素子



- ・ 回折光学素子のシミュレーション

建物構造物



- ・ 電波はマルチパスの影響を受けて受信される
- ・ 建物構造物の反射率・透過率の入射角度依存性を解析

構体内の無線通信



- ・ 電磁波解析シミュレーションを活用して設計
- ・ アンテナ・機器レイアウト
- ・ EMC対策

https://www.jaxa.jp/projects/sat/sdsl/index_j.html

* 図は例です。

解析事例と今後拡販したい領域

ParallelWaveの主な解析事例

電波/光波	分野	解析内容	ご要望頂いた内容
光波	電子・電気機器	センサー	
光波	通信	薄膜光センサー	
光波	自動車		電場増強効果を利用したアンテナ特性の高効率化
光波	電子・電気機器		透明材質微粒子における電場増強効果の解析
光波	電子・電気機器	近赤外センサー	
光波	印刷	回折格子	
光波	通信	磁性体	
光波	自動車		ナノ粒子のプラズモン解析
光波	電子・電気機器	誘電体粒子モデルの吸収特性	
光波	電子・電気機器		レーザー照射時の電熱解析
光波	電子・電気機器		CMOSセンサー
光波	化学		近接場のチップ増強効果
電波	自動車	建物構造体の反射・透過率	
電波	自動車	ミリ波レーダー	
電波	電子・電気機器	スイッチング回路配線の放射電磁界	
電波	自動車	ノイズ伝搬	
電波	自動車		車載用レーダー
電波	自動車		コイルの漏洩電磁界解析
電波	自動車		後側方レーダー
電波	宇宙	構体内の無線通信	
電波	電子・電気機器		配線導体内の電流密度分布

拡販したい領域

通信

用途：信号の送受信特性

EMC

用途：ノイズ源を配置したときの電磁界分布

光学素子

用途：光学領域における微細構造の光学特性

医療機器分野

用途：電磁波の人体への影響

FDTD法の概要

◆ 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：

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

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

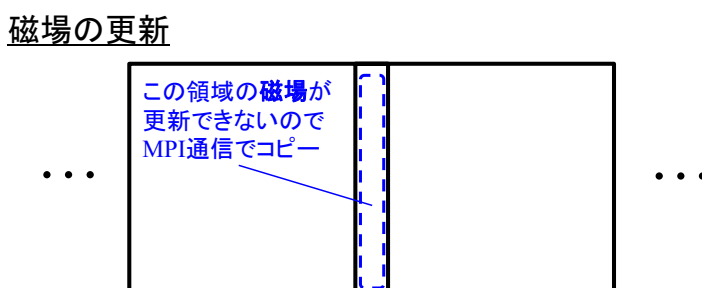
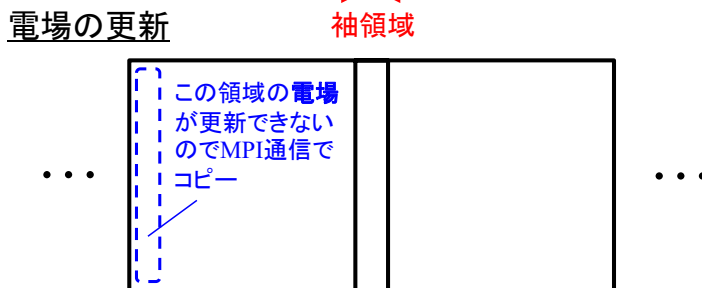
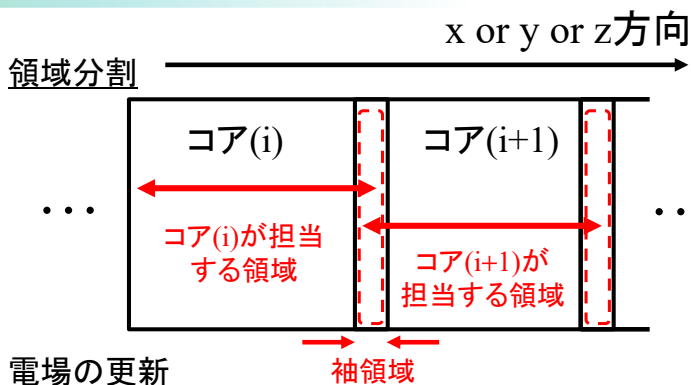
◆ FDTD法は、これらの式を時間と空間について差分法で解く

◆ Maxwell方程式の2つの発散の式は自動的に満足される

FDTD法の並列計算：MPI通信

隣接領域への依存関係

電磁場	隣接領域への依存
$ex(i, j, k)$	$hy(i, j, k-1), hz(i, j-1, k)$
$ey(i, j, k)$	$hz(i-1, j, k), hx(i, j, k-1)$
$ez(i, j, k)$	$hx(i, j-1, k), hy(i-1, j, k)$
$hx(i, j, k)$	$ey(i, j, k+1), ez(i, j+1, k)$
$hy(i, j, k)$	$ez(i+1, j, k), ex(i, j, k+1)$
$hz(i, j, k)$	$ex(i, j+1, k), ey(i+1, j, k)$



電場と磁場のx成分の場合、隣接領域に依存するのはy, z軸方向

- 電場は、添え字が一つ少ない磁場に依存する
- 磁場は、添え字が一つ多い電場に依存する

領域分割とMPI通信で並列計算を実施

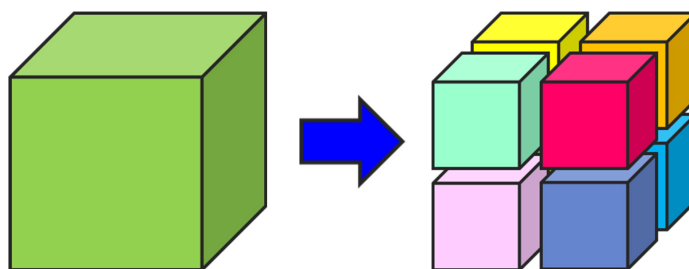
- 領域の境界で1セル重なるように分割する(袖領域)
- 袖領域のデータのみMPI通信する

高速化

- 大きく分けて並列化とベクトル化がある
- 多数のプロセッサを並べて速度向上を達成するのが並列化
- 同様の演算を次々にパイプラインに入れて、大量に処理していくのがベクトル化

並列化

- 領域分割とMPIによる並列化
- 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

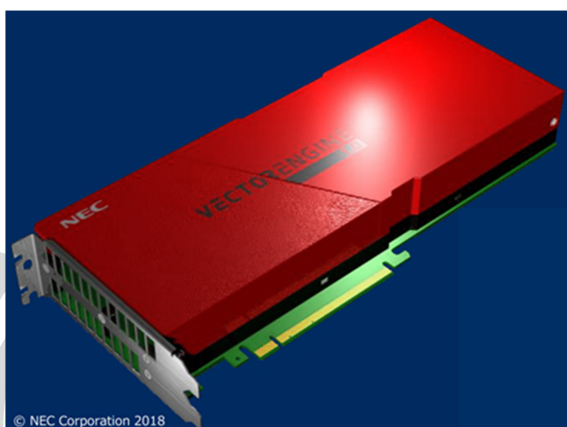


元のシミュレーション領域

領域分割(8分割)

ベクトル型スパコン

NEC SX-Aurora TSUBASA



ベクトル化

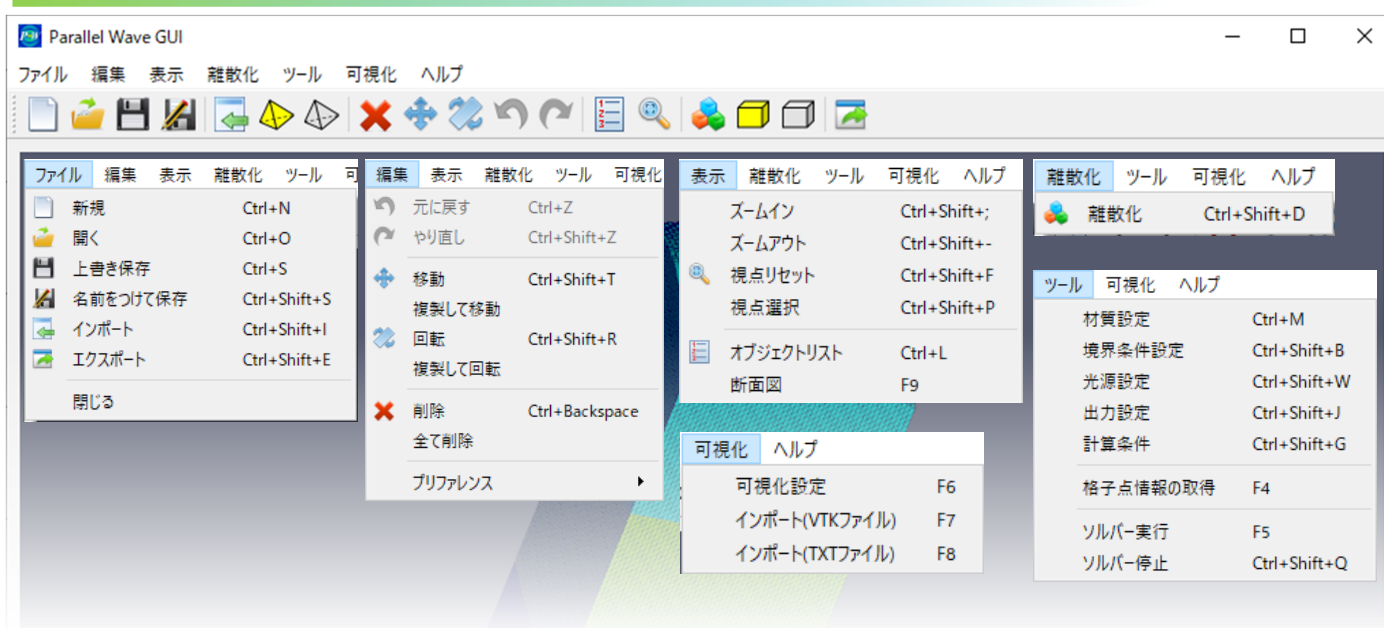
- FDTD法はもともとベクトル化に適したアルゴリズム
- ParallelWaveに対してチューニングを行いNEC製次世代イノベーションプラットフォームSX-Aurora TSUBASAでの高速計算を可能にした
- * ハイパフォーマンスなVHでプリポスト処理(GUI)

➡ 高速化技術については次の講演

オールインワンプラットフォーム

- ベクトル型スパコンSX-Aurora TSUBASA向けにチューニング
→ 同プラットフォーム上で高速計算が可能。並列計算も実装されているので大規模モデルの高速計算も実現できる
- 電磁波解析ソフトウェアParallelWaveは既にマシンにインストール済み
→ マシンの立ち上げ作業は不要
- SX-Aurora TSUBASAとParallelWaveのセットモデル
→ 電磁波・光波解析作業をより速く、より安価に、ワンストップサポートで実現すると共に、将来的な拡張性も有するオールインワンプラットフォーム

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る。
- 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)を備えている。
- 充実した計算結果の可視化機能を備えている。

出力結果

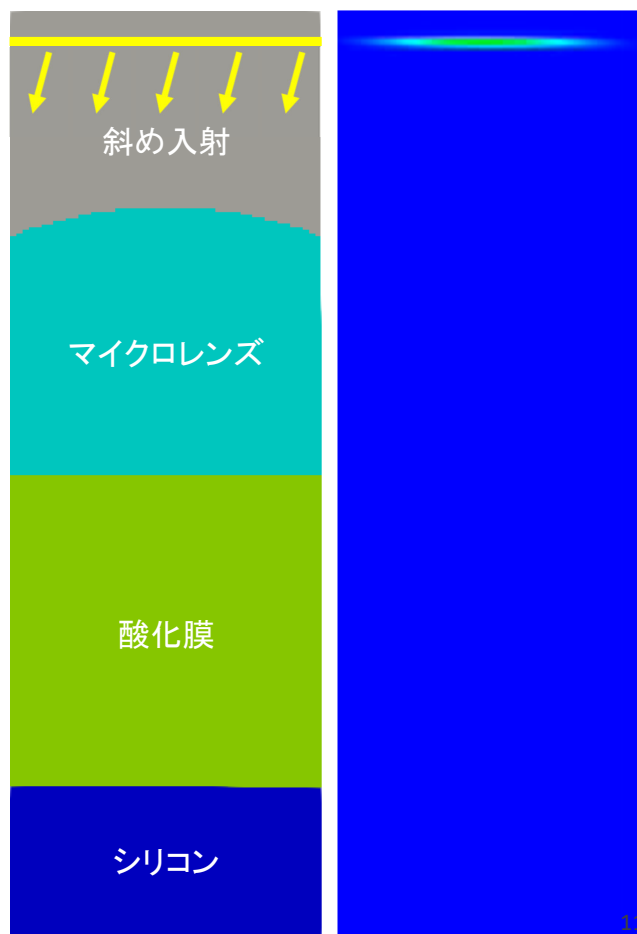
- 点出力 (Ex, Ey, Ez, Hx, Hy, Hz)
- 2D出力 (Ex, Ey, Ez)
- 3D出力 (強度 $|E|^2$ 、吸収 $\sigma|E|^2$)

* 2D/3D出力はVTK形式である。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る。

2D/3D/アニメーション描画設定画面



Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

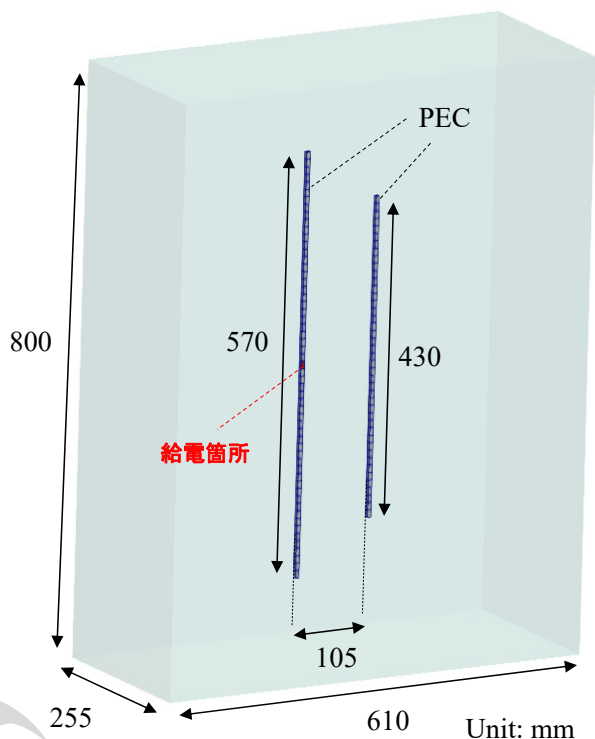


目次

1. ParallelWaveの特徴
2. 解析事例
3. FDTD法の概要
4. 高速化(並列化とベクトル化)
5. オールインワンプラットフォーム
6. GUI (直交格子生成ソフトウェアAdvance/ParallelGrid)
7. 解析事例(アンテナ特性)
8. まとめ

計算モデルと計算条件

計算モデル



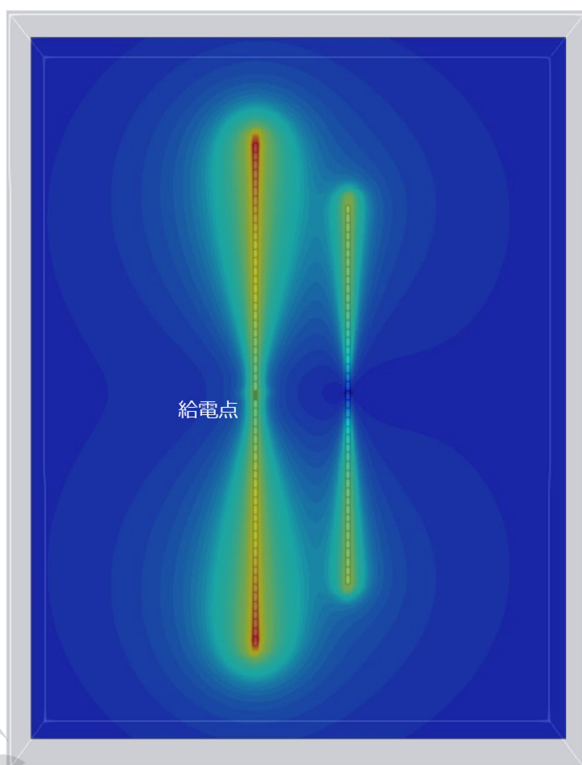
FDTD計算条件

項目	設定値
給電	ガウスパルス
パルス幅	301.625 psec
時間刻み	11.110 psec
ステップ数	9,000 (100 nsec)
境界条件	PML吸収境界(x, y, z方向)

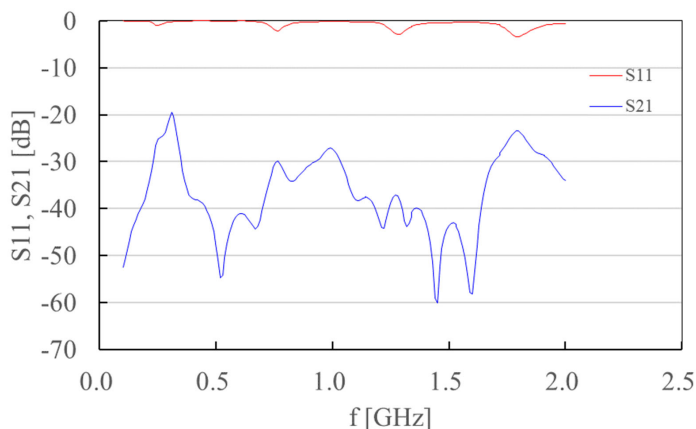
モデル参照: R. Luebbers et al., Finite Difference Time Domain Calculations of Antenna Mutual Coupling, 1992

近傍界とSパラメータ

近傍界@250MHz



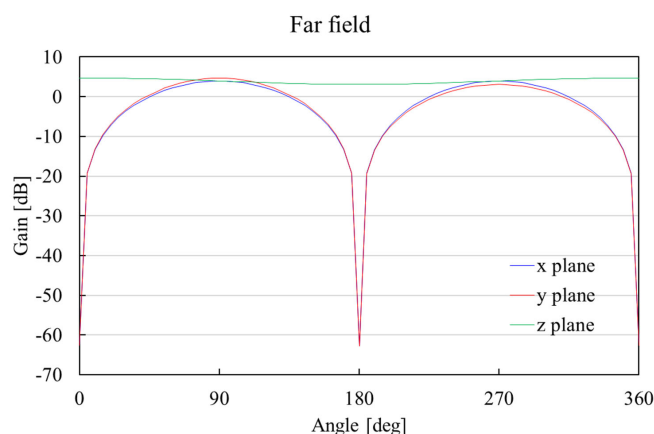
Sパラメータ



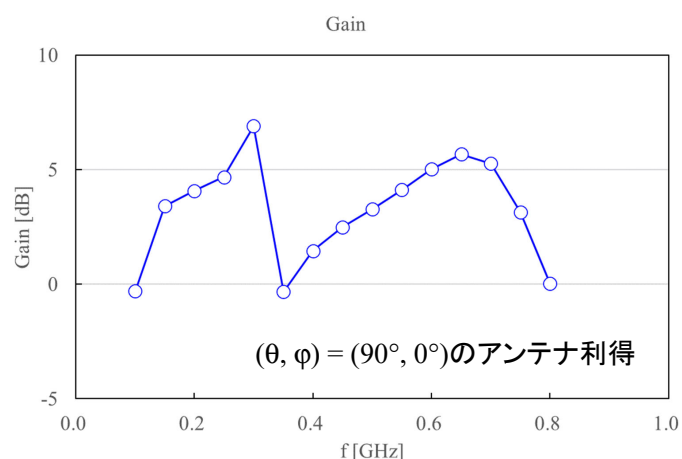
- S11: 反射特性
- S21: 伝達特性
- 複数の観測点間のSパラメータを計算できる

遠方界とアンテナ利得

遠方界(xyプロット)



アンテナ利得



- 指定した出力面(X/Y/Z)の2D遠方界を出力
- 全方向の3D遠方界を出力できる
- 指定した方向のアンテナ利得を計算

まとめ

- Advance/ParallelWaveはアドバンスソフトが自社開発している電磁波解析ソフトウェアであり、電波から光波の領域まで幅広い分野に対応する機能を持っている。
- ParallelWaveのこれまでの解析事例を紹介した。今後、通信、EMC、光学素子、医療機器分野の適用事例が増えることを期待している。
- 高速化・大規模化に対応するために並列化・ベクトル化を実施。SX-Aurora TSUBASAとParallelWaveのセットモデルを紹介した。
- アンテナ特性(Sパラメータ、遠方界、アンテナ利得、近傍界)の解析事例を紹介した。

電磁波解析ソフトウェア Advance / ParallelWaveの高速化技術

- ベクトル化による高速化 -



Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

アドバンスソフト株式会社

目次

1. ハードの紹介 (SX-Aurora TSUBASA)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
3. 高速化のベンチマーク
 - ・ マイクロレンズ付き受光素子
4. 大規模計算
 - ・ メッシュサイズとメモリ使用量の関係
5. まとめ

目次


1. ハードの紹介 (SX-Aurora TSUBASA)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
3. 高速化のベンチマーク
 - マイクロレンズ付き受光素子
4. 大規模計算
 - メッシュサイズとメモリ使用量の関係
5. まとめ

NEC SX-Aurora Tsubasaとは？


SX-Aurora TSUBASAの特長

SX-Aurora TSUBASA


SX-Aurora
(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

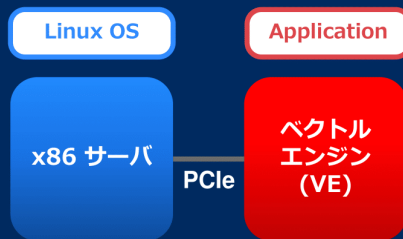
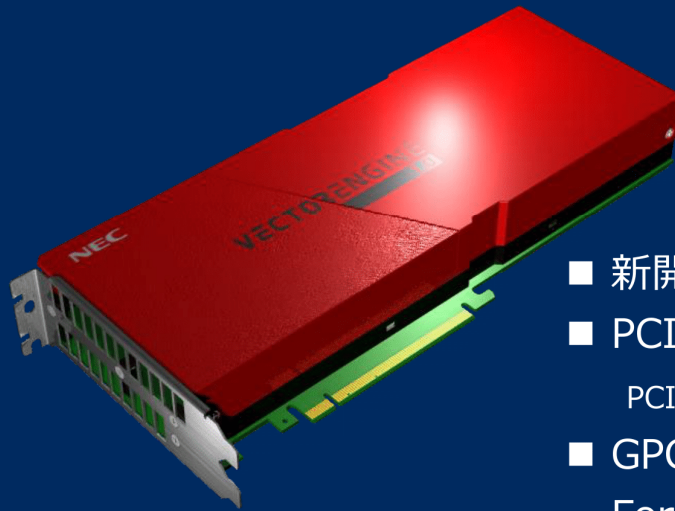
3

© 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 ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

5

目次

1. ハードの紹介 (SX-Aurora TSUBASA)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
3. 高速化のベンチマーク
 - ・ マイクロレンズ付き受光素子
4. 大規模計算
 - ・ メッシュサイズとの関係
5. まとめ

FDTD法とベクトル化

◆ もともとFDTD法はベクトル化・並列化に適している (陽解法、コア部が単純なループ構造)

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

```

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、MPIにおける境界処理の為、doループの初期値・最終値が関数呼び出しになっており、少々複雑

Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

7

FTRACEによる出力結果

FTRACEによるオリジナルコードの解析 (上位20ルーチンを出力)

```

*-----*
* FTRACE ANALYSIS LIST
*-----*
Execution Date : Mon Dec 16 17:03:51 2019 JST
Total CPU Time : 0:02'46"027 (166.027 sec.)

```

FREQUENCY	EXCLUSIVE TIME[sec] (%)	AVER.TIME [msec]	MOPS	MFLOPS	V.OP RATIO	AVER. V.LEN	VECTOR TIME	LICACHE MISS	CPU CONF	PORT HIT	VLD E.%	LLC	PROC.NAME
3894	40.034 (24.1)	10.281	4912.0	1169.2	57.13	50.3	47.117	2.551	0.000	58.86	UPD_MAGNETIC_FIELD_PARALLEL_MOD::UPD_MAGNETIC_FIELD		
3894	39.562 (23.8)	10.160	5327.1	1359.6	59.55	49.3	47.343	44.291	0.000	49.88	UPD_ELECTRIC_FIELD_PARALLEL_MOD::UPD_ELECTRIC_FIELD		
216	20.463 (12.3)	94.737	1156.6	28.5	0.03	12.4	0.021	3.179	0.000	100.00	OUTEM_PLANE_VTK_PARALLEL_MOD::OUTEM_PLANE_VTK		
154566686	9.829 (5.9)	0.000	2421.8	0.0	0.00	0.0	0.000	6.044	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IE_CELL_OWNED_ONLY		
154566686	8.743 (5.3)	0.000	2722.6	0.0	0.00	0.0	0.000	11.162	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IS_CELL_OWNED_ONLY		
1947	8.138 (4.9)	4.180	10646.4	5931.9	82.58	50.0	8.600	0.888	0.000	70.98	CALC_ENERGY_PARALLEL_MOD::CALC_ENERGY		
122855700	8.016 (4.8)	0.000	2360.3	0.0	0.00	0.0	0.000	2.163	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IS_GRID_OWNED_ONLY		
122855700	6.734 (4.1)	0.000	2809.8	0.0	0.00	0.0	0.000	5.315	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IE_GRID_OWNED_ONLY		
68133363	3.706 (2.2)	0.000	2831.4	0.0	0.00	0.0	0.000	0.550	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IS_CELL		
68133363	3.587 (2.2)	0.000	2924.8	0.0	0.00	0.0	0.000	0.473	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IE_CELL		
68975740	3.526 (2.1)	0.000	3012.2	0.0	0.00	0.0	0.000	0.261	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IS_GRID		
68975740	3.498 (2.1)	0.000	3037.0	0.0	0.00	0.0	0.000	0.243	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IE_GRID		
1	3.168 (1.9)	3168.207	1005.0	17.6	0.00	125.5	0.000	0.486	0.000	100.00	OUTPUT_ENERGY_VTK_PARALLEL_MOD::OUTPUT_ENERGY_VTK		
1947	1.594 (1.0)	0.819	6657.4	2746.2	73.33	49.5	1.761	0.691	0.081	37.15	OSB_PBC_SINCOS_PARALLEL_MOD::OSB_PBC_SINCOS		
3894	1.370 (0.8)	0.352	5108.9	1391.9	59.03	50.5	1.611	0.081	0.000	56.49	UPD_ELECTRIC_PML_PARALLEL_MOD::UPD_ELECTRIC_PML		
3894	1.351 (0.8)	0.347	5179.2	1411.1	59.03	50.5	1.564	0.086	0.000	59.60	UPD_MAGNETIC_PML_PARALLEL_MOD::UPD_MAGNETIC_PML		
1	0.221 (0.1)	220.562	1968.7	0.1	0.00	0.0	0.000	0.011	0.000	0.00	INPUT_GRID_MOD::INPUT_GRID		
62304	0.219 (0.1)	0.004	5730.2	0.4	90.50	167.7	0.082	0.053	0.040	72.64	TRANSFER_MOD::ISENDRVCV_FIELD::ISENDRVCV		
3687618	0.218 (0.1)	0.000	2603.4	0.0	0.00	0.0	0.000	0.047	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::IE_GRID_OWNED_ONLY		
3687618	0.216 (0.1)	0.000	2625.4	0.0	0.00	0.0	0.000	0.044	0.000	0.00	SUBGRID_MOD::JS_GRID_OWNED_ONLY		

- 電場・磁場の更新ルーチンが上位2つに位置している(コア部)
- 非常に多い関数呼び出し(IE_CELL_OWNED_ONLY)がある
- 出力ルーチン(OUTEM_PLANE_VTK)での時間が結構多い

FTRACE : NECコンパイラを使用してコンパイルおよびリンクすることで、プログラムの関数ごと、ユーザの指定した任意の区間ごとのCPU時間やベクトル化に関する詳細な性能情報を得る事ができる解析ツール

Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

コア部ルーチンのベクトル化

オリジナルプログラム

```

37:          !   電場の更新
38:
39: +----->      do k = ks_grid_owned_only(bound, 2), ke_grid_owned_only(bound, gnT_z-1)
40: +----->          do j = js_grid_owned_only(bound, 2), je_grid_owned_only(bound, gnT_y-1)
41: |V----->              do i = is_cell(bound, 1), ie_cell(bound, cnT_x)
42: | | |
43: | | |          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)
44: | | |                                     hy(i,j,k) + hy(i,j,k-1) )
45: | | |          enddo
46: +----->      enddo
47: +----->      enddo
    
```

do文の3重ループ

ベクトル化情報

```

NEC Fortran Compiler (2.5.1) for Vector Engine   Wed Dec 18 19:03:06 2019
FILE NAME: code_base/upd_electric_field_parallel.f90

PROCEDURE NAME: UPD_ELECTRIC_FIELD_PARALLEL_MOD::UPD_ELECTRIC_FIELD
DIAGNOSTIC LIST

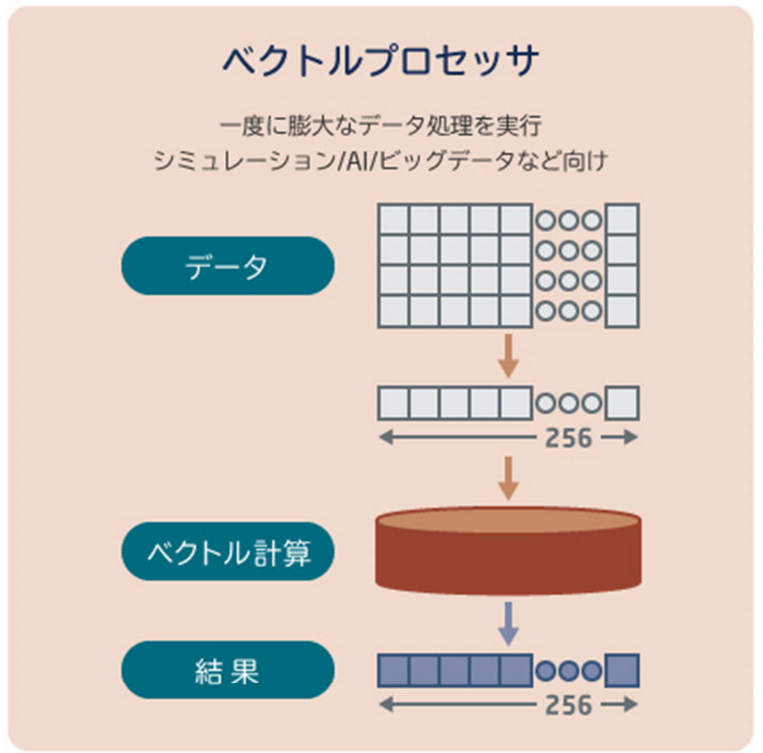
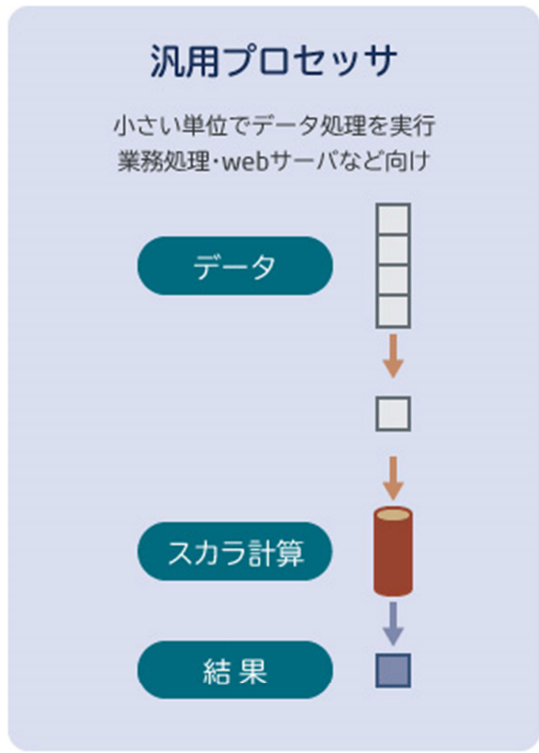
LINE          DIAGNOSTIC MESSAGE

40: vec( 110): Vectorization obstructive procedure reference.: SUBGRID_MOD::IS_CELL
40: vec( 110): Vectorization obstructive procedure reference.: SUBGRID_MOD::IE_CELL
41: opt(1025): Reference to this procedure inhibits optimization.: SUBGRID_MOD::IE_CELL
41: vec( 101): Vectorized loop.
43: vec( 128): Fused multiply-add operation applied.
    
```

自動ベクトル化診断メッセージ

ベクトル化のアプローチとして、ベクトル長を長くするために、リストベクトルを用いたベクトル化(3重ループの1重ループ化)を試みる

ベクトル演算



計算処理の例

一度に処理出来るデータサイズが256

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
    }
  }
enddo
enddo
enddo
nmaxex = n
    
```

事前にリストベクトルを作成

リストベクトル

リストベクトルの作成

```

35: S----->      do n = 1, nmaxex
36: |                i=iiiex(n)
37: |                j=jjjex(n)
38: |                k=kkkex(n)
39: |                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) )
40: S-----      enddo
    
```

部分ベクトル化にしかない

ex にベクトル化を阻害する依存関係があるかも

```

LINE          DIAGNOSTIC MESSAGE
35: vec( 102): Partially vectorized loop.
39: opt(1036): Potential feedback - use directive or compiler option if OK.
39: vec( 122): Dependency unknown. Unvectorizable dependency is assumed.: EX
    
```

そのままでは部分ベクトル化しかない(自動ではやってくれない)

リストベクトルを用いたベクトル化

実際には、ベクトル化によって答えは変わらない ⇒ 強制ベクトル化

```

35:          !NECS IVDEP
36: V----->      do n = 1, nmaxex
37: |                i=iiiex(n)
38: |                j=jjjex(n)
39: |                k=kkkex(n)
40: |                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

```

*-----*
* FTRACE ANALYSIS LIST
*-----*

Execution Date : Fri Jan 10 08:55:22 2020 JST
Total CPU Time : 0:01'23"424 (83.424 sec.)

FREQUENCY  EXCLUSIVE      AVER.TIME      MOPS  MFLOPS  V.OP  AVER.  VECTOR  LICACHE  CPU  PORT  VLD  LLC  PROC.NAME
           TIME[sec] ( % )  [msec]
           ( % )
3894      23.504 ( 28.2)    6.036  21508.5  2288.5  99.90  256.0  23.506  0.003  0.000  29.38  UPD_ELECTRIC_FIELD_PARALLEL_MOD::UPD_ELECTRIC_FIELD
3894      21.427 ( 25.7)    5.503  21575.4  2184.5  99.90  256.0  21.430  0.002  0.000  33.44  UPD_MAGNETIC_FIELD_PARALLEL_MOD::UPD_MAGNETIC_FIELD
           :
    
```

FTRACEによる出力結果 (プログラム変更後)

ベクトル演算率は 99.90%、平均ベクトル長は、最大の256とすることができ、リストベクトルによる効果が期待していた通り得られた。

目次

1. ハードの紹介 (SX-Aurora TSUBASA)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
- 3. 高速化のベンチマーク**
 - **マイクロレンズ付き受光素子**
4. 大規模計算
 - メッシュサイズとメモリ使用量の関係
5. まとめ

例：マイクロレンズ付き受光素子

光源

波面：**平面波**
 強度：一様分布
 波長：550 nm
 偏光：円偏光
 照射： **θ 15度** ϕ 90度

領域終端の境界条件

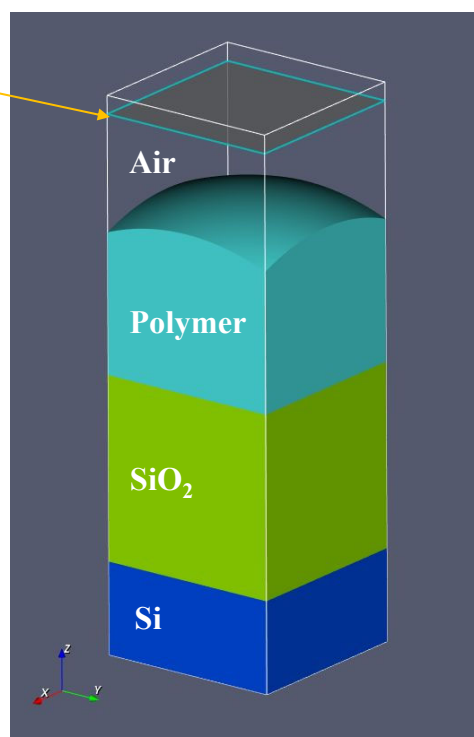
垂直方向：**吸収境界**
 水平方向：**周期境界**

分割数：**300×300×300**

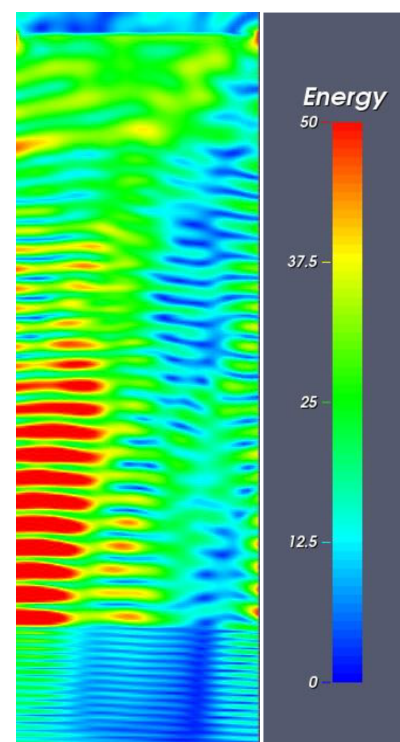
セル数：**27,000,000**

シミュレーション領域：

x方向：2 μ m
 y方向：2 μ m
 z方向：6 μ m



シミュレーション構造

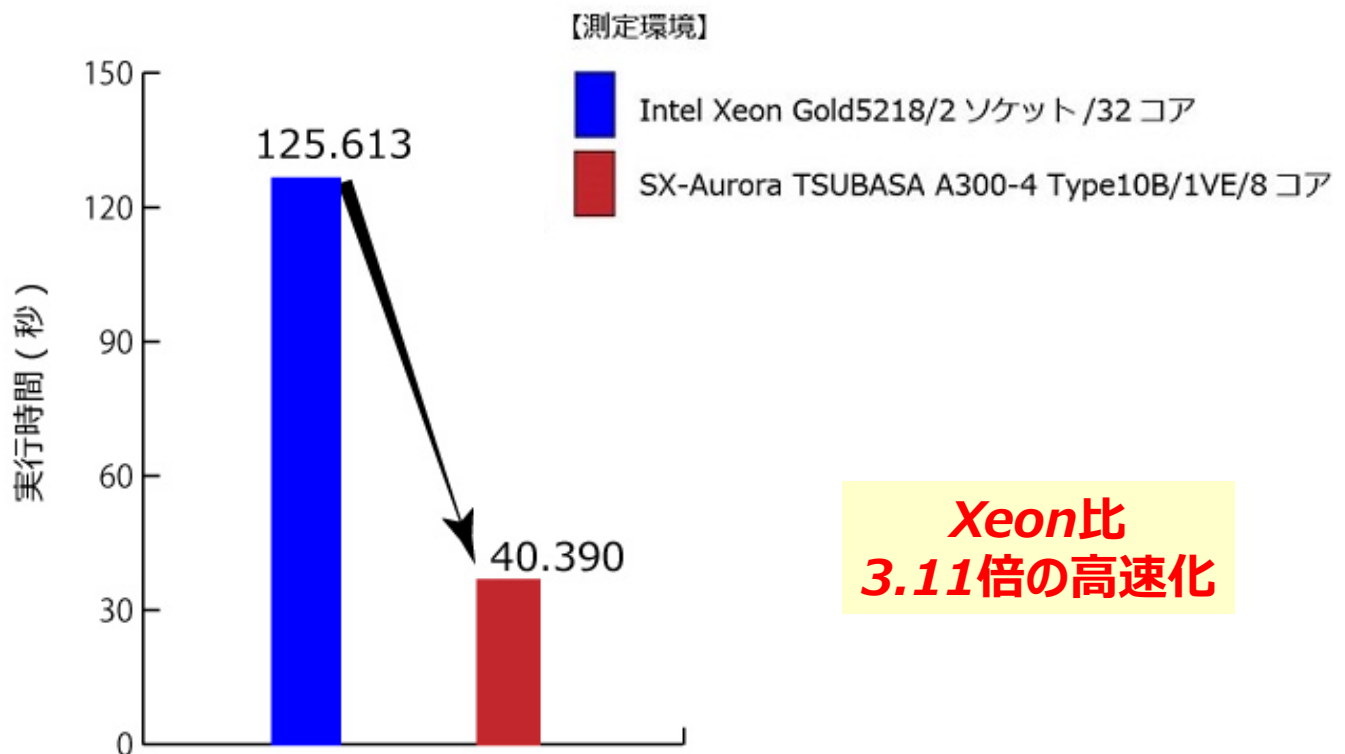


電場強度分布

SX-Aurora Tsubasa での高速化性能

分割数: 300×300×300

セル数: 27,000,000

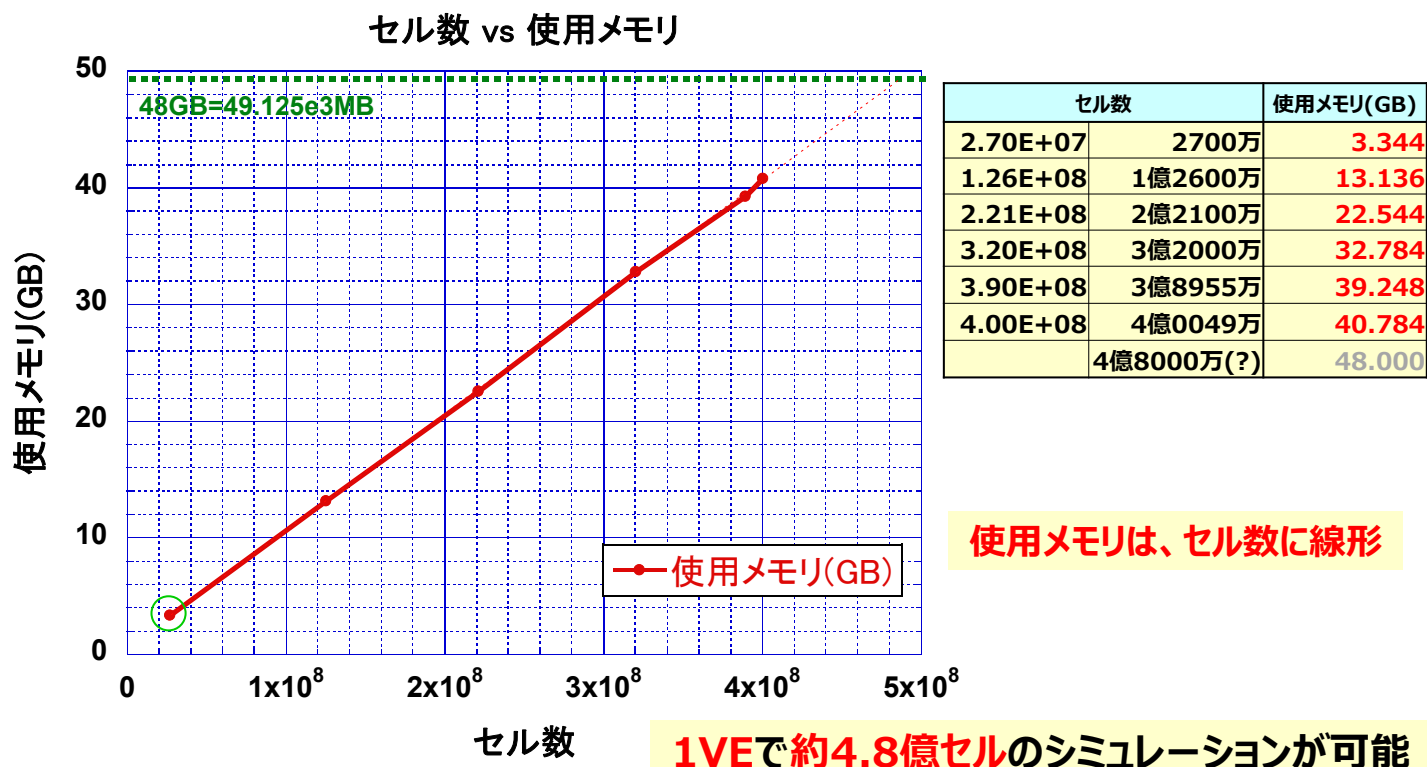


目次

1. ハードの紹介 (SX-Aurora Tsubasa)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
3. 高速化のベンチマーク
 - マイクロレンズ付き受光素子
4. **大規模計算**
 - **メッシュサイズとメモリ使用量の関係**
5. まとめ

大規模化のベンチマーク

マイクロレンズ付き受光素子を例に、セル数を変更し、大規模計算を実施



Copyright ©2022 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

17

目次

1. ハードの紹介 (SX-Aurora TSUBASA)
2. ParallelWaveのベクトル化
 - i. FDTD法とベクトル化
 - ii. コア部ルーチンのベクトル化
 - iii. リストベクトルを用いたベクトル化
3. 高速化のベンチマーク
 - マイクロレンズ付き受光素子
4. 大規模計算
 - メッシュサイズとの関係
5. まとめ

まとめ

当社ソフトウェアの電磁波解析ソフトウェアAdvance / ParallelWaveに対してベクトルチューニングを行い、NEC製次世代イノベーションプラットフォームSX-Aurora TSUBASAでの高速計算を可能にした。

● 高速化のベンチマーク

- 実用的な例題である、マイクロレンズ付き受光素子についてベンチマークを実施して高速化性能を比較した。
- Intelクラスタマシン(MPI 32並列)と比較して1VEを使用して、3.11倍の高速化が得られた。

● 大規模化のベンチマーク

- 1つのモデルについてセル数が大きくなるように離散化をして大規模モデルのベンチマークを実施した。
- 1VE (48GB搭載)の場合、マイクロレンズ付き受光素子において、約4.8億セルのFDFTD計算が可能である。




ご清聴
ありがとうございました



関連サービスのご紹介

2022年11月17日（木）
アドバンスソフト株式会社

アドバンスソフトの プログラム資産活用サービス

お客さまのニーズ	当社が提供できるサービス	お客さまが得られる成果 
古いプログラムを最新の環境で動作できるようにしてほしい。	新しい Fortran の仕様に従ってプログラムを修正します。	パソコンからクラウドまでさまざまな環境でプログラムを実行できるようになり、研究効率が向上します。
属人化していたプログラムの担当者が退職や異動してしまって、プログラムの活用に困っている。	プログラムの調査をし、ドキュメントやマニュアルの作成、実行手順書を作成するなどサポートを行います。	ドキュメントやマニュアル、実行手順書を基にしてプログラムの問題点、活用方法、スキルやノウハウの継承ができるようになります。
テキストベースで使い難く、計算結果も分かり難い。	GUI を開発し実装するなど使い勝手がよくなるように、メンテナンスを行います。	さまざまな人が利用可能となり、業務効率向上や業務短縮に繋がります。将来的な商用化の基礎となります。
計算時間がかかるので、短縮したい。 	プログラムの時間計測を行い高速化・並列化を施します。 	計算時間が短縮され解析結果の検討時間が確保できます。また、解析ケースを増やすことができたり、モデル形状の変更パラメータを変更しての解析の時間もとれたりできます。加えて、実験をシミュレーションに置き換えることができ、コスト削減につながります。

アドバンスソフトの最適化を用いた事例紹介

最適化とは
最適化問題はさまざまな分野に現れ、一般にはさまざまな制約条件の下で目的関数を最小または最大にすること、と定義されます。設計製造や研究開発の現場では、複雑な制約条件を持つものや、目的関数を明確に記述できない問題に対しても、最適化が求められることもあります。

最適化は、問題に応じてさまざまな手法を選択する必要があり、厳密解が得られない場合もあり、どのように近似解を求めるかなど、いくつかのノウハウが必要になります。

当社はパラメータ最適化、スケジュール最適化などの実績があり、お客様の問題に応じた最適化のご提案をいたします。

課題解決、意思決定および試行錯誤の時間の短縮などでお役に立ちたいと考えております。

1. 受託開発
お客様の課題に対して目的関数、制約条件、設計変数を定義し、CAE解析を用いて、モデルの選定からご提案し最適化アルゴリズムでのプログラム開発をいたします。

2. 受託請負
お客様の課題に対して目的関数、制約条件、設計変数を定義し、CAE解析を用いて、お客様の課題を解析・実行いたします。

3. コンサルティング・調査
お客様の課題について、当社でのシミュレーション技術を用い、製品開発でのご相談、検討のお手伝いをさせていただきます。

最適化を用いた事例紹介

実績紹介

弊社での実績の一部をご紹介します。

案件	概要	入力値	出力値	分野
1. パラメータ最適化	電気化学的にモデル化した電池について、試験データ(電圧・電流特性など)との誤差を最小化するパラメータ(初期電圧や拡散係数、電気伝導率など)を推定するプログラムを作成しました。	材料データ、イオンの移動、充電、放電など	初期電圧、拡散係数、電気伝導率など	材料、製造、製品開発等
2. 巡回スケジュール最適化	ある地域一帯の上空を飛行するためのヘリコプター等の最適な巡回スケジュールを立案するプログラムを開発しました。 対象地域は、緯線と経線によって数百から数千のセルに分割され、1回の巡回で1つ以上の矩形範囲(複数のセルを結合した単位)で活動します。 セルごとの優先度や、ヘリポートにおける給油のスケジュールなども考慮可能とし、巡回済みのセルや移動の様子を可視化しました。	飛行ルート、時系列データ、運行速度、高度、対象指定範囲など	巡回スケジュール、クルスタ一番号など	運輸、交通航空、造船等
3. 運航スケジュール最適化	高度(ヘリポートごとの必要機数)を決定するヘリコプターの最適な運航スケジュールを立案するプログラムを開発しました。 夜間運用の可否に基づく待機や、気象条件による迂回も考慮可能です。あわせて、移動の様子を可視化しました。	機数、航行・点検時間、気象条件など	運航スケジュール、ベース移動経路など	運輸、交通航空、造船等
4. 燃料消費量の最適化	飛行中の航空機をモデル化し、移動期間に関する制約を考慮した上で、2地点間での移動中における、燃料消費量を最小化する運航条件(高度や速度)を推定するプログラムを開発しました。なお、買入る気象条件に対するコスト最適化も実施しました。	飛行経路(高度、経度など)対気速度など	区間速度、燃料消費量、位置毎の速度と時間	運輸、交通航空、造船等
5. 機体特性の最適化	飛行中の航空機をモデル化し、航空機の飛行データ(高度や速度、燃料消費量など)との誤差を最小化する機体特性(揚力係数や推力係数など)を推定するプログラムを開発しました。	機体重量、対気速度、気圧、風速、燃料消費量など	揚力係数、効力係数など	製造、製品開発、航空、造船等

アドバンスソフト株式会社
詳しい情報をご希望の方は、まずはお問い合わせください。デモンストレーションも可能です。
〒101-0062 東京都千代田区神田豊河台丁目3番地 新お茶の水ビルディング17階
TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580 URL: <http://www.advancesoft.jp/>
E-mail: office@advancesoft.jp

Copyright ©2021 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

◇各サービスのご紹介

1. パッケージソフトウェアの販売・サポート

アドバンスソフトが取り扱っているパッケージソフトウェアは、国家プロジェクトまたは自社により開発した日本の国産製品です。

ソースコードを熟知した開発者が直接お客様のご質問にお答えするため、迅速で的確なサポートサービスをご提供することが出来ます。また、お客様のご要望に沿ったカスタマイズを行うことも可能です。

2. ソフトウェアの受託開発サービス

お客様の解決すべき課題に則した、計算科学技術用のソフトウェアを新規に開発いたします。また、お客様が現在ご利用になっているソフトウェアへの機能追加および改良にも対応いたします。

3. 解析サービス

計算科学用ソフトウェアを用いた解析計算を行います。さらに、その結果をシミュレーションの専門家ならではの見識をもって評価しご報告いたします。各種分野の専門技術者が、「お客様の課題解決にはどのような手法が有効であるか。」といったご相談にも対応させていただきます。

4. コンサルティング

CAEに関わる様々な課題をお客様と一緒に解決すべく、専門研究者がコンサルティングサポートをさせていただきます。また、「フリーソフトを使ってみたがサポート体制が無いので不安がある。」といった声にお応えして、ParaView、LAMMPSといったフリーソフトのコンサルティングもいたします。



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。