

次世代パワーデバイス実現に向けた大規模・大領域 半導体デバイスシミュレーションの研究



1. 研究目的

東日本大震災以来、従来にも増してエネルギーの効率的利用・省エネルギー化が必須となってきた。中でも自動車、電車や家庭用クーラー、ビル等の空調システムで利用されているパワーデバイスによるインバータシステムは重要なキーシステムであり、この効率化が今後のグリーン社会の実現に必須である。半導体デバイスを用いた効率化はこれまでもなされてきており、特にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の出現とその改良は自動車の燃費の向上にも端的に表れている。これまではシリコン(Si)を用いたIGBT基本セル1セルの3次元的な構造の最適化をプロセス・デバイスシミュレータを用いて行ってきていたが、今後は奥行き方向の3次元的な構造の最適化や終端構造を含めた基本セルとして数千~数万セル規模の大規模な3次元シミュレーションが強く求められている。

2. 研究内容

これまでの半導体シミュレータ(特にデバイスシミュレータ)はメモリと計算時間の関係でIGBTの3次元計算では数セル程度の規模(数十万メッシュ)しか計算できない。IGBTは大電流を流すために数万セルを並列に並べ、またセルの最終端で数千ボルトの耐圧を持たせるための3次元的な工夫が必要であり、セル動作のばらつき等を含めたシミュレーションによる最適化には2~3桁レベルの大規模計算を高速に行う必要がある。このためには

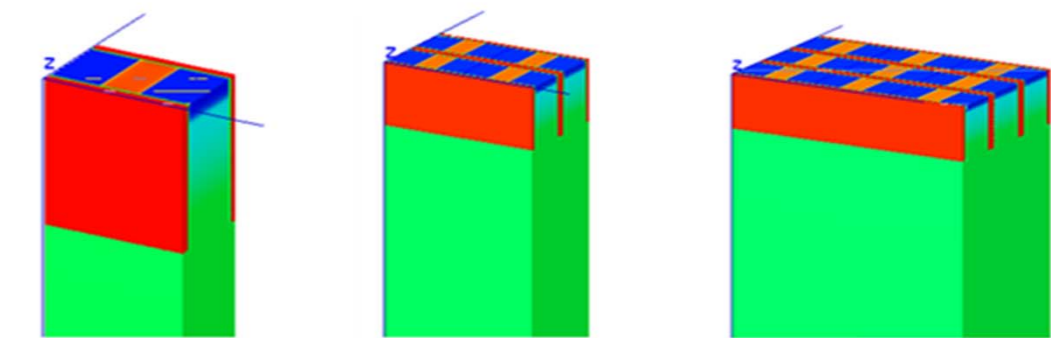
- (1) 電場内の移流拡散現象で強非線形問題となる電子輸送シミュレーションの収束性vs並列化効率の研究が必要。このため、メモリー分散をおこないつつ安定で高速に解法する並列化手法を開発する。
- (2) 1. デバイス・回路の分割、2. デバイス領域分割、3. 行列演算の並列化の手法から、最適な並列化演算の在り方を探る。数値スキームは、半導体分野で適用される高精度保存スキームで、移流反応拡散問題に広く展開でき、波及効果大きい。
- (3) 性質の異なる複数の連立方程式一括解法。行列演算は、連立方程式のNewton法から構成される大規模Jacobi行列が対象。
- (4) 桁落ちをふせぐための多倍長計算を必要な部分のみに適用した高速計算技術が必要である。特にSWとしては分散処理を行う手法として、理想的には計算順序による誤差のみとなる行列分割と領域を分割して適当な境界条件を課して反復的に解く手法があり、(1)~(4)はお互いに強い依存関係をもつため、応用数学的な理論によるチェック・検証と実際の計算結果評価を行いながら、手法の開発を進める。

『本発表(の一部)は半導体理工学研究センターと産業技術総合研究所との共同研究で実施した成果に基づくものです』

●IGBT解析(STARC-EWS(512GBメモリ))

	1x1セル	2x2セル	3x3セル
旧プログラム(O(N ^{1.8})を仮定)	約100h	1212h*(アポト)	5219h*(アポト)
産総研スパコン	約5h	約44h	約170h
高速化率	約20倍	約27倍	約30倍

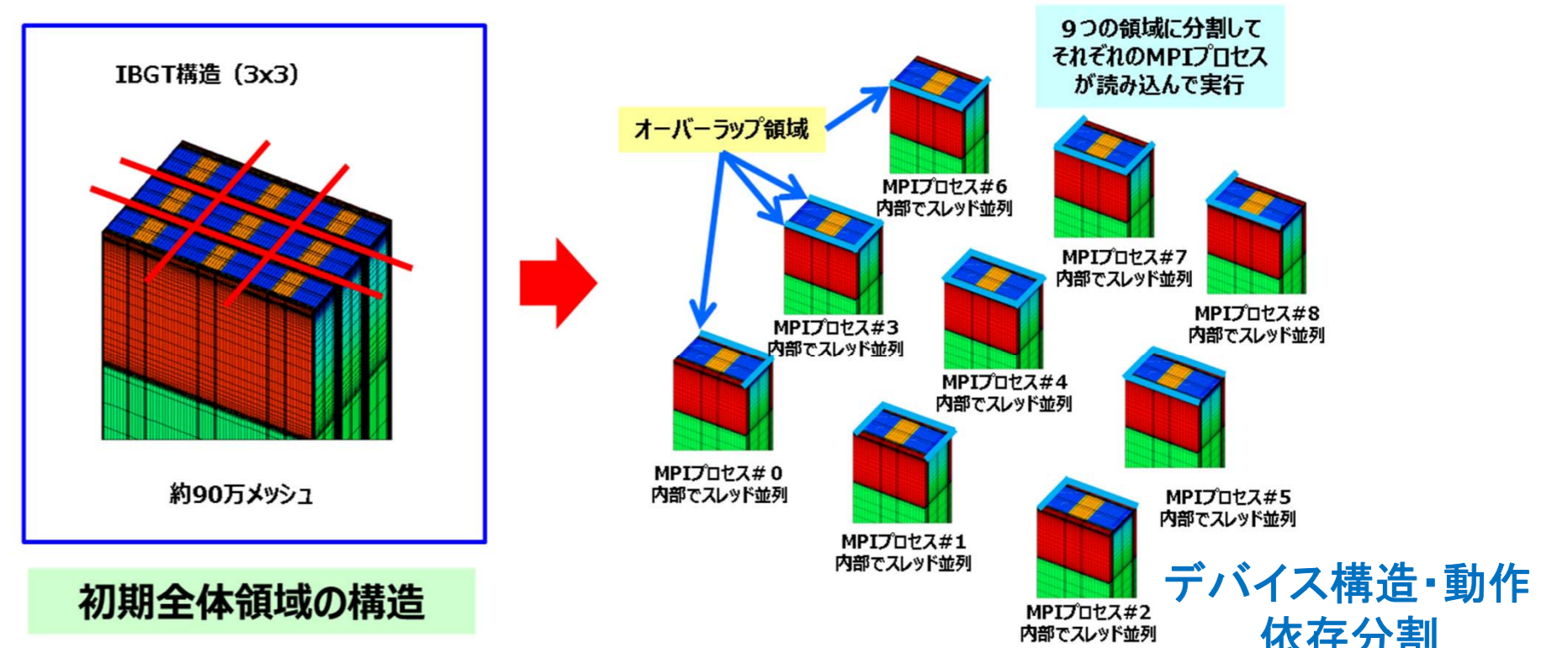
産総研スパコン: PCクラスタ16ノード128コア768GBメモリ



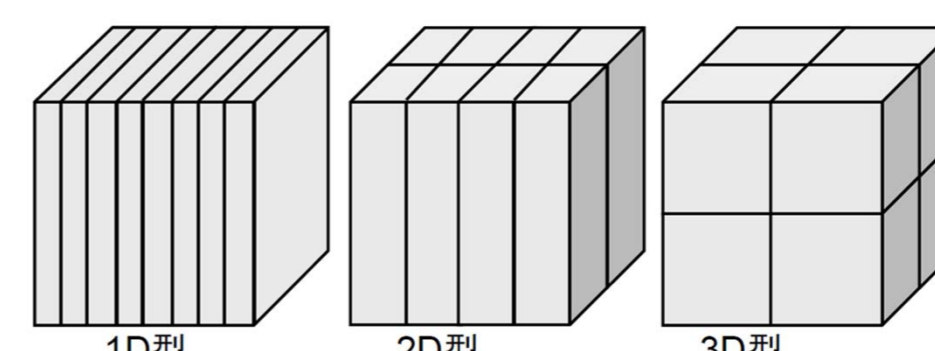
更なる大規模化を目指した領域分割・行列分割手法の評価と理論的解明

■領域分割のイメージ

・第一段階として、最初にベース(全)領域の構造を作成しておき、それを分割する方法を採用



領域分割の方法は色々試してみる(例えば構造メッシュではMETIS)



物理量の変化があまり大きくない領域分割をすれぱうまいく?

共同研究者: 松澤 一也、小田 嘉則(半導体理工学研究センター)、小田中 紳二、鐘 菁廣(大阪大学)

基本方程式

ψ : 電位、 n : 電子密度、 p : 正孔密度

ポアソン方程式: $F_\psi(\psi, n, p) = \text{div} \vec{D} - \rho = 0$

電子電流連続式: $F_n(\psi, n, p) = \text{div} \vec{J}_n - \frac{\partial n}{\partial t} + (G - R) = 0$

正孔電流連続式: $F_p(\psi, n, p) = \text{div} \vec{J}_p - \frac{\partial p}{\partial t} + (G - R) = 0$

電流密度式

移流項

拡散項

電子電流: $\vec{J}_n = -q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \text{grad} \psi + q \cdot D_n \cdot \text{grad} n$

正孔電流: $\vec{J}_p = -q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \text{grad} \psi - q \cdot D_p \cdot \text{grad} p$

収束性

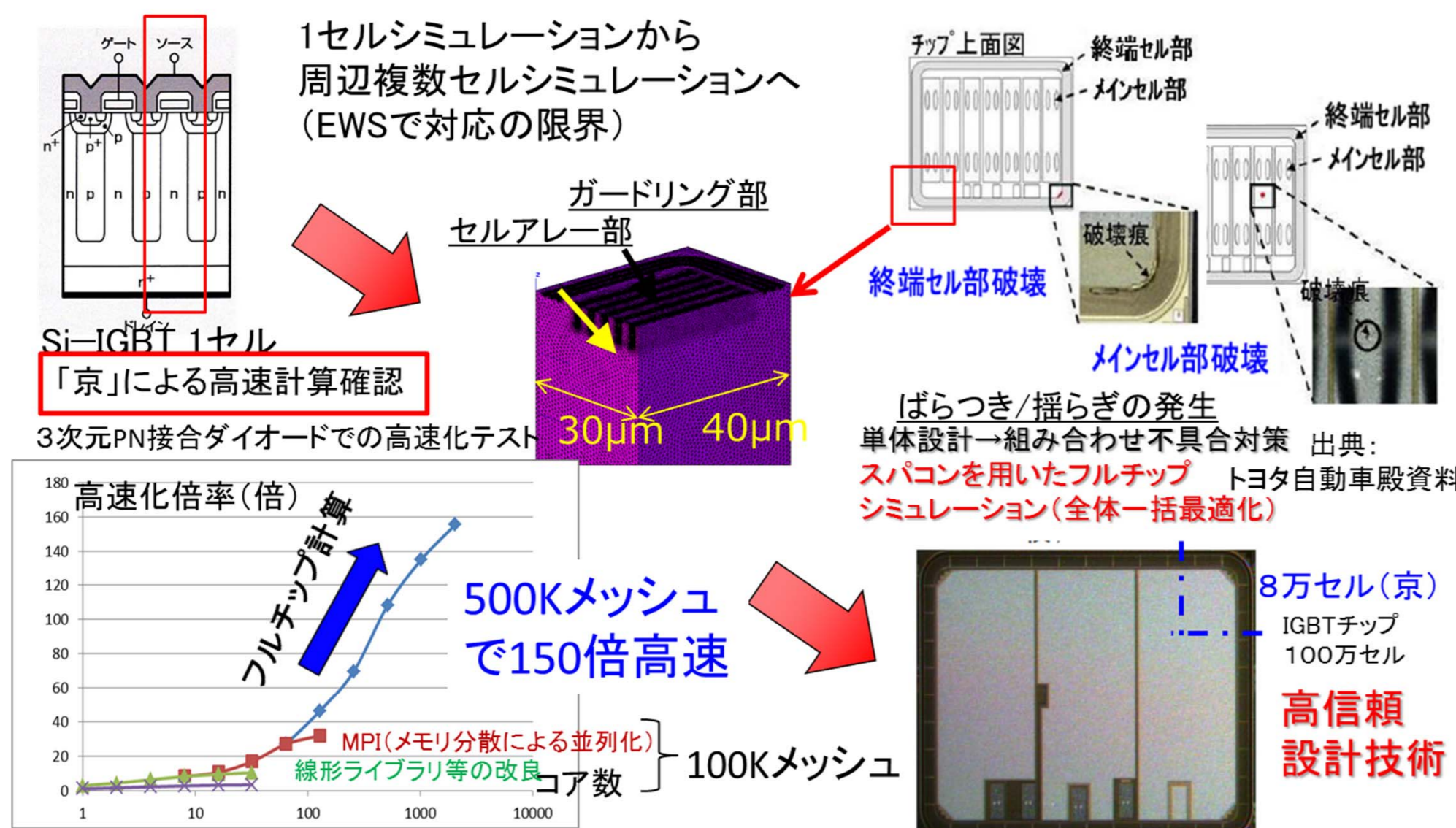
(電場内の移流拡散現象)

両立?

並列化効率

(行列・領域分割法)

フルチップシミュレーションを目指して



『本発表(の一部)は半導体理工学研究センターと理化学研究所計算科学研究機構との共同研究及び、半導体理工学研究センターと産業技術総合研究所との共同研究で実施した成果に基づくものです』

(1)石川清志、他、IGBTの大規模並列デバイスシミュレーション、第60回応用シンポジウム、2014年3月
 (2)石川清志、他、大規模・大領域高速デバイスシミュレーション、第60回応用シンポジウム、2013年3月
 (3)S.Shou and S.Odanaka, "A quantum energy transport model for semiconductor device simulation", Journal of Computational Physics, 235(2013)486-496.