

厚みの分布を理解しやすい 機械部品の新しい厚み可視化手法

茨城大学 理工学研究科
機械システム工学専攻 教授
乾 正知

乾 正知(いぬい まさとも), 自己紹介

- 1961年12月22日 茨城県日立市生まれ.
 - 茨城大学工学部 教授(2003年4月~)
 - スマーテック(株) 技術顧問
-
- 図形処理技術の機械設計・製造自動化への応用に関する研究に従事.
 - CAD/CAM, 機械設計支援, 工程設計自動化, 加工シミュレーションなど.
 - 研究のタネは現場にあり. インタビュー・調査重視.

研究の3つの方向性

- 3つの方向性でソフトウェアの研究を実施.

1. 基礎的な図形処理機能の強化

- 製造ソフトウェアで多用される複雑な図形計算を超高速に行う技術を開発し、日本のCAD/CAMベンダーに提供.

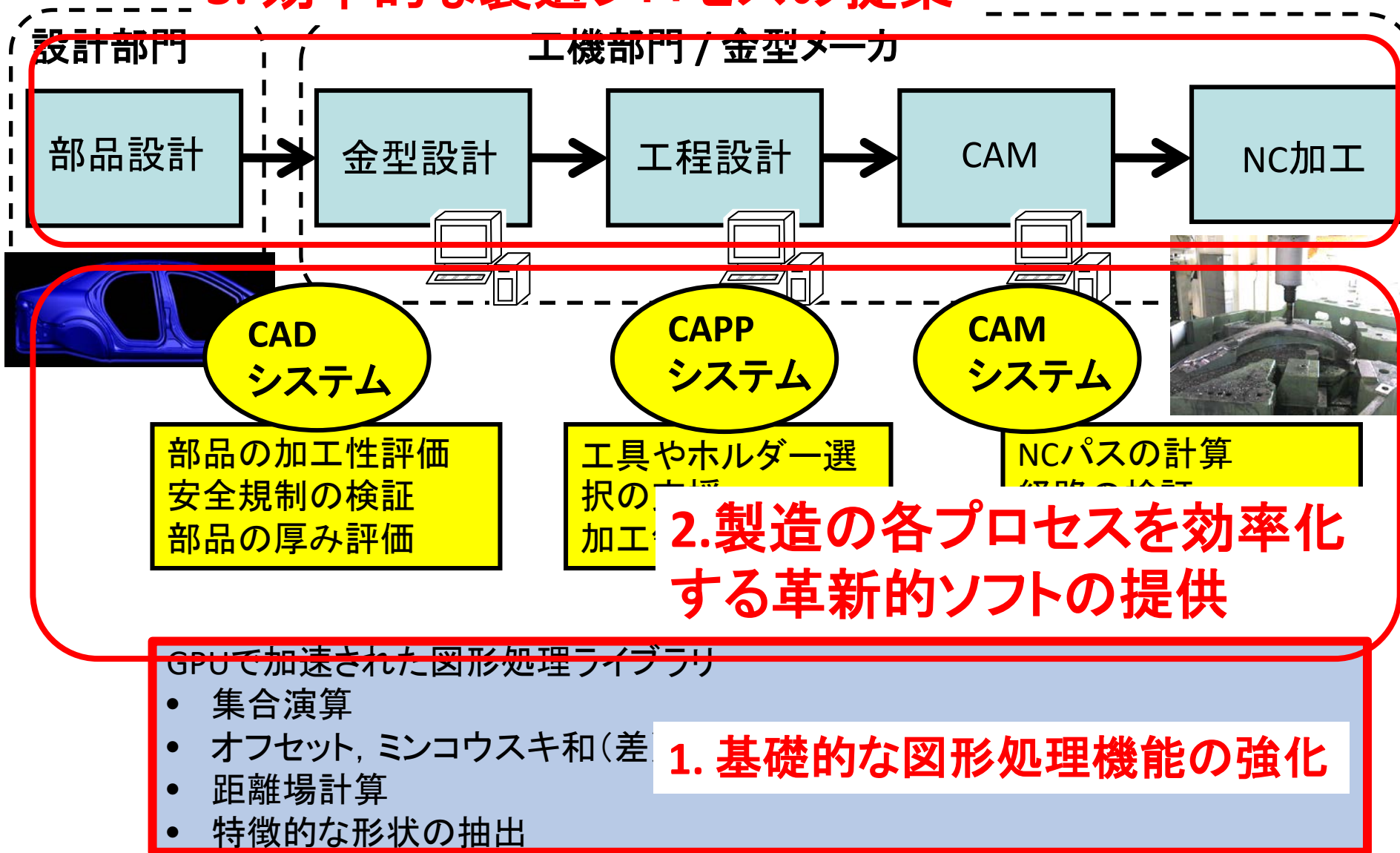
2. 製造の各プロセスを効率化する革新的ソフトの提供

- 独自に効率的な製造プロセスの構築を目指す企業に、革新的なソリューションを提供.
- 例えば工程設計の支援システムの共同開発.

3. 効率的な製造プロセスの提案

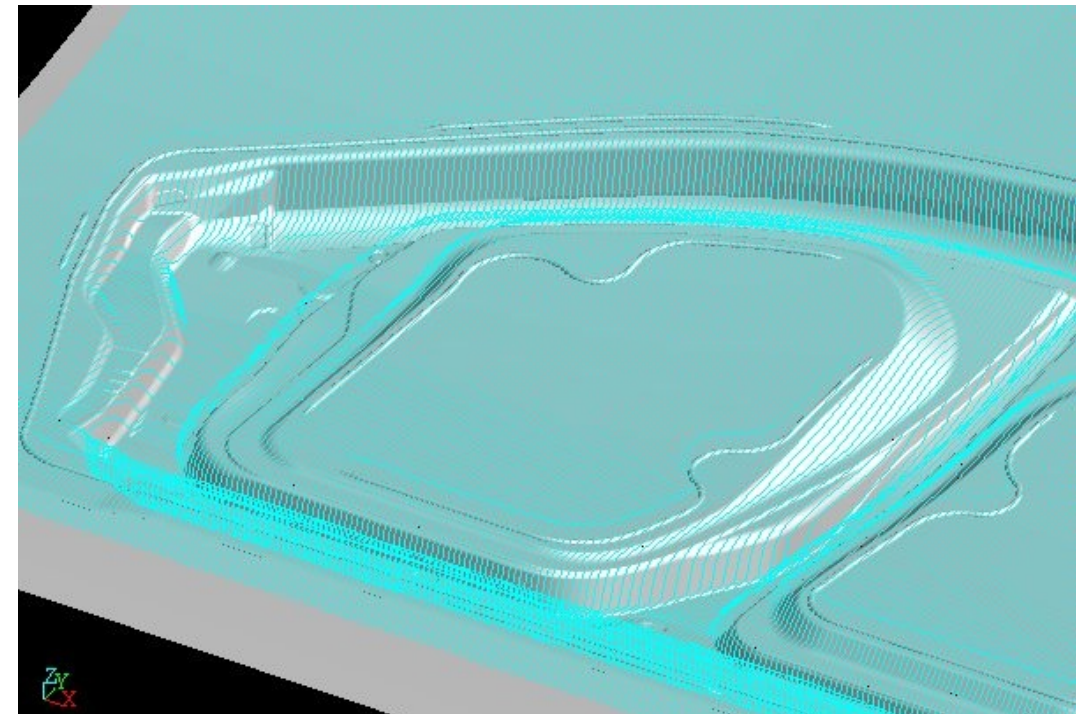
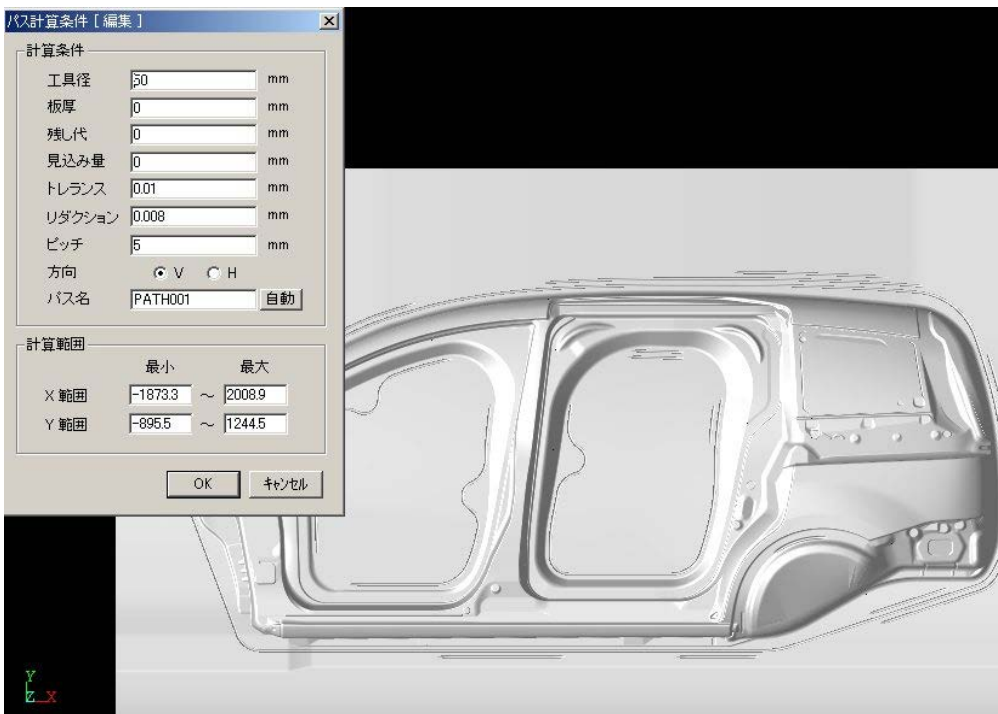
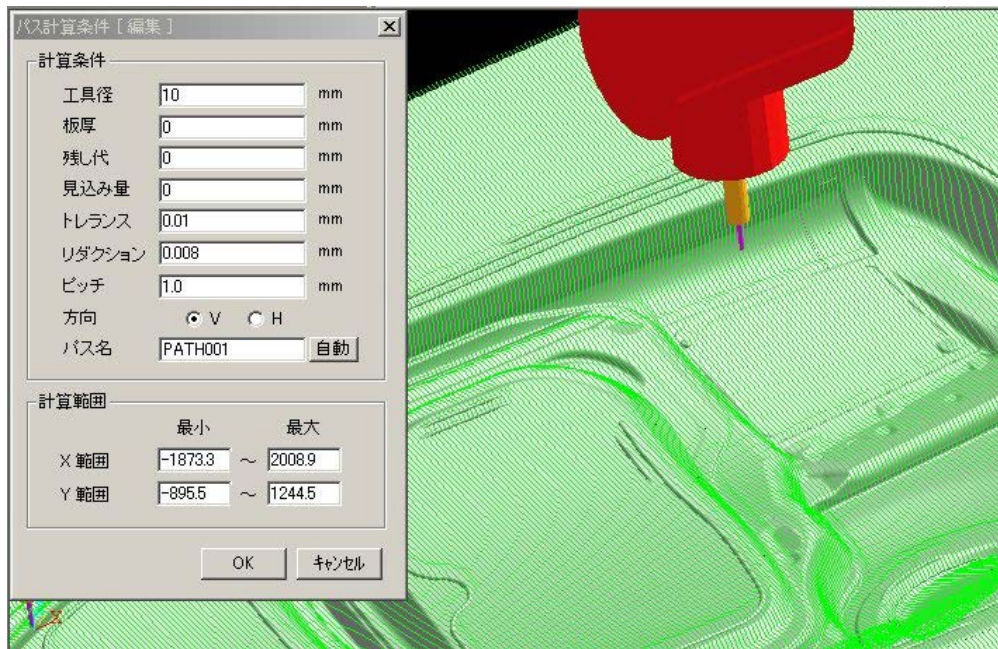
- フロントローディング:
 - 問題をできるだけ上流工程で解決し手戻り(リワーク)をなくす.
 - 早期に設計解を絞り込み作業の無駄を減らす.

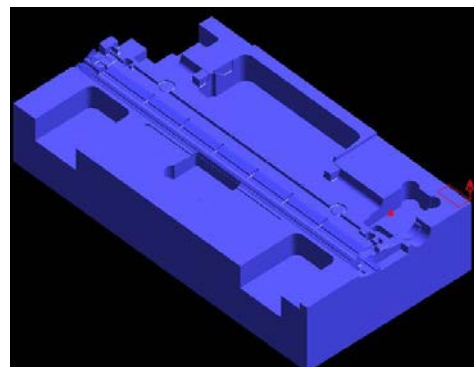
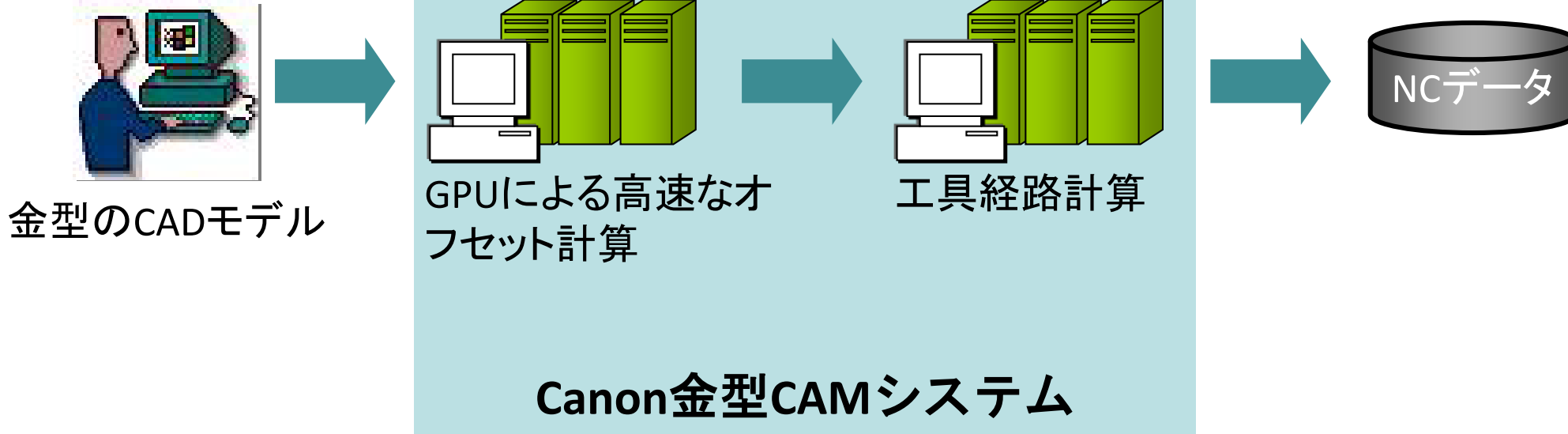
3. 効率的な製造プロセスの提案



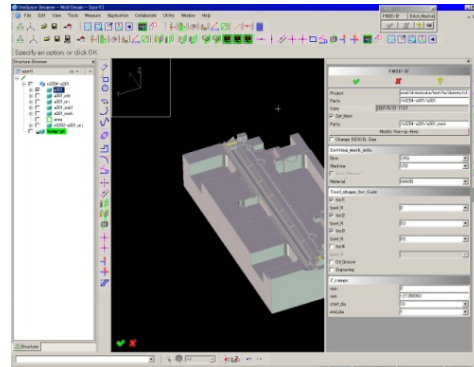
- 企業との共同研究や実用化事例多数.

2003年にマツダに提供したGPUにより高速化されたプレス金型の荒加工システム。
最初の実用化例。

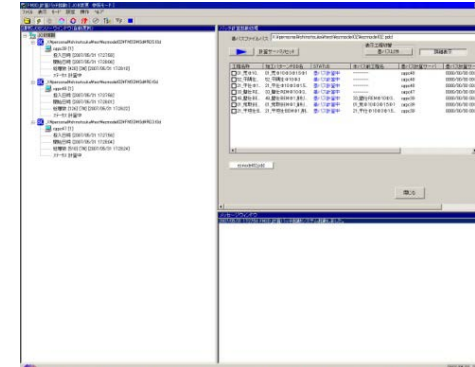




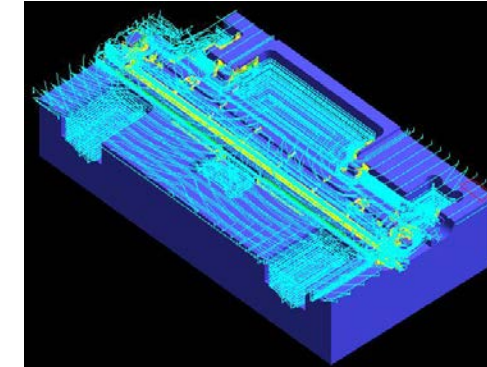
CADモデル



オフセット計算



NC工具経路の計算



NC経路データ

2006年から共同開発を進めたキヤノンの金型工程設計支援システム

超速切削シミュレータ K-ha!NC™

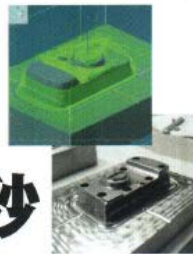
「簡単」に、「リアルタイム」で、NCデータの問題点を「解決」

K-ha!NC を利用する最大のメリット

「簡単」に、「リアルタイム」で、NCデータの問題点を「解決」
実加工後の手戻りを「ゼロ」に
3D-CAD/CAM との調和を考慮

- ◎ 一定の確率で発生する手戻りコストをゼロにする
3%から10%と言われる確率で発生する加工不具合を事前のシミュレーションで発見、修正することにより、手戻りのコスト、工具破損や材料の破損といった物理的損失をゼロにします。加工不具合の検出においては、NCプログラム中の対応行と不具合となる理由を明示し、加工パス修正の手間を最小限にします。
- ◎ システム価格を抑え、簡単な操作性の実現により初期費用を徹底削減
基本的な操作として「ワークの設定→NCファイルの読み込み→加工計算」の3つのボタンを押すだけで加工のシミュレーションが可能な仕組みとなっており、市販のソフトウェアでありがちな、導入に関する習熟コストを低減しております。導入に際しては年間ライセンス制と体験版の無償ダウンロードにより、導入費用を徹底的に低減いたします。体験版の制約は最小限にとどめ、十分に本製品の機能をご理解いただいてから購入いただけます。

- ◎ 工具軌跡の評価ではなく、加工品質とコストを評価
単なる形状計算や加工不具合の検出ではなく、目標とする形状との差分を計算し、加工品質の評価を行います。また、時間当たりの切削量、一刃あたりの切削量から工具負荷や加工品質を評価できます。*1
※1 切削量計算機能については、Ver2.0で対応の予定です。



加工シミュレーション
22万行のNCプログラムの形状計算を
ライバル社を圧倒 **わずか約20秒**

http://www.armonicos.co.jp/products/k-ha/index.html

販売価格 年間 **84,000** 円(税込)

2019年中はキャンペーン価格として年間42,000円(税込)

アルモニコス社から販売された加工シミュレータ

The screenshot shows the website for AIKOKU ALPHA, a company specializing in CAD/CAM systems. The page is titled "製品情報" (Product Information) and features a sidebar with navigation options like "特長" (Features), "製品情報" (Product Information), "サポート" (Support), "アクセス" (Access), "新着情報" (New Information), and "イベント情報" (Event Information). The main content area is titled "設計支援ツール" (Design Support Tool) and highlights the "内部突起検証ツール" (Internal Protrusion Verification Tool). The text describes the tool's function: to prevent collisions between internal parts during machining by simulating the process. It mentions that the tool can detect collisions between a 165mm diameter ball and internal features, which helps in identifying potential issues before production. The system's features include the ability to use CATIA data for internal parts and output collision points as G-code. At the bottom, there are two yellow circles representing the 165mm diameter ball, and a small image of the tool's interface.

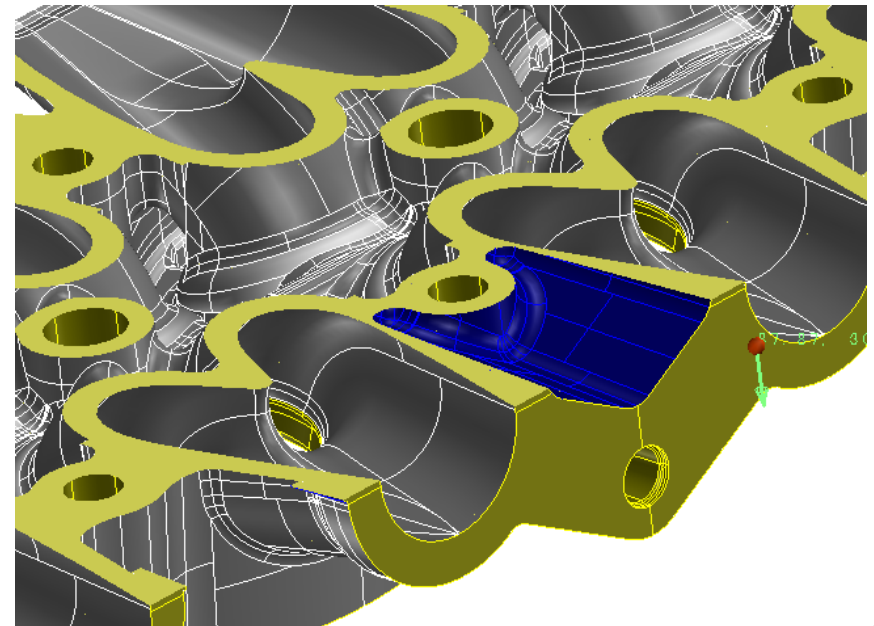
アイコクアルファ社と開発した安全規格検証システム

背景

- 機械部品の厚みは，製品の剛性や重量，製造に関わる重要なパラメータ。
 - 軽量化のため，十分な剛性と耐久性を維持しつつ，できるだけ肉厚が薄くなるように部品設計することが多い。
 - 厚みが不均一な部品は，製造時に問題を生じることがある。
(例)プラスチック成型品のヒケ。
- CADシステムの操作ミスで，部品の一部に意図しない薄肉形状を作成してしまうこともある。



プラスチック成型品のヒケ



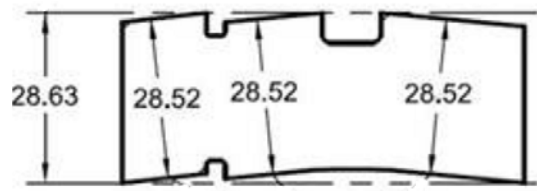
システムの操作ミスによる薄肉形状

目的

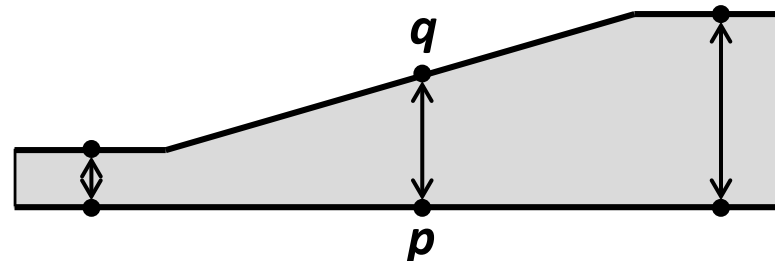
- 3次元CADモデルの厚みを, 高速かつ正確に可視化する技術が求められている.
- **体積的な厚み (Volumetric thickness) [Inui 20]**
 - 立体内部の厚み分布を記録する手法.
 - ボリュームレンダリング技術と併用することで, 立体内部の厚み分布を分かりやすく可視化可能.
- 体積的な厚みでは, 立体内部の各点に厚みを定義する. 従来の厚み評価手法と比較して, 計算に多大な時間を要する.
- **GPUを利用した処理の高速化を実現した.**

従来技術(1/2)

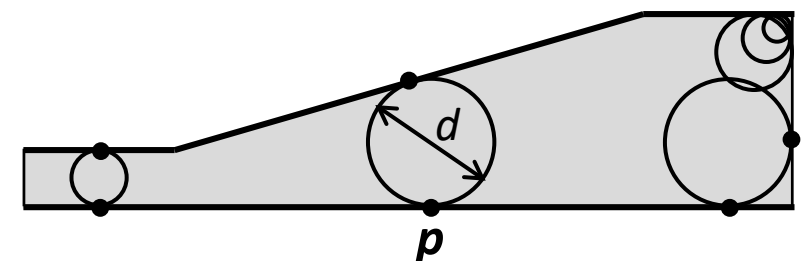
- **ISO, JIS, ASMEの厚み定義**: 平行な2つの面の間の距離として厚みを定義. 複雑なCADモデルの厚み定義には向かない.
- **光線(Ray)法**: 立体表面の点 p から, 面に垂直な直線を立体内部へ伸ばし, p のすぐ裏側の面との交点 q を得る. 距離 $|pq|$ を点 p の厚みとする.
- **球面(Sphere)法**: 立体表面の点 p に内接する最大球 (Maximum Inscribed Sphere, MIS) の直径 d を p の厚みとする.



ASME Y14.5



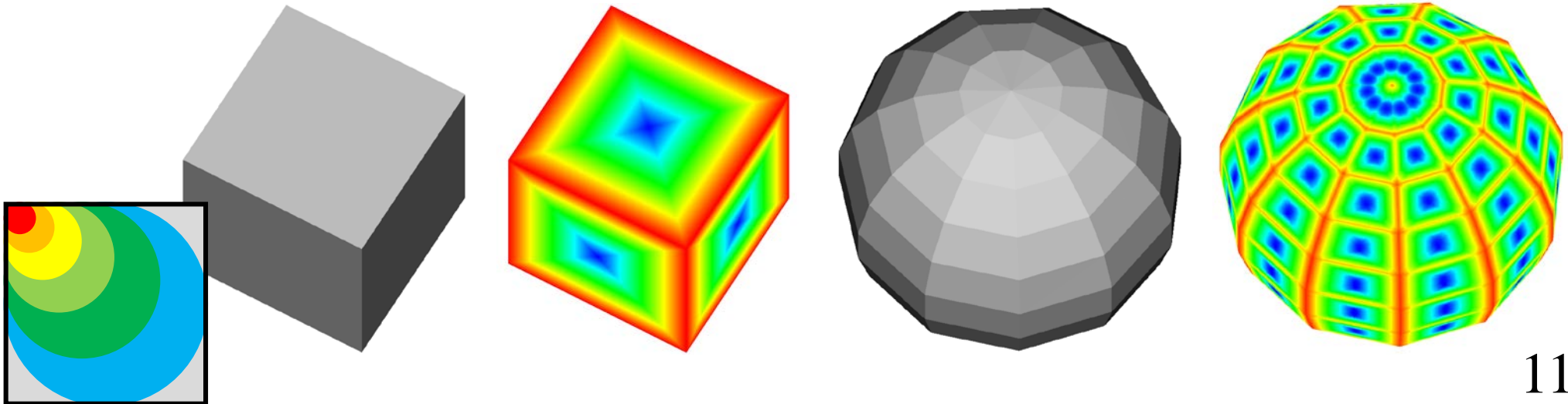
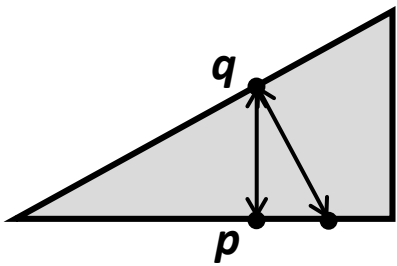
光線法



球面法

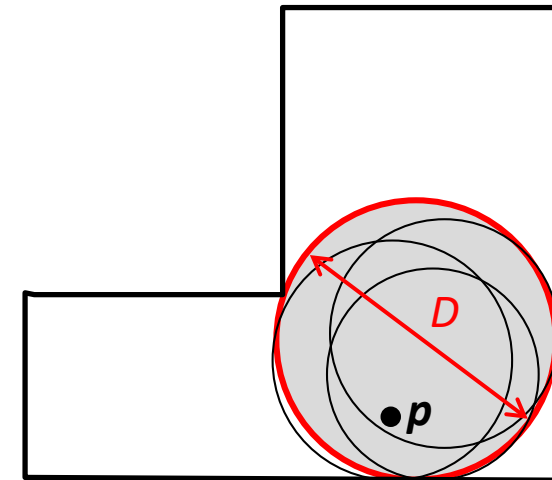
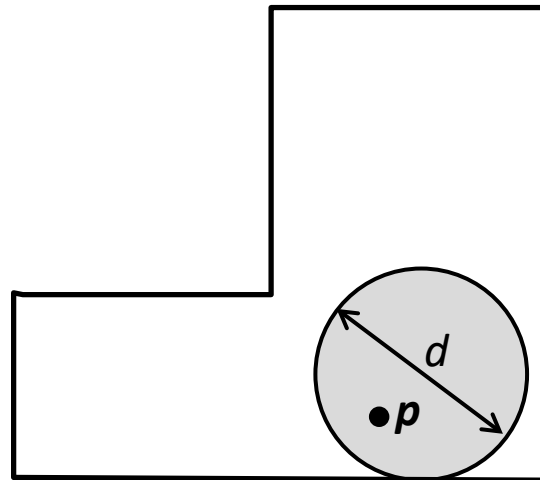
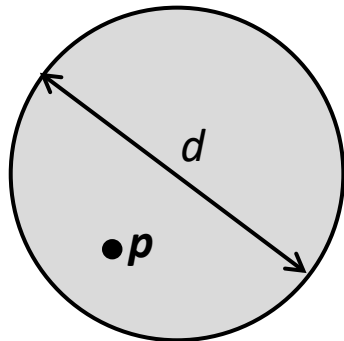
従来技術(2/2)

- 従来手法の利用には注意が必要.
 - 光線(Ray)法: p と q を含む2平面が平行ではない場合, p と q とで厚みが異なる.
 - 球面(Sphere)法: 立体の角において最大内接球(MIS)の直径が減少. 角が常に薄いと判定される.
- **立体表面の点に厚みを定義. 立体内部の厚みの分布が記録できない.**



本技術の特徴

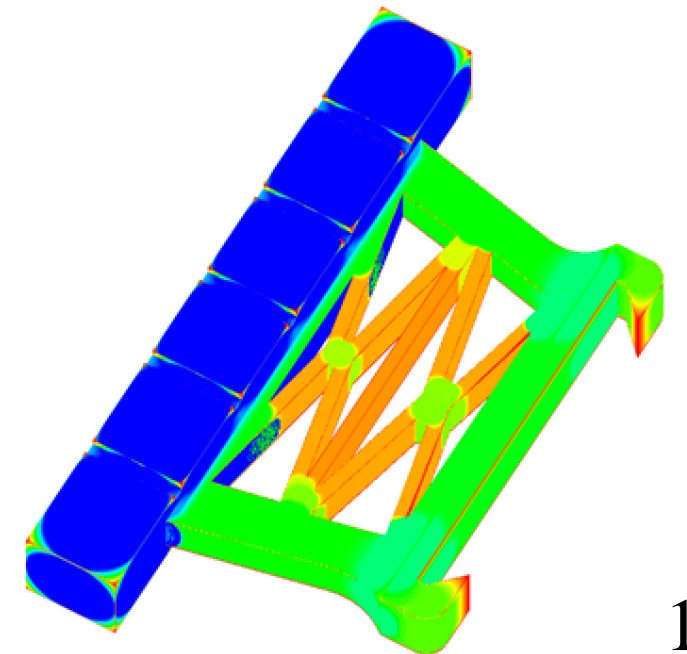
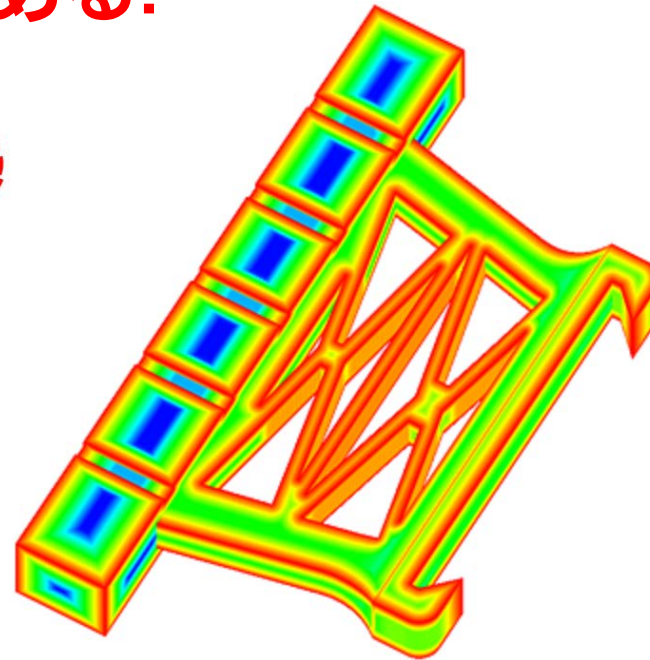
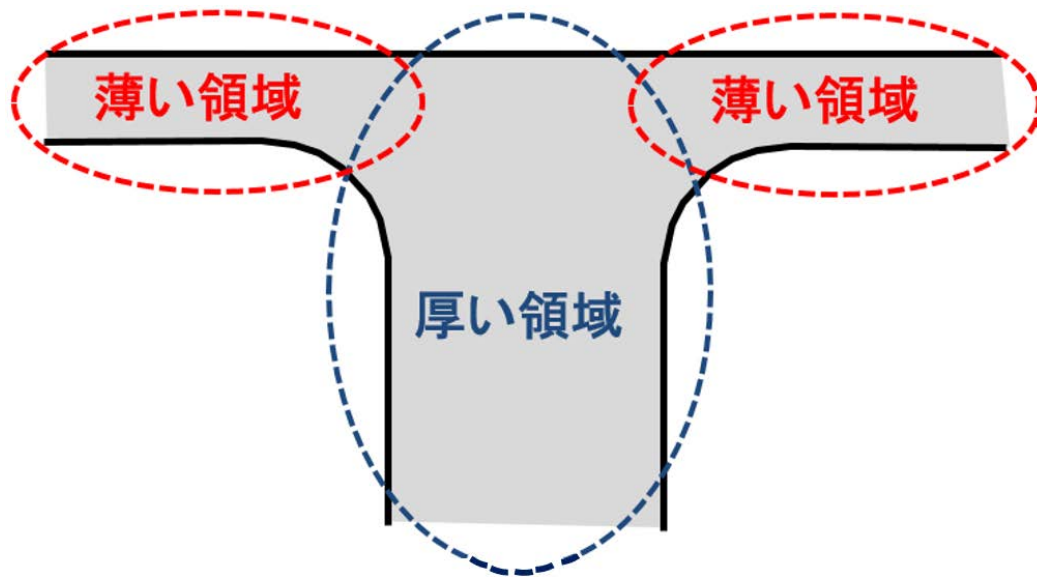
- **体積的な厚み (Volumetric thickness) : 立体内部の各点に厚みを定義.**
- 直径 d の球の内部の点は等しい厚み値 d を有すると考える. 立体内に直径 d の内接球が定義できるとき, 立体内部に厚み d の空間が存在する.
- **立体内部の点 p は複数の内接球に含まれる. p を含む最大内接球 (MIS) の直径 D を p の体積的な厚みとする.**
- 体積的な厚みの計算には, 立体内のMISの効率的な計算と, 点 p を含むMISの効率的な取得が重要.



p を含む最大
内接球 (MIS)

体積的な厚みの利用

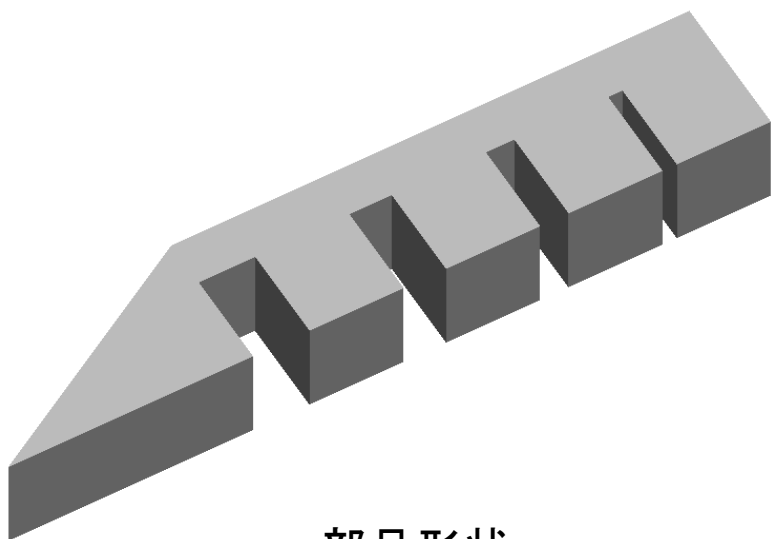
- 立体内部を厚みに応じて、薄い領域・厚い領域に分類できる。
 - ボリュームレンダリングと併用することで、立体内部の厚みの分布が分かりやすく可視化できる。
- 立体表面の点の厚み値は、球面法による厚み解析の結果と一致。**従来技術と互換性がある。**



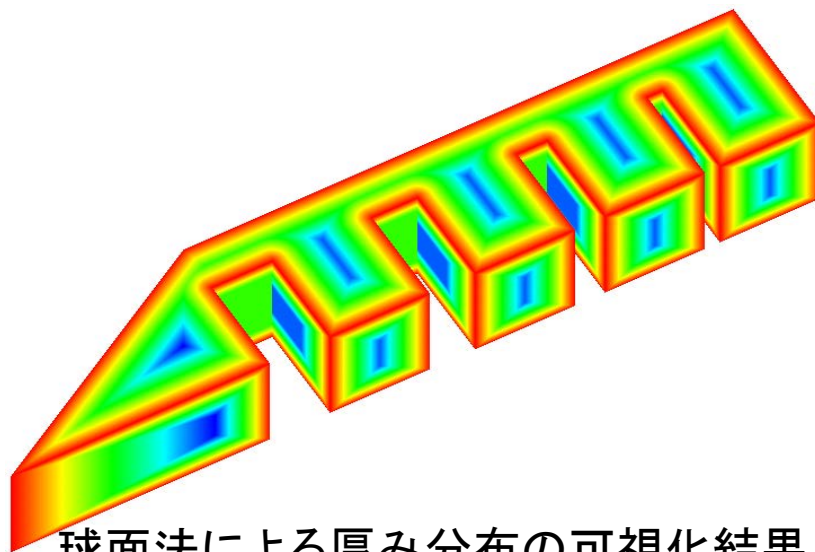
球面法による厚み分布の可視化結果

体積的な厚みを利用した可視化結果

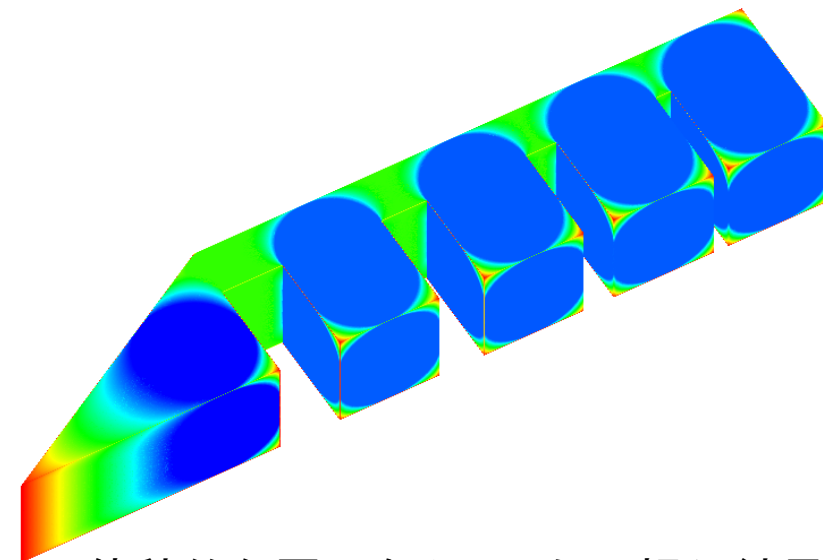
従来技術（球面法）との比較



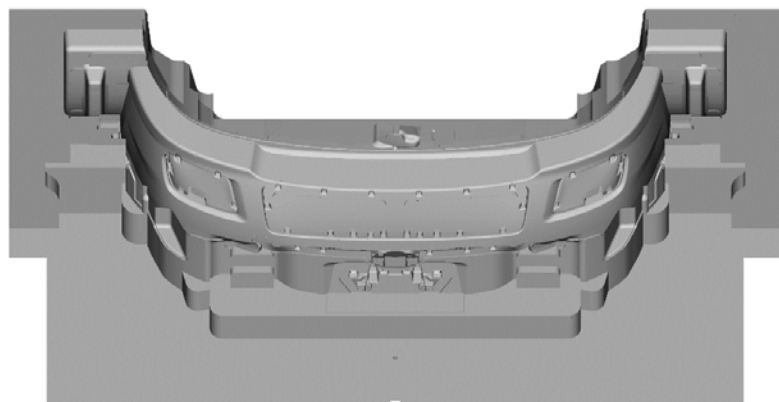
部品形状



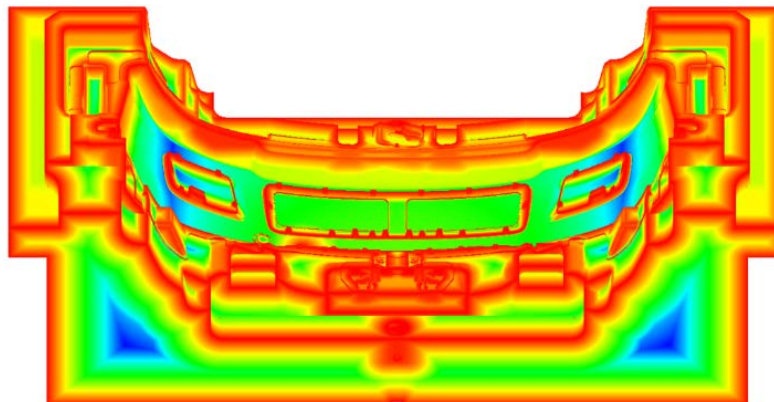
球面法による厚み分布の可視化結果



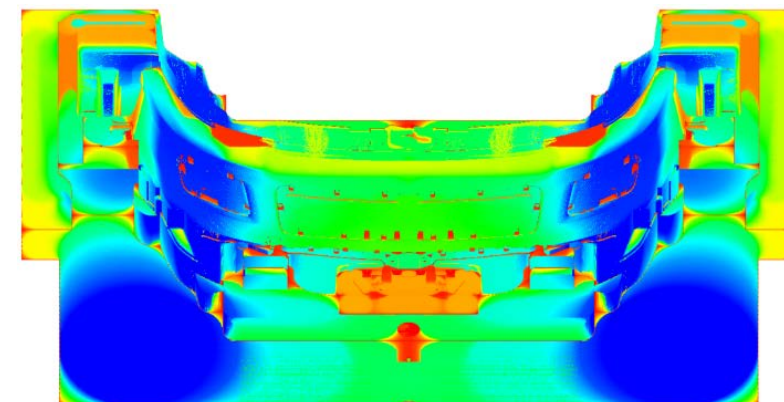
体積的な厚みを利用した可視化結果



部品形状



球面法による厚み分布の可視化結果



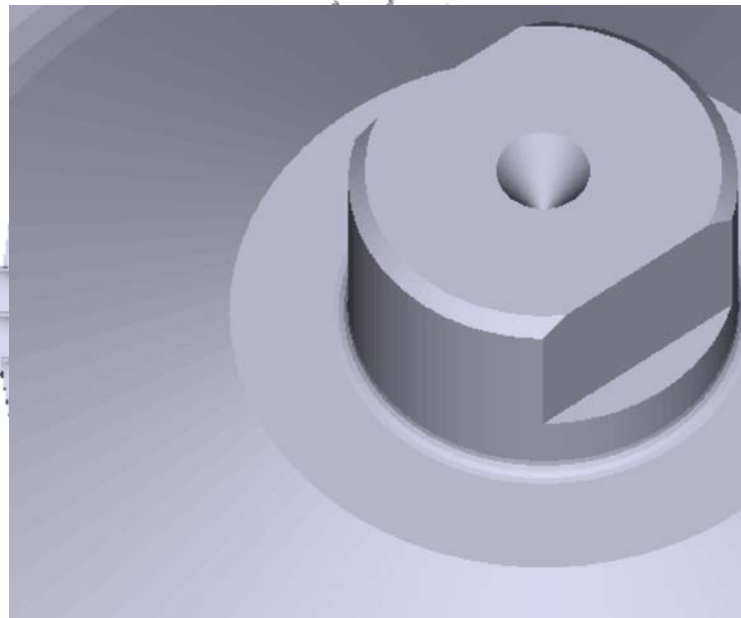
体積的な厚みを利用した可視化結果

本技術の出願状況

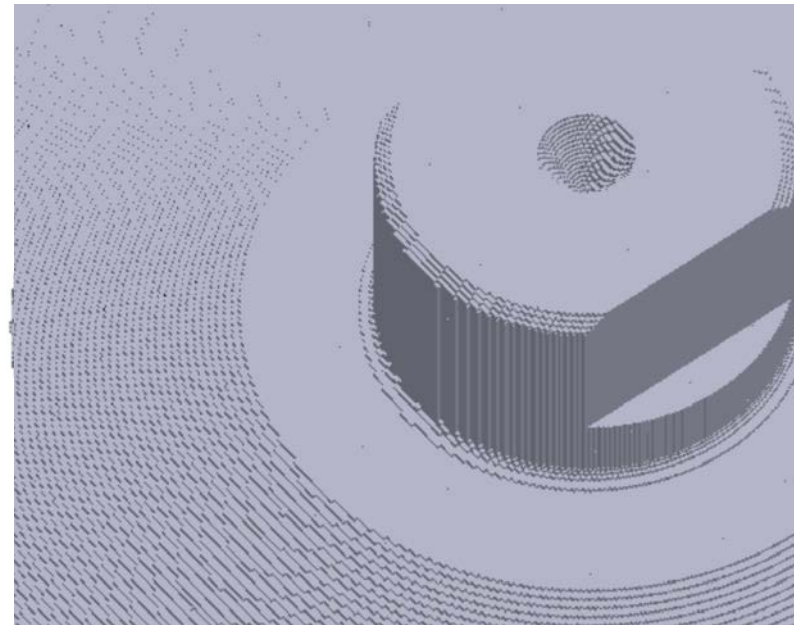
- 特願2020-120172
「ボクセルモデル演算装置, 及びプログラム」
出願日: 2020年7月13日 (優先日: 2020年3月31日)
- 既に自動車部品メーカーにて利用中.

ボクセルモデル

- 体積的な厚みは，立体内部の各点に厚み値を定義．
- 部品のCADモデルをボクセルモデル(=立体を極小の立方体群で表現)に変換し，各ボクセルの中心点に厚み値を与える．
- 計算精度はボクセルの解像度に依存する．厚み分布の可視化であれば，ボクセル数が1億個程度のボクセルモデルが妥当．



部品のCADモデル



ボクセルモデル

処理の流れ

入力: 機械部品の多面体モデル.

出力: ボクセルモデルの各ボクセルに, その中心点の体積的な厚み値を記録したデータ.

Step 1: 距離場の構築.

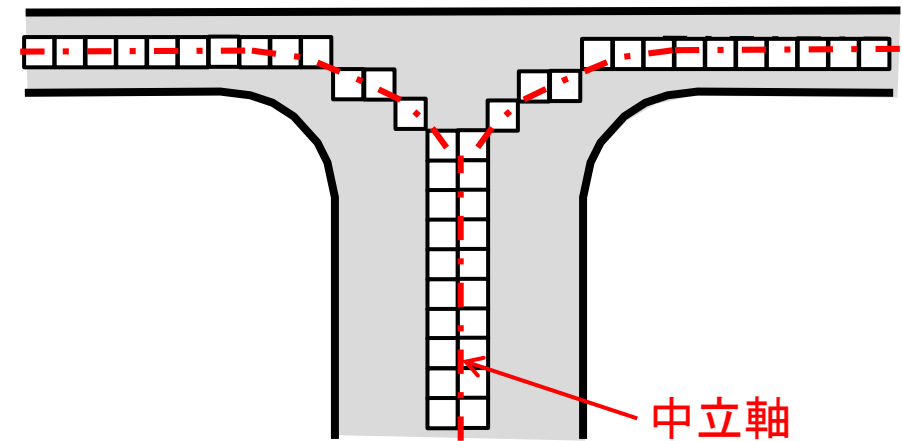
- 入力モデルをボクセルモデルへ変換.
- ボクセルモデルを用いて距離場を構築.

Step 2: 中立軸の抽出.

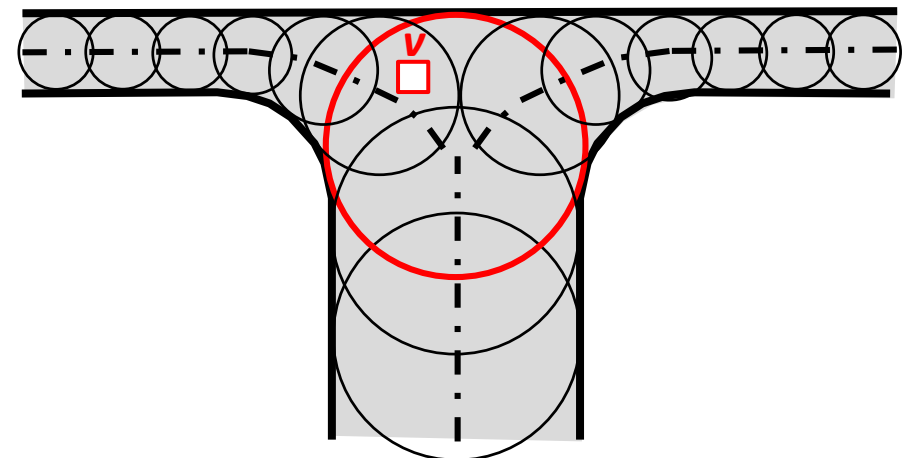
- 体積的な厚みの計算には立体内部のMISが重要.
- MISの中心点は立体内部の中立軸上.
- 距離場を用いて中立軸をボクセル群として抽出.

Step 3: MISを利用した体積的な厚みの計算.

- 中立軸上の各ボクセル c について, c を中心とするMISを定義.
- ボクセルモデルの各ボクセル v について, v を含む全てのMISを調べ, その中で最大の球を選択.
- 選ばれた球の直径を v の体積的な厚みとして記録.



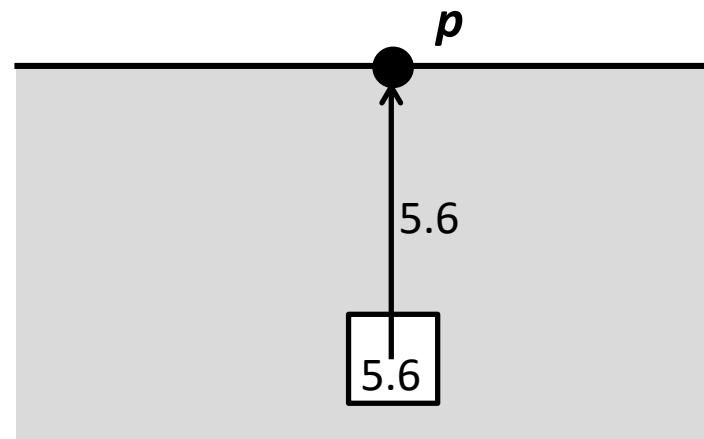
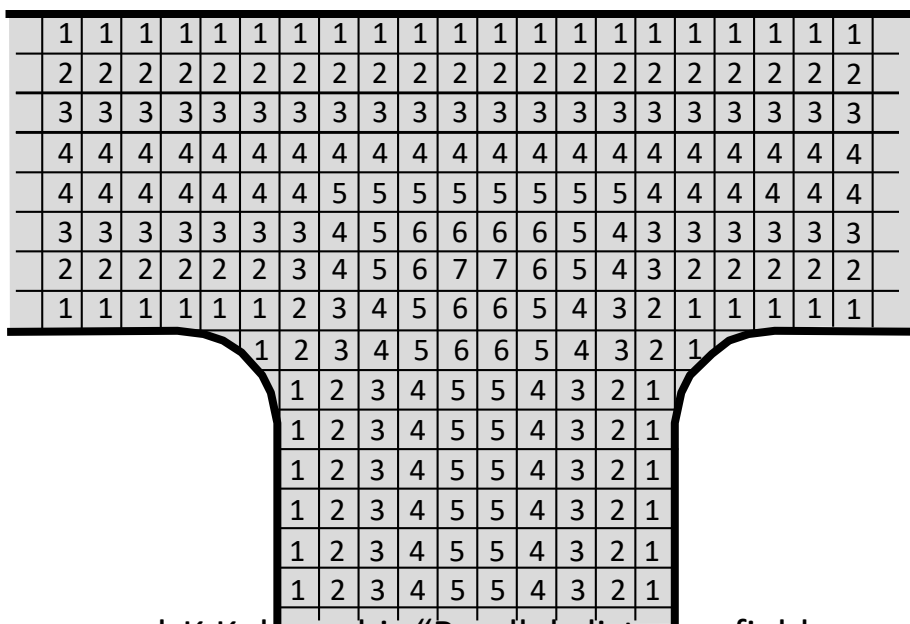
Step 2



Step 3

Step1: 距離場の構築

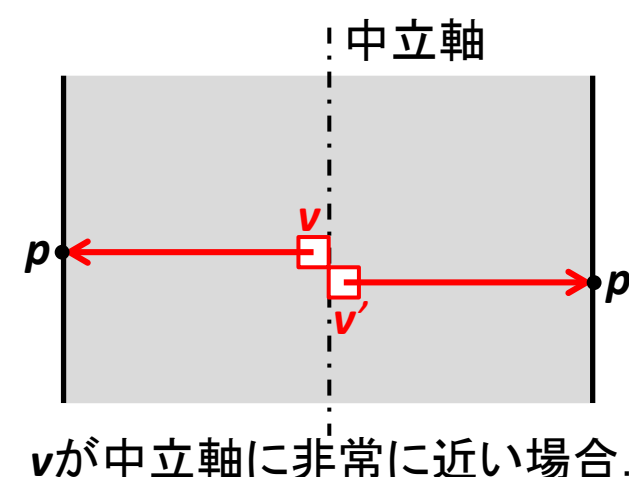
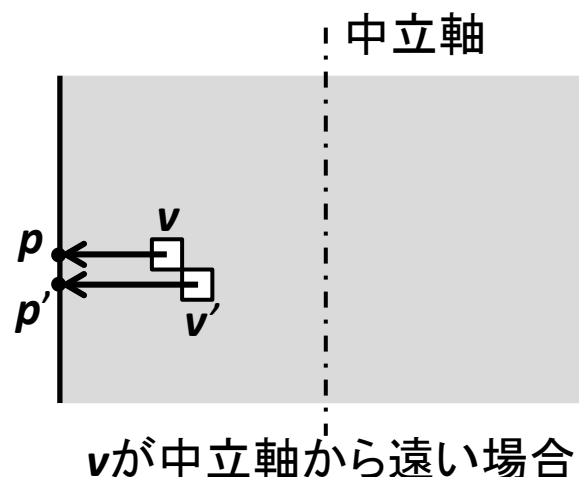
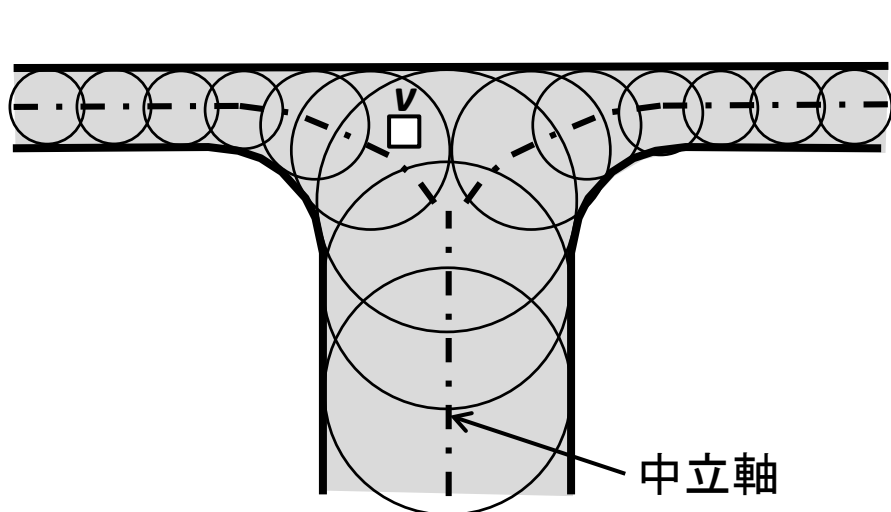
- **距離場**: 各ボクセルについて, そのボクセルに最も近い立体表面の点 p までの距離を計算し, それらの情報をボクセルに記録したもの.
- [Inui 16]のアルゴリズムを利用. ボクセルとポリゴン群間の最短距離を, 階層的な包含ボリューム (Bounding volume hierarchy, BVH) によるポリゴン群の管理と, GPUの並列処理を用いて効率的に計算.



[Inui 16]M.Inui, N.Umezu, and K.Kobayashi, "Parallel distance field computation with GPU and its application for evaluating part thickness," *Proc. of ISCI/ASME 2014 Int. Symp. on Flexible Automation, ISFA2014-40*, 2014.

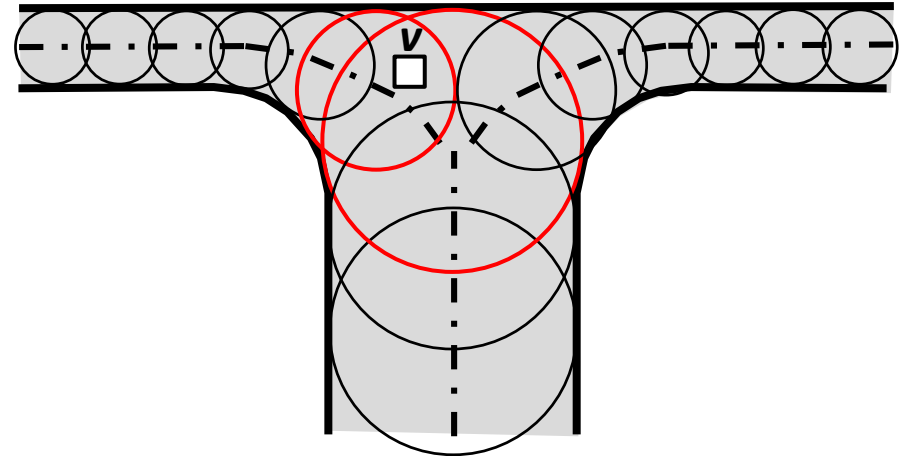
Step 2: 中立軸の抽出

- 距離場を用いて中立軸に相当するボクセル群を抽出. 抽出されたボクセルの中心がMISの中心点となる.
- 距離場中の各ボクセル v について, その1近傍の26個のボクセルを考える. そのような近傍ボクセルの一つを v' とする.
- v に最も近い立体表面の点 p と, 近傍ボクセル v' に最も近い立体表面の点 p' を得る. v が中立軸に非常に近いとき, 2つのベクトル \vec{vp} と $\vec{v'p'}$ は十分に大きな角度をなす.
- この処理は複数のボクセルについて同時に実行可能. **GPUの並列処理機能が有効.**

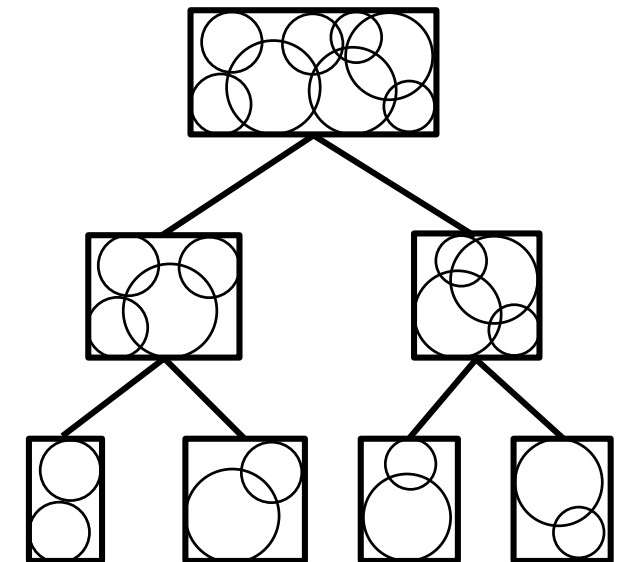


Step 3: MISを利用した体積的な厚みの計算

- 中立軸上の各ボクセル c にMISを定義.
- (特に薄い) 立体では, ボクセル v を含むMISは比較的少数に限定可能.
- MISを階層的なAABB (Axis Aligned Bounding Box) 木を用いて空間的に整理し, 距離が近い球が末端の同じボックスに格納されるようにする. 最大512個のMISが末端のAABBに格納される.
- 各 v についてMISのAABB木を深さ優先で辿り, v を包含する可能性のある球を効率的に絞り込む. **その後GPUを用いて高速処理.**

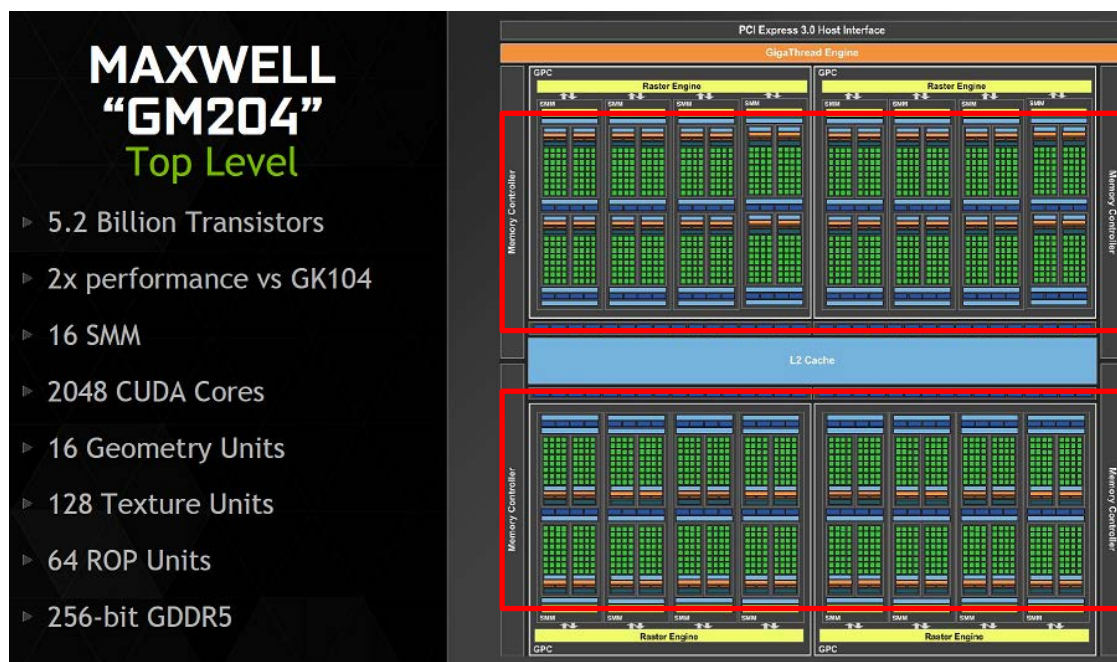


ボクセル v を含むMIS



Graphics Processing Unit, GPUの利用(1/2)

- PCの3次元グラフィックス処理を高速化するハードウェア. PCのグラフィックスボードに搭載されている.
- 汎用の並列計算機用チップとして利用することが増えている.
 - CUDA(C言語の拡張版)と呼ばれる開発環境が整備されている.



MAXWELL "GM204" Top Level

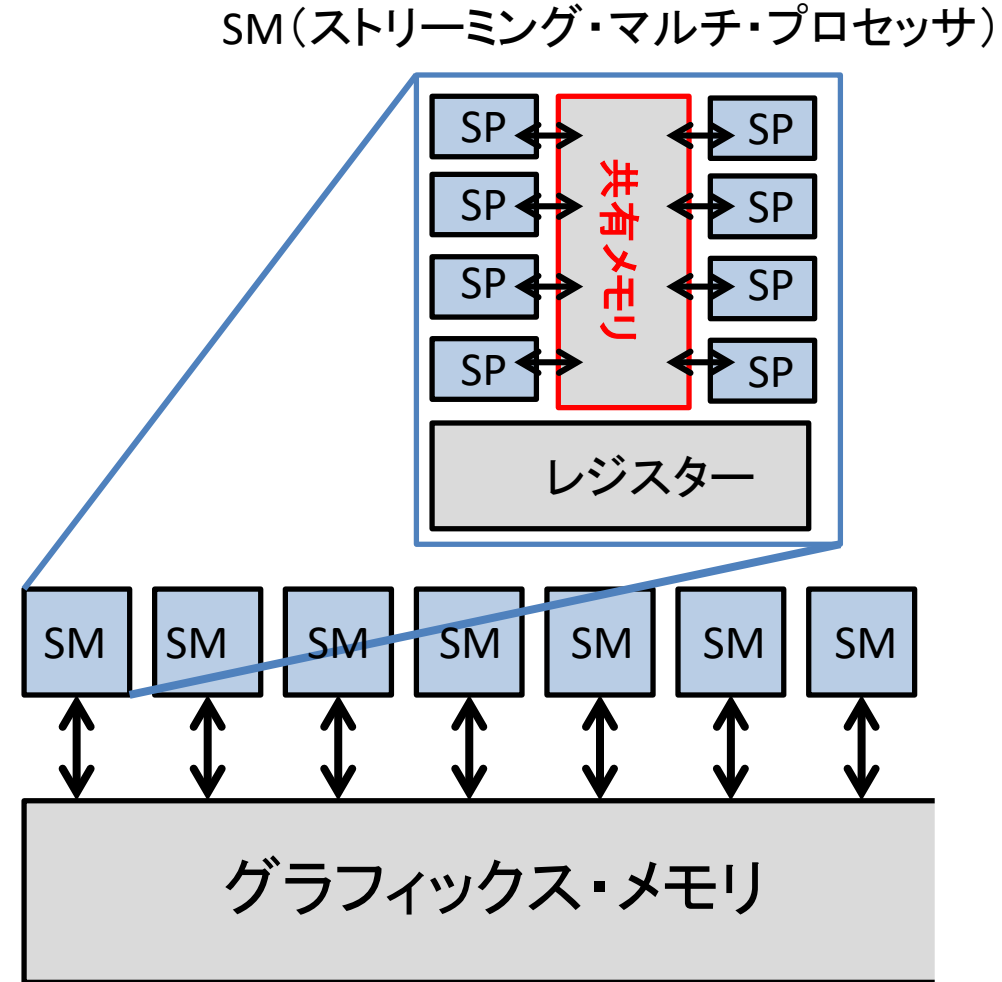
- ▶ 5.2 Billion Transistors
- ▶ 2x performance vs GK104
- ▶ 16 SMM
- ▶ 2048 CUDA Cores
- ▶ 16 Geometry Units
- ▶ 128 Texture Units
- ▶ 64 ROP Units
- ▶ 256-bit GDDR5

CUDAコア.
GPUのメインの計算ユニット.

NVIDIA社のGeForce
GPU

GPUの利用(2/2)

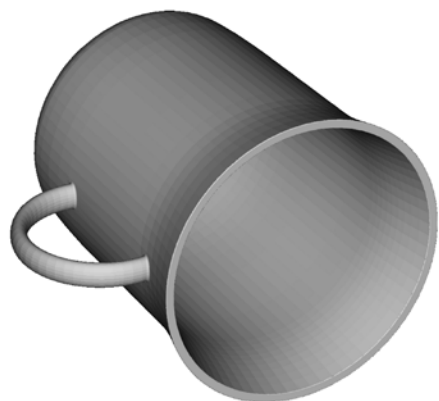
- GPUの並列処理機能を利用することで、絞り込まれたMISから、実際にボクセル v を含むものを選択し、さらにそれらの中から最大の球を選ぶ処理を高速化した。
- GPUのアーキテクチャ
 - 数千個のコア(SPと呼ぶ)が内蔵されており、処理をコアに振り分けて並列処理する。
 - 8~32個のコアが集まってストリーミング・マルチ・プロセッサ(SM)を構成。
 - SMには高速な共有メモリが内蔵されている。これを使うことで、処理をさらに高速化できる。
- 共有メモリを適切に利用する新アルゴリズムを開発。**



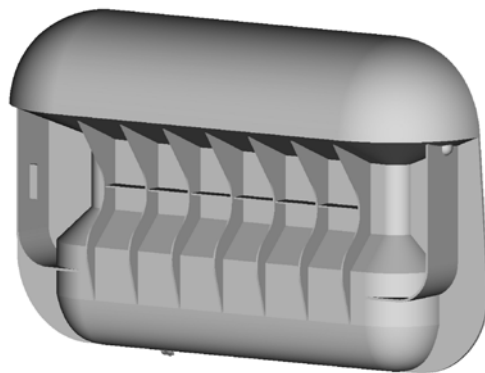
GPUのアーキテクチャ

計算実験の結果

- 有効性を検証するために、体積的な厚みを計算し可視化するソフトウェアをVisual Studio 2017とCUDA 10.1を用いて実装.
- 実験にはWindows 10 64ビットPC(Core i7 2.3 GHz CPU, 32 GBメモリ, RTX-2080 SUPER GPU)を使用.



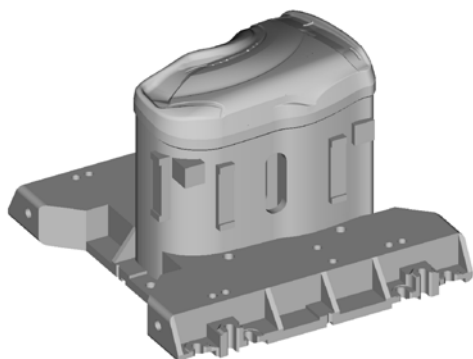
モデルA



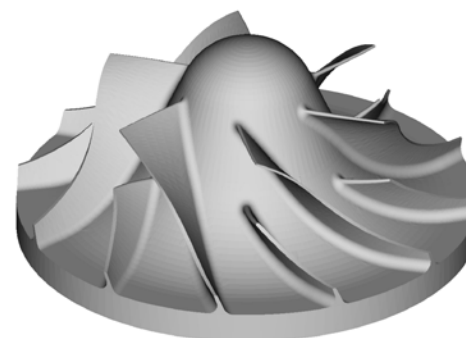
モデルC



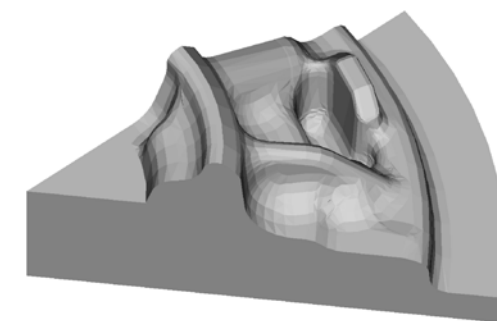
モデルE



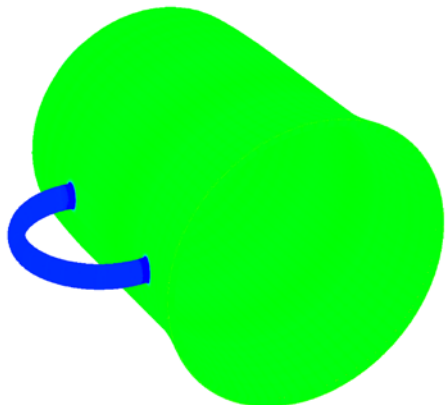
モデルB



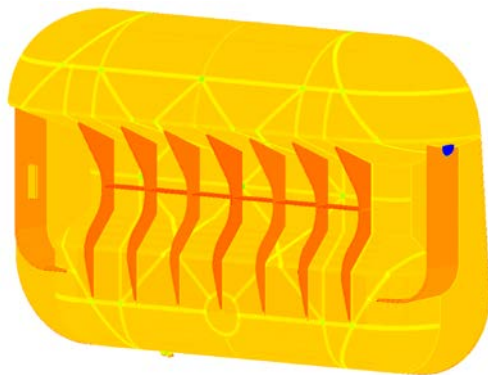
モデルD



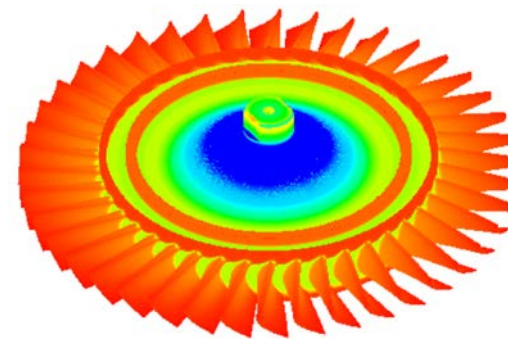
モデルF



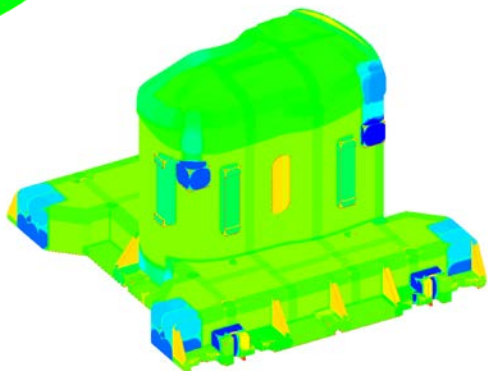
モデルA



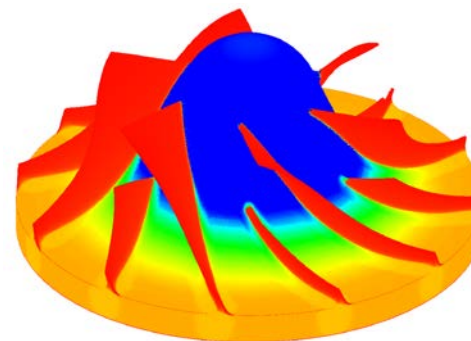
モデルC



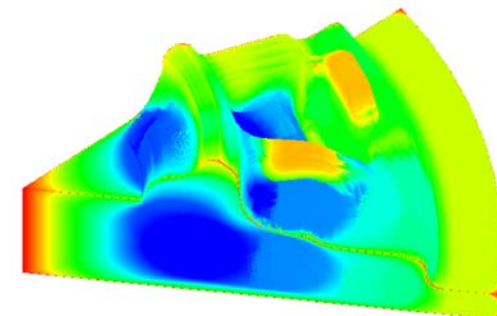
モデルE



モデルB



モデルD



モデルF

処理にはボクセル数約1億のボクセルモデルを利用

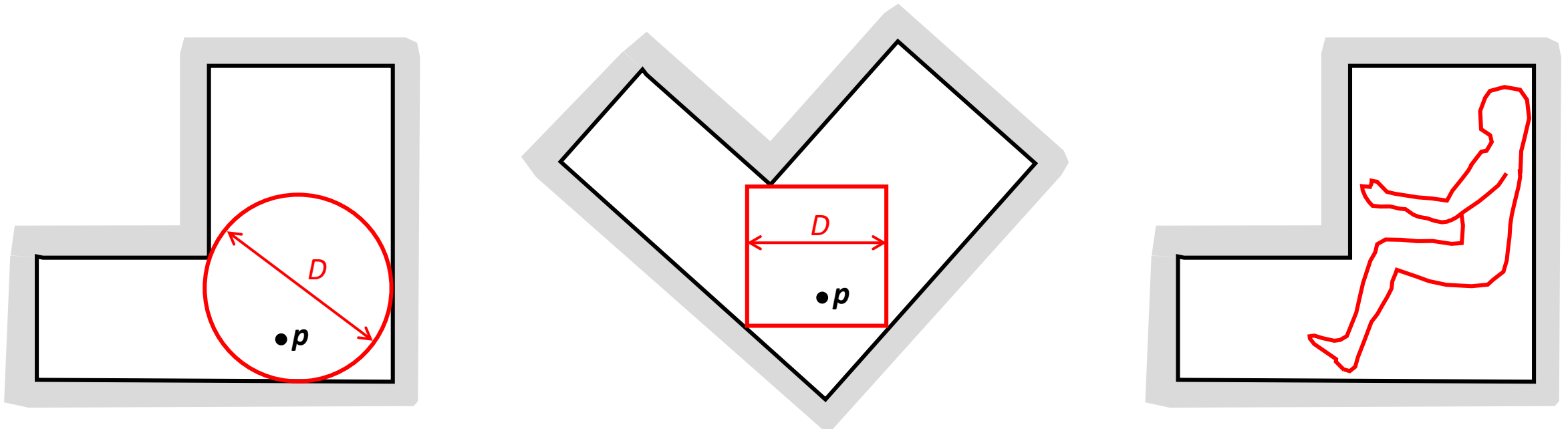
モデル	Step1 (s)	t_0 : CPU Step2 (s)	t_1 : GPU Step2 (s)	t_0/t_1	t_2 : CPU Step3 (s)	t_3 : GPU Step3 (s)	t_2/t_3
A	35.51	256.56	33.45	7.67	486.06	44.46	10.93
B	58.59	220.81	9.99	22.10	771.30	42.86	18.00
C	64.71	225.08	46.52	4.84	269.11	76.57	3.51
D	62.52	235.17	4.78	49.20	7780.09	63.68	122.17
E	41.79	217.07	3.96	54.82	5157.76	57.55	89.62
F	39.25	234.43	2.88	81.40	11556.37	74.68	154.75

まとめと今後の課題

- 3次元立体の新しい厚み評価手法として提案されている, 体積的な厚みを高速に計算するアルゴリズムを開発した.
- 階層的なAABB木によるMISの絞り込みと, GPUの並列処理機能を利用することで, 体積的な厚み評価の高速化を実現した.
- 今後は, 体積的な厚みやその発展形の応用について研究を進める予定.

例えば

- 厚みの裏返しは「隙間」. 空間における隙間の解析.
- 内接球以外を用いた厚み評価. たとえば立方体や人間(居住性評価?)
 - ただし球以外では計算が格段に難しい.



本技術の問い合わせ先

茨城大学

研究・産学官連携機構（日立オフィス）

T E L 0294-38-7281

F A X 0294-38-5240

e-mail chizai-cd@ml.ibaraki.ac.jp