

タイヤ開発におけるHPC技術の活用について（公開用）

Confidential

2026-R-L-D-0065

| 承認 | 審査 | 作成者 |
|---|---|-----|
|  |  '26.03.1 0964 | |

日付／2026年3月11日
部署名／TOYO TIRE 株式会社
技術開発本部 先行技術開発部
報告者／田中嘉宏
頁数／全39ページ

- ・タイヤ開発とシミュレーションの活用
- ・タイヤのシミュレーション技術について
- ・タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由
- ・大学でのHPC研究の必要性

1. タイヤ開発とシミュレーションの活用

ポイント（タイヤの構造を理解する）

- ・内部の圧力をゴム、補強材で保持する複合材
- ・ゴムは主にカーボン、ポリマー、レジンを含み、補強材はスチール、ナイロンコードを使用している

タイヤ構造について

・タイヤは内部の空気の圧力をゴムと補強材で保持する複合材である。

補強ベルト

ナイロン

ベルト

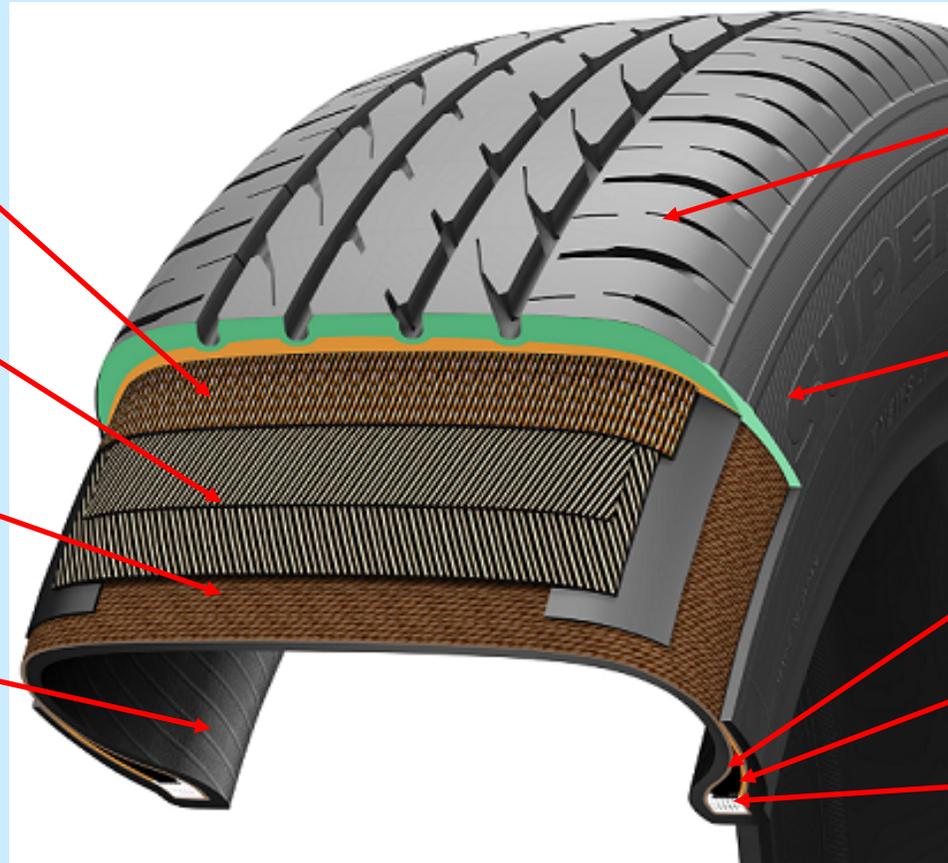
スチール, アラミド

プライ

ポリエステル, レヨン

インナーライナー

ハロゲン系ゴム



トレッド

SBR (スチレン・ブタジエンゴム), BR (ポリブタジエンゴム), NR系 (天然) ゴム

サイドウォール

BR, NR系ゴム

ビードフィラー

NR系ゴム

ビード補強

ナイロン, スチール

ビードワイヤー

スチール

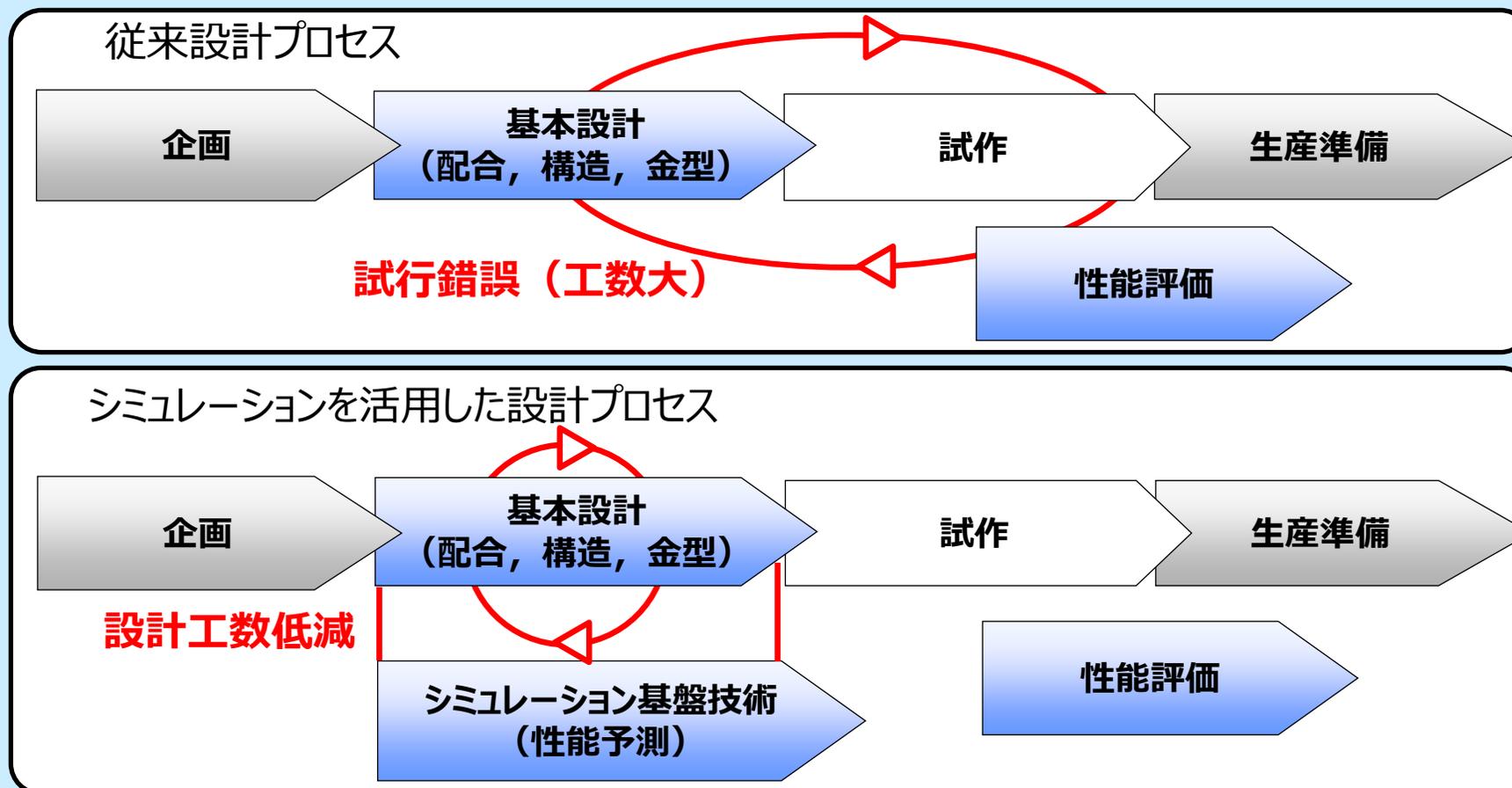
1. タイヤ開発とシミュレーションの活用

ポイント（タイヤ開発の流れを理解する）

- ・基本設計，試作，性能評価を繰り返し行い，要求性能を満たす使用を決定
- ・このフローにシミュレーションを入れることで，繰り返し回数を削減

タイヤの開発フロー

- ・設計，試作，評価を繰り返し，量産仕様を決定する。



1. タイヤ開発とシミュレーションの活用

ポイント（タイヤの要求性能について理解する）
・社会環境面では燃費や制動，騒音など
・顧客要求として，ハンドリング，居住性，耐久性など

タイヤの要求性能

・社会環境，車・道路環境，情報通信技術などのタイヤ周辺技術，顧客要求によって 変化する。*



1. タイヤ開発とシミュレーションの活用

ポイント（タイヤ開発にシミュレーションを用いる価値）

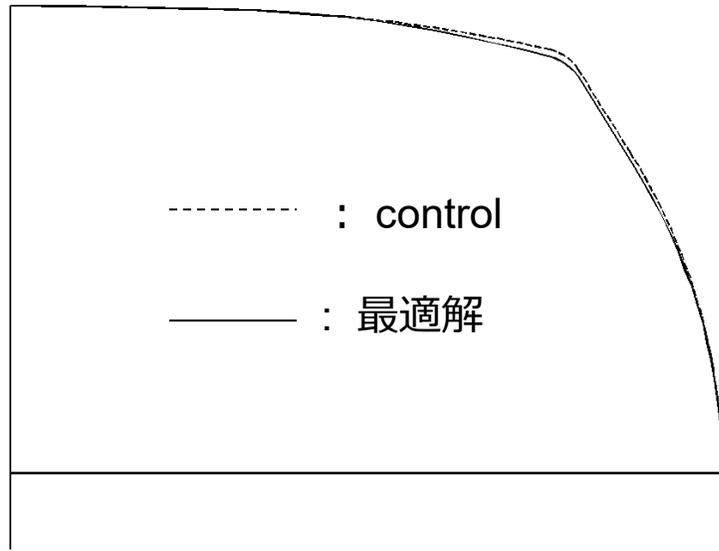
- 1つが設計見積もりの高度化
- 多種多様な設計変数の中から最適な組み合わせを迅速に意思決定できる

タイヤ開発におけるシミュレーションの活用①

• 設計の見積もり = 迅速な意思決定, 設計業務の効率化が図れる

• 製作に工数を要し, 高コストである金型設計について, シミュレーションは有効な手段になる.

設計問題定義（金型の最適設計）



| | 定常荷重 | 制動荷重 |
|-----|------|------|
| 基準 | | |
| 最適解 | | |

• 金型の形状定義の組み合わせは無数にあり, シミュレーションは強い設計ツールになる

1. タイヤ開発とシミュレーションの活用

ポイント（タイヤ開発にシミュレーションを用いる価値）

- ・2つめは実験の補完としてシミュレーションを用いる
- ・音源探査において、音源位置から計測点間の伝達関数をシミュレーションで算出し、高精度化を図ります
- ・ハイドロにおいて、接地面の可視化は計測、シミュレーションで速度ベクトルなど細部を把握する

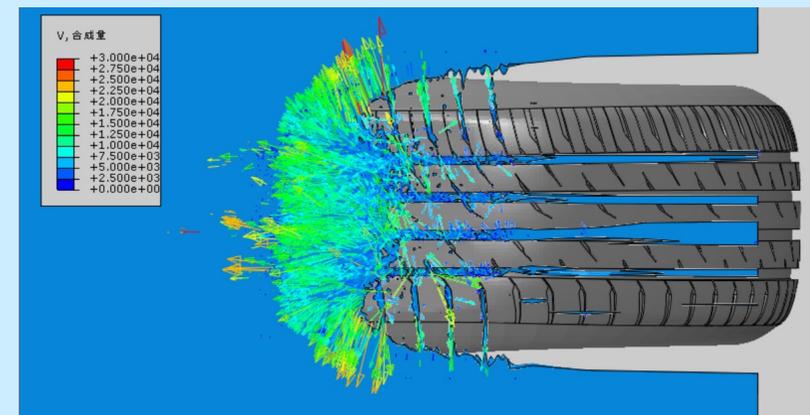
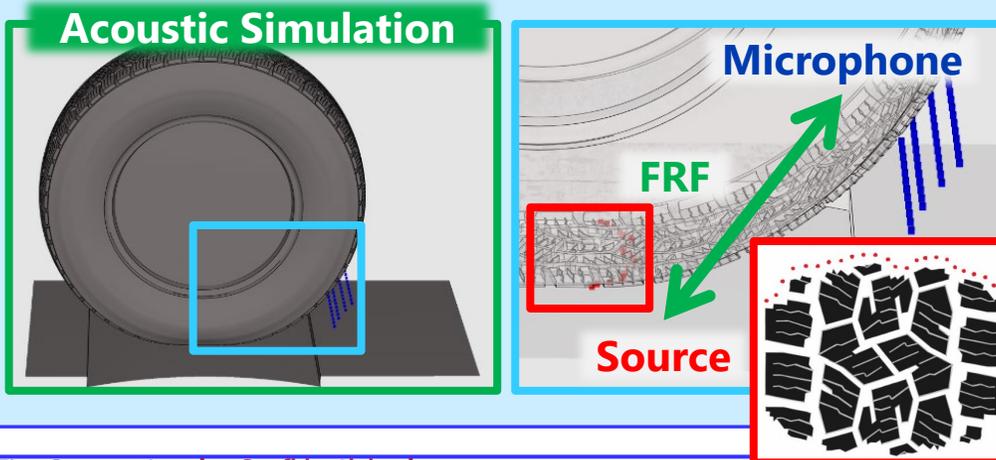
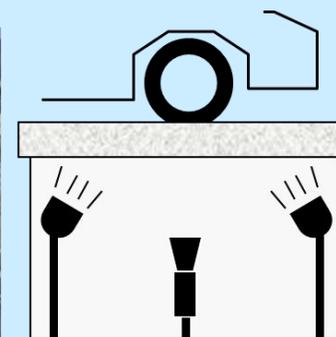
タイヤ開発におけるシミュレーションの活用②

・現象の解明 = 計測，可視化が困難な現象をシミュレーションで再現し，計測，可視化の補完を行う

例：タイヤ音計測



例：ハイドロプレーニング可視化



2. タイヤのシミュレーション技術について

ポイント（タイヤシミュレーションが難解な点）

- ・非線形 = 接触, 転動, 大変形, 材料非線形
- ・複雑さ = 天候, 二律背反, 依存性, データ量

タイヤのシミュレーションが難解な点

非線形

- ・タイヤと路面が接触している
- ・タイヤは転動し, 接地と離脱を繰り返す
- ・車両の荷重を支えるため大変形である
- ・ゴムは超弾性, 粘弾性として扱う必要がある

複雑さ

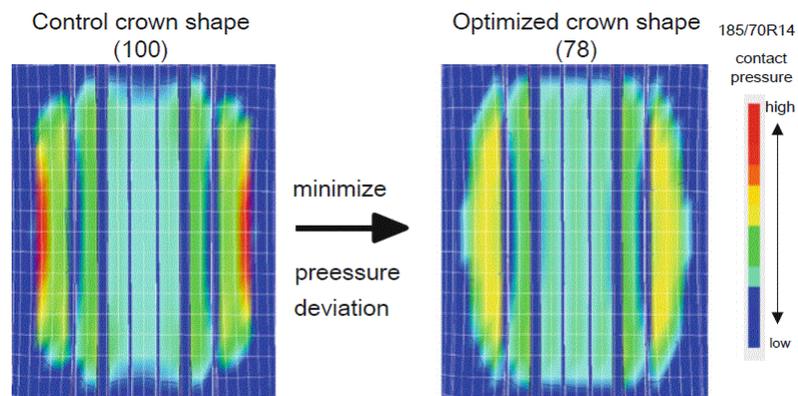
- ・多岐にわたる環境（天候）での評価が必要
- ・二律背反性能を両立する必要がある
- ・ゴムの機械的特性, タイヤ特性は速度, ひずみ, 温度などの依存性がある
- ・タイヤ形状を細部まで再現するために必要な分解能を満たすとモデルのデータ量が大規模になる

2. タイヤのミュレーション技術について (非線形性)

ポイント (非線形性についての具体的な説明)

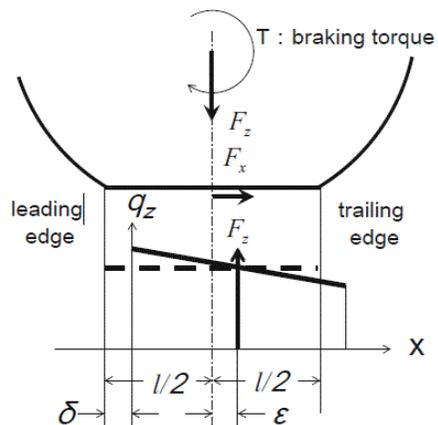
- ・接触 = 境界の非線形, 大変形 = 幾何学的非線形
- ・接地と離脱 = 力のONとOFF, ゴム材料 = 材料非線形

接触*1: タイヤと路面が接触することで接地反力が生じる



大変形: 車両の荷重を四輪で分担して支えるので大変形となる

転動*3: タイヤが転動することで, 接地と離脱の現象を繰り返す



超弾性・粘弾性: ゴムの応力とひずみの関係は非線形

* 1,3 Yukio Nakajima, Advanced Tire Mechanics, Volume1, P563, P815, P987

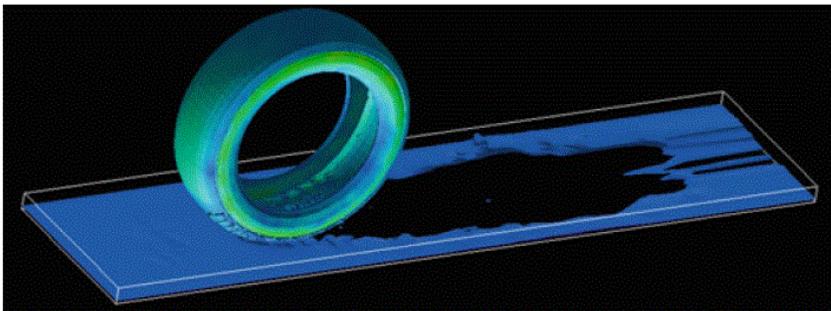
2. タイヤのミュレーション技術について（複雑さ）

ポイント（タイヤシミュレーションの複雑さについての説明）

- ・天候：路面とタイヤ間の接触状況，二律背反：燃費と制動など
- ・依存性：燃費と制動，データ量：大規模マトリックスの演算

多岐にわたる天候^{*1}：WET,SNOW,ICE路面での現象再現

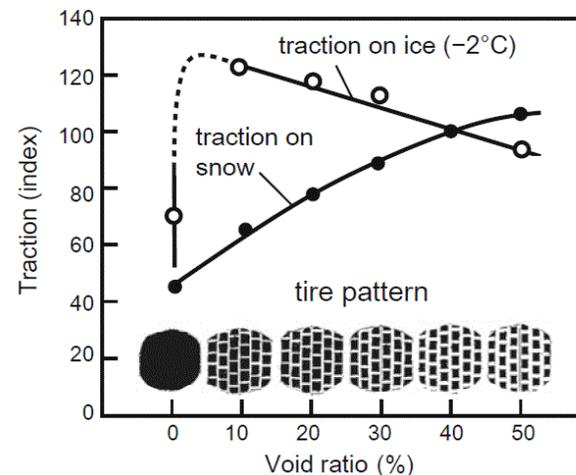
評価条件が複雑（タイヤと路面間の接触状況が多岐にわかる）



二律背反性能^{*2}：

制動距離と燃費など
背反性能を両立

設計要求が複雑



依存性：

機械的特性を関数で定義

材料特性が複雑

データ量：タイヤを忠実に再現すると節点数が膨大

計算規模



* 1,*2 Yukio Nakajima, Advanced Tire Mechanics, Volume2, P845, P850

タイヤのシミュレーションに用いる仮定について

タイヤシミュレーションに用いる仮定

- ・幾何学的非線形 *
- 材料の応答が非線形となること（変位とひずみの関係）
- ・材料の非線形 *
- 物体の変位や変形に関連した非線形性（応力とひずみの関係）
- ・境界の非線形 *
- 物体間の境界を介して力の伝達を行う，これらの運動は接触，摩擦すべりなどの非線形を含む
- ・天候の再現
- 要求性能に応じた天候での評価（Dry, Wet, Snow, Ice）

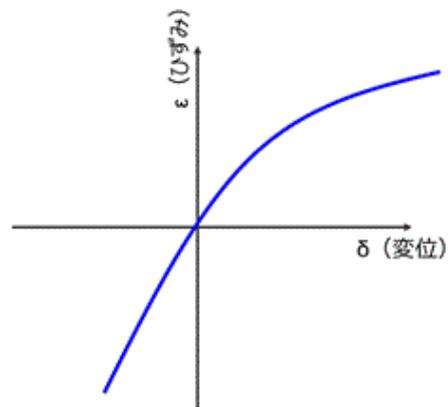
*「丸善株式会社」.「いまさら聞けない計算力学の常識」.P103-121

2. タイヤのミュレーション技術について

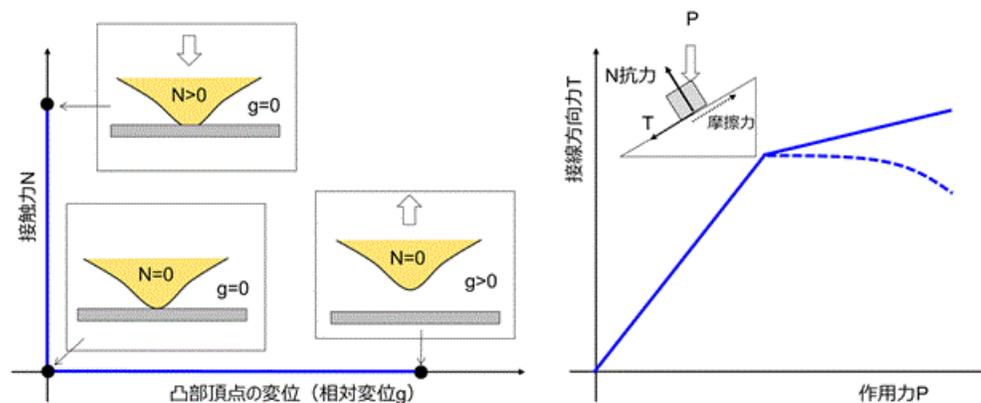
ポイント (タイヤシミュレーションに用いている仮定の具体的な内容)

- 幾何学的非線形：ひずみと変位の関係が非線形
- 材料非線形：ひずみと応力の関係が非線形
- 境界非線形：接触を介した変位と力の関係が非線形
- 天候の再現：雨や雪の環境を再現

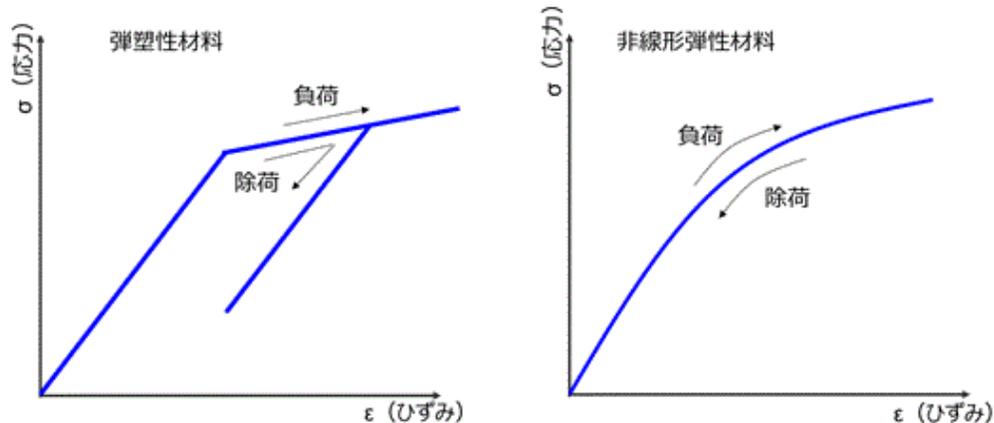
幾何学的非線形：ひずみと変位の線形成が成立しなくなる



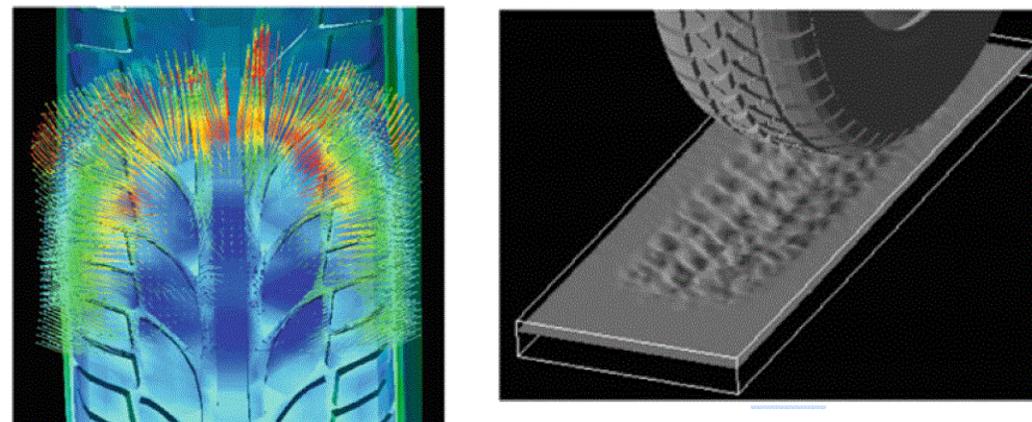
境界の非線形：接触を介した変位と力の関係が非線形



材料の非線形：応力とひずみの関係が非線形である



天候の再現*：流体や弾塑性モデルで再現する



3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント（タイヤシミュレーションに用いている仮定と非線形有限要素法の関係性を把握する）
 ・接触，大変形，材料非線形を同時に扱えるのが，非線形有限要素法である。

タイヤシミュレーションに非線形有限要素法を用いる理由

| | 力学的現象，特徴 | 適用する仮定，技術 | |
|-----|-----------|--------------------|-----------------------------------|
| 非線形 | タイヤが転動する | 境界の非線形（力のONとOFF） | 非線形有限要素法 （接触・大変形・材料非線形を同時に扱える） |
| | タイヤと路面の接触 | 境界の非線形（接触問題，摩擦モデル） | |
| | タイヤの大変形 | 幾何学的非線形 | |
| | ゴムの超弾性 | 材料非線形 | |
| 複雑さ | 種々の天候再現 | 流体・構造連成解法 | |
| | 二律背反 | 最適化手法 | |
| | ゴム特性の依存性 | 非線形粘弾性構成則 | |
| | 大規模データを扱う | 並列化計算 | |

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

- ポイント（タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由は主に3つあること）
- ・大規模マトリクスを扱う必要があること
 - ・接触問題におけるペアの探索
 - ・非線形方程式の反復計算

タイヤシミュレーションをスーパーコンピューターで計算する必要性

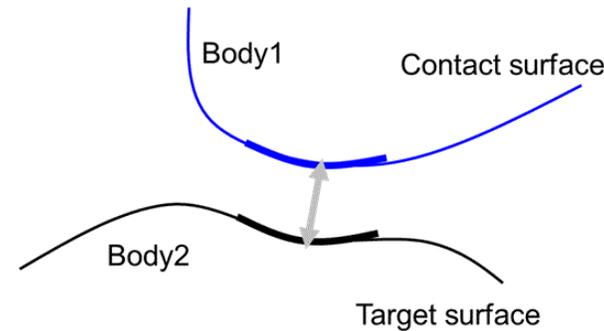
大規模マトリクス

例：10万節点モデルの場合
10万×3自由度（3次元）
→30万×30万のマトリクス

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix}$$

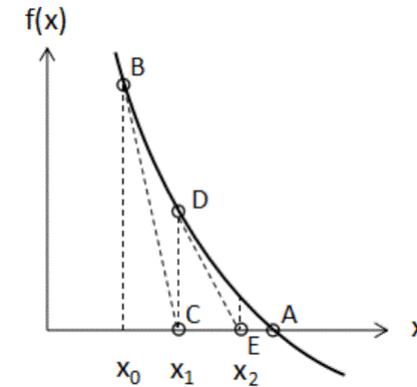
接触判定による計算負荷

接触ペア探索（転動時は毎回）



非線形問題

非線形方程式を解く



スーパーコンピューターを利用する目的：計算速度を上げるため



- ・CPU, コア数↑
- ・CPUを並列で使う
- ・メモリ消費量↑

非線形有限方程式の定式化について

仮想仕事の原理の定義

“つり合い状態にある弾性体の各点に、任意の微小な仮想変位を与えたとき、この仮想変位によって外力および内力のなす仕事はゼロである”

$$\text{(内力のなす仕事)} = \text{(外力のなす仕事)}$$

仮想仕事の原理のTotal Lagrangianによる定式化*

1. Equation of motion : すべての変数が変形前の初期形状を参照して定義される.

$$\int_{0V} {}^{t+\Delta t} S \delta {}^{t+\Delta t} \epsilon_{ij} d^0V = {}^{t+\Delta t} R$$

* 外力による仮想仕事と内力による仮想仕事のつり合い

${}^{t+\Delta t} S_{ij}$: second Piola-Kirchohoff stresses

${}^{t+\Delta t} \epsilon_{ij}$: Green-Lagrange strains

${}^{t+\Delta t} R$: external virtual work

2. Incremental decompositions : 未知の応力成分 (t+Δt) をtにおける既知量とからt+Δtの増分に分解する

Stresses

$${}^{t+\Delta t} S_{ij} = {}^t S_{ij} + \underline{{}^0 S_{ij}} \quad \text{増分}$$

Strains

$${}^{t+\Delta t} \epsilon_{ij} = {}^t \epsilon_{ij} + \underline{{}^0 \epsilon_{ij}} \quad \text{増分}$$

$${}^0 \epsilon_{ij} = \underbrace{{}^0 e_{ij}}_{\text{線形}} + \underbrace{{}^0 \eta_{ij}}_{\text{非線形}}$$

${}^0 e_{ij}$: linear incremental strains

${}^0 \eta_{ij}$: nonlinear incremental strains

${}^0 \epsilon_{ij}$: incremental Green-Lagrange strains

・t+Δtでの未知の応力, ひずみ成分をtでの既知と増分に分解する

・増分ひずみは線形増分ひずみと非線形増分ひずみとの線形結合で記述する

3. Equation of motion with incremental decompositions

・応力，ひずみを既知と増分量に分解した関係と，時刻0でのGreen-Lagrangeひずみと線形増分ひずみと非線形増分ひずみの線形結合で表す関係を仮想仕事のつり合い式へ代入し，整理する

$$\int_{0V} {}_0S_{ij} \delta_0 \epsilon_{ij} d^0V + \int_{0V} {}^t_0S_{ij} \delta_0 \eta_{ij} d^0V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}^t_0S_{ij} \delta_0 e_{ij} d^0V$$

非線形項

${}_0S_{ij}$: incremental second Piola-Kirchhoff stresses

${}_0\epsilon_{ij}$: incremental Green-Lagrange strains

${}^t_0S_{ij}$: second Piola-Kirchhoff stresses at time t

${}_0\eta_{ij}$: nonlinear incremental strains at time 0

${}^{t+\Delta t}R$: external virtual work

${}_0e_{ij}$: linear incremental strains at time 0

4. Linearization of equation of motion

$$\int_{0V} {}_0S_{ij}\delta_0\epsilon_{ij}d^0V + \int_{0V} {}^t_0S_{ij}\delta_0\eta_{ij}d^0V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}^t_0S_{ij}\delta_0e_{ij}d^0V$$

非線形項

- ・左辺第1項（非線形項）をTaylor展開により線形1次近似を行うと次式になる

$$\int_{0V} {}_0C_{ijrs}{}_0e_{rs}\delta_0e_{ij}d^0V + \int_{0V} {}^t_0S_{ij}\delta_0\eta_{ij}d^0V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}^t_0S_{ij}\delta_0e_{ij}d^0V$$

線形化

${}_0C_{ijrs}$: incremental stress-strain tensor at time t referred to the configuration at time 0

- ・この式が線形化した仮想仕事の原理の式になる。

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：接触は仮想仕事の原理に，接触剛性マトリックス，外力に接触力を足しこむ形式

・線形化した仮想仕事の原理の式に，接触を考慮すると次のように書ける

$$\int_{0V} {}_0C_{ijrs} {}_0e_{rs} \delta_0 e_{ij} d^0V + \int_{0V} {}^tS_{ij} \delta_0 \eta_{ij} d^0V + \boxed{\text{接触剛性マトリックス}} = \frac{{}^{t+\Delta t}R}{\text{↑}} - \int_{0V} {}^tS_{ij} \delta_0 e_{ij} d^0V^*$$

接触力が含まれる

・この式が材料非線形，幾何学的非線形，境界非線形を考慮した仮想仕事の原理の式になる。

→ **タイヤシミュレーションの基礎方程式**

| | |
|-------------------|--|
| Total Lagrangian | <ul style="list-style-type: none"> ・初期形状から大変形，接触，材料非線形性を同時に扱いやすい ・超弾性モデルに適する（種々の変換の必要なし） |
| Update Lagrangian | <ul style="list-style-type: none"> ・大回転，大移動を伴う場合 ・弾塑性モデルに適する |

* Shigenobu Okazawa, Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 193(2004)pp4277-4298

有限要素剛性方程式：有限要素に対する仮想仕事の原理を適用する

・応力，ひずみともベクトル成分で記述し，応力とひずみ，ひずみと変位の関係をC，Bマトリックスで関係づける*

| | integral | Matrix evaluation |
|------------------------------|--|---|
| Total Lagrangian formulation | $\int_{0V} {}_0C_{ijrs} {}_0e_{rs} \delta {}_0e_{ij} d^0V$ | ${}^t_0\mathbf{K}_L \hat{\mathbf{u}} = \left(\int_{0V} {}^t_0\mathbf{B}_{L0}^T \mathbf{C} {}^t_0\mathbf{B}_L d^0V \right) \hat{\mathbf{u}}$ |
| | $\int_{0V} {}^t_0S_{ij} \delta {}_0\eta_{ij} d^0V$ | ${}^t_0\mathbf{K}_{NL} \hat{\mathbf{u}} = \left(\int_{0V} {}^t_0\mathbf{B}_{NL0}^T {}^t_0\mathbf{S} {}^t_0\mathbf{B}_{NL} d^0V \right) \hat{\mathbf{u}}$ |

${}^t_0\mathbf{K}_L$ ${}^t_0\mathbf{K}_{NL}$: linear ,nonlinear strain incremental stiffness matrices

${}^t_0\mathbf{B}_L$ ${}^t_0\mathbf{B}_{NL}$: linear ,nonlinear strain-displacement transformation matrices

${}_0\mathbf{C}$: incremental stress-strain material property matrices

${}^t_0\mathbf{S}$:matrices of second Piola-Kirchhoff stresses

- 等価節点力 F , 外力 R も同様にマトリックスで表現すると下記のようになる*

| | integral | Matrix evaluation |
|------------------------------|---|---|
| Total Lagrangian formulation | $\int_{0V} {}^t S_{ij} \delta_0 e_{ij} d_0 V$ | ${}^t \mathbf{F} = \int_{0V} {}^t \mathbf{B}_L^T {}^t \widehat{\mathbf{S}} d_0 V$ |
| In all analysis | ${}^{t+\Delta t} \mathbf{R}$ | ${}^{t+\Delta t} \mathbf{R} = \int_0 \mathbf{H}^S T {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^S d^0 S + \int_{0V} \mathbf{H}^T T {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^B d^0 V$ |

${}^t \widehat{\mathbf{S}}$: vector of second Piola-Kirchhoff stresses

$\mathbf{H}^S \mathbf{H}$: surface- and volume- displacement interpolation matrices

${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^S$: vectors of surface forces

${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^B$: vector of body forces

* Kiaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures, P542

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：線形化した仮想仕事の原理をマトリックスで表記

Total Lagrangianで定式化した式をマトリックス、ベクトルの記述に書き換える*

$$\int_{0V} {}_0C_{ijrs} {}_0e_{rs} \delta_0 e_{ij} d^0V + \int_{0V} {}^tS_{ij} \delta_0 \eta_{ij} d^0V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}^tS_{ij} \delta_0 e_{ij} d^0V$$

マトリックスの記述に書き換える

$${}^t_0\mathbf{K}_L \hat{\mathbf{u}} + {}^t_0\mathbf{K}_{NL} \hat{\mathbf{u}} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t_0\mathbf{F}$$

整理すると次式になる

$$({}^t_0\mathbf{K}_L + {}^t_0\mathbf{K}_{NL}) \hat{\mathbf{u}} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t_0\mathbf{F}$$

$\hat{\mathbf{u}}$: vector of increments in the nodal point displacements

${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$: vector of externally applied nodal point load

${}^t_0\mathbf{F}$: vectors of nodal point forces equivalent to the element stresses at time t

タイヤシミュレーションのように接触を伴うと、このマトリックスに接触剛性マトリックスが加わります、外力に接触力も加わります ${}^t_0\mathbf{K}_L + {}^t_0\mathbf{K}_{NL} + {}^t_0\mathbf{K}_C$

* Kiaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures, PP540-541

非線形方程式の解法について*

・変形の大きな領域の解を求めることが目的であり、全変形を小さな変形の積み重ねとして扱い、全過程を増分に分割して逐次計算を進めて行く増分法をとる。一般的にNewton-Raphson法などの解法を用いることが多い。

$$\left({}^{t+\Delta t}_0 \mathbf{K}_L^{i-1} + {}^{t+\Delta t}_0 \mathbf{K}_{NL}^{i-1} \right) \Delta \mathbf{U}^i = \Delta \mathbf{R}^{i-1}$$

$$\Delta \mathbf{R}^{i-1} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{i-1}$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^i = {}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^{i-1} + \Delta \mathbf{U}^i$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^0 = {}^t \mathbf{U}$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^0 = {}^t \mathbf{F}$$

* Kiaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures, P754

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：計算フローの中で、計算負荷の大きい箇所を示している

非線形有限要素剛性方程式の計算フロー：赤字の箇所が計算負荷が大きく、大規模計算になる



剛性方程式の解法

$$\left({}^t_{0}K_L^{i-1} + {}^t_{0}K_{NL}^{i-1} \right) \Delta U^i = \Delta R^{i-1}$$

$$\Delta U^i = \left({}^t_{0}K_L^{i-1} + {}^t_{0}K_{NL}^{i-1} \right)^{-1} \Delta R^{i-1}$$

- ・大規模な行列で逆行列を求めることは困難である。

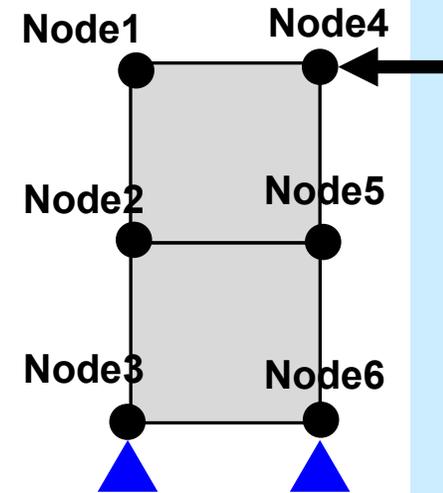
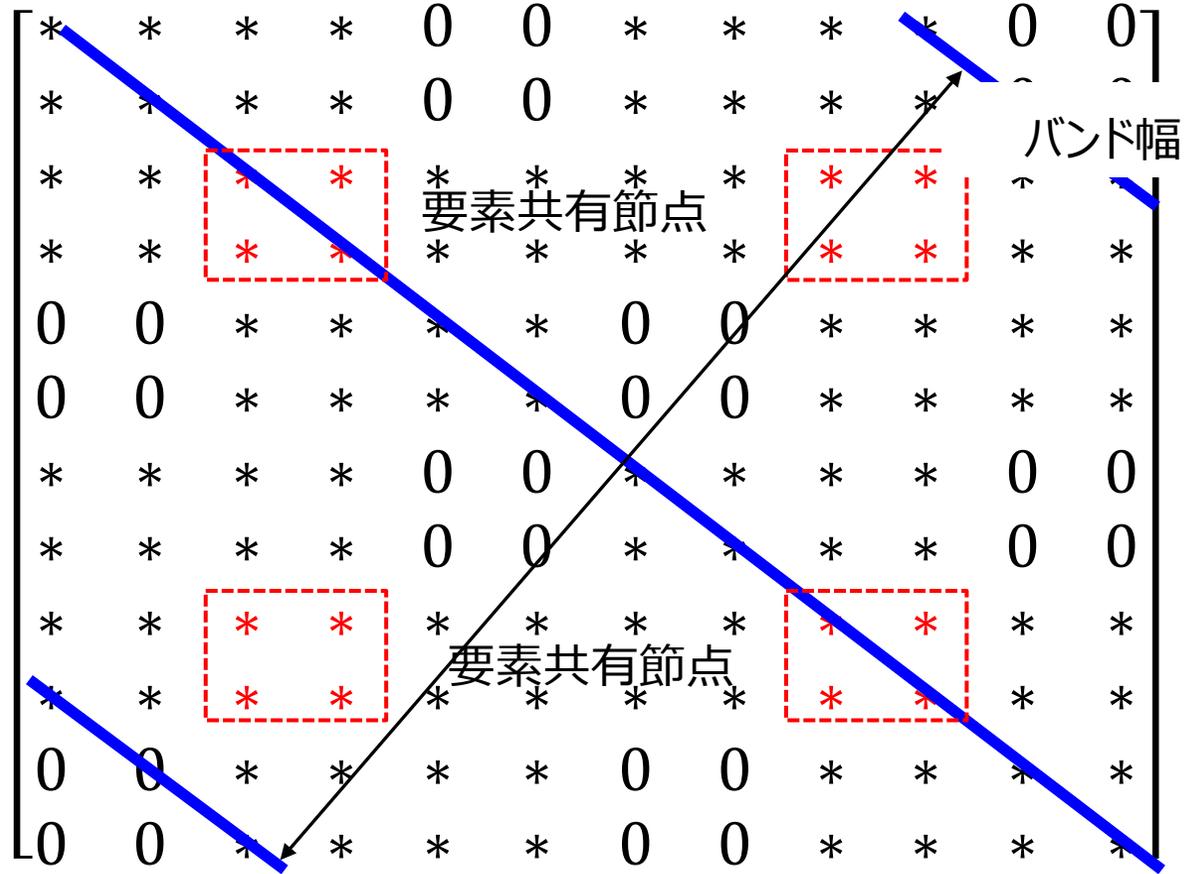
| | 直接法 (Direct Solver) | 反復法 (Iterative Solver) |
|--------|--|--|
| 手法の概要 | <ul style="list-style-type: none"> ・連立一次方程式を行列計算により直接解く方法 ・収束性と安定性に優れている | <ul style="list-style-type: none"> ・予測値を与え、予測値の修正計算を反復し、その収束解を求める方法 ・収束性は条件に依存する |
| 代表的な手法 | ガウスの消去法 | ヤコビ法 |
| | LU分解法 | ガウスザイデル法 |
| | 修正コレスキー法 | SOR法 |

- ・大規模モデルで自由度の増加により、計算量とメモリ量が増大するので連立一次方程式の求解には時間を要す。

逆行列求解ソルバー

| | | 適用問題 | ソルバー名 | 補足 |
|-----|---------|-------|--|--|
| SMP | 疎行列ソルバー | 固有値 | PSLDLT (Parallel Sparse LDL ^T Solver) | <ul style="list-style-type: none"> ・直接法 ・LDL^T分解を用いている |
| | | 剛性方程式 | PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver) | <ul style="list-style-type: none"> ・直接法 ・LU分解, コレスキー分解を適用 ・ノード内で高速に解く |
| MPI | | 剛性方程式 | MUMPS (MULTifrontal Massively Parallel sparse direct Solver) | <ul style="list-style-type: none"> ・直接法 ・LU分解, コレスキー分解を適用 ・多数のノードで高速に解く |
| | | 剛性方程式 | CG/GMRES+AMG | <ul style="list-style-type: none"> ・反復法 ・超大規模向き ・前処理依存 |

マトリックスのバンド幅について（構造体の剛性マトリックス）



* : 行列の非ゼロ成分

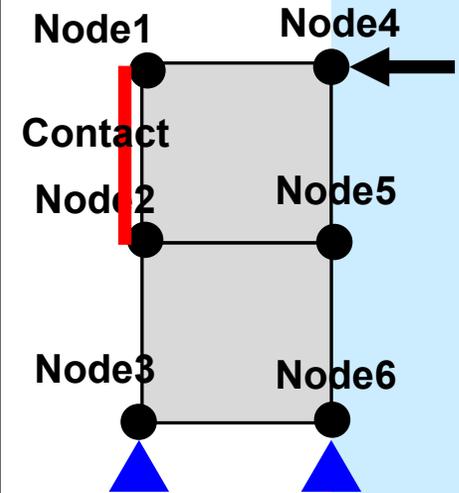
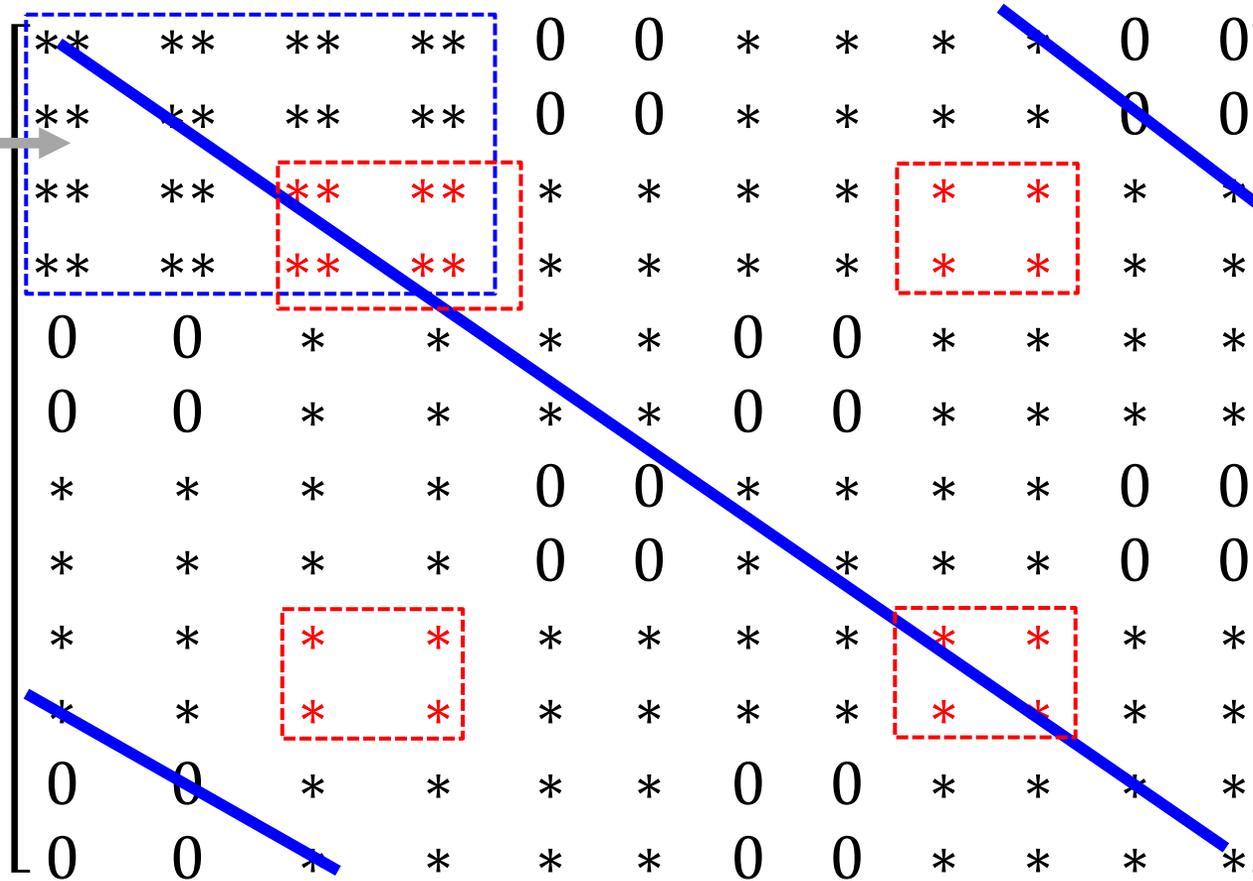
・剛性マトリックスはバンド状になり，対角項付近に非ゼロ成分が集まる。

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：接触問題の剛性マトリックスの特徴

マトリックスのバンド幅について（構造体の接触問題の場合の剛性マトリックス）

剛性マトリックス成分 +
接触剛性マトリックス



* : 行列の非ゼロ成分

・接触問題の場合、接触剛性マトリックスの成分が付加され、演算量が増える。

タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由のまとめ

| | |
|-------|--|
| 問題の特徴 | <ul style="list-style-type: none">・タイヤ変形, 転動の物理的な特徴は接触, 大変形, 材料非線形を伴う |
| 定式化 | <ul style="list-style-type: none">・非線形有限要素法の適用が必要・仮想仕事の原理による定式化・接触問題を考慮した剛性マトリックスの定義 |
| 数値計算法 | <ul style="list-style-type: none">・剛性方程式が非線形・増分法により変形の大きな領域の解を求める・各反復で連立一次方程式を解いている |
| 計算負荷 | <ul style="list-style-type: none">・大規模な疎行列の剛性マトリックス・接触により非ゼロ成分が増え, 剛性マトリックスの演算量も増える・連立一次方程式の求解が支配的になる |

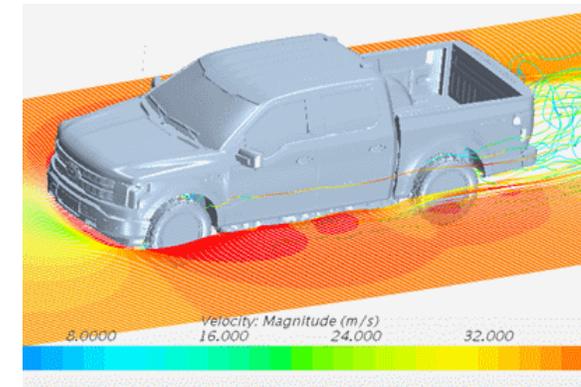
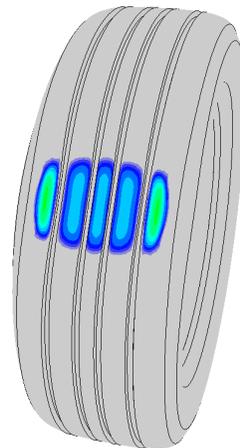
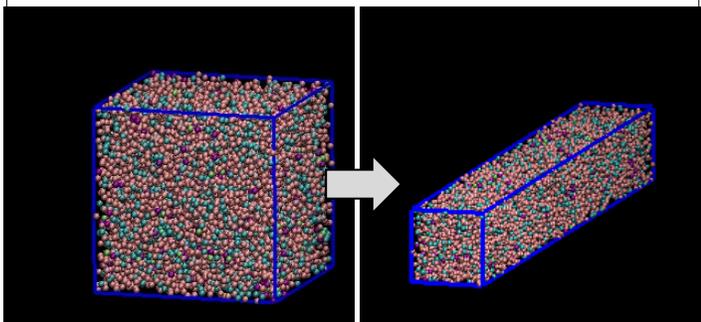
3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：シミュレーションとして扱うスケールはマイクロからマクロスケールと広範囲

タイヤ開発のシミュレーションで対象とするスケール

ミクロスケール

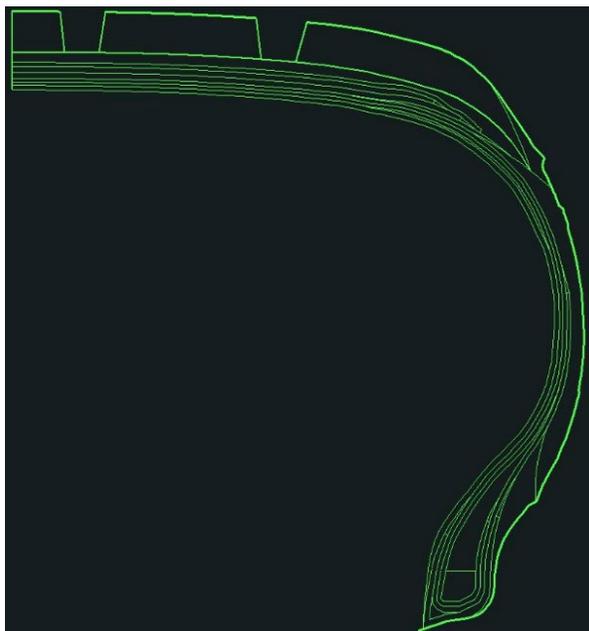
マクロスケール



| | | | |
|-------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| 対象物 | ゴムの分子レベル | タイヤ単体 | 車両全体, 車両周り |
| 手段 | Molecular Dynamics | Finite Element Method | Finite Volume Method |
| 計算規模 | 粒子数10万×3自由度 | 13万節点×3自由度 | 2億セル～3億セル |
| 計算コア数 | | | |
| 計算時間 | | | |

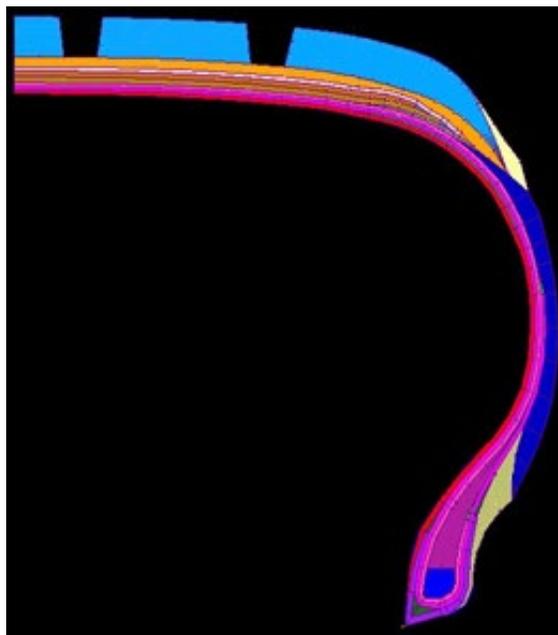
計算事例 1：設計者が主に利用するシミュレーションのオペレーション

CADデータ



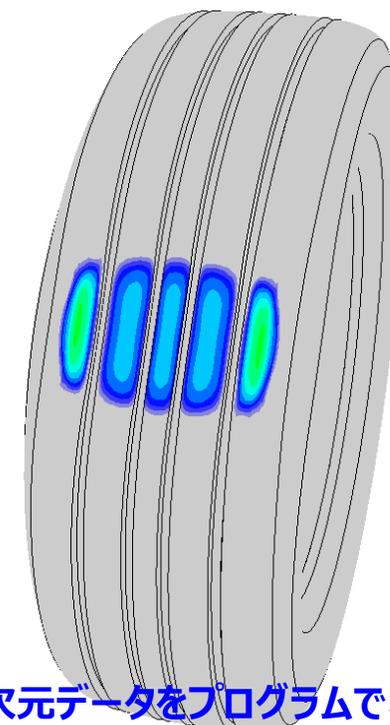
CADデータとプリデータを紐づけ

FEMモデル



- ・FEM要素へ材料特性定義
- ・境界条件の設定

ポスト処理
(例：接触圧力分布)



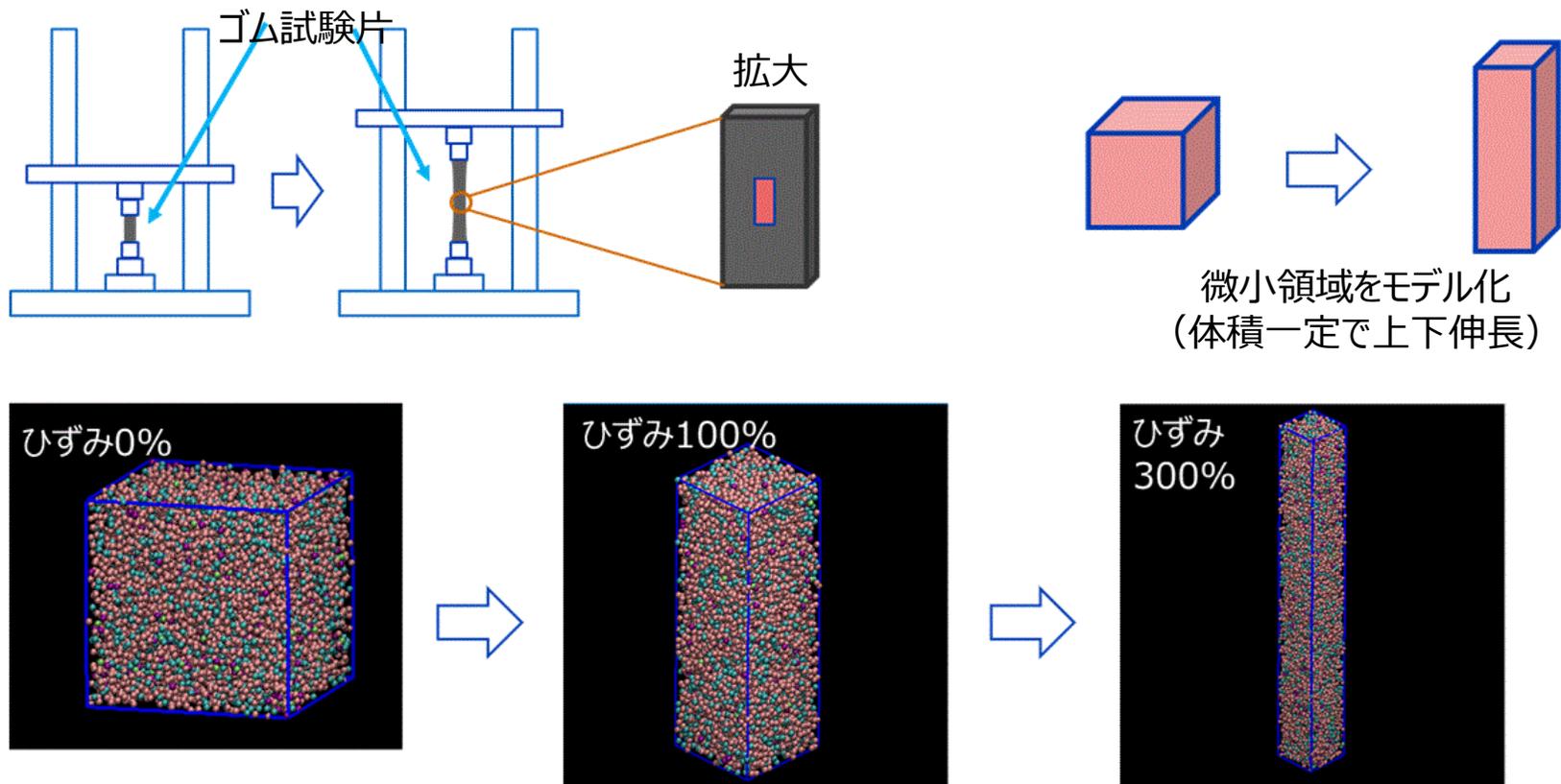
接触
圧力
高
↑
↓
低

- ・2次元データをプログラムで3次元
- ・スパコンへJOBをキック

3. タイヤシミュレーションにスパコンが必要な理由

ポイント：分子動力学法を用いて、ゴムの機械的特性を予測すること

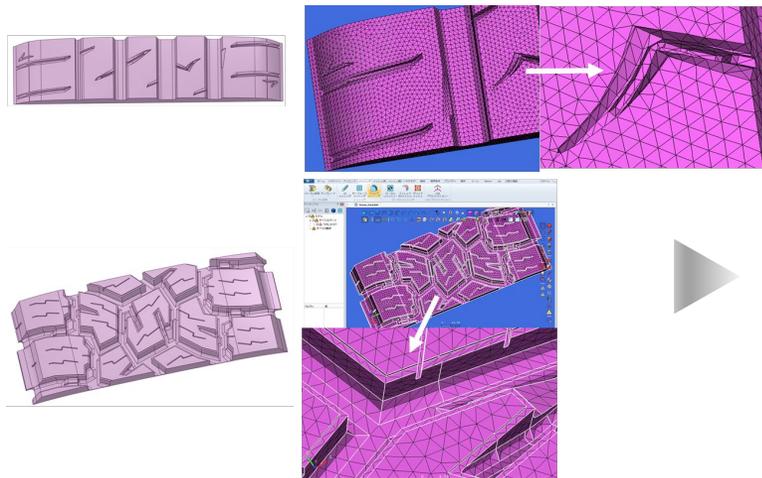
計算事例 2：分子動力学法によるミクروسケールシミュレーション



| | |
|---------------|----------------|
| 計算の目的 | 機械的特性を定量的に予測する |
| モデル規模, 計算条件など | 10万粒子, MPI並列 |

計算事例3：タイヤ単体のメゾスケール解析

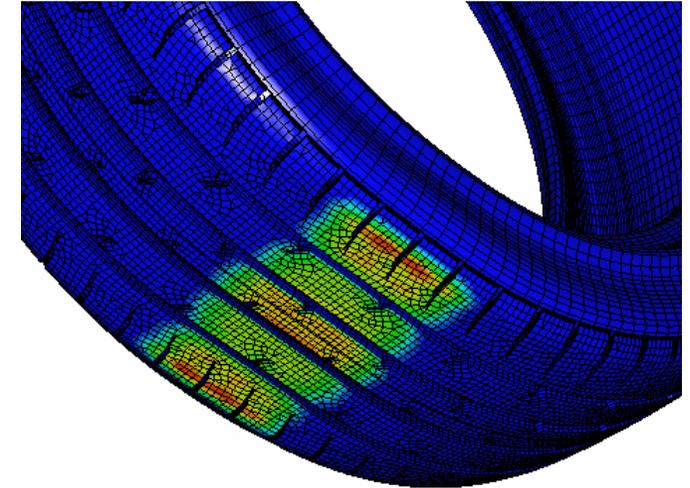
プリプロセッシング



Tire (FEM model)



転動シミュレーション



計算の目的

3次元トレッドパターン形状を再現し、接地時の詳細挙動を確認

モデル規模、計算条件など

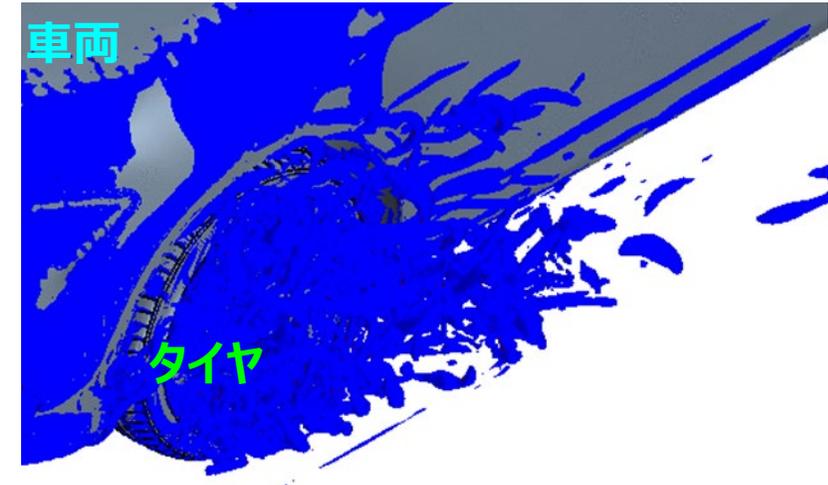
13万節点、SMP並列

計算事例 4：車両を考慮したマクロスケールでのタイヤ空力シミュレーション

タイヤの変形/運動を予測
(構造解析：有限要素法)



車両全体の流れを予測
(CFD：有限体積法)



| | |
|---------------|-------------------------------|
| 計算の目的 | タイヤ設計要因が車両Cd値に及ぼす影響を評価するために活用 |
| モデル規模, 計算条件など | 2億セル, MPI並列 |

企業でスパコンを活用する価値

| 観点 | 技術的効果 | 補足説明 |
|----------|---------------------------------|---|
| スパコン高速化 | ・開発期間の短縮 | ・商品サイクルを早くできる →顧客、市場のニーズに早く応えることができる |
| スパコン大規模化 | ・対象物、現象を忠実に再現できることによる、定量予測精度の向上 | ・試作、評価の回数を減らすことができる → 試作品を製作するためのCO2削減 評価を減らせることによるエネルギー削減 最適設計値を正確に求めることができる |

企業でのシミュレーション研究者に必要なこと

①設計，開発業務に適するシミュレーション技術であるかを的確に判断できること

→コスト，時間，現象の再現が大切

| | |
|-------|--------------------------------------|
| コスト | ・設計，開発の効率化，短縮化によるコスト低減と見合ったものであること |
| 時間 | ・設計，開発スケジュール内に収まること |
| 現象の再現 | ・最低限として定性予測ができる，望ましくはいくつかは定量予測もできること |

②ソフトウェア，ハードウェアのベンダー様と対等に話ができること

→丸投げしない，自身の意見が反映できる形にする

③研究者としての向上心

→新しいこと，難しいことに挑戦することと，社外で発表すること

企業のシミュレーション研究者として経験しておくべきこと

- ・シミュレーションの上流から下流までのプロセスを一通り経験し、それぞれのプロセスを把握、理解すること
- シミュレーション研究のテーマ選定、目標設定、計画立案のうえで、以下のことを理解したうえで進めることは大切です。

“シミュレーションに必要なものが何か”，“どのような方法を使う，応用する”，“難易度（すぐできる？）”

| | |
|-------|--|
| 力学の知識 | ・材料力学，弾性力学，流体力学，振動工学など |
| 数学の知識 | ・線形代数（ベクトル，行列，固有値），微分積分学（テイラー展開，定積分，重積分） |
| 数値計算法 | ・離散化法，時間積分法，非線形方程式の解法，連立一次方程式の解法 |
| HPC技術 | ・プログラミング（言語，並列プログラム），高速化技法（並列化，ソルバー），ハード知識 |

企業の次世代シミュレーション研究と大学でのHPC研究との関係

<企業におけるシミュレーション次世代基盤技術研究について>

・10年先のシミュレーション研究について，研究テーマ，目標を考える。（規模，精度，時間など）

→ハードウェアについても10年先の将来像が知りたい

理由：進めたいシミュレーション手法が目標性能を達成できる見通しがあるかは，ハード面の検討が必要なため



<大学でHPC研究を行う価値>

・偏りの少ない，俯瞰した，長期スパンのHPC研究が行えること → 長期目線でのハードのあるべき姿を知ることができる

・共同研究者がHPCに関する高速化技法の技術を指導頂けること

→成果物だけの提供でないこと，最新のハードを先生のご指導つきで試せること，最新の情報や長期展望を伺えること

4. 大学でのHPC研究の必要性

ポイント：産学連携したシミュレーション研究は大切（成果の質，人材育成）

シミュレーション研究のあるべき姿

企業でのシミュレーション研究

- 計測，可視化研究
- ・装置のスケールアップ
 - ・データ処理法

- シミュレーション研究
- ・社内環境へのプログラム実装
 - ・社内環境での高速化技法の実装
 - ・次世代ハードのロードマップ作成

大学での研究

- 工学・理学（計測，可視化）
- ・シミュレーション結果の検証のための計測，可視化手法の構築

- 工学・理学（計算力学）
- ・支配方程式の改良
 - ・離散化手法構築

- 情報（HPC研究）
- ・高速化技法
 - ・最適ハード仕様

実用問題提示

方法，手法
社員教育
最新研究動向

予測精度検証

高速化，効率化

連携：企業-大学間での種々のやり取りを柔軟に行い，横断的な研究活動もしやすくなる

TOYO TIRES

謝辞

- ・本講演の機会を賜りました，大阪大学D3センターの伊達進教授に心よりお礼申し上げます。
- 誠にありがとうございました。

有限要素方程式の増分法による解法 : Newton-Raphson Schemes

$$\mathbf{f}(\mathbf{U}^*) = \mathbf{0} \quad \text{式A}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{U}^*) = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}(\mathbf{U}^*) - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}(\mathbf{U}^*) \quad \text{式B}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{U}^*) = \mathbf{f}({}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i-1}) + \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{U}} \right] (\mathbf{U}^* - {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i-1}) + \text{higher order terms} \quad \text{式C}$$

式Bを式Cに代入し, 式Aの関係を適用すると式Dになる

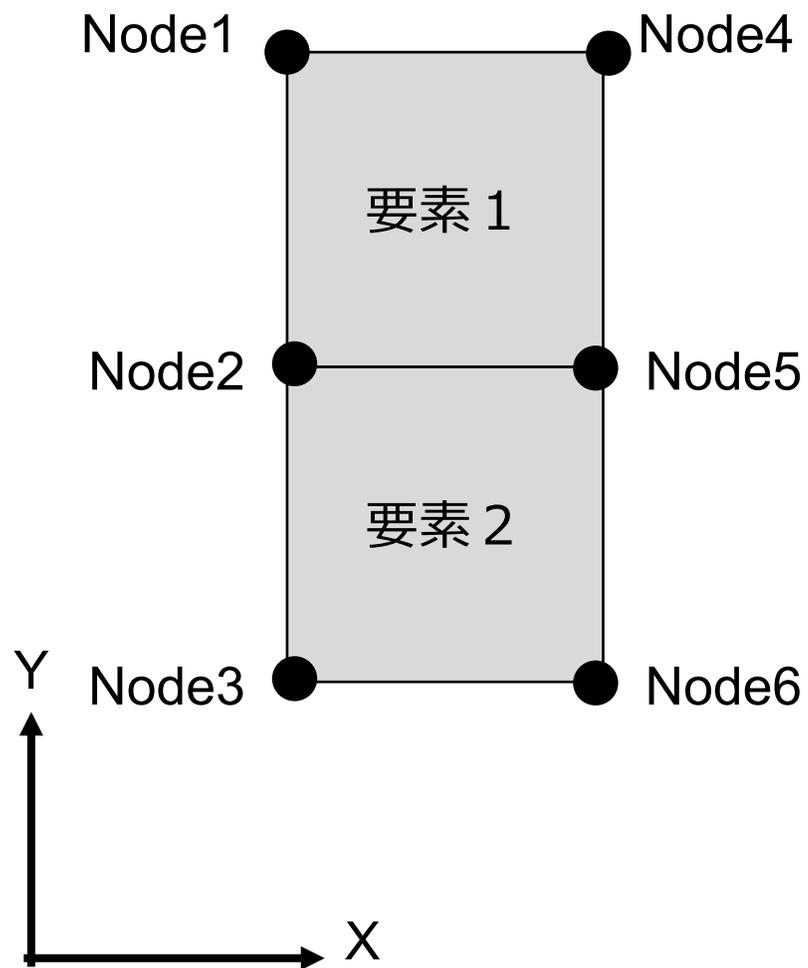
$$\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right] (\mathbf{U}^* - {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i-1}) + \text{higher order terms} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{i-1} \quad \text{式D}$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{i-1} \Delta \mathbf{U}^i = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{i-1}$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{i-1} = \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right]$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^i = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{i-1} + \Delta \mathbf{U}^i$$

$$\begin{aligned}
\int_{0V} {}_0S_{ij} \delta {}_0\epsilon_{ij} d {}_0V &= \int_{0V} \left(\frac{\partial {}_0^t S_{ij}}{\partial {}_0^t \epsilon_{rs}} {}_0\epsilon_{rs} + \text{higher order term} \right) \delta ({}_0e_{ij} + {}_0\eta_{ij}) d {}_0V \\
&= \int_{0V} \left(\frac{\partial {}_0^t S_{ij}}{\partial {}_0^t \epsilon_{rs}} \left[\underbrace{({}_0e_{rs} + \underbrace{{}_0\eta_{rs}}_{\text{neglect}})}_{\text{neglect}} + \underbrace{\text{higher order term}}_{\text{neglect}} \right] \right) \delta \left(\underbrace{{}_0e_{ij}}_{\text{neglect}} + \underbrace{{}_0\eta_{ij}}_{\text{neglect}} \right) d {}_0V \\
&= \int_{0V} {}_0C_{ijrs} {}_0e_{rs} \delta {}_0e_{ij} d {}_0V
\end{aligned}$$



| | |
|----------------|-------------------------|
| 要素 1 のコネクティビティ | Node1,Node2,Node5,Node4 |
| 要素 2 のコネクティビティ | Node2,Node3,Node6,Node5 |
| 完全拘束点 | Node3,Node6 |
| 外力 | Node4にX方向-Fを負荷 |
| 要素 | 4 節点 2 次元要素 |