

摩擦時応力スキームに配慮した広域界面摩擦シミュレーション

Friction Simulation on Wide-Area Interface Considering Friction-Induced Stress Scheme

鹿児島高専・機械（正）*杉村 奈都子 鹿児島高専（学）石原 大嵩 兵庫県立大（院）藤田

晃徳 鹿児島高専（非）上ノ園 悠大 極地研（非）杉村 剛 都市大（正）三原 雄司 兵庫県立大（正）鷺津 仁志

Natsuko Sugimura^{*,**,*}, Hirotaka Ishihara^{*}, Akinori Fujita^{**}, Yudai Uenosono^{*},

Takeshi Sugimura^{***}, Yuji Mihara^{****}, Hitoshi Washizu^{**}

^{*}National Institute of Technology, Kagoshima College, ^{**}University of Hyogo, ^{***}National Institute of Polar Research,

^{****}Tokyo City University

1. はじめに

粒子法による大規模並列計算用摩擦焼付きモデルの開発を進めている[1]。単位剪断面積が数 μm 四方のモデル凹凸界面での摩擦発熱シミュレーションを経て、昨年度から 10 μm 四方以上の広域かつ高解像度な実界面性状における剪断を再現するべく非等方モデル計算を開始した。この時、極めて小さい刻み時間においては弾性域では線形の応力増分-ひずみ増分関係が成り立ち、塑性域でも降伏と硬化を考慮した応力増分-ひずみ増分の関係が保たれると仮定して応力を表した。しかし、さらに界面の応力定義について、①陽に大変形効果を繰り込み②界面における局所的な応力やエネルギーの分布を調べることで、精度のよい界面挙動の再現を実現し、エネルギー分布の特性を見出すことが出来るのではないかと考えた。たとえば局所的なひずみエネルギーに着目すれば、第一原理計算や分子動力学計算との接合がスムーズになることも期待できる。本件では大規模計算にこのようなスキームを組み込む方法について議論する。

2. 摩擦モデルとその改良の方向性

広域界面モデルでは、鉛直方向と剪断方向の解像度が異なる非等方的な空間で計算を実施すると便利である。SPH法では用いる重み関数に方向性を持たせることで粒子形状を適宜変える（非等方粒子とする）手法があるが、荷重下剪断では着目すべき方向が一定の荷重方向と剪断方向に固定化されるため、それに合わせた座標変換で対応が可能となる。

支配方程式は質量、運動量の保存式、エネルギーの式であり、この点に変更する必要がなさそうである。また、本モデルではナノスケール界面反応性のボトムアップ粗視化を念頭に置いてこの反応力を外力項として加えるが、その点も変更はない。また、大変形により生じる計算上の振動を抑えるために、従来の人工粘性に加えて新たに何某かの減衰項を加えることを検討すべきかもしれない[2]。しかしこれも主改良の後に実施を検討すべき内容であろう。今回、改良を議論すべきなのは、運動量保存とエネルギーの計算に必要な「応力」の構成式である。マクロレベルの劇的な変化、すなわち破壊スキームを加えることもひとつ重要ではあるが[3]、Cauchy 応力-ひずみの直接的な関係の範疇で処理するのではなく、変形勾配テンソル F を陽に用いて計算する大変形スキームの投入が必要であると考え。超弾性計算で第一選択として用いられる手法であり、金属においては塑性の分を正確に除くことで超弾性計算と同様に応力を決定できる。具体的には、いわゆる有限ひずみ理論において、変形勾配 F は弾性変形勾配 F^e と塑性変形勾配 F^p の積とされ、弾性部分を超弾性で、塑性部分を降伏、流動、硬化を表す内部変数で表し、式 1 によって Cauchy 応力 σ が求められる。

$$\sigma = \frac{2}{J} F^e \cdot \frac{\partial W(C^e)}{\partial C^e} \cdot (F^e)^T \quad (1)$$

$$\therefore F^e = F \cdot (F^p)^{-1}$$

なお、 J :体積変化率（ $=\det F$ ）、 C^e :右 Cauchy - Green 変形テンソル（ $=F^e \cdot (F^e)^T$ ）である。 W は変形勾配テンソルで定義されるひずみエネルギー密度関数であり、超弾性体ではこの W について複数の代表的なモデルが提唱され、引張り、圧縮、剪断試験の再現性などが議論される。金属の場合、塑性変形勾配 F^p の内部変数をどう表すかも重要だが[4]、今回本件ではまず、この超弾性のスキームをモデルに組み入れることとする。

3. 方法と結果例

超弾性体のひずみエネルギー密度関数 W として Neo-Hooke, Mooney-Rivlin, Arruda-Boyce, Ogden などの代表的なモデルが提唱されるが、今回、Aruda-Boyce モデルについて試験した。ただし、 μ :剪断弾性率、 $I_1 = \text{tr}(C)$ （第一不変量）、 n :動

きやすさに関する係数である。

$$W = \mu \left(\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20n}(I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050n^2}(I_1^3 - 27) + \dots \right) \quad (2)$$

負荷過程における剪断時のひずみ-相当応力線図は

Fig.1 に示す通りである。初期応答にまだ課題があるが、本モデルへの大変形スキームの組み込みという点で一歩進んだ状況である。

文献

- 1) N.Sugimura,L.V.Sang,Y.Mihara,H.Washizu: Mesoscale smoothed particle hydrodynamics simulation of seizure and flash temperature for dry friction of elastoplastic solids in a newly developed model, J.Compt.Sci.,82(2024)102325
- 2) 小野 : SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析,土木学論文集 A1,69,4(2013)I_650.
- 3) C. Schäfer, S. Riecker, T. Maindl, R. Speith, S. Scherrer, W.Kley:A smooth particle hydrodynamics code to model collision between solid, self-gravitating objects”, Astronomy Astrophysics,590, A19(2016)1.
- 4) 渡邊,岩田,中西:テンソル内部変数を持つ有限ひずみ弾塑性構成モデルの定式化,日本計算工学会論文週,2010(2010) No.20100005

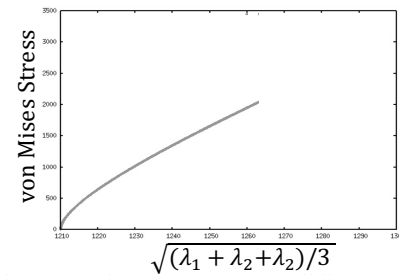


Fig.1 Strain-Stress curve on sliding test