



Title: Computational study on the effect of anisotropy in the transversely isotropic elasticity of elastoplastic solids on depth-sensing indentation with a point-sharp indenter

(先端の鋭い圧子を用いたナノインデンテーションに及ぼす弾塑性固体の面内等方弾性における異方性の影響に関する計算科学的研究)

Authors: Takashi Akatsu, Tatsuya Yamaguchi, Yutaka Shinoda, Fumihiro Wakai, Hiroyuki Muto

(赤津隆 (東京工科大片柳研究所教授)、山口達也 (東工大 大学院生)、
篠田豊 (宇部高専准教授)、若井史博 (東工大名誉教授))

Journal: International Journal of Solids and Structures

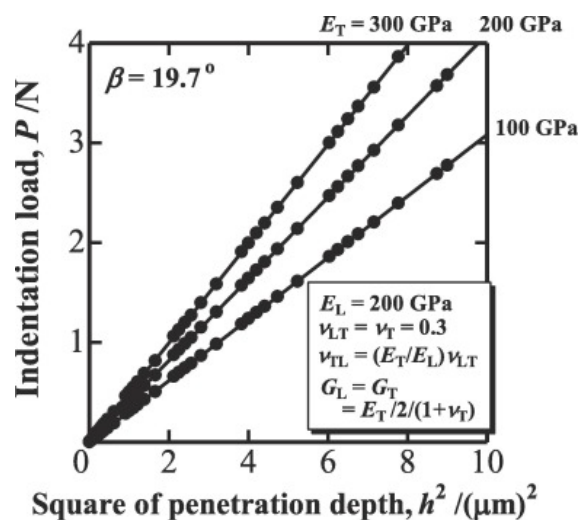
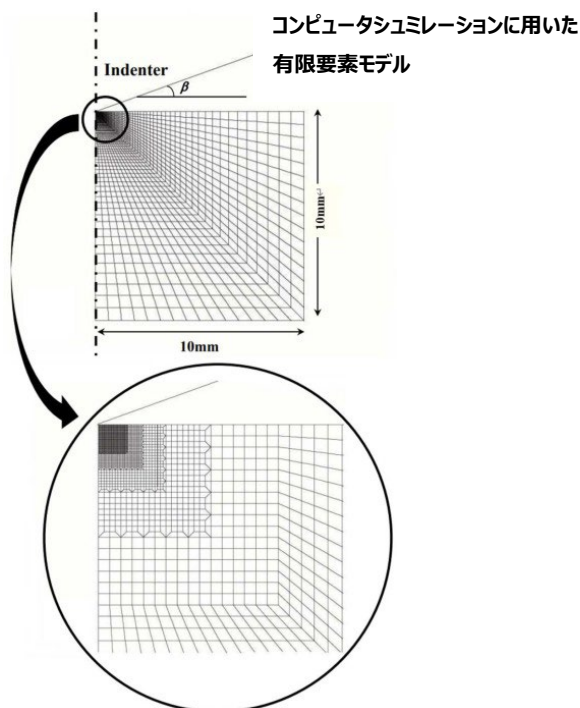
掲載年月: 2024 年 4 月

研究概要: 弾性率が面内等方性の弾塑性固体にナノインデンテーション法を適用した場合、たとえ押し込み方向の弾性率が同じでも、弾性スティフネステンソルの対角成分が異なる (弾性異方性がある) と、押し込み曲線が大きく変化します。その変化は、修正された Sneddon の式に含まれるパラメータの変化として定量的に反映できることが分かりました。その結果、面内等方弾塑性体についても、代表インデンテーション弾性率と代表インデンテーション降伏応力を弾性異方性の関数として推定できることを明らかにしました。

研究背景: ナノインデンテーション法は薄膜や微小材料の力学的特性評価法として注目されています。なぜなら、局所的な領域の力学特性が評価できるからです。しかし、ナノインデンテーションによって得られる押し込み曲線の解析法は力学的な均質等方性を前提としており、材料の局所領域において均質等方体近似を適用することは疑問視されていました。本研究では、弾性異方性が押し込み曲線に及ぼす影響がどのように現れるのか、を定量的に把握することを目的としました。

研究成果: 面内等方体である弾塑性固体において、圧子直下の弾性変形抵抗の指標である代表インデンテーション降伏応力を弾性異方性の関数として推定する方法を提案しました。

社会への影響: 弾性率に異方性がある薄膜や微小材料に対してもナノインデンテーション法を適用して力学特性を評価することが可能となります。



弾性異方性が押し込み曲線に及ぼす影響 (押し込み方向と垂直方向の弾性率が大きくなると勾配が増加し、小さくなると減少することが分かる。)

専門用語：

ナノインデントーション法：ある形状（例えば、球や円錐、円柱など）の圧子を材料表面に押し込み、その際の荷重 P と押し込み深さ h の関係を連続的に計測して得られる押し込み曲線(P - h 曲線) を解析することで、押し込んだ部分の力学特性を評価する方法。

面内等方性：ある方向の性質とそれと垂直な方向の性質とが異なる固体で、その垂直方向はすべて同じ性質のもの。

弾性スティフネステンソル：応力テンソル(2 階テンソル) とひずみテンソル(2 階テンソル) の比例係数に対応する 4 階テンソル。

代表インデントーション弾性率：圧子直下の弾性変形抵抗として評価される弾性率。

代表インデントーション降伏応力：圧子直下の塑性変形抵抗として評価される弾性率。

Sneddon の式： $\frac{E}{k_e} = \left(\frac{\pi}{2}\right) (1 - \nu^2) \tan\beta$ 。ここで、 E ：ヤング率、 ν ：ポアソン比、 β ：圧子の傾斜面角、 k_e ：完全弾性体において P/h^2 で与えられるインデントーション弾性パラメータ。ポアソン比の影響を正確に反映させるために、 $\frac{E}{k_e} = a\{1 - c(\nu - b)^2\}$ に修正される。ここで、 a 、 b 、 c は以下で与えられるパラメータ、 $a \equiv 1.31 \tan^{0.919} \beta$ 、 $b \equiv 0.225 \tan^{1.05} \beta$ 、 $c \equiv 1$ 。