最終更新日: 2004-01-29

球状圧子がもたらす弾性応力場の解析

薄膜・表面物性研究室　　天野　晶夫
T005002　Akio Amano

目的

圧子の押し込みによる薄膜/基板系の弾塑性変形がわかると、皮膜の力学的耐久性（付着性）の向上に利用できる。スクラッチ試験機に用いられる半球状圧子が、物体表面に作用するときの力学過程を有限要素法によって解析することを試みる。

概要

物体内の各点は力が作用すると変形する。応力σ とひずみεの間には$\sigma = \{c\}\varepsilon$ の関係がある。また、各点の変位を u, v, w とすると、ひずみは$\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x, \varepsilon_{yy} = \partial v / \partial y, \varepsilon_{zz} = \partial w / \partial z$ と表される。座標面に平行に物体内部に dx, dy, dz の微小直方体を考え、各面に作用する応力を求めて力のモーメントの釣合いを考えると、物体の中では $\nabla \cdot \{\sigma\} = 0$ が成り立っている。球圧子を半無限物体に押し込むことにより生じる応力場は、球圧子と物体の接触円半径を a 、圧子の全荷重をW 、半無限弾性体を $z > 0$ の空間として、物体表面 $z = 0$ で

$$\sigma_{yz} = 0 \quad ; \quad \sigma_{xz} = 0 \quad ; \quad \sigma_{zz} = -\frac{3W}{2\pi a^3}(a^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \quad , \quad r < a \quad , \quad r = \left(x^2 + y^2\right)^{1/2} \qquad (1)$$

の垂直抗力に関する境界条件のもとに、上述の微分方程式を満たすような解を求めればよい。この解はすでに知られていて、その解から導かれる von Mises の相当応力をMATLAB でグラフにしたのが図1である。 ここでは、接触円の半径を a=20 とした。相当応力とは、応力テンソル{ σ }の不変量のひとつ J_2 の平方根$\sqrt{J_2} = \sqrt{-(\sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x + \sigma_x\sigma_y) + \tau^2{}_{yz} + \tau^2{}_{zx} + \tau^2{}_{xy}}$ として計算される、応力の次元を持つ量で、延性材料の弾性限界に関係するといわれている。

図2は膜厚 2 µm、4 µm×2 µm の Cu 薄膜に半径 15 µm の剛体圧子を 0.005 µm 押込んだときの相当応力を有限要素法ソフト ANSYS により計算した結果である。

結果

球状圧子で薄膜材料を押し付けると、接触面よりも深いところで最大の応力が発生することが知られているが、有限要素法による解析でも MATLAB でグラフにした結果と一致することがわかった。

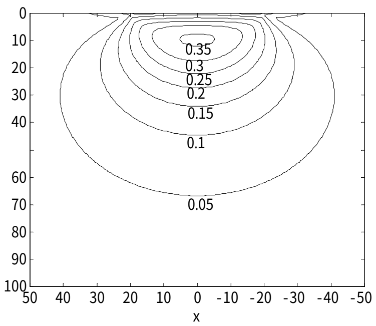

図1. 弾性方程式による von Mises の応力場

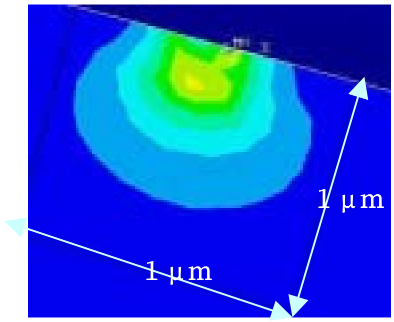

図2.　有限要素法による相当応力