

有限変形過程における外力の影響 - 弾性(内)系と非弾性(外)系のカップリング -

Finite deformation and the influence of external stress on elasticity of solids

大内 徹 [1]

Toru Ouchi[1]

[1] 神戸大学都市安全研究センター

[1] Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

固体系の弾性に対する外界からの作用の効果は初期応力・歪として、すなわち直接弾性(内; internal)系の変形・歪応答と非弾性(外; external)系を介した外力として現れる。線形の範囲ではこの問題は顕在化しないが、高次変形理論では大変に重要である。この問題に対しては Poincare や Brillouin による先駆的な研究がある。外界から一様な静水圧が作用している状況を考える。初期圧力 P (正)と歪 e (負)のもとでは S 波の速度の 2 乗 V_s^2 は $d \cdot V_s^2 = G - P + e \cdot (3 \text{ 次弾性効果; 負})$ と表される (Brillouin, 1925)。 d と G は密度と剛性率。 P 波も同様である。初期圧縮歪が大きくなると 3 次の弾性効果は弾性波速度を大きくするように働くが、外系からの圧力 P は逆にこれを抑えるように働く。直感的には分子間の距離が小さくなることにより弾性が增加するが、一方弾性歪と非弾性による外力との相互作用により剛性が減じると考えることができる。一般に見られる圧力とともに増加する弾性波速度は前者が卓越した状況を反映したものと考えられる。

一様な外力は静水圧の場合具体的に $P = P_{th} + P_{st} + P_{ex}$ と表すことができる。最初の P_{th} は熱圧力で、 P_{st} は初期歪に起因する。問題は最後の P_{ex} で、外界からの作用に対する非弾性効果とそれと弾性変形とのカップリングに起因する外力効果を表している。以下これを外系効果とする。問題はこの項でこれが従来の多くの議論で考慮されていない。この外系効果に関して Falzone & Stacey(1980,81) は分子動力学モデルを用いた研究でそれが全系の弾性に大きく影響することを明らかにしている。

実際に外界からある固体に作用を加える場合それが直接弾性(内系)変形の歪と応力として応答するのか、あるいは外系効果による応答になるのかという問題が生じる。重要なことはそれはすべて両者のカップリング状態によって決まるということである。この問題は外界からの作用に対する固体の弾性と非弾性応答の問題と考えることもできる。また、非弾性系における力の輸送とそれに対する弾性系の変形応答の問題とも考えることができる。いかなる固体も弾性と非弾性を有する構造をしている。両者は表裏一体の性質であり弾性系に着目すると非弾性効果は外系からの作用とみなすことができる。弾性(内系)としての応答は初期歪の問題となるし、外系効果なら初期応力の問題となる。塑性変形は外系効果に対応する。系固有の構造に起因する変形応答も外系効果とみなすことができるだろう。

実験や観測でも対象に加わると想定される圧力がすべて弾性(内)系に加わるわけではなく、外系としての非弾性系(実験であれば加圧装置)も含めた全系にかかることになるので、実験や観測結果を評価する上で重要である。従来の研究の多くは固体が両方の性質を有していることは認識していても、実際の実験結果の解釈もほとんど対象を弾性固体として扱っているのではないだろうか。

非弾性による外系効果は従来余り考慮されていないが予想される以上に大きいものと考えている。この外系効果については浅部域では様々なテクトニクスに由来する非弾性外力による効果が非常に大きいものと予想される(大内, 2003; Ouchi, 2004)。深部の高圧・高温域では非弾性的性質は大変に大きくなるだろう。高圧変形における塑性変形の重要性については Bridgman(1952)の書物に詳しいが、この場合も外系効果は大きいと考えられる。固体の塑性や分子構造のゆがみ等の効果を考えると地球深部で圧力、温度依存性は考えられてきた以上に大きく複雑であろう。特に考えられるのは外系効果により外力(静水圧)が増加し、それにより生じる速度構造の低下現象である。弾性と非弾性とのカップリングによっては静水圧の増加の効果により溶融等の相転移まで行かなくても速度の低下が起こりうる。また、温度や圧力の変化により固体の形態構造が微妙に変化し、両効果のカップリングが変わり系の弾性に大きな変化が生じるような現象も起こる可能性がある。