

522 エネルギー原理による粘性の発生メカニズム

長松, 昭男 / NAGAMATSU, Akio

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Dynamics & Design Conference

(巻 / Volume)

2007

(開始ページ / Start Page)

522-1

(終了ページ / End Page)

522-6

(発行年 / Year)

2007-09-25

522 エネルギー原理による粘性の発生メカニズム

Generation Mechanism of Viscosity by Energy Principle

○正 長松 昭男 (法政大)

Akio NAGAMATSU, Hosei University, Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo

Linear equation of motion consists of mass, stiffness and viscosity, and is deduced from the energy law. Functions of mass and stiffness are clearly explained by the law of conservation of mechanical energy. But usually, it is said that viscosity can not be explained by the energy law. In this paper first, relation between viscosity and potential energy is made evident. Second, generation mechanism of viscosity is made clear from the standpoint of nuclear physics. It is newly introduced that the inflect point of Lennard-Jones potential decides the boundary between the elastic and the viscous regions. Third, the reason is presented why viscosity dissipates mechanical energy by changing it to thermal energy. Forth, it is made clear how viscosity yields the resistance force proportional to given velocity.

Key Words: Viscosity, Energy law, Lennard-Jones Potential, Van der Waals Gravity, Dissipation of Mechanical Energy

A1. はじめに

減衰を有する系の運動方程式は、一般には非線形になるが、粘性だけは線形の運動方程式を構成する。線形運動方程式はエネルギー原理から導かれることから、粘性の発生機構と働きは、エネルギー原理の立場から説明できるはずである。しかし著者の知る限りでは、従来このような試みは全く行われておらず、粘性の発生メカニズムはこれまで不明とされていた。本論文は、この問題を解決するものであり、エネルギー原理を用いれば、粘性の発生メカニズムが定性的に説明できることを、明らかにする。

A2. 内容

A2・1 カエネルギー場と粘性 従来は無関係とされていた弾性と粘性が、カエネルギー場の性質の違いによって決まる2種類の力学的性質であり、共にカエネルギー場が発現する現象として、統一的に説明できることを述べる。カエネルギー場 $U(x) = ax^n$ (a は正の定数) の性質を決めるのは、指数 n である。そして、 $n > 0$: 原点からの引力の場、 $n = 0$: 等カエネルギーの場 (例: 無重力場)、 $n < 0$: 原点からの斥力の場、である。また引力の場のうち、 $n > 1$: 弾性の場、 $1 \geq n > 0$: 粘性の場、である。

A2・2 粘性の発生原因 2個の原子・分子間には、図 A1 の点線のようなポテンシャル (カエネルギー場) が形成され、これを原子間距離で微分した実線のような力が作用する。このカエネルギー場の底点 a が原子・分子間の安定位置であり、それ以近では斥力、以遠では引力が作用する。

本論文では、原子・分子間のカエネルギー場の変曲点 b が、力学的にも物学的にも重要な意味を有する位置であることを、提示する。そして、この場において変曲点 b 以近が弾性域、それ以遠が粘性域になることを説明する。

このように弾性と粘性の発生原因は、原子・分子間カエネルギー場を用いて統一的に説明できる。このことは、2個の原子・分子間で発生する粘性という力学的性質自体は、力学的エネルギー保存の法則に従う現象であり、力学的エネルギーの散逸を伴わないことを意味する。

A2・3 粘性による力学的エネルギーの散逸機構 複数の相手原子との間のカエネルギー場を対象原子が運動する場合には、粘性が力学的エネルギーの散逸を伴うことを、明らかにする。またこれに伴って、粘性が速度に比例する抵抗力を発生する理由を述べる。さらに、粘性と塑性が同一の発生原因で生じる力学的性質であることを、説明する。

A2・4 固体・液体・気体の物性 本論文で初めて指摘した原子・分子間カエネルギー場の変曲点が、物質の物性を決定付ける大きい意味を有することを指摘する。そして、それによって生じる粘性を用いて、従来は明らかでなかった固体・液体・気体の違いを物的に解明し、溶解と蒸発のメカニズムを説明する。同時に、固体が弾性に、液体が粘性に、気体が不規則自由運動に支配されることを述べる。

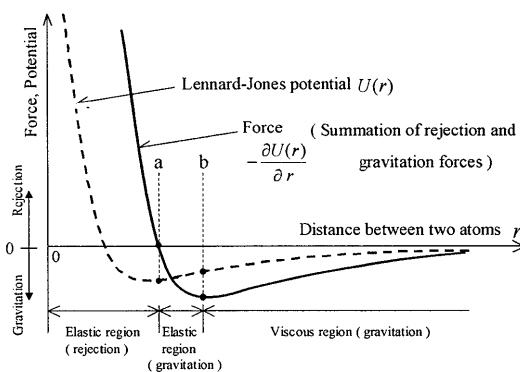


Fig.A1 Potential energy and action force between two atoms

A3. まとめ

従来は全く注目されていなかった原子・分子間のカエネルギー場の変曲点を初めてとりあげ、それを用いれば、粘性の発生原因と機能を原子物理学の立場から解明でき、また、従来は明らかでなかった固体・液体・気体間の物性の違いが、定性的に説明できることを、提示した。

なお本論文の根幹は、下記の本に記されている。

長松昭男、機械の力学、朝倉書店 (2007・3)

1. はじめに

物質に内在する3つの力学特性のうち質量と剛性は、力学法則によって明確に定義付けられており、それらとエネルギー原理の関係は、力学的エネルギー保存の法則によって明白である。しかし、もう一つの力学特性である減衰は、その正体がまだ十分解明されておらず、このことが機械力学における難点の一つになっている。特に振動工学では、減衰が支配的役割を果たすので、この問題は重要である。

減衰を有する系の運動方程式は、一般には非線形になるが、粘性だけは線形の運動方程式を構成する。線形運動方程式はエネルギー原理から導かれることから、粘性の発生機構と働きは、エネルギー原理の立場から説明できるはずである。しかし著者の知る限りでは、従来このような試みは全く行われておらず、粘性の発生メカニズムはこれまで不明とされていた。

著者はこの問題を解決するための研究を続けており、この度一応の結果が得られたので、報告する。なお本論文は、著者が提唱する新しい力学理論⁽¹⁾に基づくものである。

本論文の内容は以下の通りである。まず、物体の3つの力学特性である質量・柔性（剛性の逆数）・粘性の機能を述べ、互いを関連付ける。次に、弾性と粘性の発現機構を、力エネルギー場を用いて統一的に説明する。そして、原子物理学の立場から粘性の発生原因を解明する。続いて、粘性の働きが力学的エネルギーの散逸を伴うからくりと、作用速度に比例する抵抗力を発生する理由を述べる。さらに粘性は、上記のように力学特性としてのみではなく、固体・液体・気体の物性を決定付ける、物理学上重要な特性であることを提示する。

2. 質量・柔性・粘性の機能

本論文では、弾性を従来の剛性 K の代りにその逆数である柔性 $H(=1/K)$ として扱っている⁽¹⁾。これは、物質は剛性ではなく柔性でエネルギーを保有するからである。例えば、質量 M のない物体は運動エネルギーを保有できず、柔性のない物体（剛体）は力エネルギー（弾性エネルギー）を保有できない。また本論文は、力の代わりにエネルギーを表に出した力学理論⁽¹⁾をその基盤としている。

本論文では、従来の位置エネルギーを力エネルギーと呼んでいる⁽¹⁾。これは、運動エネルギーの状態量は運動を代表する速度であるのに対して、位置エネルギーの状態量は位置ではなく力であることによる。すなわち、物体がある位置にあることではなく、その物体に力が作用することが、力学的エネルギーの存在を具現しているのである。動力学では、位置は運動の一種であり速度の時間積分値である。

本論文では、両者を乗じたらパワーになる速度 v と力 f を対等・双対の状態量としている⁽¹⁾。運動エネルギーは、速度を用いて $Mv^2/2$ と表現する以上、それと対等・双対の関係にある力エネルギーは、運動の一種である位置（変位 x ）を用いて $Kx^2/2$ と表現するよりも、力を用いて $Hf^2/2$ と表現するほうが自然であろう。このようにエネルギーの立場から見れば、質量と対等・双対の関係にあるのは剛性ではなく柔性なのである⁽¹⁾。

質量は、作用力（不釣り合い）を受けると、それに比例する速度変動（加速度）を生じることによって力学的エネルギーを吸収・蓄積（時間積分）し、それを速度で保存する。

一方柔性は、作用速度（不釣り合い速度＝相対速度）を受けると、それに比例する力変動を発生することによって力学的エネルギーを吸収・蓄積し、それを力で保存する。

これに対して粘性は、作用速度（相対速度）を受けると、同時に、それに比例する粘性抵抗力を生じることによって、力学的エネルギーを吸収する。そして、吸収した力学的エネルギーを蓄積して保存することなく、直ちにそのまま熱エネルギーに変換して放出し散逸させる。

質量・柔性・粘性は共に、物体に力学的エネルギーの不均衡（力または速度の不釣り合い）が生じたとき、力と速度という両状態量の相互変換によってその均衡状態を回復しようとする力学的性質である。これらのうち質量は、作用力を時間積分する結果、力から遅れて速度を生じるから、力が原因で速度が結果の因果関係で機能する。反対に柔性は、作用速度を時間積分する結果、速度から遅れて力を生じるから、速度が原因で力が結果の因果関係で機能する。

これに対して粘性は、作用速度と同時に力を生じるから、少なくとも時間的には双方向の因果関係を想定できる。すなわち粘性をモデル化する際には、本来の「速度が作用して力を生じる」の代りに「力が作用して速度を生じる」と考えることもできるのである。

3. 力エネルギー場と粘性

力エネルギー場に存在する物体には、場から何らかの力が作用し、その力は場の性質によって様々に変化する。本章では、従来は無関係とされていた弾性と粘性が、力エネルギー場の性質の違いによって決まる2種類の力学的性質であり、共に力エネルギー場が発現する性質として、統一的に説明できることを述べる。

原点 $x=0$ に関して対称性を有する次のような力エネルギー場が存在し、その中に物体が置かれているとする。

$$x \geq 0 \text{ では } U(x) = ax^n, \quad x < 0 \text{ では } U(x) = U(-x) \quad (1)$$

ここで a は正の定数である。物体には常に力エネルギーが減少する方向に力が作用する。力とその勾配は式(1)より

$$f(x) = -\frac{dU}{dx} = -nax^{n-1}, \quad \frac{df}{dx} = -n(n-1)ax^{n-2} \quad (2)$$

場の性質は、式(1)の指数 n に支配される。

① $n > 0$: 原点からの引力の場

原点が場の底点で安定位置であり、それ以外の位置に置かれた物体には、原点からの引力が復元力として作用する。

①-1 $n > 1$: 弾性の場

引力の大きさが原点からの距離 x と共に増加する。引力の勾配は正であり、それを剛性、その逆数を柔性として定義できる。

①-1-1 $n > 2$: 硬化非線形弾性の場

①-1-2 $n = 2$: 線形弾性の場（フックの法則が成立）

①-1-3 $2 > n > 1$: 軟化非線形弾性の場

①-2 $1 \geq n > 0$: 粘性の場

原点からの距離 x が増加すると、引力が一定（ $n=1$ ）ま

たは減少 ($1 > n > 0$) する。引力の大きさの勾配は零か負であり、それを剛性という物理量として定義できないから、この場合は弾性という力学的性質を有する場ではない。

点 x に置かれた物体に、原点から遠ざかる方向の一定外力を加え続けるとする。外力の大きさがその位置における引力よりも小さい場合には、物体は原点に向かって動く。外力の大きさが引力に等しい場合には、物体に作用する引力と外力が釣り合い、物体は動かない。

外力の大きさが引力よりも大きい場合には、外力から引力を引いた不釣り合いが物体に作用して、物体は原点から遠ざかる方向に加速度運動をし始める。外力は一定であり、引力は物体が原点から遠ざかるに従って減少し続けるから、加速度は増大し続ける。この現象は、粘性に他ならない。

引力は、原点から離れるに従って減少するが存在し続けるから、この運動中に急に外力を除去すれば、物体は引力により原点に向かって動き始め、やがて原点に復帰する。弾性の場と同様に粘性の場においても、このように復元力は存在するのである。

② $n=0$: 等力エネルギーの場 (例: 無重力場)

場には斥力も引力も存在しないから、そこに置かれた物体は、自由浮遊状態にあり慣性の法則に従う。

③ $n < 0$: 原点からの斥力の場

物体は、場が有する斥力より大きい大きい引力を外作用として与えない限り、初期にどこに位置しようと、原点から離れ去る。

以上のように粘性を、弾性と同様に力エネルギー場が発現する力学的性質として説明できることは、本来粘性は弾性と同様に力学的エネルギー保存の法則に従う性質であり、それ自身は力学的エネルギーの散逸を伴わないことを意味する。すなわち、外力が物体になす仕事のうち、引力に釣り合う部分が場の勾配を上昇するための力エネルギーに変り、残りが物体の運動エネルギーに変ることによって、力学的エネルギーは保存されるのである。粘性によって力学的エネルギーが熱エネルギーに変換され散逸するのは、本論文の第5章で後述する別の原因による。

4. 粘性の発生原因

粘性の発生原因を、原子物理学の立場から解明する。

ヘリウムやアルゴンなどのように電気的に中性である2個の原子間には、レナード・ジョーンズポテンシャル (LJポテンシャル) と呼ばれる、次式のような力エネルギー場が形成される⁽²⁾。

$$U(r) = \epsilon \left\{ \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right\} \quad (3)$$

式(3)の右辺第1項は、異なる電子雲同士は重なることができないというパウリの排他律による、交換斥力エネルギー場である。無数の原子間に存在する交換斥力場の直列結合によって生じる巨視的な力学的性質が、物質間の接触柔性である。また式(3)の右辺第2項は、原子核を囲む電子

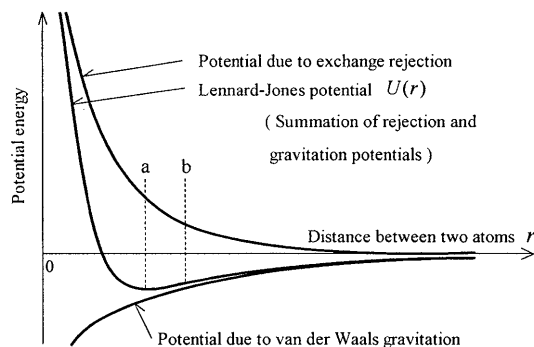


Fig.1 Potential energy between two atoms
a. Bottom point of potential energy
b. Inflection point of potential energy

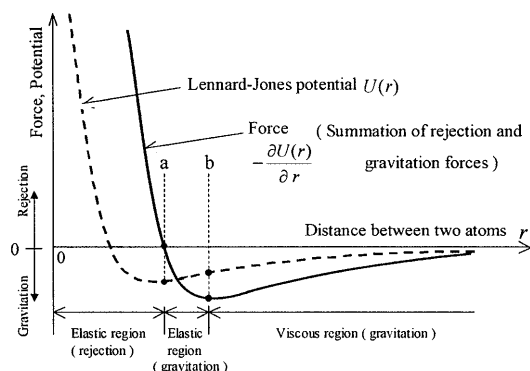


Fig.2 Potential energy and action force between two atoms
a. Bottom of potential energy (Zero force: Stable point)
b. Inflection point of potential energy (Maximum gravitation force)

雲の揺らぎに起因する電荷の瞬間的な偏りが、隣接する原子間で連動するために生じる、ファンデルヴァールス引力 (vW 引力) エネルギー場である。LJ ポテンシャルは、水のような中性の分子間にも存在する。

式(3)を図示した図1から明らかのように、LJポテンシャルのような力エネルギー場には、必ず最小点すなわち底点 a が存在する。LJポテンシャルのもう1つの特徴は、定點より少し離れた距離に必ず1個の変曲点 b が存在することである。従来の物理学ではこの変曲点は全く注目されておらず、これを指摘しその力学的役割を論じた研究は、著者の知る限りではこれまでに存在しない。著者は、この変曲点は、第2章で示した弾性と粘性の境界点として、力学的にも物性的にも重要な意味を有することを、提言する⁽¹⁾。

図2において、点線は図1のLJポテンシャルであり、それを原子間距離 r で微分して負号をつけた原子間作用力は、実線のようにになる。作用力は、底点 a において零であり、それ以近では極めて大きい斥力、それ以遠では引力になる。すなわち、この底点が2個の原子間の安定距離であり、底点にある原子同士には斥力も引力も作用しない。そして、何らかの外作用あるいは原子自身の不規則振動が原因で、原子間距離がこの安定距離から変化した場合には、底点に復帰しようとする復元力が作用する。底点 a の極めて近傍では、距離 r の増加と共に作用力が斥力から引力へと直線的に変化していると見られる。したがって、距離の変化 (変

位)が安定距離に比べて小さい場合には、復元力と変位の間にフックの法則が成立する。

引力は、底点 a から変曲点 b の間では r の増加とともに増加し、変曲点 b で最大になり、それ以後では減少に転じて零に収斂する。このことと第2章で述べた粘性の発現機構に関する説明を併せれば、底点 a 付近は斥力弾性域、底点 a と変曲点 b の間は引力弾性域、変曲点 b 以遠から無限遠までは粘性域になることがわかる。

隣接する2原子間に、両者の距離を増加させる方向の外力が作用し、その大きさが変曲点 b における引力の大きさよりも大きければ、原子間距離は変曲点を越えてさらに増加していく。変曲点を通過した後は引力の大きさは減少に転じるから、原子同士は、最初は微速度で少しずつ加速しながら、ずるずると離れていく。加速度は蓄積し続け、引力が零に収斂し原子同士の相互影響域から脱する際の離反速度を生む。しかし、その途中で外力を急に除くと、引力は定点からの距離の増加と共に減少するものの存在し続けるから、原子は減速しやがて反転して原子間距離が減少する方向に動き始め、変曲点を先ほどとは逆方向に通過して弾性域に入り、底点へと復帰する。これらが、「ねばい」という言葉で表現される巨視的かつ総合的感覚の原因となる一連の現象であり、粘性の正体である。

粘性域は、中性原子間の力エネルギー場のみではなく、図1と同様な力エネルギー場を有するすべての物質間に存在し、それよりもはるかに狭い弾性域と必ず共存する。

粘性域でも引力は存在し、作用力を急に除去すれば底点に復帰するから、粘性域は不安定領域ではない。しかし作用力を引力の減少に合せて徐々に減少させると、原子同士はゆっくり離れ続けるから、安定域でもない。このように粘性域は、力学的に中途半端な領域なのである。

この段階までの粘性の全現象は、力学的エネルギー保存の法則に支配されながら推移するので、粘性という力学的性質が存在しても、力学的エネルギーの散逸が生じることはない。原子間の相互作用による力エネルギー場が発生する粘性は、相手原子が1個だけであれば、第3章でも述べたように、力学的エネルギーの散逸を伴わないのである。

5. 粘性による力学的エネルギーの散逸機構

本章では、相手原子が複数存在する場合を考える。対象原子が、一定の外作用を受けながら、その左右に隣接して存在する2個の静止した原子の間を左から右へと移動するとする。図3は、その際の対象原子と左右静止原子との相互作用による、左右対称の力エネルギー場を示す。

左右の底点 a' と a の間では、対象原子は左右の静止原子からの左右両方向の引力を受ける。左右の変曲点 b' と b の間は粘性域であり、その領域では対象原子が静止原子に近づくほど、引力が増大する。左静止原子から遠ざかることは右静止原子に近づくことであるから、この移動により、左からの引力は減少し、同時に右からの引力は増大する。

左右の静止原子から等距離にある点 c は、左右の静止原

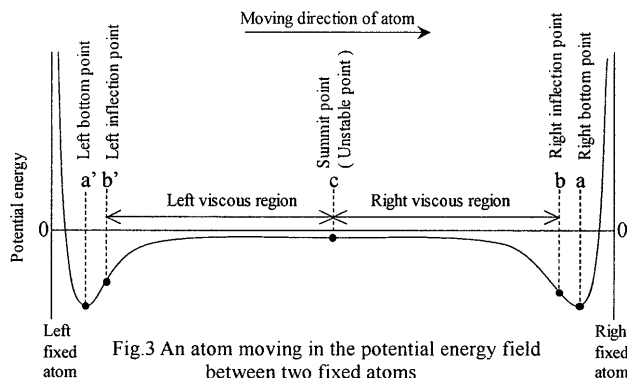


Fig.3 An atom moving in the potential energy field between two fixed atoms

子と対象原子の相互作用によって形成される2つのLJポテンシャルの連結点である。この連結点は、力エネルギー場の頂点でありかつ左右からの引力の大きさが等しくなる、不安定点である。

最初に点 a' にあった対象原子が、右方向に移動し始めるとする。対象原子は、左弾性域 $a' \sim b'$ を経て、点 b' を通過して、左粘性域 $b' \sim c$ に入り、点 c に到達する。これまでに外作用が対象原子になした仕事は、一部が左静止原子からの引力に逆らいながら力エネルギー場を上昇するための力エネルギーになり、残部が対象原子の運動エネルギーになって右方向の速度を生じる。

対象原子は、点 c を通過した後に右粘性域 $c \sim b$ に入り、点 b を通過して、右弾性域 $b \sim a$ を経て、点 a に到達する。点 c を通過した後の対象原子は、引力が反転して速度と同方向になるため、大きい加速度を生じさらに加速しながら、力エネルギー場の頂点 c から底点 a まで一気に下っていく。この間に、それまでに蓄えられていた力エネルギーがすべて解放されて運動エネルギーになる。同時にこの間に外作用がなす仕事もすべて運動エネルギーになるので、結局、対象原子が点 a' から点 a に移動する間に外作用がする全仕事は、運動エネルギーに変化することになる。

点 a に到達するまでに対象原子が得た運動エネルギーの一部は、力学的エネルギーのままで対象原子の右方向の速度になり、対象原子は隣接した図3と同様な力エネルギーの丘を登り、さらに右方向へと移動していく。

一方その残部は、対象原子の微小不規則振動(震え)の運動エネルギーすなわち熱エネルギーに変換される。対象原子の不規則振動は、直ちに多くの隣接原子に伝播し、熱エネルギーは拡散される。その結果、巨視的微小領域の温度がかすかに上昇する。このようにして、粘性域において外作用がなす仕事の一部は、熱エネルギーに変換・拡散され、力学的エネルギーの散逸が生じるのである。

物質では、1個の原子の移動は同時に無数の周辺原子の移動を伴い、原子配列を変化させる。1箇所の原子配列の変化の影響が周辺の広範囲に広がり、すべての原子が新しい安定位置の状態を取り戻して物質が再構成されるためには、時間の経過が必要である。そこで粘性を有する物体では、力学的作用によって生じる応答現象の出現には、作用

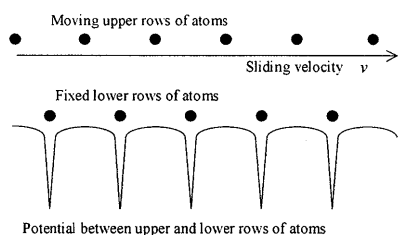


Fig.4 Potential between moving upper and fixed lower rows of atoms

からの時間遅れを伴う。この時間遅れと、無数の安定状態間の移動中に力エネルギーの頂点を越える際における抵抗力の増減の繰返しが、「粘性があるとずるずるとすべる」という感覚を生むのである。

図4は、原子が等間隔に配置されている上下2本の原子列と、それら上下列間の相互作用による力エネルギー場を图示している。図4の力エネルギー場は、図3中の左右底点a'、a間の領域を繰り返すものである。

図4の場の底点は、上列と下列の全原子が互いに鉛直に並び、上下の原子間距離が最も近い位置であり、外作用がない場合の安定位置である。また、図3中の点cに相当する図4の場の頂点は、上列の全原子が下列原子間の中央の鉛直上で、上下原子間の距離が最も遠い不安定位置である。図4には、上下列の原子がこの不安定位置にある瞬間が描かれている。図4の場の底点を中心にしてその両側の変曲点にはさまれた極めて狭い領域は弾性域、その他の広い領域はすべて粘性域であり、粘性域の中央に頂点が存在する。

上下の原子列間にすべりの外力が作用して、下の原子列は静止したままで、上の原子列のみが水平右方向に移動することによって、上下列間にすべりの相対速度が生じるとする。上原子列が底点から頂点まで移動する間は、下原子列からの引力の水平方向成分が移動と逆方向であり抵抗力として働くから、外力のなす仕事はすべて抵抗力に抗して場を登るために費やされ、力エネルギーに変換され蓄積される。上原子列が頂点を左から右に越えると、下原子列からの引力の水平方向成分が反転して移動と同方向に変わり推進力として働くから、上原子列は加速しながら自発的に場を下り、最初の定点から見て1つ右隣の底点である次の安定位置に落ち込む。その際に、それまでに蓄えられていたすべての力エネルギーが解放される。

上原子列の水平方向のすべり速度は、底点間内では変化するが、その変化は周期的であり、次々と底点を通過するときの速度は一定のまますべりを続行するとすれば、解放されたエネルギーはすべて原子の微小不規則振動の運動エネルギーすなわち熱エネルギーに変化する。これを「原子が熱励起される」という。すべりの外力がなす仕事は、すべてこの熱励起に費やされるのである。

1個の原子の熱励起は次々と隣接原子の熱励起を誘発し、熱エネルギーは希釈されながら拡散し、周辺の巨視的微小領域の温度がかすかに上昇する。こうして粘性は、力学的エネルギーを直ちに熱エネルギーに変換し散逸させる。

このように、粘性の機能は力学的エネルギーの散逸を伴

う。そして、すべりが終了して力学的エネルギーが均衡に復帰した後は、原子配列や結晶構造のような内部組織の再編成と温度の上昇という、2種類の痕跡を残す。後者はすべての物質において、観測可能な物理量として残存する。

これに対して前者は、物質が形を形成しない流体やゲル状物体の場合には、表に現れず、形の変化としては残存できない。しかし、金属のように原子が規則的に配列され形を形成している固体の場合には、前者は表に表れ、不可逆変形として残存する。この不可逆変形が塑性変形である。このように、粘性と塑性の発生機構は同一なのである。

6. 粘性が速度に比例する抵抗力を生じる理由

図4において、原子1個分のすべりを単位すべりとし、この単位すべりで熱エネルギーに変換され散逸される力学的エネルギーを、原子1個あたり一定値 E_c 、水平方向の原子列において隣接する原子間距離を l 、上原子列のすべり速度を v とする。

上列の原子1個は、このすべりによって単位時間に v/l 個の下列の原子とすれ違うから、単位時間に失われる力学的エネルギーは、上列原子1個あたり $(E_c/l)v$ である。そしてこの現象が、単位時間に v/l 個の上列原子について同時に起こるから、原子列同士の相対すべりによって散逸される単位時間当たりの力学的エネルギー（パワー）は $(E_c/l^2)v^2$ になり、速度の2乗に比例する。

すべりに対する粘性の抵抗力 f_c に抗してすべりを続けさせるための外作用力 $-f_c$ が単位時間になす仕事 $-f_c v$ は、この散逸されるパワーに等しいから

$$f_c = -\frac{E_c}{l^2} v = -Cv \quad (4)$$

ここで、定数 C は粘性抵抗係数である。

これまでは原子が規則的に配置されている固体内のすべりについて論じたが、原子が不規則に存在する流体の場合にも同様の現象が成り立つ。すなわち、静止流体中に1個の原子を打ち込めば、その原子が単位時間に衝突する静止流体中の原子数は、打ち込まれた原子の速度 v に比例する。

静止流体と速度 v で流れる流体が混合される際、あるいは互いに相対速度 v を有する流体同士が出会って混合する際には、互いに単位時間に相手の流体中に速度 v に比例する個数の原子が相対速度 v で打ち込まれる。そしてこれらの原子同士の衝突に際しては、図4の原子間力エネルギー場を用いて説明した過程と同様の過程により、力学的エネルギーが熱エネルギーに変換され散逸される。つまり、単位時間に速度 v に比例する個数の原子が、1個ごとに速度 v に比例する回数の衝突を生じるのである。

1個の原子が他の1個の原子と1回の衝突で失われる力学的エネルギーは上記と同じ E_c であるから、相対速度 v で流れる2流体の衝突・混合によって、単位時間に熱エネルギーに変換されて散逸される力学エネルギーは、上記と同

様に $E_c v^2$ に比例する。これが流体の粘性抵抗力 f_c に抗して作用源が単位時間になす仕事 $-f_c v$ に等しいから、流体の場合にも、粘性抵抗力 f_c は速度 v に比例するのである。

ただし、この議論は流体の層流に対してのみ有効であり、乱流には適用できない。

7. 固体・液体・気体の物性

固体は、共有結合のような互いに強い電気力で結合された規則正しい原子の配列からなり、体積と形を形成する。液体は、原子・分子間の作用引力が固体よりも弱いため、体積は形成するが形は形成しない。気体は、原子・分子間の作用引力が非常に弱いため、体積も形も形成しない。

このように固体・液体・気体で、原子・分子間に作用する力の性質に大きい差がある理由は、著者の知る限りでは、従来の物理学ではまだよく説明されていない⁽²⁾。しかし、著者が初めて明らかにした上記の粘性の発生機構を用いれば、固体・液体・気体間における作用力の性質の違いが、定性的にはあるが説明できることを、以下に述べる。

すべての物質における原子・分子間には、発生原因や強弱は異なるが、図 1 に示した LJ ポテンシャルと類似の力エネルギー場が存在し、共有結合・イオン結合などのあらゆる原子・分子間結合の原因となっている。そしてすべての原子・分子は、図 1 の底点 a の平衡安定位置を中心に熱励起され、微小不規則振動をしている。

温度が低いときには原子・分子の熱励起は弱く、原子・分子は力エネルギー場の変曲点以近の狭い弾性域内に存在する。そのために、隣接する原子・分子同士は互いに底点 a の距離に整然と配置されて、結晶格子を形成し、物質の体積と形の両方が正確に形成される。これが固体である。

このように規則正しい原子・分子配列で組み立てられている固体を変形させようとすれば、隣り合う原子の原子核と電子の間に作用している電気力による強い抵抗力を受ける。そのため、原子の位置は力エネルギーの底点近傍の弾性域から容易に抜け出ることができず、力エネルギー場の変曲点を越えて固体に塑性変形を生じさせるには、極めて大きい力を必要とする。そしてこの抵抗力が材料の巨視的な変形を抑え、固体の弾性と強度を作り出すのである。

温度が上昇すると、原子・分子の熱励起による不規則振動が増大する。その平均振幅が図 1 の底点 a と変曲点 b 間の距離以上になり粘性域に入ると、物質を支配する力学特性は弾性ではなく粘性になる。この状態の物質は、わずかな作用力をきっかけに自発的に原子・分子間にすべりを生じ、原子・分子間の相対位置が容易かつ自由に変化する。したがって、物質は形を形成できず、自由に流動・変形し、常に最も存在しやすい形に自在に変化する。これが溶解である。そして、原子の不規則振動をこの自発的原子間すべりに必要な平均振幅にまで成長させるために必要な吸収エネルギーが、溶解熱である。

しかし、この段階における熱励起振動の平均振幅は、周

辺の原子・分子間引力を振り切るほど大きくはないので、原子・分子間引力による相互拘束は存在し、物質は、形は形成しないが体積は形成する。これが液体である。

個々の原子・分子の不規則振動は統計的性質に従うから、液体においても平均振幅よりもはるかに大きく熱励起される原子・分子は必ず存在し、それらは原子・分子間引力を振り切って離れ去る。これが液体表面からの蒸発である。

温度がさらに上昇して、ほとんどすべての原子・分子が図 1 の定点から無限遠に至るまでの力エネルギーの差以上の運動エネルギーを持つまで熱励起されると、微小不規則振動の平均振幅が原子・分子間力の支配域を越える。この状態にある原子・分子は、互いの拘束から開放され、勝手な方向に自由に離れ去る。したがって、物質は体積も形も形成しなくなり、それを構成する原子・分子は拡散する。これが気体である。

固体・液体・気体間の物性の違いは、固体が弾性に、液体が粘性に、気体が不規則な自由運動に支配されていることに由来する。弾性と粘性は、共に原子・分子間の力エネルギー場が有する力学的性質であるが、両者の違いは原子・分子間の平均距離の違いであり、平均距離が図 1 の変曲点を越えなければ弾性、越えれば粘性または塑性となる。

8. まとめ

従来は明らかにされていなかった粘性の発生メカニズムを、エネルギー原理を用いて解明した。本論文で得られた主な結果は、以下の通りである。

- 1) 力学的エネルギーから見た粘性の機能を、質量・柔性の機能と関連付けて、明らかにした。
- 2) 弾性と粘性は、両者共に力エネルギー場において発現する現象であり、両者のどちらが発現するかは、力エネルギー場の性質によって決まることを、明らかにした。
- 3) 粘性の発生原因を、原子物理学の立場から明らかにした。そして、LJ ポテンシャルのような原子・分子間の作用力を支配する力エネルギー場において、従来は全く注目されていなかった変曲点の存在を初めて指摘し、それが弾性と粘性の境界点として力学的・物性的に重要な意味を有することを、提示した。
- 4) 粘性が、力学的エネルギーを熱エネルギーに変換・散逸させる機構を、原子間力エネルギー場を用いて説明した。
- 5) 粘性が作用速度に比例する抵抗力を出す理由を述べた。
- 6) 著者が提示した力エネルギー場の変曲点を用いれば、従来は不明であった固体・液体・気体の物性の違いが、定性的に説明できることを、明らかにした。

なお本論文の根幹は、古典力学において新しい概念を提唱した下記の文献 (1) に記載されている。

文 献

- (1) 長松昭男、機械の力学、朝倉書店、(2007)
- (2) Richard P. Feynman, et al., 坪井忠二訳、ファインマン物理学 I 力学、岩波書店、(1967)