

流動場を受けたブラウン粒子の相互作用

名大・理・物理 吉野茂雄

§ 序.

物理学におけるブラウン粒子、化学におけるコロイド粒子、生物における細胞内の微粒子の、各々の相互作用については、互いに矛盾しない共通の結論がある。それは、それらの粒子の粒子間距離が長くなると、例えばいくら長くてもミクロンメートル程度にもなると相互作用は無視できることである。この結論は、これまでの理論と実験の両面からのものであり、各々の研究の歴史の重みからみて一般に疑問を差し挟む余地はないと考えられている。しかしながら、これまでに筆者が生物物理学の研究をしてきた過程で、現実の細胞などの生物材料についての実験、観察や文献調査等をとうして、この結論に疑問を持つに至った。そこで上記の試料を統一的に扱えるように、溶媒中に微粒子が分散している状態をコロイドと呼ばれることに着目し、上記の各粒子の相互作用はコロイド粒子間相互作用として集約されるものであるとの理解のもとに研究を始めた。

コロイド粒子の相互作用の研究の歴史は古く、前世紀から存在し物理学者の寄与も大きく、今日、基本的な点はDLVO理論で説明されるとみなされていて、すでに確立されたものとなっている。このようになった背景として、これまでに種々の実験や理論が出されたが、上記の結論に矛盾することを主張する文献は、極最近までは無かったことがあげられる。

コロイド粒子の相互作用は、粒子表面の荷電による静電相互作用をもとに議論される。粒子の周囲に形成されるポテンシャルは、斥力項と引力項とからなり、斥力項はコロイド表面荷電とイオン雰囲気とで構成される電気二重層によるものであり、引力項はコロイド表面のファンデアワールス力によるものである。その第二極小はいくら遠くに存在する実験条件にしても、せいぜい数十ナノメートルにしかならず、通常の条件下であれば相互作用の距離は10ナノメートル以下である。

したがって粒子濃度の希薄な系であれば、粒子間の平均の距離が長いために、他の粒子が捕捉されることはなく相互作用は剛体と考えてもよいことになり、ブラウン粒子の剛体ポテンシャルが保証される。

ところが筆者の実験によると、コロイド溶液を自然なままに放置した状態で、2個の粒子が数ミクロンメートル、あるいは数十ミクロンメートルにも及ぶ距離を

ほぼ一定に保った状態、即ち「対」を形成し長いときは1時間以上も「対」がみられることなどから、コロイド粒子間の相互作用は長距離におよぶことを示した。その他の実験事実をも含めて考えた結果、コロイド粒子の相互作用の「動的電気多重極子説」を出した。

このモデルは、コロイド粒子自身が何等かの原因（例えばブラウン運動）で溶媒と相対運動をすることによって、コロイド粒子の表面付近に溶媒流を生成し、その溶媒中に存在する対イオンの分布を歪ませ、その結果これが電氣的歪となって、電気多重極子を発生させることを言っており、この多重極子間の相互作用によって長距離にポテンシャルの第二極小が出来ると考えている。その多重極子を式で表すと次のようになる。

$$M_{lm}(\tau, t) = \int \alpha_{lm}(\tau, t) \rho(r) r^l Y_{lm} dr$$

このモデルから、速度勾配があると動的電気多重極子が生成され易くなることが解る。そこで、このことを実験的に検証するために速度勾配をかけることによる相互作用への影響を調べることにした。

§ 材料と方法

コロイド粒子として、直径 0.2 μm のポリスチレンラテックスを使用し、溶媒は純水を用い、塩化ナトリウムの添加塩がある場合と、ない場合について実験した。測定温度は、常温である。

コロイド溶液に流動場をかけている状態では測定は行わず、流動場をかけた後の状態について観測した。流動場をかける方法は、コロイド溶液をパスツールピペットの細い部分（内径 1 mm のバイレックス製）に流速 100 cm/sec 程度で流すことで行った。このときの速度勾配は 2500 sec⁻¹ 程度である。

試料セルの厚さは 1 mm であり、ステンレス製の 1 mm 厚の枠と、上下のカバーガラスとで構成されている。

コロイド粒子の運動と分布は、光学顕微鏡で観察し、映像はビデオカメラで捕らえ、ビデオテープに記録した。

§ 結果と検討

溶媒として、純水を使用したときは流動場を加えなくても、対の形成が見られる。対を形成する2個のコロイド粒子の距離は、数 μm の時と数十 μm のときとがあり、対の寿命は、短い場合は1秒以下であり、長い場合には1時間以上にも及

ぶ。寿命の長さは、粒子濃度と関係し、対を形成する粒子とは異なる粒子が近傍に来るとパートナーを換えるようになり個々の対の寿命は短くなる。ここでの自然な状態での対の形成の原因は、動的電気多重極子説から各粒子のブラウン運動（並進、回転）によるものと考えられる。

塩を加えて行くと、対を形成する確率は下がり対を形成しにくくなる。塩濃度を高くして、0.15 モルの生理的塩環境に合わせると、自然なままでの対の形成の確率は非常に低くなる。しかし一旦流動場を加えると、対を形成する確率が増大する。観測は流動場を加えた後でのものなので、流動場の影響のみならず、流動場を取り去った後も、対形成が保存されていることを示している。対を形成する2粒子の距離は流動の大きさと関係し、流速が早くなると、2粒子間距離は短くなって1 μm 程度になることもあり、流速がゆっくりだと粒子間距離は数十 μm になる。また、流動場の加え方が定状ではなく加えると、対の形成の確率ははなはだ減少する。塩濃度が高くても定状流による流動場を加えたときには、一旦、対を形成すると流動場が取り去られた後も対は保存され、寿命は上記と同じように1時間以上になる。対の近傍に他の粒子がきてパートナーを換えても、新しいパートナーと対を形成する。

溶媒中の微粒子の相互作用として、一般には上記の静電的相互作用とは別に流体力学的相互作用も考慮されている。ブラウン運動の記憶効果もその一つと言えるが、その影響はブラウン粒子の本来の運動に比べて微々たるものなので、よほど実験精度を高くしないと測定は不可能であって、光学顕微鏡で観測するような実験精度では、とても測定にかかるものではない。もし上記の現象において流体力学的効果が支配的であるとすると、流動場を取り去ると対が崩壊することになり、この実験事実を説明することが出来ない。

以上の実験結果において、対の形成は定性的ではあるが「動的多重極子説」を支持しており、議論の方向性は適当であると判断できる。添加塩がないときも、対は長時間存在しており、これは個々のコロイド粒子に生成消滅する多重極子の寿命よりもけた違いに長いので、多重極子間の共鳴によるものと考えられる。またコロイド粒子が適当な条件下におかれると、コロイド同士が接触せずに、場合によっては数ミクロンメートルも距離を空けて秩序相を形成することも、これらの素過程の積み重ねによって成り立っているものと考えられる。

ここで取り上げた実験は、冒頭に挙げた三つの分野の基本的問題であり、これまでの常識を逸脱する結果であるので実験的にも、また理論的にも更に発展させる必要がある。