

粒体メカノケミカルピストンの諸特性

松 島 正 太・森 政 弘

Mechano-Chemical 現象とは、化学的エネルギーを直接機械的エネルギーに変換し、化学試剤の作用で物を動かすことができる現象のことである。これはガソリン機関が化学エネルギーを一度熱エネルギーに変換した後、ピストンを動かしたり、蓄電池が電気エネルギーを媒介としてモータを動かしたりするのは本質的に異なっている。本文では **Mechano-Chemical** な性質のある高分子粒子をつめたピストンの特性の実測結果の主なものを発表している。

1. はじめに

周囲の媒体の化学的性質の変化に応じて伸縮をし、その化学的エネルギーを直接機械的エネルギーに変換することができる高分子物質を **Mechano-Chemical** 物質という¹⁾。

このもっとも高度化したものとしては、動物の筋肉（その中でもとくに横紋筋）があげられる。筋肉はいまのところ人工的合成はまったく不可能だが、**Mechano-Chemical** 物質には合成可能な低級なものもあり、ポリアクリル酸とポリビニールアルコールを架橋させたものを初め、ポリアクリル酸とグリセリン、ポリメタアクリル酸とディビニルベンゼン、ポリメタアクリル酸とポリビニールアルコールを、それぞれ適当な度合で架橋させたものなど、かなりの種類の高分子電解質が、**Mechano-Chemical** な性質を顕著に示すことがわかっている¹⁾。そして、これらはいずれも周囲の液の pH の変化に応じて、ふくらんだり、縮んだりするのである*。

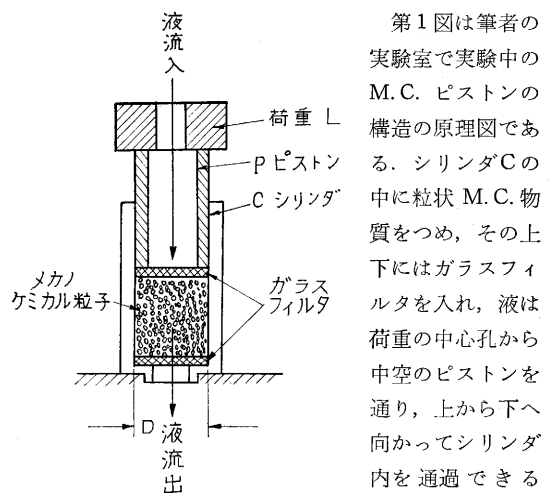
この **Mechano-Chemical** な性質は、これまでは主として筋肉モデルとして筋肉生理研究者の興味の対象になっていたり、また近くは生物物理学者や高分子分性論研究者の純理的な研究対象となっていたに過ぎず、これを技術畑で物を動かすエンジンとして、あるいは自動機械の手や指に相当する操作部その他として使うということは考えられてもいなかった。筆者はこの **Mechano-Chemical** 物質**（以下 M.C. 物質と略記する）を技術の領域で、なんとか応用できないものかと思い、これを工学的に研究することをはじめ、pH 自動制御用の自力制御弁²⁾ や pH 検出スイッチ³⁾ などの具体的な機器の開発をするとともに、M.C. フィラメントや、M.C. 粒子の力学的性質の測定も行なっている。

“M.C. 物質がなぜ伸縮できるのか？”という原理については、ようやく物性物理学者の間で定説¹⁾ が生まれたような状態であって、なおくわしいことはまだ十分には明らかになっていないように見うけられる。しかし M.C. 系を構成する高分子電解質の電離基の周囲に凝縮した対イオンのミクロな運動状態が、M.C. 系の伸縮の原因であることはたしかのようである。たとえば、上記の

ポリメタアクリル酸とポリビニールアルコールの架橋高分子からなる M.C. 物質を水につけ、それに NaOH を入れてゆくと、ポリメタアクリル酸中の (COO⁻, H⁺) が (COO⁻, Na⁺) に変化する。この H⁺ と置きかわった Na⁺ は完全には COO⁻ にとらえられてしまっていない、ある程度自由にその近傍を不規則に動きまわり、自己の運動範囲をひろげようとする結果、糸まり状に丸まっている M.C. 物質の分子をのばすことになる。このため M.C. 物質はマクロな意味においても、ふくらむというのが定説である。この伸張力と平衡する力は、M.C. 物質に外から加わる荷重と、M.C. 物質自身のゴム状弾性力が考えられる。この理論によれば M.C. 物質をふくらませようとする力は、ちょうど浸透圧と同類の、したがって気体の圧力とも同類の力であるということが出来る。

M.C. 物質によって物体を動かそうとする時には、場合場合に依りて各種の形が考えられるが、ここではこのもっとも単純で基本的な、粒体 M.C. 物質を内蔵する第 1 図のようなピストンについて、その二三の実験データを発表することにする。

2. M.C. ピストン



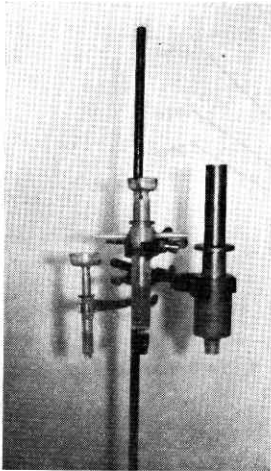
第 1 図 粒体メカノケミカルピストン

第 1 図は筆者の実験室で実験中の M.C. ピストンの構造の原理図である。シリンダ C の中に粒状 M.C. 物質をつめ、その上下にはガラスフィルタを入れ、液は荷重の中心孔から中空のピストンを通り、上から下へ向かってシリンダ内を通過できるが、M.C. 粒子はこぼれ出さぬよう

* 最近では、pH 変化つまり中和のエネルギーを機械エネルギーに変換するこれらの物質のほか、酸化還元エネルギーを機械エネルギーに変換する物質も合成できている。

** イオン交換体の膨潤は M.C. 現象の一つだが、イオン交換の場合には、この現象は逆に邪魔なものとなっている。

シリンダ内を種々の pH の液体を通過させると、その pH に対応して M.C. 粒子はふくらんだり、縮んだりしてピストンを介して荷重を上げ下げし、(中和の) エネルギーによって直接 (熱エネルギーや電気エネルギーを媒介とすることなく) 機械的の仕事をするのである。



第 2 図 実験した種々のピストン

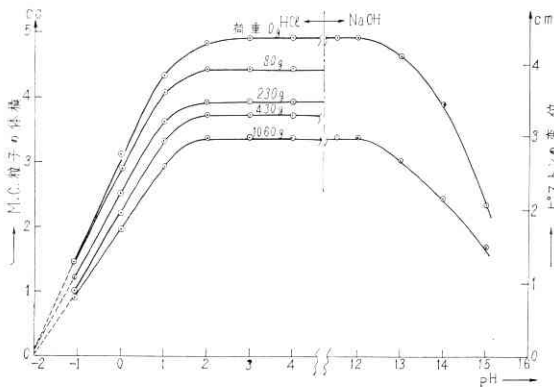
左よりそれぞれ直径 1.2 cm, 2.1 cm, 3 cm のもの

の HCl, NaOH, 純水を使った。

実験では、第 2 図のように注射器を改造した、それぞれ直径 1.2 cm, 2.1 cm のピストンと、バンライトで作った直径 3.0 cm のものの 3 本を使用した。また粒状 M.C. 物質は第一段階として、市販のイオン交換樹脂中より選び出した。SO₃H 基を有するポリスチレン・ディビニルベンゼン・スルホン酸 DOWEX 50WX 1, 50~100 メッシュを使用し、シリンダ内を通過させる液体としては、各種 pH

3. pH 伸縮特性

第 3 図は直径 1.2 cm のピストンについて液の pH とシリンダ内 M.C. 粒子の総体積およびピストン伸縮の関係である。パラメータとしては荷重の重量をとった。荷重の大きい曲線ほど下に下がっているのは、はじめ約 5 cc (正確には 4.88 cc) の M.C. 粒子をシリンダにつめて荷重 0 のデータを取り、つぎにそれに各重量の荷重をかけてデータをとったためである。つまり、M.C. 粒



第 3 図 液の pH とシリンダ内 M.C. 粒子の総体積およびピストンの伸縮の関係：ピストン直径 1.2 cm の場合

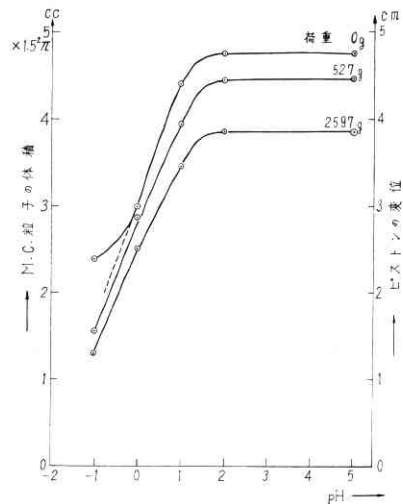
子が荷重で圧縮される様子が現われている。この M.C. 粒子の弾性については第 11 図を参照されたい。このグラフからわかるとおり、この M.C. 粒子は pH=3~12

に対し、つまり中性およびその付近でもっともふくらみ、それ以上あるいは以下の pH で収縮する。とくに pH=1 以下ではほとんど直線の伸縮となっている。ただし、アルカリ側では、一度 NaOH 液を通して収縮させた後、純水を通してふくらませる場合のもどり方が極めておそく、元どおりにもどり切らないとさえ考えられるほどである。したがってアルカリ側の伸縮は実用には使えそうもない。また酸の側でも pH が -1 以下に対応したところまで縮ませると、各 M.C. 粒子間のすき間がつまってしまう、つぎにふくらまそうとして、pH の値の大きな液 (たとえば純水) を通す場合、非常に通過しにくく、M.C. 粒子がふくらみかけるまでの時間が長くなり、したがってピストンの伸びる速さが極めておそく、実用にならなくなる。実用になる範囲は pH=-0.5~7 の間(このうち pH=2~7 の間はほとんど伸縮なし)と見てよい。

0 g から 1060 g までの各荷重に対する各曲線を左へ延長してゆくと、だいたい体積 0 の付近で (こういうことは実際には起こり得ないがグラフの上だけの話で) 一点に集っているのは興味深い。

伸縮の再現性は酸の側 (すなわち第 3 図の左半分) では良好である。伸縮の回数、伸縮の大きさ、伸縮をはじめめる起点などに無関係に第 3 図の (左半分) の曲線上をたどる。

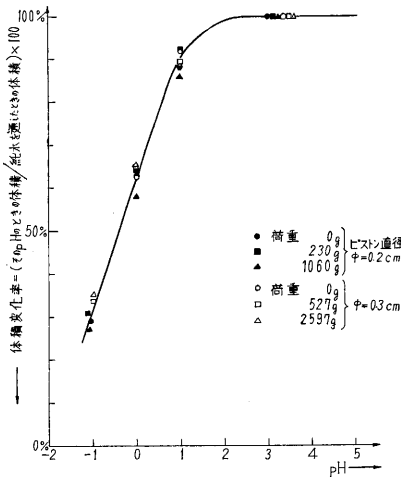
なお、本文中のすべてのデータについて、液の pH の値は液のモル濃度より換算した値をとった。これは M.C. ピストンが実用になる範囲の pH 値は、いわゆるガラス電極 pH 計では正確な測定が困難なためである。また荷重がはんばな値のものとなっているが、これは分銅のほかにピストンの自重をも加えた総加重を示したためである。



第 4 図 液の pH-シリンダ内 M.C. 粒子の総体積ピストン直径=3.0 cm の場合

第4図はピストンの直径=3.0 cm の場合のデータである。ただしアルカリ側は上述のとおり実用にならないので、酸の側だけを示した。荷重 0 g の曲線が、その左端で直線的に降下せずに、上がり気味になっているのは、M.C. 粒子一個一個は直線的に収縮してはいるのだが、粒子相互間のわずかな摩擦のため粒子全体が十分縮むことができず、空隙ができてしまうためである。ほんのわずか（数g）の荷重さえかかれば、破線のように直線的に縮むことができる。もちろんこの荷重 0 g のときはピストンは抜きとって、ピストンの自重さえもかからぬ状態にしてある。

“この M.C. ピストンの伸縮はどの程度なのか？”との質問にさらに一般的に答えるため、第3図、第4図およびここに表示せぬほかのデータを整理して体積変化率として表わすと第5図となり、体積変化率は、ピストン



第5図 液の pH-体積変化率

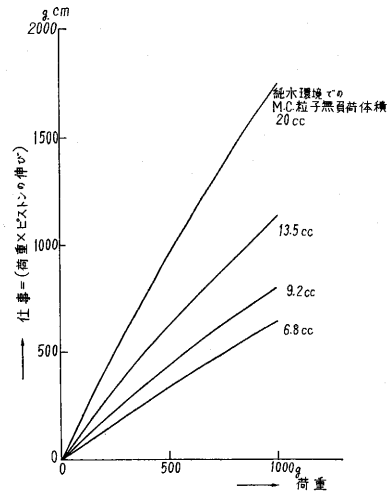
径、シリンダ容積にほとんど無関係に pH で定まる、という結果となる。図中の丸、三角、四角の各点は第3図、第4図のデータを参考までに記入したものである。

4. 仕事特性

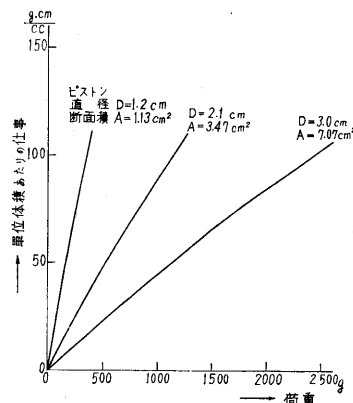
第6図は直径 2.1 cm のピストンについて求めた、1回のピストンの伸び（pH を 0 から 5 まで変化させた場合）によって得られる仕事と荷重の関係である。

図からわかるように、仕事は荷重にほぼ比例している。これは第3図や第4図にあらわれているように、M.C. ピストンの伸びは、この実験で問題にしている程度の荷重によってはあまり影響を受けないためである。とはいっても、荷重が大になるほどピストンの伸びの絶対値は次第に小さくなって、仕事も荷重に比例するほどには増加しない、第6図の各曲線が右へゆくほど、や

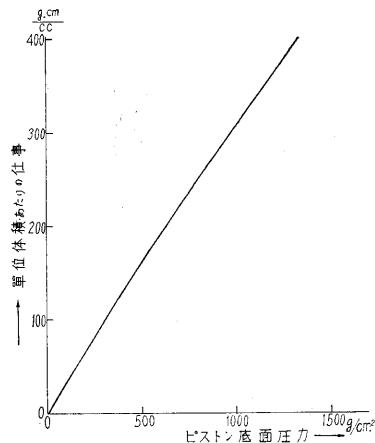
+ これは当然のことであるが、同一荷重に対しては、一回の伸びでなしうる仕事は、シリンダ内 M.C. 粒子の体積（したがって質量）に比例していることが第6図よりわかる。



第6図 荷重-仕事の特性
ピストン直径=2.1 cm, pH 変化=0→5に対するもの



第7図 荷重-純水無荷重環境での M.C. 粒子 1 cc のなす仕事
pH 変化=0→5に対するもの



第8図 ピストン底面圧力-M.C. 粒子単位体積（純水無荷重環境での）のなす仕事
pH 変化=0→5に対するもの

や寝る傾向にあるのがこれをものがたっている。実験装置の不備とくにシリンダ内ガラスフィルタ（第1図参照）の強度の大きいものが得られないため、まだデータはとれていないが、ずっと荷重を増すにしたがって、この曲線はさらに寝て、いずれは飽和してしまうと予想される。その飽和点付近の仕事は相当に大きなものにちがいないだろう。

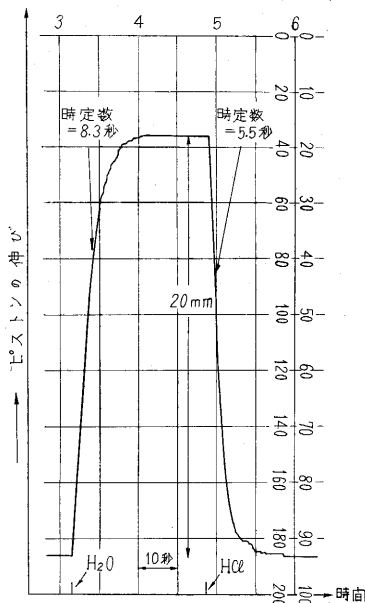
第6図は直径 2.1 cm のピストンについてだけの特性だが、各種の直径のピストンについて、荷重と、単位体積の M.C. 粒子が一回の伸

びによって行なう仕事との関係を実測した結果が第7図である。ただし M.C. 粒子の単位体積としては、無荷重で純水を通した場合の値をとっている。この図の示すとおり、一定荷重では M.C. 粒子単位体積あたりの仕事は、ピストンの断面積に反比例している。したがってこの荷重をピストン断面積で割って、単位面積あたりの荷重すなわちピストン底面の圧力に換算しなおすと、第8図のような、ピストンの直径、シリンダ内 M.C. 粒子の体積に無関係な、ピストン底面圧力—単位体積 M.C. 粒子のなしうる仕事の関係が得られた。この特性は、図示の程度の圧力範囲では、ややまがり気味のほとんど直線とみなしてよいものとなっているが、はるかに高い圧力において飽和すると考えられる。

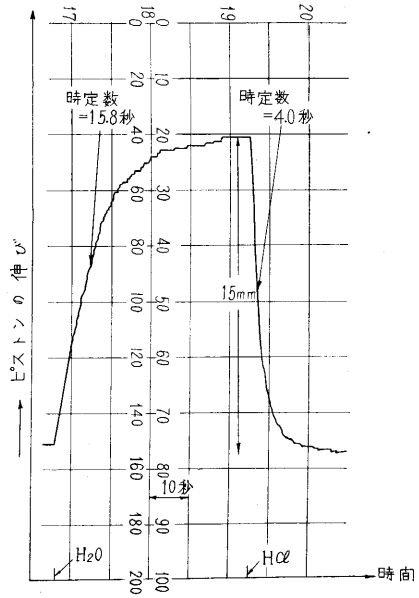
以上、この実験の範囲では、かけた荷重が軽すぎたために、このような単位体積 M.C. 粒子は荷重をかければかけるほど仕事をする、という結果がでたと考えられる。ずっと荷重を大にした実験を今後行なう予定である。

5. 伸びのはやさ

第9図、第10図は M.C. ピストンの伸縮の応答の例で、それぞれ荷重 305 g、3010 g の場合のものである。これはだいたい1次おくれ特性と見ることができる。実験の結果では、荷重が大となるほど、伸びる場合の時定数は増し、縮む場合の時定数は短くなる。荷重が大となるにつれ、それを持ち上げる仕事が増すこと以外に、大荷重の場合には球状の M.C. 粒子が圧縮されて立方体に近づくため、液が通過するすき間が減って液が通りにくくなることも、伸長の時定数が大きくなる原因となっ



第9図 M.C. ピストン伸縮の応答
ピストン直径=2.1cm, pH=0~5, 荷重=305g
無荷重純水環境でのシリンダ内 M.C. 粒子体積=18cc の場合

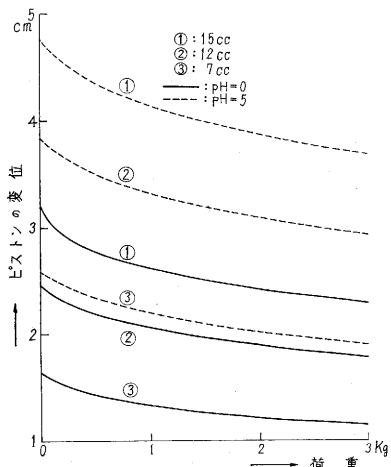


第10図 M.C. ピストン伸縮の応答
ピストン直径=2.1cm, pH=0~5, 荷重=3010g
無荷重純水環境でのシリンダ内 M.C. 粒子体積=18cc の場合

ている。

この程度の伸びのはやさでは、現用の空気ピストンに代わって実用になるというわけにはゆきそうもないが、小型自動車用ジャッキの程度にならば十分であろう。

荷重 3010 g (第10図) の場合の伸長の直線部分は、だいたい 1 mm/sec の速さとなっている。したがってこの M.C. ピストンの出しうる動力は、この場合 $3.01 \text{ g} \cdot \text{m}/\text{sec} \approx 0.03 \text{ W}$ となる。この場合は無荷重純水環境での M.C. 粒子体積は 18 cc だから 1 cc あたりの出した動力は約 1.7 mW となる。



第11図 M.C. ピストンの荷重と変位の一例
①, ②, ③, の体積はピストン内 M.C. 粒子の無荷重純水環境での体積を示す。

6. M. C. 粒子の弾性と M. C. ピストン

M. C. 粒子の弾性を論ずるには、レオロジの助けを借りなければならぬことと思う。しかし M. C. ピストンとして正常の動作をする範囲内では、M. C. 粒子はだいたいのフックの法則に従うと見なしてよいと思われる。

しかしこれは M. C. 粒子一個を裸にした場合の話であって、これを多数剛体のシリンダ内に押し込んだ M. C. ピストンとなると多少おもむきがちがってくる。そこには粒子相互間や粒子とシリンダ内壁との影響など粉体工学の助けを求めなければならぬやっかいな問題が起きてきて、理論的に定量的に論ずるのは困難のように思われる。そこで、とにかく実験的に求めた M. C. ピストンに対する荷重と縮みの関係の一例を第 11 図に示しておく。図示のとおり荷重と縮みとの関係は非線形となっている。

7. おわりに

M. C. 粒子を応用して、とにかく物体を動かすことだけでは筆者の実験室ではできている。しかしこれは蒸気機関にたとえれば、蒸気の圧力でやかんのふたが持ち上がったと同程度のごく初期の段階である。この程度の伸縮のはやさや、この程度の馬力のものが何に利用できるのかは、いまのところまったく未知である。しかし M. C. エネルギーの利用は何もピストンに限ったこととはな

いはずである。自然の与えてくれる一つの示唆は、筋肉のような高次の構造によってこそ、はじめて動物のようなすばらしい動きが可能になるのかも知れぬ、ということではなからうか。

M. C. 系研究の第一歩として、ピストン 特性を実測した結果を述べた次第である。頁数の都合でデータの一部しかあげ得なかったことと、測定装置の不備でデータが完備していないことが残念である。なお M. C. 粒子の粒度や材質を変えた場合のデータはまた別の機会に発表することにした。

おわりに、この研究に対する本研究所第 4 部の菊池教授・山辺助教授および山辺研究室、第 2 部の平尾教授はじめ諸先生諸先輩のご援助とご理解に感謝すると同時に、今後のいっそうのご指導をおねがい申し上げる次第である。
(1963 年 2 月 18 日受理)

文 献

- 1) 森 政弘：“軟体機械（人工筋肉へのこころみ）”，日本機械学会誌，Vol. 65，No. 517，1962 2 月，pp. 275～283.
- 2) 特許出願，昭和 36 年 第 47811 号
- 3) 特許出願，昭和 36 年 第 47809 号，第 47810 号
- 4) A. Wasserman：“Size and Shape Changes of Contractile Polymers”，Pergamon Press，1960.

東京大学生産技術研究所報告刊行

第 12 卷 第 6 号 花 井 正 実 著

STUDIES ON DECISION OF DESIGN WIND LOAD

「設計用風荷重の決定に関する研究」(英文)

土木・建築を問わず、一般工学において、設計荷重選定の問題は割合あいまいに取り扱われてきた傾きがある。建築構造物の耐風設計において、従来から用いられている方法は、設計荷重として、過去数 10 年の記録の最大値をえらび、それによる構造物の応力が構造部材の実際の強度より十分に低い許容応力度以内におさまるようにする方法である。しかしながら、この方法は種々の難点を持ち、設計の方法としてもあまり明確であるとはいえない。

高い設計荷重で構造物を設計すれば、構造物の危険の確率は小さくなり、したがって災害による損失の期待値も小さくなる。しかしながらそれは反面、建設費の増加をもたらすので、両者の和を最小ならしめる設計荷重が最も合理的な設計荷重と考えることができる。

本研究はこのような考えに基づき、設計荷重決定の理論を展開するとともに、風に関する統計資料によって、その実際の適用を試みている。
(1963 年 3 月発行)