

# 自然現象を連続化しない シミュレーション・プログラミング

米澤 彰二

芝浦工業大学大学院工学研究科材料工学専攻

土屋 敏明

株式会社 計算流体力学研究所

武田 邦彦

芝浦工業大学工学部材料工学科

## 概要

近年計算機の急速な進歩により、材料の様々な研究分野に計算機が用いられるようになった。そこで、今回は従来の数式を用いる手法ではなく、分子の転位と切斷反応という化学的反應を単純に直接モデル化することで数式を使用しない分解のプログラミングを試み、従来のシミュレーションと比較を行い、この方法を新たにモリックマウス法として提案し、この方法によって高分子分解の分解過程、特に全過程についての情報がどの程度得られるかについてコンピュータ・シミュレーションを検討した結果を報告する。

## 1. はじめに

工学的な実験で得られる種々の自然界の情報を如何に処理をして工学として有効なデータや概念を得るかということは情報処理の極めて重要な課題である。特に、少量のデータから多くの計算結果を得ることが情報処理の価値を高めることになるが、この目的として研究されている多くは、量子力学などの基礎学問を応用する方向に進んでおり、我々が実験によって容易に得られる情報の処理という観点では不十分であると考えられる。

もともと自然界の現象に対して数学の助けを借りて数式で表現するという考え方はそれほど古い

ものではない。近代の幕開けとともに自然を正確に観察しその中から神の摂理を見いだすという新しい考えが生まれ、その手段として数学が用いられるようになった。この様な近代科学の思想と実践はベーコン[1]、デカルト[2]、そしてガリレオなどが開拓したものであるが、それを体系的に整理し必要な数学的道具、特に微分方程式、二項式などを発見して近代科学に大きな足跡を残したのは他ならぬニュートンである[3]。

ニュートンらが当時自然現象の解明手段として発見した微分方程式は近代自然科学の手法の内でも特に大きな前進であり、発見以降は多くの自然現象が微分方程式で表現され、その本質を明らかにされていった。その成果は際だって優れていたし、また応用数学面での発展にも助けられて、多少誇張した表現が許されるなら、ほとんどの自然現象は微分方程式で整理されるに至った。

---

A Programming Method of Computer Simulation without Using any Differential Equations, Shoji Yonezawa, Kunihiko Takeda, Shibaura Institute of Technology, Toshiaki Tsuchiya, Institute of Computational Fluid Dynamics

しかし微分方程式にも若干の欠点があり、そのうちの 하나가一部の線形方程式以外の微分方程式はその解を求めるのが困難で、近似解も満足な結果を与えないことが多かった。そのために多くの応用数学者達が非線形微分方程式の解法を研究し、そのいくらかは自然界の現象を解明するのに訳だった。しかし非線形微分方程式の解はいずれも極めて複雑で、しかもその解が本当に正確であるかについて多くの科学者が検証できない程であった。

このような状態は第二次世界大戦後のコンピュータの著しい発展によって新しい局面を生んだ。それまで適切な解法が発見されていなかったように微分方程式でも差分法などの手法で値を見いだすことができるようになってきた。本研究はこの様な自然現象を数学的手段、特に方程式を用いて解明してきた手法について若干の疑問を呈するとともに、それらとは異なるコンピュータ・シミュレーション手法について研究した結果を報告する。

## 2. モリックマウス法の概要

### 2.1. 自然現象を方程式で表現することに関する批判的見解

自然現象を方程式などの数学的手法を応用して表現する方法として、量子力学などの基礎的な原理を直接的に応用する方法で一般に第一原理などと呼ばれている方法、分子動力学など多少実験的な知見を利用して計算する方法、そして微小部分の動きに注目して微分方程式を立てる方法がある。そのほかにも現象にあわせて独特の数式を立てる場合もあり、高分子の分解について本研究でも一例を挙げる。

このうち、自然界を数学的手段で解明する方法としてもっとも有力な方法である微分方程式は、対象物を小さな区分に分けることによって均質で単純な現象に還元することができるという考え方

に基づいている。観測する系全体が複雑な場合でも、その系を細かく分けて数学的に均一と見なせるまでに微小化すれば、そこでの支配方程式は単純になる。微小部分で表現した自然現象は微積分的手法を用いて、我々が直接観察する巨視的自然に統合される。

巨視的自然現象を支配する方程式を導入する過程では、可能な限り連続的な動きを求める。例えば球体が宇宙空間に浮いている場合なども球体を一旦質点としてあつかい、系全体の連続性を補償する。その結果、微分方程式で表現された自然は連続性を持ち、滑かであり、不連続部分は系の外に置かれる。

自然現象を正しく表現した支配方程式を作ることができれば、数学的な厳密解を得るか、もしくは近似解を求める。さらにコンピュータ・シミュレーションの手法を使用することができれば差分法などで値を求めることができる。

本研究ではこの可能な限り連続的な動き過程での不自然さを示したい。仮に自然の不連続をそのまま不連続として扱うことができれば、そのほうが適切であろう。宇宙空間は星が分散しているが、星と空間の間は明らかに不連続である。地球は陸と海、空でできているが、それらは互いに不連続である。また微視的正解でも均質な材料などはほとんどない。日常的に我々の身の回りを見ても、連続的な物質や部品、家具などはほとんど見あたらない。

物理的原理、数学的手法を応用する第一原理計算、分子動力学計算はそれぞれ優れた点があり、多くの分野で有効に使われている。従って本研究の情報処理領域とは異なる領域として特に批判を加える対象ではない。その他の対象とする現象に応じて考案される多くの数式の中には、微分方程式で論じたと同様に、計算機が進歩していないこ

とを前提として研究されたものがあり、それが一般的に良く認識されていない。コンピュータ・シミュレーションの発達によって、これらの数式を使用した研究が計算によってより簡単に、より有用な結果が得られることを何らかの方法で研究者に広めていくことが必要である。

自然界のこの様な状態を忠実に表現するとすると、不連続を含む対象を直接何らかの方法でコンピュータ・シミュレーションする方法が考えられる。そこで我々は少ない自然からの情報、すなわち実験や観測によって得られた情報を如何に有効に活かすかに付いての新しい方法について研究したので、それを提案し、計算機による情報処理の効果を示そうとするものである。

## 2.2. 方程式を用いないコンピュータ・シミュレーションの試みとしての一つのモデル

微分方程式をたてるときの微小部分の定義は数学的に均質と見なせる微小空間と定義される。また、微分方程式の微小区間が常に均質であるように、微小空間内の自然現象は直接的な表現で記載することができない。それは自然が本質的に均質ではないのにも関わらず、微小空間を均質とするところになる。

そこで、本研究で提案する方法は、微小空間を均質にするというディメンジョン由来の概念を捨てて、ディメンジョンを念頭に置かないモデルを設定し、そのモデル形状の組み合わせである特定の自然を表現する手法に関するものである。本研究で用いた基本的モデルをFigure 1に示す。

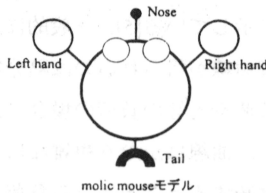


Figure 1 "Molic mouse model" to construct Phenomena

このモデルはある機能を有している「単位個体」であり、このモデルをモリックマウスと命名させてもらいまたこのモデルを利用した方法をモリックマウス法とする。またモリックマウスの機能は隣接マウスと結合するためのノーズとテイルを有し、結合したり、反応したりする機能を有するレフトハンドとライトハンドを有する。

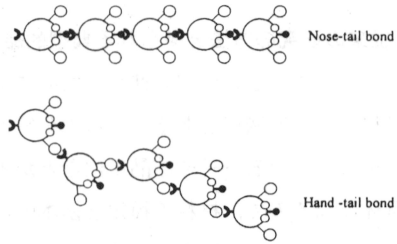


Figure 2 Combination model composed of the first Molic mouse model

Figure 2はモリックマウスによるノーズテイル・チェーンモデルとハンドテイル・チェーンモデルを示した。この様なモデルはモリックマウスモデルの一つの例であり、対象現象によりもっとも相応しい結合モデルが選択される。またモリックマウス法が普遍的な方法として応用できるかどうかは、この様な単位個体の普遍性によると考えられる。従って、モリックマウスモデルはFigure 1に限定されず、次のようなモデルも考えられる。

例えば、こんなモデルや

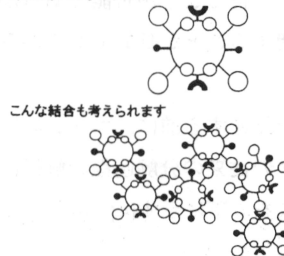


Figure 3 Second Molic mouse model and their combination

この場合は2つのノーズと2つのテイルが互いに90度で外に突き出しており、ハンドも4つ備わっている。対象とする資源現象の単位個体の種

類によってこの様に様々な形を取りうる。しかし、実際にはできるだけ少ないモデルでコンピュータ・シミュレーションを行うことが望ましいが、一方では対象となる自然を簡単なモデルで表現する過程で、対象物に対する理解が深まるという利点もある。

### 3. 応用する材料分解の概要

#### 3.1. 従来の研究の方法と得られる典型的結果

モリックマウス法の研究を進めるために選択した系は材料の分解過程である。材料の分解過程は材料を構成している分子や結晶単位などが劣化の単位個体になるので、材料の種類と基本的には無関係とも言えるが、本研究ではその中でもポリフェニレンエーテルというエンジニアリング・プラスチックを選択した。コンピュータ・シミュレーションの研究に当たっては対象となるポリフェニレンエーテルがどのような構造を持ち、性能を有するかについては知る必要は必ずしもない。モリックマウスで表現される対象であれば良いのであるし、またその分解過程をモリックマウスモデルで解析することが優位であれば良いということになる。特に本研究は対象現象そのものよりも、自然界の情報を如何に効率的に処理をして、そこから多くのデータを得ることが可能であるかに付いての手法を研究することが目的であるからである。

本研究の方法を記述する前に、エンジニアリング・プラスチックの従来の分解過程の解析に用いられる代表的な式を以下に示す[4]。

$$\int \frac{dx}{g(x)} = A \int \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dt \quad (1)$$

ここで、A は頻度因子、E は見かけの活性化エネルギー、T は絶対温度、R は気体定数を示している。g(x)は反応量 x の関数で、その物理的意味は

熱力学的反応の様式である。この様な分解過程を解析する式は研究者によって数種類出されているが、いずれも式(1)と類似のものである。式(1)に使用する関数 g(x)などは高分子材料の分解メカニズムによって種々の関数が導入されており、その詳細をTable 1に示す。

Table 1 Several functions used for calculation of polymer degradation

反応様式	f(x)	g(x)	G(x)	dC/dAB	dC/dAB
n次反応 (n≠1)	x	(1-C) <sup>n</sup>	$\frac{1-(1-C)^{n+1}}{n+1}$	(1-C) <sup>n</sup>	$\frac{1-(1-C)^{n+1}}{n+1}$
1次反応	x	(1-C)	-(1-C)	(1-C)	exp(-Aθ)
高分子主鎖の 無秩序崩壊	$\frac{1-C}{1-C_0}$	(1-x)	-(1-x)	$\frac{1-C_0}{1-C}$	$\frac{1-C_0}{1-C}$
自触媒反応	x	C(1-C)	$\ln\left(\frac{C_0-C}{C_0-C_0}\right)$	C(1-C)	—
拡散律速 (無阻平版)	x	$\frac{1}{x}$	C <sup>2</sup>	$\frac{1}{x^2}$	$\frac{1}{2Ax}$
拡散律速 (無阻円柱)	x	-(1-C)	$\frac{1-C}{2}$	-(1-C)	—
拡散律速 (球)	x	$\frac{2}{3}(1-C)^3$	$\frac{2}{3}(1-C)^3$	$\frac{2}{3}(1-C)^2$	—
界面律速 減少反応 (無阻円柱)	x	$\frac{1}{2}(1-C)^2$	1-(1-C) <sup>3</sup>	$\frac{1}{2}(1-C)$	—
界面律速 減少反応(球)	x	$\frac{1}{3}(1-C)^3$	1-(1-C) <sup>4</sup>	$\frac{1}{3}(1-C)^2$	—

Table 1で示した複雑な関数を使用して、具体的にどのような結果が得られるかについて、Figure 4に例を示す。

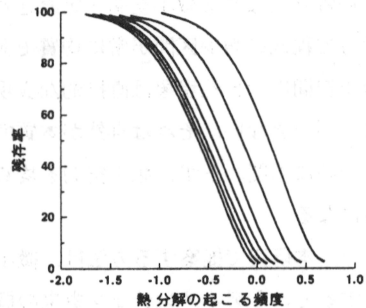


Figure 4 Degradation curves at thermal polymer degradation

Figure 4は横軸にエンジニアリング・プラスチックに与えられる負荷の強さを示し、縦軸はその負荷によって分解したエンジニアリング・プラスチックの割合を示している[5]。一般的にこのような規則的な分解曲線が得られるのは熱分解の時が多く、力学的負荷や光等の負荷の場合には副反応が併発するので、曲線はかなり複雑な形状を示す。この曲線の意味するところはある負荷が与えられるとその負荷の大きさの対数に対して分解が図の

曲線のように進むという事であり、式(1)とその計算はそれだけの知見を与えてくれるが、それ以上の情報は得られない。

この様に従来の方法では比較的複雑で長い方程式の導入過程を経過し、さらに式を近似的に解く様々な関数を導入しても、エンジニアリング・プラスチックの分解をハッキリとした形で解析することは不可能であることが判る。コンピュータ・シミュレーションが研究に実用的に用いることができない時にはやむを得ないが、もし複雑な方程式を経由しなくてもより有効な結果が得られるなら、従来の方法にこだわる必要はないだろう。

材料の実験を担当している人たちの中には、この様な一連の数式と解法に不十分な感を抱いている人が多い。それは式自体が複雑で理解するのに時間がかかることもあるが、それ以上に上記の方法の中に材料の分解研究者が日頃問題としている、「化学的表現」が含まれていないことにある。良く化学を象徴的に表すときにベンゼン環を「亀の子」と呼ぶことがあるが、有機材料の研究者は日頃は亀の子を相手にしているのであり、複雑な数式を扱っているのではない。そして日常の研究から多くの情報を得ているが、それを処理する方法は持っていないのである。なぜ、これだけコンピュータが発達しているのに、日常的な情報を有効に処理し得ないことが理解できないのである。

### 3.2. モリックマウス法のモデルの組立

本研究の材料の分解では標準的なモリックマウスモデルを使用した。モリックマウスモデル自体はFigure 1に示したが、材料は何らかの結合で大きな分子集団を形成している。エンジニアリング・プラスチックの場合にはモリックマウスモデルが結合して長い鎖状の構造をしている。従って、モリックマウスモデルが結合したチェインモデルをFigure 5に示したような結合の仮定をおいて組み

立てた。

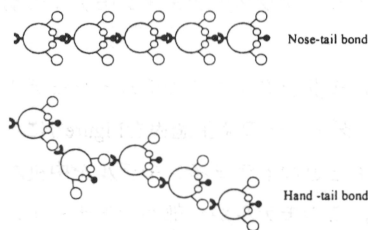


Figure 5 Chain model of standard "molic mouse" model

Figure 5に示されているようにモリックマウスモデルの基準となる結合をノーズテイル結合とすると、直線上の構造が得られ、ハンドが結合に寄与する状態では結合の割合に応じて多少捻れた構造を採る。このモデルはあくまでも方程式を使用しないモリックマウス法のモデルとして組み上げたもので、エンジニアリング・プラスチックの構造の一つの可能性を示しているに過ぎない。

次にチェインモデルの分解について示す。チェインモデルの分解は、それを一部の実験データと併せて分解パラメーターを決定した。材料研究者はモリックマウスモデルを一つのベンゼン環と認識し、コンピュータ・シミュレーション研究者はある程度普遍的な計算モデルと認識することが可能である。

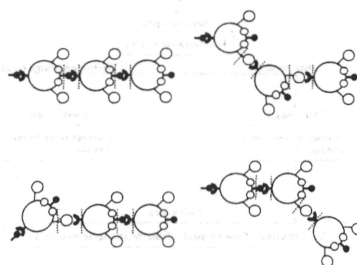


Figure 6 Assumption of cleavage point to generate monomer units

Figure 6はモリックマウスモデルの2つの結合状態に対して、それが切断してモリックマウスが1つからなる「モノマー」に変化する過程を示し

たものである。図で結合部位に破線で示したところがモリックマウスのチェーンモデルの切断箇所である。

次に、モリックマウスのチェーンモデルの切断による、ダイマーの発生過程をFigure 7に示した。切断のもととなるチェーンモデルを中央左端に示したが、このモデルが一部ハンドチェーンモデルに転換しつつ、ダイマーを形成する切断を行うと考えた。

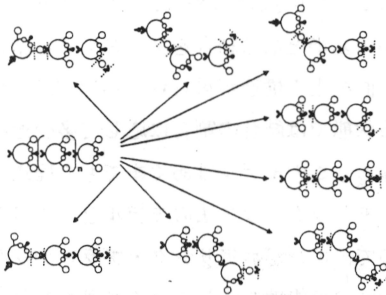


Figure 7 Assumption of cleavage point to generate dimer units

次にFigure 7では使用した図の記号などはFigure 6と同様である。

### 3.3. 材料分解の計算方法

今回の材料分解の計算手順をFigure 8のフローチャートに示す。

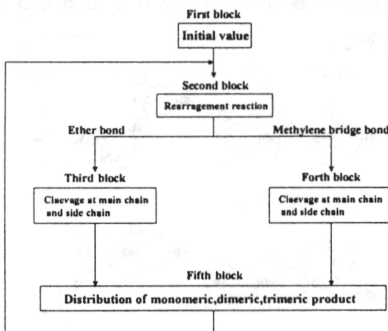


Figure 8 Block flowchart of computer simulation

計算のブロックは大きく5つに分割した[6]. 第1ブロックは初期設定やプログラムを動かすためのFortran言語での宣言文を入力する項目である。第2ブロックは切断を生じるモリックマウス結合

方法を決定するもので乱数を発生させて特定のモリックマウスを決め、次にその結合を決める。第3ブロックはノーズテイル結合の周辺のノーズ、テイル、ハンドの切断を、第4ブロックはハンドテイル結合の周辺のノーズ、テイル、ハンドの切断を取り扱っている。第5ブロックでは第4までで行われた分解過程により生成したモノマー、ダイマー、トリマー、テトラマーの構造解析と実験データとモリックマウスのモノマーを比較するブロックである。

大まかな流れとして、結合、初期の切断確率などの初期値を設定し、乱数を発生させた後、その乱数によって特定された箇所の結合様式を判断し、それぞれの構造ごとに結合様式、切断箇所などの同じく乱数を発生させて、ランダムに結合、切断をさせる。その後、一回の計算ごとにモノマー、ダイマー、トリマー、テトラマーを積算し、実験データの比率になったところで計算を終了させた。

## 4. 結果及び考察

### 4.1. 実験との整合性の実証

モリックマウスモデルの適用性を検証するために本研究では、873Kの分解実験データからモノマーの切断比率を求め、それをモリックマウスモデルの分解過程を使用して切断確率を計算し、フィッティングした結果をTable 2に示す。

Table 2 Experimental and calculated results of monomer units degraded

Symbol	Structure	Experiment	Simulation	Symbol	Structure	Experiment	Simulation
A1		0.90	0.70	E1		25.23	25.22
B1		17.09	17.41	F1		0.14	0.08
C1		1.55	1.14	G1		25.25	25.70
D1		28.62	28.77	H1		1.22	0.98

Table 2から判るように、モリックマウスモデルを使用したモノマーの生成は実験データとほぼ完全に一致する。本研究の目的の一つは少ない自

然観測のデータから多く有用なデータを、できる限り研究対象から離れずに、しかも数学的な式を使用せずに得る方法に関するものである。この結果はさらに先に進むことのできる可能性を示したものとして有用である。

次にダイマーの発生過程に対して、モノマーの切断の実験データからの情報処理によって得られた様々な切断確率を代入して計算した結果をTable 3に示した。

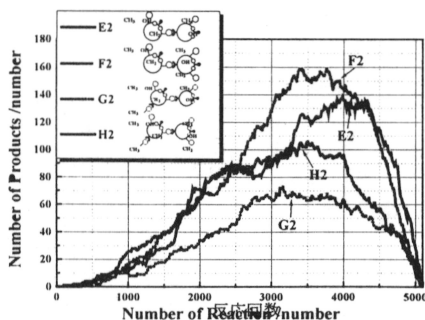
**Table 3 Experimental and calculated results of dimer units degraded**

Symbol	Structure	Experiment	Simulation	Symbol	Structure	Experiment	Simulation
A2		1.19	3.29	E2		17.06	16.79
B2		2.32	4.23	F2		20.59	20.64
C2		11.15	11.08	G2		14.76	13.71
D2		13.66	15.02	H2		17.32	15.24

Table 3で計算されたダイマーの構造とその分布に関する計算結果と実験結果の一致は期待以上のものがあつた。この計算の過程ではモノマーの実験データを使用して、単に構造と切断確率を計算したに過ぎないからである。この過程では当然ながら数式などは一切使用しておらず、乱数を発生しつつランダムに切断箇所を決定したに過ぎないからである。

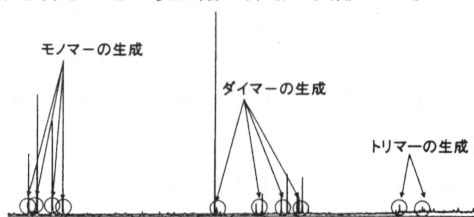
#### 4.2. シミュレーションから得られた材料分解過程の結果

まず、ダイマーの発生過程を経時的に表したFigure 9を示す。



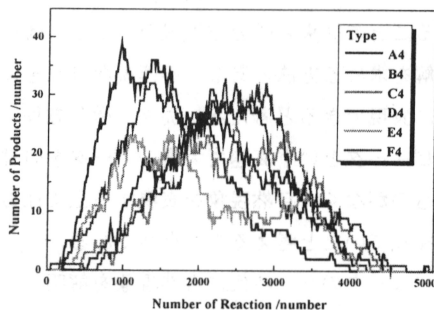
**Figure 9 Transition of dimer according to structure**

この図は従来微分方程式を使用した方法では作成することは困難であつた。しかし、モリックマウスを使うことでモリックマウス1個1個の動きを示すことができ、このような結果を得ることが容易にできるのである。また、実験で得られる結果もFigure 10に示すようにモノマー、ダイマー、トリマーが生成しているといった極少量の情報しか得られず、トリマー以後のテトラマーなどの情報を得ることは現段階で非常に困難である。



**Figure 10 Experimental results of GC/MS**

しかし、モリックマウス法で行った結果では、Figure 11のようにテトラマーの構造とその分布を示すことができ、またダイマーと同様に発生過程を経時的に示すことができる。



**Figure 11 Transition of tetramer according to structure**

このようにモリックマウス法を用いることで従来得ることのできなかつた材料の熱分解の過程を詳細に示すことができる。

#### 4.3. 考察

モリックマウス法と従来の方方程式を使用した方法の比較をTable 4に示す。

**Table 4 Comparison of parameters used in two methods (conventional method and Molic mouse model)**

ケース	方程式を用いた場合	モデル化した場合
使用するパラメータ	A: 頻度因子 E: 見かけの活性化エネルギー T: 絶対温度 R: 気体定数 x: 反応率 g(x): 反応様式によって異なる関数	転位確率 分解確率
特徴	熱分析結果から速度論的知見を求めることができる。 理想的な熱分解の結果を厳密に得る事が出来る。	分解反応を個々に見る分解経過が全部判明するというこのように熱分解過程が非常に詳細にどのようなものを経て分解されているのかということが明らかにできる

従来の方法で得られる結果は先程のFigure 4に示したように材料が熱分解した時にどのような傾向が出るのか、得られた結果が次の材料の改良に生かすことができないなどが欠点として挙げられる。モリックマウス法による結果は、モリックマウスを使用することで材料の個々の特性や、分解過程が明瞭に示すことができる。このように極少量の実験データから材料の個々の特性が得られるのは「分解の方程式」を使用せずに、現実の元素や分子と同じ形をしたモデル（モリックマウスモデル）を使ったことにあると考える。

## 5. おわりに

モリックマウス法は、物質の最小単位をモデル化することで従来の微分方程式を使用し、離散化して解を求める方法と異なり不連続な自然をより明確に表現できると考える。従来、微分方程式はコンピュータという高速で大量のデータを処理できるものがなく、自然現象を表現する上で仕方なく行っていたと考えるのが自然である。

コンピュータのない時代に自然現象を解明しようと作られた微分方程式では、一旦微小部分を見ることで全体を表現し、解を求める上で離散化して、再び微小部分を計算するといった複雑な方法を採用しているが、このように微小部分を微分方程式に還元することなく、物質の最小単位から全体を記述することがモリックマウス法の概念であり、それによって微分方程式ではブラックボックスで

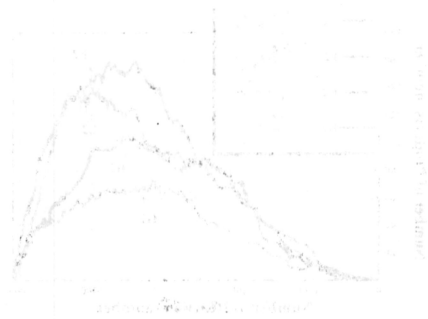
あった材料の特性をより明確に示す事ができるのである。

このように、近代科学の手法がそのまま応用されているコンピュータ・シミュレーションと異なり、近代科学の手法を批判的な視点に立って論じ、新しい手法を提案することは有意義であると考えられる。

謝辞 本研究を進めるに当たって、材料の提供をしていただいた旭化成工業（株）の高山茂樹博士、実験データを提供していただいた小糸製作所の木下雅夫氏、そしてコンピュータ・シミュレーションのご指導を頂いたヒロセ電機の近藤博昭氏にお礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) F.Bacon, "The Two Books of the Proficiency and Advancement of Learning", (1605)
- 2) 野田又夫: "デカルト", 岩波新書(東京), (1966)
- 3) ニュートン: "自然哲学の数学的原理" (Philosophiae naturalis principia mathematica), (1687)
- 4) 米澤彰二, 豊高宏典, 土屋敏明, 武田邦彦 (1998): 日本金属学会講演概要, pp.57-58
- 5) 神戸博太郎, 小澤丈夫: 熱分析, 講談社, (1993)
- 6) 近藤博昭, 木下雅夫, 武田邦彦: マテリアルライフ学会第8回研究発表会, (1996), 東京.





本 PDF ファイルは 1999 年発行の「第 40 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトに、下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載し、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

[https://www.ipsj.or.jp/topics/Past\\_reports.html](https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html)

#### 過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者 (論文を執筆された故人の相続人) を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者搜索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 ([tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp](mailto:tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp)) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間：2020 年 12 月 18 日～2021 年 3 月 19 日

掲載日：2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>