

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82617

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26750097

研究課題名(和文) コンピュータ・シミュレーションの科学技術史構築に向けた理学・工学事例の比較考察

研究課題名(英文) Toward the History of Computer Simulations: A Comparative Study in Science and Engineering

研究代表者

有賀 暢迪 (Ariga, Nobumichi)

独立行政法人国立科学博物館・理工学研究部・研究員

研究者番号：90710921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンピュータ・シミュレーションが日本国内で始められていった過程を、台風の数値予報と超高層ビルの耐震設計という二つの事例に即して、文献資料に基づき検証した。またこれと並行し、現代の研究者の協力を得て、学術分野間でのシミュレーションの共通点・相違点についても検討するなどした。以上の分析を総合した結果、シミュレーションの歴史研究では、シミュレーションと旧来の手法との連続性、他の研究手法との関係性、基礎となる法則や方程式の地位といった点に注目することが重要であるとの示唆が得られ、「コンピュータ・シミュレーションの科学技術史」という新しい研究領域の課題が明確化された。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the beginnings of computer simulation in Japan through case studies on numerical weather prediction of a typhoon and earthquake-resistant design of a skyscraper. In addition to these, the study considered what is common or different about simulations from one scientific field to another. To sum up, for further studies on the history of computer simulations it seems particularly relevant to pay attention to such aspects as the continuity of simulations and older methods, the relationship of a computer simulation to other ways of research, and the epistemological status of the laws or equations serving as a basis of the simulation. The problems in the novel research field of "history of computer simulations" have been made more specific.

研究分野：科学史

キーワード：シミュレーション 数値予報 応答解析 計算物理

## 1. 研究開始当初の背景

コンピュータ・シミュレーションが理論、実験と並ぶ「第三の科学」と呼ばれるようになって久しい。このことは科学の歴史上、重要な変化と考えられるが、この新しい手法による科学がどのようにして生まれ、発展してきたのかについて、科学史の立場からの研究はまだ、ほとんど行われていない。

他方で、研究手法としてシミュレーションを用いている各学術分野においては、教科書の冒頭でその分野の歴史(研究史)が説明されたり、先駆的な研究者が往時を回顧したりする例が少なからず見受けられる。しかし、それらは基本的に、当該分野の事情についてのみ述べているために、広く科学全体を見渡したときに、どの分野においてシミュレーションの導入が早期に進んだのか、あるいは、分野の違いによってシミュレーションにはどのような違いがあるのかといったことは明らかでなかった。

また、科学史と近縁関係にある科学哲学の分野では、科学におけるモデルを考察する延長線上で、シミュレーションについても取り組む例が出てきていた。ただしそれらの主張が、現場の研究者の実際に感じていることとどの程度よく一致するのかについては、検討する余地があると思われた。

以上のことから、科学哲学の知見を参照しつつ、実際にシミュレーションを行っている研究者が有している「現場知」とでも呼ぶべきものを手掛かりとして、歴史研究に取り組む必要があると考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究の基本的な課題は、コンピュータ・シミュレーションによって科学研究や技術開発のあり方がどのように変わったのかを考究することである。ただし、その変化の仕方は学術分野により異なると考えられたために、いくつかの具体的な事例に即した比較考察を行うこととした。

また本研究では、「どのように変わったのか」という大きな問いに対して回答を与えることよりもむしろ、これまでにほとんど前例のない「コンピュータ・シミュレーションの科学技術史」というテーマの研究・叙述において、どのような点に着目する必要があるのか見当することに重点を置いた。言い換えれば、「コンピュータ・シミュレーションの科学技術史」という研究領域そのものの構築が、本研究の究極的な目標であった。

## 3. 研究の方法

本研究を進めるに当たっては、次の三つの取り組みを行った。

### (1) 詳細分析

文献資料に基づき、特定分野におけるシミュレーションの導入過程を検討する。ここでいう文献資料とは、基本的には、出版された論文や書籍を指す。それらの精読を通じて、シミュレーションの手法による研究がどのように進展したのか記述することを試みた。

具体的な事例としては、まず、1950年代の日本における気象の数値予報を取り上げた。これは、気象学という分野が、科学全体の中でも早期に「計算科学化」したと考えられるためであり、また、日本国内の状況を考えて際、大型計算機が導入されたほぼ最初の分野とされているためである。

コンピュータによる気象の数値予報は、1950年前後にアメリカで行われた研究を嚆矢とするが、日本ではこれを受けて、台風の進路予報が取り組まれた。この研究開発の過程を、詳細分析の第一の事例とした。

もう一つの事例は、耐震工学の分野から選んだ。この分野では、地震動に対して建物がどのように揺れるかを調べる応答解析という手法があるが、これは工学分野におけるシミュレーションの早い例と考えられる。

具体的に取り上げたのは、霞が関ビルの構造計算である。1968年竣工の同ビルは、日本初の超高層建築として知られているが、これには電子計算機が大きな役割を果たしたと言われている。そこで、この研究開発の過程を詳細分析の第二の事例とした。

### (2) サーベイ調査

前項の分析と並行して、いくつかの学術分野におけるシミュレーションの歴史(特に国内での展開)について、概要の調査を行った。この調査では、詳細分析で検討材料としたような文献資料までは扱わず、研究者による回顧記事やインタビュー記事を探ること、学会での特別講演(特に、何らかの周年を記念したもの)などを聴講すること、現役または退職した研究者に直接話を聞くこと、という三つの方法を採用した。

調査した分野は、主に次の二つに分かれる。第一は物理学であり、なかでも統計力学・物性基礎論とプラズマ物理学を取り上げた。この二つを選んだのは、出版物から確認できる限り、「シミュレーション」や同義と思われる「計算機実験」という用語が早期に使われた分野であると予想されたためである。

第二の分野は機械工学であり、なかでも材料力学における有限要素法の歴史と、流体力学における数値計算(すなわち数値流体力学、CFD)の歴史に着目した。これらは古典力学の現代的展開と看做することができるが、これは詳細分析で扱った数値予報や応答解析にも言えることであり、それゆえ比較する意味があると考えられた。

### (3) 研究会

本研究における「研究会」は、科学論（科学史・科学哲学・科学社会学）研究者の関心と、実際にシミュレーションを行っている研究者の認識とのすり合わせを行い、シミュレーションについて考察する際の視角や論点を抽出するための場として設定した。そのため、インターネットなどを通じ、様々な分野から研究者を集めることも試みた。

この研究会は、参加者やテーマを少しずつ変えて、各年度に1回ずつ、計4回実施した。

## 4. 研究成果

本項ではまず、詳細分析を行った台風の数値予報と霞が関ビルの耐震設計に関する歴史研究の成果、ならびにサーベイ調査のうち物理学における調査の成果について、既発表をもとに記述する。その上で、これらの結果について比較検討を行い、さらには研究会などを通じて得られた主要な論点も交えながら、全体の総括と今後の展望について述べることとする。

### (1) 台風の数値予報

※「主な発表論文等」の雑誌論文 [1] および学会発表 [4][5] の要約

数値予報は、コンピュータを用いて天気の子報を行うための手法である。電子計算機を使った最初の予報はアメリカで、ENIAC を用いて行われ（1950年）、続く数十年のあいだに、この新しい方法が日々の予報業務の一部となった。日本では、1959年に気象庁がIBM704 計算機を導入しているが、本研究ではそこに至るまでの受容過程について、特に台風進路の予報に注目して検討した。

アメリカの成果はプリンストン高等研究所のJ・チャーニーらによるものであったが、彼らの気象力学分野における一連の仕事は、東京大学の気象学教授であった正野重方らの注意を引いた。とりわけ、その弟子に当たる岸保勘三郎は1952年から54年にかけてプリンストンに留学し、当地の研究状況を日本に知らせた。国内では、正野らを中心として「数値予報グループ」が作られ、東京大学、中央気象台（のち気象庁）、気象研究所の人々が非公式に集って研究が始まった。

数値予報によって台風の進路を予報するという課題は、当初は手計算（図式計算）によって取り組まれ、最初の重要な成果が東京大学の佐々木嘉和と都田菊郎により与えられた。この方法はすぐに、中央気象台（気象庁）の寺内栄一や鍋島泰夫らによって現場の場面で試験的に活用され、彼らはさらに、リレー計算機を用いた傾圧モデルでの予報へと進んだ。これに対して気象研究所の増田善

信らは、傾圧モデルによる予報の改良を目指し、結果的に、電子計算機を使った台風の数値予報に初めて成功した。

この過程で特に問題だったのは、台風の中心付近をどのように取り扱うかということであり、そのための計算手法が工夫された。また、傾圧効果をモデルにどのように取り入れるかについても、多くの研究者からさまざまな提案がなされていた。この一連のプロセスは、特定の自然現象について深い理解を得ていく過程よりもむしろ、特定の目標に向けられた技術開発の過程に類似していると考えられた。

### (2) 霞が関ビルの耐震設計

※「主な発表論文等」の学会発表 [1] の要約

国内初の超高層建築と呼ばれる霞が関ビルディング（1968年4月竣工）では、電子計算機を用いた「動的設計」と呼ばれる手法が重要な役割を果たしたことがしばしば強調されている。本研究では特にこの側面に着目して、霞が関ビル誕生に至る耐震構造研究ならびに設計の展開を考察した。

具体的な時期区分としては、(i) 東京駅舎の高層化計画（59～62年）、(ii) 霞が関ビルの予備研究（62～63年）、(iii) 構造設計（64～65年）、(iv) 実施設計から竣工まで（65～68年）、を考慮することができる（年はいずれも目安）。このうち(i)と(ii)ではアナログ計算機が、(iii)と(iv)ではデジタル計算機が主に用いられていた。

設計という行為は一般に、与えられた目標を達成するにはどうすればよいかという技術的問題に関わっていると考えられる。しかし、霞が関ビルの耐震設計について書かれた文献の中には、そうした問題系に収まらないような記述も散見された。たとえば、「このような高層ビルでは建物の上下における剛性配分が耐震性の支配的要素であることを発見した」（武藤清編『超高層建築へのアプローチ』鹿島研究所出版会、1966年、40頁）であるとか、「固有周期5秒といった非常に柔らかい場合、建物があたかも波うつような現象を明確にみることができる」（同書、109頁）といった文章である。

このような言葉遣いは、自然現象を対象とする科学研究の場合と極めてよく似ており、そのことは、耐震設計が展開していく中で何らかの知識生産が行われたという解釈を可能にするように思われる。設計の各段階で得られた知見の種類はさまざまであったが、いずれの段階でも、特定の建物構造を想定した上で、それが地震によってどのように揺れるかという力学的検討（応答解析）が行われていた。これを敷衍すると、この耐震設計の過程では、まだ存在しない建物が有しているはずの性質を、モデルを通じて探究することが繰り返し行われていたと考えられる。

### (3) 計算物理

※「主な発表論文等」の学会発表 [2] の要約

計算物理 (computational physics) は今日、理論物理、実験物理に次ぐ「第三の物理」としての地位を確立している。この「計算物理」という日本語そのものは、1983 年の『日本物理学会誌』に掲載された A. J. Freeman の解説記事「第三の物理学としての計算物理学」をきっかけに普及したようである。しかし、計算物理に相当する内容の研究は、それよりもかなり前から行われていた。特に、次の 3 つの領域においては、特徴的な展開が 1960 年代に認められる。

プラズマ物理は、「シミュレーション」の語と手法が早期に使われ始めた領域である。日本物理学会の 68 年秋の分科会では、川上一郎が「プラズマのコンピューター・シミュレーション」と題して特別講演を行った。これより先、66 年の会誌には、長谷川晃が解説記事を寄せている。両者はまた、京大数理解析研で 68 年 1 月に開かれた「近似計算とシミュレーションによる近似解法研究会」で、それぞれ報告を行っている。

当時、シミュレーションは「計算機実験」とも呼ばれた。この表現は同じく 60 年代後半に、物性基礎論・統計力学の領域で一般的になった。荻田直史や松田博嗣らによる、66 年の秋の分科会での一般講演がその端緒と見られ、68 年にはその延長線上に、有名な「計算機実験グループ」の成果が現れた。これと並行して斎藤信彦らも非線形格子振動についての「計算機実験」を行っており、以上の成果は上述の数理解析研の研究会でも報告されている。

物性物理における初期の「計算機実験」について興味深いことの 1 つは、これに関わった荻田や上田頭が元は宇宙線の研究者だった点である。物理学会の講演予稿を見ると、足立篤子らが 59 年から 67 年にかけて「モンテカルロ法によるカスケードシャワーの計算」を発表しており、荻田や上田もこれに関わっていた。この一連の研究は、モンテカルロ法が国内で物理学研究に使われた初期の事例の一つと考えられる。

### (4) 総括と展望

上述の(1)および(2)の詳細分析から、特に 2 点を指摘できる。第一に、この二つの事例では、電子式デジタル計算機 (今日「コンピュータ」と呼ばれるもの) が最初から使われていたわけではなかった。数値予報では、手計算 (図式計算) →リレー計算機→電子 (真空管式) 計算機の変遷があり、応答解析ではアナログ計算機→デジタル計算機 (どちらも電子計算機) という変化があった。もっとも、これらの計算手段の変化により、研究者らが問題に取り組む際の考え方に大きな変化が生じたように見受けられない。すなわち、

シミュレーションあるいは計算科学の歴史は必ずしもコンピュータの出現とともに始まったわけではなく、それ以前の時期から連続的につながっていると考えることができる。ただし、電子計算機によってある種のアプローチが遥かに容易になった結果として、あたかもそれが新奇な手法であるかのように受け止められた可能性はある。

これと関連して重要と思われるのは、シミュレーションが当該分野において、その他の研究手法とどのような関係にあったのかという点である。たとえば、台風の数値予報と地震の応答解析はどちらも、実際に実験することがほぼ不可能な対象を扱っている。このような場合におけるシミュレーションと、実験可能な対象についてのシミュレーションとは、その認識論的地位が異なり、したがって導入や発展の仕方も異なる可能性がある。これは研究会の場で出された論点の一つであり、今後さらに深められるべきであろう。とりわけ、物性物理学などにおいて「計算機実験」という表現が使われたことの含意は、当時の状況に即して検討する必要がある。

シミュレーションと他の研究手法との関係はまた、シミュレーションの分類学を行う上で手掛かりとなる可能性もある。ところで、分類学、あるいはシミュレーションの種類とその相違に関しては、研究会の中で、さらに別の論点も提出された。それは、基礎に置かれる法則や方程式がどの程度「固い」ものであるかという問題である。「固い」とは、ある研究者の表現であるが、どのくらい普遍的で疑問の余地がないかを意味する (たとえば、力学の運動方程式は非常に「固い」が、人間集団の振る舞いに関する仮定はそうではない)。以上の見方は、シミュレーションについて、学術分野による分類とは異なる切り分けの可能性を示唆している。

ここで詳細分析の結果に論を戻せば、二つの事例の比較から引き出せるもう一つの論点は、理学と工学の関係性である。すなわち、気象学は自然現象を対象とする理学であるが、台風の数値予報はむしろ、一種の技術開発の様相を呈していた。他方で応答解析は、建物という人工物を対象とする工学に属するが、そこでは自然現象を対象とするのと同様の知識生産が行われていた。このようなことが他の領域についても言えるかどうかを、たとえばサーベイ調査で取り上げたプラズマ物理や宇宙線物理について、あるいは有限要素法や数値流体力学について検討することが、今後の課題となるであろう。

以上のほか、本研究期間を通じて浮かび上がってきたテーマとしては、シミュレーション結果を可視化することの重要性なども挙げられる。このように研究すべき主題は多岐に渡るものの、「コンピュータ・シミュレーションの科学技術史」においては何を問題とすべきなのか、一定の整理を行えたことをもって、本研究の主要な成果としたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] 有賀暢迪、「台風の数值予報の始まり、あるいは黎明期の計算気象学における問題意識の連鎖」、『科学史研究』第54巻(2016年)、314-326頁 [査読なし]

〔学会発表〕(計9件)

[1] 有賀暢迪、「震が関与する建物の耐震設計(ある知識生産の過程)」、日本科学史学会第65回年会、2018年

[2] 有賀暢迪、「国内における「計算物理」以前の計算物理の動向」、日本物理学会第73回年次大会、2018年

[3] 有賀暢迪、「数值モデルは(いつ)社会と出会ったか：台風進路予報の歴史から」、科学技術社会論学会第16回年次研究大会、2017年

[4] Nobumichi Ariga, “Engineering the Numerical Prediction of Typhoons: The Emergence of a New Type of Meteorological Work in Japan,” History of Science Society, Annual Meeting, 2016

[5] 有賀暢迪、「日本における台風の数值予報の始まり」、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年

ほか4件

〔その他〕(計2件)

[1] 有賀暢迪、「科学史から見た近現代の気象学：導入に代えて」、『科学史研究』第54巻(2016年)、284-286頁 [査読なし]

[2] 有賀暢迪、「数值気象学の始まり：歴史研究の動向と課題」、『地質学史懇話会会報』42号(2014年)、36-40頁 [査読なし]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

有賀 暢迪 (Ariga Nobumichi)

独立行政法人国立科学博物館

・理工学研究部・研究員

研究者番号： 90710921