

第77回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

世話人 福永征夫
TEL & FAX 0774-65-532
E-mail : irfdf117@ybb.ne.jp

事務局 岩下幸功
TEL&FAX042-35-3810
E-mail : yiwashita@syncreate.jp

第77回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第76回アブダクション研究会のご報告

◆2010年11月27日(土)に開催された第76回アブダクション研究会では、飯塚道夫氏(永井国際特許事務所・弁理士)に、『N・ウィーナーに学ぶ<サイバネティクス>とアブダクション』のテーマで、ご発表をいただきました。

◆難解な部分の多いウィーナーのサイバネティクスの理解に、長期の粘り強い努力を積み重ねられて、発表のゴールに達せられたことに心から敬意を表します。

◆われわれが、20世紀の知の巨人について、理解の入り口を共有できたことは、今後のためにも、実りの多い素晴らしい出来事だったと思われま

◆本会・懇親会ともに熱心な質疑と関連する対話が繰り広げられて、素晴らしい会合になりました。先ずは、発表者と出席の皆様にお礼を申し上げます。

◆19世紀の考えが20世紀の科学・技術で実現したように、自然の未踏の領域を見据えていた20世紀の知の創造者の一人であるN・ウィーナーには、21世紀に生きる知恵の至宝の数々が見出されるものと思われま

◆世話人は、知識が進化して人間の知(事実の系)・情(価値の系)・意(目的の系)が環境の変化に適応して行く、人間の環境への適応プロセスの基本モデルを提出しています。

- 既存の領域知識Aのタテ系による分析では問題の穴を塞げないという限界があるとき、穴をカヴァーできて知識Aとも親縁する新規の領域知識Bのヨコ系を構成し、 $A \times B$ という広域知識Cの布を織り上げる発見的創造の意思と行動が発見される。
- 一所深耕の領域学と、多様な領域の多様な知識を多様に研究して知のパターンを探究する広域学の、相互の啓発と協業に向けて、<避けず逃げずブレず>の覚悟と実行が為される。
- アブダクションとは、既存の領域知識Aと新規の領域知識Bの間に、 $A \Rightarrow B$ 並びに $B \Rightarrow A$ という二つの方向の広域知識を発見し、その相互還流<対話>によって、より高次の領域知識Dが推論される発見的創造の過程である。

◆N・ウィーナーは、数学と物理学の狭間において、時代のニーズを踏まえながら、発明的創造と発見的創造に向けて果敢に挑んだ20世紀の巨星の一人として、今日のシステム科学と情報科学をもたらす起点となった時代の、起点となった人物群の輝かしい一角を占めています。

◆最近のロボティクスやAIの先端に位置する人の著作でも、N・ウィーナーの存在が大きく意識されています。ブルックスが、カンブリアン・インテリジェンスという著書で、また、ホールが、Beyond AIで、それぞれ詳しく言及をしています。

◆この案内状の文末には、世話人が取りまとめた『N・Wiener が歩んだサイバネティクスへの道』という概説を再録していますので、皆様のご研鑽ご研究のために、長くお役立て下されば幸いです。

これは、ノーバート・ウィーナー＝池原・弥永・室賀・戸田訳「サイバネティクス第2版」(62・岩波書店)並びにノーバート・ウィーナー＝鎮目訳「サイバネティクスはいかにして生まれたか」(56・みすず書房)の記述から抜粋し、あるいは、抜粋のうえ要約を加えて、分節化しながら、編集したものです。

ウィーナーの言説を、出来るだけ正確に、分りやすく、しかも、包括性を保てるよう、綿密に編集することに努めたつもりです。

(2) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説研形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

記

◇ 日 時： 2011年1月29日(土) 13:00~17:00(例会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場 所： 日本電気企業年金会館 2階和室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話:03-3413-0111(代)

* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話)070-5541-4742

* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分

* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館 MA p」に記載。 <http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ： 研究発表

『 <ゲーデル, エッシャー, バッハ> とアブダクション 』

尾 上 彰 氏

◆ 教科書：ダグラス・R・ホフスタッター著＝野崎・はやし・柳瀬訳＝
「ゲーデル, エッシャー, バッハ」(85・白揚社)

◇プログラム：

- | | | |
|---------------|----------------------|-------------|
| (1) 開会諸連絡： | | 13:00~13:10 |
| (2) 研究発表： | < PART 1. > | 13:10~14:25 |
| | 休 憩 | 14:25~14:30 |
| | < PART 2. > | 14:30~15:45 |
| | 休 憩 | 15:45~15:50 |
| (3) 総合的な意見交換： | | 15:50~16:50 |
| (4) 閉会諸連絡： | | 16:50~17:00 |
| (5) 懇 親 会 ： | <皆様の積極的なご参加を期待しています> | |
| | | 17:15~19:15 |

第77回 アブダクション研究会(1/29)の出欠連絡

●1/24(月)までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FAX: 042-356-3810

E-mail: abduction-owner@yahooroups.jp

岩下 幸功 行

- | | | | |
|---------------------|----|-------------|----|
| ●1/29(土)の研究会に、未定ですが | 出席 | ●懇親会に、未定ですが | 出席 |
| 調整します。 | 欠席 | 調整します。 | 欠席 |

☆ 出欠の連絡は、グループメールメニューの「投票」コーナーから行うこともできます。

ご署名 _____

<定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。
皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで（第1回～第76回）の研究発表やなされた議論（「議事録」を参照下さい）に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。
特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....
.....
.....
.....
.....
.....



N・Wienerが歩んだサイバネティクスへの道

第一部 サイバネティクスの成立

◆その1◆

1. 「サイバネティクス」という書物は、当時ハーバード大学医学部に在職し、現在はメキシコの国立心臓医学研究所にいるアルツェーロ・ローゼンブルース（Arturo Rosenblueth）博士とともに10年以上前から行ってきた一連の研究の成果である。

2. 大分前から、ローゼンブルース博士も私も、既に確立された科学の諸分野の間に誰からも見捨てられ

ている無人地帯こそ、これから稔り豊かに発展する見込みのある土地なのだという確信を、お互いに持っていた。ある時代に於ける全ての分野の学問を自由にマスター出来る様な人は、ライプニッツ以後、おそらく一人もいないであろう。彼の後は、科学は、次第に狭くなって行く諸分科の専門家達のものとなって行った。今から1世紀前にはもう、ライプニッツの様な人はいなかったけれども、まだガウスやファラデーやダーウィンの様な人物がいた。今日では、単に自分は数学者であるとか、物理学者であるとか、生物学者であるとか言えるような学者は殆んどいない。今日の学者は位相数学者であったり、音響物理学者であったり、鞘翅類昆虫学者であったりするのである。この人達は、その専門分野の難しい術語を沢山知っており、文献も知り尽くし、その専門の枝葉末節に至る迄良く知っているが、大抵の場合は、ちょっと離れた分野の話になると、それは三部屋先の同僚のやっている事で、そう言う事に興味を持つのは、他人の縄張りを不当に荒らす事の様になっているのである。

3. これらの専門化した分野は絶えず拡がり、新しい領域を侵して行く。その結果、丁度オレゴン州が、イギリス人・メキシコ人・ロシア人等いろいろな合衆国移住者に依って同時に侵入された時と良く似た事情が起る。即ち各種各様な探索が為され、名前が付けられ、法則が出来、混乱して、手が付けられなくなる。・・・丁度それと同じ様な事情が生じている科学の或る研究部門がある。そこでは純粋数学・統計学・電気工学・神経生理学の各方面からの研究が同時に行われ、同じ事に夫々の部門で別々の名前が付けられ、重要な研究成果が三重にも四重にも別個にまとめ上げられているかと思うと、ある部門では既に古典的とさえなっている結果が、他の部門では余り知られずに研究が遅れていると言う様な有様である。

4. 科学のこう言う境界領域こそ、有能な研究者に最も稔り豊かな好機を与えるものである。同時に、こう言う領域は、集団攻撃と分業と言う、一般に使われている研究方法だけではどうにもならない分野でもある。もし或る生理学の問題の行き詰まりが、本来、数学的なものであるとすれば、数学を知らない生理学者が10人掛かった所で、一人がやれるだけの事しか出来ず、それ以上の進展は望めない。また数学を知らない生理学者が、生理学を知らない数学者と協力したとしても、前者は後者が取り扱える様に問題を言い表す事が出来ず、後者は前者が理解できる様な形で解答を示すことが出来ないであろう。

5. ローゼンブルース博士は日頃、科学の世界に於けるこれらの空白地帯の探究は、一つの部門の専門家でありながら同時に隣りの部門にも透徹した理解のある科学者たちのチームに依って初めて成功すると主張した。

即ち、全員が協同研究に参加して、互いに他の人の考え方の習慣を知り、同僚が新しい提案をする時には、それが完全に整った形で表現される以前に、その意義を汲み取る事の出来るような科学者のチームである。数学者が、生理学の実験をやり遂げる腕前を持ち合わす必要はないが、それを理解し、批判し、かつ示唆し得る能力を持たなければならない。生理学者は数学の定理を証明出来なくても良いが、その生理学上の意義を把握し、数学者に考えて欲しい問題を話せる様でなければならない。何年もの間、われわれはこれらの科学の未開拓領域の一つを協同研究する、夫々一人前の科学者から成る研究グループを夢見て来た。この科学者達は一人の偉い行政官の部下として組織されるのではなくて、その領域を全体として理解し、その理解に依ってお互いに力付け合いたいという精神的な欲求に依って結集するのである。

6. われわれが、共同研究の領域と、その各自の分担を選ぶよりもずっと以前にこれらのことについてのわれわれの考えかたは一致していた。

7. (新しい) 段階の決定的な要因となったものは戦争であった。私はだいぶ以前から、国家に非常事態が起ったときには次の二つのことによって私の任務はきめられてしまうであろうと予想していた。それは私がヴァネヴァー・ブッシュ (Vannevar Bush) 博士による計算機の研究計画に密接に関係していたことと、私自身がリー博士とともに電気回路網の設計を研究していたことである。事実、両者とも重要なも

のであることがわかった。

8. 1940年の夏、私は偏微分方程式を解くための計算機について一生懸命に考えていた。私は長いあいだ、そのような計算機に興味をもっており、常微分方程式がブッシュ博士の微分解析機で十分扱いうるのに、偏微分方程式を扱うのが困難であるのは、1個以上の変数をもつ函数をいかに表示するかに主要な問題があることに気づいていた。そして、テレビジョンは、それが単に1個の産業として成立することよりも、むしろこうした新しい技術を導入することによって、工学自体の進歩をうながすにちがいないであろうことを確信していた。

9. 走査法を採用すれば、扱いうるデータの数を、常微分方程式の問題の場合のデータの数に比べて、飛躍的に増大させるにちがいないことは明らかであった。このようにデータの数を多くした場合、適当な時間内に相応の結果が得られるようにするためには、基本的動作の速度を極力高いものにし、その高速動作の連続を、本質的に速度の低い他の動作で遮断したりしないようにすることが必要になる。また基本的動作を何回となくくりかえしているうちに誤差が累積し、全体としての精度をぶちこわしたりすることのないように、個々の動作の精度を十分高いものにしておかなければならない。それには次のような方針をとらなければならないと思われた。

(1) 計算機の中心部分である加算と乗算の装置は、ブッシュの微分解析機に用いられたような計量式のものでなく、通常に加算器のように計数式のものとする。

(2) これらの機構は本質的にはスイッチ操作を行う装置であるけれども、高速に動作させるためには、歯車や機械的継電器でなく、電子管で構成すること。

(3) ベル電話研究所がもっているある機構に採用された方法にしたがって、加算・乗算などの計算には10進法よりも2進法を用いたほうが経済的であろうということ。

(4) 演算の全過程を計算機の内部に置いて、データが計算機にはいり、計算の最終結果がとりだされるまでのあいだ、人が介入しなくてもよいようにすること。またそのために必要な論理的判断は、計算機が自ら行うこと。

(5) 計算機は、データを貯える装置を内蔵すること。この装置はデータを高速度で記録し、抹消すべきときまで確実に保持し、必要なときには高速度でデータをよみとり、あるいは抹消して、直ちに新しいデータを貯えることができるようにすること。

10. これらの提案は、戦争となった場合には使用される見込みがあるとして、その実現方法のプランとともにブッシュ博士に送られた。その当時の戦争準備期の頃には、これらの提案はそれほど優先的にも扱われず、直ちにとりあげられて十分研究されるということもなかったようである。しかし、これらは今日の超高速度計算機にとりいれられている考えかたのすべてをつくしているのである。

これらの考えは、その当時多くの人びとが抱いていた思想のうちにあつたのであって、私一人だけでそういうことを考えついたとは、すこしも主張するつもりはない。

11. これらの考えかたが有用であることが後からわかったのであるが、私の覚書きがそういう考えかたを技術者間にひろめるのに、何かの役に立ったのならそれはそれでよかったと私は思っている。とにかく、・・・この考えかたは、神経系の研究に関連してみても、興味あるものなのである。

12. そのようなわけで、この研究は机の上に放置されてしまった。後になってこれも無意義ではなかったことがわかったけれども、当時、ローゼンブルース博士も私もただちにこの方面の研究にとりかかるということではなかった。

13. われわれが実際に共同研究態勢をととのえたのは、同じような事情の下に企画された他の戦時研究計画からであった。第二次大戦の初期におけるドイツ空軍の優勢と、イギリスの守勢とから、多くの科学者が高射砲の性能向上をはかろうとしていた。戦争前でさえも、航空機の高速化が、従来の対空火器照準法を全く時代おくれなものにしてしまい、火器の制御装置の内部に必要な計算機構一切を組みこむ必要のあることがはっきりわかっていた。

14. しかし、それはきわめて困難なことであった。今まで扱ってきた標的とちがって、飛行機は速度が、それを打ち落とそうとする砲弾の速度にだいぶ近くなってきたからである。したがって、標的に狙いを定めて砲弾を発射するというのではなく、砲弾と標的とが、ある時間後に空中のどこかでぶつかるように発射する必要がある。それで飛行機の、未来の位置を予測する方法を考えださなければならないこととなった。

15. その最もかんたんな予測法は、飛行機のそのときまでの進路を直線的に延長する方法である。これはなかなか良い方法である。飛行機の立場からいえば、機体を急転したり、カーブしたりすればするほど、有効な速度はそれだけ小さくなり、任務遂行のための時間が短くなるとともに、それだけ危険領域に長く滞空することになる。だから他の条件が同じなら、飛行機はできるだけまっすぐに飛ぼうとするであろう。しかし、最初の砲弾が炸裂しだせば、“他の条件が同じ”ではなくなる。そうすると操縦士は多分ジグザグしたり、いろいろな高等飛行をしたり、何かの方法で逃避行動をとろうとするであろう。

16. もしこの種の行動が完全に操縦士の意のままになり、操縦士が、たとえばポーカーの名人のように、巧みに機会をとらえることができる人であれば、砲弾のとどく前に、意表をつく位置に出てしまい、われわれとしてはひじょうにむだ弾の多い弾幕砲火に対抗する以外に、この操縦士を射ち落とす見込みがないことになる。

17. ところが操縦士のほうでも、完全に意のままには行動することはできないのである。まず第一に、操縦士はひじょうな高速度で飛んでいる飛行機にのっているのであるから、その進路を急に曲げようとするれば加速度のために意識不明に陥り、それどころか飛行機を破壊してしまうかもしれない。さらに、操縦士は、操縦翼面を動かすことによってのみ飛行機を操縦できるのであって、翼面の変化によって空気の流れの状態が変わりきるまでにはいくらか時間がかかる。流れが完全に変わっても、単に飛行機の加速度が変えられるだけであって、それが最終的に効果をあらわすまでには、この加速度変化がまず速度変化に変わり、次に位置変化が起ることになるのである。さらに、戦争状態で緊張している飛行士は、臨機応変の複雑な自発的行動をとる気分にはならないものであって、それまでに訓練を受けた型通りの行動ですませてしまいがちのものなのである。

18. そんなわけで、飛行進路の曲線の予測の問題の研究は、それが制御装置に実際に使われて、ぐあいの良い結果を生みだすものであろうとなかろうと、考慮する価値のあるものとなる。曲線の将来を予測するということは、その過去にある種の演算操作を施すことである。

19. どんな装置で組立てたところで、真の予測演算を機械的に実現することはできないが、それにかなり近い演算があって、それは装置によって実現することができる。私が、マサチューセッツ工科大学のコードウェル (S・Caldwell) 教授に、そういう演算機構は作ってみる価値がありそうだと話したところ、彼はただちに、ブッシュ博士の微分解析機を出来あいのモデルとし、それを使って要望されていた火器制御装置を試作してみようといいだした。その結果は、「サイバネティクス」の本論に述べてある通りである。

20. そんなわけで私自身、戦時研究に従事することになり、ビッグロウ (J・H・Bigelow) 氏と私とは、予測理論と、その理論を実地に応用する装置製作の協同研究にあたったのである。

21. こうして私は、第一に複雑な計算の遂行、第二に未来の予測という、人間特有の頭脳活動のお株を奪ってしまうための電気機械系の研究に、心たたび従事することとなった。

22. この打ちの第二の点については、人間のある種の機能の動作を論じないわけには行かない。なるほど、或る種の火器制御装置では、レーダーによって衝撃波そのものが直接、照準器に入ってくるが、もっとふつうのものでは、人間の照準手が、火器制御装置といっしょに、その一部分であるかのように動作する。したがって照準手のはたらきを機械に含めて数学的に扱うためには照準手の特性を知ることが必要になる。さらに、標的である飛行機も、人間によって操縦されており、その動作特性を知らなければならない。

23. ビゲロウ氏と私とが得た重要な結論は、随意運動においてとくに重要な要素は、制御工学の技術者が“フィードバック”と呼んでいるものであるということであった。・・・ここでは次のように説明しておけば十分であろう。われわれが、与えられた一つの型通りに或るものに運動を行わせようとするとき、その運動の原型と、実際に行われた運動との差を、また新たな入力として使い、このような制御によってその運動を原型にさらに近づけるということである。

24. たとえば、船の或る種の操舵装置は、蛇輪の位置の読みを舵柄からオフセットに送り、舵柄が操舵装置の弁を開くような機構になっている。そのとき舵柄は、弁制御用オフセットの他端を中央部にもってくるように動作し、舵輪の位置を舵柄の位置として指示するのである。舵柄の運動を妨げる摩擦、あるいは動作を鈍らせるような力は、一方の弁への蒸気流入量を増加し、他方の弁への流入量をへらすように動作し、その結果、舵柄を所望の位置にもっていくトルクを増大させることになる。このようにフィードバック系は、操舵装置の動作を、負荷にあまり影響されないものになっているのである。

25. 他方、動作の遅延などが或る条件下におかれると、フィードバックがききすぎて舵がまわりすぎ、次の瞬間にはフィードバックの作用によって反対方向にまわりすぎることになり、そのあげく操舵機構がはげしく振動する、いわゆる“乱調” (hunting) を生じて、しまいにはこわれてしまう。マッコル (McColl) 氏の著書などにはフィードバックの作用が詳細に論じてあり、それが有効に使えるための条件やうまく働かなくなるときの条件ものべてある。この現象は、定量的にも完全によくわかっている現象である。

26. たとえば、私が1本の鉛筆を拾いあげようとするとしよう。そうするには私は筋肉を動かさなくてはならない。しかし少数の解剖学専門家をのぞいては、だれもそれがどの筋肉であるか知ってはいない。また、専門家でさえも、どういう筋肉が次々に収縮していくかを意識しながら動作できる人はほとんどないであろう。われわれの意図するところは、単に鉛筆を拾いあげることなのである。われわれがいったんそうしようと決心してからの動作は、大ざっぱに言えば、手先と鉛筆との距離が動作の各段階ごとに減っていくように進行する、ということになる。もちろん、動作がそういうふうに意識されるわけではない。

27. このような動作を行うためには、意識するとしないとに拘らず、われわれが鉛筆を拾うという目的にまだ到達していない程度が、各瞬間ごとに神経系に報告されなければならない。もし鉛筆を目でみているなら、この報告は、少くとも部分的には視覚的なものであろう。

28. しかし、さらに一般的には、この報告は筋肉運動知覚によるもので、最近よく使われる言葉でいえば、自己受容性 (proprioceptive) の感覚によるものである。もし自己受容感覚が不十分な場合、しかも視覚あるいは他の感覚で自己受容感覚の作用を代行し得ないときには、われわれは鉛筆を拾うという動作ができず、いわゆる運動失調という状態におちいるであろう。この種の運動失調は脊髄ろうとうという型の中樞神経系梅毒によく見られるが、この病気では脊髄神経を介して伝達される筋肉運動知覚が多かれ少なかれ失われているのである。

29. しかしながら、過度のフィードバックも不十分なフィードバックと同じく、生体の組織的な運動を行うためには、ひじょうに不利な条件となるはずである。こういう見通しをえたので、ビッグロウ氏と私とは、このひじょうに特殊な疑問をローゼンブルース博士に提出した：“患者が鉛筆を拾いあげるといような、ある随意運動をしようとするときに、目的の物からいきすぎてしまい、どうにも止められない振動をおこすというような病理学的症状があるだろうか”。これに対し、ローゼンブルース博士は、それは企画震顫 (purpose tremor) というよく知られている症状であって、しばしば小脳の障害に関連しているものだとして即答してくれた。

30. このようにしてわれわれは、少なくとも、ある種の随意運動の性質に関するかせつについて、最も重要な確証を見出した。われわれの見解が神経生理学者の通説よりかなり優れたものであったことは注目してよい。中枢神経系はもはや、感覚から入力を受けて筋肉に放出するだけの独立な器官であるとは思えなくなった。

31. それとは反対に、中枢神経系のきわめて特徴的な或る種の機能は、循環する過程としてのみ説明できるものである。この循環する過程は、神経系から発して筋肉にゆき、自己受容性の感覚を伝える末梢神経か、別な特殊な感覚であるかを問わないが、いずれにせよ感覚器官を通して、再び神経系にもどってくるものである。このことは、神経やシナプス (synapse) の個々の作用のみでなく、神経系全体の機能に関する神経生理学のその方面の分野の研究に一進歩をもたらすものと、われわれには思われたのである。

32. われわれ三人は、この新しい見解は、論文とするだけの価値があると思い、まとめ上げて発表した。ローゼンブルース博士と私とは、この論文が膨大な実験研究の計画を述べるだけにとどまるであろうから、もしわれわれが科学の諸部門にまたがる研究組織を実現できるようになるとすれば、この問題こそわれわれの協同研究の中心課題にうってつけのものであろうと考えた。

33. だいぶ以前から、ビッグロウ氏と私自身とが感じていたことは、制御工学と通信工学との問題が、たがいに切りはなし得ないこと、またこれらの問題が電気工学の技術のみに関するものではなく、むしろ通報 (message) という、はるかに基本的な概念に関するものであるということであった。ここにいう通報とは、時間的に分布した測定可能な事象の離散的あるいは連続的な系列のことであって、電氣的・機械的な方法、あるいは神経系などによって電送されるもの一切を含んでいる。これはちょうど統計学者が時系列 (time series) とよんでいるものにほかならない。

34. 通報の将来の予測は、その過去に、ある種の演算を施して行いするのであるが、この演算子は数学的な計算または機械的か電氣的な装置によって実現される。これに関連してわれわれが見出したことは、はじめに考えていた理想的な予測装置には、およそ相容れない2種の誤差がつかまとうことであった。われわれが最初に設計した予測装置は、望むままの近似度をもって、ひじょうに滑らかな曲線を予測できるものであったが、このように精密なものにするには、常に感度増大という犠牲をはらわなければならなかった。

35. 滑らかな波形をうるという点ですぐれている装置は、その滑らかさから少しずれても発振しやすく、またそのような発振は減衰しにくいのである。こうして滑らかな波形を良く予測するためには、粗い曲線を最大限に良好に予測する場合よりも精巧で感度のよい装置が必要である。与えられた場合にどんな装置をえらんで使用するかは、予測すべき現象の統計的な性質によってきめなければならない。

36. この相互に関係しあう誤差は、ハイゼンベルグ (Heisenberg) の量子力学に述べられている位置と運動量の測定が互に相反するという問題、いわゆる不確定性原理と呼ばれるものと相通するものであると思われた。

37. 最適の予測を見出す問題は、予測すべき時系列の統計的な性質を考慮してはじめて解かれるということがわかってしまった以上、予測の理論で初めは困難と思われていたことを逆に有効な解決手段に変えて

しまうのはそう困難ではなかった。時系列の統計を仮定すれば、与えられた方法による与えられた時間後の予測の二乗平均誤差の表示式を得ることができる。この表示式が得られれば、最適な予測を求める問題を、ある特別な演算子の決定問題におきかえてしまうことができる。この演算子はそれによってきまる或る特別な正の量を極小にするようなものである。この種の極小値問題は、変分法というよく知られた数学の一部門の問題になり、変分法にはよく知られた計算方法がある。従って、時系列の統計的性質がわかりさえすれば、変分法の計算方法を使って、時系列の将来を予測する問題の最良の解の表示を求めることができ、さらにこの解を装置として物理的に実現することも可能となったのである。

38. このことがわかってからは、工学の少くともこの方向の設計法は様相を一変した。一般に、工学における設計というものは、科学 (science) というよりもむしろ技術 (art) であると考えられてきた。この種の問題を極小値問題に直すことにより、われわれは、はるかに科学的な根拠に立った設計法を確立したのである。しかもこれは単なる孤立した問題ではなかった。工学の全領域において、やはり変分法の手法によって説きうる同様な性質の設計問題があることがわかったのである。

39. われわれは他にも類似の問題を同じ方法で取りあげて解決した。それらの中に濾波器 (wave filter) の問題がある。通報を電送する場合、“背景雑音” (background noise) と呼ばれる外部からの妨害によって、通報の伝達に誤りを生ずることがしばしばある。そのような場合、妨害をうけた通報を演算回路にかけて、もとのままの通報、あるいはある時間だけ後の、または前の通報をとり出すという問題がある。このような演算子、あるいはそれを実現する装置の最良なものを設計するには、通報と雑音それぞれ単独および両者同時の統計的性質を知る必要がある。従来は、経験と、行き当たりばったりともいうべき方法で行われていた濾波器の設計を、われわれは完全に科学的根拠に立って行うことができるようにしたのである。

40. このようにしてわれわれは、通信工学における設計の問題から、統計力学の一分野と見られる一つの統計的な科学をつくりあげることとなった。統計力学の考え方は、事実、過去 1 世紀以上にもわたって科学のあらゆる分野に入りこんできている。

41. . . . 現代物理学において統計力学がこのように重要な地位を占めるにいたったことは、時間というものの性質の解明にも、きわめて重要な意義をもたらしたのである。

42. しかし、通信工学の場合には統計的要素のもつ意義は一見して明らかである。すなわち情報を送るということは、二つのことから (yes か no) のなかのどちらか一つを送るということによって成り立つ。伝達すべきことが一つだけしかないならば、通報を送るまでもない。通報を全く送らないのが最も能率よく、最も簡単に、そのことを伝達する方法になる。

43. 電信や電話は、それらの伝達する通報が、過去によって完全には決定されない変化をたえず行っているときに、その機能をよく果しているのであって、これらの通報の変化が一種の統計的規則性をもつときに、はじめて効果ある設計をすることができる。

44. 通信工学をこのような立場から把握するには、“情報量” なるものについての統計的な理論を発展させなければならなかった。この理論では、同等に確からしい二つのことから、そのうちの一つを 1 回選択するときに伝えられる情報の量を情報量の単位とする。

45. この着想は、統計学者フィッシャー (R・A・Fisher)、ベル電話研究所のシャノン (Shannon) 博士、および私を含む数人の研究者がほとんど同時に考えついたものである。フィッシャーのこの研究の動機は古典的統計理論からであり、シャノンの動機は情報の符号化 (coding) の問題からであり、著者の動機は電気濾波器による雑音と通報の分離の問題からであった。

46. ついでに、この方面の私の考察のあるものは、ロシア語でかかれたコルモゴフ (Kolmogoroff) の初期の研究と関係があることをつけ加えておこう。もっとも私の研究の相当な部分は、私がロシア学派のこれらの研究に着目する以前になされたのであった。

47. 情報量の概念は、統計力学における古典的なエントロピーの概念ときわめて自然に結びついている。ある系の情報量はその秩序の度合いの測度と考えられるが、それと同様に、ある系のエントロピーとは不秩序の度合いの測度とも考えられる。従って一方の正負の符号を変えさえすれば他方になるのである。このような見かたをすすめていけば、熱力学の第二法則に関するいろいろな考察や、いわゆるマクスウェルの魔の存在の可能性の研究が生まれてくる。この種の問題はまた酵素やその他の触媒に研究にも独立に現われてくるのであって、それを研究することは新陳代謝や生殖作用のような生物体の基本現象を正しく理解するのにも重要である。生命の第三の基本現象、すなわち刺激に対する感受性は通信理論の領域に属し、またわれわれが今論じた考えかたの体系の中に含まれていることになる。

48. このようにして 4 年ほど前 (注：1957 年) にはすでに、ローゼンブルース博士と私のまわりの科学者のグループは、通信と制御と統計力学を中心とする一連の問題が、それが機械であろうと、生体組織内のことであろうと、本質的に統一されるものであることに気づいていた。

49. 他方、われわれはこれらの問題に関する文献に統一のないこと、共通の術語のないこと、またこの分野自身に対する名前一つないことに甚だしく不自由を感じた。この分野の名前についてわれわれは熟考した結果、既存の術語はみなどこか一方にかたよっていて、この領域の将来の発展まで含めてあらわすには不適當であるという結論に達した。そこで科学者がよくするように、ギリシャ語から一つの新造語を造って、この欠を補わざるを得ないということになった。

50. それでわれわれは制御と通信理論の全領域を機械のことも動物のことも、ひっくるめて“サイバネティクス” (Cybernetics) という語でよぶことにしたのである。これは“舵手”を意味するギリシャ語からつくられた語である。この言葉をえらんだ理由の一つは、フィードバックの機構に関する最初の重要な研究論文が 1868 年にクラーク＝マクスウェルによってかかれた调速機 (ガバナー、governer) に関するものであって、さらに governer が“舵手”を意味するギリシャ語のラテン語の訛りから生まれたものであることを想起したいからであった。また、船の操舵機はフィードバックの機構のうち最も古く、しかも最も良く発達した形式のものであったという事実も述べておきたい。

51. このようにサイバネティクスという言葉は 1947 年の前にはなかったわけであるが、この分野の初期の発達について述べるときにも、この言葉を用いた方が便利である。1942 年の頃から、この研究はいろいろな方面から進展し始めた。まず第一にピゲロウ、ローゼンブルースと、ウィナーの協同研究の概要が、ジョサイア＝メイシー財団の主催で 1942 年ニューヨークに開かれた神経系の中樞性制止 (central inhibition) の問題の会合でローゼンブルース博士によって発表された。その会合にはイリノイ大学医学部のマッカロ (Warren McCulloch) 博士が出席していた。彼はすでにローゼンブルース博士と私とに連絡をとっており、大脳皮質の組織の研究に興味をもっていた。

52. この時期に、サイバネティクスの歴史に繰り返しあらわれる論理数学の影響がはいってくる。科学史の中からサイバネティクスの守護聖人をえらぶとすれば、それはライブニッツであろう。ライブニッツの哲学の中心は、普遍的記号法と推理の計算法の密接に関連した二つの概念である。これらの概念から今日の数字の記号法と記号論理とが生まれたのである。算術がそろばんか卓上型計算機を経て現代の超高速計算機にいたるまでの計算機の機構の根幹をなしているのと同様に、ライブニッツの“推理計算法” (calculus ratiocinator) は“推理機械” (machina ratiocinatrix) の萌芽を含んでいたのである。事実、ライブニッツ自身、かれの先駆者パスカル同様、金属部品で計算機械をつくることに興味をもっていた。したがって論理数学の発達をうながしたと同一の知的衝動が、思考過程の機械化をみちびいたとしても少しも驚くに当たらない。

53. 数学の証明がわれわれのたどり得るものであれば、それは有限個の記号で書きあらわせるものであるはずである。これらの記号法は、無限の概念を用いることがあるかもしれないが、それはたとえば数学的帰納法における場合のように、実は有限個の過程を積み重ねればすむものである。数学的帰納法においてはパラメータ n に依存する定理をまず $n=0$ について証明し、次に $n+1$ の場合が n の場合から導かれることを示す。それによって、 n のすべての自然数値に対してその定理が成立することを証明するのである。また、演繹法の推理の規則は有限個しかない。あるいは無限の概念を使うために、これらの規則が無限にあるように見えるかもしれないが、無限の概念自身有限個の言葉で表わされるのである。要するに、数学的論理学の発達には、計算機の機能に限界があるのと同種の制限があることが、ヒルベルト ((Hilbert)) のような名目論者にも、ワイル (Weyl) のような直観主義者にも、ひとしく明らかとなってきたのである。・・・カントル (Cantor) やラッセル (Russell) の逆理も、この見地から解釈することさえできるのである。

54. 私自身ラッセルについて学んだことがあり、彼の影響は非常に多く受けている。シャノン博士は古典的なブール代数を、電気工学における系電気回路に応用する研究によって、マサチューセッツ工科大学で博士号を得た。チューリング (Turing) は計算機が論理的にどんなことができるかをおそらく一番最初に、知的実験として研究した人であるが、戦時中は電子工学研究者として英国政府に勤め、現在はテディントン (Teddington) の国立物理学研究所にあって、新しい型の計算機建造計画の責に任じている。

55. 論理数学の分野からサイバネティックスの研究に転じたもう1人の若い研究者はピッツ (Walter Pitts) である。かれはシカゴにいるカルナップ (Carnap) の弟子であったが、ラシェフスキー (Rashevsky) 教授を中心とする生物物理学者の学派とも接触を保っていた。ついでながらこのグループは、数学的な考え方をする研究者たちの関心を、生物科学がもっている可能性に向けるのにひじょうに貢献したのである。もっとも、このグループの人たちは、エネルギーやポテンシャルなど、古典物理学的な方法ばかりを主として用いているので、神経系のような、エネルギーから見て閉じていない系の研究では、最良の結果に到達できないのではないかと批判もある。

56. ピッツ氏は幸いにもマッカロの影響を受けることになり、2人は、神経繊維がシナプスによって結びつけられて系をなし、全体としてある機能特性をもつにいたるまでについての研究を、いち早く取りあげた。彼らはシャノンとは独立に、本質的には継電器回路の問題に帰しうる問題の研究に、論理数学を適用したのである。彼らはシャノンの初期の研究ではあまりはっきりしなかった次のような要素を付け加えた。それは確かにチューリングの考えから示唆されたものであろうが、時間をパラメータとして使うこととか、循環回路を含む網状構造の考慮とか、シナプスなどによる時間的遅れなどである。

57. 1943年夏に、私はボストン市立病院のレットヴィン (J・Lettvin) 博士に会ったが、彼は神経の機構にひじょうに興味をもっていた。彼はピッツ氏の親しい友人であったので、ピッツ氏の研究のあることを私に教えてくれた。彼はまたピッツ氏にボストンにきて、ローゼンブルース氏や私と知己になるようにすすめた。そんなわけで、われわれは、彼を喜んでグループに迎えたのである。

58. 1943年秋、ピッツ氏はマサチューセッツ工科大学にきて、私といっしょに研究し、数学的基礎を固めて、サイバネティックスの研究をすることとなった。もっともその頃この新しい科学は、確かに生まれてはいたけれども、まだ名前はないのであった。

59. 当時、ピッツ氏はすでに論理数学と神経生理学には精通していたが、あまり工学の方面とは接触する機会をもっていなかった。特に彼はシャノンの研究を知っていなかったし、電子工学によって可能となるいろいろなことも知っていなかった。だから私が最近の真空管の見本を示して、ニューロン系の等価回路を実現するためにはこれが理想的なものだと説明したとき、彼はひじょうに興味を感じたようであった。このとき以来、われわれに明らかになったことは、つぎつぎにスイッチの操作を行う超高速計算機が、神経系に生ずる問題をほとんど理想的にあらわすモデルとなりうるにちがいないということであった。ニュー

ロンの神経興奮の発火は、起こるか、まったく起こらないかという悉無律に従う性格 (all or-none character) をもつが、これはちょうど2進法で0か1かの数字の一つを、二者択一的に1回えらぶのと同じことである。そして計算機には2進法をもとにするのが一番よいとは、われわれが前から考えていたことであった。またシナプスは、他の特定のニューロンからの出力のある組み合わせが、次のニューロンの神経興奮を発火させるにかなった刺激であるかどうかを決定する機構にほかならない。計算機の機構でも、ちょうどそれに対応するものがなくてはならない。動物における記憶の本質とその多様性を説明する問題は、計算機械の中に記憶装置を人工的につくる問題に対応するものとなる。

60. そのころ、計算機を作ることは、ブッシュ博士の最初の意見が示唆していた以上に戦争遂行に必須のものであることがわかってきたので、私の以前の勧告書が示唆したものとあまりちがわない線に沿って、方々でその建造がすすめられていた。ハーバード大学、アバディーン試射場 (Aberdeen Proving Ground)、ペンシルヴェニア大学ではすでに計算機を建造中であつたし、プリンストンの高級学術研究所とマサチューセッツ工科大学でも、まもなくこの方面の研究をすることになっていた。この研究計画においては、機械的構成から電氣的構成へ、10進法から2進法へ、機械的継電器から電氣的継電器へ、人による操作から自動的操作へと、だんだんに進歩してきた。要するに古い機械よりは新しいものほど、私がブッシュ博士に送ったメモの考えと一致してきたのである。これらの分野に興味をもっている人々のあいだには絶えず行き来があつた。われわれはわれわれの考えを同僚、特にハーバード大学のエイケン (Aiken) 博士、高級学術研究所のノイマン (J. von Neumann) 博士、ペンシルヴェニア大学の Eniac と Edvac をつくったゴールドシュタイン (Goldstine) 博士らに伝える機会をもった。いたるところでわれわれは理解ある態度で受け入れられ、技術者の語彙はまもなく神経生理学者や心理学者の術語と混合していった。

61. このような進展をみたころ、フォン=ノイマン博士と私は、われわれが今日サイバネティクスと呼んでいる分野に興味をもつ人全部を呼び集めて、連合の会合を開くことが望ましいと思った。1943年から1944年にかけての冬、プリンストンでその会合が開かれ、技術者、生理学者、数学者をそれぞれ代表する人々がみな出席した。ローゼンブルース博士は、ちょうどメキシコの国立心臓医学研究所の生理学研究所長の地位につくよう招聘を受けたばかりのところであつたので出席できなかったが、マッカロ博士とロックフェラー研究所のローレンテ=デ=ノー (Lorente de No) 博士とは、生理学者を代表して出席した。エイケン博士は出席できなかったが、計算機の設計者の何人かのグループが参加し、ゴールドシュタイン博士もその1人であつた。数学者としては、フォン=ノイマン博士、ピッツ氏および私がいた。生理学者等は彼らの立場からサイバネティクスの問題を扱って協同して発表し、計算機設計者も、同じく彼らの研究方法と目的とを発表した。会議を終ったとき、出席者のすべてに明らかとなつたことは、異なつた分野に働いている研究者のあいだにも、実質的に共通な考え方の基盤があるということ、またどの分野の人でも、他の分野の人々によってすでに発展させられている概念を利用できる場合があるということ、また共同の語彙を持つよう何とかしなければならぬということなどであつた。

62. これよりだいぶ前、ウィーヴァー (Warren Weaver) 博士によって指導されていた戦時研究グループは、ビッグロウ氏と私の予測装置と濾波器に関する研究を、始めは秘密の、後には限定版の文書として刊行した。曲線の予測を行う装置は、対空兵器に付随する条件に適合しなかつたので、そのために特別な装置が設計されるということではなかつたが、予測の原理そのものは完全であり、実用的でもあつたので、政府は補整やそれに関係のある分野の問題を解決するのに使つていた。特に、変分法の問題から導き出されるある型の積分方程式は、導波管の問題や、その他多くの応用数学の面白い問題にも出てくることが示された。このように戦争の終了までには、いろいろな方面で予測理論や通信工学を統計学的に扱うといった考えは、アメリカおよびイギリスの大部分の統計数学者や通信技術者にはなじみ深いものになつていた。今は絶版になつたが私が政府のために書いた文書とか、またレヴィンソン (Levinson)、ウォールマン (Wallmann)、ダニエル (Daniell)、フィリップス (Phillips)、その他の人々によって文献の不備をうめるために書かれたおびただしい数の解説的論文が戦争中に現われた。私自身、自分のした研究を記録として残しておくために数年にわたつて数学的な長い解説的論文を準備したが、私にも何と

もならない事情があって早く発刊することができないでいる。1947年春、アメリカ数学会と統計数学会の連合大会がニューヨークで開かれ、サイバネティクスに密接な関係のある分野の立場からみた確率過程の研究発表があった。その会の後、私はそれまでに書きあげた原稿をイリノイ大学のドゥーブ (Doob) 教授に手渡し、彼流の記号法と、彼の考えかたによって発展させたものをアメリカ数学会の数学展望叢書 (Mathematical Surveys Series) の中の一つとして出版するように頼んだのである。私はすでに1945年の夏、マサチューセッツ工科大学の数学科で、私の研究の一部を敷衍して講義をした。そのころ、私の古い学生で研究にも協力してくれたことのある、リー博士が中国から帰ってきた。彼は1947年秋にはマサチューセッツ工科大学の電気工学科で濾波器などの装置の新設計法の講座を担当し、その講義録を本にしようと計画している。同時に、絶版になっていた政府文書も再版されようとしている。

63. 記述のようにローゼンブルース博士は、1944年初頭メキシコにもどった。1945年の春になって私はメキシコ数学会からその年の6月ワダハラ (Guadalajara) に開かれることになっていた学会に出席するよう招待をうけた。既述のヴァリヤルタ博士の下にあるメキシコ学術会議からも、重ねて招待があった。ローゼンブルース博士は、私にいっしょに研究をやらないかとすすめてきたし、またチャベス (Ignacio Chavez) 博士を所長とする国立心臓医学研究所からも招待があったのである。

64. 私はそのときメキシコに約10週間滞在した。ローゼンブルース博士と私とは、キャンノン博士ともすでに討議してあった一連の研究をつづけることになった。キャンノン博士はその当時ローゼンブルース博士の許に滞在していたが、不幸にしてそれが最後となってしまった。この研究は、一方においては癲癇の強直 (強縮) 性 (tonic)、間代性 (clonic) および単相性 (phasic) の収縮と、他方においては心臓の強直性痙攣、搏動、震顫 (福永注: しんせん) のあいだの関係を調べてみることであった。心臓筋肉は鋭敏な組織であって、神経組織と同様に伝導機構の研究に役立つものであり、さらに心臓の筋肉繊維の吻合 (anastomoses) と十字交叉 (decussations) とは、神経シナプスの問題よりも現象としては単純であるとわれわれは考えた。チャベス博士のひじょうな好意に対しては感謝にたえない。研究所の方針としてはローゼンブルース博士を心臓の研究だけに制限するようなことは決してなかったが、われわれがちょうど研究所の主目的に貢献することができたのはありがたいことであった。

65. われわれの研究は二つの方向をとった。すなわち、二次元あるいはそれ以上の次元をもつ均一な伝導媒質における伝導度と遅延 (latency) の研究、もう一つは伝導繊維の不規則な網状組織の伝導特性の統計的研究である。前者から心臓搏動の基礎理論が導かれ、後者は震顫を理解するためのいくつかの助けとなった。この両面の研究をわれわれはとりまとめて発表した。われわれの初期の研究成果は相当の訂正と補足を要することがわかったが、心臓搏動の方の研究はマサチューセッツ工科大学のセルフリッジ (Oliver G. Selfridge) 氏によって修正されつつあり、心臓の筋肉の網状組織の研究に用いた統計的手法は、現在ジョン=サイモン=グッゲンハイム (John Simon Guggenheim) 財団の特別研究員となっているウォルター=ピッツ氏により拡張されて、ニューロン網を取り扱うこともできるようになった。実験的研究はメキシコの国立心臓医学研究所のラモス (F. Garca Ramos) 博士とメキシコ陸軍医学校の援助を受けて、ローゼンブルース博士が続行している。

66. メキシコ数学会のワダハラにおける会合において、ローゼンブルース博士と私とは研究成果の一部を発表した。協同研究に関するわれわれの初期の計画は実行可能なものであるという結論をわれわれはすでに得ていたが、研究結果を大勢の人々に発表する機会を得たということはひじょうに幸いであった。1946年春、マッカロ博士はジョサイア=メイシー財団と打ち合わせて、フィードバックの問題に関する一連の会合の第1回をニューヨークで開催する準備を整えた。これらの会合は財団を代理するフランク=フレモント=スミス (Frank Fremont Smith) 博士によって組織され、メイシー流にひじょうに能率的にすすめられた。すなわち種々の関係分野の中から約20名をこえない程度のあまり多くない数の研究者を一堂に集め、連続する2日間、形式ばらずに研究発表を行い、参加者同志の意見のちがいが無くなり、同じ線に沿って考えられるようになるまで討論し、食事をともにするというやりかたであった。

67. われわれの会合の中核は 1944 年にプリンストンに集った連中であつたが、マッカロ博士とフレモント＝スミス博士とは、この領域が心理学や社会学にも密接な関係のあることを見抜き、数名の一流の心理学者・社会学者・人類学者を推薦してグループに参加させた。事実、心理学者を包含する必要のあることは始めから明らかであつた。神経系を研究するものは、人間の心理を無視できないし、心理を研究するものは神経系を無視し得ない。過去の心理学の大部分は、特別な感覚器官の生理学以上の何ものでもなかつた。サイバネティクスが心理学に導入した重要な考えは、これら特別な感覚器官に連絡している高度に特殊化した大脳皮質部の生理学と解剖学とに関するものである。当初からわれわれが予想したことは、ゲシュタルトの知覚の問題、あるいは普遍的概念 (universals) の知覚形成の問題は、この種のものであるらうということであつた。われわれが正方形を見て、その位置や寸法や向きにとらわれずに正方形であると認識する機構は何であらうか？ そのような点でわれわれを助け、またわれわれの考えかたが何らかの意味で心理学者の役に立つようと、シカゴ大学のクリューフェル (Klüver) 教授、マサチューセツ工科大学の故レーヴィン (Kurt Lewin) 博士、ニューヨークのエリクスン (M. Ericsson) 博士のような心理学者にも参加してもらつた。

68. 社会学や人類学についていえば、情報や通信は、個人の内部においてもそうであるが、共同社会の場合においていさう組織のメカニズムとして重要な意味をもつことは明らかである。蟻の社会のような共同体の理解は、蟻同志の通信手段を完全に研究しなくてはできないことであるが、幸いこれについてはシュナイラ (Schneirla) 博士の援助を得た。人間の社会組織の同様な問題については、人類学者のベイトソン (Bateson) 博士とマーガレット＝ミード (Margaret Mead) 博士の援助を求めた。また高級学術研究所のモルゲンステルン (O. Morgenstern) 博士からは社会組織の経済理論面の重要な分野で助言を与えられた。ちなみに、彼にはフォン＝ノイマン博士との共著のゲームに関するきわめて重要な著書がある。それはサイバネティクスとは同じではないが、それに密接に関連した研究方法の立場からみた、社会組織のひじょうに面白い研究である。レーヴィン博士等は世論標本化の理論と世論形成の実際についての新研究を発表した。またノースラップ (F. C. S. Northrup) 博士はわれわれの研究成果の哲学的意義を評価分析することに興味をもっていた。

69. 以上はわれわれのグループの完全なリストを示すものではない。われわれはグループの人数をもつとふやし、ビゲロウやサベッジ (Savage) のような技術者・数学者、またフォン＝ボーニン (von Bonin) やロイド (Lloyd) のような神経解剖学者・神経生理学者等に参加してもらつた。1946 年春に開かれた最初の会合は、おもにプリンストンの会に出席した人たちによる啓蒙的論文が発表され、出席者全員によってこの領域の重要性の一般的な評価が行われた。その結果、サイバネティクスの背後にある思想は出席者にとってきわめて重要かつ興味あるものであることがわかつたので、その後もつづけて 6 ヶ月ごとに会合を開くことになった。またあまり数学になれていない人々のため、次の総会までの間に、関係のある数学的概念の本質を、できるだけわかりやすい言葉で説明するための小規模な会合を開くことになった。

70. 1946 年夏私は、ローゼンブルース博士との協同研究をつづけるため、ロックフェラー財団の援助と国立心臓医学研究所の好意により、メキシコにもどつた。われわれは今度は神経の問題を、直接フィードバックの立場からとりあげ、実験的にどうなるかをみることにした。実験動物としては猫を選び、研究する筋肉としてはその四頭股筋 (伸筋 quadriceps extensor femoris) を選んだ。筋肉の付着部を切りとって挺子に固定し、一定の張力のもとに長さの変化を、また一定の長さにして張力の変化を記録した。また同時に筋肉内に生ずる電気的変化もオシログラフを使って記録した。実験に使つた猫は、たいていまずエーテル麻酔下に去脳し、次に胸部で脊髄を切断し、脊髄動物 (spinal) にしたものであつた。多くの場合ストリキニーネを使って反射反応を増加させた。

71. そしてちょっと触れれば周期的な収縮、生理学者の言葉でいわゆる間代 (かんだい) 痙攣 (clonus) を生ずるような状態になるまで、筋肉に負荷をかけた。われわれはこのような状態の収縮を観察したのであるが、特に猫の生理学的状態や筋肉にかけた負荷、振動の周波数、振動の基底レベル、振動振幅などに注目した。このようにして、われわれはそれと同じ型の乱調を起す機械系や電気系を分析するのと同じ

ように、これらを分析しようと試みた。たとえば制御機構に関するマッコルの本にのべられている方法を使ってみた。

72. ここではわれわれの成果の意義を詳論することは省くが、今この実験を繰り返しており、成書として発表するための準備をすすめている。しかしながら、次のようなことはすでに証明されているか、あるいはほとんど確実になっている。間代痙攣の振動周波数は期待したよりもはるかに負荷条件の変化の影響を受けない。また遠心性神経から筋へ、次に筋の運動知覚を発する部分、さらに求心性神経、最後に中枢のシナプス、再び遠心性神経という閉鎖回路に関する定数が、他の何ものよりも強く間代性の振動周波数を決定するようである。遠心性神経によって伝送される1秒あたりのインパルス数を基礎として線型かどうかを考えるならば、この回路は近似的にも線型演算子の回路とはいえないが、もしインパルス数のかわりにその対数をとって考えるならば、ほとんど線型であるといつてよいようである。この事実は、遠心性神経の刺激の包絡線の形は正弦波に近いとはいえないが、この曲線の対数は正弦波に近いことに相当する。一定のエネルギー・レベルをもった線型振動系においては、外力の曲線の形は零確率の場合を除いては常に正弦波でなくてはならないのである。また、疎通 (facilitation) や制止 (inhibition) の概念は、本質的に加法的というよりも乗法的である。たとえば完全な制止とは零による乗法を意味し、また部分的な制止とは小さな数による乗法である。これが反射弓 (反射回路 reflex arc) の検討に使われた疎通と制止の概念である。

73. さらにシナプスは一種の一致記録装置である。つまりこれから出てゆく繊維は、全体としてある短い時間内にこれにはいってくるインパルス数が一定の閾値を超えたときにのみ刺激される。この閾値が、はいってくるシナプスの総数に比べて十分低いならば、シナプスの機構は確率を乗する役目を果たし、またそれが近似的にも線型性をもった連結回路と考えられるのは対数をとった場合だけである。このシナプスの機構が近似的に対数的な性質をもっていることは、感覚の強さに関するウェーバー・フェヒナーの法則が近似的に対数的であることと確かに関係があると思われる。もっともこの法則は第一近似にすぎないであろう。

74. 最も注目すべき点は、この対数的な性質を考慮に入れ、神経筋回路 (neuromuscular arc) のいろいろな部分を通過して一つのインパルスが伝導するときに得られるデータを用い、乱調をおこすフィードバック系の発振周波数を決めるのに制御工学技術者がすでに発展させた方法を使って計算してみると、間代痙攣の実際の周期にひじょうによく合った数値が得られることであった。われわれは発振周波数の理論値として13.9サイクル/秒を得たが、実測値は7~30サイクル/秒の周波数の範囲であり、多くの場合は12~17の範囲内にある。このような条件下では、この程度の一致もひじょうによく合っているといつてよい。

75. われわれが観察できる重要な現象は、単に間代痙攣の周波数だけではない。振動の基底になる筋張力にも比較的ゆるやかな変化があらわれ、振幅にはそれよりもっとおそい変化があらわれる。これらの現象はけっして線型的であるとはいえない。しかしながら、線型振動系の定数がひじょうにゆるやかに変化する場合は、第一近似として、その変化が無限にゆるやかで、振動の各部分はパラメーターがその時刻における値をとるとするときと同様に起るとして扱うことができる。これは物理学の他の分野で永年、摂動法として知られている方法である。間代痙攣における筋の基礎張力レベルと振幅をしらべる問題にもこの方法を使うことができよう。

76. この研究はまだ完成していないが、それが可能でもあり、また有望であることは明らかである。ここに次のようなことが強く示唆される。痙攣性の筋収縮の主な反射弓の時間関係から証明されることは、二つのニューロンからなる単純な反射弓が基礎となっていることであるが、この反射弓におけるインパルスの振幅は、少なくともその一つのニューロンの動きによってきめられ、さらにおそらくは、より多くのニューロンが関与しているように思われる。この振幅のある部分は、多くのニューロンを経て走るゆっくりとした過程に影響されているのであろう。この多ニューロン性の神経過程は、痙攣性の筋運動の時間関

係を基本的に決定する脊髄よりは、さらにはるかに高位の中枢神経系から発するものと思われる。このように振幅の変わる現象は、ストリキニーネあるいは麻酔剤の使用、または外の原因による中枢神経活動の一般レベルの変化に伴って起こりうるものである。

77. 以上が、1946年秋のメイシーの会合と、またサイバネティックスの思想を大勢の人々にひろめる目的で同時に開かれたニューヨーク科学アカデミー (New York Academy of Sciences) の会合とにおいて、ローゼンブルート博士と私が発表したおもな研究成果であった。われわれは自らの研究成果を喜び合い、この方面の研究成果が一般的に実用性をもつことを確信していたが、またわれわれの協同研究の期間はあまり短かすぎ、かつ早く出版したいとあせって研究をまとめたために、実験的に十分確かめることができなかつたと感じた。われわれは今、1947年の夏と秋に、その確証のための実験を――結局は反証となるかもしれないが――行いたいと思っている。

78. ロックフェラー財団はすでにローゼンブルース博士に、メキシコの国立心臓医学研究所に新しい研究所の建物を設置するための補助金を出した。そこでもっと落ち着いた健全な歩調でわれわれの研究計画を遂行するための長期協同研究態勢の基盤を確立することについて、われわれは財団の物理科学部長ウィーヴァー博士と、医学部長モリスン (Robert Morison) 博士に話に行くべき時機が熟したと感じた。この時にあたってわれわれはそれぞれの勤務先から熱心な援助を受けた。理学部長のハリスン (George Harrison) 博士は、この交渉の間マサチューセッツ工科大学の首席代表者であつたし、チャベス博士は国立心臓医学研究所のために弁じた。

79. この交渉中に協同研究の中心は国立心臓医学研究所でなければならないことが明らかとなった。それは一つには研究所の設備の重複をさけるためと、今一つはロックフェラー財団がラテン・アメリカに科学の中心を建設したいという切なる希望をもっていたので、それにも応ずるためとであった。結局最後に採用された案は5年間にわたるもので、その間私は1年おきに6ヵ月を国立心臓医学研究所にすごし、ローゼンブルース博士はその間の年ごとに6ヵ月間をマサチューセッツ工科大学にすごすものであつた。国立心臓医学研究所にすごす時期はサイバネティックスに関する実験データの収集と究明にあてられ、その中間の年にはより理論的な研究と、特にこの新分野に入っていこうとする人々のために、必要な数学的・物理学的・工学的基礎と生物学的・生理学的・医学的研究手段を与えるための教育課程を案出するというひじょうに厄介な問題とをやってみることになつた。

80. 1947年春、マッカロ博士とピッツ氏は、サイバネティックスの立場から相当重要な価値をもつ研究をなしとげた。マッカロ博士には盲人が本の印刷した頁を耳で読める装置を設計する問題が与えられていた。光電管を使って活字ごとに変わった音を発生させるのは古い話であるが、いろいろな方法で実現することができる。その難しい点は文字の形が与えられたとき、その大きさに関係なく実質的に同一の音を発生することにある。これは大きさや向きがいろいろに変わっても正方形は正方形と認識する、形態すなわちゲシュタルト知覚の問題と明らかに類似したものである。

81. マッカロ博士の装置はいろいろな大きさの活字でも選択、解読しうるものであつた。このような選択読字は走査法によって自動的になしうるものである。この走査法は私がすでにメイシーのある会合で示唆したものであつたが、ある図形と、一定ではあるがそれとは大きさのちがう標準図形との比較を行うものである。選択読字を行う装置の図面はフォン・ボーニン博士の注目を惹き、博士はそれを見たとき直ちに次のような質問をした。“これは大脳の視領域の第四層の図面ですか？”この質問から思いついてマッカロ博士はピッツ氏の助力を得て視領域の解剖学と生理学を結びつける理論を展開したのであるが、この理論の中で、一連の変換についての走査過程が重要な役割を演じている。

82. この理論は1947年の春、メイシーの会合と、ニューヨーク科学アカデミーの会合とで発表された。なお、この走査は一定の時間周期をもって行われるのであるが、それは通常のテレビジョンで“掃引時間” (time of sweep) とよばれているものにあたる。鎖状に連続したシナプスが動作を1回行うに

要するこの時間には、解剖学的にいろいろな解釈がつけられる。それから推すと、動作を1回完全に行うための時間は10分の1秒程度となるが、これはいわゆる大脳の“ α 波”の周期とほとんど同じである。この α 波は他の理由から、視覚に帰因し、かつ形態知覚の過程に重要な役割を果すものと推測されている。

83. 1947年春、私は調和解析についてナンシー（Nancy）に開催される数学の会議に出席するよう招待をうけた。私はそれを受諾し、航海の往復の途中イギリスに合計3週間、おもに私の旧友のホールデン（J. B. S. Haldane）教授の客として滞在した。超高速計算機の研究をしている大勢の人々、殊にマンチェスターやデントンンのチューリング氏とはサイバネティックスの根本思想について語り合う絶好の機会に恵まれた。またケンブリッジの心理学研究所を訪れ、バートレット（F. C. Bartlett）教授と彼のスタッフが、人間を含む制御過程の中の人間という要素について行っている研究について討論する好機会を得た。私がそこで見出したことは、イギリスにおいてもアメリカに劣らず、サイバネティックスに対する興味が盛んで、よく知れわたっており、資金が限られているための制限は免れないが、優秀な工学研究が行われていることであった。私は多くの処でサイバネティックスの可能性についてひじょうな関心もたれ、理解されているのを見たが、ホールデン、レヴィ（H. Levy）、バーナル（Bernal）教授等は確かにサイバネティックスを、科学と科学哲学の方面で問題になっていることのうちで最も緊急の問題の一つであると考えているようであった。しかし、この分野を統一し、研究の種々な方法をいっしょにしてゆくとということについては、アメリカ本国でわれわれが達成してきたほどの進歩をしているとは思えなかった。

84. フランスのナンシーで開かれた調和解析に関する会合では、統計的概念と通信工学からの概念とをちょうどサイバネティックスと同じ立場から結合しようとする研究がいくつか提出された。私は特にここにブラン＝ラピエール（Blanc Lapierre）氏とロエーヴ（Loeve）氏の名をあげなければならない。私はまた数学者・生理学者・物理化学者がそれぞれこの問題に、特にその熱力学的な方面に関心をもっているのを見た。熱力学的な方面は生命の現象そのものについての一般的な問題に触れるので、それに関する限り興味がもたれたのである。事実、私も出発前ボストンでハンガリヤ人の生化学者セント＝ジョルジ（Szent Györgi von Nagrapolt）教授とその問題について議論を交わし、彼の意見も私と一致していることを知ったのである。

85. フランス訪問中に、ここに特記するに値する次のことが起った。それはマサチューセッツ工科大学の私の同僚サンティリヤーナ（G. de Santillana）教授によって私はエルマン出版会社（Hermann et Cie）の故フレイマン（E. Freymann）氏に紹介され、そこで私は彼からこの本を書くように依頼されたのである。フレイマン氏はメキシコ人であったので、私は特に喜んでその申出を受諾した。この本の執筆もメキシコでなされたし、そのための研究もメキシコで多くできたものであるからである。

86. すでに示唆したように、メイシーの会合で考えられたことから提示された研究の方向の一つは、メイシーの会合で考えられたことから提示された研究の一つは、社会組織における通信の概念と技術との重要性に関するものである。社会組織も、個人の場合と同様に確かに、通信系によって結びつけられた一つの組織であり、フィードバックの性質をもった循環過程を主体とする一種の力学によって支配されている。これは人類学と社会学の両分野一般についても、経済のもっと特殊な分野についてもいえることであり、フォン＝ノイマンとモルゲンステルンの既述のゲームのようなひじょうに重要な研究も、このような思想の範囲にはいるのである。この見地からベイトスン博士とマーガレット＝ミッド博士は、現代のような混乱時代では社会的・経済的問題がひじょうに緊迫しているから、サイバネティックスのこの面の討論に精力をもっと集中するようにと私に要請した。

87. 私は時勢が緊迫しているという彼らの感じかたには同感であり、本書の後の章で述べるようなこの種類の問題が、彼らや他の有能な研究者たちによってとりあげられることを望むものではあるが、私がこの方面の問題を真先にとりあげるべきであるとする彼らの考えかたには賛成できない。また現在の社会の病状に相当な治療効果が得られるほどこの方面の進歩が期待できるとも私には思われない。まず第一に、

社会に影響を与える要因のおもなものは単に統計的なものであるというわけではないが、その基礎となっている統計の継続期間は著しく短い。ベッセマー法の導入以前と以後の鉄鋼業経済を統計の一項目として扱うことはあまり意味がない。自動車工業の興隆あるいはマレーにおけるパラゴムの木の栽培の前と後のゴム生産量の統計を比較してみてもしかたがない。また、サルバルサンスの出現以前と以後の時期における性病の統計を一つの表にかきならべても、その薬の効き目を研究する特殊目的以外には何の役にも立たない。

88. 光の良好な解像力を得るには、本質的に一定の条件が継続する必要がある。レンズが均質な物質でできていて、レンズの各部における光の遅延が、波長の数分の1以下の適当な設計値以内におさまっていなければ、見かけのレンズの口径を大きくしても、レンズの実効口径はあまり大きくはならない。同様に大きく変化する状況下に、統計を長期間にわたってとって、その利益は、見かけだけのものであって実際にはそれほどものではない。

89. このように人間の科学は数学の新しい手法の効果をためすにはひじょうに都合の悪い分野である。たとえば気体の統計力学は、分子の動揺が巨視的立場から無視できるからこそ成立するのであるが、ちょうどそのような動揺が興味の対象となるような、分子の大きさの程度の生物の世界では、統計力学が無効となるのに似ている。さらに、安全な結果を得るための一定の数値計算方法がなく、社会学的・人類学的・経済学的量を評価するにあたって、専門家の判断力という要素がひじょうに大きくきいてくるために、専門家になれるだけの豊富な経験をもたない新人には何ともできない分野でもある。ここに一言付け加えておこう。小標本の理論のような近代的手段は、情勢を構成する主要因を知悉しているか、あるいは勘によってわかることのできる統計学者が活用するならよい。また、よくわかっている理論特有のパラメーターを決定する場合ならよい。そうでなく、全く未知の場合に積極的に統計的推測を行うために使うことには、私には確信がもてない。

90. 私が今述べたような分野においては、われわれが得ることのできるデータに限界があることを考えてみれば、サイバネティクスに対する私の期待は、確かに弱められてしまう。私がサイバネティクスの考えかたによって、実際に役に立つようなことをやってみたいと思う分野が他にも二つあるが、その希望も今後の進歩をまたなければならぬ。そのうちの一つは、失くなった手足、あるいは麻痺した手足の補綴術である。ゲシュタルトを論じたところで知ったように、マッカロは通信工学の考えを、喪失した感覚を他のもので代用させる問題に用い、盲人が耳で印刷文字を読めるような装置を作製した。マッカロの案出した装置は、明らかに目だけでなく、脳の視領域の機能さえもある程度まで代行しうるものである。

91. 義肢の場合でも同様のことが明らかに可能である。手足の一部の喪失は、単に支持物として役立っていたもの、あるいは手足の（切断後に残された）基部の先に機械的延長としてつながっていたものを失ったというだけでなく、それについていた筋肉の収縮力や、それから生ずる皮膚感覚や筋肉運動知覚も同時に失ったことになる。義肢製造者は、現状では、始めの二つの喪失物を義肢で代用させようとしているが、第三のものにはとても及んでいない。簡単な棒状義足（peg leg）の場合には、これは重要ではない。なくなった手足の代用をする棒は、それ自身、自由度をもたないから、手足の基部の筋肉運動知覚の機構だけで十分その位置や速度がわかる。可動の膝やくるぶしがついていて、患者が残存した筋肉組織を使って前へ投げ出すようにして歩ける関節付きの義肢の場合は、事情が変わってくる。患者は義肢の関節の位置や運動がわからないから、でこぼこ道では確実な歩きかたは困難となる。人工関節や人工足の裏などに歪計や圧力計を備えつけ、電気的方法あるいはバイブレーターなどで残存した皮膚にそれを伝えるというようなことができないはずはないであろう。

92. 現在の義肢は、手足の切断から生じた能力の喪失をかなり取りのぞいてはくれるが、運動失調はそのまま残っている。適当な受容器を使用すれば、この運動失調も相当程度まで同時になおってしまい、患者はすべての健全な人間が自動車の運転の際に使うような反射作用を使えるようになり、その結果もっとしっかりした足どりで歩けるようになるであろう。神経学の本を読んだことのある人にはおなじみの人体

模型でわかるように、親指だけの切断から生ずる感覚喪失は、股関節の切断の場合の感覚喪失よりはるかに重大なのであって、われわれが足について述べたことは、手についてもそれ以上にあてはまるのである。

93. 私はこれらの考察をその方面の適当な人に報告するためにまとめかけたが、現在までのところ大して進捗していない。他の人が同じようなことをすでに考えついておられるかもしれないし、またやってみて技術的に実行不可能ということになっているかもしれない。いずれにしても、もしまだ実際的な立場から十分考慮されていないならば、早い機会に考慮されるべきであろう。

94. 今一つ、次のことは注目に値しよう。私にはだいぶ前からわかっていたことであるが、現在の超高速計算機は、原理上、自動制御装置の理想的な中枢神経系として使用できる。その入力と出力とは、数字や図形などである必要はなく、光電管や温度計のような人工感覚器官の読み、あるいはモーターやソレノイドの動作であってもよい。歪計や類似の装置を使ってこれら運動器官の動作を読み、また中枢制御系に報告、すなわち“フィードバックする”ことによって、人工の筋肉運動知覚を実現するとすれば、われわれはほとんどどのような精巧な動作でもなしうる機械を人工的に作製できる状態にある。‘長崎’よりずっと前、すなわち一般の人が原子爆弾のことを知るよりだいぶ前に私が気づいたことは、われわれは善悪を問わず未曾有の重要性をもった社会革命に当面しているということであった。自動工場、すなわち工員のない一貫組立工場は、今までのところ実現されてはいないが、その実現を阻んでいるものは、ただわれわれが第二次世界大戦中に、たとえばレーダーの技術の進歩にそそいだ程度の努力をしていないからにすぎないのである。

95. 私は新たな進歩が、善悪を問わず無限の可能性をもつと述べた。一つには、サミュエル＝バトラー (Samuel Butler) が比喩として想像した機械万能が、最も緊急の、しかも比喩ではない実際問題となってきたのである。人間の仕事をやってくれる新しく、かつ最も有能な機械的奴隷の集団を人類がもつことになるのである。このような機械的奴隷は、奴隷労働とほとんど同等な経済的性格をもっているが、違うところは、人間の残虐という不道徳を直接にはもたらさないという点である。しかしながら奴隷労働と競争する条件を受け入れる労働は、どんなものであっても奴隷労働の条件を受け入れることであり、それは本質において奴隷労働にほかならない。その本質は一口に言えば‘競争’ということである。機械のおかげで不快な卑しい仕事をやる必要がなくなるのは、人類にとってひじょうな福祉かもしれないが、あるいはそうでないかもしれない。私にはわからないことである。

96. このような機械による新しい可能性を、市場の言葉、すなわちそれによって儲かった金で評価すべきものではない。それは正しく公開市場の言葉であり、あるいは米国工業会やサタデー・イブニング・ポストで代表されるような標準的なアメリカ人の世論の合言葉となった表現をかりていえば、“第五の自由”そのものである。私はアメリカ人としてよく知っているから、アメリカ人の世論といったが、商人の目には国境がないであろう。

97. 最初の産業革命、すなわち“暗い悪魔の水車場”の革命が、機械との競争による人間の腕の価値下落であったといえ、現在の事情の歴史的背景を明らかにすることができるであろう。掘さく機のような蒸気シャベルの仕事と十分に競争し得るほどの低い労賃では、つるはしやシャベルだけのアメリカ人労働者は生きてゆけない。これと同じように現代の産業革命は、少くとも簡単な一定の型にはまった判断力だけで済むような仕事の範囲では、人間の頭脳の価値を下落させつつある。もちろん、腕利きの大工・機械工・裁縫師は第一次産業革命の場合でもある程度まで失職しなかったと同じように、第二次産業革命でもすぐれた科学者や行政官は失職しないであろう。しかし、第二次革命が終了した場合、ふつつ、あるいはそれ以下の能力をもった世間一般の人間は、金を出して購うに値するものを何ももたなくなるであろう。

98. この問題に対する解答は、もちろん、売買よりも人間の価値を尊重する社会をつくることである。このような社会に到達するためには、われわれは十分な計画と、ひじょうにうまくいったとしても思想の面で生ずる多くの闘争とを必要とする。もしそうしなかったとしたら？ それは誰にもわからないことで

ある。そこで私はこのような事情に関する情報や見解を、労働の条件や将来に強い関心をもつ人々、すなわち労働組合の人々に伝えることが私の義務であると思った。そこで C.I.O. の高級幹部の一、二人と連絡をつけ、ひじょうな理解と同情のある態度で私の話を聞いてもらった。しかし私も、また彼らのうちの誰も、個人的見解以上に進むことはできなかった。すなわち私がすでに検分していたとおり、彼らの意見は次のようであった。アメリカにおいてもイギリスにおいても、労働組合と労働運動はひじょうに限られた人々の手に委ねられ、彼らは労賃や労働条件に関する職場代表や組合評議員からの特別な問題を扱うにはひじょうになれているが、労働そのものの政治的・技術的・社会的・経済的問題を大局立場から論ずるようなことには全然用意がないということであった。その理由は簡単である。一般に労働組合の幹部は、労働者の苦しい生活から広い教育を受ける機会をもたず、いきなり行政管理者としての忙しい生活にはいつてゆくためである。広い見地からの教育を受けた人々には、組合活動は魅力のあるものでなく、また、組合もそのような人を受け入れ難い。

99. このようにして新しい科学、サイバネティクスに貢献したわれわれは、控え目にいっても道徳的にはあまり愉快でない立場にある。既述のように、善悪を問わず、技術的に大きな可能性のある新しい学問の創始にわれわれは貢献してきた。われわれはそれを周囲の世間に手渡すことができるだけであるが、それはベルゼン (Belsen) [訳注：ハンブルグ近郊ベルゲンドルフに設けられたナチの強制収容所] や広島の間でもある。われわれはこれら新しい技術的進歩を抑圧する権利をもたない。これらの進歩は今日の時代のものである。われわれがそれを抑圧しても、その発展を、最も無責任で欲得ずくの技術者達の手に乗せることにしかならないであろう。

100. われわれのなしうる最善のことは、この研究の動向と意義とを広く衆知せしめ、この領域におけるわれわれ個人の努力を、生理学や心理学のように戦争や搾取からもっとも遠い分野に限定することである。この研究によって、われわれはどうかすると力の結集を助長することになるかもしれない(生存という条件によって、力というものには常に最も不道徳な手に結集せられるのである)。しかし上にも述べたように、かりにそうした危険があるとしても、この新しい領域の研究によって人類と社会の理解を深めることができるという善い成果が挙がり、その方が、危険よりもずっと大きいという希望をもつ人々もいる。私は(今)1947年(11月)に、(この、1. から100. までの内容を)書いているが、そういう希望は根拠薄弱であると言わねばならない。

◆その2◆

101. (1961年3月の現在)今や、サイバネティクスは、漠然とした将来の研究計画としてではなく、すでに存在している科学として考え直すべき時期がきたと思われる。この機会に、(1947年の)初版の訂正を必要とするところを読者にお知らせし、同時にこの問題の現状、および初版出版後にあらわれたこれに関連する新しい考え方にまで、話をひろげて述べてみることにしたい。

102. 科学上の一つの新しい主題が真の生命力をそなえているならば、その興味の中心が、年の経つにつれて変わって行くのは当然である。はじめにCyberneticsを書いたとき、話の要点をおさえていくのにおもな障害と感ぜられたのは、統計的情報論および制御論の概念が目新しく、当時一般に行なわれていた考え方にとっては、ショッキングでさえあったことであった。今日では、これらの概念は、通信技術者や自動制御の設計者の道具として、まったくなじみ深いものとなったので、むしろ、本書には平凡な、きまりきったことしか書いてないと思われるのではないかと私はおそれている。

103. 工学上の設計でも、生物学でも、フィードバックの役割が、今はよく認識されるようになった。技術者、生理学者、心理学者、社会学者のだれにとっても、情報の役割と情報を測定し伝達する技術を知

ることが最もたいせつとされるようになった。オートマトンのことは、(1947年の)初版ではすこし予言しておいただけであったが、今はりっぱな地位を占めるようになった。それに関する社会的危機については、(この本においても、この本の)通俗的姉妹編である The Human Use of Human Beings においても警告しておいたが、それはすでに地平線上に頭をもたげて来ている。

104. 今や、サイバネティックスの研究者は、これらの新しい分野に歩を移し、この10年間に発展してきた考え方に注意をむけなければならない。単純な線型フィードバックの研究は、科学者たちをサイバネティックスに注目させるために重要であったが、フィードバックは最初に思われていたほど簡単なものではなく、線型なものでもないことがわかってきた。初期の電気回路の理論では、回路網を組織的に取扱う数学的方法として、抵抗や容量やインダクタンスを線型に結合して考える方法しかなかった。すなわち、伝達すべき通報、インピーダンス、アドミタンス、および通報が通過する回路の電圧比——これらのものの調和解析のことばで、すべての問題が適切に記述されると考えられていた。

105. 他方、Cybernetics が出版されるずっと以前から、(たとえば増幅器、電圧制限器、整流器などの)非線型回路の研究は、調和解析のわくにはおさまらないことがわかっていて、しかし他によい方法もなかったため、従来の電気工学の線型な考え方を拡張しようとする多くの試みがなされたが、新しい型の装置をそのようなしかたで表現するのは、むりであった。

106. 1920年ごろ、私がMITへきたころには、非線型装置の問題を扱うためには、非線型系も線型系も同時に取扱うことができるように、インピーダンスの概念をそのまま拡張する方法が一般にとられていた。その結果は、非線型電気工学の研究が、天文学のプトレマイオスの体系では、周転円にまた周転円を、修正にまた修正を、と重ねていき、ついには、それ自身の重みによってその巨大なつぎはぎ構造が崩壊したのである。

107. むりのできたプトレマイオスの体系の難破したあとにコペルニクスの体系ができたように、すなわち、複雑で、見通しのわるい、地球中心のプトレマイオスの理論に代って、太陽を中心として天体が動くという、簡単かつ自然なコペルニクスの理論が生れたように、非線型構造や非線型系の研究にも——これらの構造あるいは系が、電氣的、機械的あるいは天然のもの、人工のものいずれであるかを問わず——新鮮な、過去とは無関係な出発点が必要であった。

108. 私は Nonlinear Problems in Random Theory という著書で、新しいアプローチを始めてみた。

その結果、線型現象の取扱いでは圧倒的な重要性を持っていたフーリエ解析が、非線型現象を考えるときには、それほど重要でないことがわかった。これには、はっきりした数学的理由がある。電気回路の現象は、他の多くの物理的現象と同様に、時間の原点の移動に対して不変であるという特徴をもっている。正午にある物理実験を開始して、午後2時にある段階に達したとする。12時15分と同じ実験を開始すれば、2時15分にそれと同じ段階に達するであろう。したがって物理学の法則は、時間の平行移動の群の不変量を扱うのである。

109. すなわち、三角函数族は、平行移動の群に対して不変であるという性質をもつが、この性質だけならば、他の函数族についても成り立つのである。たとえばいわゆる彷徨運動 (random walk) を考えよう。彷徨運動では一定の時間の間の粒子の変位は、その時間の長さだけで定まり、その運動の開始以前のあらゆるできごとに無関係な確率分布をもっている。そのような彷徨運動全体の集合に、時間の平行移動を施せば、同じ集合に移るのである。

110. この不変性以外に、三角函数族は、非常に簡単な線型集合をなすという特徴的な性質をもっている。これは線型性に関する性質であることに注意せねばならない。すなわち、一定の周波数の振動は、すべて2個の振動の重ね合せにひき直される。電気回路の線型問題の取扱いで、調和解析が重要なのはこの

特別な性質による。

111. しかし、定数を乗じて加え合わせる以外の函数の結合、たとえば、2個の函数をかけ合わせるなどの結合法を考える場合には、単純な三角函数は、そのような初等的な群の性質をもっていない。これに反して、彷徨運動に現われる彷徨函数 (random function) は、函数の非線型結合の研究に、たいへん具合のよい性質をそなえている。

112. 私の著書 *Nonlinear Problems in Random Theory* に述べられたプログラムを実現するには、まだまだなすべきことが多い。その実用上の結論は、非線型系を研究するに適した試験用入力、三角函数系ではなく、ブラウン運動の性格を持った入力でなければならないということである。電気回路の場合、このブラウン運動の函数は、散射効果 (shot effect) を利用して、物理的に作ることができる。散射効果というのは、電流の不規則現象であって、電流が、電気の連続な流れではなく、分割できない均一な電子の系列の移動であることから生ずる。電流にはこのように統計的不規則性があり、その不規則性自身はまた、ある均一性をもっているが、十分に増幅すれば、あるところでかなりの大きさの無作為雑音 (random noise) がえられる。

113. この無作為雑音の理論は、電気回路や、その他の非線型過程の、解析 (analysis) だけでなく、その合成 (synthesis) にも実際に利用できる。そこで用いられる方法は、非線型装置に無作為入力を加え、その出力を、エルミート多項式と密接に関係したある直交函数の、明確に定義されたある級数に展開することである。非線型回路の解析の問題は、それらの多項式の係数を、入力信号のあるパラメータの函数として、平均の操作により決定することに帰着する。

114. その手順は、かなり簡単に記述される。解析しようとする非線型を '暗箱' (black box) で示すこととする。その他に、展開の各項に対応する、構造が分っている装置があるとし、それらを '明箱' (white box) で表わすこととする。この暗箱と与えられた明箱に同じ無作為雑音を加える。暗箱を明箱で展開するときの係数は、両者の出力の積の平均として求められる。この平均は散射効果入力 (shot effect input) の全集合に対して求めなければならないが、この平均を出力の時間平均で代用しても、間違いをおかすのは、確率0の場合にすぎないことを保証する定理がある。この平均を求めるには、明箱と暗箱の出力の積を作る乗算器と、平均装置があればよい。平均装置は、蓄電器の両端の電圧が、そこに蓄えられる電荷、すなわち、蓄電器を流れた電流の時間積分に比例するという事実を利用して作ることができる。

115. ある装置が、過去の経験によって、特定の構造なり機能をもつようにくふうできるということから、工学においても生物学においても非常に興味深い新しい態度が生じてくる。工学においては、このようなくふうによって、ゲームを行ったり、特定の目的を追求して行動する装置がつけられるばかりでなく、過去の経験によりその動作をたえず改善してゆくようにすることも考えられる。生物学的には、多分生命現象の中心であると思われるものと、少くとも類似なものを見出すことができる。遺伝が行なわれ、細胞が増殖することができるためには、細胞の遺伝型質を担う部分——いわゆる遺伝子 (gene) ——が、自分に似た別の遺伝型質を担う構造を作りだすことができなければならない。したがって、工学的に構成されたものが、ある手段によって自分と同様の機能をもつ他の構造物を作り出すことができ、その手段がわれわれに知られるということは、——特に、一定の周波数で振動している系が、いかにして他の振動系を自分と同じ周波数のものにかえてゆくことができるか——たいへん興味のあることである。

116. どんな種類にしても、ある種類の分子を考えると、すでに存在しているものと同じ姿に、他の分子が作り出されるということは、工学で '鋳 (い) 型' を用いるのによく似ている、とはよくいわれていることである。工学では、機械の機能を決定する単位を型 (pattern) として、他の同種の単位を作り出す。鋳型のたとえば、静的なものであるが、遺伝子分子が他の分子を作り出すには、何らかのプロセスがあるにちがいない。私は仮説としていってみるのであるが、生物学的物質の同一性を決定する型

(pattern) の要素は、ある周波数、分子スペクトルとかいうべきものの周波数であるかもしれない。そうすれば、遺伝子が自ら組織化すること (self-organization) は、後にのべる周波数の自己調整の一つの現われということになる。

117. 学習する機械 (learning machine) 一般についてはすでにのべた。学習する機械の考えは、サイバネティクス自身と同時に生まれたものである。そこで述べた防空用の飛行進路予測器では、ある与えられた時刻に用いられる予測器の線型特性は、予測を行なうべき時系列の集合の統計量を、長時間にわたって知ることによってはじめて定められる。飛行機のこれからの進路を予測するのに、予測器は、いまからすぐ前までの飛行進路に、線型演算をほどこす。しかしこの線型演算を正しく決定するのは、統計的な問題であって、その統計の基礎としては、ずっと前からの飛行進路や、過去の多くの同種の飛行についての知識が用いられるのである。遠い過去からの知識を用いて、ごく近い過去から未来への方針を決定するに必要な統計的な方法は、極めて非線型なものである。実際、ウィーナー・ホッフ (Wiener-Hopf) の予測の方程式を用いるときも、その方程式の係数は、非線型操作によってきめられる。一般に、学習機械は非線型なフィードバックによって動作する。サミュエルと渡辺の記述しているチェッカーを指す機械は、10 ないし 20 時間の動作で、プログラムの学習が完成し、かなり筋道の通った指し方で、機械をプログラムした人に勝つようになる。

118. 計算機を作って、予測のために使われたその機械が、自動的にまとめあげてきた自分の経験によって、これらの統計量を処理し、その時々予測器の特性を定めるようにすることは全く可能である。そういうことができるのは純粋に線型的な予測器に限らない。カリアンプール (Kallianpur)、マサニ (Masani)、アクトヴィチ (Akutowicz) や私の諸論文で展開された非線型予測の理論は、少くとも概念的には、上と同様な方法で機構化し、長期間の観測を用いて短期間先の予測の統計的基礎を与えることができる。

119. 線型予測の理論でも、非線型予測の理論でも、予測のよさを測る何らかの規準がなければならない。一番簡単な基準は、誤差の平均二乗を最小にするというものである。もちろん、この他にも使用できる規準は考えられる。私はブラウン運動の汎関数を非線型装置の構成に用いたが、そのときの展開の各項はある直交性をもっているので、平均二乗最小の規準をある特別の形で用いた。平均二乗誤差の規準を用いることにすれば、上の直交性によりこの級数の有限項の部分和が、それと同様の項を用いる限り、近似される装置の最良近似になる。

120. 学習機械の概念は、予測器、濾波器 (filter) やそれと同種の装置のほかにもはるかに広く用いられる。それは、チェッカーのような相手のあるゲームを行なう機械の研究製作では特に重要である。この分野では、IBM 社研究所のサミュエル (Samuel) と渡辺によってなされた研究がきわめて重要である。濾波器や予測器の場合と同じように、時系列のある関数が級数に展開される。それと同じ級数に、もっとはるかに一般的な関数も展開されるのである。これらの関数は、ゲームの手の優劣を定める意味のある量に対して数値的な評価をあたえるものである。たとえば、両方のこまの数、勢力範囲、こまの動きやすさなどを評価する。機械を始めて使うときには、それぞれの要因に仮の重みを与えて、機械は、許される手の中で重みの総和が最大になるような手をえらぶ。ここまでは、機械は固定されたプログラムによって動作しているので、学習機械ではない。

121. しかしその機械は、ときどき、以上とはちがったことをする。すなわち、勝ちゲームには 1、負けゲームには 0、引き分けにはおそらく $1/2$ というような値をとる関数を、いろいろな関数の級数として展開するのである。それらのいろいろな関数は、機械が認識することのできる種々の要因を表わすものとする。機械はこうして、これらの要因の重みを定め直し、前よりもっと巧みなゲームができるようになる。ここではただ機械が 10 時間から 20 時間学習した後には、プログラマーを負かすことのできるほど優秀な機械ができていたことを指摘しておこう。

122. これらはすべて、プログラムをプログラムすることの理論と実際とにふくまれるもので、その研究はマサチューセッツ工科大学のエレクトロニクスシステム研究で大規模になされてきている。その研究の結果、何か学習するくふうがなされなければ、はっきり固定した機能の機械のプログラムをつくること自体もたいへん困難な仕事なので、そのようなプログラミングをプログラムするくふうがぜひ必要なことが判明した。

123. 学習機械の概念が、われわれのこしらえた機械に適用されるのであれば、動物とよばれる生命のある機械にもこの概念は意味をもつにちがいない。それは、生物学的サイバネティクスにも、新しい光をなげかけるであろう。この方面の最近の数多くの研究の中で、スタンレー＝ジョーンズ (Stanley=Jones) の本を特に挙げたいと思う。この本では、神経系の活動レベルを保つフィードバックと、特別の刺激に反応するフィードバックに多くの注意がはらわれている。系のレベルと個々の反応の関係は、かなりの程度乗法的なものであるので、当然非線型となり、上のべたような考察が必要となる。この方面の活動は現在きわめて活発である。近い将来にはますますさかんになると思われる。

124. 今までのべてきた、記憶機械や自己増殖する機械で用いられる方法は、全部とはいかないまでも、大部分は、非常に特殊な装置に関するものである。その装置をかりに青写真装置とよんでもよいであろう。生理学的な面では、このプロセスは、生物組織の特別なしくみにもっと即したものでなければならぬ。それは、とにかく、系が自分自身を構成していく過程である。脳波の自己組織過程 (self-organizing process) の例は、脳波でごくせまい範囲の特定の周波数だけが形成されていく過程である。そして同種の過程を青写真的な観点からも論じて、脳波の中に、はっきりした周波数が存在するという事実、およびそれがどのようにして発生し、何をすることができ、医学的にどのように利用されるかを説明するために、私が提案した諸理論は、生理学の新しい重要な突破口をなすものではないかと思われる。これと同様の考えは、生理学の他のところでも応用でき、生命現象の根元を解明するのにも役だつであろう。この分野については、私がのべていることは、既に完成した研究というよりも、研究の計画であるが、私はこの計画に大きなのぞみを託しているのである。

125. 私の著書、Cybernetics では、サイバネティクスに関するすべての成果を要約するつもりはない。私の興味も能力もそのような方面にはない。私の意図するのは、この問題に対する私の考えをふえんして述べ、最初私がこの分野にふみこむ動機となり、理論の進展につれて私の興味をつねにとらえてきた思想と、哲学的考察とを示すことである

◆第二部 サイバネティクスへの道◆

[1] サイバネティクス (Cybernetics) の定義をする

●われわれの状況に関する二つの変量があるものとして、その一方はわれわれには制御出来ないもの、他の一方はわれわれに調節出来るものであるとしよう。その時制御出来ない変量の過去から現在に至る迄の値に基づいて、調節出来る変量の値を適当に定め、われわれに最も都合の良い状況をもたらせたいと言う望みが持たれる。それを達成する方法がCyberneticsに他ならないのだ。船の場合、風向や海の状態が今迄移り変わって来た模様によって舵を巧く執り、与えられたコースに最も近い航路を船が進む様にするこ

[2] 今日 (1961年現在) では、統計的情報論及び制御論の概念は、馴染み深いものとなった

●初めに「サイバネティクス (Cybernetics)」を書いた時 (1948年の第一版)、統計的情報論及び制御論の概念が目新しく、当時の考え方にとっては、ショッキングでさえあった。今日 (1961年の第二版) では、これらの概念は、通信技術者や自動制御の設計者の道具として、馴染み深いものとなった。

[3]工学上の設計でも、生物学でも、フィードバックの役割が、今は良く認識される様になった

●工学上の設計でも、生物学でも、フィードバックの役割が、今は良く認識される様になった。技術者、生理学者、心理学者、社会学者の誰にとっても、情報の役割と情報を測定し伝達する技術を知る事が最も大切とされる様になった。

[4]自動機械に関する社会的危機については、既に地平線上に頭をもたげて来ている

●オートマトン [注：自動機械] の事は、1948年の出版では少し予言して置いただけであったが、今は立派な地位を占める様になった。それに関する社会的危機については、既に地平線上に頭をもたげて来ている。

[5]ケンブリッジ大学で手ほどきを得たルベーク積分が直接私の若い頃の主な業績を導き出した

●私はケンブリッジ大学で、ハーディ教授からルベーク積分の手ほどきも受けたが、これが直接私の若い頃の主な業績を導き出す事になった。

[6]ルベーク積分は無数の線分や曲線で囲まれた無数の領域に不規則分布する点の集合の大きさ

を測る一つの道具である

●線に沿った或る区間の長さや円その他の滑らかな閉じた曲線内の面積を測る事は実に容易である。だが、無数の線分とか曲線で囲まれた無数の領域とかに撒き散らされた点の集合、又は、この複雑な表現でも未だ十分でない程に不規則に分布している点の集合の大きさを測ろうとすれば、面積とか体積とか言う極めて単純な概念さえも、それを定義する為には程度の高い思考を必要とする。ルベーク積分はこの様な複雑な現象を測る一つの道具である。

[7]確率と統計の理論にとって不規則な領域を測る事は不可欠の事で、この二つの理論は物理学

と数学のほぼ中間の領域に位置し、私が最善の仕事が出来る様な場所だった

●極めて不規則な領域を測る事は確率と統計の理論にとって不可欠の事である。この二つの密接に関連した理論は、私には既に戦前の遠い時代から、間もなく物理学の大きな領域を占めようとしている様に思われた。この二つの理論は物理学と数学のほぼ中間の領域に位置し、この中間領域こそ、ひょっとしたら私の最善の仕事が出来る様な場所だった。と言うのは、そういう仕事は私自身の個性の基調と調和している様に思われたからである。

[8]数学上の観念を物理的世界に生じる問題に応用する事を巡る問題がどの様に展開されて行っ

たかという事は、以下の主要なテーマの一つとなっている

●その上、確率と統計の理論は、アメリカの大科学者ジョーサイア・ウィラード・ギブズの統計力学に於いて展開された測度と確率という観念に依拠し物理学に基礎を置いた近代数学の本流を予想するものであった。

数学上の観念を物理的世界に生じる問題に応用する事を巡る問題がどの様に展開されて行ったかと言う事は、以下の主要なテーマの一つとなっている。

[9]ルベーク積分に依って、長さ即ち測度の概念を単純な区間から点集合の様な測度を定める事が可能な極限の場合に迄拡張する事が出来た

●ルベーク積分の理論に依って学者は、区間の測度（長さ、大きさ）と言うものから区間の系列の結合に依って得られるもっと複雑な現象の測度と言うものへ導かれ、更にその様に区間の系列に依って近似する事の出来る点集合へと導かれる。又、これらの系列から除外された点の集合も同様にして近似する事が出来る。これを使ってルベークは、長さ即ち測度の概念を、単純な区間から、測度を定める事が可能な極限の場合に迄拡張する事が出来たのである。

[10]若い私は、偉大な抽象能力と徹底的な物理学的現実感覚を兼ね備えたヒルベルトの様な数学者になりたいと思った

●ダヴィッド・ヒルベルトは、私がゲッチンゲンで学んだ時の先生だった。ヒルベルトは近代数学のあらゆる分野で次々と大抵の困難を取上げ、どの分野でも大きい業績を上げていた。こうして彼は20世紀初頭の数学に於ける偉大な伝統を代表していた。若い私は、偉大な抽象能力と徹底的な物理学的現実感覚を兼ね備えた彼の様な数学者になりたいものと思う様になった。

[11]ケンブリッジで、ラッセル教授は私に数学の重要性ばかりでなく物理的な勘の必要性をも痛感させた

●ケンブリッジでバートランド・ラッセル教授は私に数学の重要性ばかりでなく物理的な勘の必要性をも痛感させ、電子と物質の本性の理論に関するラザフォードその他の人々の新しい研究を勉強する様に勧めた。

[12]M・I・T に於いて、数学の物理的な局面に対する絶えず高まっていた興味がはっきりした形を取り始めた

●数学の物理的な局面に対する私の絶えず高まっていた興味がはっきりした形を取り始めたのも M・I・T に於いてだった。校舎はチャールズ河を見下し、何時に変らぬ美しいスカイラインが眺められる。河水の面は何時眺めても楽しかった。数学者兼物理学者としての私には、それは又別の意味を持っていた。絶えず移動するさざ波のかたまりを研究して、これを数学的に整理する事は出来ないものだろうか。そもそも数学の最高の使命は無秩序の中に秩序を発見する事ではないのか。波は或る時は高くうねって泡のまだらを乗せ、又或る時は殆んど目に見えぬさざ波となる。時々波の波長はインチで測れる位になったかと思うと、再び幾ヤードにもなるのであった。

[13]水面の波の問題は明らかに平均と統計の問題であり、この意味で当時私が勉強していたル

ベーク積分と密接に関連していた

●一体どう言う言葉を使ったら水面をすっかり記述すると言う手に負えない複雑さに陥らずに、これらのはっきり目に見える事実を描き出す事が出来るだろうか。波の問題は明らかに平均と統計の問題であり、この意味でそれは、当時私が勉強していたルベーク積分と密接に関連していた。こうして私は、自分が求めている数学の道具は自然を記述するのに適した道具である事を悟り、私は自然そのものの中で自己の数学研究の言葉と問題を探さねばならないのだと言う事を知る様になった。

[14]フィリップスのお蔭で、純粋数学者にとって物理的な態度が大切な事を知り、統計力学に関するウィラード・ギブスの偉大な仕事を知る様になった

●M・I・T の数多くの年上の同僚の中、特に一人私を助けて数学の物理的側面を認識させてくれた人は、ヘンリー・ベイヤード・フィリップスである。私が純粋数学者にとって物理的な態度が大切な事を知り、統計力学に関するウィラード・ギブスの偉大な仕事を知る様になったのは誰よりもフィリップスのお蔭である。これは私の生涯に於ける知的な道標であった。

[15]アメリカ最大の科学者ギブスはこの中間領域で仕事をし、実にその草分けをした人だ

●アメリカ最大の科学者ギブスはこの中間領域で仕事をし、実にその草分けをした人である。彼は物理学と数学の両方面に多くの貢献をしたが、私にとって常に最大の興味を呼ぶのは彼の統計力学である。そしてこの領域に於ける彼の仕事が私に非常に大きい影響を与えた。

[16]われわれの限られた測定器具に依っては現在に関する完全な知識は得られないので、物理学者の当面の問題は得られた限りの不完全な知識をどこまで活用出来るかを究明すること

●ニュートンの偉大な物理学的伝統は必然的に決定論の伝統となった。ここでは或る一瞬に於ける宇宙についての完全な知識は、宇宙の全歴史の完全な知識を含むとされている。ニュートンの仮定に依れば、チャールズ河の水面に起っている波の中の粒子の現在の位置と速度を知れば、この波の動きを永久に算定出来ると言う事になる。残念ながら、われわれの限られた測定器具に依っては現在についての完全な知識は得られないのであり、物理学者の当面の問題は得られた限りの不完全な知識をどこまで活用出来るかを究明する事である。

[17]新しい確率の物理学はかなり前から進んではいたが、ギブスの仕事は正しくその最終的にして明確な定式化を狙ったものだった

●この為には唯一つの固定した宇宙ではなく、各々前以って定められた確率を持つ多くの異なる宇宙を同時に扱わなければならない。そうする事に依って、何が必ず起るかと言う事ではなく、一定の条件の下で一定の時に何が起る可能性があるかを知る事が出来るのである。この新しい確率の物理学はかなり前から進んではいたが、ギブスの仕事は正しくその最終的にして明確な定式化を狙ったものであった。

[18]確率の概念を一般化して、問題の出来事が点ではなく曲線の様なもので表わされる場合の

確率に迄及ぼす様に出来ればと、バーネット博士に示唆された

●ケンブリッジにやって来たシンシナチ大学のI・バーネット博士に、新しい活気のある問題を示唆してくれる様に頼んだ。彼は次の様に私に注意を促した。確率の概念を一般化して、問題としている出来事が平面上や空間内の点で表わされないで、空間に於ける道筋を示す曲線の様なもので表わされる場合の確率に迄及ぼす様にしたら、一仕事出来るのではなかろうかと言うのであった。

[19]曲線の確率と言うのは、酔払って足の向う方向が直ぐ前の一步と今度の一步で全く脈絡が

無くなっている人の歩き振りを記述する様な場合に起って来る問題である

●例えば、一点の確率と言うのは、マットに当たった弾痕の分布について、それが中央の黒丸にどう集るかを前以ってどう予言する事が出来るかと言う事であり、曲線の確率と言うのは、ミツバチの飛び経路や、もっと良い例としては酔払って足の向う方向が直ぐ前の一步と今度の一步で全く脈絡が無くなっている人の歩き振りを記述する様に頼まれた場合に起って来る問題である。

[20]M・I・Tでの最初の一年間に、ルベーク積分法をルベーク自身が論じた系よりも複雑な系

に拡大する種々の方法を研究した

●バーネット博士の示唆に従い、私はM・I・Tでの最初の一年間に、ルベーク積分法をルベーク自身が論じた系よりも複雑な系に拡大する種々の方法を研究した。

[21]テーラーの乱流理論の論文では、乱流中の空気粒子の経路は曲線であって、その様な曲線

族に亘っての平均又は積分を含んでいた

●ロンドン数学会誌の中で私はG・I・テーラーの乱流の理論に関する論文を見た。これは流体力学と航空にとって本質的な重要性を持った分野で、テーラー卿は長年英国でこの問題に関する研究の支柱となって来た。この論文は少なくとも次の点で私自身の興味と繋がるものだった。即ちそれは、乱流中の空気粒子の経路は曲線であって、テーラーの論文の物理的結果は、その様な曲線族に亘っての平均又は積分を含んでいるという点である。

[22]私は曲線の平均に関する理論の物理学的可能性を益々考える様になり、最初の大きな数学

上の仕事の課題にブラウン運動の問題を選んだ

●テーラーの論文を手掛りとして、私は曲線の平均に関する理論の物理学的可能性を益々考える様になった。乱流の問題は余りに複雑で直ちに手を付ける訳には行かなかったが、これと関連した問題の中に、私が自分の為に選んだ分野の理論的考察には打って付けのものがあつた。それはブラウン運動の問題で、これが私の最初の大きな数学上の仕事の課題を与える事になった。

[23] 気体や液体の様な流体の分子は静止していないで、群集の中の人間の様に、ブラウン運動と呼ばれるでたらめな不規則運動をしている

●気体や液体の様な流体の分子を考えて見よう。これらの分子は静止していないで、群集の中の人間の様にでたらめな不規則運動をしている。この運動は温度が上昇すれば一層活発になる。さてこの流体の中に小さい球を入れた場合を考えよう。するとこの球は分子に依って突き回される事になる。もしこの球が極めて小さいものならば見えないし、もし非常に大きくて流体の中に中ぶらりんになっておれば、球と流体の沢山の粒子との衝突は十分良く相殺されて運動は起らない。しかし中間の段階、即ち球が見える程度に大きく、顕微鏡の下で絶えず不規則運動をしているのが見られる程度に小さい場合がある訳である。この運動は、分子の不規則運動の存在を示すものであり、ブラウン運動と呼ばれている。これは最初 18 世紀の顕微鏡学者によって顕微鏡の視野に於ける全ての十分小さい粒子の普遍運動として観察されていたものである。

[24] 私は粒子が曲線ばかりでなく曲線の統計的集合をも記述するという場合をブラウン運動に見出したのだが、それはルベーク積分とギブスの業績に関連を持っていた

●私は粒子が曲線ばかりでなく曲線の統計的集合をも記述するという場合をここに見出したのであった。それは曲線空間に於けるルベーク積分に関する私の考え方を検証する理想的な場であると同時にその持つ多分に物理的な構造をも備えていた。私はこの分野に対し、私が既に積分理論に於いて進めていた研究を応用しようと決心した。そしてかなりの成功を収めた。

[25] アインシュタインやスモルコフスキーのブラウン運動に関する論文は、一個の粒子が描いて行く曲線の数学的性質を論じてはいなかった

●ブラウン運動は物理学者の研究対象としては別に新しいものではなかった。アインシュタインやスモルコフスキーのこれに関する基本的な論文もあった。しかし、これらの論文は特定時間に任意の一粒子に起る事柄、又は多くの粒子の長期的な統計を扱ってはいたが、一個の粒子が描いて行く曲線の数学的性質を論じてはいなかった。

[26] 物理学者のペランが鋭い論文で、ブラウン運動中の粒子が取る非常に不規則な曲線から、われわれは数学者が想像する連続であって微係数を持たない曲線と言うものを想起すと述べている

●この方面の極めて乏しい資料の中にフランスの物理学者のペランがその著「原子論」で書いている鋭い論文がある。それは要するに、ブラウン運動中の粒子が取る非常に不規則な曲線から、われわれは数学者が想像する連続であって微係数を持たない曲線と言うものを想起するというのである。彼に依れば、この粒子はギャップを跳び越さないからその運動は連続であり、如何なる時にも運動がはっきり定まった方向を取らないと思われるので微係数を持たないと言うのであった。

[27] 私は分子の大きさが極微で衝突が継続的に起っている様な理想化されたブラウン運動を研究し、これが本物のブラウン運動のもっと粗雑な諸性質に対する優秀な代用物である事を知った

●物理学で言うブラウン運動では粒子は分子の衝突の結果から不断の影響を受けるのではなく、衝突と衝突の間には短い時間的余裕がある事は言う迄もない。しかしこの隙間は極めて短いもので普通の方法では観察出来ない。従って分子の大きさが極微で衝突が継続的に起っている様な理想化されたブラウン運動を設定する事が自然となる。私はこの様な理想化されたブラウン運動を研究し、これが本物のブラウン運動のもっと粗雑な諸性質に対する優秀な代用物である事を知った。

[28] ブラウン運動の完全さと優美さを備えた形式的理論を発見し、確率がゼロの一組の集合を除き全てのブラウン運動は、連続で微分不能な曲線である事を証明する事が出来た

●このようなものとして考えられたブラウン運動が高度の完全さと優美さを備えた形式的理論を持っている事を発見した時は、驚くと同時に嬉しかった。この理論に依って私はペランの推測を確認すると共に、確率がゼロの一組の集合を除いては、全てのブラウン運動は、連続で微分不能な曲線である事を証明する事が出来た。

[29] 私の論文は、ルベークの積分のテクニックとギブスの物理学的なアイデアを結合する、斬新な何かを暴き出した最初の論文だった

●この題目について私が書いた論文は、ルベークの積分のテクニックとギブスの物理学的なアイデアを結合する何か斬新なものを暴き出した最初の論文だったと思う。

[30] 私の論文は、ギブスの仕事の理論的根拠に暗に含まれていた問題点を解決しなかったが、それは、後の1930年にJ・フォン・ノイマン等の手に依りルベークの意味で解決された

●この論文はギブスの仕事の理論的根拠に暗に含まれていた問題の中のものや解決しなかったが、それは、後にバーナード・コープマン、J・フォン・ノイマン、G・D・バーコフの手に依りルベークの意味で解決される事になった。この解決はギブスとルベークに共通なものがあると言う事が最早珍しくなくなった1930年の事であった。

[31] 丁度注目され始めて来た、所謂ショット効果（散弾効果）と呼ばれる、もう一つの現象があり、それも私のやった研究で扱うことが出来ると考えられた

●私がブラウン運動に関する最初の論文を書き下した頃丁度注目され始めて来たもう一つの現象があり、それも私のやった研究で扱うことが出来ると考えられた。それは所謂ショット効果（散弾効果）であった。これは、電線または真空管を電流がツブツブな電子の流れと言う形で伝わる事に関するものである。

[32] ショット効果と言われる電子の流れの不規則性は極めて小さいが、これに依る真空管又は導線の雑音の負荷が大きい時には、電気器具の使用に重大な制限を与える

●不連続な電子の流れを作る時には、時には電子を一カ所に混み合わせ、又時には電子の流れを多少稀薄にするという事が起らないようにする方法はない。ショット効果と言われるこれらの不規則性は極めて小さいが、真空管増幅器を使用する事に依り聞える程度に迄増幅することが出来る。この真空管又は導線の雑音は負荷が大きい時、電気器具の使用に重大な制限を与える。

[33] 後にラジオ、次いでレーダー、テレビが発達した結果、ショット効果はあらゆる通信技師の直接の関心とされるに至った

●1920年にはショット効果が問題になる程まで負荷が与えられる電気器具はめったになかった。しかし、後にラジオ、次いでレーダー、テレビが発達した結果ショット効果はあらゆる通信技師の直接の関心とされるに至った。

[34] ショット効果は、起源がブラウン運動に類似しているのみならず、本質的に同一の数学理論を持っていたので、ブラウン運動に関する私の仕事は約20年後に電気技師の不可欠の道具となった

●このショット効果は、その起源がブラウン運動に類似している（つまりそれは宇宙の不連続性の結果である）のみならず、本質的に同一の数学理論を持っていた。かくしてブラウン運動に関する私の仕事は約20年後電気技師の不可欠の道具となった。

[35] 新しい時代が起り、産業と戦争の緊急の必要が、私が解決し或いは光明を投げ掛けていた問題が真に注目に値するものだという事を証明してくれる迄、私は待たねばならなかった

●しかしながら私の仕事はかなりの期間死産したかの様であった。やっと私がブラウン運動に関して最も初期の論文を書いた時には、数学界に何ら大きな問題を起しはしなかった。私の仕事はアメリカ数学の指導者達から全然問題にされなかった。幾年も後に新しい時代が起り、産業と戦争の緊急の必要が、私が解決し或いは光明を投げ掛けていた問題が真に注目に値するものだという事を証明してくれる迄、私は待たねばならなかった。

[36] ヨーロッパでの受けはアメリカよりも遥かに良かったが、私は米国は勿論ヨーロッパでも、新時代の支柱たるべき一人としてよりも、何か末梢的な才能を備えた若者と見做されていた

●ヨーロッパでの受けはアメリカでよりも遥かに良かった。1920年の夏を共に過したモーリス・フレシエは私の仕事に多少興味を抱いていた。私の仕事は多くの点で彼の考えと相通じるものがあったからである。彼の年下の同僚ポール・レヴィは既に私の考えと関連のある方向を研究し始めていたし、英国のテラーは私の考え方に理解を持っていた。それでも私は米国は勿論ヨーロッパでも、新時代の支柱たるべき

一人としてよりも、何か末梢的な才能を備えた若者と見做されていた。

[37] 私は自分の新しい考えの重要性を十分に確信していたので、私の仕事は自信を持って進むことの出来る明確な方向を持つ様になった

●それはともかくとして、私は自分の新しい考えの重要性を十分に確信していた。この確信は私の構想が小さいながらも整った形式を備えた課題として急速にまとまって行くにつれて、いよいよ強まった。私は間違いないと思った。仕事の細かい部門を理解する為に、波や振動、数学用語で言い換えれば、フーリエ級数、フーリエ積分等についてもっと突っ込んで勉強する必要があった。私は従来から物理的な意義を持つ事が知られていた数学の諸部門を徹底的に勉強し始めた。これらは全て応用数学をやってもらいたいと言うM・I・Tの同僚の私に対する希望にぴったり当てはまった。この時以後、私の仕事は決して行き当たりばったりのものではなく、自信を持って進む事の出来る明確な方向を持つ様になった。

[38] 数学者は、最高の創造的能力に恵まれた短い春の季節を、生涯を投じても消化し切れな
い位の豊富さと魅力を備えた新しい分野と新しい問題の発見に献げるべきである

●数学者が線香花火の様でない一生を送る為には、彼は、最高の創造的能力に恵まれた短い春の季節を、生涯を投じても消化し切れな
い位の豊富さと魅力を備えた新しい分野と新しい問題の発見に献げるべきである。若い私を刺激し、それを創始するため相当な努力を献げた問題が、60代になった今尚、私に最大の要求を加えて来る力を失っていない様に思われるのは、私にとって幸いである。

[39] 一緒に仕事をしたいと思って私が選んだ学者、モーリス・フレシエは、点の代わりに曲
線を対象とする新しい数学の意味する所を最も深く見抜いていた

●私は、1920年のストラスブールの国際数学会議が9月に始まる前の時間を利用して私と同じ興味を抱いているヨーロッパの学者と一緒に仕事をしたいと思った。私が選んだ学者はモーリス・フレシエであった。点の代わりに曲線を対象とする新しい数学の意味する所を最も深く見抜いていたのは、他ならぬフレシエであった。当時われわれは皆、彼の仕事は将来の数学への新しい偉大な前進を画することになるだろうと言う大きい期待を持っていた。もっとも現在では、彼の仕事は極めて重大であるが、われわれが期待していたよりも中心から外れている事が分った。それは、深遠な物理学的応用を基本的に受け入れない抽象的形式主義の精神で書かれている。

[40] フレシエの仕事には、ラッセルやホワイトヘッドがプリンピキア・マテマティカの為に
考案した極めて独創的な数学的論理学の術語で表わされるのに相應しいものが最初から多分に
あった

●私が特にフレシエに引き付けられたのは一つには彼の仕事の精神が、1914~1915年にかけて私がロンビア大学で試みた位相幾何学の仕事に密接な関係を持っていたからである。先にラッセルに師事し、後ホワイトヘッドの仕事に接触した事は私を数学で形式論理的な道具を使用する事に敏感にさせていた。そしてフレシエの仕事の中には、既にラッセルやホワイトヘッドがプリンピキア・マテマティカの為に考

案した独特な極めて独創的な数学的論理学の術語に依って表わされるのに相応しいものが最初から多分にあったのである。

[41] 仮説主義 (postulationalism) と構成主義 (constructionalism) と言う、数学の方法についての二つの対立する考え方は、数学の中心的課題の一つであり、私の大きい関心事だった

●仮説主義 (postulationalism) と構成主義 (constructionalism) と言う、数学の方法についての二つの対立する考え方は、数学の中心的課題の一つであり、1920年のストラスブールの国際数学会議での私の大きい関心事であった。

[42] ギリシャ人の幾何学で「平行線の公理」と言う公準には数学上の純粋に論理的な公準程の純然たる明白さはないので、数学者達は幾世代にも亘ってこれに対する例外を求めて来た

●ギリシャ人の幾何学は公理 (axiom) とか公準 (postulate) と言われる若干の基本仮定から出発している。そしてこれらは論理的思考と幾何学的思考の絶対的な規則と考えられている。これらの中には、主として形式的論理的な性格のもの、例えば「同一の量に等しい諸量はすべて相等しい」と言う公理がある。もっと純粋に空間的内容を持つ公理としては平行線の公理がある。これは「平面上に直線 L とこの線上にない一点 P がある場合、この平面上で P 点を通り L と交わらない直線は一本しか引けない」と言うもので、この直線は言う迄もなく L と平行な直線である。この公準には数学上の純粋に論理的な公準程の純然たる明白さはない。そこで数学者達は幾世代にも亘ってこれに対する例外を求めて来た。

[43] 19世紀に平行線の公準を否定しても非ユークリッド幾何学が成立すると言う結論に到達以来、公準とは特定の数学体系で認める事も拒否する事も可能な仮定だと見做されるに至った

●遂に、19世紀初頭、ハンガリーのヤーノシュ・ボーヤイとロシアのロバチェフスキーとドイツの大ガウスを含む一群の数学者が、平行線の公準を否定しても何ら矛盾はなく新しい別個の非ユークリッド幾何学が成立するに過ぎないと言う大胆な結論に到達した。この時以来、幾何学のみならず他の数学部門に於いても、所謂公準なるものは否定出来ない真理ではない事がいよいよ明白に理解される様になった。公準とは、われわれが研究を進めようとする特定の数学体系について認める事も拒否する事も可能な仮定である、と見做されるようになった。

[44] 公準を思考の基本原理と言うよりもむしろ研究を進める便宜の為に作られた仮定と考える数学上の暫定的態度は、次第に全ての国の数学者の標準的見解となり始めた

●公準を思考の基本原理と言うよりもむしろ研究を進める便宜の為に作られた仮定と考える数学上の暫定的態度は、次第に全ての国の数学者の標準的見解となり始めた。アメリカではハーヴァードのエドワード・ヴァーミル・ハンチントン氏がその初期の代表者の一人でおそらく初期の主要な代表者だったであろう。私は1912年に彼の下で学び、彼から大きい影響を受けた。

[45] ホワイトヘッドは、数学の対象は公準の中に記述された基本概念だけではなくむしろ論

理的構成であるという見解を以って、純粹の仮説主義を補足した

●ホワイトヘッドはおそらく英国の仮説主義者として主要な人物であつたらう。しかし、彼は、数学の対象は公準の中に記述された基本概念だけではなくむしろ論理的構成であるという見解を以って、純粹の仮説主義を補足した。ハンチントンはこれと良く似た考えを全く別個に定式化したし、又これより数年前に哲学者のジョーサイア・ロイスはこれと方向を同じくする重要な論文を書いていた。

[46] ホワイトヘッドとラッセルのプリンキピア・マテマティカの中にある整数の定義は、数学に於ける構成主義の古典的な実例である

●しかし数学に於ける構成主義の古典的な実例はホワイトヘッドとラッセルのプリンキピア・マテマティカの中にある整数の定義である。

[47] 数に対する仮説主義者の取り扱い方とホワイトヘッド・ラッセルら構成主義者の取り扱い方との相違を述べると次の様になる

●数に対する仮説主義者の取り扱い方とホワイトヘッド＝ラッセルら構成主義者の取り扱い方との相違を述べると次の様になる。

●仮説主義では、数とはそれ自体は無定義で、その相互関係が一組の仮定的な形式的関係に依って結び付けられるものであり、われわれの経験からより要素的な経験を一定の様式で結合する事に依って作り出されることの出来る或るものである。仮説主義者の取り扱い方に依れば、整数とは単に、もし a が b の前にあり、 b が c の前にあれば、 a は c の前にあり、ゼロ以外の全ての数はその直前に別の数を持つ、と言う様な前後関係に並べられる或るものである。これらの関係は仮説主義者の整数系の取り扱いに於ける公準の一部を為している。

●構成主義者が数を扱う際には、先ず単位集合と言うものを考える。この集合はその構成要素の全てが実とは同一物である集合である。すると、1 という数は全ての単位集合の集合の事である。次に二つ組み集合を考える。これは、単位集合ではないが、その構成要素をどれか一つ取り去ると単位集合となる集合である。すると、2 という数は全ての二つ組み集合の集合なのである。三つ組み集合と言う集合は、単位集合でも二つ組み集合でもないが、その構成要素のどれか一つを取り除くと二つ組み集合となる集合である。3 とは全ての三つ組み集合の集合である。この様にして、数学的帰納法と言う手続きに依って、全ての自然数の完全系を作る事が出来る。

●専門外の人にはこんな事は恐らく空虚な理屈のこね回しの様に聞えるであろう。しかし、これらの定義に与えられたかなり精密な思考は論理学者に対し数学上のもっと突っ込んだ考え方に進むための堅固な地盤を提供している。集合の集合、関係の間の関係、として益々複雑な数学的对象を作り上げて行くコツは、ハンチントンやラッセルの仕事に依って私には親しいものになっていた。事実私は既に、この技術を若干の初等的な数学的状況の構成に応用する事についての二、三の論文を書き上げていた。

[48] 仮説主義と構成主義は単に数学だけの動きではなく物理学に於いてもあり、相対性理論

と新しい量子力学は物理学が古典的な枠を打破って、一組の明白な公理として与えられる新しい定義を採用している

●反説主義と構成主義は単に数学に於いてだけの動きではなく、物理学に於いてもあるのである。アインシュタインの相対性理論と新しい量子力学とは新しい領域を組み立てているのであり、そこでは物理学が古典的なユークリッド幾何学の枠を打破り、カントの古い空間理論の与える様な固定的な取替えることの出来ない空間的直感としてではなく一組の明白な公理として与えられる新しい定義を採用しているのである。

[49] 私は反説主義の伝統の中で育ち、起って来た構成主義の初期の空気を吸ったので、共に仕事をするフランスの学者には二つの思考方向の一つ又は双方を具体化した仕事をしている人を探した

●私は反説主義の伝統の中で育ち、そこから起って来た構成主義の初期の伝統の空気を吸った。そこで私は一緒に仕事をするフランスの学者を探した時、これら二つの思考方向の一つ又は双方を具体化した仕事をしている学者を探したのであった。フランスはこれらの新しい思考様式を取り入れるのにとかく遅れ勝ちだったが、フランスの反説主義に関する限りではフレシエが絶対的な指導者であった。

[50] 私は構成主義の立場から、新しい一層複雑な曲線空間を研究する道具としてのフレシエの反説主義を補足する為に、完全な失敗作とも言えない二、三の試論を書いた

●私は構成主義の立場から、新しい一層複雑な曲線空間を研究する道具としてのフレシエの反説主義を補足する為に、完全な失敗作とも言えない二、三の試論を書いた。しかしこの新努力はフレシエ自身の仕事の内部の枠から離れたものであった。

[51] 一般化された空間に対するフレシエの取り扱い方では、点を数の組で表現する座標を用いていないので、私はフレシエの仕事の二、三の点を拡張しようとしていた

●私はフレシエの仕事の二、三の点を拡張しようとしていたのである。一般化された空間に対するフレシエ氏の取り扱い方に於いては、所謂座標は用いられない。即ち彼は点を数の組で表現しようとはしないのである。座標に依る空間の表現法では、ある区間の両端にある二点の関係は一端に対応する数と多端に対応する数の差に依って量的に決まる。二次元又は三次元の普通の幾何学では線分のこの様な表現法はベクトル表現として知られている。例えば、三次元の空間中に一点が与えられている場合、他の点の位置は、その点に対して北、東及び上方にどれだけ離れているかが示されれば定まる。ベクトル理論は数学では別に新しい事ではない。1世紀半以上もの間、普通の三次元空間はそれ自体の中に矢の様な方向付けられた量を含んでいる事が知られていた。この量は相互に加える事が出来る。それには、例えば、一つの矢で表わされる行程を通り、次いで他の矢で示される行程を通る時、この二行程をそれが一つの行程であるかの様に考えれば良い。この様な方向を持った行程を使って導かれる多くの操作に立ち入る事はしないが、三次元以上でも無限次元空間でも同様な幾何学が存在する事がずっと前から知られていた。

[52] 極限と微分とに関するフレシェの一般化された理論はベクトル空間を含む多種の空間に適用し得るが、ベクトル系を自分の着想の中で特に取立てて重要なものとも考えていなかった

●極限と微分とに関するフレシェの一般化された理論はベクトル空間を含む多種の空間に適用し得るものであるが、必ずしも一つ一つの要素を一つ一つの行程と見做し得る空間のみに限られている訳ではない。しかしこの行程の幾何学はフレシェの一般理論の極めて重要な部分を形成するもので、一組の適切な仮定で強化する価値のあるものだった。フレシェはこれをしていなかったし、またこれらのベクトル系を自分の着想の中で特に取立てて重要なものとも考えていなかった。私がやったのはその仕事であった。それは群論と呼ばれており相次いで行われる変換の結合の理論と密接に関連し、事実、群論の重要部分を構成している。

[53] 私はベクトル空間に対して完全な一組の公理を設定したが、その二、三週間後にフレシェはポーランドの数学雑誌でステファン・バナッハが発表した論文を見て、全く興奮した

●私はベクトル空間に対して完全な一組の公理を設定した。それから二、三週間後彼がポーランドの数学雑誌でステファン・バナッハが発表した論文を見た時、彼は全く興奮してしまった。その論文は私が出した結果と事実上同一のものを含んでいたのである。しかも私たち二人の論文のオリジナリティーの程度は同一であった。

[54] バナッハ空間は、私が自分の将来を賭ける理論の要件として望んでいた物理的数学的な構造を持っていない様に思われたが、それは厳密に論理的な意味でよりは審美的な意味でなのだ

●こうしてバナッハと私の二つの業績は当分バナッハ＝ウィーナー空間の理論として知られる様になった。以来 34 年間、それは依然人気のある研究方向となっている。私はこの問題について一、二の論文を発表し続けたが、次第にこの分野から離れた。私にとってバナッハ空間が、自分の将来の声価の大部分を賭けようとしていた理論の為に私が望んでいた物理的数学的な構造を持っていない様に思われたのは、厳密に論理的な意味に於いてよりは審美的な意味に於いてなのである。

[55] ブラウン運動の空間である微分空間はバナッハ空間に酷似した一種のベクトル空間で、私に最も好都合な物理的性格を備えたものだった為、私の注意をバナッハ空間からそちらへ引き付けた

●私がバナッハ空間の理論を放棄する様になった主な要因はブラウン運動に関する私の仕事が実を結び掛けて来たからであった。ブラウン運動の空間である微分空間は、実はそれ自体バナッハ空間に酷似した一種のベクトル空間で、私にとって最も好都合な物理的性格を備えたものであった為に、私の注意をバナッハ空間からそちらへ引き付けてしまった。その上バナッハ空間論では私は新参者であったのに反し、ブラウン運動に関する理論ではその純粋に数学的な部分は全部私のものであった。

[56] フレシェは当時フランスで最も有望視されていた若い確率学者だった工科大学のポール・レヴィを紹介してくれて、レヴィ氏と私は現在に至るまで仕事上で相互に影響し合っている

●私が微分空間の理論を初めてフレッシュに語ったとき、彼がその重要性を認めてくれたとは思われない。しかし彼は、当時フランスで最も有望視されていた若い確率学者だった工科大学のポール・レヴィを紹介してくれた。レヴィ氏と私は現在に至るまで仕事の上で相互に影響し合っている。

[57] M・I・T 電気工学科のジャクソン教授は数学の素養のある工学者又は工学の素養のある数学者を探し求めていたが、理由は当時電気工学理論の進歩を妨げていた若干の問題を解決する為だった

●ストラスブールから帰って見ると私の仕事は私にとってお誂え向きの状態にあった。M・I・T の電気工学科の部長であったドゥガルド・C・ジャクソン教授は数学の素養のある工学者又は工学の素養のある数学者を探し求めていたが、その理由は当時電気工学理論の進歩を妨げていた若干の問題を解決する為であった。電気工学は大体ははっきりと二つの分野に分ける事が出来る。その各々は英語では電力工学と通信工学と呼ばれ、ドイツ語では“強電技術”と“弱電技術”と呼ばれている。

[58] 電力工学の方は 1920 年迄には大体安定した学問になっていて、今日存在する発電機、モーター、変圧器等の型はその頃迄には大部分が完全に理解されていた

●電力工学の方は 1920 年迄には大体安定した学問になっていた。今日存在する発電機、モーター、変圧器等の型はその頃迄には大部分が完全に理解されていた。1920 年以降の電力工学の分野に於ける進歩は、大きな送電系統及び電源に関する戦略と言った面に見られたのである。米国および他の諸国に於ける膨大な電力網は増大し、相互に連結され、安定化された。

[59] 通信工学の方では、当時の通信理論の論理的基礎は到底満足できる様なものではなくて、それは実際以上に不満足なものの様に思われていた

●通信工学の方では事態はずっと遅れて安定化した。当時の通信理論の論理的基礎は到底満足できる様なものではなかったが、その上それは実際以上に不満足なものの様に思われていた。

[60] 当時、電話線上の波動（揺らぎ）が音声入力の写しである事は理解されていたが、波動電流と電圧の理論の意味する所を完全に理解する事が大問題なのであった

●勿論会話は電話線上を波動電流となって伝わり、その波動（揺らぎ）が音声入力の写しである事は理解されていた。だが波動電流と電圧の理論の意味する所を完全に理解する事が大問題なのであった。

[61] 波動電流と波動電圧の理論は、交流理論及び交流回路網の理論として C・スタインメッツによって統一されたが、それは虚数又は複素数の数学的理論を極度に駆使して記述された

●数十年間に亘って波動電流と波動電圧の理論は通信工学のみでなく、電力工学に於いても交流理論という形で支配力を揮って来た。交流理論及び交流回路網の理論はゼネラル・エレクトリックに於いてチャールス・スタインメッツにより組織化され統一された。この才気ある小柄な人物は虚数又は複素数（これは実数に劣らず実在的かつ実用的なものである）の数学的理論を極度に駆使して交流電流・電圧及びそれに依って働く装置を記述した。交流の工学に複素数が持ち込まれた理由は、複素数は所謂実部と虚部という一対の実数から成っており、他方周波数の与えられた交流も又二つの実数に依って定められる——その一方は交流の強さを、他方は位相即ち電流或いは電圧が零を通過する時刻を表わす——事に依るのである。

[62] 電話その他の通信工学に於いて取り扱う交流はずっと複雑なもので、その毎秒当りの振動数は一定せず、任意の与えられた時刻に於いてわれわれは同時に多くの種類の振動を扱わねばならない

●多年に亘り交流理論は少なくとも例えば 60 サイクルの電圧及び電流と言う様に周波数の一定した電流や電圧に関する限りはかなり完全なものであった。電話その他の通信工学に於いても又われわれは数種の交流を取り扱うが、この交流はずっと複雑なものであって、その毎秒当りの振動数は一定せず、任意の与えられた時刻に於いてわれわれは同時に多くの種類の振動を扱わねばならない。

[63] 唸り声から金切り声に至るあらゆるものを運ばねばならない電話線は、その周波数に可変性と多様性とがあって初めて有効な通信伝達手段として使えることになる

●一本の電話線は同時に例えば 20 サイクルの周波数と 3000 サイクルの周波数を運ぶのである。この様に周波数に可変性と多様性とがあるからこそ電話線は有効な通信伝達手段として使えるのである。電話線は唸り声から金切り声に至るあらゆるものを運ばねばならない。

[64] 調和解析の基本定理の教える所に依れば、同一波形を無限に繰り返している様な曲線は振動数の異なる無限個の正弦波に分解する事が出来る

●調和解析の基本定理の教える所に依れば、同一波形を無限に繰り返している様な曲線は振動数の異なる無限個の正弦波に分解する事が出来る。こう言った事実は既に 18 世紀には知られていたが通常この定理はフーリエの名を冠せられて居る。彼はフランス学士院会員で、ナポレオンのエジプト遠征に参加した人である。

[65] 調和解析は周期現象の解析——フーリエ級数——と時間が経つにつれ零から始まって再び零へ戻るような現象の解析——フーリエ積分——を扱うがどちらも量を加えるのにルベーク積分の手法を用いる

●調和解析には二つの部分があり、それらは夫々、周期現象の解析——フーリエ級数——と、時間が経つにつれて零から始まって再び零へ戻るような現象の解析——フーリエ積分——を扱う。どちらの場合でも数学者は量を加えるのに奇妙な方法を用いなければならないのであって、その方法とは既に述べたルベーク積分の手法である。

[66] フーリエ級数とフーリエ積分についての真の満足すべき理論は 1920年には現場の電気工学者の手に届くには至っていなかった

●しかしながら、フーリエ級数とフーリエ積分についての真の満足すべき理論は 1920 年には未だ余りに新しく現場の電気工学者の手に届くには至っていなかった。

[67] フーリエ積分の標準的理論が扱える現象は、始まりと終りを持ち、大体同じ大きさで、無限に広がる事のないものに限られていたので、雑音とか光束で出会うような連続的現象は数学者からは無視された

●その上工学者が主として興味を抱いていた様な現象は純粋数学者の手法を以てしては殆ど捕捉する事が不可能だった。純粋数学者が取り扱っていたフーリエ級数は或る定まった時間経てば再び繰り返される様な現象の研究にしか使えなかった。フーリエ積分に関する標準的理論の扱い得る現象は何らかの意味で始まりと終りを持ち、大体同じ大きさで、無限に広がる様な事のないものに限られていた。われわれが雑音とか光束で出会う様な連続的現象は職業的数学者からは無視された。

[68] 通信理論の正しい基礎付けに関して求められた多くの要求を満すには、当時の調和解析を基にしただけでは果せないと言う事が、私には分って来た

●ジャクソン教授が通信理論の正しい基礎付けに関し私に求めた多くの要求を満すには、調和解析の研究を進めれば良い筈だが、この仕事は当時の調和解析を基にしただけでは果せないと言う事が、私には分って来た。

[69] 通信工学者が用いたヘヴィサイドの演算子法は、厳密に正当化されてはいなかったが、その考えを吸収して利口な使い方をする事の出来た人達にとっては役に立つものだった

●通信工学者が実際にやっていた事と言えば約 20 年も前にオリヴァー・ヘヴィサイドによって展開された形式的計算法を用いる事であった。このヘヴィサイドの演算子法は当時完全に厳密に正当化されていた訳ではなかったが、ヘヴィサイド自身及び彼の考えを十分吸収して利口な使い方をする事の出来た人達にとっては役に立つものであった。

[70] ヘヴィサイドの演算子法の適切で厳密な基礎付けをする事では、私が最後に与えた方法以上に満足すべきものはないと思う

●私が M・I・T の電気工学科から多年に亘って受けた主要な要求はヘヴィサイドの演算子法の適切な厳密な基礎付けをする事であった。同じ事を同じ頃、他の国々で他の人々がやっていたが、私の考えでは私が最後に与えた方法以上に満足すべきものはないと思う。

[71] 私は極度に一般的な基礎の上に立って調和解析の研究をして、ヘヴィサイドの業績が一言一語、この一般化された調和解析の言葉に翻訳出来る事を発見した

●この仕事をするに当って私は極度に一般的な基礎の上に立って調和解析の研究をせねばならなかった。そして私はヘヴィサイドの業績は一語一語この一般化された調和解析の言葉に翻訳出来る事を発見したのである。

[72] 私がヘヴィサイドの理論に関してやっていた事と、それ以前に私がブラウン運動に関してやった事との間には、連続スペクトルを持った音や光に対応する運動という点で関連があった

●これらの全ての点で、私がヘヴィサイドの理論に関してやっていた事と、それ以前に私がブラウン運動に関してやった事との間には関連があった。私のブラウン運動の研究より前には、連続スペクトルを持った音又は光に対応する様な種類の運動の十分満足な例は示されていなかった。

[73]連続スペクトルとは、エネルギーが、孤立したスペクトル線に塊まって含まれていないで、連続的な周波数の波に分布しているものの事である

●連続スペクトルとは、エネルギーが、孤立したスペクトル線に塊まって含まれていないで、連続的な周波数の波に分布しているものの事である。そして、従来の調和解析は、太陽の光を調べる時見えるものよりは、ナトリウムの蒸気の光を調べる時見えるものの方に対応していた（ナトリウムの蒸気から出る光は何本かの輝線に集中しており、他方太陽の光は色、従って周波数に関して連続に分布している）。

[74]私は不連続的なもの特にブラウン運動やショット効果の数学と物理学とを研究していた

●私は不連続的なもの特にブラウン運動やショット効果の数学と物理学とを研究していた。ブラウン運動では気体中に置かれた粒子が、運動している気体分子から受ける次々の衝撃が研究されている。ショット効果（散弾効果）は電流が個別的な電子の流れに依って運ばれるために起る現象である。

[75]私はブラウン運動やショット効果を用いて連続スペクトルを発生させ得る事と、ショット効果発信器から振動回路に入力を供給した場合、出力は連続的な振動数分布を持つ事を発見した

●私はブラウン運動又はショット効果を用いて連続スペクトルを発生させ得る事と、ショット効果発信器から振動回路に入力を供給した場合、出力は連続的な振動数分布を持つ事を発見した。

[76]私は既に連続スペクトルの理論に於ける統計的要素と、更にそれを通じて通信理論に於ける統計的要素を探り出し始めていたのだ

●言い換えれば私は既に連続スペクトルの理論に於ける統計的要素と、更にそれを通じて通信理論に於ける統計的要素を探り出し始めていたのである。

[77]30年を経た今日、通信理論は全く統計的であるが、この源は私のその頃の研究に遡る事が出来るのだ

●それから殆ど30年を経た今日、通信理論は全く統計的であるが、この源は私のその頃の研究に遡る事が出来るのである。

[78]他にも私を捕えた問題があったが、私はケロックからポテンシャルの分布という古い問題が再び新たな興味を引きつつある事を学んだ

●私の数学的活動は調和解析の問題だけに尽きる訳ではない。他にも私を捕えた問題があったが、その程度には強弱があった。私は時々ハーヴァード大学のO・D・ケロック教授と何か私の研究の種にするのに面白そうな問題について話し合う事にしてた。私はケロックからポテンシャルの分布と言う古い問題が再び新たな興味を引きつつある事を学んだ。

[79]例えば一つの部屋の中の各点での温度や電位の様に、平面上又は空間内の各点で異なる値を取る様な測定可能な量を扱う物理的問題は沢山ある

●平面上又は空間内の各点で異なる値を取る様な測定可能な量を扱う物理的問題は沢山ある。例えば一つの部屋の中の温度はこの様な量である。又、流体の流れや気体の拡散に関連した同様な量が他にもいろいろある。電気現象の場合は電位がそれで、これは電圧計（ポルトメーター）で測定する事が出来る量である。電圧計は室内の各点と地面との間の起電力や電流が流れている導体内の二点の間の起電力を示す。

[80]偏微分方程式とは、こういう量が空間内のいろいろな方向に沿って変化する率と時間の経過と共に変化する率との間の種々の関係を記述する数学者の言葉である

●空間及び時間に関して変化する一切の量に関する数学は偏微分方程式の分野に含まれている。偏微分方程式とは、こういう量が空間内のいろいろな方向に沿って変化する率と時間の経過と共に変化する率との間の種々の関係を記述する数学者の言葉である。既にライブニッツの時代から、時間的にも空間的にも分布した量が存在し、これらの量は空間的变化率と時間的变化率とを有する事が良く知られていた。

[81]気温や水の流れの様に、空間と時間に関して分布する量には工学的に重要なものが多い

●気温は一時間毎に何度かずつ変る事もあり、北へとか東へ何マイルか行く毎にやはり何度かずつ変化する事もある。また水が丘を流れ下っている時、丘が急なほど流れは早い。この様に空間と時間とに関して分布している量には工学的に重要なものが多い。送電線の周囲の局所的な起電力（電位勾配）に応じて、送電線が大した漏洩なしに送電出来るか、コロナ放電を生じて夜光って見えるかが決まり、延いては電気会社や需要者の懐具合にも影響を与えるのである。建築物の壁の断熱力の研究では熱の流れや温度の勾配などの間の関係が問題になる。

[82]これらの量はポテンシャルと呼ばれていて、それに関する数学の大部分は明晰かつ直接的であるが、境界と呼ばれる領域の近傍ではポテンシャルの問題は一段と複雑さの度を増す

●これらの量はポテンシャルと呼ばれているが、それに関する数学の大部分は明晰かつ直接的である。しかし非常に特殊な電氣的性質を持った部分の極く近傍へ来ると、われわれは困ってしまう。境界と呼ばれ

るこれらの領域の近傍では静電ポテンシャルの問題は一段と複雑さの度を増す。同様の困難が熱や流体の流れに関する問題でも生ずるのである。

[83]私は既に研究していた一般化積分の概念に類似した概念を突き止め、領域の内部に於ける

電磁ポテンシャルと、境界上のそれとの間の関係に関する新しい概念に到達した

●私のポテンシャル論に関する仕事は二つの方向に続けられた。先ず第一に、私は領域の内部に於ける電磁ポテンシャルと、境界上のそれとの間の関係に関する新しい概念に到達した。或る領域の内部に於ける電磁ポテンシャルについての以前の概念は、それが境界の上で与えられた値に完全に一致しなければならぬと言う事であった。しかしながら私は既に研究していた一般化積分の概念に類似した概念を突き止めた。そして一つの領域の内部ポテンシャルは、境界の近傍ポテンシャルに適当な値を付加したものに依って決定されると見做せば、この定義が境界上へ連続に繋がる函数を与えない場合でも構わない事に気付いた。これは根本的に新しいアイデアであった。そしてそれは、電荷と容量の概念を含むポテンシャル論の多くの概念の重要な拡張へと私を導いた。

[84]どこが新しいかと言うと、境界の内部の点のポテンシャルと境界値との関係を一種の押し

広めた積分として考えた事で、境界問題に関する既存の見解の一つの転換と言うべきものだった

●私の考えのどこが新しいのかと言うと、境界の内部の点のポテンシャルと境界値との関係を一種の押し広めた積分として考えた事である。これは境界問題に関する既存の見解の一つの転換と言うべきものであった。数学に於ける多くの観点の転換と同様に、ポテンシャル論の問題のこの再定式化は、余りにも伝統的な陳述に依って永年殺されていた状態に、新鮮な息を吹き込んだのである。

[85]私のもう一つの研究は、ハラルド・ボーアが概周期函数と名付けた、繰り返しに近い曲線

に関するもので、調和解析の重要な拡張となっている

●私のもう一つの研究が、デンマークの数学者ハラルド・ボーアの彼が概周期函数と名付けたものに関する研究に依って引き起された。この概周期函数の表わす曲線は、壁紙模様のように全く同じものを繰り返すのではないが、それに非常に近い様な曲線である。この概周期函数は、調和解析の重要な拡張となっている。私自身ヘヴィサイドの形式的な計算法を基礎付けようとする試みから行き着いた調和解析の拡張の研究をやっている所だった。

[86]元素スペクトルの様に鋭い線として表示出来る光のスペクトルのみならず、力が連続的に

分布している場合の連続スペクトルにも当てはまる広範な結果を、私の理論から導いたのだ

●ここでも私は、ひたすら元気を出して、この分野で私の考えを固める事が出来はしないかとやってみる他はなかった。それは成功し、元素のスペクトルに見られる様に鋭い線として表示出来る様な光のスペクトルのみならず、力が連続的に分布している場合のスペクトルにも当てはまる、適当な理論を見付け出した。ボーアの理論は線スペクトルにのみ当てはまるものだったのである。一、二の技巧を用いて、

私はボーア理論のみならず、連続スペクトルに関するずっと広範な結果を、私自身の理論から導くことが出来た。

[87]この理論を導く時に、ブラウン運動の研究で用いた、連続だが方向を持っているとは言えない、縮れた曲線を使用したのが、抽象的な考察から生れて物理的対応物のない曲線が不可欠の役割を演ずる、本質的に物理的な理論を確立したのだ

●私はこの理論を立てる時に、私が以前ブラウン運動の研究に用いた考えに非常に良く似た考えを使わねばならなかった。特に、連続であるけれども方向など持っているとは言えない程縮れた曲線を使用せざるを得なかった。ブラウン運動の所で指摘した様に、この曲線は、数学の継子だったのであり、数学者の抽象的な考察から生れた何らの物理的対応物のない、むしろ不自然な博物館ものだと見られていた。ここで私は、この様な曲線が不可欠の役割を演ずる、本質的に物理的な理論を確立したのである。

[88]私のゲッチンゲンでの一般調和解析の話が、その頃その地で、量子力学と言う形を取って花咲こうとしていた新しい物理学の思想と密接に結ばれている事に、当時は全く気付かなかった

●1924年私はゲッチンゲンを訪れた。一般調和解析の私の仕事について、ゲッチンゲンの人々にした話は非常に良く受け入れられた。特にこの問題に大きな興味を示した。しかし、私の話が、その頃ゲッチンゲンで今日量子力学として知られている形を取って将に花咲こうとしていた新しい物理学の思想と密接に結ばれている事には、当時私は全く気付かなかった。

[89]1900年の空洞輻射の平衡に関するマックス・プランクの仕事に起源を發する量子論の主題は、炉の中で熱い物質と光とが平衡に達した後に炉の中に見出される光の研究である

●量子力学は、1900年の空洞輻射の平衡に関するマックス・プランクの仕事に起源を發する数理物理学の一主題であった。平たく言えば、量子論の主題は、炉の中で熱い物質と光とが平衡に達した後に炉の中に見出される光の研究である。熔鉱炉の様な熱い壁を持った空間の中を見る時、炉の内部から出て来る光の性質は温度に依って異なる。これは容易に観察出来る現象であり、誰でもこの事を赤熱した金属片と白熱した金属片との違いから知っている。赤熱した炉からやって来る光のスペクトルは赤か黄のどこかで終るが、白熱した炉からやって来る光はずっと紫外域の方まで及んでいる。

[90]光と熱との間のこの関係を説明する時に会う困難の要点は、光を連続的な現象として表現する伝統的な行き方は満足ではないと言う事だった

●光と熱との間のこの関係——プランクが強引な新しい反説でこれを解決したのだが——を説明する時に会う困難の要点は、光を連続的な現象として表現する伝統的な行き方は満足ではないと言う事であった。プランクは、物質と同様光にも、連続的でなく粒子的な構造があると論じた。

[91]プランクの説明は、数学の思想にも関係し、物質の不連続性を信じる原子論者と物質が連続である事を信ずる人々との間に知的闘争が行われた 17 世紀末に遡る思想にも関連していた

●それより以前の物理学では、炉の温度から炉の中の光の色の分布を決定できる様なからくりが、分らなかったのである。しかしこの簡単に観測出来る現象に対するプランクの終局的な説明は、単純なものではなかった。それは数学の思想にも関係し、又、物質の不連続性を信じる原子論者と物質が連続である事を信ずる人々との間に重大な知的闘争が行われていた 17 世紀末に遡る思想一般にも関連していた。そして、種々な哲学的な理由が絡んで、この論争を特に際どいものにしていった。

[92]17 世紀末の論争を山に持って来たのは、この時代の一般的な哲学的風潮よりもオランダ人レーヴェンフックによる顕微鏡の発見と言う技術上の変革だった

●この論争を山に持って来たのは、この時代の一般的な哲学的風潮よりもむしろ技術上の変革だったのである。この革新はオランダ人レーヴェンフックの顕微鏡の発見である。彼は溜まり水のたった一滴の中に満ち溢れるばかり多くの生物を見る事が出来る程迄に、この器械を完全にしたのである。

[93]顕微鏡で視力に与えられた新しい力は新しい想像の領域を生み出し、あらゆる人の思想は世界の微細構造と、物事を拡大するという操作の暗示する哲学的含蓄とに向けられた

●レーヴェンフックの顕微鏡は、池の水の一滴が雑沓した都会を思わせる様な満ち溢れた生命の集りである事を直に見せてくれた。視力に与えられたこの新しい力は新しい想像の領域を生み出し、あらゆる人の思想は世界の微細構造と、物事を拡大するという操作の暗示する哲学的含蓄とに向けられた。

[94]ライプニッツは生物の間や生物の内部にある空間全てが、より小さい大きさの生物で充されていると言う考えから、生命の無限可分性、従って物質の連続性を仮定した

●ライプニッツは、水の滴や同じく生命の満ち溢れた血の滴から類推して世界を充実空間——真空は存在しない——と考えていた。即ち彼は生物の間や生物の内部にある空間全てが、より小さい大きさの生物で充されていると考えた。この考えから、更にライプニッツは生命の無限可分性、従って物質の連続性を仮定したのである。

[95]数学の新しい解釈に到達したライプニッツに依れば、時間と空間が無限に分割可能であるのみならず、時間と空間に分布している量は、時間と空間のあらゆる次元で変化率を持っている

●ライプニッツは、彼の時代の微視的観察と彼自身の哲学の内的な働らきとの両方に依って生み出されたこの見解に導かれて、数学の新しい解釈に到達した。われわれが忘れてはならない事は、彼が微積分法の発明者の一人であり、今尚われわれが使っている記号は彼が創めたものであると言う事である。彼に依れば、時間と空間が無限に分割可能であるのみならず、時間と空間に分布している量は、時間と空間のあらゆる次元に亘って変化率を持っている。

[96]時間と空間の二次元に分布する量には、偏微分方程式が一つの自然な数学的法則となって、
時間と空間が共に無限に分割可能な系で時間的変化率と空間的変化率が互いに関係付けられる

●例えば、温度は時間と空間に分布している一つの量である。寒暖計が一時間に10度の割合で下ると言った時には、温度の時間的変化率について言っているのであり、又、西に行くに従って1マイルにつき3度の割合で温度が下ると言った時には、その空間的変化率を言っているのである。時間と空間の両方の次元に分布している量を論ずる場合には、偏微分方程式が一つの自然な数学的法則となり、その方程式では、時間と空間が共に無限に分割可能な系に於いて、時間的変化率と空間的変化率が互いに関係付けられている。

[97]ライブニッツは物理的世界の連続性を主張する事に依って、原子論に正面から反対する見解の代弁者となった

●この様にしてライブニッツは、物理的世界の連続性を主張する事に依って、原子論に正面から反対する見解の代弁者となった。

[98]物理学の発展は原子論と連続論の両方を完成させたが、ライブニッツの時代にはない鋭い対立を生み二つの思想方向が互いに正面衝突した結果、現代物理学の中心問題の幾つかが生じた

●ライブニッツの時代以来の物理学の発展は、原子論と連続論との両者を完成させたが、又彼の時代にはなかった鋭い対立をもたらした。分子は殆んど目で見える程になったし、不連続的な原子が存在する事は、化学上の証拠から明らかである。更に原子を越えて、電子、陽子及び原子核の中に発見された多くの新しい素粒子に於いて、原子性の新しい展望が発見された。一方連続体の理論は、気体、流体及び固体の力学の研究に対して、又光及び電気の理論に対して、有用かつ殆ど不可欠の道具となった。この二つの大きな思想方向が互いに正面衝突した結果、現代物理学の中心問題の幾つかが生じたのである。

[99]マクスウェルの気体運動論では、気体の一分子全体としての全ての運動は、剛体としての分子の運動であるが、分子はまた剛体以上のもので、弾性体としての分子の内部振動を持つ

●約100年前クラーク・マクスウェルが今日気体運動論として知られている理論を展開した時に、この衝突が具体化し始めた。気体は分子と呼ばれる粒子から成り、それは幾つかの互いに独立な仕方で運動する事が出来る。即ち一つの分子は、一分子全体として上下と左右と前後に動く事が出来、更に垂直軸及び二つの水平軸の廻りに回転出来る。これらの全ての運動は、剛体としての分子の持つ運動であるが、分子は又しばしば剛体以上のものであって、弾性体としての分子に属する内部振動を持っている。

[100]気体を形成する一つ一つの粒子の運動の様式の数を加え合せて、その気体全体の運動の様式の数即ち自由度を決定する事が出来る

●われわれは一個の粒子の運動の様式の個数、或いは物理学者の呼び方に従えば自由度を数える事が出来る。気体を形成する一つ一つの粒子の運動の様式の数を加えて、その気体全体の運動の様式の数即ち自由度を決定する事が出来る。

[101]マクスウェルは、気体が内的な統計的平衡状態に落ち着いた時、運動の夫々の様式は平均として或る一定のエネルギーを持ち、それはどの運動の様式に対しても同じである事に気が付いた

●マクスウェルは、気体が内的な統計的平衡状態に落ち着いた時、運動の夫々の様式は平均として或る一定のエネルギーを持ち、この平均エネルギーはどの運動の様式に対しても同じである事に気が付いた。これは気体の温度と他の性質とを関係付ける最も重要な定理である。

[102]一定容積の気体がエネルギーを吸収する能力は単位容積当りの自由度の数に依ると言う事が、直ちにこの定理から導かれる。この能力の大きさを示す量は比熱と呼ばれる

●一定容積の気体がエネルギーを吸収する能力は単位容積当りの自由度の数に依ると言う事が、直ちにこの定理から導かれる。この能力の大きさを示す量は比熱と呼ばれる。これに依って、熱平衡にある物体が与えられた温度でどれだけエネルギーを含んでいるかが分る。単位容積当りの自由度が無限ならば、その物体は温度の有限な増加に対して、無限のエネルギーを取り入れる事が出来るであろう。言い換えれば、その物体のエネルギーを有限だけ増しても、それを温める事は出来ないであろう。もし同様な論法を連続的な媒質に当てはめるならば、それは当然単位容積当り無限の自由度を持っているのだから、この媒質も又無限の比熱を持ち、温度と言う概念はそれに当てはまらなくなるだろう。

[103]マクスウェルの光の理論は、物質が存在しない場合の自由輻射に関しては満足なものだが、光が物質と熱平衡に達する事を不可能にする。実際にはこの様な熱平衡が炉の中で実現することが知られている

●クラーク・マクスウェルは今述べた気体運動論の創始者であるばかりでなく、光及び電気が、光波伝播エーテルと呼ばれる連続媒質の振動として伝達されるという理論の創始者でもあった。エーテルが連続媒質である事は、エーテルが温度の上がる事なしに無限に熱を吸収し得る事を意味している。エーテルの運動は、光・X線・輻射熱等々の形の輻射として知られているのであるから、マクスウェルのエーテル理論は、輻射に対して温度が存在するという事と矛盾する。マクスウェルの光の理論は、物質が存在しない場合の自由輻射に関しては満足なものであるが、光が物質と熱平衡に達する事を不可能にする。ところが実際にはこの様な熱平衡が炉の中で実現する事が知られている。

[104]光の輻射の研究には、マクスウェルの理論とは違ったそれ以上のものが必要とされ、それがプランクによって示唆された

●何かもっとマクスウェルの理論とは違ったそれ以上のものが、光の輻射の研究に必要とされた。そしてこの何かそれ以上のものがプランクによって示唆されたのである。

[105]プランクは、輻射が量子と呼ばれる小さな原子的な量を単位にして放出されると仮定して、

輻射に温度が存在し、この温度と輻射の特性との関係が、一定の法則に従う事を見出した

●プランクは、輻射に温度が存在するという事だけでなく、この温度と輻射の特性との関係が、プランクの法則と呼ばれる或る一定の法則に従う事を見出した。この法則を立証する為に、彼は輻射が或る小さな原子的な量を単位にして放出されると仮定した。この小さな原子的な量を彼は量子と呼んだ。彼のこの仕事が近代物理学の量子論の最初の形である。

[106]1900 年は科学思想の変革の境の時期。量子論は輻射の分野で連続性の思想を破壊し始

めており、ギブスの統計力学は着々と決定論を適当な非決定論で置き換える道を進んでいた

●一般に 1900 年は科学思想の変革の境の時期である。それよりほんの数年前迄は最も進んだ科学者でさえ、今後数世紀は既存の物理学理論を益々高い精度まで確かめてゆく事に費やされるだろうと考えていた。

●しかし 1900 年の頃には量子論は輻射の分野に於いて連続性の思想の一部を破壊し始めていた。ギブスの統計力学は既に着々と決定論を適当な非決定論で置き換える道を進んでいたし、エーテルの中を動く地球の速度を測定することの不可能さを示したマイケルソンとモーリーの光学的実験は、やがてアインシュタインの相対性理論に行き着く一連の思想の不可欠な一環となったばかりの時だった。

[107]アインシュタインは、光の吸収或いは放出と電気とを結び付ける光電効果の或る定数が、

数値的にもディメンション的にも量子論でプランクが用いた定数と同じである事を示した

●アインシュタインの相対性理論は 1905 年に発表され、また同じ年彼は量子論に対して決定的な寄与をした。彼は、光の吸収或いは放出と電気とを結び付ける光電効果に於ける或る定数が、数値的にもディメンション的にも量子論でプランクが用いた有名な定数と同じである事を示した。

[108]ニールス・ボーアは水素原子の輻射の理論で、同じ定数を発見したが、この量子化された

力学は、数値的に重要な成功であったと同時に、理論的な首尾一貫さがかなり欠けていた

●それから 7 年後の 1912 年に、コペンハーゲンのニールス・ボーアは水素原子の輻射の理論で、同じ定数を発見した。ボーアに依って推し進められた輻射の理論は、完全に成功とは言えないが、非常に素晴らしいものであった。それは、不連続論の諸特徴が遊星軌道の理論に似た連続論の上にやや不自然に接木されている、奇妙な混血児であった。この量子化された力学は、数値的に重要な成功であったと同時に、理論的な首尾一貫さがかなり欠けていた。

[109]私がゲッチンゲンで話をした 1925 年には、世界は量子現象の一個の統一された理論を

求めて沸き返っていた

●私がゲッチンゲンで話をした年である1925年には、世界は量子現象の理論を求めて沸き返っていた。継ぎはぎ細工でなく、一個の統一された理論が求められていたのである。

[110]ゲッチンゲンの関心が量子論の難点に集中していたのを知らずに、調和解析に関する私の話は、量子論と同様、普通の大きさの物の法則が非常に小さい物では当てはまらない場を扱った

●ゲッチンゲンに於ける関心がこの量子論の難点に既に集中していた事を知らずに、私のゲッチンゲンの話は、量子論と同様に、普通の大きさの物での法則が非常に小さい物の範囲では当てはまらないような場を扱った。前に述べた様に、私の話は調和解析に関するものだった。

[111]複雑な運動を単振動の和に分解する話だったが、調和解析の根は一つで、ピタゴラスに遡る歴史を持ち、ピタゴラスが音楽と豎琴の絃の振動に関心を寄せた事に発している

●言い換えれば、複雑な運動を単振動の和に分解する話だった。調和解析は、近年多くの分枝に分れているが、その根は一つで、ピタゴラスに遡る歴史を持ち、音楽と豎琴の絃の振動に彼が関心を寄せた事に発している。

[112]同じ一本の絃は多くの仕方で振動する事が出来るが、楽器の絃の運動は、もしそれが単振動でない場合でも、単振動の最も初等的な結合である事がよく知られている

●同じ一本の絃は多くの仕方で震動する事が出来るが、その中で最も基本的で単純なものが、単振動（単一調和振動）と呼ばれている。楽器の絃の運動は、もしそれが単振動でない場合でも、単振動の最も初等的な結合である事が良く知られている。実際、非常に粗い第一近似で、このような運動を単振動として取り扱うことが出来る。

[113]楽譜で音符の縦の位置は、その高低即ち振動数を示し、水平の記号はこれらの振動数の時間的配分を示していて、楽譜は、振動が振動数と継続時間に特徴付けられる系を扱う様に見える

●さて、音符とは本当は何であるか考えて見よう。楽譜上で音符の縦の位置は、その高低即ち振動数を示し、一方楽譜の水平の記号はこれらの振動数の、時間的配分を示している。この時間記号の中には、メトロノームの速度を指定するもの、全音符・二分音符・四分音符への分割を示すもの、種々の休止符、その他様々なものがある。楽譜は、一見した所、振動が二つの独立な仕方、即ち、振動数と継続時間とによって特徴付けられる系を扱っている様に見える。

[114]楽譜の性質をもっと詳しく調べると、事はそう簡単ではなく、一つの音符の振動数と継続

時間とは非常に複雑な仕方で影響し合っている

●楽譜の性質をもっと詳しく調べると、事はそう簡単ではない。一つの音符の表わしている一秒当りの振動数は、振動数に関する陳述を為していると同時に、又、時間的に分布した或るものについての陳述となっている。実際、一つの音符の振動数と継続時間とは非常に複雑な仕方で影響し合っている。

[115]時間的に精密である事は音の高さが幾らか曖昧である事を意味し、又音の高さを精密にすれば必然的に時間的な区切りが付かなくなる

●理想的には、単振動とは遠い過去から遠い未来迄時間的に不変に続いている運動である。或る意味でそれは永遠の姿の下に存在する。音を発したり、止めたりする事は、必然的にその振動数成分を変える事になる。この変化は、小さいかも知れないが、全く実在のものである。有限時間の間だけ継続する音符は或る帯域に亘る多くの単振動に分解する事が出来る。それらの単振動のどれか一つだけが存在すると見る事は出来ない。時間的に精密である事は音の高さが幾らか曖昧である事を意味し、又音の高さを精密にすれば必然的に時間的な区切りが付かなくなる。

[116]もし毎秒16回の割合で振動する音を出して、それを20分の1秒間続けたとするなら、
得られるものは、何等周期的と認められる性質を持たない空気の一押しだけである

●このような事情は、理論的に重要であるばかりでなく、音楽家が現にぶつかっている限界に符合している。オルガンの最も低い音域で、ジック舞曲を弾く事は出来ない。もし毎秒16回の割合で振動する音を出して、それを20分の1秒間続けたとするなら、得られるものは、何等周期的と認められる性質を持たない空気の一押しだけである。それは耳に音の様には響かず、むしろ鼓膜が押される様に感ずるだけだろう。実際、オルガンの管を音楽的に鳴らすのに必要な複雑な衝撃反射機構は、働き始める余裕がないであろう。オルガンの最低音域での早いジック舞曲は、実は悪い音楽と言うよりはむしろ全然音楽になっていないのである。

[117]私は、物理学の法則は楽譜と同様で、余り厳密に適用したり、時間の尺度を或る水準以下まで下げたりしない限りで、現実的で意味を持つのだ、と言う可能性をはっきりとつかんでいた

●1925年にゲッチンゲンで行った私の話の重要な部分は、この調和解析のパラドックスから成っていた。当時私は、物理学の法則は楽譜の様なもので、それを余り厳密に適用したり、時間の尺度を或る水準以下まで下げたりしない限りに於いて、現実的で意味を持つものである、と言う可能性をはっきりとつかんでいた。

[118]時間或いは空間の非常に短い間隔での事物と、日常的な尺度で認められるものとの間には
差異がある事、宇宙の無限可分性は現代物理学が認め得ない概念である事、を強調しようとした

●言葉を換えれば、丁度量子論に於けると同様に、音楽に於いても、時間の（或いは空間の）非常に短い間隔に特有の事物と、日常的な普通の尺度に於いて認められるものとの間には差異があると言う事と、又、宇宙の無限可分性は現代物理学が最早重大な制限なしでは認め得ない概念である事を、強調しようとしたのである。

[119]ハイゼンベルクの不確定性原理は音楽での二元性と全く同じ性質のものであり、彼は、私

が5年前にゲッチンゲンの人達に示した同じ調和解析を用いて、それを説明するに至ったのだ

●私の考えが量子論の現実の発展と関係していた事を知る為には、数年下って、ウェルナー・ハイゼンベルクが二元性の原理即ち不確定性原理を定式化した時まで進まなければならない。ニュートンの古典物理学では、粒子は同時に位置と運動量——これは位置と速度と言っても余り違いはない——を持つ事が出来る。しかし遂にハイゼンベルクは、位置が高い精度で測定出来る様な条件の下では運動量或いは速度が低い精度でしか測定出来ず、また逆の場合も同様である事を見出した。この二元性は、音楽での音の高さと拍子との二元性と全く同じ性質のものであり、事実ハイゼンベルクは、私が既に少なくとも5年前にゲッチンゲンの人達に示した同じ調和解析を用いて、それを説明するに至ったのである。

[120]マクス・ボルンの思想の方向が新しい量子力学を生み出したのだが、この理論の一つの形式を実際に創始したのは若い彼の共同研究者・ハイゼンベルクである

●ゲッチンゲンに於ける量子力学の初期時代の二人の大立者は、マクス・ボルンとハイゼンベルクであった。この二人の中ではマクス・ボルンの方がずっと年上であったし、また確かに彼の思想の方向が新しい量子力学を生み出したのであるが、この理論の一つの形式を実際に創始したのは若い彼の共同研究者である。

[121]原子スペクトルの全てが一つ一つ分離した線から成る訳ではないので、ボルンは、行列即ち数の格子をスペクトルの連続部に匹敵する連続性を持つものに拡張する理論を望んでいた

●ボルンがM・I・Tに講義をしに来る事になり、私はその間、彼と共に研究する事にした。アメリカにやって来た時、彼は、ハイゼンベルクが原子の量子論に与えた新しい基礎に非常に刺激されていた。この理論は、本質的に不連続の理論で、これを研究するのに使う道具は、マトリックス（行列）と呼ばれる数の格子状の配列であった。この行列の行や列が一つ一つ別々になっている事が、原子のスペクトル線が一本一本別々になっている事と結び付けられていた。しかし、原子のスペクトルの全ての部分が一つ一つ分離した線から出来ている訳ではないので、ボルンは、行列即ち数の格子をスペクトルの連続部に匹敵する連続性を持った何らかのものに拡張する様な理論を望んでいた。この仕事は高度の専門技術を要するものなので、彼は私の援助を当てにしていた。

[122]私はボルンを援助して、行列の拡張を、今日演算子（オペレーター）と呼ばれている形でやったのだが、ヒルベルトがそれに賛成して、以来演算子は量子論の本質的な要素となった

●ここではただ、私が、既に行列の拡張を、今日演算子（オペレーター）と呼ばれている形でやっていたことだけを言って置こう。ボルンは私の方法の妥当性に大分不安を持ち、果たしてヒルベルトが私の用いた数学を是認するだろうかと怪しんでいた。実際は、ヒルベルトはそれに賛成し、これ以来演算子は量子論の本質的な要素となった。

[123]この演算子がディラックに依って独立に導入され、シュレーディンガーに依って発明された量子力学のもう一つの形式と、今迄のハイゼンベルク流の形式を結び付けるのに役立った

●殆んど同時に、イギリスでもこの演算子がポール・ディラックに依って独立に導入された。更に、これは、ウィーンでエルヴィン・シュレーディンガーに依って丁度発明された量子力学のもう一つの形式と、今迄のハイゼンベルク流の形式とを、結び付けるのに役立つ事が分った。

[124]仕事の上で私が深い関係にあったブッシュ氏は、後に有名になったいろいろな型の電気計算機の考案を既に進めていたが、私は別個に計算機を考案しようと懸命になっていた

●この頃、仕事の上で私はヴァネヴァー・ブッシュ氏と深い関係があった。ブッシュ氏は、後に彼がそれで非常に有名になったいろいろな型の電気計算機の考案を既に進めていた。時々彼は私の所にやって来て、その事で私の意見を求めた。私は又私で別個に計算機を考案しようと懸命になっていた。

[125]調和解析に関する学問は私にはその頃から既に重要な実際の応用の芽を出している様に見える、この一般調和解析は今に到る迄私の仕事の重要な部門を成している

●調和解析に関する学問は私にはその頃から既に重要な実際の応用の芽を出している様に見えた。その後この応用は実現したのであるが、この一般調和解析は今に到る迄私の仕事の重要な部門を成している。

[126]調和解析の為の光学的計算機械を作ろうと言う考えが私の胸に浮び、ブッシュと私は協力してその具体化に乗り出したが、その後それは予想以上の成功を収めるに到った

●或る時、調和解析の為の光学的計算機械を作ろうと言う考えが私の胸に浮んだ。直ちにこの新しいプランを詳細に亘って検討し、ブッシュ氏と相談した。このアイディアは正しかった。ブッシュと私は協力してその具体化に乗り出した。新しい型の調和解析機を作ろうと言うわれわれの企てが巧く行くのは全く当然だったし、事実その後それは予想以上の成功を収めるに到った。

[127]ブッシュが最後に行き着いたのは一種の微分解析機で、種々の量をシャフトの回転で表し、量を加算乗除する等の操作を施せる装置で、量の総和は積分子と言う円盤状の装置で読み取れた

●電気機械的装置の大発明家としてのヴァネヴァー・ブッシュの主な仕事の方向は微分方程式技術と言う分野の問題を解く為の高速計算機械を発展させる事にあつた。微分方程式は各種の測定可能な物理量とそれらの時間・空間に於ける変化率との関係を扱うものである。これらの物理量は電流、電圧、シャフトの回転の角度等である。ブッシュは装置の基礎として種々の量を使う事を試みたが、最後に行き着いたのは、一種の機械的装置である微分解析機だった。これは種々の量を言わばシャフトの回転で表わし、これらの量を加えたり、乗除したり、その他の操作を施すことが出来る装置であつた。特に、量の総和が欲しい時は積分子と言う円盤状の装置でこれを読み取る事が出来た。

[128]ブッシュの機械を相似式機械と呼び、この機械で問題を解くには、問題に含まれている物理量を、それらの量と性質を異にするが、量的相関関係を同じくする他の物理量で置き換える

●ブッシュの機械では、数は数字の並んだものとしてでなく測定された量として表わされた。この意味が

らわれわれはブッシュの機械を相似式機械と呼び、数字式機械とは呼ばないのである。前者は量を測り、後者は数を数える。この機械で問題を解くには、問題に含まれている物理量を、それらの量と性質を異にするが、量的相関関係を同じくする他の物理量で置き換える。

[129]ブッシュが、時間的変化率と空間的変化率を結び付ける偏微分方程式をどうしたら自分の機械で取り扱えるように出来るかについて私の助言を求めた

●ブッシュの機械の本質的要素は全ての変化の起る変数が時間であると言う点にあった。これが重要な意義を持つ様になったのは、ブッシュが時間的変化率と空間的変化率を結び付ける偏微分方程式をどうしたら自分の機械で取り扱えるように出来るかについて私の助言を求めた時である。

[130]私は偏微分方程式の主要問題は二つ以上の空間的次元の中で変化する諸量、例えば上下方向と左右方向で変化する写真陰画の黒さ等を表現する事であるのを知った

●ブッシュがこの質問を出した時、私は偏微分方程式の主要問題は二つ以上の空間的次元の中で変化する諸量、例えば上下方向と左右方向で変化する写真陰画の黒さ等を表現する事であるのを知った。

[131]幾つの変数の関数の表現と言う問題であれば、テレビ映像の格子上の点の様に、これらの変数を空間的にでなく時間的に変化するものとして表現する事が望ましくなって来た

●幾つの変数の関数の表現と言う問題がはっきりして来ると、これらの変数をも空間的にでなく時間的に変化するものとして表現する事が望ましくなって来た。すると私には、当時新しく発展して来たテレビ技術が鍵を与えてくれるように思われた。テレビでは、映像はフィルム上に同時的に分布する様々な不透明度の銀粒子に依って運ばれるのではなく、格子上の点を次々と走りながら格子の各列を次々に掃いて行く一つの光点に依って運ばれるのである。

[132]私は、スキャニング技術が計算機やこれと密接な関係を持った機械に於いて、テレビ産業に於ける以上に、社会的に重要になるだろうと信じていた

●スキャニング（走査）と呼ばれるこの過程は、今では自分の家のテレビ・セットの動き方についてちょっとでも好奇心を動かした事のある人なら誰でも知っている事である。事実、私はスキャニング技術は計算機やこれと密接な関係を持った機械に於いてテレビ産業に於ける以上に社会的に重要になるだろうと信じていた。計算機や制御機械のその後の発展は私のこの考えを証明してくれたと思う。

[133]スクリーンの上の個々の点は、光の強度の大小で大きさが示される光量で指定する事も出来るし、われわれが数を書き下す時に使うような一連の数字の列で決定する事も出来る

●テレビのスクリーン上の一点を一つの量で表わすには二つの異なるやり方が使える。一つは相似式の機

械で使われているもので、もう一つは数字的機械で使われているものである。スクリーンの上の個々の点は、光の強度の大小で大きさが示される光量を指定する事も出来るし、われわれが数を書き下す時に使う様な一連の数字の列を決定する事も出来る。従って偏微分方程式で表わされている状況を表示する為には、強度を組み合せるか数を表わす数字の列を組み合せれば良い。

[134] 当時でも私には、数字は正確にしかも速く組み合わせることが出来るという理由から偏微分方程式用の機械には数字の列に依る表示法がより適切であろうと思われた

●その当時でも私には、偏微分方程式用の機械には後者の表示法がより適切であろうと思われた。その理由は、電子工学装置を使えば、数字は強度即ち光の量などより正確にしかも速く組み合わせる事が出来るからである。私は、計算機技術の実際の発達が私の想像の正しかった事を証明し、今日の高速度計算機械は当時私がブッシュに示唆した方針に極く近い線に沿っている事だけ言って置きたい。

[135] 私が当時からずっと機械的計算機と電氣的計算機に於いて、数字式表示法の採用に依る高速度の重要性を強調して来た事の正しさは今では十分明らかになっている

●私が当時からずっと機械的計算機と電氣的計算機に於ける速度の重要性を強調して来た事の正しさは十分明らかになった。四角い格子全体の上には格子のどの一本の線の上によりも多く異なる数を置くことが出来る。そして偏微分方程式を解く為に行わねばならない操作の回数は実に莫大なものである。偏微分方程式用の機械は、速度を莫大にしなければ、のろ過ぎて役に立たなかつたであろう。一般的に言って、計算機械は人間の計算手の競争相手であり、結局の所計算機が計算手に勝っている点は第一にその速度である。これが今日の極めて高速度の計算機やそれに極く近縁のオートメーション機械を生んだ最初の機縁である。

[136] 星の内部では光と、物質を構成する種々の型の粒子は、相互に一種の平衡を成して存在しているが、エベルハルト・ホップと一緒にやった仕事は、その微分方程式に関するものだった

●ドイツからハーヴァード大学へ来ていたエベルハルト・ホップと一緒にやった最良の仕事は、星の輻射平衡の研究に出て来る微分方程式に関するものだった。星の内部には、電子と原子核が輻射を構成する光子と共存している領域がある。星の外部には、輻射だけか、せいぜい極めて希薄な物質を伴った輻射が存在する。光と物質とを構成する種々の型の粒子は相互に一種の平衡を成して存在しているが、この平衡は星の表面を離れると急激に変化する。この平衡状態に対する方程式を立てることは容易だが、これらの方程式を解く為の一般的方法を見出す事は容易ではない。

[137] ホップ・ウィーナー方程式と密接な関係を持つものに、星の内部状態と外部状態の様な二つの異なる物理的状态が鋭いへりや境界を隔てて密着している場合の幾つかの方程式がある

●星の輻射平衡の方程式は今日ホップと私の名で呼ばれている型の方程式に属する。この方程式と密接な関係を持つものに、二つの異なる物理的状态が鋭いへりや境界を隔てて密着している場合に生じる他の幾つかの方程式がある。例えば、原子爆弾がそれで、この爆弾は本質的には星の模型であり、その表面は内

部の状態と外部の状態との間の変化の境界面を成している。従って、この爆弾に関する種々の重要問題は当然ホップ・ウィーナー方程式で表現される。原子爆弾の爆発限界容積の問題はこの種の方程式の一つに帰着する。

[138]この方程式が最も効用を発揮するのは、二つの状態間の境界が空間ではなく時間にある場合

合で、一方の状態は一定の時刻迄の世界の状態を表わし、他方の状態はそれ以後の状態を表わす

●私の見解に従えば、ホップ・ウィーナー方程式が最も目覚ましい効用を発揮するのは、二つの状態間の境界が空間にでなく時間にある場合である。一方の状態は一定の時刻迄の世界の状態を表わし、他方の状態はそれ以後の状態を表わすのである。

[139]これは過去に関する知識を未来を決定する為に利用する予測理論の若干の部面に対して

正しく打って付けの道具である

●これは、過去に関する知識を未来を決定する為に利用する予測理論の若干の部面に対して正しく打って付けの道具である。

[140]同じ技術を時間的に適用して解く事の出来る濾波器の問題は、同時に生じた雑音に依って

乱された通信を受け取って、それから本来の通信を出来得る限り良く再構成する問題である

●この外にも、この同じ技術を時間的に適用する事に依って解く事の出来る一般的な応用問題が数多くある。その一つは濾波器の問題で、これは同時に生じた雑音に依って乱された通信を受け取って、それから本来の通信を出来得る限り良く再構成する問題である。

[141]予測の問題は高射砲の操作に関して起り、濾波の問題はレーダーの設計に役立ち、予測と

濾波の問題は共に気象学の新しい統計的方法にとっても重要である

●予測の問題と濾波の問題は共にこの前の大戦で重要だったが、戦後の新しい技術界でも依然として重要である。予測問題は高射砲の操作の際起って来た。高射砲手は鴨打ちかやる様に敵の飛行機の前方に射たねばならぬからである。濾波問題はレーダーの設計の際何度も役に立った。また予測と濾波の問題は共に気象学の新しい統計的方法にとって重要である。

[142]ロシアの確率論の二大数学者ヒンチンとコルモゴロフ両氏は長い間私と同じ分野で研

究を続けており、20年以上も私たちは互いに追いつ追われつでやって来た

●ロシアの確率論の二大数学者ヒンチンとコルモゴロフ両氏は長い間私と同じ分野で研究を続けている。20年以上も私達は互いに追いつ追われつして来た。私が将に証明しようとしていた定理を彼等が先に証明した事もあれば、極めて僅かの差で私の方が早かった事もあった。このような研究上の接触は、私の方に何か明確な計画があったからでもなく、又おそらく先方に明確な計画があった為でもなく、双方が

ほぼ同じ知的能力を備えてほぼ同じ時期に働きの全盛期に入った為である。

[143]ペイリーと共に着手した多くの問題の中に、私は物理学的応用ばかりか工学的応用さえも見出し、私が作る像と問題を解く為の道具とをしばしば決定した

●私のイギリスでの同僚ペイリーがやって来たとき、彼は数学を一種のゲームとして自由自在に操る素晴らしい腕と、殆んどどんな問題でも攻撃する事の出来る一大装備にまで積み上げられた実に多くのあの手この手を私にもたらしたが、数学を他の諸科学の中に正しく位置付けるという感覚は殆んど全く持たなかった。われわれが着手した多くの問題の中に、これは私の癖なのだが、私は物理学的応用ばかりか工学的応用さえも見出した。そして私のこの様な感覚は、私が作る像と問題を解く為に使う道具とをしばしば決定した。私が彼のやり方を学びたがっていたのと同様、ペイリーは私のやり方をしきりに学びたがっていた。

[144]濾波器が一定の周波数帯を切り取る鋭さには一定の限度のある事が知られており、私は、電気工学者に課されたこの限界が、正しく未来が過去に作用するのを防ぐ限界である事を示した

●われわれと一緒に取り掛かった一つの面白い問題は半直線上で零になる函数のフーリエ変換を制限する諸条件に関するものだった。それ自体価値のあるまともな数学の問題だが、本質的には電気工学に関する問題であった。濾波器が一定の周波数帯を切り取る鋭さには一定の限度があると言う事は多年知られていたが、物理学者や工学者はこう言う限度に対する深い数学的根拠を全く知らないままだった。私は、電気工学者に課された限界は正しく未来が過去に作用するのを防ぐ限界である事を示した。

[145]ローゼンブルースと私は共に、諸科学間の境界とは便宜上の区画線であり、各分野で研究する科学者はその研究が要求する場合には進んで境界線を越すべきだと言う事を確信していた

●アルツェロ・ローゼンブルースはハンガリー系のメキシコの生理学者で、ハーバード大学の偉大な生理学者ウォルター・キャンノンの片腕だった人物である。彼と私に共通していた事の一つは科学の方法論に強い関心を持っていた事である。もう一つは、諸科学間の境界とは経費と労力を配分する為の便宜上の行政的区画線であり、各分野で研究する科学者はその研究が要求すると思われる場合には何時でも進んでこの境界線を越すべきだと言う事を、われわれが確信していた事である。われわれは二人共、科学は共同研究の労作であるべきだと感じた。

[146]ローゼンブルースと私が行った多くの討論のテーマは数学、特に通信理論の生理学的方法への適用と言う事であった

●アルツェロはハーバード大学の医学部で科学的方法についての個人的ゼミナールをやったが、このゼミナールは、最近20年間に行われた最終的かつ決定的な協力で先立ち、数年間に亘るわれわれの予備的な協力であった。最後にはローゼンブルースと私が私的及びゼミで行った多くの討論のテーマは数学、特に通信理論の生理学的方法への適用と言う事になった。われわれは、もっと緊密に協力し得る将来に備えて、これらの領域に於ける協力の方策を打ち立てた。

[147]1933~34 年度に M・I・T の数学科では若い大学生の面白いグループが頭角を現わし、

クロード・E・シャノンはこの中の非常に際立った一員だった

●1933~34 年度に M・I・T の数学科では若い大学生の面白いグループが頭角を現わしていた。クロード・E・シャノンはこの中の非常に際立った一員だった。彼は或るアイデアを思い付いたが、それは、その頃でも深い独創性を示し、その正しさは以来、回路開閉装置、計算機、このアイデアに由来する情報理論等に関する夥しい研究等によって裏付けられた。

[148]開閉回路の最も経済的な設計法は論理代数の一部門だ、と言うのがシャノンの発見だった

●シャノンのアイデアの内容だが、開閉回路の最も経済的な設計法というものは論理代数の一部門である、と言うのがシャノンの発見だった。開閉回路は自動電話交換装置の核心を成しており、シャノンの特別な才能はベル・テレフォン研究所にとって打って付けのものであった。シャノンはこの研究所の所員として次々に手柄を立てた。彼の関心の中には情報の計量、迷路の中を歩いて行くことを習得しうる電気ネズミ、自動的にチェスを指す機械、通信を符号化したり符号を解読したりする問題、即ち事実上近代情報理論の全領域が包含される様になった。

[149]シャノンは、連続的と見做せる電流を頭に浮べる問題よりも、スイッチの場合の様な鋭い

イエスカノー式の問題の方を好む、知的好みに終始忠実だった

●彼は、これら全ての問題に於いて、連続的な電流か、さもなければほぼ連続的と見做せる電流を頭に浮ばせる問題よりは、壁上スイッチの場合の様な鋭いイエスカノー式の問題の方を好む彼の最初の知的好みに終始忠実であった。

[150]シャノンは電子計算機やオートメーション工場の時代の背後にある主要人物の一人だ

●こういう訳で、シャノンは電子計算機やオートメーション工場の時代の背後にある主要人物の一人である。その上、彼の仕事に依って初めて、あらゆる学問の中で最も形式的な記号論理学の学習が、ベル・テレフォン研究所の複雑な科学研究に入る為の一つの道として認められるようになったのである。

[151]後にシャノンと私は、方向が同じではないとしても平行の路に沿って研究を進め、われわれ

れの学問的關係は大いに広く又深くなった

●シャノンが未だ M・I・T の学生であり、ブッシュの他にはわれわれの中で彼を理解し評価する者が未だ殆んどなかった頃、シャノンと私は比較的接触が少なかった。しかし、それ以後二人は方向が同じではないとしても平行の路に沿って研究を進め、われわれの学問的關係は大いに広く又深くなった。

[152]中国の精華大学で李と一緒に電気回路設計の問題を研究し続け、ブッシュに倣って相似式

の計算機をずっと高速度の電気回路に連動させて作る事を試みた

●1934~35年度に私は中国の精華大学から1年間数学と電気工学の講義をしてはどうかと言う招請を受けた。疑いもなくこの招請を推進したのは、かつて私の下で研究していた李であった。私は李博士と一緒に電気回路設計の問題を研究し続けた。李と私が実際に試みた事はブッシュに倣って相似式の計算機を作る事だったが、但しそれを低速度の機械的な回転軸と積分機にでなく、もっとずっと高速度の電気回路に連動させようとした。原理は間違っていなかった。

[153] 原理は間違っていなかったが、われわれの研究で欠けていたのは出力の一部を新しい入力として過程の始点にフィード・バックする装置を設計する問題に対する十分な理解であった

●そして事実、後に他の人々がこの原理で成功したのだが、われわれの研究で欠けていたのは、出力の一部を新しい入力として過程の始点にフィード・バックする装置を設計する諸問題に対する十分な理解であった。こう言う種類の装置は現在フィード・バック機構という名で知られている。

[154] 余りに強いフィード・バックは機械を振動させ、平衡状態を得る事を不可能にし、純粋に電氣的な機械の強いフィードバックの場合にはこの困難は克服し難い

●フィードバック機構は既にブッシュの計算機で使用されたが、このメカニズムには或る種の重大な固有の危険がある。余りに強いフィード・バックは機械を振動させ、平衡状態を得る事を不可能にする。ブッシュ型の機械で使用されている比較的弱いフィードバックではこれは避けられない程困難な問題ではないが、純粋に電氣的な機械の強いフィードバックの場合にはこの困難は克服し難い。私は第一歩から問題に取り組み、自らフィード・バック機構のかなり包括的な理論を展開させるべきだった。ところが当時はそうしなかったのでその結果失敗した。

[155] 精華大学での私の主な仕事は、一般調和解析について、又ペイリーと私の共著「複素領域に於けるフーリエ変換」の中に包括した事柄について講義する事であった

●精華大学での私の主な仕事は、一般調和解析について、又ペイリーと私の共著「複素領域に於けるフーリエ変換」の中に包括した事柄について講義する事であった。私は又所謂準解析函数の問題について新しい純数学的研究にも従事していた。

[156] 微積分学の近代的延長である解析学は二つの主だった部分に分れ、一方には複素変数の函数の級数として知られているものがある

●過去150年の間、微積分学の近代的延長である解析学は二つの主だった部分に分れた。一方には複素変数の函数の級数として知られているものがある。それは例えば $1, x, x^2, \dots$ というような一つの変数の中(ベキ)に従って進む級数についての18世紀理論の延長である。この理論は滑らかに徐々に変化する量に対して特に適用出来る。

[157] もう一方は実変数函数の理論として知られ、振動系の解析である調和解析の研究に依
って、相互に関係のない部分が継ぎ合わされて出来た曲線は独自の解析に従う事が示された

●かつては、重要な数学的量は全て滑らかに徐々に変化するものであると考えられていた。ところが 18 世紀の終り頃になって振動系の解析である調和解析の研究に依って、相互に関係のない部分が継ぎ合わされて出来た曲線は独自の解析に従うという事が示された。この見地は先ずフーリエ級数の理論を生み出し、それから実変数函数の理論として知られている一般研究部門を生み出した。

[158] 実変数函数論と複素変数函数論とは二つの別々だが関連した分野で、量及び量の相互
依存性と言うものの本性に対する根本的に異なった見方を表すものである

●実変数函数論と複素変数函数論とはこのように二つの別々だが相関連した分野である。それらは、一年生のコースと二年生のコースの様一方の後に他方が繋がるものではなく、量及び量の相互依存性と言うものの本性に対する根本的に異なった見方を表すものである。過去 150 年の間両者は大いに相互に作用し合った。

[159] 最近、両者の方法論を共有する、或る中間の研究領域がある事が数学者に注目され、
準解析函数論として知られている

●しかしながら両者の方法論を共有する、或る中間の研究領域があるという事が数学者に注目されるようになったのは極く最近の事である。或る種の曲線は、一部分が分れば曲線の全コースが分る程に滑らかであるが、古典的な複素変数函数論に依って処理出来る程滑らかではない。こういう曲線の研究は準解析函数論として知られている。フランスの数学者達はこの分野で大いに寄与し、ソレム・マンデルブロイツの研究はその最も優れたものの一つである。しかしこの分野に於けるペイリーと私自身の著書からも私が中国滞在中に求めていた成果が得られた。私はすでにペイリーとの共同研究が電気回路の研究に直接適用出来るものである事を指摘した。これらは準解析函数論にも出て来た同じ問題点と関連していた。

[160] 私の研究でしばしばあるのだが、実際問題の研究へ私を導いた動機が、純粹数学の最も抽象的な一分野へも私を引き込んだ

●この様にしてここでも、私の研究でしばしばある事だが、実際問題の研究へ私を導いた動機が、純粹数学の最も抽象的な一分野へも私を引き込んだのである。ここに表われている私の態度は、18・19 世紀の大部分の研究と調和しており、その後ヒルベルトやポアンカレの著作に現われた態度でもある。これは今日アメリカや他のどの国で流行っている態度とも違う。これと似た観点を取って来た人で現在或いは最近迄活動していたアメリカの二人の数学者は――私はそれを偶然の一致ではないと思うが――近代数学に於ける最も偉大な力を持った二人、すなわちヘルマン・ワイルとジョン・フォン・ノイマンである。

[161] 戦時下の科学者の動員と用途についての質問書に対し、私は、何か二つの科学の境界を乗り越える様な自発的な共同研究と言う事を唱えて、熱心に支持した

●1940年の夏、アメリカ数学会の夏の集りがダートマスで開かれた。その前だったか、後だったかよく覚えていないが、ヴァネヴァー・ブッシュが、M・I・Tの学部のいろいろなメンバーに戦時下の科学者の動員と用途について示唆を求める質問書を送って来た。この事は、私がかかりはっきりした意見を持っている問題だった。私は、何か二つの科学の境界を乗り越えるような共同研究と言う事を熱心に支持し、しかもそれは同時に必ず自発的なものとし、そうすることに依って、科学者のイニシャチブと個人の責任とを大きく保持すべきであると唱えた。

[162] 複素数の代数学は電話工学には欠かせないものであり、ベル電話会社の或る数値計算機は、この種の仕事の必要を満たす為に製作され、二進法を採用した

●複素数の代数学は電話工学にとって欠くべからざるものであり、ベル電話会社の或る数値計算機は、この種の仕事の中の一定の必要を満たす為に製作されたものである。十進法に依るよりも、二進法に依る方が、算術を機械化するのにずっと容易だという事は、分り切っており、その為、ベル会社方式の装置は二進法を採用した。

[163] 二進法の機械に依って得た新しい経験から、私は、電子工学的な二進法計算機こそ偏微分方程式の問題を解くのに必要な高速を具えた装置であると確信した

●アメリカ数学会からの帰途、私はレヴィンソンと計算機の一般問題を討論し始めた。そしてこの時私は、この方面が私の戦時研究の場となるのではないかと思い始めた。かつて、私はブッシュの為に、機械を使って偏微分方程式を解く事を考えた事がある。そして、テレビのスキャニング(走査)に類した事が、偏微分方程式の問題を計算機で解く為の適切な基礎になるだろうと感じた。二進法の機械に依って得た新しい経験から、私は、電子工学的な二進法計算機こそ偏微分方程式の問題を解くのに必要な高速を具えた装置であると確信した。

[164] ブッシュは私の着想に見込みがある事は認めたが、今はもっと直接実用性のある事に注意を集中するようにと勧めて来た

●私は、高速計算機に関する考えをブッシュに知らせてやった。しかし、余り、良い返事は来なかった。ブッシュは私の着想に見込みがある事は認めたが、その実現は前途尚遠くて第二次大戦には役立つまいと考えた。今はもっと直接実用性のある事に注意を集中するようにと勧めてきた。

[165] 昔の射撃制御の場合には、砲座と標的との相対的な運動が非常にのろく、標的が有効射程から出てしまう迄には非常に粗っぽい手動式の装置でかなりの計算をすることが出来た

●私は、役に立ちそうな他の分野を探し回らなければならなかった。私はこれを対空火器の射撃制御装置の設計に見出した。私が子供だった頃は、射撃制御と言うものは、主に海岸砲台又は艦砲の見地から考えられていた。つまり、その場合には砲座と標的との相対的な運動が非常にのろく、標的が有効射程から出てしまう迄には非常に粗っぽい手動式の装置でかなりの計算をするのに十分な余裕があった。

[166] 対空砲の制御系統に組み込まれなくてはならない機械的なものは、砲に自動的に飛行機の前方を狙って、弾丸と飛行機が同一時刻に同一地点に来るようにさせなければならない

●第一次大戦の時既に、飛行機はこの事情を全面的に一変させた。飛行機を打ち落とす問題は、飛んでいる鴨を撃ち落とす様なものである。今現に鴨が見える位置を鉄砲で狙ったのでは、獲物は弾丸が届く迄の間はかなり前方に行ってしまうだろう。どれ位前方を狙うかを素早く正確に算定しなければならない。従って、極く最初から、対空砲の制御系統には射程表に相当する機械的なものを組込まねばならなかった。そしてそれは、砲に自動的に飛行機の前を撃つ、弾丸と飛行機が同一時刻に同一地点に来る様にさせるものでなければならない。

[167] 飛行機の未来の位置は過去の位置即ち既に観測された位置から推算されなければならない
す、航空機の未来の位置を予測する問題は、数学者が外挿の問題と呼んでいるものである

●或る程度迄、これは純粋に幾何学的な問題だが、それがもっと精密なものになると、飛行機の方の未来の位置の算定の仕方を改善する事が必要になる。飛行機の未来の位置は過去の位置から、即ち、とにかく既に観測された位置から推算されなければならない。航空機の未来の位置を予測する問題は数学者が外挿の問題と呼んでいるものである。

[168] 演算子を物理的に実現可能なものにする為に演算子に課されなければならない主な条件は、出力が入力の過去と現在だけに関係するものでなければならぬと言う事だ

●私は、以前に電気工学の仕事に関係した為に、演算子の理論に明るかった。電気工学では、演算子とは、或る電氣的入力にそれに対応する電氣的出力に変換する装置の事である。数学的に言えば、演算子は一つの変換式で表わされるが、このような変換式の全てが、物理的に実現可能な演算子を意味する訳ではない。物理的に実現可能な演算子にする為に演算子に課さねばならぬ主な条件は、出力が入力の過去と現在だけに関係するものでなければならぬと言う事である。

[169] 飛行機の前を撃つという問題は、実現不可能な演算子に依らねば本当は確かめられない飛行機の未来の位置を、実現可能な演算子に依って近似的に求めることを要求している

●飛行機の前を撃つという問題は、実現不可能な演算子に依らねば本当は確かめられない飛行機の未来の位置を、実現可能な演算子に依って近似的に求める事を要求している。飛行機の未来の位置を絶対確実に予言する事は、操縦士の心の中を知らなければ出来ないが、十分正確と言える程度の予言を可能にする手段は、実際には、大抵、存在する。

[170] 最初に思い付いた数学的操作は未来についての知識が存在すると仮定していたので実行不可能だったが、私は、これを難点のない操作に依って、ある意味で近似し得ることを示した

●予測の問題について私が最初に思い付いた数学的な操作は、実は実行不可能だった。と言うのは、それ

は未来についての知識が既に存在すると仮定していたからである。しかし私は、この操作を、こういう難点を持たない操作に依って、或る意味で近似し得ることを示す事が出来た。私はこれらの考えを、コールドウェル教授に話した。彼は平時にはM・I・Tでブッシュ式計算機に関する仕事を担当していたが、当時はこの機械を戦時の問題に応用する仕事をやっていた。

[171] われわれは、この問題の試験装置として、広い範囲のいろいろな問題に適用出来るブッシュ式微分解析機を使おうと思ったが、この段階で予測理論の研究は、政府計画に指定された

●この問題の試験装置として、コールドウェルと私は、ブッシュ式微分解析機を使おうと思った。この機械の部品を組立てば、広い範囲のいろいろな問題に適させる事が容易だったからである。われわれの装置は足し算機と掛け算機と積分子を沢山組合せたものだった。この段階で、予測理論の研究は、政府計画に指定された。

[172] われわれの予測方法の限界を確かめる仕事に取り掛かり、予測装置を滑らかな曲線について試して見る代わりに二つの直線が或る角度を成して交っているグラフにつき試して見た

●若い技師のビグローと私は、われわれの予測方法の限界を確かめる仕事に取り掛かった。と言うのは、重大な限界が見出されるだろう事が殆んど確実だったからである。今度は、われわれの予測装置を滑らかな曲線について試して見る代わりに、二つの直線が或る角度を成して交っているグラフについて試して見た。

[173] われわれの装置を一本の真直ぐな線分がその端で一定の角度で交わるもう一本の線分に続いている折れ線という滑らかでない曲線に対し動かして見た所、非常に奇妙な動きを示した

●予測装置は二つの部分から成っていた。その一つは与えられた曲線を追っていく様に作られているもので、もう一つはこれら過去の資料に基づいて未来の曲線を少し先の方まで示せる様に作られているものだった。その第二の方の部分を追跡子 (follower) と呼ぶ事にしよう。われわれは、われわれの装置を滑らかでない、ある曲線に対して動かして見た。それは、一本の真直ぐな線分が、その端で一定の角度で交わるもう一本の線分に続いている折れ線だったが、やって見ると予測装置は、動きはしたが、非常に奇妙な仕方であった。

[174] 予期しなかった事ではなかったのだが、滑らかな曲線をたどるのに最も適するように設計された幾つかの装置は、余りに敏感過ぎて、曲がり角に来ると激しい振動状態に陥った

●面白くてわくわくさせられた事は、実はそれは予期しなかった事ではなかったのだが、滑らかな曲線をたどるのに最も適するように設計された幾つかの装置は、余りに敏感過ぎて、曲がり角に来ると激しい振動状態に陥った。繰り返し繰り返しやって見たが、いつも結果は同じ事だった。

[175] 滑らかな曲線向きの精密な装置が、粗い曲線向きの装置としては余りにも敏感過ぎる

のは、予測と言うものの本性に属するのであろうし、これを克服し得る道はないのであろう

●そこで、こんな考えが私の心に浮んで来た。——おそらく、この困難は万物の理法に根ざしており、これを克服し得る道はないのであろう。おそらく、滑らかな曲線向きの精密な装置が、粗い曲線向きの装置としては余りにも敏感過ぎるのは、予測と言うものの本性に属するのであろう。おそらくこれは、ハイゼンベルクの不確定性原理に現れているのと同じ種類の、自然の悪意の例なのであろう——と。不確定性原理は、われわれに、一つの粒子がどこにいるかと言う事と、それがどんな速度で動いているかと言う事との両方を、精密にしかも同時に言う事を許さないのである。

[176] 困難は根本的なものなので、完全な予測装置を作る事が不可能だとするなら、われわれは手持ちの布に合わせて着物を裁つ他はない

●この問題を研究すればする程、益々われわれは、自分たちの考えは正しく、困難は根本的なものである事を、確信するようになった。さて、われわれが望んではいたが本当に期待してはいなかったこと（すなわち、完全な普遍的予測装置を作る事）がやはり不可能だとするなら、われわれは手持ちの布に合わせて着物を裁つ他はない。つまり数学的に可能なかぎり最善の予測装置を作る他はないであろう。

[177] 精度の不足に基づく誤差と感度の過大に基づく誤差とが常に逆向きに働くように見えるとしたら、一体何に基づいてこの両種の誤差を調停出来るであろうか？

●こうして残る唯一の問題は、最善の予測装置とは何か、ということになった。もしも精度の不足に基づく誤差と感度の過大に基づく誤差とが常に逆向きに働くように見えるとしたら、一体何に基づいてこの両種の誤差を調停出来るであろうか？

[178] この調停は統計的基礎に基づいてのみ可能で、われわれは、次々の各時刻に於ける予測の誤差の自乗——予測値と実測値の差の自乗——を平均し、この自乗誤差の平均値を最小にしようとした

●答は、このような調停は統計的基礎に基づいてのみ可能だということだった。われわれが予測したい曲線の実際の分布、たとえば撃墜したい航空機の実際の分布が分かれば、それに対してわれわれは或る量を最小にするような予測を求めることが出来るだろう。そしてこの量として最初に選ぶのに最も自然な量は、軍事的意義は別としても計算のたやすさを目安とするなら、予測の平均自乗誤差という量であった。即ち、われわれは次々の各時刻に於ける予測の誤差の自乗、言い換えれば予測値と実測値の差の自乗を採ったのである。次にわれわれは装置が働いている全時間に亘って、この値を平均した。この自乗誤差の平均値こそ、われわれが最小にしようとしていた量である。

[179] かくして予測の問題を極小値を求める問題とする事が出来、予測さるべき曲線群の統計について一定の仮定をしさえすれば、この問題にはっきりした数学的形式を与える事が出来た

●こうしてわれわれは、予測の問題を、極小値を求める問題とする事が出来、予測さるべき曲線群の統計について一定の仮定をしさえすれば、この問題にはっきりした数学的形式を与える事が出来た。曲線群に関する量を極小にする問題を取扱う数学の分野は、変分法と呼ばれており、この分野には、非常に有名な良く分っている手法がある。その手法に依れば、多くの場合、極小にするという条件を満たす曲線あるいは函数に対してある微分方程式が作られる。しかし又、ある場合には、微分方程式の親類の積分方程式と呼ばれるものが作られる。われわれの場合はこの後者の一例であった。

[180] 幸運だったことに、われわれが取り組んでいた問題が帰着する或る特定の積分方程式は、E・ホップと私自身とが以前に取り上げた積分方程式を少し拡張したものだだったことだ

●積分方程式は私の興味を持つ分野に属するものだった。だが、それにも増して幸運だったことに、われわれが取り組んでいた問題が帰着する或る特定の積分方程式は、エーベルハルト・ホップと私自身とが以前に取り上げた積分方程式を少し拡張したものだだったことだ。その結果、私は予測問題を定式化することが出来たばかりでなく、それを解くことも出来た。しかも、更に運が良かったことには、出て来た解は簡単な形をしていた。

[181] われわれが紙の上で計算したことを、実際に金属で実現する装置を案出する事は、難しくなかった

●われわれが紙の上で計算したことを実際に金属で実現する装置を案出する事は、難しくなかった。われわれは、インダクタンスと抵抗とコンデンサーを組み立てて、機械器具屋なら何処でも売っているような小さな電気モーターで動かす簡単な装置を作りさえすれば良かった。

[182] 或る基線からの点の高さを電圧として表わす装置を作り、時間と共に変化するこの電圧を連続的に測定したが、ある時間だけ先の電圧の予測値として役立つのはこの出力電圧だった

●われわれは、ある基線からの点の高さを電圧として表わす装置を作った。そして、時間と共に変化するこの電圧を、抵抗線とコンデンサーと電磁コイルを電氣的に結合したものの中通じた。この系の他の点で電圧を取り出し、電圧計で連続的に測定した。電圧計は出力電圧の連続的変化のグラフを実際に描いて見せてくれた。或る時間だけ先の電圧の予測値として役立つのはこの出力電圧であった。

[183] 予測の基のデータが精密に与えられない場合の予測の問題では、データの統計だけでなく誤差の統計も指定する必要があったが、この極小値問題は別のホップ・ウィナー方程式に帰着した

●次に取り上げねばならなかった問題は、予測の基になるデータが精密に与えられていない場合の予測に関するものだった。これも極小値問題に帰着したが、この方では、与えられたデータの統計だけでなく、誤差の統計をも指定しなければならなかった。この極小値問題はもう一つのホップ・ウィナー方程式に帰着した。これは同じ方法で解けて、非常に満足な理論が得られた。

[184] 科学の仕事に於いては、自分が、与えられた問題との関連では頭に描いていなかった問題を、いつの間にか解いていた、と言う事がしばしばあるのだ

●科学の仕事に於いては、研究者は与えられた問題が解けるというだけでは十分とは言えない。自分が解いた問題をあらゆる面から調べて、自分は一体どういう問題を解いたのかを見付け出さなければならない。或る問題を解く際に、自分がそれとの関連では頭に描いてさえいなかった問題をいつの間にか解いていた、と言う事がしばしばあるのである。

[185] 雑音と通信文との同時的な統計に基づいて、通信文の未来を予測する事の中には、雑音と通信文を最善の可能な方法に依って分離する為の新しい方法がそっくり含まれていた

●新しい予測理論の場合にもやはりそうだった。妨害的な雑音を伴った通信文の未来を、雑音と通信文との同時的な統計に基づいて予測するという事の中には、雑音と通信文を或る意味で最善の可能な方法に依って分離する為の新しい方法というものがそっくり含まれていることが分った。

[186] 新技術のレーダーが重大な困難に直面しており、レーダーでも掻き乱された微かな通信文を雑音の海の中から取り出す事が重要であった

●このことは、非常に巧い時に起った。と言うのは新技術、レーダーが重大な困難に直面していたからである。レーダーでも又、掻き乱された微かな通信文を雑音の海の中から取り出す事が重要であった。雑音とは、耳で聞くあの雑音ばかりでなく、一切の不要な電氣的な攪乱をも意味している。

[187] 通信文から雑音を分離するのは濾波器の動きだが、濾波器は周波数が或る範囲内にある通信文は強さに出来るだけ変化を与えずに通過させ、その直ぐ側の周波数は弱めるよう設計されていた

●通信文から雑音を分離するのは、濾波器の動きである。濾波器とは、電話技術ではずっと以前から使われているもので、通信文からそれに伴う雑音成分を取り除く装置である。最初は、濾波器は、周波数（つまり音の高さ）がある範囲内にある通信文は全てその強さに出来るだけ変化を与えずに通過させ、その直ぐ側の周波数は出来るだけ弱めるように設計されていた。

[188] テレビでは濾波器の設計を限度以上に敏感にする程性能の悪い事が分ったが、それは電話の濾波器が、位相の知覚に劣っている人間の耳の特性に合わせて設計されていたからだった

●電話の濾波器に倣って、テレビにもこういう濾波器が作られると、濾波器の設計を或る限度以上敏感にすると、敏感であればある程性能が悪いと言う事が分った。何故、こんな事が起ったのだろうか。それは、

電話の濾波器は人間の耳の特性に合うように設計されているからである。人間の耳というものは、音の高さを知覚するのに非常に正確な器具であり、音の大きさを知るのにもかなり正確な器具だが、位相と呼ばれるものを知覚するには、言い換えれば空気の振動の圧力が零を通過する正確な時点を知覚する器具としては非常に劣ったものである。

[189] 音でも位相の変化は全く知覚されないものではないが、特に重要なものではなく、電話その他の音響機器用の初期の濾波器では位相の違いにはさして注意を払わなかった

●交流というものは、強さという量一つだけで表わされるものではなく、強さと位相を決める二つの量で表わされるものである。音でも、この位相の変化は全く知覚されないものではない。しかし、それは特に重要なものではなく、電話その他の音響機器用の初期の濾波器では位相の違いにはさして注意を払わなかった。

[190] レーダーやテレビが伝える様な目に訴える種類の通信では、眼は位相の誤差に対しても振幅の誤差に対すると同じ程敏感である

●レーダーはテレビと同じく目に訴えるものである。レーダーやテレビが伝える様な種類の通信では、眼は位相の誤差に対しても振幅の誤差に対すると同じ程敏感である。こう言う訳で、旧式の電話機型の濾波器がレーダーやテレビで作り出す位相の歪みは重大で、この種の濾波器の特性である周波数の大きな範囲に亘って振幅を正しく伝達するという長所と引き替えにする訳には行かなかった。

[191] レーダーやテレビで、全体としての誤差を最小にする為には、振幅の歪みの方はそれだけを問題にする場合の最善よりは余計に許して、その代り位相の歪みを減らす事が必要だった

●レーダーやテレビで、全体としての誤差を最小にする為には、振幅の歪みの方はそれだけを問題にする場合の最善よりは少しばかり余計に許して、その代り位相の歪みを減らす事が必要だった。この様に二つの歪みを釣り合わせようとするには、私が示唆した方法は、理想的なものではなかったが、少なくとも役に立ち、しかもそれ返使われていたどの方法よりもずっと良かった。ただ、私は、私の方法が初めてこの問題に原理的な水準で取り扱う簡潔で妥当なやり方を与えたと言っているに過ぎない。

[192] 航空機の進路予測の問題と同種類の不規則な函数を描く実験装置を作り、それで統計的観測をして予測装置を設計したが、それは時間的変動の形を、発生する 0.5 秒前に示す様なものだった

●ピグローと私は旅行に出て、われわれの考えを、予測理論や対空火器のデータの補整法を研究している他の人々の考えと較べに行き、知識を交換した。帰って来ると、航空機の進路予測の問題に出て来ると同じ種類の不規則な函数を描き出す実験装置を作った。そして次に、この装置を使って行った統計的観測に基づいて、予測装置を設計した。実際われわれは、電圧の時間的変動の形を、それが起る例えば二分の一秒前に示す様な予測機を製作することが出来た。これに依ってわれわれは自分たちの理論を実際と照合

することが出来、又何か一つの予測装置が良い予測を与える装置であるか否かを判定する条件を見出すことも出来た。

[193] 或る程度周期的なコースを取って動く光のスポットを天井に映して、このスポットを、ある装置で操縦する鏡で反射されるもう一つのスポットで追う事を試みた

●統計的に制御可能な程度の不規則性を持った不規則な曲線を作り出すことは非常に興味深い問題だった。われわれは、或る程度周期的なコースを取って動く光のスポットを天井に映した。そして、このスポットを、或る装置で操縦する鏡で反射されるもう一つのスポットで追う事を試みた。この操縦装置に於いては、第二のスポットの実際の動きが、鏡の動きを支配するクランクの回転に比例するのではなく、クランクの回転運動のいろいろな微分や積分のかなり複雑な混合に比例するようにしてあった。

[194] 操縦装置は、人がこの種の装置には当然伴うものだと思うような筋運動感覚等は与えないようにしてあった

●その上、クランクからハンドルまでの間には一連の錘りとスプリングから成る系が接続されており、人がこの種の操縦装置には当然伴うものだと思うような筋運動感覚等は到底与えないようにしてあった。

[195] われわれの予測機の設計の基礎には、この操縦装置の一般的動作ばかりでなく、各人がこの操縦装置を練習して或る特定の段階に達した時の操縦能力の個人差をも取り入れた

●言い換えれば、スポットを動かす為に使わねばならぬ操縦装置は、何よりも先ずひどく複雑で、しかもその上、手応えが全く狂っていた。当然の事ながら、この装置に対する反応の仕方は、各人各様に幾らかずつ違っていた。そしてわれわれは、われわれの予測機の設計の基礎として、この操縦装置の一般的動作ばかりでなく、各人がこの操縦装置を練習して或る特定の段階に達した時に操縦する能力の個人差をも取り入れたのである。

[196] 航空機の運動の様な不規則な運動の諸性質を或る程度迄再現する方法を見出して、人間に依って引き起される不規則な行動の本性に解明の光を投じる一つの機械仕掛けを組み立てたのだ

●われわれは、自分達の得た明確で首尾一貫した結果に満足だった。一方から言えば、われわれは、一つの人工的な問題に出会った場合に人間が如何に行動するかということに対して、従って又人間に依って引き起される不規則な行動の本性に対して、大きな解明の光を投じてくれる一つの機械仕掛けを組み立てたのであった。又他方から言えば、われわれは、飛行中の航空機の運動の様な型の不規則な運動の諸性質を或る程度まで再現する方法を見出したのであった。こうしてわれわれは、航空機を撃墜する実際的な装置の設計に使えるような理論について、ある程度の望みを得た。

[197] 飛行機操縦士の退避の飛行パターンは飛行機の限界と操縦士の神経系の限界に依って

制約され、高射砲射手は標的を完全には追えず自らの感覚器官と筋肉の限界の故に不規則な誤差を持ち込む

●対空火器の射撃指揮（ファイヤコントロール・射撃制御）に関するわれわれの考えは二重の意義を持っていた。射撃指揮という制御問題に於いては、二つの人間的要素が考慮されなければならない。一方では、飛行機の操縦士が飛びながら退避行動を取っている時、操縦士の飛行のパターンは、自分の飛行機の諸限界に依ってばかりでなく、自分の神経系の諸限界に依って大きく制約されている。だから、その行動は、われわれが設計した仮想的な人間行動とひどく違ったものではない。他方では高射砲の射手が用いるやり方では、射手は自分の標的を完全には追うことが出来ず、自分の感覚器官と筋肉の限界の為に或る不規則な誤差を持ち込むことになる。この二種の人間的要素が組み合わさって、射手が標的を撃墜する半機械的操作の一部を構成している。

[198] 射撃の制御の系は、その様々な部分を人間的基準か機械的基準のいずれかで数学的に扱うことを要し、砲の照準の機械的要素の方は研究が進んでいたため、照準手や操縦手という心理的要素に相似な機械仕掛けを見付けることにした

●戦争の初期には、高射砲で飛行機を追跡する方法としては、人間の操る操作に依って飛行機を自分の視野に捕まえて置く方法だけしかなかった。しかし、戦争が進むにつれて、レーダーが完成し、この操作は機械化された。飛行機の位置を決めるレーダー装置を高射砲に直結し、砲の照準から人間的要素を無くしてしまうことが可能になった。しかし、人間的要素をすっかり無くしてしまうことは、それが敵の行動に現れる限り、到底出来そうもない。だから、射撃過程を全体として制御する問題を出来る限り完全に数学的に取扱うためには、系の様々な部分を、人間的な基準か機械的な基準かのいずれか一方に同化して、単一の見地から取り扱わねばならない。ところが、砲の照準の機械的要素の研究は心理学的研究よりずっと進んでいる様に思われたので、われわれは、照準手や操縦手に相似な機械仕掛けを見付けることにした。

[199] 照準手も操縦手も行動の中の誤差を観測し、これらの誤差を減らす様な動作に依って誤差を打ち消すネガティブ・フィード・バックのやり方で行動を調整している様に思われた

●照準手の場合も操縦手の場合も共に、操縦者は、或る型の行動の中に引き起された誤差を観測し、これらの誤差を巧く減らす様な動作に依って誤差を打ち消すというやり方で自分の行動を調整している様に思われた。この制御法は、当時電気回路で既に知られていた或る方法と違うものではないように思われた。その方法とは、今日サーボメカニズム（自動制御機構）に適用されている方法であり、サーボ機構というのは、トラックの動力操舵機構に使われている様な、制御用の外部動力源のスイッチを自動的に開閉する装置の事である。われわれは、これをネガティブ・フィード・バックと呼んでいる。

[200] ネガティブ・フィード・バックは軍艦の砲が現に向いている方向と、照準算定具の指示している方向が違う場合、その差が砲塔への入力を制御して砲を指定の方向に近付けるのに使われている

●われわれはネガティブ・フィード・バックを軍艦の砲塔への入力を制御するのに使っている。砲が現に向いている方向と、照準算定具が砲をこれこれの方向に向けよと示している方向とが違っている場合、この差が、砲塔への入力を制御して、砲を指定の方向にもっと近付ける様な入力になる様にさせるのに、使われるのである。

[201] 器官の病理はその正常な行動に大きな光を投じてくれるとは生理学者の金言だが、われわれはネガティブ・フィード・バック装置に特異的な病理が認められるのではあるまいか、と自問した

●器官の病理はその器官の正常な行動に非常に大きな光を投じてくれると言うのは、生理学者の金言である。われわれは自問した。——ネガティブ・フィード・バック装置に特異的な病理が認められるのではあるまいか、と。この点では、われわれの立場はしっかりしていた。

[202] 砲塔に対するフィード・バック制御の目的は、砲の反応を、なるべくハンドルを押す力に比例させ、摩擦や慣性やその他の不定な外的なものに左右されないようにする事にある

●ネガティブ・フィード・バック装置の一般の用途を知る為に、ハンドルで制御される砲塔の場合を取り上げて見よう。もし、このハンドルが砲塔を直接動かすとすれば、砲塔が冷えていて潤滑油が粘っこい場合と、砲塔が熱くて潤滑油がさらさらしている場合とでは、ハンドルに同じ圧力を加えても、生ずる結果は非常に違う。砲身の仰角が低くなっていて、慣性モーメントが大きくなっている時と、砲身が上に向けられていて、その為砲身に直角な軸の周りの感性モーメントが小さくなっている時とでは、やはり結果が異なるであろう。砲塔に対するフィード・バック制御の第一の目的は、ハンドルを動かした時の砲の反応を、ハンドルを押す力になるべく比例させ、摩擦や慣性やその他の不定な外的なものになるべく左右されないようにする事にある。

[203] 負荷の変化に左右される度合は運動を大きくフィード・バックしてやる程小さくなる

●フィード・バックを持つ系は、それを持たない系より負荷の変化に左右されることが少ないばかりではない。この左右される度合は、運動を大きくフィード・バックしてやればやる程、小さくなる。言い換えれば、フィード・バックに大きな増幅を加えてやれば、やるほど、負荷の変化に左右されなくなる。

[204] フィード・バックの増幅の大きさが或る限度を越すと、装置は自己発振を起して動作が無茶苦茶になり、装置は負荷のまにまに弄ばれるようになる

●しかし、この様なやり方で動作を改善することは、幾らでもやれる訳ではない。フィード・バックの増幅の大きさが或る限度を越すと、装置は自己発振を起し、動作が無茶苦茶になり、装置は負荷に左右されない所か、返って負荷のまにまに弄ばれるようになる。

[205] われわれは、もし人体の調節も又フィード・バックに依存しているなら、フィード・

バックが過大な為に起る或る種の病的状態があるだろうと予想した

●そこでわれわれは、もし人体の調節も又フィード・バックに依存しているなら、フィード・バックが過大な為に起る或る種の病的状態があるだろうと予想した。その病的状態の下では、人体は調節の取れた働きを失って、段々烈しくなる振動状態に陥り、この振動は人体が壊れるか少なくともその運動の根本的な仕方が大きく変化する迄は止まらない筈と思われた。

[206] 患者が水の入ったコップを取り上げる様な動作をしようとすると次第に激しく震え出

し水をこぼしてしまう、という様な失調症が知られていないだろうか、と神経生理学者に話した

●この考えはビゲローと私の両方から同時に出て来たのだが、私はこれを私の友人の神経生理学者ローゼンブルース博士に話した、彼は当時未だメキシコに行ってしまうはずは、ハーヴァード大学医学部のキャンノン博士と一緒に研究していた。われわれが持ち出したのは次のような特殊の質問だった。神経病の中に、患者が静止している時には全く震えを起さないが、水の入ったコップを取り上げる様な動作をしようとすると、次第に激しく震え出し、結局やろうとすることが果せなくなり、例えば水をこぼしてしまう、という様な失調症が知られていないだろうか。

[207] われわれの想像するフィードバックの病理が、秩序正しく組織的な人体行動に生ずる

既知の一定の病理と極めて良く似ている、という確固とした事実によって確かめられた

●ローゼンブルース博士の答えはこうだった。そういう病理的状态は良く知られており、インテンション・トレマー（意図震顫）と呼ばれている。そして非常に多くの場合、障害の起っている場所は小脳に存在し、小脳は人体の組織的な筋肉活動の様式と強さを支配しているのであると。こうして、フィード・バックが人体の調節に大きな役割を果たしているのではないかというわれわれの想像は、フィードバックの病理が、秩序正しい組織的な人体行動に生ずる既知の一定の型の病理と極めて良く似ている、という確固とした事実によって確かめられた。

[208] ビゲローと私にとって重要だった事は、制御の連鎖の中の人間的要素をフィード・バ

ック装置と見做せば、十分研究が進められると感じた事である

●われわれはこれらの考えを論文に書き上げた。しかし、それよりもっと重要だった事は、ビゲローと私が、制御の連鎖の中の人間的要素をフィード・バック装置と見做せば、十分研究が進められると感じた事である。こうしてわれわれは、われわれの粗っぽい実験装置から、対空火器の制御と予測の為の完全な装置の設計の方向へ進むのが正しいと感じた。

[209] われわれの着想は他の研究者達に熱心に取り上げられた結果、実際面ではっきりした

改良が為され、私の書いた教科書はその当時やその後も自動制御や電気通信の技術者に依って使

われた

●われわれの着想はこの分野の他の研究者達に依って熱心に取り上げられ、その結果実際面で非常にはっきりした改良が為された。特に観測の実験誤差をふるい分ける部分についてそうであった。われわれの設計を完成させることを最終的に委任されたのはわれわれ自身ではなかったが、私は実際、「時系列、外挿法、内挿法」について本を書く様に頼まれた。この本は写真版刷りで複製され、表紙が黄色かったので、「黄禍（イエロー・ペリル）という名で知られる様になった。このあだ名は以前はシュプリンガーの黄表紙の数学全書に限られていたのである。私の書いた教科書は、非常に気軽に使われた。戦時中に高射砲の照準と発射の制御システム設計者達に依って使われたばかりでなく、又、その当時やその後も自動制御や電気通信の技術者達に依って使われた。

[210] 対空射撃制御を統計的に取扱った私の仕事から通信工学に於ける一般的な統計的な見方が生れ、今日迄の年月は、この見地を広く受け入れられる見方にし、もっと広く発展させた

●対空射撃制御を統計的に取扱った私の仕事から、結局通信工学に於ける一般的な統計的な見方が生れた。当時から今日迄の年月は、この見地を通信工学で広く受け入れられる見方にしてくれたばかりでなく、それをもっと広く発展させた。今では工学全般が急速に統計的な様相を帯びて来つつあり、これは気象学や社会学や経済学の様な比較的系統的でない科学分野にも行き渡りつつあると言って先ず良いであろう。

[211] ニュートン力学の立場では物理的世界に対して微分方程式と言う速度を含む方程式を与え、その諸変数の初期値即ち時刻0の値が分れば一歩一歩現象を時間的に追って行くことが出来る

●既に私は、ウィラード・ギブスと彼や彼の同時代人が物理学にもたらした革命とについて述べた。正統的なニュートン力学の立場は、物理的世界に対して微分方程式と呼ばれる速度を含む或る方程式を与える。時間的に変化するいろいろな変数の変化率はそれらの変数自身の値との関連で時々刻々に決定されており、これらの諸変数の初期値即ち時刻0に於ける値が分れば、われわれはこの微分方程式を使って、一歩一歩これらの現象を時間的に追って行くことが出来る。各時刻にそれらの諸変数の値が分るから、それらの値からわれわれは、それら自身の時間的変化率を決定出来、これらの変化率は、一瞬間後の同じ諸変数の値の近似値を教えてくれる。

[212] これが、天文学者が惑星の軌道を計算するのに使う方法であり、弾道学の専門家が弾丸の飛び道筋を決定するのに使う方法である

●もしこの一瞬間として十分短いものを選べば、われわれは現象を時間的に追って行き、われわれが到達したい任意の時点へ行き着くことが出来るであろう。これが、天文学者が惑星の軌道を計算するのに使う方法であり、弾道学の専門家が弾丸の飛び道筋を決定するのに使う方法である。天文学では、軌道の計算は非常に厳密な数学であり、初期条件は非常に正確に分っている。

[213] 弾道の方程式を解く為の従来の方法は初期値が正確に与えられたとして解き射程や着弾角や着弾速度やその他重要な量を見出してから、内挿法や誤差論を使ってこれらの修正をする

●弾道計算や工学の問題では、こういう事は先ず余りない。例えば、弾丸を発射する場合、仰角の精度は余り高いものではない。弾丸の重さ、火薬の量、気象条件等も同様である。その結果、この中どれも正確には分っていないで、ただ、或る範囲内にあるというデータだけで始めなければならない。弾道の方程式を解くのに、これ迄やられて来た方法は、初期値が正確に与えられたとして解くものである。こうして射程や着弾角や着弾速度やその他重要な量を見出してから、次に内挿法や誤差論を使って、最初の計算法とは全く違ったやり方で、これらの修正に取り掛かるのである。

[214] こう言うやり方では、かなり多くの努力を無駄にしているので、今日ではもう一つ別な方法が使われるようになって来ており、その考えの流れはウィラード・ギブスから出ている

●こう言うやり方では、かなり多くの努力を無駄にしている。第一に初期条件の値を非現実的な精度で取ることについて、第二には本当には現実的でない結果を修正することについてである。しかし、もう一つの別な方法もある。これが今日使われるようになって来た方法で、その考えの流れはウィラード・ギブスから出ている。

[215] 自由に回転しているコマの状態を指定するには、その位置（重心の位置と軸の傾きと回転角）を与える六つの座標と運動量を与える六つの座標の合計十二本の座標軸が必要である

●ギブスは、一つの力学系がそれ自身の法則に従って動いている時、例えばコマが自由に回転している時には、流体の流れに非常に良く似た事が起っている事を指摘した。コマの状態を指定するには、或る種の空間の一点が必要である。但し、この空間は、立体幾何学の普通の三次元空間と同じものではない。コマの状態を指定するには、その位置（重心の位置と軸の傾きと回転角）を与える六つの座標——座標とは測定可能量を意味する——と運動量を与える六つの座標が必要であり、これを一緒にすれば十二本の座標軸がある。これを三本の座標を持つ普通の空間からの類推で十二次元空間と呼ぶことが出来る。

[216] この空間の体積の測り方では、或る一時刻に或る一定体積を満たしているコマの集りは、時間が経つにつれてこの空間の中を流れて行っても、常にこれと等しい体積を満たしている

●この空間には或る種の体積の測り方があって、その測り方に依れば、或る一時刻に或る一定体積を満たしているコマの集りは、時間が経つにつれてこの空間の中を流れて行っても、常にこれと等しい体積を満たしている。このような体積の不変性は、入力や出力のない全ての力学系に見られるものである。

[217] 一つの粒子が或る時刻に、或る所与の領域の中に存在する確率は、その粒子がその後の或る時刻にそれに対応する領域——最初の領域から流れ込んだ領域——の中に存在する確率に等しい

●こう言う流れは、確率の流れと考えることが出来、ギブスもそう考えたのだった。一つの粒子が或る時刻にこの奇妙な空間の、或る与えられた領域の中に存在する確率は、その粒子がその後の或る時刻にそれに対応する領域——即ち最初の領域（にあったもの）が流れ込んだ領域——の中に存在する確率に等しい

い。

[218] 流れの方程式の典型的な形式は常微分方程式と呼ばれる一般的な形式ではなく、一組の積分方程式になるが、流れの方法で力学を取扱う時の積分方程式は線形積分方程式と見る事が出来る

●こうして、流れの方程式の典型的な形式は最早常微分方程式と呼ばれる一般的な形式ではなく、一組の積分方程式になる。これらの積分方程式は過去の分布を将来の分布に関係付けているが、その際両者は、いろいろな過去の分布を重ね合せればその結果は夫々に対応する将来の分布が重ね合さったものとなるという関係に置かれている。この様にアウトプット（出力、産出量など）の総和がインプット（入力、投入量など）の総和に等しい系は、線形と呼ばれている。流れの方法で力学を取扱う時の積分方程式は線形積分方程式と見ることが出来る。

[219] この方法は、比較的複雑な場合に計算がやり易いと言うばかりでなく、論理的に見ても、ニュートン力学的な計算方法より本質的に優れている

●この方法は、比較的複雑な場合に計算がやり易いと言うばかりでなく、論理的に見ても、この方法は、ニュートン力学的な計算方法より本質的に優れている。何故かと言うとわれわれが自分たちの問題の中に持ちこむデータは、後になってから方程式や初期条件の不正確さに応じて削って角を取らねばならない数値から成っているばかりでなく、精密な計算を害する不正確さをそもそもの初めから含んでいるのである。そこでわれわれは計算をし過ぎて、その余計な計算の効果をわざわざ、その誤差を研究して取り除く様な事をしないで、初めから持ち札を全部見せようと言うのである。そしてその結果得られるものは、正にわれわれの求めるものより多くも少くもない、丁度必要なだけのものである。この様にすれば、多くの不必要な努力を省くことが出来るばかりでなく、われわれのやっている仕事の真の精度を高める事にもなる。

[220] 科学の測定は、どんなものでも完全な正確さは期し難いし、不正確な数値を使って行なったどんな計算の結果も精密なものと考え事は出来ない

●科学の測定は、どんなものでも、完全な正確さは期し難い。また、不正確な数値を使って行なったどんな計算の結果も精密なものと考え事は出来ない。従来の伝統的なニュートン物理学は、不正確な観測値を取り上げて、実際には存在しない正確さをそれに与え、それが行き着く結果を計算し、次いで最初のデータの不正確さに基づいてこれらの精密さを削り取るのである。

[221] 近代物理学の態度というのは、観測が行われる際のギリギリの精度で得られた不正確なデータを使って、それから得られるべき完全に正確ではない結果を計算しようとするのである

●近代物理学の態度は、次の点でニュートン物理学の態度と異っている。即ち、近代物理学の態度というのは、観測が行われる際のギリギリの精度で得られた不正確なデータを使って、それから得られるべき完全に正確ではない結果を、そのデータが完全に知られていると仮定されている様な段階を一切経ずに計

算しようとするのである。

[222] 不精密な問題に、天文学者が遊星の軌道を決定する計算を使うと、特殊な初期条件を選んでしまい、われわれが取り扱ったもっと幅の広い初期条件にとって、典型的な結果ではない事が起る

●こういう不精密な問題に、天文学者が遊星の軌道を決定するのに使っている様な計算を使えば、われわれがたまたま特殊な初期条件を選んでしまって、そこから出て来るものは、われわれが取り扱ったもっと幅の広い初期条件にとって典型的な結果ではないと言う様な事が起る恐れがあり、軌道を扱う時起るこの様な不安定さは、われわれに終局的誤差の評価を誤らせることになるかも知れない。

[223] 機械的な装置の敏感さと不安定さに関して既に述べた事は、計算法についても当てはまり、不精密さによる誤差と不安定さによる誤差との釣合いは、統計的な基礎に基づいてのみ計算出来る

●既に予測についての私の研究を述べた際に言ったように、装置が敏感になればなる程、それは益々不安定になる。それはある種の誤差を引き起す。この誤差は、不精密による誤差とは種類を異にするが、それに劣らず重大な誤差である。私が機械的な装置について述べた事は、計算法についても当てはまる。不精密さによる誤差と不安定さによる誤差との釣合いは、統計的な基礎に基づいてのみ計算できる性質のものである。だから、いっその事、最初に統計的な基礎を仮定して、統一的な計算法に依って平均の結果と誤差とを求めようと、何故しないのか。

[224] 全科学の統計的本性の認識が、ニュートン的な機械工学の計算法に於いて価値を發揮しつつあるとすれば、観測誤差が非常に大きくなる様な分野では、こういう計算法が自然な計算法である

●もし、こういう様な全科学の統計的本性の認識が、最もニュートン的な機械工学の計算法に於いても既にその価値を發揮しつつあるとすれば、われわれの観測誤差が当然非常に大きくなる様な分野では、こういう計算法が如何に自然な計算法であることだろうか！

[225] 気象学の計算で、もし初期条件の観測が極端に良いと言っても、実際にわれわれが大気について知る事は、大気の何十万立方マイル毎に標本を採って調べた知識だけなのだ

●一例として気象学の事を考えよう。大気の力学については、既に非常に多くの事が分っている。そこで、もし初期条件の観測が極端に良いなら、純粋にニュートン的なやり方で将来の事を計算出来ると考えて良からう。たとえこのやり方は余分な計算を沢山やる事になる恐れが非常に多いにしても、やはりそうだ。しかし、実際にわれわれが大気について知る事は、大気の何十万立方マイル毎に標本を採って調べた知識だけなのだ。

[226] 気象学的方法が適切である為には、力学と統計学とを併用しなければならない。気象学で統計的要素を軽んずれば研究全体を危くせざるを得ない事は、はっきり分っている

●最近では、ジョン・フォン・ノイマンの影響を受けて、気象予報の問題を、非常に複雑な天体の軌道の問題の様なものとして取扱う方法で解こうとする試みが為されている。この考えは、初期条件を与えるあらゆるデータを超高性能計算機に入れて、運動の法則と流体力学の方程式を使って、或る程度先の時期の天気を弾き出そうというものである。巧くない事には、測候所の観測を全部合わせても、互いにひどく離れて非常に少数の地点の限られた情報しか得られない。こういうものは、何らかの統計的な推理に依らねば穴を埋めることが出来ない。だから、気象学的方法というものは、それが適切である為には、力学と統計学とを併用しなければならない。気象学で統計的要素を軽んずれば研究全体を危くせざるを得ない事は、はっきり分っている。

[227] 力学の重要性を否定しようとしているのではなく、この力学を統計的な流れとして取扱うギブス流のやり方の利点を主張しようとしているのだ

●私は、力学の重要性を否定しようとしているのではなく、この力学を統計的な流れとして取扱うギブス流のやり方の利点を主張しようとしているのである。

[228] 経済の力学である計量経済学の根本的な困難は経済の力学に持ち込む数値的な量がはっきり定義されていないので、粗っぽい統計的な推定量として取扱わなければならない事にある

●気象学は、科学史上遅くなってから前面に現われた数量的科学の大部分の中で典型的なものである。経済学では、経済の力学である所謂計量経済学は根本的な困難を持っている。その困難とは、経済の力学に持ち込む数値的な量がはっきり定義されていないので、粗っぽい統計的な推定量として取扱わなければならないからである。誰が必要などというものを精密に定義出来ようか。又、誰が、それを大多数の経済学者を満足させるような仕方で測定出来るだろうか。どの二人の経済学者を取っても、一定の時期のアメリカの失業者の総数について一致する事など有り得ようか。

[229] 計量経済学が扱う量の測定が力学と同程度の精度と厳密さを持つ基準に従わなければならないが、われわれの取り扱う量は統計的な性格のものなので、ギブス流の取り扱い法に入らねばならない

●計量経済学は次の二つの段階を踏まないうちは、現在以上には余り発展しないだろう。その一つは、需要とか在庫高とか等々という計量経済学が扱う量の測定は、それらの量の関係を扱う力学と同程度の精度と厳密さを持つ基準に従わなければならないという事である。もう一つは、われわれの取り扱う量は本来統計的な性格のもので、完全に精密な量ではないという事を、最初から認識して、ギブス流の取り扱い法に入らねばならないという事である。

[230] 気象学や計量経済学について言った事は、半精密科学に於いて数学的方法を使う際の

文法（グラマー・指導原理）に属するものであり、将来の工学の中心課題でもある

●気象学やエコノメトリックス（計量経済学、または経済測定学）について言った事は、ソシオロジカル・ダイナミックス（動態社会学）やバイオメトリックス（生物測定学または生物統計学）にも、そして特に又、大脳気象学とも言うべき非常に複雑な神経系の研究にも、等しく当てはまる。それは、半精密科学に於いて数学的方法を使う際の文法（グラマー・指導原理）に属するものであり、又将来の工学の中心課題である。

[231] この新しい手法は、対空射撃指揮の予測装置の仕事の中で前兆を見せ、その後の私の通信理論の研究の中で更に前進したのだが、あらゆる精密科学の全様相を一変させる見込みは十分にあり

●この新しい手法は、私の対空射撃指揮の予測装置の単独中の仕事の中で前兆を見せ、その後の私の通信理論の研究の中で更に前進した。これは、今迄の所では、それに良く適した科学分野の二、三の先端階に滲み込んだに過ぎない。しかし、これは原理的に正しく、あらゆる精密科学の全様相を一変させる見込みは十分である。

[232] コルモゴロフが時間的に非連続な予測に局限していたのに対し、私は連続的な時間で予測を研究していたのだが、結果的には、考えの本質は私の仕事よりも前に彼の仕事の中に含まれていた

●私は最初予測理論について論文を書いた時は、主な数学的着想の一部が、既に文献に現われる事に気が付かなかった。しかし、間もなく第二次大戦の直前に私は、同じ問題についての小論文がロシアの数学者コルモゴロフによりフランス科学アカデミー機関誌コント・ランデュに既に発表されている事を見付けた。その中でコルモゴロフは時間的に飛び飛びの予測だけに議論を局限していた。これに対し私の方は、連続的な時間の中での予測を研究していた。コルモゴロフは濾波器については勿論、電気工学技術に関係した事は一つ論じていなかった。又、彼は、その予測理論を装置に組立てて具体化する方や、対空兵器の射撃指揮に応用する方法については、何も言っていなかった。しかし、私の考えの本質的なものは全て、私の仕事よりも前にコルモゴロフの仕事の中に含まれていた。

[233] 通信の問題を先行して統計的に論じた私の仕事は、通信の理論と実際の分野に既に非常に広く拡がって、通信理論を扱う為の統計的研究方法は今や殆ど至る所で受け入れられている

●私の仕事、いや私のグループの仕事は、通信の理論と実際の分野に既に非常に広く拡がった。先ず第一に例の「黄禍」の本は、はっきり言えば、通信の問題を統計的に論じたものである。この本を書いた時分は、殆んど誰も、通信というものをこのような関連で考えてはいなかった。幾らか自慢して言うことをお許し願いたい、通信理論を扱う為の統計的研究方法は、今や殆ど至る所で受け入れられている。

[234] 情報理論に入る出発点として、私は連続電流あるいは連続電流と見做せるものを運ん

でいる電気回路を選び、シャノンはほぼ等価な理論を電気スイッチ系という見方から進めていた

●私は、情報理論に入っていくのに、出発点として、連続電流あるいは少なくとも連続電流と見做せるようなものを運んでいる電気回路を選んだ。同じ時、ベル・テレフォン研究所のクロード・シャノンは、私と平行した、ほぼ等価な理論を、電気スイッチ系という見方から進めていた。これは、彼が以前にスイッチの開閉の問題に論理代数を使う事を研究していたのを直接に発展させたものであった。

[235] 私は連続的な濾波の理論で、情報の単位について、最初はシャノンとかなり違った見地から考えたのだが、非常によく似た定義に到達していた

●シャノンは不連続が好きで、連続は避けたがる。彼は不連続的な通信を、時間的に分布したイエスとノーの系列のようなものだと考えた。そして、一組のイエスかノーかの決定が情報の単位だと考えた。しかし私は、連続的な濾波の理論で、最初はシャノンとかなり違って見地から、情報の単位について、非常に良く似た定義に到達していた。

[236] 長い間、単位時間に情報を運ぶ能力は、その通信線が担える周波数帯の幅で決まると思い込まれていたのだが、シャノン・ウィーナーの定義で、われわれは既存の見方から根本的に脱却した

●情報の量に対するシャノン・ウィーナーの定義を導入した際にわれわれは、既存の見方から根本的に脱却した。と言うのは、通信線が単位時間に情報を運ぶ能力は、その線が担うことの出来る周波数帯の幅で決まるのだと、長い間思い込まれていたからである。

[237] 200 サイクルの周波数帯は 100 サイクルに較べ、毎秒二倍の情報を運べるという仮定は、雑音がなければどんな周波数帯でも秒当り幾らでも多くの量の情報を運べる事実を無視している

●200 サイクルの幅の周波数帯の幅は 100 サイクルのそれに較べて、毎秒二倍の情報を運ぶことが出来ると考えられていた。こういう仮定は、雑音がない時には、どんな幅の周波数帯でも、一秒間に幾らでも多くの量の情報を運び得るという事実を無視している。電圧の方が十兆分の一ボルトという精度で測定出来るなら、たった一ボルトの幅でも、大英百科辞典にある全ての情報を運ぶことが出来る。但しこれは、回路雑音というものが、測定の精度を一万分の一位に限ってしまうという事がなければの話である。

[238] ラジオやテレビの様な新しい通信方式が現れて、情報空間の徹底的な利用が要求される様になると、電線や空間の路線の雑音は、考えなければならぬ重大な要素になって来た

●電話技術の初期には、電話線がその通信搬送能力ギリギリの限界迄使われるという事は殆んどなかった。技術が進歩し、ラジオやテレビの様な新しい通信方式が現われて、使える情報空間の徹底的な利用が要求

される様になると、電線や空間の路線の雑音は、われわれが考えなければならぬもう一つの重大な要素である事が、はっきりして来た。

[239] 電子の流れの不規則さの現われは、散弾効果と呼ばれており、これは近代の通信設計では必ず考えなければならぬ重要な事である

●空間はラジオ技術者が空電(スタティック)妨害と呼んでいるいろんな妨害物で満ちているし、導体は、金属であれガスであれ、一個の電子よりも小さい塊りで電気を伝えることは出来ない。電子の流れの不規則さの現われは、散弾効果と呼ばれており、これは近代の通信設計では必ず考えなければならぬ重要な事である。

[240] 第二次大戦の直ぐ前になって漸く、通信路線にかかる負荷が十分に大きくなって、これらの路線を使って送る通信量を増やすのにこの内在的な雑音が重大な障害となるに至った

●第二次大戦の直ぐ前になって漸く、通信路線にかかる負荷が十分に大きくなって、これらの路線を使って送る通信量を増やすのにこの内在的な雑音が重大な障害となるに至った。通信理論に於ける統計的な見方は、それよりずっと以前に私が一般調和解析の仕事に依って予見し、またシャノンと私が同時に第二次大戦の当初に基礎付けたものではあるが、大戦が始まって少し後に初めて、避くべからざる基本的な見方になった。

[241] 射撃指揮装置と神経系に関連したフィード・バックについてわれわれがやっていた研究はもう一つの大転回をもたらし、一般に受け入れられるようになった

●射撃指揮装置と神経系に関連したフィード・バックについてわれわれがやっていた研究はもう一つの大転回をもたらした。そして、これも前者と同様に最近数年間に一般に受け入れられるようになった。

[242] 電気工学を通信工学と動力工学の二つの分野に区分する事は正当ではあるが、この分け方の本性と、どこに境界線を引くべきかと言う事は、かなり長い間分らなかった

●私がM・I・Tに始めて来た時には、電気工学は二つの基本分科に分れていた。この二つはドイツでは弱電技術と強電技術と呼ばれていた。アメリカでは通信工学と動力工学と呼ばれていた。こう言う二つの分野に区分する事は正当ではあるが、この分け方の本性とどこに境界線を引くべきかと言う事とは、かなり長い間分らなかった。

[243] 波の集りとしての取り扱い方が時間的に変化する量としての取り扱い方よりも適している分野は、電話や電信やテレビばかりでなく、自動制御機構もやはりそうだとは容易には分らなかった＝

●この区別が十分に認識されていなかった時には、砲塔等重い装置の制御についてのサーボ機構は、通信技術よりも、むしろ動力技術に属するものだと当然の様に考えられていた。動力技術は昔からずっと、電流や電圧は時間的に変化するものだと考えていた。一方、通信技術も、これ又昔からずっと、特にヘヴィサイドの影響で、通信と言うものは多数又は無限に多くの異なる周波数の波の集りであると考えられるようになっていた。波の集りとしての取り扱い方が時間的に変化する量としての取り扱い方よりも適している分野は、電話や電信やテレビばかりでなく、自動制御機構もやはりそうだという事は、容易には分らなかった。

[244] 私は、これらの問題に関する自分の見方全体に依って、計算機は一種の通信装置で、動力よりも情報の方が問題になるのだと言う見解に達したのである

●この事実を指摘して、自動制御機構の理論全体を通信工学の領域に移転させた功績は私にあると言っても良いと思う。私は、これらの問題に関する自分の見方全体に依って、計算機は一種の通信装置で、動力よりも情報の方が問題になるのだと言う見解に達したのである。既に述べた様に計算機は本質的には幾つものスイッチを繋いだもので、この連鎖の幾つかの段階から出て来た情報が、その次の段階に入ってそれを規制する情報として、そこへ送り込まれる、と言う様な仕方で繋がっているのだと、私は考えた。

[245] 私は、十の可能なものの中から一つを選ぶ方式よりも、二つの可能なものの中から一つを選ぶ方式のスイッチ装置を是非とも使いたいと思った

●こう言うスイッチ装置は歯車やそれに似たものでも良いが、機械的な継電器でも良く、真空管その他の電子現象に基づく電氣的継電器でも良いという事は、明らかだった。既に述べた様に、私は、十の可能なものの中から一つを選ぶ方式よりも、二つの可能なものの中から一つを選ぶ方式のスイッチ装置を是非とも使いたいと思った。そこで私は、計算機についてのこの考え方に工学者一般の関心を引こうとして見た。

[246] 継電器方式に依る新型スイッチ式計算機の最初のを私が見たのは、ハーヴァード大学に行った時で、H・エイケンが政府の研究費でこの種の機械を作っていた

●継電器方式に依る新型スイッチ式計算機の最初のを私が見たのは、ハーヴァード大学に行った時で、その機械はホワード・エイケンが管理していた。当時エイケンは政府の研究費でこの種の計算機を作っていた。私はエイケンの仕事に非常に感心した。その仕事を私は賞賛したが、エイケン自身は自分の機械を百年前にイギリスのバページが作った粗末な計算機を近代的に推し進めたものだと考えていた。バページは数学的可能性について、優れた構想を作り上げたが、これらが提起する機械的な問題については殆んど何の理解も持たなかった。

[247] 当時のエイケンは、計算機のかんりのろまな機械式継電器にすっかり執り付かれており、しかも電子式継電器を使えば非常にスピードが上げられる事など少しも重視していなかった

●私が見て驚いたことに、エイケンは、計算機の第一の道具としてかんりのろまな機械式継電器にすっかり執り付かれており、しかも電子式継電器を使えば非常にスピードが上げられる事など少しも重視していなかった。こういう視野の狭さは、今ではエイケンが自分で振り捨てて、彼は電子計算機の考案と設計に

ついて最も活動的で独創的な人の一人となった。しかし当時の彼は、妙な道徳的奇癖に囚われており、機械式継電器でやる仕事は本質的に健全で正しく、電子式継電器でやる仕事は不必要で倫理的な墮落であると考えていた。

[248] 機械仕掛けを工夫する実際的才能に長けた人達の態度の弱点は、彼等が何かの問題についての手法を自分の発見の才に依って達成した段階に固定して置きたがるという傾向だ

●私はここで、機械仕掛けを工夫する実際的才能に長けた人達の態度に根強く結び付いている弱点の事を強調したい。それは、彼等が何かの問題についての手法を自分の発見の才に依って達成された、丁度その段階に固定して置きたがるという傾向で、従って又彼らは後の仕事が自分たちの原理から外れるなら、それに対して深刻な知的及び道徳的な抵抗を示す、いやむしろそれを阻止しようとさえするのである。

[249] 自分達のやる事は悉く後の人の踏み台以上のものではない——ニュートンの “もし、私が他人より前方を見通したと言うなら、それは私が巨人の肩に乗っていたからだ” の意味だ

●われわれの様に紙や印刷インキ以上に金の掛かるものは何も使わない数学者は、非常に活発な分野で仕事をしている時は、自分達の発見は紙の上に書いた途端に、いや頭の中に浮んだ途端にさえ、もう古臭くなり始めるといふ事実、すっきり甘んじている。われわれはよく知っている——自分達のやることは悉くやがては後の人の踏み台以上のものではなく、彼等にわれわれが最後に到達した所を既に知っているという有利な立場を与えるのである。これが、あのニュートンの有名な格言の意味する所である。“もし、私が他人より前方を見通したと言うなら、それは私が、巨人の肩に乗っていたからだ。”

[250] 特許制度があり、発明家の着想が売買出来るものとして商業的価値を持つので、益々産業技術者をこの方向に追い遣って行くが、この期待は結局は幻想に過ぎない

●しかし、金属に具体化される発明は売り物になる見込みがあるために、産業技術者にとにかくこう言う基本的な事実を見えなくさせ、彼自身が貢献をしたその段階で、進歩の流れを押し止めることが出来そうな望みを抱かせるようになる。特許制度があり、発明家の着想が、売買出来るものとして商業的価値を持つ事が、益々産業技術者をこの方向に追い遣って行く。この期待は結局は幻想に過ぎない。

[251] 発明家も、長い目で見た最大の貢献は単に一つの装置にあるのではなく、過去現在未来に亘る機械類に関する思考と着想の流れ全体を如何に推し進めたかという意識を持つべきだ

●もし発明家も真に実際家であるなら、長い目で見れば自己の最大の貢献は単なる一つの装置にあるのではなく、過去現在未来に亘る機械類の大集団に関する思考と着想の流れ全体を如何に推し進めたかにある事になるといふ、非常に現実的な意識を持つべきである。彼は、この思考と着想の流れに協調すべきであり、彼が先人を乗り越えて進んだと丁度同じ様に、彼自身と彼の仕事も、未来への礎石とならざるを得ず、決して科学や技術の最後の到達点になることは出来ないといふ事を悟るべきである。

[252] 大脳と神経系も計算機としての重要な特性を備え、継電器のイエスカノーと同じ様に

神経線維も基本的には全か無かのたった二つの状態しか取る事が出来ない

●ところが、計算機の研究に対する私の興味は、真鍮や銅やガラスや鋼で作られる計算機の過去現在将来の流れ等を遥かに超えた所へ私を押し流してしまっただ。大脳と神経系も又、計算機としての重要な特性を備えている。継電器のイエスカノーと同じ様に、神経線維も基本的にはたった二つの状態しか取る事が出来ない。つまり一つは情報を伝えると言う状態であり、もう一つは情報を伝えないと言う状態である。これは神経系の全か無か（オール・オア・ナン）の法則と言われている。この法則は、この言葉の無骨で冷酷な表現から察せられる程精密に行われる訳ではないにせよ、神経伝導の基本的事実を表わすには十分に正しい。

[253] 神経線維は種々の強度信号で刺激されるが、信号の運命は、消えて繊維の端迄伝わら

ないか、自己触媒を続けて次の繊維の一端から多端へ伝わる刺激を新たに出発させるかだ

●神経線維と言うものは、いろいろな強さの信号に依って刺激されるものではあるが、これらの信号の終局の運命は、途中で消えてしまって繊維の端まで伝わらないか、又は、化学で自己触媒過程と呼ばれている過程を続けて端まで行って、そこで次の繊維の一端から多端へ伝わる様な刺激を新たに出発させるかどうかである。

[254] 神経線維とフリップ・フロップ電気回路には密接な相似が存在し繊維の端に通信が達

するずっと以前に繊維は刺激の強さの形でなく刺激の数の形で情報を運んでいる点まで相似だ

●神経線維は、計算機としての重要な特性と同様に、基本的には全か無か（オール・オア・ナン）のたった二つの状態しか取る事が出来ない。刺激が繊維の端まで伝わって来た時には、その後の成り行きは、元の刺激の強さには殆んど無関係であり、従ってこの方の強さは全く無視して良い。

こうして、神経線維とフリップ・フロップ電気回路との間に或る種の相似が存在する。フリップ・フロップ回路は二つの、しかも唯二つの、平衡状態を持っている。この相似は非常に密接で、繊維の端に通信が達するずっと以前に、繊維は刺激の強さと言う形ではなく刺激の数の形で情報を運んでいると言う点まで相似である。

[255] 神経線維はシナプスと呼ぶ接続系で通信を受け渡し、新しい通信をシナプスから出る

神経線維の中に作るかどうか、いろんな繊維から入って来る通信の詳しい組合せに基づいて決定される

●神経線維はスイッチ装置であるばかりでなく、他のスイッチ装置に接続する装置でもある。神経線維はお互いに、接合点即ちシナプスと呼ばれる接続系で通信を受け渡している。そしてここで、新しい通信をシナプスから出て行く神経線維の中に作るかどうかと言う問題が、いろんな繊維から入って来る通信の詳しい組合せに基づいて決定される。最も簡単な場合には、シナプス系は或る閾値を持っている。と言うのは何の事かと言うと、もし或る一定数以上の入って来る神経線維が、或る一定の限られた時間間隔内に通信を受け取ったならば、シナプスから出て行く神経線維は興奮し、そうで無ければ、興奮しないのである。

[256] われわれは、日常生活にフィード・バック現象を余りに良く使っているから、反って、

至極簡単な動作の中にも潜むフィードバック・バックの本性に気付かない事が多い

●われわれは、日常生活に、フィード・バック現象を余りに良く使っているから、反って、至極簡単な動作の中にも潜むフィードバック・バックの本性に気付かない事が多い。人間が真っ直ぐ立っている時でも、彫刻の像が直立している様な仕方ではない。最も安定の良い彫像でも、何か台に固定しなければならない。さも無いと、引っ繰り返ってしまう事もある。人間が直立しているのは、これと違って、倒れる様な力に対して、前であれ後であれ常に抵抗し、反対側に引っ張る筋肉を作用させて、どの方向への力も相殺する様にしているからである。

[257] 人間の体の中の平衡は、生命現象の中に見られる平衡の大部分と同様に静的なもので

なく、破壊をもたらすどんな力に対しても積極的に抵抗する過程が、何時も相互に作用している

結果だ

●人間の体の中の平衡は、生命現象の中に見られる平衡の大部分と同じ様に、静的なものでなく、破壊をもたらす様などんな力に対しても積極的に抵抗する過程が、何時も相互に作用している結果である。われわれの直立している事、歩く事、これらは皆、重力に対抗して、何時も柔術をやっている様なものであり、又生命と言うのは間断無く死を相手にレスリングをやっている様なものだ。

[258] 私は神経系を一種の計算機と考えて、友人のローゼンブルースやその他の神経生理学

者に伝え、神経生理学者と通信工学者と計算機研究者を集めてプリンストンで非公式な集りを

持った

●この点から私は、神経系を多くの点で一種の計算機と考えざるを得なかった。そしてこの考えを友人のローゼンブルースやその他の神経生理学者に伝えた。私は一群の神経生理学者と通信工学者と計算機研究者を集めてプリンストンで非公式な集りを持った。すると、どのグループも他のグループがやっている事を積極的に知ろうとしていたし、他のグループの専門用語を利用しようとしていた。その結果、間もなく、これらのどの分野で仕事をしている人も、同じ言葉を語り始めた。その言葉は通信技術者や自動制御研究者や計算機研究者や神経生理学者が使う用語を含む言葉であった。

[259] 記憶という言葉が様々な分野に通用する便利な言葉である事、フィード・バックと言

う言葉が生体に於いても現象を述べるのに適切な事、情報をイエスとノーの数——ビット——に

依って測定するのが便利だと言う事に皆が気付いた

●彼等は、情報の貯蔵と言う事に興味を持ち、神経生理学者と心理学者が使う記憶という言葉が、こう言う様々な分野の全てに亘って通用する便利な言葉である事に、皆が気付いた。またフィード・バックという言葉も見付けた。これは電子工学者から出て既に自動制御研究者にも広がっていたのだが、機械ばかりで無く生体に於いても現象を述べるのに適切であった。情報を測定するには、イエスとノーの数に依っ

で測定するのが便利だと言う事に皆が気づき、何時の間にか、この情報単位として、ビットと言う言葉が決まった。

[260] この会合を私は新科学サイバネティックス、即ち機械及び生体における通信（コミュニケーション）と制御（コントロール）の理論の誕生地と見做したい

●この会合を私は、新科学サイバネティックス即ち、機械及び生体に於ける通信（コミュニケーション）と制御（コントロール）の理論の誕生地と見做したい。私は、この新しい科学が、急速に発展しつつ広く各方面に行き渡って行くだろう、と期待した。事実、問題は非常に発展し、私も後の段階でそれに一役果たした。

[261] どの様な仕事も、われわれの初期の仕事が道を開いた自動制御機械とオートメーション工場についての文献のほんの一小部分以上を覆うには足りないだろう

●李がM・I・Tに帰って来たので、自動制御機構の研究を進めるのにも、又後に私がサイバネティックスと名付けた一連の諸問題全体に入っていくのにも、私は大いに勇気付けられた。しかし、この問題についてわれわれ二人が力を合わせてやれる仕事全部でも、又、どんな人が百人掛かってやれる仕事全部でさえも、われわれの初期の仕事が道を開いた自動制御機械とオートメーション工場についての文献のほんの一小部分以上を覆うには足りないだろう。

[262] オートメーション工場では、今や工場を設計出来るばかりでなく、それについて最も多面的な問題を構成出来る様な新しい専門家が求められており、新しい専門職を生み出そうとしている

●オートメーション工場はきっと、今（福永注・1956年）の学生諸君が活着している間にさえ、特殊なものではなく当り前のものとなるだろう。それは今や、新しい専門職業を生み出そうとしている。つまり、こういう工場を設計出来るばかりでなく、それについて最も多面的な問題を構成出来る様な専門家が求められているのである。

[263] オートメーション工場を設計する技術は理論家の私の範囲を超えた問題だが、その本性と、もたらず結果を説明し聡明に対処する必要を労使双方に警告する事が、私の第一の仕事だ

●オートメーション工場を設計する近代技術は、私の様な理論家の範囲を遙かに超えた問題である。私はオートメーション工場について、その設計技術を研究する事は、その本性とそのもたらず結果とを説明し、それに聡明に対処する必要を労使双方に警告する事が、自分の第一の仕事だと考えている。

[264] ローゼンブルースと一緒に始めた仕事はクローナスと呼ばれる筋肉の痙攣についてのものだが、それは神経筋肉系でフィード・バックの震えを研究するのに願ったり叶ったりの実例

と思われた

●1944年のメキシコ数学会に招かれてメキシコを訪問した機会に、ローゼンブルースと私は一緒に仕事を始めた。その仕事はクローナス（間代痙攣）と呼ばれる筋肉の痙攣についてのもので、これは膝の上にもう一つの膝を乗せ脚を組んで座っているとよくなるあの痙攣性の震えの事である。これは、神経筋肉系で、フィード・バックの震えを研究するのに願ったり叶ったりの実例と思われた。

[265] クローナスの仕事の中には、その後一般に認められる様になった考えが多く含まれていたと思うし、クローナスの研究の他にリズムカルな収縮を指揮している心臓について幾らか研究した

●クローナスについてのわれわれの研究の進み具合は、私には満足なものだったが、実験的研究に対して厳格な事を要求するローゼンブルースには不満足なものだった。論文は終に発表されず仕舞いになった。だが私は、その仕事の中には、その後一般に認められる様になった考えが多く含まれていたと思う。クローナスの研究の他に、リズムカルな収縮を指揮しているものとして心臓について幾らか研究した。この研究は後になって、ローゼンブルースの共同研究者の一人に依って、ずっと進められた。

[266] 神経系の研究を一種の通信系の問題と見て近代的数学技術を応用する事が、活発な関心を引き起し、精神病学者、社会学者、人類学者等が、神経生理学者、数学者、通信専門家、計算機設計技師等と共に、考え方の共通基盤を発見出来ないかを論じた

●私がアメリカに帰って見ると、ローゼンブルースと私が共同でやって来た種類の研究、つまり、神経系の研究を一種の通信系の問題と見て近代的数学技術を応用する事が、非常に活発な関心を引き起していた。同僚の一人がニューヨークのメイシー財団を説き伏せて、この問題に関する幾つもの討論会を組織した。これは数年間続いた。ここには、精神病学者、社会学者、人類学者等が、神経生理学者、数学者、通信専門家、計算機設計技師等と共に集って、考え方の共通基盤が発見出来ないかどうかを論じた。

[267] セマンティックな（語義的な）困難は、数学の持つ精密さの代りになる言語が無い事、社会科学の用語の大きな部分は、数学的な言葉で表現する方法が未だ分っていない物事を言うのに使われている、と言う事から発するものであった

●討論は興味深いものだったが、事実われわれは、多かれ少なかれ、互いに他の人が使っている言葉でものを言う事を学び取ったのだが、完全に理解するには大きな障害があった。このようなセマンティックな（語義的な）困難は、次のような事から発するものであった。つまり、全般的に言って、数学の持っている精密さの代りになる様な言語が無い事、又、社会科学の用語のかなり大きな部分は、数学的な言葉で表現する方法が未だ分っていない物事を言うのに専ら使われており、しかもそうならざるを得ない、と言う事である。

[268] 通信の問題全体に亘って——社会的通信であれ、生理的通信であれ、機械的通信であれ——同一の考え方が通用する事を確信すると同時に、数学以外の分野で数学が為し得る事の過大評価に水をかけねばならないのは数学者だった

●実際、その時私は、他の多くの時と同じ様に気が付いたのだが、数学者が、数学程の精密さを持たぬ分野の科学者たちの助言者の役割を務める際に、しなければならぬ主な事の一つは、こういう人達が数学に対して持っている余りに大きな期待をくじく事である。この人達に、有効な精度が一桁しか得られない場合に、三桁もの数学を使う事には、何も知的な美徳は存在しない（しかも、実は、重大な知的害悪が存在する）という事を、教え込まなければならない。こうして、通信の問題全体に亘って——それが社会的通信であれ、生理的通信であれ、機械的通信であれ——同一の考え方が通用する事を十分確信すると同時に、こういう数学以外の分野で数学が為し得る事の過大評価に、水をかけねばならないのは、生理学者や社会学者でなくて、数学者なのだった。

[269] 心臓の神経伝導・クローナスについてローゼンブルースと私がやった共同研究の他に二人が一緒に研究したもの、私が単独に関心を持ったものを含めて、尚一群の生物学的研究がある

●心臓の神経伝導とクローナスとについてローゼンブルースと私がやった共同研究の他に、二人が一緒に研究したものと私が単独に関心を持ったものを含めて、なお一群の生物学的研究がある。未だはっきりした結果をもたらす迄には至っていないが、今後の研究にとって面白そうな問題を示している。

[270] 一緒にやった仕事の一つは神経を伝わるインパルスの流れの微分方程式を立てて、それを解くと言うやり方で一つの衝撃が通り過ぎる際に起る波形の電気分布を計算しようとする試みである

●私がローゼンブルースと一緒にやった仕事の一つは神経を伝わる衝撃（インパルス）の流れの微分方程式を立ててそれを解くと言うやり方で、一つの衝撃が通り過ぎる際に起る波形の電気分布を計算しようとする試みである。これが所謂神経スパイクの理論である。一つの神経衝撃が通過して行く際に電位が突然上昇し突然下降するが、この現象は、私には、少なくとも三つの別個の継起的現象に分たれるように思われた。

[271] 共同のもう一つの研究は、シナプスの所での神経衝撃の伝導の統計理論に関するものだった

●共同でやったもう一つの研究は、シナプスの所での神経衝撃の伝導の統計理論に関するものだった。但しシナプスとは、そこへ入って来る衝撃を運ぶ神経線維が、神経系のもっと先まで衝撃を運ぶ神経線維と接続している場所である。

[272] ウィースナーと共同でやって来た研究の一つは彼の着想に依るもので、音を機械的に

分析して、音の波形を局所的な圧力又は振動の系列として皮膚に伝えようとする試みである

●他の二つの研究は、未だ機が熟してはいないが、方向としては前途有望だと思っているもので、私がM・I・Tの電子工学研究所の人達、特にジェローム・ウィースナー博士と共同でやって来た研究である。その中の一つは、ウィースナーの着想に依って主導されているものだが、音を機械的に分析して、音の波形を局所的な圧力又は振動の系列として皮膚に伝える事が出来る様にしようとする試みである。この問題に取り掛かった時は前途有望だったが、耳の聞えない人が何らかの方式で手触りで音を判読するのに使える様な装置を作るのに、どんなやり方を取って研究を進めるのが一番良いのかを、はっきり決める迄にはならなかった。

[273] これはprostheses（身体欠陥の補綴）と言う事に対して私が持っている全般的関

心の一面を表わしている

●この事は、prostheses（身体欠陥の補綴〈ほてつ〉）と言う事に対して私が持っている全般的関心の一面を表わしている。私は前から考えていたのだが、手術で手足を切断すると、運動的なものが失われるばかりでなく、知覚的なものも全く同程度迄失われるのだと言う事が認識されたら、そして又正常な人の手に入る情報の一部が切断手術で失われると、その人は麻痺と共通なばかりでなく運動失調とも共通な状態に陥ると言う事が理解されたら、義手や義足は大いに改良出来るようになると思う。

[274] 運動失調とは運動の舵を取る神経の動きが失われているもので、運動する事が全然出

来なくなっているのではなく何かをしようとする自分自身の運動を知覚出来なくなった為なのだ

●運動失調と言うものは、運動の舵を取る神経の動きが失われているもので、運動することが全然出来なくなっているのではなく、何か或る事をしようとする様な運動が出来なくなっているのである。これは自分自身の運動を知覚出来なくなっている為である。

[275] 患者の完全には死んでいない呼吸筋から電気信号を取り出して増幅し、患者が自分で鉄の肺を制御する喜びを与え、侵されずに残る呼吸筋を使う練習をさせ得るものを実現出来ると

思う

●この問題と良く似たものに、麻痺患者用の鉄の肺を改良する問題がある。今の鉄の肺は多くの人命を救って来たが、これは患者を、自分では全く制御しない固定的な呼吸操作に頼り切りにさせてしまい、正常な呼吸動作を忘れさせてしまう傾向がある。私は、完全には死んでいない呼吸筋から電気信号を取り出して、それを増幅し、患者に自分で自分の鉄の肺を制御する喜びを与え、又呼吸筋のうち侵されずに残っているものを使う練習をさせる事も出来る様なものは、実現出来ると思っている。この仕事は、生理学者と医師と工学者から成る研究組織が必要な研究をやり遂げるのを待っている。

[276] 生理学の分野でやった事で自分が一番有意義だと思う事は、脳波の研究に時系列と呼ばれている統計理論を適用した事である

●私が生理学の分野でやった事の中で、自分が一番有意義だと思う事は、脳波の研究に時系列と呼ばれている統計理論を適用した事である。

[277] 時系列の濾波と予測に関する私の戦時研究は、一般調和解析とブラウン運動に関する初期の研究を基に、それを時間的に分布した不規則な現象を研究する道具として拡張する仕事であった

●時系列の濾波と予測に関する私の戦時研究は、一般調和解析とブラウン運動に関する自分の初期の研究を基に、それを、時間的に分布した不規則な現象を研究する道具として、拡張する仕事であった。何年もの間私は、この道具をそれに適していると思われる領域があればどこでも良いから使いたいと思っていた。

[278] ハーヴァード大医学部のローゼンブルース・ゼミナールで最初の脳波研究者の幾人かと付き合う様になった時以来ずっと、私はこれこそ自分が何か一仕事出来る分野だと感じていた

●脳波の研究と言うものが始まった当初からの事だが、ハーヴァード大学医学部のローゼンブルースのゼミナールで最初の脳波研究者の幾人かと私が付き合う様になった時以来ずっと、私はこれこそ自分が何か一仕事出来る分野だと感じていた。そして、仲間の神経生理学者達に対して絶えず、君達はこう言う方法に同情を持って耳を傾けるべきだ、出来るなら何か実験データについて徹底的に試して見るべきだと、しつこく要求し続けて来た。

[279] 頭皮を通して観測される脳中の回路から出た電流は脳の生理とそれに関連した精神現象の研究に新しい光を投じるものと期待されて来たが、30年代の大きな期待は未だ実現されていない

●脳波研究の初期の時代には、頭皮を通して観測される様な脳中の回路からさ迷い出た電流は、脳の生理とそれに関連した精神現象の研究に新しい光を投じてくれるものと期待された。事実、脳波の研究に依って、癲癇の処理に、多くの成果が挙げられて来たが、30年代にもたれた大きな期待は未だ実現されていない。

[280] 脳波電位記録装置がインクで描いた脳波の記録には非常に多くの情報が含まれているが、エジプト文字を解読するカギになったロゼッタ石の発見以前のエジプト語に関する情報の様なものだ

●その理由は、元々脳波と呼ばれているものは、非常に多種多様な現象の混じり合ったもので、例えば計算機や制御装置の回りに漂遊して来る電流を観測する場合に見出される様なものだからである。脳波は、その固有の言語でわれわれに語っているのであるが、その言語は肉眼そのもので見られる文字で書かれている訳ではなく、われわれの眼に見えるものは脳波電位記録装置（エレクトロエンセファログラフ）がインクで描く図に過ぎない。インクで描かれたこの記録には、非常に多くの情報が含まれている。しかし、

それは、エジプト文字を解読するカギになったロゼッタ石の発見以前のエジプト語に関する情報の様なものである。

[281] 私の属するグループは調和解析を使って、脳波のロゼッタ石を見付ける努力を続けて来ているが、この分野では過去にアメリカの偉大な実験物理学者マイケルソンの輝かしい成功の例がある

●最近になって、私はM・I・Tのいろいろな研究室やマサチューセッツ総合病院等の人達が参加しているグループに入っている。このグループは調和解析を使って、脳波と言う文字に対するロゼッタ石を見付けようと努力を続けて来ている。われわれにはこの分野で過去に、アメリカの偉大な実験物理学者マイケルソンの輝かしい成功の例がある。

[282] マイケルソンが考案した干渉計の原理は脳波やその他それと類似の振動を研究する装置にも実現させることが出来、われわれはこの器械を自己相関器と名付けた

●マイケルソンは干渉計と呼ばれる装置を考案した。これは光のスペクトルの研究の為にこれ迄に考案された最も繊細な器械であり、これに依って彼は、恒星が地球に対して張る角度を測定する等と言う一見不可能な仕事を幾つかの恒星について遣って退けた。干渉計の原理は、実は、脳波やその他それと類似の振動を研究する装置にも実現させる事が出来る。われわれはこの器械を自己相関器（オートコリレーター）と名付けた。M・I・Tの多くの人、特に李によって、自己相関器の設計は驚く程高度の完成の域に達した。

[283] 30年前の初期脳波学者の野心的な期待、即ち本当に読み易い形の脳波図形が欲しいと言う望みは今や実現され掛かって来たと言っても驚く事はない

●脳波の生のままの記録を自己相関器に掛けて変形すると、驚く程鮮明で意味のある図形が得られる。この図形は初め機械に入れてやった生の記録の判読出来ない程の混乱とは似ても似つかぬ程である。われわれはこの問題の研究の未だほんの第一歩の所にいる。しかし、前途には非常に大きな希望を持っている。30年前の初期の脳波学者の野心的な期待、即ち、本当に読み易い形の脳波図形が欲しいと言う望みは、今や実現され掛かって来たと言っても、驚く事はない。

[284] 干渉計と自己相関器との相似は表面的でない意味深いものであり、マイケルソンの初期の研究がわれわれに機械から得られる結果の解読に必要な言語を全部与えてくれたのである

●干渉計と自己相関器との相似は、表面的なものではなく意味深いものであり、マイケルソンの初期の研究がわれわれに、こう言う機械から得られる結果の解読に必要な言語を全部与えてくれたのである。この脳波の研究で私が受持った仕事のかなりの部分は、私のメキシコ訪問が終ってから以後にやったのだが、本質的にはローゼンブルースと私がやって来た研究の集大成であると考えている。

[285] 機械と人間のフィード・バックの間に見出した最初の相似関係は、その後われわれが発見を重ねている神経系と制御機械又は計算機との新たな驚くべき相似に依り次々と補足されている

●自己相関に依る脳波の研究は、私の数学的興味とローゼンブルースの生理学的興味が出会った唯一つの場面ではない。われわれが機械と人間のフィード・バックとの間に見出した最初の相似関係は、その後もわれわれが発見を重ねている神経系と制御機械または計算機との間の新たな驚くべき相似に依って、次々と補足されている。

[286] そもそも初めから私は神経系と数字式計算機との間の相似に心を打たれた

●そもそも初めから私は神経系と数字式計算機との間の相似に心を打たれた。私は、この相似関係はあらゆる点で成り立つものであると言おうとするのではなく、また神経系の性質は、数字的計算機と同じだと言えばそれで一切が作り出せるのだと主張するでもない。私は唯、神経系の振る舞いの或る種のもの、数字式計算機のそれと密接に似ていると言いたいのである。

[287] 或る一つの神経衝撃が一つの神経線維の端に到達すると、同じレベルに既に達していた他のいろいろな衝撃と組み合わせさせて、次の神経線維が衝撃を発射するかどうかを決定する

●神経系は、確かに、衝撃を伝達するいろいろな要素から成る複雑な網である。基本的には、もし或る一つの神経衝撃が一つの神経線維の一端から多端に伝わる程強ければ、いやしくもそれが伝わる限り手前の端での衝撃の強さの大小に余り関係せず、或る一つの大きさを先の方の端へ到達するものである。こうして、神経線維はイエスかノーかを伝えて行く。或る一つの衝撃が一つの神経線維の端に到達すると、同じレベルに既に達していた他のいろいろな衝撃と組み合わせさせて、次の神経線維が衝撃を発射するかどうかを決定する。

[288] 神経線維は一種の論理機械であり、前の幾つかの決定の結果に基づいてその次の一つの決定が為されるのだが、これは本質的に計算機械の中の一つの要素の行う操作様式である

●言い換えれば、神経線維は一種の論理機械であって、前の幾つかの決定の結果に基づいて、その次の一つの決定が為される様になっているのである。これは本質的に、計算機械の中の一つの要素の行う操作様式である。この様な基本的な相似性の他に、補助的な相似点もある。それは記憶、学習等々の様な現象に関するものである。

[289] ホメオスタシスとは、体温や血圧やその他生体の内部環境の多くの因子を生きている事が可能になる様に安定に保っている事である

●最近私の注意を引いている医学的な問題がもう一つある。ウォルター・キャノン、クロード・ベルナールの昔に帰って、人間の健康、いや肉体の存在そのものが、ホメオスタティック・プロセス（ホメオス

タシス的過程)と呼ばれるものに依存している事を強調した。ホメオスタシスとは、体温や血圧やその他生体の内部環境の多くの因子を、生きていく事が可能になる様に安定に保っている事である。

[290] 生命の見掛け上の平衡状態と言うのは能動的な平衡であり、何か基準から外れると

その外れがそれと逆向きの反応を引き起すネガティブ・フィード・バックの性質を持つ

●即ち、生命の見掛け上の平衡状態と言うものは、能動的な平衡であり、この中では何か基準から外れると、その外れがそれと逆向きの反応を引き起す様になっている。これは、われわれの言うネガティブ・フィード・バックの性質を持つものである。

[291] 身体の調子が悪くなった時は患者の体の中でフィード・バックの仕掛けが内部的に壊

れているに違いないので、失調を数学的に記述すれば仕掛けの性質と故障の性質を表示する筈だ

●従って、身体の調子が悪くなった時には、患者の体の中でフィード・バックの仕掛けが内部的に壊れているに違いないのであり、その失調を数学的に記述したものは、フィード・バック仕掛けの性質とその故障の性質とを表示する筈である。

[292] 白血病で白血球が過度に増える状態では血球の製造と破壊を釣り合わせるホメオスタ

ティック・プロセスが止まっていず、正しくないレベルにずれていると言う証拠を見付けた

●私の共同研究者の一人ポール・ハーンと私は、白血病の経過にこの種の議論を応用した。そして、この白血球が過度に増える状態では、血球の製造と破壊を釣り合わせるホメオスタティック・プロセスが完全に止まってしまっているのではなく、正しくないレベルにずれてしまっていると言う事を示すかなりの証拠を見付けた。

[293] ホメオスタシスの病気と言う概念は従来から物事を局所的に考える傾向が非常に強か

った医学の多くの分野で、きっと有用なものになるだろうと感じている

●私は、このホメオスタシスの病気と言う概念は、医学の多くの分野できっと有用なものになるだろうと感じている。この傾向は脳に関して特に言える。大脳皮質つまり大脳両半球の表面の殆ど領域に対しても、一つ一つ別々な機能が発見されるかが仮定されて来た。しかし、物事を局所的に突き詰める事を強調する傾向は、有機体の全般的な問題を、局所的に限定出来る原子的現象より軽く見させる事になっていた。

[294] 私達の制御装置の研究はこの様な局所現象がどの様に組み立てられて脳全体や人体全

体に亘る大きな過程を作り上げているかについて、より良い見通しを与えつつある様に思われる

●私達の制御装置の研究は、この様な局所現象がどの様に組み立てられて、脳全体——いや実は、人体全

体——に亘る大きな過程を作り上げているかについて、より良い見通しを与えつつある様に思われる。

[295] 白血病の病的活動に於いても故障したのは血球生成と血球破壊の過程全体に亘る全内部調節ではなく、調節が或る誤ったレベルで働いている事にあると言う事を示す強い証拠がある

●健康体の働きについても、こう言う総合的な過程が理解されなければならない。何故なら、病理的状态では、この総合的な過程が、個々の部分の故障に帰着させる事が出来ない様な仕方で壊れる事があるからである。或る種の病気、例えば白血病の場合には、白血球の生成の様な或る種の過程が、一見無茶苦茶に高ぶっている。しかし、こう言う病的活動に於いてさえ、故障したのは、血球生成と血球破壊の過程全体に亘る全内部調節の欠如ではなく、むしろ調節が或る誤ったレベルで働いている事にある、と言う事を示す強い証拠がある。

[296] 私は予測機械についての私自身の仕事で忙しく、その仕事では私は有能で私の助力がなければ誰も満足に仕事が出来なかったので、戦争が終る迄の私の持場はそこだと思っていた

●第二次世界大戦中の或る日、私はヴァネヴァー・ブッシュに会う為に、ワシントンに呼ばれた。彼はコロンビア大学のハロルド・ユージーがウラニウムのアイソトープ（同位元素）の分離に関する拡散の問題の事で私に会いたいと言っていると言った。われわれは既にウラニウム・アイソトープが元素の変換に重要な役割をし、そして又原子爆弾さえそれから作られるだろう、と言う事に気が付いていた。私はニューヨークに行きユージーに会った。しかし私は彼が助力を求めている特殊問題を解く為の能力をこれと言って持っているとは思えなかった。実際の所、私は予測機械についての私自身の仕事で忙しく、戦争が終る迄の私の持場はそこだと思っていた。その仕事では私は有能であり、私の助力がなければ誰も満足に仕事が出来なかった。それ故私はユージーの問題には、これと言った熱意は示さなかった。

[297] マンハッタン計画に参加する様になった沢山の若い人々の仕事は微分方程式が沢山繋がったものを解き反復拡散の問題を処理する事であるらしかった

●その後、私と一緒に仕事をしていた沢山の若い人々が、マンハッタン計画に参加する様になった。ともかく彼等の仕事は微分方程式が沢山繋がったものを解き、反復拡散の問題を処理する事であるらしかった。ウラニウムのアイソトープを分離する問題は結局、ウラニウムを含む液体の拡散を次々と反復して、各段階で二つのアイソトープの分離を極く僅かずつ行ない、それが積み重なって最後にはかなり完全な分離となる様に仕事に帰着された。

[298] 物理的・化学的に同じ性質を持つ二つの物質を分離するには反復拡散操作が必要だったが、私が聞かされた説明は、この操作では非常に微小な効果を利用するので計算を出来るだけ精密に行わなければ結果は全然得られなくなってしまうと言う事だった

●ウラニウムの二つのアイソトープの様に物理的にも化学的にも同じ性質を持つ二つの物質を分離するには、この様な反復拡散操作が必要であった。当時私は、この計算のかなりの部分は、実は多額の金を浪

費している事になっているのではないかと思った（この仕事の細かい点は何も知らないけれど、今でも私はそう思っている）。私が聞かされた説明に依れば、この操作では非常に微小な効果を利用するのであるから、計算を出来るだけ精密に行わなければ、結果は全然得られなくなってしまうと言う事だった。

[299] 非常に僅かな効果しか生じない過程を積み重ねて使うという状況の下に於いてこそ一連の微分方程式群を唯一つの偏微分方程式で近似するという標準的な近似法が最もうまく行くのであって、近似的に連続として扱うのが正当だと認められない現象は殆んど重要ではない

●しかし、私はこれはおかしい事だと思った。何故ならば、このように一回毎には非常に僅かな効果しか生じない過程を積み重ねて使うという状況の下に於いてこそ、一連の微分方程式群を唯一つの偏微分方程式で近似するという標準的な近似法が最もうまく行くのだ。言い換えれば、私は当時も今も大いに疑問を持ち、このような遅くて何回も反復される拡散過程では、近似的に連続として扱うことが正当だと認められないような現象は、実際には殆んど重要ではない、というように思うのである。

[300] 1944年の秋には、私は既に高速計算機とオートメーション工場の関係について考え始めており、オートメーション工場も近い将来には生れる筈だという考えに到達した

●1944年の秋には、私は既に高速計算機とオートメーション工場の関係について考え始めていた。そして、凄いスピードで計算をやってのけた磁気テープと穿孔（パンチ）カードにより流れ作業の手順の決定一すなわちプログラミング—を行うことの出来る計算機が既に生れている以上、オートメーション工場も近い将来には生れる筈だという考えに到達した。

[301] 社会的にあるいは有害であるかもしれないオートメーションという問題について、世の人々によく説明することが私の第一の義務となったのではないかと思うようになった

●そこで私は、社会的にあるいは有害であるかもしれないオートメーションという問題について、世の人々によく説明することが、私の第一の義務となったのではないかと思うようになった。

[302] 人間がボタン押し装置として使われている場合にはオートメーション工場は人間を完全に機械で置き換えてしまう恐れがある反面で、機械類が一定の目的を最も果せるように操作の手順を編成するような高度の技能を持つ専門家を新たに必要とすることにもなる

●オートメーション工場は、労働雇用の問題について新しい社会問題を投げ掛けずには置かないが、それをどうしたら良いかは私にははっきり分らなかった。広い範囲に亘るいろいろなレベルの労働力の配置転換が引き起されるであろう。人間が単に一種のつまらぬボタン押し装置として機械的に使われている場合には、オートメーション工場はその人間を完全に機械で置き換えてしまうおそれがある。だがまたその反面、オートメーション工場は、機械類が一定の目的を最もよく果せるように操作の手順を編成することが出来るような高度の技能を持つ専門家を新たに必要とすることにもなる。

[303] 労働需要の変化が乱脈な仕方に来るならば失業時代が現出するだろうが、われわれが漫然と破局を待っておらずに良く対策を考えるならば、こういう破局は確かに避けることが出来ると思う

●オートメーションはまた、故障を直したり機械の手入れをしたりする高度の熟練工を、新たに必要とする。もしこういう労働需要の変化が、出たら目な乱脈な仕方で行って来るならば、きっと未曾有の失業時代が現出するだろう。だが私は、もしわれわれが漫然と破局が来るのを待っておらずに、良く対策を考えるならば、こういう破局は避けることが確かに出来ると思う。

[304] 本質的にオートメーションによって置き換えられる人間労働は非人間的な種類の人間労働であり、それがたまたま産業革命が起って以来人間のやるべき仕事と見做されて来ただけの話なのだ

●私の考え方からすれば、本質的にはオートメーション化によって置き換えられる人間労働は、非人間的な種類の人間労働であって、それがたまたま産業革命が起って以来人間のやるべき仕事と見做されて来ただけの話なのである。では、こういう労働はどこへ行くべきなのか。最もはっきりしていることは、オートメーション工場に於いて何時でも必要なのは、修理工や熟練技能工や、プログラミングの専門家、つまり指定された目的をうまく果せるように機械類を適当に仕立てたり配置する仕事の専門家である。

[305] オートメーション化が徐々に進んで行く間に、非熟練工場労働者が何らかの格上げによって、こういう高級な労働者の位置へ進むことが可能かどうかという問題は決定的に重要だ

●だから、オートメーション化が徐々に進んで行く間に、非熟練工場労働者が、何らかの格上げによって、こういう高級な労働者の位置へ進めば無理がない。従ってこういう格上げが可能かどうかという問題は、決定的に重要な問題となる。

[306] 1946年当時のイギリスの科学的環境は、私が当時展開しつつあった制御と通信と組織についての新しいアイデアを同化するのに最早十分熟していると思われた

●1946年の夏、フランスのナンシー大学で調和解析について私的な数学会議があり、この会合では私のアイデアを大きく取上げるようになっていた。この会議に出席する前に、イギリスとイギリスの友人を訪れた。マンチェスター大学は高速自動計算機の新技术の点で確かに第一線にあった。国立物理学研究所では、シャノンが既にアメリカでやっていたのと同じような、数学的論理学と電子工学との総合をチューリングがやっていた。要するに、イギリスの科学的環境は、私が当時展開しつつあった制御と通信と組織についての新しいアイデアを同化するのに最早十分熟していると思った。

[307] 出版社のフライマン氏は、通信と自動工場と神経組織についての私のアイデアを彼

の双書の一冊として書き上げてくれないかと言い、私は承諾した

●これらの問題に関する包括的な一書を書こうという考えは私がパリに着いた時に熟し始めた。出版社のフライマン氏は、通信と自動工場と神経組織についての私のアイデアを彼の双書の一冊として書き上げてくれないかと言い、私は承諾した。

[308] 私はブリストルでグレー・ウォルターに会い、彼がやっている脳波に関する極めて面白い仕事を見せてもらった

●ナンシーの会合は極めて成功し、われわれの仕事をうまく統合することが出来ることが分かった。私は再びイギリスに渡り、ブリストルではグレー・ウォルターに会い、彼がやっている脳波に関する極めて面白い仕事を見せてもらった。

[309] イギリスのケートンは 1875 年に動物の脳波に関係のある研究をしたが、人間の頭皮上に現われる或る種の電位の観察を初めて行ったのはドイツ人のハンス・ベルガーだった

●イギリスのリチャード・ケートンは 1875 年に動物の脳波に関係のある研究をしたが、人間の頭皮上に現われる或る種の電位の観察を初めて行ったのはドイツ人のハンス・ベルガーだった。この種の電位は、脳の電気化学的な活動に由来するもので、神経性や精神性のいろいろな異常と一定の関係が見られる。もっとも、この関係は未だ余りはっきり解読されていない。最初は、これらの現象は脳の生理に直接近づく方法として大きな期待を持たれた。そして事実、癲癇の発作と切迫の場合には、ある種の解読できる特性が見られる。

これとは別に、正常の状態で観察される一定の規則性を持った脳波がある。これらのうち、最も顕著で一貫したものはアルファ・リズムと呼ばれている。これは約十分の一秒の周期の振動である。

[310] 最近私は、脳波を測ってもっとはっきりした判断をすることが出来るようにする数学的な道具を考え出したが、この仕事は科学者達の共同研究事業として現在進行中である

●脳波のような不規則な振動を読み分ける術はたやすくはない。そしてこれらの振動はただ眼で見ただけでは到底読み分けられないものを沢山含んでいる。既にアルツロー・ローゼンブラスと共同で生理学の研究をした経験について述べたように、脳波を測ってもっとはっきりした判断をすることが出来るようにする数学的な道具を、最近私は考え出した。この仕事は M・I・T とマサチューセッツ総合病院の科学者たちの共同研究事業として現在進行中である。

[311] ウォルターはいろいろな部分の脳波の包括的な図を描く装置を工夫しこの図が脳の正常な生理とその異常の診断に役立つことは疑いないが、数学的には大雑把で精密さが劣っている

●グレー・ウォルター博士は、アメリカの出だが、長らくヨーロッパに住んでおり、脳波の研究すなわちエレクトロ・エンセファログラフィーのヨーロッパにおける指導者の一人と見られる。彼は情熱と精力の満ち溢れた人で、脳のいろいろな部分の脳波の包括的な図を描かせる装置を工夫した。この図は興味深い

ものであり、脳の正常な生理とその異常の診断に役立つことは疑いない。だが、われわれの研究で使っている道具と較べると、数学的には大雑把で精密さが劣っている。事実、ウォルターの科学に対する見方は数学者の見方よりはむしろ図解画家のそれに近い。

[312] 私とほぼ同時に、ウォルターはフィード・バック機械と人間の神経系との類推に着眼し動物の行動の或る種の様相を見せる機械仕掛けを作り始めたが、私は自動的に光の方に舵を執る「蛾」を作る仕事をした

●私とほぼ時を同じくして、ウォルターはフィード・バック機械と人間の神経系との類推に着眼し、動物の行動の或る種の様相をやって見せる機械仕掛けを作り始めた。私は自動的に光の方に舵を執る「蛾」を作る仕事をした。ウォルターの自動人形は「海ガメ」と呼ばれ、比較的込み入った幾つかの型の行動が出来るようになっていた。その中には、カメたちが動いている時にお互いに避け合うことが出来るような仕掛けもあり、また文字通り「腹が減った」時、すなわち、蓄電池の電気が無くなった時、兎小屋を思わせるような所へ行って蓄電池が再び充電されるまで電気を食べる事が出来る別の仕掛けもあった。

[313] 舵手を意味するサイバネティックスの言葉が気に入ったのは、制御の技術と科学を制御の概念が当てはまる全領域に亘って表現する言葉として、私が見付け得た最善のものだったからだ

●アメリカに帰ると私は再びメキシコに行き、ローゼンブルースと神経生理学の研究の続きを始めた。また、フライマンに約束した予測理論と制御装置に関する本の仕事に非常に熱心に取り掛かったのだが、先ず最初に迷ったことは、この本の表題は何とするか、扱う主題は何と名付けるかということだった。私は最初「メッセンジャー（使者）」を意味するギリシャ語を探したが私の知っていたものはアングロスだけだった。この言葉は、英語ではエインジェル（angel）すなわち神の使者という特定の意味を持っているため、私の表現したいものを正しく表わせない。そこで私は通信の方でなく制御の方の分野から適当な言葉を探した。私が考え付いた唯一の言葉は舵手を意味するギリシャ語のキュベルネテスだった。当然ギリシャ語の英語読みを利用すべきだと決めていたので、サイバネティックス（cybernetics）という名前を思い付いた。サイバネティックスという言葉が私に気に入ったのは、制御（control）の技術と科学を、制御という概念が当てはまる全領域に亘って表現する言葉として、それは私が見付け得た最善のものだったからである。

[314] 確率論についての私の初期の仕事は、私に一切のことが必然であって何事も偶然では無いような世界では組織という概念は無意味になってしまうということを確認させた

●大分前にヴァネヴァー・ブッシュが私に制御と組織（organization）を包括する新しい理論を取扱う新しい科学の道具が見出されねばならないというようなことを言った。結局、私はそういう道具を通信の領域に探し始めた。ブラウン運動についての私の研究からも分かるように、確率論についての私の初期の仕事は、私に一切のことが必然であって何事も偶然では無いような世界では組織という概念は無意味になってしまうということを確認させた。そのようなガッチリした世界が組織されていると言えるのであれば、それはガッチリ熔接された橋が組織されているというのと同じ意味でのみ言えるのである。

[315] 熔接された橋は内部の歪をうまく配分して調節を取り戻せるような材料でない限り、どこかの個所で歪が大きくなることになり、そこに歪が集中され終に橋は引きちぎれるか裂けて崩れる

●あらゆるものが他のあらゆるものに依存しているのであって、橋の構造のどこか取立てて一部に特に依存しているということはない。だから熔接された橋は内部の歪をうまく配分して調節を取り戻せるような材料で作られていない限り、どこかの個所で歪がひどく大きくなることになり、実際はそこに歪が集中されて、終に橋は引きちぎれるか裂けて、崩れ落ちてしまう。

[316] 組織というものは、その各部分が内部のストレス（歪力）に応じて多かれ少なかれある程度伸縮することが出来る時にのみ存在することが出来る

●橋や建物は完全な剛体ではないからこそ持つのである。これと同様に、組織というものは、その各部分が内部のストレス（歪力）に応じて、多かれ少なかれある程度伸縮することが出来る時にのみ存在することが出来る。われわれは、組織というものを考える時には、組織とは幾つかの構成部分の間に相互依存があり、しかもこの相互依存にはいろいろな程度の差があるものだということを考慮しなければならない。

[317] ある内部的な相互依存は他のものよりも重要であるに違いないから、系の幾つかの量を決定しても他の量には変化の余地が残されていて、この変化は場合によって様々で統計的なものである

●ある内部的な相互依存は他のものよりも重要であるに違いない。このことは言い換えれば、その系の内部依存は完全ではないということ、そしてその系のある幾つかの量を決定しても他の量には変化の余地が残されているということである。この変化はそれぞれの場合によって様々で、統計的なものである。そして、少なくとも統計理論以下の何ものも、組織という概念を意味のあるものにすることが出来る程の自由を含まないのである。

[318] 世界を一つの孤立した（隔離された）現象として見るのではなく、あらゆる可能な現象に亘る確率分布を持った統計集団の中の多くの可能な現象の一つとして考える

●私はウィラード・ギブスの仕事へ追い戻された。すなわち、世界を一つの孤立した（隔離された）現象として見るのではなく、あらゆる可能な現象に亘る確率分布を持った統計集団の中の多くの可能な現象の一つとして考えることである。私は、因果関係というものを、有るか無いか（因果の有無）という形で存在するものというよりは、むしろ多いか少ないか（因果の多少）という形で存在する或るものとして考えざるを得なくなった。

[319] サイバネティックスに関する私のアイディアの全背景は、<一つの系のある部分につ

いて知識を得た場合に残りの部分について得られる不完全な情報を扱う>情報の理論を考える

ようになったところの私の初期の仕事の記録の中に存している

●サイバネティクスに関する私のアイディアの全背景は私の初期の仕事の記録の中に存している。私は通信の理論に興味を持っていたので、情報の理論、特に、一つの系のある部分について知識を得た場合に残りの部分について得られる不完全な情報を扱う理論を、どうしても考えるようになった。

[320] 連続スペクトルの問題はわれわれに函数や曲線の中で解析学からはみ出す程不規則なものを考察せざるを得なくさせることに気付いていたので、不規則という事に対する新しい観点と宇宙の本質的な不規則についての新しい概念を構成した

●ところで、私はそれまでに調和解析の研究をやっており、連続スペクトルの問題はわれわれに函数や曲線の中で古典的な解析学の目録からはみ出す程不規則なものを考察せざるを得なくさせるということに気付いていたので、不規則という事に対する新しい観点と宇宙の本質的な不規則についての新しい概念を構成した。

[321] 私はわれわれのデータが決して精密ではないことを知っていたし、われわれを巡る世界は神経系を通じてのみ近付くことが出来、この世界に関するわれわれの情報は神経系が伝達し得る限られた情報の範囲を出ないことを知っていた

●私は物理学者や技術者と出来る限り密接に仕事をしていたので、われわれのデータというものは決して精密ではないことを知っていた。私は神経系の複雑なメカニズムに或る程度接触していたので、われわれを巡る世界は神経系というものを通じてのみ近付くことが出来、またこの世界に関するわれわれの情報は神経系が伝達し得る、限られた情報の範囲を出ないということを知っていた。

[322] 私は人間の頭脳のようなルーズなメカニズムに頼って完全な理論を作り出すことの不可能さを痛切に感じており、バートランド・ラッセルと研究した時、あらゆる論理に対して閉じた一組の仮設（公理の閉集合）が存在し、それによって定義された命題系にはどんな任意さの余地も残されないことが有り得るとはどうしても信ずることが出来なかった

●私は、人間の頭脳のようなルーズなメカニズムに頼って完全にびちっとした理論を作り出すことの不可能さを痛切に感じていた。そして私がバートランド・ラッセルと研究した時、あらゆる論理に対して、閉じた一組の仮設（公理の閉集合）が存在し、それによって定義された命題系にはどんな任意さの余地も残されない、ということが有り得るとは、どうしても信ずることが出来なかった。それで私は、それらの見事な技巧の正否を証明することなしに、ラッセルに対する或る種の批判を予見した。この批判は後にゲーデルとその後継者たちによって遂行されたが、彼らは、一群の明確に規定された規則から或る閉じた一定に決まった方法で出て来る単一な閉じた論理の存在を否定する正しい根拠を与えた。

[323] 昔から私にとっては論理や学習（習得）やその他全ての精神活動は、閉じた完全なものとしては頭に描くことが出来ず、人間が自己をその環境と合一させて行く過程としてのみ理解することの出来るものだった

●昔から私にとっては、論理や学習（習得）やその他全ての精神活動は、閉じた完全なものとしては頭に描くことが出来ず、人間が自己をその環境と合一させてゆく過程としてのみ理解することの出来るものだった。

この過程に於いて重要なのは、学習への闘いであり、勝利ではない。およそ如何なる勝利も、それが絶対的な勝利たる限り、直ちに「神々のたそかれ」〔訳注・ワグナーの楽劇〕をもたらす。そしてそこでは、勝利の概念そのものが、それが得られた刹那に消散してしまうのである。

[324] われわれは組織の解体の大奔流に逆らって泳いでおり、この奔流は万有を熱力学の第二法則が示す熱の死滅即ち万物の平衡と斉一の状態へ向って押し流している

●われわれは組織の解体の大奔流に逆らって泳いでいる。そしてこの奔流は万有を熱力学の第二法則が示す熱の死滅即ち万物の平衡と斉一の状態へ向って押し流している。

[325] マクスウェルやボルツマンやギブスが物理学に於いてこの熱の死滅という言葉で指したものは、キールケゴールの倫理学が人間は混沌たる道德世界に住んでいると指摘したのに対応している

●マクスウェルやボルツマンやギブスが物理学に於いてこの熱の死滅という言葉で指したものはキールケゴールの倫理学の中にその対応物をもつ。すなわちキールケゴールは、人間は混沌たる道德世界に住んでいると指摘したのである。この混沌世界の中で、われわれの為すべき第一の仕事は自由意志による秩序と制度（体系）の飛び領地を作ることである。これらの飛び領地は、ひとたび樹立されれば、それ自身の弾みによって何時までもそこに留まっていはいない。われわれは出来るだけ早く走ることなしに今いる所に留まっていることは出来ない。

[326] われわれはやがて何時しか得られるべき最終的な勝利を求めて戦っているのではなく、生きていること、行き続けること、そして生きて来たことは可能な最大の勝利である

●われわれはやがて何時しか得られるべき最終的な勝利を求めて戦っているのではない。生きていること、行き続けること、そして生きて来たことは可能な最大の勝利である。如何なる敗北も、われわれから、無情と見える宇宙の中で既に或る時間だけ生存して来たという成功を奪うことはできない。

[327] われわれ自身の自然（本性）を声高々と宣明すること、また無秩序へ向う自然の圧倒的な流れに面と向かって組織という飛び地を築く企ては、神々とその課する鉄の必然に逆らう傲

慢無礼であるが、ここに悲劇が存した栄光もここに存するのだ

●これは敗北主義ではない。それはむしろ、一切の差別の不可避的消滅こそが必然である世界に於ける悲劇の感覚（センス）である。われわれ自身の自然（本性）を声高々と宣明すること、そしてまた無秩序へ向う自然の圧倒的な流れに面と向かって組織という飛び地を築く企ては、神々と、その課する鉄の必然に逆らう傲慢無礼である。ここに悲劇が存し、しかもまた栄光もここに存する。

[328] 以上がサイバネティックスについて私の著書でまとめ上げたいアイディアだったが、具体的に書こうとしたのは、シャノンと私に依って展開されつつあった新しい情報理論と、コルモゴロフの戦前の仕事と私の対空射撃予測機の研究に根源を持つ新しい予測理論であった

●こう言った事が、サイバネティックスについての私の著書でまとめ上げたいと思ったアイディアだった。私の第一の目標はもっと具体的で限定されたものだった。私が書こうとした事は、シャノンと私に依って展開されつつあった新しい情報理論と、コルモゴロフの戦前の仕事と私の対空射撃予測機の研究に根源を持つ新しい予測理論とであった。私はこれらの考えの間の関係に、私の例の「黄禍」を読むことが出来た人たちよりもっと広汎な人々の注意を惹きつけ、またこれらの人々に通信工学に対する先ず何よりも統計的な近づき方である新しい見方を示したいと思った。私はまた、このかなり広汎な人々の眼を、私とローゼンブルースの共同研究を呼び起こした人体の神経系と計算機・制御機械との一連のアナロジーに向けさせたいとも思った。

[329] 最初に明らかになったことは、通信と制御についてのこれらの新しい概念は、人間と、宇宙に対する人間の知識と、社会についての新しい解釈を必然的に伴っているということだった

●しかし、このような多様な課題に取り組むことは、私の頭の中の資産を総ざらいせずには不可能だった。殆んど、事の最初に明らかになったことは、通信と制御についてのこれらの新しい概念は、人間と、宇宙に対する人間の知識と、社会とについての、新しい解釈を必然的に伴っているということだった。

[330] 近頃動物の様々な通信様式が分り始めたのだが、人間の言語は動物のものより遥かに発達していて遥かに融通の利くものであり、そこには全く異った種類の問題が提出されている

●通信は決して人類に限られたものではない。何故なら、それは程度の差はあるが、少なくとも、哺乳動物や、鳥や蟻や蜜蜂にも見られるからである。しかし、鳥の鳴き声や求婚ダンスに含まれる通信や、同じ巣の仲間に蜜のありかの方向や距離を教える蜜蜂の無言劇や、その他近頃漸く分り始めて来た動物のいろいろな通信様式など、様々な通信があるとは言え、人間の言語は動物のものより遥かに発達しており、遥かに融通の利くものであり、そこには全く異った種類の問題が提出されている。

[331] 喋ったり聞いたり読んだり書いたり等々の言語の各種の面に割当てられる脳の領域が非常に広い事は、高度に発達した通信手段が人間にとって圧倒的に重要である事を立証している

●明らかに言語は国に依り時代に依り実に多種多様であり、又どの一種類の言語を取っても実に広範囲の

ものを表現するものであるが、これらの事を別にしても、喋ったり聞いたり読んだり書いたり等々の言語の各種の面に割当てられていると思われる脳の領域が非常に広い事は、高度に発達した通信手段が人間にとって圧倒的に重要なものである事を立証している。

[332] 通信するという事は、一方では観察し実験し学習する事を意味し、他方ではわれわれの目的に適った有効な動作をすると言う仕方であらわれわれが外界に働きかける事を意味する

●外界と通信するという事は外界から通信文を受け取り、外界に通信文を送る事を意味する。通信するという事は、一方では、観察し、実験し、学習する事を意味し、他方では、われわれの目的に適った有効な動作をすると言う仕方であらわれわれが外界に働き掛ける事を意味する。事実、実験と言う事は外界と相互に会話をする一つの形式であり、この会話では、外界からわれわれの方へ入って来る観測の条件を決定する為に、われわれから外界の方へ出て行く命令を用い、又、われわれから出て行く命令の有効さを増す為に、外からわれわれの方へ入って来る観測を使うのである。

[333] 社会をして社会たらしめている本質は、より大きな有機体の中で個人が行う親密な相互作用であり、社会は個人の記憶よりもずっと永続的で多様なそれ自身の記憶を持っている

●通信は社会のセメントである。社会とは、単に個人的な闘争や生殖の為に相い会する個人の集りに過ぎないものではない。社会をして社会たらしめている本質は、より大きな有機体の中でこれらの個人が行う親密な相互作用である。社会はそれ自身の記憶を持っている。この記憶はその社会に属するどの個人の記憶よりもずっと永続的であり、ずっと多様である。

[334] 適切な筆記文字を持っている社会では、記憶即ち共有の伝統の大部分は文書となっているが、種族の歌や歴史を儀式に盛り込んで憶えて置くやり方で全ての伝統を保存している社会もある

●偶々十分適切な筆記文字を持っている恵まれた社会では、この記憶即ち共有の伝統の大部分は文書となっているが、文書を用いず、種族の歌や歴史を儀式に盛り込んで憶えておくと言うやり方で全ての伝統を保存している社会もある。

[335] 社会学・人類学・経済学は数量的な取り扱い方で精密さが足りない為にサイバネティックスと言う大きな学問の数学的道具を十分利用出来ないが、サイバネティックスの思考様式を共にしている

●社会学と人類学は主としてコミュニケーションの科学であり、従ってサイバネティックスという一般部門に属する。社会学の内、経済学と呼ばれる一分科は、他の諸分科と比べて価値の数量的な取り扱いが余程やり易い点で特色があるが、この分科は社会学自体のサイバネティックス的性格の為に、やはりサイバネティックスに属する。これらの全ての分野は、その多くが未だ数量的な取り扱い方の点で精密さが足

りない為にサイバネティックスと言う大きな学問の数学的道具を十分利用出来ないとは言え、サイバネティックスの一般的思考様式を共にしている。

[336] サイバネティックスは、既成の諸科学に於いて果す機能の他に科学そのものに対する考え方、特に科学方法論及び認識論の分野に必ず影響を与える筈である

●サイバネティックスは、これら既成の諸科学に於いて果す機能の他に、科学そのものに対する考え方、特に、科学方法論および認識論の分野に必ず影響を与える筈である。先ず第一に、サイバネティックスと私の初期の研究にはっきり現れている統計的観点は、秩序又は規則性と言うものに対する新しい見方を採らざるを得なくさせる。何か或るものについて完全な情報を持っているとすれば、その情報の大きさを測ると言う事は全く問題にならない。だから、大きさが測れる情報は、その事自体に依って、完全な情報では有り得ないのである。仮にわれわれが因果関係の大きさと言うものを測る事が出来るとするなら（実は情報理論についての私の仕事の多くはこれが全く可能な目標である事を示しているが）それが出来るのは、宇宙が完全にびちっとした構造でなく、様々な領域で小さな変動があり得る様な構造であるからこそその事である。その場合は、世界の或る一面に於ける変化がどの程度多く他の面の変化を引き起こすかと言う事を観測できる。

[337] サイバネティックスから見れば世界は有機体であり過程の世界だが、過程が到達するのは死の平衡でもなく、ライプニッツのいう予め定められた調和により前以って決定される世界でもない

●こうして、サイバネティックスの立場から見れば、世界は一種の有機体（オルガニズム）であり、その或る面を変化させる為にはあらゆる面の同一性をすっかり破ってしまわなければならないと言う程ぴったり結合されたものでもなければ、任意の一つの事が他のどんな事とも同じ位安々と起ると言う程緩く結ばれたものでもない。それは、ニュートンの物理学像の剛性を欠くと共に、真に新しいものは何も起り得ない熱の死滅即ちエントロピー極大状態の全く筋目のない流動性をも欠く世界である。それは過程の世界である。しかも、過程が到達する終局の死の平衡のそれでもなく、ライプニッツのその様な予め定められた調和に依ってあらゆる事が前以って決定された過程の世界でもない。

[338] 知識は生命の一つの面であり、生命とは永遠の形相の下に於ける存在の過程ではなく、むしろ個体とその環境との相互作用である

●その様な世界では、知識はその本質に於いて知る過程である。宇宙が時の進むにつれて近付いて行く終局の状態に関する最終的知識を求める事は無益である。何故なら、この終局の状態は（もしそれが存在するとすれば）恐らくは時間も持たず、知識も持たず、意味も持たない状態だからである。知識は生命の一つの面である。そして生命はいやしくも説明さるべきものであるならば、われわれが生きている間に説明されねばならない。生命とは、永遠の形相の下に於ける存在の過程ではなく、むしろ個体とその環境との相互作用である。

[339] 実存主義のペシミズムの諸前提と懸け離れてはいない私の前提が、宇宙とそこでの

われわれの人生に対する肯定的な態度とは矛盾しないように、サイバネティックスは積極的な或るものを加える事が出来たと思う

●以上の様な風にして、私はキールケゴールとその感化を受けた著作者達のペシミズムに積極的な或るものを加える事が出来たと思う。それらの著作者達の中で、最も重要なのは実存主義者である。私は、生存の陰鬱を、決してポリアンナの的（盲目的）な楽天主義の哲学に依って置き換えたりはしなかった。だが少なくとも私は、実存主義の諸前提と懸け離れてはいない私の前提が、宇宙と其中でのわれわれの人生とに対する肯定的な態度と矛盾しないことを確信して来た。

以 上
