

医学系教養課程の物理教育と 医学・生物学における寸法解析

川崎医科大学 物理学教室

近藤 芳朗

(昭和58年9月17日受理)

Physical education in general course of
medical science and Scaling analysis in medicine and biology

Yoshiro KONDO

Department of Physics, Kawasaki Medical School

Kurashiki 701-01, Japan

(Received on Sept. , 1984)

Abstract

In physical education in general course for the students majoring in life science, it is important to introduce phenomena on medicine and biology as examples by which fundamental principles of physics are understood. In fact, according to the author's experience in lecturing on physics in Kawasaki Medical School, the students were much interested in these phenomena. Introduction of scaling analysis in medicine and biology changed the aspects of physics and biology of the students. The scaling analysis is to analyze physically how the size of animals influence its shape, function and structure. It leads to not only understanding of physical principle but also that of physiological mechanism of animals. In the present study, two typical examples of scaling analysis are introduced. The subjects are "Estimation of the weight of an animal from the shape of its bone" and "Heart rate is inversely proportional to its body size".

概 要

医学、生物学などの生命科学の諸分野を専攻する学生に対する教養課程での物理教育において、物理の基本原理解をさせるための例題として原子や宇宙などの日常生活からかけ離れた世界の現象よりも日常身の現象、医学、生物学における現象を取り扱うことが重要でかつ効果的であると考えられる。実際、川崎医科大学での講義における著者の経験では学生は大変興味を示し有効であった。特に、医学、生物学における現象の寸法解析を導入したことは学生の物理学観、生物学観を変えたようである。寸法解析というのは、生物の大きさが変化するとき、生物の形、機能、構造などにどのような影響が現われるかを物理的に解析することであって、これはまた物理の原理の理解だけでなく、生物の生理学的メカニズムの理解へもつながり、医学生にとって大変重要な例題であることがわかった。この論文では二つの典型的な寸法解析の例題を紹介する。すなわち、題して“骨の形から動物の体重を推定する”および“脈拍は体長に反比例する”である。

1. はじめに

物理学は原子や宇宙などのとかく日常生活からかけ離れた世界のものと思われ、また一方では大変難解なものと思われている。しかしながら、物理学は日常身の現象に対しても、また医学、生物学における現象に対しても有効であって決してとっつきにくいものではないのである。そこで、身近な現象、生き物や人体の物理的側面に焦点をあてこれらを題材とした新しい物理教育の可能性がでてくる。[1-3]

日本の医学生、医学研究者が欧米に比べて数学的、物理学的知識が少ないという現状、また医学の診断、治療、研究においてもME学的色彩がますます強くなってきているという現状なども考え合わせるとライフサイエンスを専攻する学生、研究者のための物理教育の重要性は日に日に増してきていると云わねばならない。

ライフサイエンスの物理学といっても特別な物理法則があるわけではない。存在するのは、原子や分子のミクロの世界にも、宇宙のような超マクロの世界にも、また生き物の世界にも等しく適用できる基本的かつ普遍的な物理法則があるだけである。したがって、ライフサイエンスのための物理教育とは、法則それ自身よりもそれを適用する対象に特色を発輝するものでなければならない、必然的にそれは日常身の現象、医学・生物学における現象を祖上にのせこれを物理法則の理解の一助とし、またこれによって物理学をなじみ易いものにし、そして生体に対する物理的なものの見方を会得させることに重点をおいた教育を意味する。と同時に、学生に、多くの医学・生物学の現象および生理学的メカニズムが実は物理学の問題であることを認識させ、これを通して医学・生物学の理解を深めさせることも物理教育の目的の一つである。

以上のような観点からの物理教育を、著者は川崎医科大学第1学年の物理学講義において毎年少しずつ取り入れてきたので紹介する。特に講義の目玉商品である“寸法解析”については問題の定式化、考え方、概念、結果などについて詳述する。なお、日常身の現象、医学・生物学における現象などで現在までに講義に取り入れてきたもの及び今後取り入れる予定の題材は以下のとおりである。[1-23]

- 1* 寸法解析入門 “骨の形から動物の体重を推定する”
- 2* 生物の増殖とロジスティック曲線
- 3* 昆虫のら線運動
- 4* まさつ力と日常身の現象、オイラーのベルト理論
- 5* つりひも、つり橋の釣合い
- 6* ボタン雪の運動
7. 跳躍の寸法解析 “高跳び、幅跳び、ランニングの生体力学”
- 8* テコの原理 “身体でのテコ、人の重心、動物のアゴ”
9. 股関節、腰椎に加わる力
10. 腰椎と椎間板の病気、骨折の力学
11. 食物とエネルギー代謝

12. 心臓, 肺臓, じん臓のする仕事
- 13.* 遠心機と沈降平衡
- 14.* 加速度の生理的影響, 回転運動の知覚
15. 動物の機能と寸法解析
- 16.* 哺乳動物の血液循環系
- 17.* 寸法解析 “脈拍は体長に反比例する”
18. 表面張力と呼吸困難症候群
19. 音波と耳の生理, 聴覚
20. 光と眼の作用, 視覚, 色覚, 昆虫の複眼
21. ウイルス攻撃に対する細菌の免疫の原因としての突然変異
22. 酵素の物理学, ヘモグロビンの酸素吸着曲線
- 23.* 生体と浸透圧および拡散現象
- 24.* 細胞膜と Nernst 電位および Donnan 平衡
25. 医学・生物学における最適原理

*印 昭和58年度までに、一部または全部を教材として取り入れたもの。

2. 教養課程での物理教育

2-1 医学系教養課程における物理教育の意義

川崎医科大学での講義で著者が折にふれ学生達に強調している物理学講義の目的, 意義および役割は次のようなものである。

- ① “物理学を教育するのは実用に供しようというのが主な目的ではない。人間文化の生んだところの遺産をうけつぎ, これを発展させるのが大きな使命である”(1960年物理教育国際会議, 英国代表の議演から[24])
- ② 物理学は自然科学の基礎であって, 科学的なものの考え方を養うのに適している。
- ③ 物理学は日常身の現象, 医学・生物学における現象などを理解するのにも役立つ。
- ④ 物理学の知識は実用にもなる。
- ⑤ 良医は何でもこなせるだけの度量が広くなくてはいけない。だから, 物理学もこなせなくてはならない。

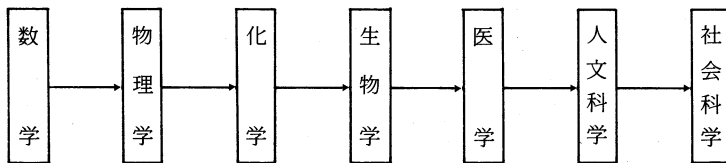
2-2 医学系教養課程での物理教育

医学系教養課程での物理教育は物理学を専攻している学生に対する物理教育とは当然異ならなければならない。学生が物理学に対して誤解をしていたり, 興味をもっていなかったり, また数学, 物理学のレベルが低かったりしているので教師は物理以前の教育から始めなければならない。それで, 法則, 公式, 定理の説明は, 学生がなるほどと思い納得のいく解説をするこ

とが重要になってくる。同じ説明でも、学生のレベルによってはなるほどと思ったり、思わなかったりするので、学生のレベルを計って彼らに適した説明を選ばなければならない。丸暗記をすればすむような知識だけを教え込む類のありきたりの無味乾燥な講義は学生も教師もあとの味の悪いものでこれはさげなければならない。また、講義内容は、学生にとってはすべてが初めてのことなので学生の感動と興奮を引き出す講義が望ましい。

どんな教育でも同じであろうが教師が教える学問をどのように観ているかによって学生の受ける印象は異なるものである。著者の物理観というものについて以下に述べてみる。

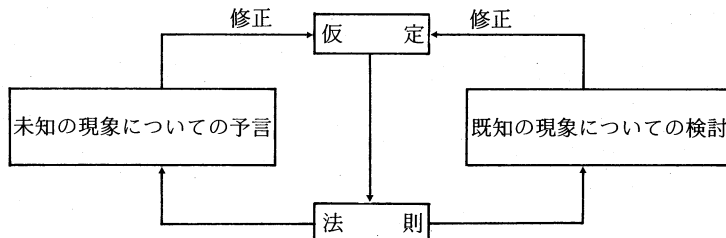
- ① 学問にはそれぞれ特有の論理構造がある。物理学には物理学特有の論理があって、これを認識することが物理学を理解する鍵となる。(第1図参照)



第1図 学問の論理構造

矢印の向きにしたがって単純な論理からより複雑な論理を必要とする学問になっている。数学における論理は最も単純であるが、単純であるが故にあまりまは許されない。これが数学を難しくしている原因でもある。

- ② 物理学は逐次近似的性格をもつ。物理学の法則が逐次精密化されていく様子が第2図に示されている。実際は第2図の流れ図が並列にいくつも並んでいて、矢印が互いに入り組んで網の目のようになっている。これらが全体として矛盾がなくなったとき、全ての仮定、全ての法則の正しさが一挙に証明されるのである。最初の段階の法則を第0近似の法則といい、この法則を修正して得た次の少し精密な法則を第1次近似の法則という。



第2図 物理法則が逐次精密化される様子

まず、直観的な仮定から出発して、実験あるいは演繹によって一つの法則を作る。次にこの法則が正しいか否かを調べるために、既知の現象、未知の現象に対して検討する。矛盾が生ずれば仮定を修正して再出発する。この結果、法則は修正され、それを使ってもう一度、既知の現象、未知現象に対して検討をする。こういうことを繰り返して法則は逐次近似的に精密になっていく。

③ 問題を発展的にとらえる

解けない問題、条件の足りない問題、不備な問題が提出されると学生はしばしば思考を停止する。しかし、このような態度では何も得られない。学生は自ら問題を修正し、発展させて積極的に取り組んでほしいのである。フェラーも同じようなことをいっている。[25] “…いちばん容易な解決方法は形式論者のそれであって、完全なやり方で問題が定式化されていなければそれを考えることを拒否する。しかし、問題は無視することによっては解かれない。…”

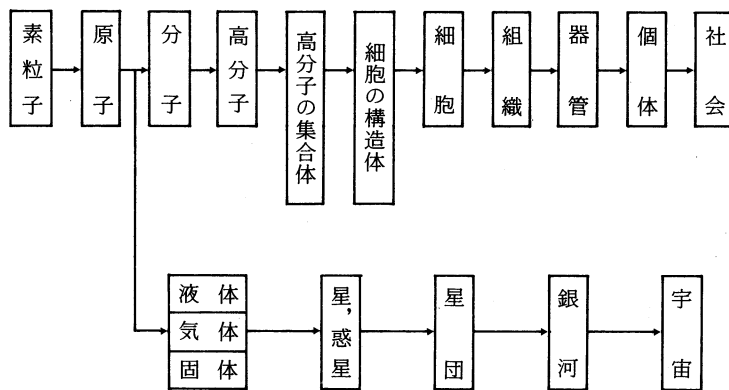
④ 微積分学の重視

⑤ テーラー展開を援用することによる、現象の線形的な見方の重視

⑥ 現象の確率論的な見方の重視

⑦ 分子論的な見方の重視

猫もじゃくしも分子できてきているという認識は重要である。(第3図参照)



第3図 物質の諸階層

3. 寸法解析とは何か

人を含めてたいの動物は赤ちゃんからおとなに生長するにつれて体型が変化する。ヒヨコの体つきはおとなのメンドリの体つきとは全く異なっている。同じことが小型の鳥と大型の鳥との間にもいえる。このように生物の大きさの変化は必然的に形や比率の変化を引き起す。その理由は、結局のところ一つの器管の異なる方向の成長速度が異なっているということである。何故そうなっているのだろうか。それは、進化の結果であるが、物理学的、生理学的に生物が安定であるために必然的に起る結果であるといい直してもよい。でなければ、そのような生物はどこか不都合があって競争に負けてしまうだろうから。ここに、現在の生物の大きさと形とを安定性の見地から物理学的、生理学的に議論できる余地があるのである。

生物の大きさが変化したとき、その形、構造、機能にどのような影響が現われるかを物理的に解析することを生物における寸法解析と呼ぶことにする。寸法解析はどんな現象に対しても

適用できるものであってその一般的な定義は次のようになる。

“寸法解析とは問題にしている物理現象に関与している系の幾何学的寸法を変えたとき、系を特徴づける種々の物理量がどのように変化するかを解析することである。”

医学・生物学における寸法解析の意義は次の二点にある。

- ① 動物実験の結果から人体に対する結果を予測することができる。
- ② 人、生物の生理学的諸メカニズムの解明に役立つ。

ところで、生物の大きさの変化と共に生理学的諸変数が一定の関係を保って変化するとき、これらの変化を表わす関係式を寸法則と名づける。最も単純な寸法則は生理学的変数を体重の何乗かで表わすものであって、任意の生理学的変数を Y 、体重を M とするとそれは

$$Y = KM^b \quad (1)$$

と表わしうる。実際、この式で表現される寸法則は多い。哺乳類についてのそれらの一部を第1表に示す。

第1表 哺乳類に対する生理学的変数 Y と体重 M との関係

$Y = KM^b$	K	b
個体あたりの O_2 消費量 (liter h^{-1})	0.696	0.75
体重あたりの O_2 消費量 (liter $h^{-1} kg^{-1}$)	0.696	-0.25
肺換気速度 (liter h^{-1})	20.0	0.75
肺容積 (liter)	0.063	1.02
肺換気量 (liter)	0.0062	1.01
血液量 (liter)	0.055	0.99
心重量 (kg)	0.0058	0.99
呼吸数 (min^{-1})	53.5	-0.26
心拍数 (min^{-1})	241	-0.25

(Schmidt-Nielsen[15])

指数 b が似ていたり、単純な関係にある生理学的変数は物理的、生理学的に一定の関係があるものと推測される。これらの変数のからくりの一端を解き明かすのが寸法解析なのである。

4. 医学・生物学における寸法解析

4-1 骨の形から動物の体重を推定する

第4図は大きさの異なる動物の骨格をほぼ同じ大きさに描いたものである。どちらの動物が何倍大きいだらうか。また、第2表は4足動物の寸法表である。絶滅したヨーロッパゾウの体重がわかっていないがいくらだらうか。これらは本質的に同じ問題なのである。

比較の対象となる4足動物の体形は大雑把には相似であるとしても、幾何学的相似は力学的、



ネオヒッパリオン (右)
マストドン (左)

第4図 どちらが大きいか

第2表 数種の有蹄類と長鼻類の大きさ

4 足 動 物	肩までの高さ L (cm)	体 重 W (kg)	上 腕 骨	
			厚さ d (cm)	長さ l (cm)
ヒツジ (<i>Ovis aries</i>)	80	100	2.5	25
ウシ (<i>Bos taurus</i>)	160	820	7.0	50
アフリカゾウ (<i>Loxodonta africa</i>)	320	6360	19.5	100
絶滅したヨーロッパゾウ (<i>Elephas meridionalis</i>)	384	—	25.0	118

(Carl Schlee Hammen[11])

生理学的相似を意味しないから、骨の形なかでも上腕骨の形は幾何学的相似ではないと予想される。上腕骨の形は体重を与えなければならないという力学的関係から定まる。すなわち、4足の各々の骨に作用する単位面積あたりの力 τ は、骨の材質によって定まるある最適値 τ_0 に等しい。4足のそれぞれの骨には体重の約 $\frac{1}{4}$ がかかっているとし、骨の最もくびれた部分は簡単のため直径 d の円であるとする。また、4足動物の一次元寸法を L とし、体重は $k_w L^3$ に等しいとすると

$$\eta \tau_0 = \frac{\frac{1}{4} k_w L^3}{\frac{1}{4} \pi d^2} \tag{2}$$

が成り立つ。ここで η は肥満度であって、 τ が τ_0 に等しくないかも知れないということを考慮して導入したものであるが、普通は $\eta = 1$ である。以上より

$$d = k \cdot L^{2/3} \tag{3}$$

を得る。ただし、 $k = k_w / \pi \eta \tau_0$ である。 k は4足動物間ではほぼ一定であることがわかるので式(3)から d は $L^{2/3}$ に比例することがわかる。次に一次元寸法 L として肩までの高さを取り、上腕骨の長さを l 、体重を W とすると

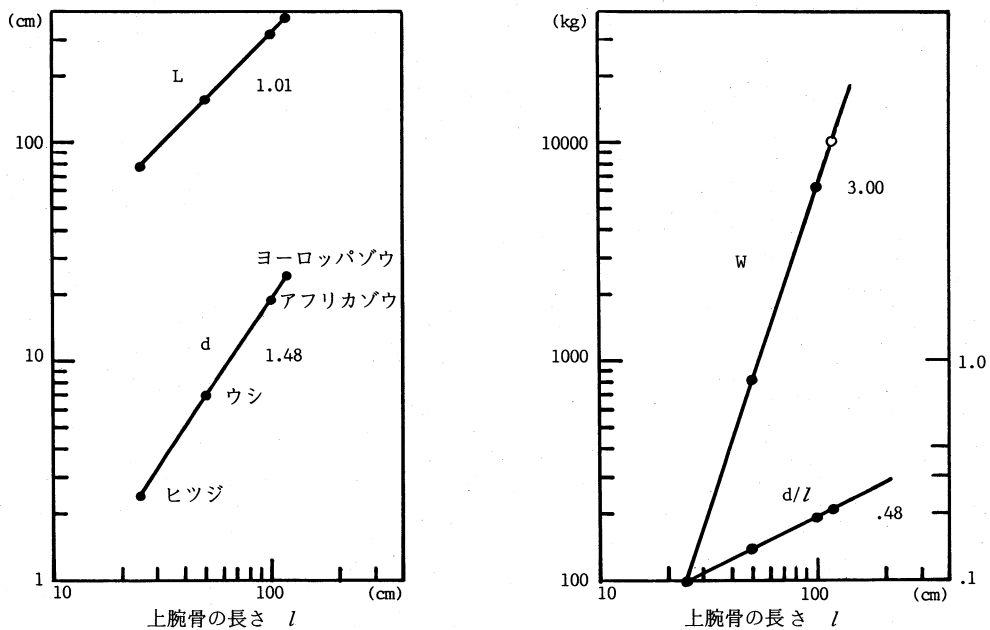
$$W = k'_w l^3 \tag{4}$$

$$L = k'_L l \tag{5}$$

$$d = k' l^{2/3} \quad (6)$$

$$d/l = k'' l^{1/2} \quad (7)$$

などが成立する。特に最後の関係式から、大型の動物ほど d/l は大きいことがわかる。 d/l は骨の形に対応するもので、骨の形がずんぐりしていると d/l は大きいし、逆に骨の形がきゃしゃであると d/l は小さい。このことから、第4図のマストドンがネオピッパリオンより大きいということがわかる。第2表を両対数グラフ用紙に記入すると第5図のようになり、式(4)~(7)が再現される。また、このグラフから絶滅したヨーロッパゾウの体重は約10トンと推定される。



第5図 4足動物の寸法則

4-2 脈拍は体長に反比例する

哺乳動物の心拍数すなわち脈拍は大型の動物ほど少なく、ほぼ体長に反比例することがわかっている。心拍数に関する物理的メカニズムの本質は次のとおりである。すなわち、1心拍で心臓の送ることのできる血液の量と単位時間に大動脈から送り出すことのできる血液の量とのバランスで心拍数は定まる。

以下の議論に必要な量の定義をする。

R_1, R_2 : 心筋の任意の部分の互いに直交する曲率半径

e : 心筋の肉厚

T : 心筋の張力

P : 収縮期の左心室の血圧

- u : 収縮期の大動脈の血流速度
- ρ : 血液の密度
- V_0 : 1心拍で心臓の収縮する体積
- r : 大動脈の内半径
- Q : 血流量
- α : 収縮期の時間な割合
- β : 心臓のする仕事が血流の運動エネルギーに転換する割合
- f : 単位時間あたりの心拍数

- ① 心臓が単位時間に送り出す血流量と単位時間に大動脈から出てゆく血流量は等しい。
このことから

$$f = \frac{\alpha \pi r^2 v}{V_0} \quad (8)$$

- ② 心臓のする仕事が血流の運動エネルギーに転換する。このことから

$$V = \sqrt{\frac{2 \beta P}{\rho}} \quad (9)$$

- ③ ラプラスの式

$$P = e\tau \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (10)$$

以上より心拍数 f は

$$f = \frac{\alpha \pi r^2}{V_0} \sqrt{\frac{2 \beta e \tau}{\rho} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (11)$$

で与えられる。長さの次元をもつ量 r, e, R_1, R_2 は一次元寸法に比例し、体積を表わす量 V_0 は L^3 に比例するものとする。また、 $\alpha, \beta, \rho, \tau$ は種によらないとすると

$$P \propto L^0 \quad (12)$$

$$f \propto L^{-1} \quad (13)$$

を得る。すなわち、脈拍は体長 (L) に反比例する。血圧が種によらないこともほぼ事実であるし、心臓が体重に比例することも事実なので心臓に関係する長さの次元をもつ量を一次元寸法 L に比例すると仮定するのはもっともなことである。

5. 結 び

以上は医学部における著者の永年の教育研究の一端であって、今後も研究を重ね、動物の物理的カラクリを明らかにし医学生に興味を引く例題を開発したいと思っている。最後に、昭和59年度川崎医科大学1年生(120人)に対する寸法解析入門“骨の形から動物の体重を推定する

”の感想を掲げてしめくりとしたい。

第3表 昭和59年度、寸法解折入門の講義に対する感想

感 想 (1年生120人)	人数
講義の速度が速い	5
後半が速い, 難しい	7
講義の速度はゆっくり	2
少し難しい, 難しい, わからない, めんどくさそう	14
文字, 記号が多い	3
やさしい, わかりやすい,それほど難しくない	18
おもしろい, 楽しい, 興味深い	18
数学的である, 物理か数学かわからない	4

参 考 文 献

- [1] G.B.Benedek and F.M.H.Villars/松原武生, 井上章訳:『医系の物理』, 第1巻 力学(上, 下), 第2巻 統計物理学(上, 下), 第3巻 電磁気学(上, 下), 吉岡書店 (1979-1982)
- [2] J.W.KANE and M.M.STERNHEIM/石井千穎監訳:『ライフサイエンス物理学』, 広川書店 (1980)
- [3] I.W.Richardson and E.B.Neergaard/中馬一郎, 岩間吉也訳:『医学と生物学のための物理学』, 講談社 (1974)
- [4] ガリレオ・ガリレイ著/今野武雄, 日田節次訳:『新科学対話』上, 下, 岩波書店 (1937, 原著は1638)
- [5] D.W.Thompson/柳田友道他訳:『生物のかたち』, 東京大学出版会 (1973, 原著は1917)
- [6] R.McNeil Alexander: Animal Mechanics, Sidgwick and Jackson, London (1968, 1971)
- [7] J.M.Smith/押田勇雄他訳:『数理生物学序説』, みすず書房 (1970)
- [8] R.McNeil Alexander: Size and Shape, Edward Arnold, London (1971, 1973, 1975)
- [9] 山口昌哉編:『非線型現象の数学』, 朝倉書店 (1972)
- [10] エム・ベ・ボルケンシュテイン著/田中豊一訳:『酵素の物理学』, みすず書房 (1972)
- [11] Carl Schlee Hammen: Elementary Quantitative Biology, John Wiley & Sons, New York (1972)
- [12] Knut Schmidt-Nielsen: How Animals Work, Cambridge University press (1972)
- [13] John Lenihan: Human Engineering, The body re-examined;Waidenfeld and Nicolson,London (1974)
- [14] Leonard Peusner: Concept in Bioenergetics,Prentice-Hall, Inc.,New Jersey, U.S.A. (1974)
- [15] Knut Schmidt-Nielsen: Animal Physiology, Cambridge Univ. Press, London (1975, Second ed.1979)
- [16] 寺本英, 山口昌哉編:『数理を通してみた生命』(岩波講座, 現代生物科学17), 岩波書店 (1975)
- [17] R.McNeil Alexander: Biomechanics, Chapman and Hall,Ltd.,London (1975)
- [18] シュミット・ニールセン著/柳田為正訳:『動物の生理学』, 岩波書店 (1979)
- [19] 稲垣新:『数量生物学のすすめ』, 講談社 (1980)
- [20] 増山元三郎:医学の数理 薬の効果の種差と個体差 (準不変量を追って), 数理科学, No.142 (1975), 72-76

- [21] 増山元三郎：生化学的にみた個体差，自然，1978年4月号，26-44
- [22] Thomas and McMahon：Size and Shape in Biology, Science **179**(1973), 1201-1204
- [23] RICKYE HEFFNER and HENRY HEFFNER：Hearing in the Elephant, Science **208**(1980), 518-520.

- [24] 原島鮮著：『物理教育の覚え書き』，裳華房（1980）
- [25] W.フェラー著／国沢清典監訳：『確率論とその応用』Ⅱ上，紀伊國屋書店（1969），p18