

理学博士久保亮五君の「非可逆過程の統計力学における線型応答

理論」に対する授賞審査要旨

(一) 久保亮五君は昭和十六年東京大学理学部物理学科を卒業し、その後大学院、助手、助教を経て、教授としての今日まで終始東大物理学教室にあって、物理学の中心課題である物性理論研究に取組み、この分野の研究者の中核として活躍している。

その初期の業績は「ゴム弾性の統計力学」であり、これは日本の物性論研究の黎明期における注目すべき業績として高く評価されたものである。久保君の統計力学への関心はこれを出発点として高まり、次いで固体物理学の種々の分野で多くの論文を発表したが、わけても磁性理論、とくに磁気共鳴吸収のスペクトルの形態に関する論文は高い評価を受けた。そして、これが「非可逆過程の線型応答理論」へと一般化されるに至った。

(二) この久保君の理論は所謂久保理論と称せられている。その内容に関する詳しい専門的記述は別添資料(1)で紹介したが、ここにはその内容を記述することにする。

統計力学とは多数の粒子の集団としての性質を、それを構成している個々の粒子の力学的性質を統計的に平均して導く理論であり、熱的な概念、例えば温度の意義を微視的立場から基礎づけるものであって旧く Maxwell や Boltzmann 以来今日まで発展しつつある理論物理学の一つの中心理論であり、物性論の基礎である。

個々の粒子の運動からその集団の性質を理論的に理解することは集団が熱的平衡状態にある場合についてはすでに

その一般的方法が確立している。

然しながら集団に外力が加わって熱平衡からずれた場合の性質を取り扱う方法は現象が多様であるため確固たる一般的な理論が形成されていない。

ところで外力が小さい場合には、それに対する集団の応答は外力に比例するであろう。例えば金属電子の集団に外力として電場が加わったときの応答は電流であって、オームの比例則が見出される。外力として温度の勾配があれば熱の伝導が応答としてみられ、熱伝導率が測定される。

これらの外力が時間とともに変化する場合の応答は変化の速さ如何によって例えば応答のおくれなど興味深い現象が種々現われる。

いままでの統計力学は上に述べた個々の現象を説明するために種々の方法を発展させて来たが、集団の力学的性質と外力の種類を与えてその応答を極めて一般的に確かな理論的基礎をもって導く方法を与えたのが今日この方面で Kubo Theory の名でよばれている久保君の線型応答理論である。表題の非可逆過程とは熱平衡でない状態でおこる過程であり、線型とは外力に比例する応答の意味である。

(三) 次に久保理論がどのような現象の解明の理論的基礎を与えるか例をあげてその重要性をみたいと思う。

まず電気伝導率がある。例えば金属の電気伝導率を説明する理論としては旧く Boltzmann 方程式にもとづく Sommerfeld の理論があり多くの現象を説明して来た。しかし最近実験技術が進歩して強い磁場をかけた極度の低温下で電気伝導率を測定した結果は金属半導体などでいままでの理論では説明出来ない現象や又理論の適用限界をこ

えた現象がみつかつている。この説明にはいづれも久保君の理論を使った研究が成功しており理論の一般性の効用を実証している。

久保君もその理論にもとづいて協同研究者とともに強磁場下の電気伝導とくにその量子効果に関する理論を發展、發表し現在この方面の進展に大きな寄与をしている。

次にスペクトル線の形状に関する応用を述べる。光の吸収とか磁気共鳴スペクトルとかは外力がその振動数で変化する場合の応答であるから久保理論の活用舞台である。とくにスペクトル線の形状が温度や振動数によってどのように変化するかは、その物質が内にもっているいろいろな緩和過程によって複雑に変化する。これらの実験を解析して逆に物質内で何がおこっているかを解きほぐす理論的な武器を久保理論は提供している。

例えば戦後急速に發展した磁気共鳴現象の研究、とくにそのスペクトル線の形状については、久保君及びその協力者によって發表された理論の論文が、その解析の基礎として多くの研究者の論文に使用されて国際的にも定説となっている。

今後發表を予想される超伝導体の研究、中性子線による磁性体の散乱現象の研究などいづれもこの理論の活用舞台となることが確実でありすでにそのような研究もいくつか出現しつつある。

(四) 以上述べたように久保君の理論は久保君自身又その協力者更に最近では多くの同分野の研究者によって多方面に適用發展されつつあり最近一五年の日本の統計力学の水準を高め世界的にも一つのピークを形成した。昨年日本で開催された統計力学国際会議もかかる發展を背景にして可能となったものと考えられる。

久保君は別添資料2及び別添資料3に示すようにその論文数は七〇を越え、その著書も一〇を越えている。したがって国の内外の学界に与えた功績は誠に顕著である。

別添一

久保亮五君の「非可逆過程の統計力学における線型応答理論の確立」について

今日統計物理学は量子力学とともに、物理的現象を微視的立場から把握しようとする近代物理学の根幹をなしている。統計物理学のうち、熱平衡状態を取扱う狭義の統計力学については、その理論的体系は今日ほぼ完成され、理論物理学者の一つの大きな関心は、ここ数十年非平衡状態を取扱う統計力学の理論的体系を確立することに向けられて来た。その中で、平衡から僅かずれた系で起る不可逆現象について、これを記述する一般的理論をはじめて提出したのが久保君であり、この分野での今日の理論の発展は、一九五四年および一九五七年に久保君によって発表された線型応答理論に負う処が極めて大きい。

線型応答理論が発表される以前、電気伝導、熱伝導、拡散等の非可逆現象を微視的立場から理解するために用いられて来た方法は、Boltzmannの輸送方程式である。この伝統的方法是、その対象とする状態は原理的には熱平衡状態に近くなくてもよいが、他方非常に弱いか或いは局所的な相互作用をもつ体系で、外的な力の時間的変化が極めて緩慢である場合にしか適用できないという欠点をもっている。これに対して久保君は、対象を熱平衡からのずれが小さい線型の不可逆現象に限る代りに、体系の関する相互作用は如何なるものでもよく、また外から加える力の時間的変化がどんなに早い場合にも適用し得る一般的理論を築き上げることを試みた。

不可逆現象を惹き起す外的な力は、力学的なもの、熱的なものの二種類に分けられるが、久保君の線型応答理論では、まず第一に電場のような力学的な力が加わった場合の応答を微視的立場から導出する。この場合には外場の効果は、体系の運動を記述する Hamiltonian に、一般には時間的に変化する外力 $F(t)$ とそれに共役な体系の力学量 A との積で表わされる相互作用の項を付け加えることによって考慮される。この外力に対する体系の任意の量 B の応答を求めるために、密度行列の運動方程式を、無限の過去で熱平衡という初期条件のもとに、外力との相互作用については最低次の摂動の範囲で解く。久保君はこの結果、その応答関係が A と $B(t)$ の Poisson 括弧を熱平衡状態で平均したもので与えられることを導き、更にこの応答関係を $\pm V_0$ の範囲で Fourier 変換した admittance が、非可逆現象を記述する種々の輸送係数と直接関係することを示した。事実久保君は、この理論を非可逆過程の代表的な例である電気伝導および磁気共鳴の問題に応用し、電気伝導の場合には伝導率が時刻 t での電流と $t=0$ での電流との相関関数によって、また磁気共鳴の場合には磁化率が時刻 t での磁気エネルギーと $t=0$ での磁気エネルギーとの相関関数によって表わされることを導いた。これらの結果は、電気伝導および磁気共鳴の分野でのその後の諸研究の理論的基礎を与え、固体物理学の今日の発展に大きな貢献をなした。

久保君は更に線型応答理論を外界からの作用が熱的な場合に拡張し、この場合の代表的な例である拡散の過程について一般論による取扱いを確立した。この場合、体系内での密度分布は一樣ではないが、局所的には熱平衡状態にあるとして場所によって異なる値をもつ化学ポテンシャルを導入し、このポテンシャルの空間における変化が小さいとして密度行列を求め、粒子密度の時間変化を計算している。この結果から拡散係数に対する一般的表式を導き、拡散

係数が粒子の速度の相関関数で表わされることを導いた。久保君はこの結果を電気伝導の場合に應用して、拡散係数と伝導率の間の關係を示す所謂 Einstein の關係の最も一般的な表式を導き、Einstein の關係式が従來の運動論的方法によらないで、線型応答理論から厳密に導かれることを示した。

久保君によって得られた重要な成果は、求めるべき輸送係数が常に熱平衡における物理量の時間的な相関で表わされ、非平衡状態の取扱いが実は熱平衡状態での統計力学の問題に帰着されることを指摘したことである。このことは Onsager, Nyquist にはじまる揺動散逸定理の思想を輸送係数を導きだす關係として把握することを意味し、Boltzmann 輸送方程式を用いる伝統的方法を脱却する方向を指摘したものである。今日の不可逆過程の理論的体系を築き上げるのに貢献した処が極めて大きく、その成果は高く評価されるべきものである。

以上述べたように、久保君は力学のおよび熱的擾乱によって起る非可逆現象を線型応答の範囲で記述する最も一般的な理論を独創的な立場から導出し、非可逆過程の統計力学の今日の發展に、この分野における理論の開拓者の一人として偉大なる貢献をしてきた。論文目録に示された七四編の論文と一二冊の著書は久保君のこの分野における非凡なる力量を示すものである。

別添二

主要な著書及び論文目録

著書

一、二、ロム弾性 河出書房 一九四七年

- 二、ゴム弾性 増補改訂版 河出書房 一九五二年
- 三、電子放射と半導体(川村肇、小林秋男、納賀勤一共著) 産業図書 一九五〇年
- 四、統計力学 共立出版 一九五二年
- 五、統計力学 小山書店 初等物理学講座
- 六、磁性 岩波書店 現代物理学講座
- 七、固体物理学(永宮健夫) 第一版 岩波書店 一九六一年
- 八、固体物理学(永宮健夫) 第二版 岩波書店 一九六六年
- 九、熱学統計力学 大学講演 裳華房 一九六一年(橋爪、市村、碓井)
- 一〇、固体物理の歩み(永宮健夫) 岩波書店 一九六二年
- 一一、R. Kubo, H. Ichimura, T. Usui, and N. Hashizume: Statistical Mechanics. North Holland Publisher (1965).
- 一二、——: Thermodynamics. North Holland Publisher (1968).

別添三

論文目録

- 一、緩和現象について 数物会誌 二四三 一九四二年
- 二、統計力学における一つの解析的方法、物性論研究 一一 一九四三年
- 三、結晶の安定性と融解 数物会誌 一七 六三 一九四三年
- 四、鎖状体の統計力学(一) ゴム弾性に関する一つの模型的考察 数物会誌 一七 二七三 一九四三年
- 五、ゴムの分子的理論(一) 科学 一五 四三 一九四五年
- 六、ゴムの分子的理論(Ⅱ) 科学 一六 七 一九四六年
- 七、ゴム類似物質の統計力学 物性論研究 五 三八 一九四七年

- 八' Born-Green の量子液体の理論に対する批判 物性論研究 一八 六四 一八四九年
- 九' 散乱媒質中の粒子の拡散 統計数理研究 三 二二三 一九四九年
- 一〇' R. Kubo: Statistical theory of linear polymers. I. Intramolecular statistics. J. Phys. Soc. Japan, 2, 47 (1947).
- 一一' ———: Statistical theory of linear polymers. II. Elasticity of vulcanized rubber. J. Phys. Soc. Japan, 2, 51 (1947).
- 一二' ———: Statistical theory of linear polymers. III. Double refraction. J. Phys. Soc. Japan, 2, 84 (1947).
- 一三' ———: Statistical theory of linear polymers. IV. J. Phys. Soc. Japan, 3, 119 (1948).
- 一四' ———: Statistical theory of linear polymers. V. Paraffine-like chain. J. Phys. Soc. Japan, 4, 319 (1949).
- 一五' ———: Statistical theory of rubber-like substances. J. Colloid Science, 2, 527 (1947).
- 一六' ———: Large elastic deformation of rubber. J. Phys. Soc. Japan, 3, 312 (1948).
- 一七' R. Kubo: Interaction between electrons and ions in semiconductors. I. J. Phys. Soc. Japan, 3, 254 (1948).
- 一八' ———: Interaction between electrons and ions in semiconductors. II. J. Phys. Soc. Japan, 4, 322 (1949).
- 一九' ———: Interaction between electrons and ions in semiconductors. III. J. Phys. Soc. Japan, 4, 326 (1949).
- 二〇' 量子統計力学における密度行列の展開 物性論研究 三八 二四 一九五二年五月
- 二一' 強磁性体の統計理論 物性論研究 四三 二二 一九五二年一〇月 (共著小幡行雄・大野鏡十)
- 二二' ———: An expansion theorem of the density matrix. J. Chem. Phys., 20, 770 (1952).
- 二三' ———: Thermal ionization of trapped electrons. Phys. Rev., 86, 929 (1952).
- 二四' ———: The spin-wave theory of antiferromagnetism. Phys. Rev., 87, 568 (1952).
- 二五' ———: The spin-wave theory as a variational method and its application to antiferromagnetism. Rev. Mod. Phys., 25, 344 (1953).
- 二六' R. Kubo and K. Tomita: Broadening in nuclear magnetic resonance absorption. Proc. International

Conference of Theoretical Physics, Kyoto, 779 (1953).

二七' —: A general theory of magnetic resonance absorption. *J. Phys. Soc. Japan*, **9**, 888 (1954).

R. Kubo: Note on the stochastic theory of resonance absorption. *J. Phys. Soc. Japan*, **9**, 935 (1954).

二九' 結晶内不純物準位の光学的及び熱的遷移について 物性論研究 七三 四三三 一九五四年四月(共著豊沢豊)

三〇' R. Kubo and Y. Toyozawa: Application of the method of generating function to radiative and non-radiative transitions of a trapped electron in a crystal. *Prog. Theor. Phys.*, **13**, 160 (1955).

三一' 磁気回転効果 物性論研究 八六 五五 一九五五年七月

三二' 調和振動子の密度行列 物性論研究 八六 六一 一九五五年七月

三三' 非平衡系の量子統計力学 I Fluctuation-dissipation theorem と Correlation function の方法 物性論研究

八九 七九 一九五五年一〇月

三四' 非平衡系の量子統計力学 II 熱的な Disturbance に対する Response 物性論研究 八九 九九 一九五五年一〇月(共著横田万里夫)

三五' 電気抵抗に関する中島氏のノートに対する注意 物性論研究 八九 七二 一九五五年一〇月

三六' 非平衡系の量子統計力学 III pseudo potential の方法 物性論研究 九一 三三一 一九五五年一二月(共著橘爪夏樹、横田万里夫)

三七' 強磁場における電気伝導 I 物性論研究 九一 五〇 一九五五年一二月

三八' R. Kubo, T. Nagamiya, and K. Yosida: Antiferromagnetism. *Advances in Phys. The Philosophical Magazine, Supplement*, **4**, 1 (1955).

三九' R. Kubo: A general expression for the conductivity tensor. *Canadian J. Phys.*, **34**, 1274 (1956); The International Conference on Electron Transport in Metals and Solids.

四〇' —: Statistical-mechanical theory of irreversible processes. I. General theory and simple applications to magnetic and conduction problems. *J. Phys. Soc. Japan*, **12**, 570 (1957).

- 四一' R. Kubo, M. Yokota, and S. Nakajima: Statistical mechanical theory of irreversible processes. II. Response to thermal disturbance. *J. Phys. Soc. Japan*, **12**, 1203 (1957).
- 四二' R. Kubo: Stochastic theory of magnetic resonance. *Nuovo Cimento Supplement*, **6**, 1063 (1957).
- 四三' 電気伝導の理論の体系化 科学 五八 一九五七年一月
- 四四' ——: О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ ДОСТЕЖЕНИЯХ В ОБЛАСТИ МАГНЕТИЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТОКИО, ИЗВ. СТИИ АКАДЕМ. НАУК СССР, СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, XXI, No. 8, 1197 (1957).
- 四五' ——: Report on some recent progress in the field of magnetic investigation in Tokyo. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical Series*, **21**, 1197 (1957), Translation, **21**, 1186.
- 四六' R. Kubo, H. Hasegawa, and N. Hashitsume: Theory of galvanomagnetic effect at high magnetic field. *Phys. Rev. Letters*, **1** (8) (1958).
- 四七' ——: Quantum theory of galvanomagnetic effect. I. Basic considerations. *J. Phys. Soc. Japan*, **14**, 56 (1959).
- 四八' R. Kubo: Some aspects of the statistical mechanical theory of irreversible processes. "Lectures on Theoretical Physics" 120 (1959), ed. by E. Brittin and L.G. Dunham Interscience (1959).
- 四九' ——: A stochastic theory of line-shape and relaxation. "Fluctuation, relaxation and resonance in magnetic systems". *Scottish Universities' Summer School*, 23 (1961), edited by D. ter Haar.
- 五〇' ——: Generalized cumulant expansion method. *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, 1100 (1962).
- 五一' R. Kubo: Electronic properties of metallic fine particles. I. *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, 975 (1962).
- 五二' R. Kubo, T. Izuyama, D. Kim, and Y. Nagaoka: Band theoretical interpretation of the neutron diffraction phenomena. *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, Suppl. B-1, 67 (1962).
- 五三' R. Kubo: Stochastic Liouville equation. *J. Math. Phys.*, **4**, 144 (1963).
- 五四' R. Kubo, T. Izuyama, and D. Kim: Band theoretical interpretation of the neutron diffraction pheno-

- mena. J. Phys. Soc. Japan, **18**, 1025 (1963).
- 五五 R. Kubo and E. Fukuda: Diffusion constant of ^3He in liquid helium. II. Prog. Theor. Phys., **29**, 621 (1963).
- 五六 R. Kubo and T. Izuyama: Some consideration of the magnetic carriers in ferromagnetic transition metals. J. Appl. Phys., **35**, 1074 (1964).
- 五七 R. Kubo: Wigner representation of quantum operator and its applications to electrons in a magnetic field. J. Phys. Soc. Japan, **19**, 2127 (1964).
- 五八 ———: Orbital magnetism of metallic electrons. Proc. of the International Conf. on Magnetism, Nottingham, p. 35 (1964).
- 五九 R. Kubo, S. J. Miyake, and N. Hashitsume: Quantum theory of galvanomagnetic effect at extremely strong magnetic fields. Solid State Phys., **17**, 269 (1965).
- 六〇 R. Kubo: Linear response theory of irreversible processes. "Statistical Mechanics of Equilibrium and Non-Equilibrium". Proc. Int. Symposium Aachen (1964); North Holland, p. 81 (1965).
- 六一 ———: Some topics on the orbital magnetism. Lectures in Theoretical Physics, VIII-A, Univ. of Colorado Press, p. 239 (1966).
- 六二 ———: The fluctuation-dissipation theorem. Reports on Progress in Physics, **29**, Part I, 255 (1966).
- 六三 R. Kubo and A. Kawabata: Electronic properties of fine metallic particles. II. Plasma resonance absorption. J. Phys. Soc. Japan, **21**, 1765 (1966).
- 六四 R. Kubo: The fluctuation-dissipation theorem and Brownian motion. "Many-Body Theory" 1965. Tokyo Summer Lectures in Theoretical Physics, Shokabo and Benjamin, p. 1 (1966).
- 六五 R. Kubo and T. Toyobe: A stochastic model for low-field resonance and relaxation. Proc. of the XIVth Colloque Ampere, Ljubljana 1966, North Holland, 810 (1967).

- 六六' R. Kubo and K. Yamaji: A note on the orbital diamagnetism of nearly free electrons. *J. Phys. Soc. Japan*, **25**, 330 (1968).
- 六七' R. Kubo and M. Suzuki: Dynamics of the Ising model near the critical point. I. *J. Phys. Soc. Japan*, **24**, 51 (1968).
- 六八' R. Kubo: Electrons in small metallic particles. Jubilee Book in Honor of Prof. Kastler. *Physical Society of France, Paris* (1968).
- 六九' —: A Stochastic theory of line-shape, to be published in *Advances in Chemical Physics. Conf. on Stochastic Processes in Chemical Physics*, 1968.
- 七〇' R. Kubo, M. Suzuki, and H. Ikari: Dynamics of the Ising model near the critical point. *Proc. Int. Conf. Statistical Mechanics, Kyoto*, 1968.
- 七一' R. Kubo: Stochastic theories of randomly modulated systems. *Proc. Int. Conf. Statistical Mechanics, Kyoto*, 1968.
- 七二' 金属微粒子中の電子 物理 二二二 七一八 一九六八年 (共著川畑)
- 七三' R. Kubo and S. J. Miyake: Nonlinear magnetoresistance in Bismuth. *Phys. Rev. Letters*, **9**, 62(1962).
- 七四' R. Kubo: Some general considerations on the hall constant. *Physique des Semiconducteurs. Proc. of the 7th Intern. Conf., Paris 1964, Dunod, Paris*, p. 357.