高温超伝導体

超伝導現象は工学的見地からみて種々のすぐれた特徴を持ち、応用上豊富な可能性を秘めている。ただ残念なことに、超伝導状態は現在のところ 21°K 以下の極低温でしか得られないのであって、このため、超伝導現象の持つすぐれた特質も経済面から大きく割引きされてしまう。

したがって、室温でなおかつ超伝導状態になっている物質が見つければどんなにすばらしいことであろうというのが、超伝導が発見されて以来の人々の夢であった。そして、最近の Little や Ginzburg らによる高温超伝導体のモデルの出現は、この夢が間もなく実現されるのではないかという期待を人々に抱かせたのである。この底抜けに明るいムードは、たとえば Little の解説 (Sci. Am., 212, 21 (1965)) を読んでいただくとよくわかる。

しかしながら現実には意外に厳しく、この方面の研究は多くの人々の努力にもかかわらず、その後はかばかしい進展をみせないままである。この間の事情を述べるのが本稿の目的であるが、それを超伝導の機構にたち入らずにやさしく説明するのは筆者の力及ばざるところであって、結果として議論がかなり難解なものになってしまったことを、あらかじめおわびしておきたい。

山 藤 馨*

1. 超伝導とその応用

超伝導体の本質は完全反磁性にあり、電気抵抗を持たない。これは確かにすばらしい特質に違いない。ただ、上の記述はいささか厳密性を欠いている。Sn や Al の場合にはこのいい方は大体において正しいのであるが、それでも電流が表面だけにしろ流れるということは、磁界が表面付近のごく僅かの領域には侵入していることを意味している。その侵入領域の厚さは、物質によって異なるが、大体 $10^3\text{\AA}$ の程度である。さらに、交流電流に対しては、ごく僅かではあるが電気抵抗を持っている。しかし、その抵抗は超伝導状態でない場合（常伝導状態と呼ぶ）に比較して桁違いに小さいのである。

20 世紀の前半までは、このようなすばらしい特質を持つ超伝導状態には特殊な物質しかなりえないように思われていた。しかし最近の研究によって、ほとんどの金属元素は、磁気的な秩序性が超伝導状態になるのを妨げる場合を除き、圧力をかけていくと有限の温度で超伝導状態への遷移を起こすことが知られてきた。さらに多くの合金や、いくつかの半導体、半金属なども超伝導を示すこともわかってきた。つまり、超伝導状態は別に特殊なものではなく、ごくありふれた現象なのである¹⁾。

超伝導現象は 1911 年に Kamerlingh Onnes によってはじめて発見されたのであるが、10 年ぐらい前までは、超伝導現象の工学的応用には見るべきものがなかった。これは一見不思議にみえるかもしれないが、そうではない。超伝導状態は低温で熱力学的に安定な一つの相であって、温度を上げていくとある遷移温度（以下 T_c と書く）以上では相転移を起こして常伝導状態になってしまう。したがって、 T_c 以下の温度においても、ある値以上の磁界もしくは電流をかけると常伝導状態になってしまう。ある温度における超伝導状態と常伝導状態の自由エネルギー差は T_c が大きいほど大きいので、その温度における遷移磁界 H_c は T_c が大きい物質のほうが大きい。ところが、1950 年代に知られていた超伝導体の T_c は NbN の場合を除き²⁾ せいぜい 10°K 以下であって、液体ヘリウムの遷移温度 4.2°K 付近で使用するものとする、その H_c はせいぜい数百 Oe の程度にすぎない。電気抵抗がないという特質から直ちに想像できる送電線への応用にしても、この程度の磁界の範囲内で流しうる電流量では、当時の送電容量を考えると、極低温に送電線を冷却する費用が送電線の電力損失によって失う費用を下廻るというわけにはいかなかったのである。

最近 10 年間に発見された Nb₃Sn, V₃Ga, NbZr, NbTi などの一連の化合物もしくは合金超伝導体の出現は、しかしながら、上のような事情を一変させてしまった。これらの超伝導体は T_c が $10\sim 20^{\circ}\text{K}$ の範囲内に

* Kaoru YAMAFUJI 九州大学（工学部電子工学教室・812 福岡市東区箱崎）助教授・理博
Possibility of the Discovery of Superconducting Materials with High Transition Temperatures

あってそれほど高くはないが、磁界を増して行くと、不完全な反磁性を示しているが依然として超伝導状態であるという領域（混合状態）に入り、この領域の上限の磁界（ H_{c2} ）の値は、4.2°Kで数十 KOe～数百 KOeにも達する³⁾。したがって、このような超伝導体を材料にした磁石は、従来の高磁界用磁石に比して小型で経済的であり、MHD 発電などの例にみられるように従来の高磁界応用の常識を変えてしまった観がある。さらにこのような高い H_{c2} を持った超伝導材料の出現は、最近における大容量電力の長距離送電の必要性和相まって、送電面でも経済的に有利になる時代が近づいて来ている⁴⁾。

近年の急速な科学技術の進歩とそれに伴う工学的応用上の種々の要請の波は、上の送電線の例にも見られるように超伝導現象の応用面にも波及してきて、以前には極低温のため経済的に不利だという理由で顧みられなかったり思い付かなかったりしていたいろいろな応用が、脚光を浴びはじめてきた。低損失に目をつけた超伝導通信ケーブル⁵⁾、磁石と超伝導磁石との間に働く反発力を利用する浮上列車⁶⁾、さらには Josephson 効果⁷⁾などを利用した微小電圧や微小磁界の測定素子⁸⁾や発振素子、増幅素子、記憶素子などである。

このように超伝導現象は、極低温で使用するため経済上非常に不利であるという一見致命的な欠点を持ちながらも、工学的応用面に着実な地歩を築き上げかけている。もし、室温とまで行かなくともせめて液体窒素温度で超伝導状態になる物質がみつければ、科学技術の飛躍的進歩が達成されるかもしれない。

2. 電子-フォノン相互作用による超伝導の遷移温度^{*1}

超伝導状態は一種の秩序状態であるが、常伝導状態から超伝導状態への遷移が起こるためには、 T_c 以下で常伝導状態を形成している電子のフェルミ分布が不安定にならなければならない。このような不安定性をひき起こすためには、フェルミ面付近の電子間にクーロン斥力に打勝つ引力が存在すればよいのだが、そのような引力に格子振動（フォノン）が関係していることは、同位元素効果を通じてかなり前から予測されていた。同位元素効果とは、物質を構成している元素を同位元素で置き換えた場合、 T_c が元素の質量 M とともに変化する効果であって、もし格子振動が関与していれば、おおまかにいって相互作用のエネルギーは格子振動の角周波数 ω に比例するが ω はまた $M^{-1/2}$ に比例するので、 $T_c \propto M^{-1/2}$ となることが予測されるのである。この場合の引力の起源は、大ざっぱに言えば次のようになる。格子を形成している正イオンと電子の間には電気的引力が働くので、

^{*1} 超伝導現象にあまり親しみのない方には冒頭に掲げた Little の解説をおすすめしたい。超伝導の機構が直観的にうまく説明されている。

電子と電子の間にも正イオンを媒介として間接的な引力が働きうるのである。

このような電子-フォノン相互作用に基づく超伝導の微視的理論は最初 Bardeen-Cooper-Schrieffer⁹⁾ と Bogoliubov¹⁰⁾ によって独立に提出された。彼らの理論の近似は分子場近似と同程度のものであるが、超伝導現象のあらゆる特徴を半定量的にみごとに説明する。BCS の結果は Abrikosov や Gor'kov らによって展開された Green 関数の方法¹¹⁾を用いても再現することができるが、超伝導状態と常伝導状態の間のエネルギー・ギャップが積分方程式の解として与えられるという特徴を持つ。有名な BCS の T_c の表式⁹⁾：

$$T_c = 1.14 \theta_D \exp[-1/N(0)V] \quad (1)$$

は弱い相互作用の場合 ($N(0)V \ll 1$) の近似で上の積分方程式から解析的に求められるものである。(1)式において θ_D はデバイ温度、 $N(0)$ はフェルミ面における状態密度、 V は電子間に働く正味の引力ポテンシャルの絶対値である。

(1)式を見ると BCS の近似の特徴が次のようなものであることがわかる。(イ) 正味の引力ポテンシャル V は、電子フォノン相互作用のポテンシャルと電子間クーロン相互作用との差として定義されるが、これは一般には電子の波数の関数であるのに一定にとっている。(ロ) フォノンの振動数分布が考慮されていず、ただ cut-off の目安としてデバイ温度が入っているだけである。

(ハ) 弱い相互作用の場合の近似である。したがって BCS 理論は、詳細にみると、実験値との定量的なくい違いが随所にみられるのである。

その後の理論の発展により、現存する超伝導体はすべて電子-フォノン相互作用の機構によることがわかってきた。同位元素効果の指数が $(-1/2)$ よりはずれるようなものも理論の精密化に伴って説明がつくようになってきた。 T_c が高いような強い相互作用をもつ超伝導体の

山藤 謙氏 昭和 31 年九州大学理学部物理学科卒業、昭和 36 年九州大学理学部研究科物理学専攻博士課程卒業、以後現在の場所に勤務。研究歴は昭和 33～43 年固体高分子の誘電的性質、昭和 36 年から超伝導物性および応用。著書は分担執筆したもの 2 篇。趣味は山歩き（九大・ワンダーフォーゲル部部長）その他種々のスポーツ、ゲーム。

T_c の理論も発展しているが、このうち McMillan¹²⁾ によって提出された次の近似式は、電子-フォノン相互作用による超伝導の T_c に上限があることを半定量的に示している点でおもしろい。

$$T_c \cong (\hbar c \omega / K_B) e^{-1} \exp(-M < \omega^2 > / C) \quad (2)$$

これで C は似たような物質に対しては一定値をとる。(2) 式と (1) 式を比べてみると電子-フォノン相互作用のポテンシャルに格子振動の振動数分布がとり入れられていることがわかる。この結果、大ざっぱに $< \omega^2 > \sim < \omega >^2$ とすれば、(2) 式で与えられる T_c がある最大値を持つことがすぐにわかる。実際彼の計算によると $(T_c)_{\max}$ は V_3Si 系で $40^\circ K$ 、 Nb_3Sn 系で $28^\circ K$ となる。(2) 式において $< \omega^2 >$ が $< \omega >^2$ より小さくなればそれだけ T_c が上ることになるが、これは薄膜や微小粒子、無定形などで T_c が高くなることを説明する。さらに Herter¹³⁾ によれば、クーロンの擬ポテンシャルをきちんと取り入れて計算した場合の $(T_c)_{\max}$ は、 V_3Si 系で $22.6^\circ K$ 、 Nb_3Sn 系 $18.1^\circ K$ となり現在実験的に得られている値にもっと近づくことが示される。

実験的に T_c の大きい超伝導体を求める努力は主として Bell Telephone Laboratories, Los Alamos Scientific Laboratories, University of California の三箇所です。精力的に続けられてきたが、現在得られている最高の T_c は $Nb_3(Al_{0.75}Ge_{0.25})$ の $21^\circ K$ にすぎない。 $12^\circ K$ 以上の T_c を持つ超伝導体は $\beta-W$ 、 $NaCl$ 、 Pu_2C_3 の三つの構造をもつ物質に限られるが、これらの結晶構造は T_c 付近でかなり不安定であるという特徴を持つ¹⁴⁾。したがってあらうことをいえば、 T_c を上げるには不安定な結晶構造を捜せばよいということになるが、仮に不安定なものまで許すとしても、 T_c の上限は $21^\circ K$ の $1.2 \sim 1.5$ 倍ぐらいがせいぜいであろうというのが、 $Nb_3(Al_{0.75}Ge_{0.25})$ をつくった Matthias の経験からの意見である¹⁾。

3. 電子-励起子相互作用による超伝導^{*2}

電子-フォノン相互作用による超伝導の T_c には上限があり、それはせいぜい $30^\circ K$ でぐらいであろうということを述べたが、実際 $30^\circ K$ ぐらいの T_c を持つ超伝導体が出現すれば、それでもなおかつ冷却の問題はかなり楽になり、応用上大きな意義を持つ発見になる。したがってこの方面の努力は当然続けられねばならない。しかし、もっと高い T_c をもつ超伝導体を得られればその利するところははかりしれないようにも思われる。実際、最近になって電子-フォノン相互作用以外に種々の機構が提出され始めたが、残念ながらことには、これらの理論的予測を裏付ける実験結果は、まだなにより一つとして得られ

ていない。ここでは、これらのアイデアのうち、電子-励起子 (exciton) 相互作用とでも呼ぶべき機構による超伝導の可能性についてふれてみたい。

この機構の発想点はおそらく次の点にあるように思われる。(1)、(2) 式をみるとわかるように、電子-フォノン相互作用の場合に相互作用ポテンシャル V をいかに変化させても、 T_c は決して Θ_D の程度を越すことはなく、むしろ指数関数因子によって Θ_D よりずっとさがってしまう。したがって高い T_c の物質を得るには少なくとも Θ_D に対応する比例係数をずっと大きくしてやる必要があるように思われる。電子-フォノン相互作用の場合 Θ_D や $< \omega >$ はほぼ $M^{-1/2}$ に比例するので、格子振動に関係している正イオンの質量 M を仮に電子の質量 m で置き換えてやると、比例係数は 100 倍程度に大きくなり、指数関数因子の大きさの程度がもし同じくらいならば $1000K$ ぐらいの T_c が得られるはずである。この場合伝導電子間の引力を媒介するものとしては、伝導電子系と別の系における電子分極 (たとえば誘電体や半導体中の exciton) などが考えられよう。

この機構による超伝導体のモデルとしてはかなりいろいろのものが示唆されているが、おおまかに分けて Little によって示唆されたものと Ginzburg によって提唱されたものの二つの系列に分けることができるように思われる。Little の最初のモデル¹⁵⁾ は前にもこの雑誌上で解説¹⁶⁾ があり、あまりにもよく知られているのでその詳細はここでは省略するが、共役 π -二重結合よりなる主鎖部 (spine) とシアニン系の色素からなる側鎖を持つ。側鎖内に存在する 2 個の N の間のうちの 1 個が正に帯電しているが、主鎖部を走る π 電子によってその分極のゆらぎが生じ、これによって主鎖部を走る他の電子がまたひきつけられるというものである。

このモデルが発表されると、それに対して種々の批判が集中したが、主なものは次の二つに要約されるようである。(イ) 一次元ないし二次元の物質では三次元物質に比べて相互作用を行なう相手の数が少ないので、ゆらぎの影響を受けやすく、したがって超伝導状態のような長距離秩序をもった状態は現れえない¹⁷⁾。Little の示唆したような体系は正確には一次元系ではないけれども、ゆらぎによって T_c が期待した値よりおそらく何桁も減小することになるだろう¹⁸⁾。(ロ) 引力がクーロン斥力に打ち勝つためには、クーロン相互作用が十分遮蔽 (screen) されている必要があることがわかっているが、一次元の系ではこの遮蔽効果が十分に行なわれない可能性がある¹⁹⁾。さらには、このように分子の規模で高温超伝導を示す物質が見つかったとしても、どうやって外に電極をつなぐのであろうなどという現実的 (?) な心配までとび出す始末である。

その後この系統のモデルはこれらの批判をくみ入れて

*2 ここでは励起子という言葉が本来の意味からだいぶ拡張されて使われているので注意されたい。

徐々に進歩したものになりつつあるが、これらを確かめる実験の側としては、Kampas²⁰⁾による電子-励起子相互作用が適当な環境のもとでは実際に起こりうるという結果を除けば、現在のところあまり希望のもてものはない。このような型の超伝導体が可能だとしても、それは少なくとも DNA 級の分子規模もっていて、適当な側鎖がついたものを合成するのは現段階ではむずかしいのではなかろうかというふうにも思われるのだが、これは筆者の個人的意見であてにはならない。

Ginzburg の示唆したモデルは、薄い金属層を非金属ではさんだサンドウィッチ構造のものであって、伝導電子が非金属部の励起子と相互作用できるためには、金属層は非常に薄い ($\sim 10\text{\AA}$) のものでなければならないという考えに基いている。この意味で、このような型のもは二次元超伝導体というふうに呼ばれている。二次元の場合は一次元の場合と異なり、前述した二つの批判はかなり緩和され、期待した T_c の桁を変えるほどには至らないのではないかという考え方もなりたちそうである²³⁾。しかし実験的には、同時蒸着もしくは多層蒸着した絶縁物の効果は大部分金属の結晶化を妨げて $\langle\omega^2\rangle$ を $\langle\omega\rangle^2$ より小さくする (格子の softening と呼ばれる) ようなものであって、電子-励起子相互作用が効いたとはいいい切れないようである²⁴⁾。膜厚が $30\text{\AA}$ 程度より小さくなると T_c が下がるという結果²⁵⁾もこのモデルに対する見通しをいくらか暗くしている。

二次元的なものとしては、この他にグラファイトとアルカリ金属の層間化合物²⁶⁾、 TaS_2 のような層状化合物の層間にピリジンのような分子をすべり込ませた (intercalated) もの²⁷⁾ などいろいろの理論や実験が提出されているが、まだ高温超伝導体の出現に明るい希望をもたせるような結果は得られていない²⁸⁾。Ginzburg 自身もこのようなモデルに対する困難性のある程度認めていて、強調したほどには薄くない薄片状の金属を誘電体中に埋め込んだ顆(か)粒状の (granulated) 物質に望みをつないでいるようであるが²⁹⁾、問題は適当な伝導電子-励起子相互作用を与える誘電体の選択の困難性にもあるように思われる。

つまり、このような性質をもった excitons ならば超伝導の条件を満たすであろうという事はあらい計算で言うはできるのだが、そのような性質をもったものがいったい何なのか、また実際に存在しうるのかといった面での議論が欠けているように思われるのである。

上に述べた二つの流れのほかにもいくつかの示唆²⁹⁾やいろいろな努力がなされているが、紙数の都合でここでは省略させていただく。ただ、この方面の研究が盛んになれば一軸方向にかなりの電気伝導性をもつ錯塩の合成³⁰⁾など、おもしろい副産物がいろいろ現れてくることも無

視できないように思われる。いづれにしても、高温超伝導体の可能性に対してなんらかの結論を述べるのは、今の段階では早計であろう。

文 献

- 1) B. T. Matthias: *Physics Today*, **24**, 23 (1971)
- 2) G. Aschermann, E. Friederich, E. Justi, J. Kramer: *Phys. Zeits*, **42**, 349 (1941)
- 3) A. C. Rose Innes, E. H. Roderick: "Introduction to Superconductivity" Pergamon Press (1969), Chap. 12
- 4) 伊原征治郎, 堀米 孝: 低温工学, **5**, 8 (1970); 岡本英夫: 低温工学, **6**, 37 (1971)
- 5) 星子幸男, 千葉信行: 応用物理, **40**, 905 (1971)
- 6) 山村 昌: 電気学会雑誌, **91**, 37 (1971)
- 7) B. D. Josephson: *Phys. Letters*, **1**, 251 (1962)
- 8) 大塚泰一郎: 低温工学, **3**, 249 (1968)
- 9) J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer: *Phys. Rev.*, **108**, 1175 (1957)
- 10) N. N. Bogoliubov: *Nuovo Cimento*, **7**, 794 (1958)
- 11) A. A. Abrikosov, L. P. Gor'kov, I. E. Dzyaloslinski: "Method of Quantum Field Theory in Statistical Physics", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., (1963), Chap. 7
- 12) W. L. McMillan: *Phys. Rev.*, **167**, 331 (1967)
- 13) P. Hertel: *Z. Physik*, **248**, 272 (1971)
- 14) 佐藤武郎: 固体物理, **4**, 235 (1969)
- 15) W. A. Little: *Phys. Rev.*, **134**, A1416 (1964)
- 16) 松沢通生: 高分子, **16**, 801 (1967)
- 17) T. M. Rice: *Phys. Rev.*, **A140**, 1889 (1965); P. C. Hohenberg: *Phys. Rev.* **158**, 383 (1967)
- 18) R. A. Ferrel: *Phys. Rev. Letters*, **13**, 330 (1964); De Warmes, *et al.*: *Phys. Rev. Letters*, **13**, 749 (1964)
- 19) W. L. McCubbin: *Phys. Letters*, **19**, 461 (1956); K. F. G. Paulus: *Mol. Phys.*, **10**, 381 (1966); C. G. Kuper: *Phys. Rev.*, **150**, 189 (1966)
- 20) F. J. Kampas: *J. Polymer Sci.*, **29**, c81 (1970)
- 21) 古山俊之: 高分子の電気物性講演要旨集, **44** (1972)
- 22) V. L. Ginzburg: *Contemp. Phys.*, **9**, 355 (1968)
- 23) V. L. Ginzburg: *Soviet Phys. Uspekhi*, **3**, 335 (1970)
- 24) 関沢和子, 安河内昂: 低温工学, **7**, 11 (1972)
- 25) M. Strongin, O. F. Kammerer: *J. Appl. Phys.*, **39**, 2509 (1968); J. P. Hurault: *J. Phys. Chem. Solids*, **29**, 1765 (1968); R. F. Frindt: *Phys. Rev. Letters*, **28**, 299 (1972)
- 26) N. B. Hanne, T. H. Geballe, B. T. Matthias,

- K. Andres, P. Schmidt, D. MacNair: *Phys. Rev. Letters*, **14**, 225 (1965)
- 27) F.R. Gamble, J.F. Disalvo, R.A. Klemm, T.H. Geballe: *Science*, **168**, 568 (1970); T.H. Geballe, A. Menth, F.J. Disalvo, F.R. Gamble: *Phys. Rev. Letters*, **27**, 314 (1971)
- 28) V.L. Ginzburg: *ZhETF Pis. Red.*, **14**, 572 (1971)
- 29) R.H. Parmenter: *Phys. Rev.*, **116**, 1390 (1969); Yu. A. Bychkov, L.P. Gor'kov, I.E. Dzyaloshinski: *Soviet Phys. JETP*, **23**, 489 (1966); T. Schneider: *Helv. Phys. Acta*, **42**, 957 (1969); P. Donze, M. Peter, B. Hirt, W.A. Little: *Helv. Phys. Acta*, **42**, 898 (1969); I.E. Dzyaloshinski, E.I. Kats: *Soviet Phys. JETP*, **28**, 178 (1969); D.I. Lalović, B.S. Tödić, R.B. Žakula, M.J. Skrinjar: *Phys. Stat. Sol.*, **47**, b265 (1971); V.D. Blazhin, A.S. Selivanenko: *Soviet Phys. Solid State*, **12**, 2610 (1971)
- 30) M.J. Minot, J.H. Perlstein: *Phys. Rev. Letters*, **26**, 371 (1971)

定期刊行物予告

POLYMER JOURNAL Vol. 3, No. 5

購読費●会員年 4,000 円 会員外 15,000 円 1 冊頒価 4,000 円

- Effects of Molecular Weight and Its Distribution on Fractural Behavior of Polystyrene
..... S. Onogi, T. Matsumoto, and E. Kamei
- Solution Properties of Synthetic Polypeptides. XI. Solvent Effect on Helix—Coil
Transition in Polypeptides.....N. Sayama, K. Kida, T. Norisuye, A. Teramoto, and H. Fujita
- Interactions in Poly (vinyl chloride) Solutions.....L.A. Utracki
- Theory of Light Scattering by an Isotropic System Composed of Anisotropic Units.
Out-of-Plane Scattering.....K. Nagai
- The Reaction between Diphenylmethane and Butadiene with Organolithium Compounds
.....T. Yamaguchi, T. Narita, and T. Tsuruta
- Thermodynamic Properties of Polyethylene and Eicosane. I. P—V—T Relations and
Internal PressureY. Tsujita, T. Nose, and T. Hata
- Thermodynamic Properties of Polyethylene and Eicosane. II. Conformational Entropy
of MeltingY. Tsujita, T. Nose, and T. Hata
- Molecular Conformation and Packing of Poly (vinylidene fluoride). Stability of Three
Crystalline Forms and the Effect of High Pressure
.....R. Hasegawa, M. Kobayashi, and H. Tadokoro
- Crystal Structures of Three Crystalline Forms of Poly (vinylidene fluoride)
..... R. Hasegawa, Y. Takahashi, Y. Chatani, and H. Tadokoro
- Asymmetric Addition Catalyzed by Optically Active Polymers. IV. Addition of Lauryl
Mercaptan to Dimethyl Maleate and Dimethyl Fumarate.....S. Inoue, S. Ohashi, and Y. Unno
- Electrochemical Oxidation of Polymer Anions and Arene Anions.....S. Nakahama and N. Yamazaki
- Relationship between Ionic Mobility and Segmental Mobility in Polymers in the Liquid State
.....H. Sasabe and S. Saito
- Effects of Temperature and Pressure on the Micro-Brownian Motion in Poly
(vinyl chloride)..... H. Sasabe and S. Saito
- SHORT COMMUNICATION
- A Pendant-drop-Type Tensiometer for Surface Tension Measurements of Polymer System
..... A. Nakajima and M. Murakami
- Mechanism of Charge-Transfer Polymerization: Formation of an Alternating Copolymer
of N-Vinylcarbazole and Fumaronitrile.....Y. Shirota, A. Matsumoto, and H. Mikawa
- PMR Spectra of Poly (methyl vinyl ether) in the Presence of Shift Reagent
.....H. Yuki, K. Hatada, T. Hasegawa, Y. Terawaki, and H. Okuda