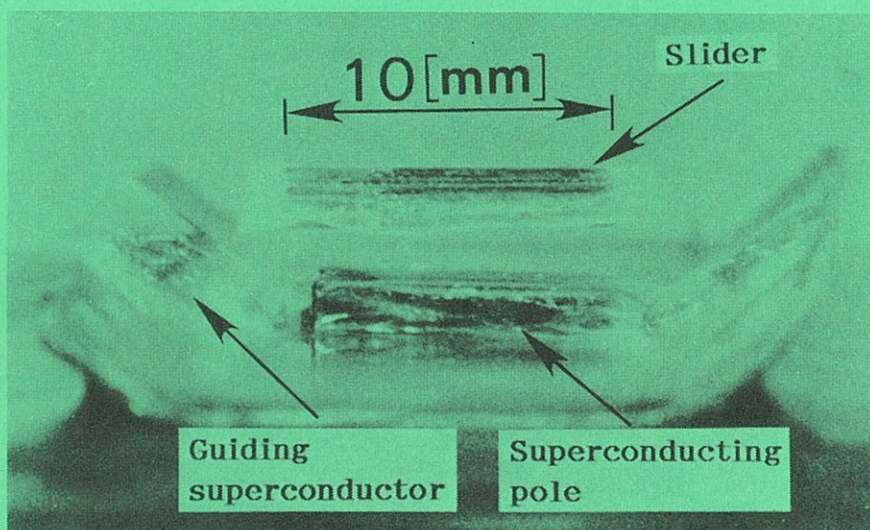


低温センターだより

第 10 号

1989 年 11 月



東 京 大 学
低 温 セ ン タ ー

目 次

温度はどこまで下がるか	物性研究所 石 本 英 彦	1
マيسナー効果を利用したセラミックス系 超電導アクチュエータの基礎特性	工学部 電気工学科 金 容 権, 桂 井 誠	7
	生産技研 第3部 藤 田 博 之	
実験メモ		
能動素子の低温動作	理学部物理学科 勝 本 信 吾	13
液体ヘリウム容器の温度分布と 時間的経過	教養学部低温サブセンター 小田嶋 豊	18
昭和 63 年度寒剤供給状況		22

温度はどこまで下がるか

物性研究所 石 本 英 彦
(内線 96-5231)

1 はじめに

私が液体Heを使うようになったのは、今から約20年前やっと超伝導磁石が世に出始めた頃である。本学の低温センターが順調に稼働し始めてまもなくの頃であったと思う。当時、故熊谷寛夫先生のもとで水素原子核の核偏極のために低温を始めたのが、この道に入る端緒であった。その後、高エネルギー物理学研究所、物性研究所と場所変ったが、液体Heとは縁が切れないでいる。それどころか、今では大量の液体Heがなければ、岡に上った河童と同じで液体を供給してくださっている方には非常にお世話になっている。という訳でこの原稿依頼を何も考えず承諾してしまった。後で何を書けばと迷ったが、超低温研究の一端を紹介するのが簡単そうである。

2 超低温の生成とその限界

物質の相を規定するパラメーターとしては、普通 温度 T 、圧力 P 、磁場 H が使われているが、このうち低い温度については開拓の歴史も古く先人の努力の結果、既に人工の低温が自然界にある最低の温度(黒体輻射の2.7 K)をはるかに越えている。図1に熱平衡温度の歴史的な変化の様子が示されているが、1960年代後半の超伝導磁石と希釈冷凍機の

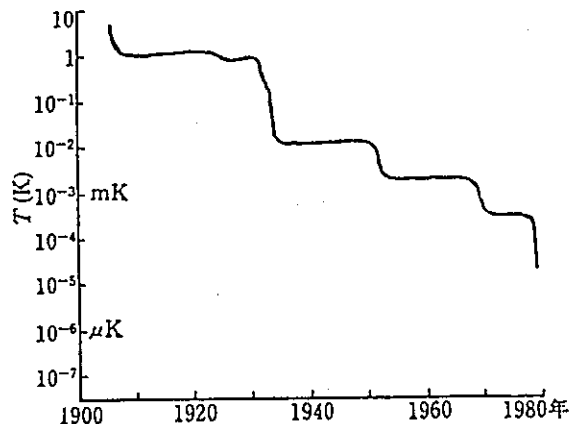


図1 熱平衡温度の歴史的変遷

開発は温度の最前線を m K から μ K に進めることとなった。1972 年の超流動 ^3He の発見はこの温度領域の研究に拍車をかけ、最近では m K 以下の温度領域を特に超低温と呼び、これより高い温度領域である極低温と区別している。

さてこのような温度はどのようにして作るのだろうか。まず簡単に述べてみよう。約 1 K までの温度は液体 ^4He を減圧すれば、割合簡単に得られる。これ以下の温度になると少し厄介で、今では ^3He と ^4He の混合液を用いるのが一般的になっている。この方法は希釈冷凍法と呼ばれ原理は次の様なものである。例えば 6.7% の ^3He をふくむ混合液は 0.87 K で相分離を起こし ^3He 濃厚相が ^3He 希薄相の上に浮く。この濃厚相中の ^3He が希薄相に溶けこむ過程は、古典的蒸発と同様で熱が奪われ温度が下がる。この冷凍法の最も大きな利点は、数 m K までの温度を連続的に生成することができる点で、さらに低い温度へのベースキャンプの役割を果たすことになる。1 m K 以下の温度となると原子核スピン系の自由度を用いた核断熱消磁が唯一の方法である。図 2 に一例として我々の装置を示す。寒剤である

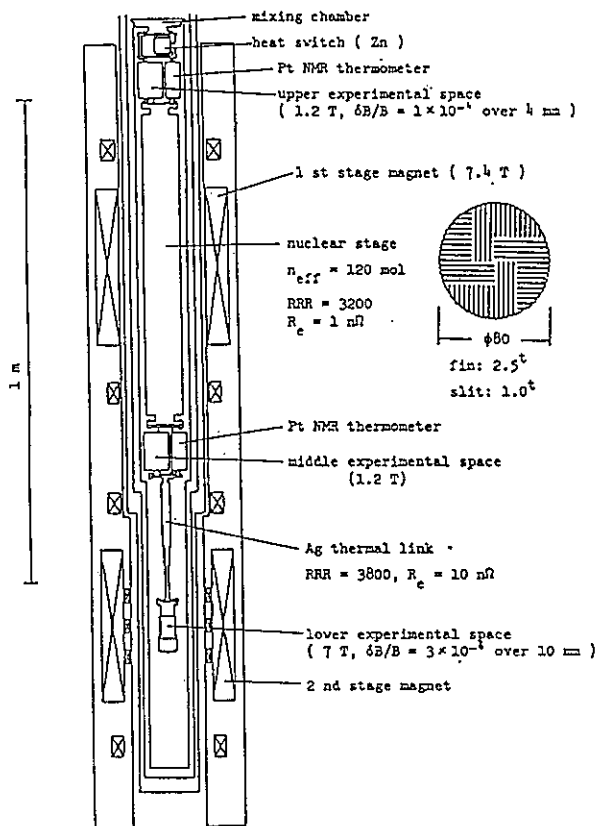


図 2
核断熱消磁装置

銅を超伝導磁石の中にいれて、希釈冷凍機により磁化熱を奪う。その後、断熱状態で磁場を取り去ると核スピン系の温度が下がる。このとき核スピン系だけが冷える方式を核冷却とよび、寒剤自身の核秩序の実験に用いられる。一方電子系を含め他の物質を冷やすのが核冷凍とよばれる。核冷凍では試料は消磁用磁石の外に置かれるので、その性能を比べる際には普通金属試料の温度 (T_s) を使う。これまでに到達された T_s の最低は $12 - 15 \mu K$ であるが、限界は何によって決められているのだろうか。磁石中の寒剤を数 μK にするのに大きな困難はなく、これと試料をつなぐ熱リンクでの温度差が T_s を決めてしまう。この温度差を小さくする為、熱リンクでもある寒剤は十分に焼鈍されている (電気抵抗比 ~ 3000)。しかし μK 領域になると熱伝導も小さくなるので、ほんのわずかの熱流入 (\dot{Q}) が試料に入ってもかなりの温度差を生じてしまうのである。この \dot{Q} を小さくすれば、さらに低い温度に到達できるが \dot{Q} の何分の一かは宇宙線などの自然放射線による熱発生であり、これを避けようとするれば鉱山の中でも入らねばならない。以上の様な訳で T_s の限界も近づきつつある。さらにこの様な低温になると温度測定にも問題がでてくる。温度は白金原子核の常磁率がキューリー則に従うことを用いて、NMR 信号の大きさから決めている。しかし核秩序が近づくと、この法則からのずれが出てくると考えられ、いわゆる温度計なるものがなくなってしまう。次に試料が He の様な場合、別の問題が出てくる。いわゆる界面熱抵抗 (カピッツァ抵抗) である。この抵抗は T^{-1} ($n = 1 \sim 3$) の温度依存性を持っており温度が下がると格段に大きくなる。そして試料に入るわずかの \dot{Q} でも、界面で大きな温度差を生じてしまう。これを小さくする為に銀や白金の超微粉を用い接触表面積を大きくするが、液体 3He では約 $100 \mu K$, $^3He - ^4He$ 混合液では約 $200 \mu K$ が今のところの最低温度である。

以上は試料全体の熱平衡温度であるが、寒剤自身の核スピン系はもっと冷える。スピン格子緩和時間 (10 分 - 30 分) という短時間ながら、銅原子核系が $50 n K$ まで冷え核秩序が観測されたという報告がある。この場合電子系は $100 \mu K$ のままである。このような核秩序温度が我々の到達最低温度であり、絶対零度には永遠に近づけない。しかしこの温度はどのようにして決められたのであろうか。唯一の方法は熱力学の第 2 法則に立ち返ることである。すなわち外部から核スピン系に入れた熱量とそれによる系のエントロピーの変化の比 $\Delta Q / \Delta S$ から温度を決める。しかしながら、かなりのあいまいさは避けられない。

3 超低温に於ける物性測定

次にこの様な超低温でどんな測定がなされているか、述べてみよう。物質は温度が下がると相互作用の強い自由度から秩序化が起こり、その際新しい現象を示す。その最も典型的なのが巨視的量子効果である超伝導や超流動であり、これらも低温開拓の中で発見されてきた。このうち超低温領域でこれまで最もよく研究されてきたのは、寒剤でもある液体Heそのものである。液体Heにはフェルミ粒子の ^3He とボーズ粒子の ^4He があり、非常に量子性が大きく常圧では0 Kまで液体である。このうち液体 ^3He は1972年に数mKで超流動転移が発見され、ここ10数年この分野に於ける中心課題で様々な角度から研究が行われてきた。いまでは、この超流動は2個の ^3He 原子が平行に対を組んだP波($S=1$)の凝縮体で、軌道核運動量も有限($L=1$)であることが明らかになっている。このため金属超伝導のS波($S=0$, $L=0$)の場合と異なり、沢山の内部自由度を有しており、その相図も図3の様に複雑である。H=0でA相($\uparrow\uparrow$, $\downarrow\downarrow$) B相($\uparrow\uparrow$, $\downarrow\downarrow$, $\uparrow\downarrow+\uparrow\downarrow$)の2相があり、 $H \neq 0$ で新たに A_1 相($\downarrow\downarrow$)

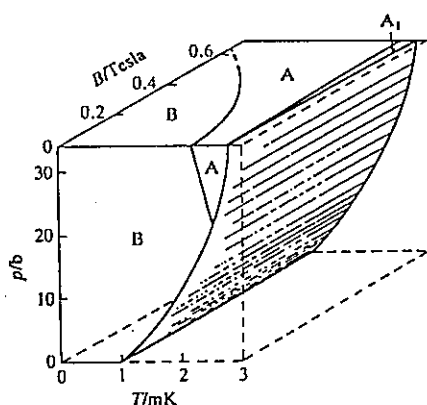


図 3

^3He の相図

が現れる。最近ではこの ^3He 超流動体を回転させる実験が成功し、B相が回転により生じている渦糸の構造によって2つの相に分れることも判ってきた。また超伝導に於けるジョセフソン効果に対応する現象が確認され、SQUID(超伝導量子干渉計)と同じ原理により地球の回転速度をより精密に測定しようという試みも始められている。

今後に残されている課題は $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液中の ^3He 超流動性の確認であろう。これらの ^3He 粒子間には引力相互作用が働いていることが知られており、いつかは超流動転移を示すと考えられる。しかも圧力、 ^3He 濃度によりS波、P波と変わる可能性もあり、世界中でその探索が

行われている。しかし $200\ \mu\text{K}$ 以上にその証拠はなく、転移温度がどの辺にあるかさえ判っていない。

さて液体 ^3He に圧力をかけると、約 34 気圧で bcc 相、約 105 気圧で hcp 相の固体になる。これらの固体は大きな零点振動に伴うトンネル効果で原子はお互いに頻繁に位置を交換している。これは原子間に交換相互作用が働いていることであり、その強さは双極子相互作用より千倍近く大きい。その結果融解曲線上の bcc 相では約 $1\ \text{mK}$ で反強磁性核秩序が観測されている。しかも大きな特徴は 3 体、 4 体などの多体間交換相互作用が中心的な役割を演じていることである。しかしお互いの大きさなどまだ不明な点も多い。特に hcp 相についてはワイス温度が正であることは判ったが核秩序温度は数 $10\ \mu\text{K}$ 以下で未発見のままである。

このほか限られた空間に閉じ込められた He フィルムや強磁場中の偏極量子流体などもさかんに研究されている。ちょっと変わった例として偏極原子状水素 ($\text{H}\downarrow$) があげられる。原子状態の水素を低温、強磁場のもとで偏極させることにより安定化し、その性質を調べようというのである。 $\text{H}\downarrow$ は $0\ \text{K}$ までほぼ理想的なボーズ気体として振舞うことが期待され、高密度で冷却すればボーズ・アインシュタイン凝縮をすることが予想されている。しかし、凝縮を観測出来る程の密度がまだ得られず、様々な試みが行われている。

これら液体 He に比べ金属での測定は少ない。銅やプラセオジミウム金属間化合物の核秩序などに限られている。その大きな理由は試料の問題であり、 ppm あるいはそれ以下の不純物でも本来の性質を壊してしまうのである。超高純度の試料作成専門家の協力が必須である。

以上、主として量子流体、量子固体について述べてきたが、ほとんどの測定は $100\ \mu\text{K}$ 以上のものであり、 $100\ \mu\text{K}$ 以下のものは数える程しかない。それは、 μK 領域においては試料の冷却はもとより測温を含めた物性測定に大きな困難が伴う為である。これに比べ少し温度の高い mK 領域になると、その困難もかなり減りバラエティある測定が可能である。様々な分野で、この温度領域の物性測定をやってみたい方は、ぜひ物性研を利用していただきたい。物性研は学内のみならず全国共同利用研であり、少しはお手伝いできるものと思います。

4 さいごに

超低温に於ける実験は長い時間がかかります。試料の熱平衡時間が

1日あるいはそれ以上になることもあり、実験が半年から1年連続することもあります。長期間にわたる安定した液体Heの供給体制がなければ不可能で、物性研液化室には非常にお世話になっており感謝の言葉もあります。ついでに液化、供給業務について日頃感じていることを少し述べさせてもらいます。1つは高圧ガス取締法に関してで、爆発の危険のない様な学術用の設備にはもっとゆるやかにしてもらえないかということです。米国で5,000リットル／時のHe液化機が中古の圧縮機で動いているのを見ましたが、こんなことは日本では非常に難しいことでしょう。もう1つはHeガス購入についてです。大量な場合、液体として購入すれば液化の為の経費、労力の節約になるのではないのでしょうか。液体として輸入されているものをガス化した液化するのは国全体としてエネルギーの無駄と思われるのですがいかがでしょうか。もちろん容器やコストなどいろいろな問題はあるかもしれませんが。

マイスナー効果を利用したセラミックス系 超電導アクチュエータの基礎特性

工学部 電気工学科(内線 6751)

生産技研 第3部

金 容 権

藤 田 博 之

桂 井 誠

1. はじめに

近年、電子回路の集積化を目的として発達した半導体の微細加工技術を利用して、極めて微細なセンサやアクチュエータを構成するマイクロメカニクスの研究が活発になってきた[1, 2]。しかし、機器の構成部品の大きさが μm オーダーであるマイクロアクチュエータにおいては、摩擦力の影響が大きいので[3, 4]、アクチュエータの滑らかな動作を妨げる大きな問題になっている[5]。その摩擦力を無くすため、高温超電導体のマイスナー効果を利用して動作部を浮上させて駆動するところの超電導マイクロアクチュエータ(マイスナック)が提案された[6]。本研究では、マイスナックの拡大モデル(10倍程度、寸法は mm オーダー)を試作し、その浮上力・駆動力特性を測定した。

2. マイスナック

提案されたマイスナック(マイスナー効果を利用したマイクロ超電導アクチュエータ)は、図1に示すように、高温超電導膜を設置したステータと永久磁石膜を設置したスライダによって構成される[6]。ステータはストライプ状であり、液体窒素で冷却されている。スライダの永久磁石膜もストライプ状であって、垂直磁化されている。スライダはステータの上にマイスナー効果で浮上する。さらに、スライダのピッチをステータのピッチよりわずかに小さくしておくと、スライダの磁石とステータの超電導体との相対的な位置のずれによって横ずれ力が生ずる。各々の超電導体の垂直方向の反発力は、超電導体と磁石との相対的な位置ずれに関わらず上向きで、一定な方向である。しかし、横ずれの力は、位置ずれによってその向きが変わるので、ステータの全ての超電導体が超電導状態であれば、その力は相殺されて総和は零になる。そこでこの時、望み方向の駆動力を得るために、適当な場所の超電導体の状態を超電導状態から常電導状態へ転移させると、横方向力の均衡が崩れてスライダを左右いずれかの

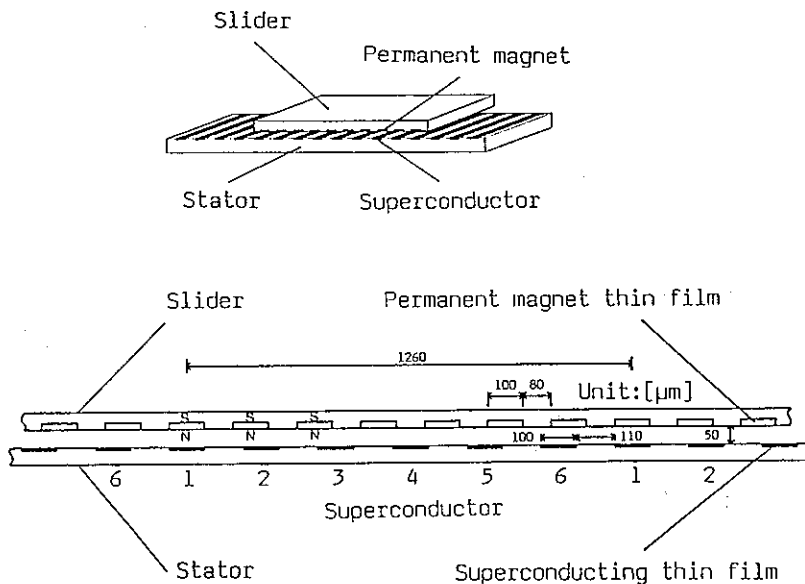


図1 マイスナックの構造（一例）

方向に駆動する力が生じる。

図1は、マイスナックの一例で、超電導体と磁石の幅が100[μm]で、奥方向の長さは幅に比べて非常に長いモデルである。この例は、超電導体は6本が1周期になっており、それに対して磁石は7本が1周期になっている。

3. 拡大モデルの試作

試作したモデルは、図2のとおりである。マイスナックは大きく分けてスライダースタータで構成されるが、本試作機においてはスタータは5本の超電導体棒と補助超電導体で構成されている。5本の超電導体棒（1.3x1.3x8.5mm）はスライダースタータの浮上・駆動用で、補助超電導体はスライダースタータ両側に設置されており、スライダースタータを案内する。実験に用いた超電導体は高温超電導体（YBCO）で、臨界温度は90[K]、臨界電流密度は176[A/cm²]、下部臨界磁界（H_{c1}）は約50[G]である。超電導体は液体窒素で浸漬冷却した。スライダースタータは厚み方向で磁化した希土類永久磁石（1x1x10mm、保磁力640[kA]）を用いた。

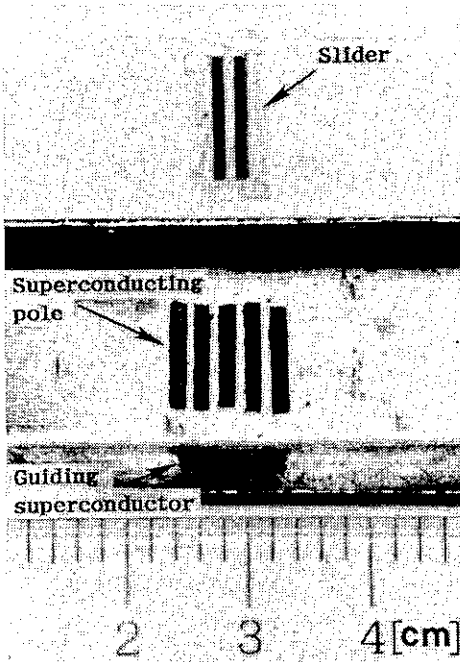


図2 拡大モデルの構造

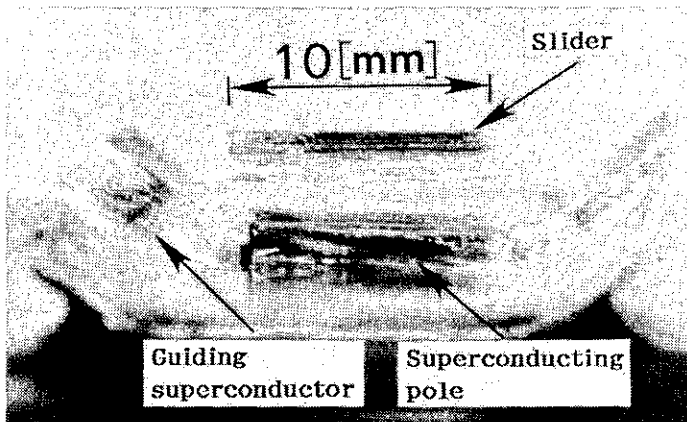


図3 スライダーの浮上の様子

4. 測定結果

4. 1 浮上高さと浮上力

スライダは、図3のようにステータの上にマイスナー効果によって安定に浮上している。浮上高さについては、何種類かのステータの超電導体間隔（ s 値）に対し、スライダーの重さ（浮上力に相当）に対する変化をビデオカメラで測定した。この時、スライダーの重さを増加するとき、減少するときの双方を測定した。

浮上力（スライダーの重さ）は浮上高さが小さくなるほど大きい（図4）。同じ重さのスライダーに対し、超電導体の間隔が大きくなるほど浮上高さは減った。超電導体の間隔が1[mm]で、スライ

ダーの重さが180[mg]である時、浮上高は1.7[mm]で、超電導体に加わる磁界は約300[G]である。この磁界に対応する浮上力を μm モデルの数値解析値[6]（完全反磁性モデル）と比較するため、浮上力が超電導体に加わる磁界の2乗に比例するという仮定に基づいて力を算出した。実験の拡大モデル

は、完全反磁性の μm モデルの値の72[%]に相当する。また、より浮上高さが小さく、超電導体に加わる磁界が強い場合は、拡大モデルの浮上力は計算によって推定される値よりさらに小さくなった。これは超電導体に侵入する磁束が増えることに起因すると考えられる。

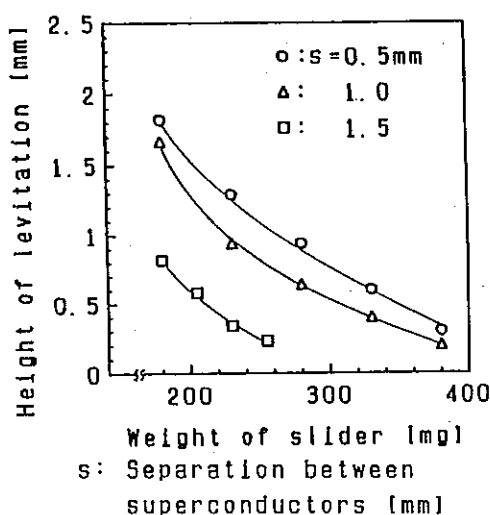


図4 浮上力特性

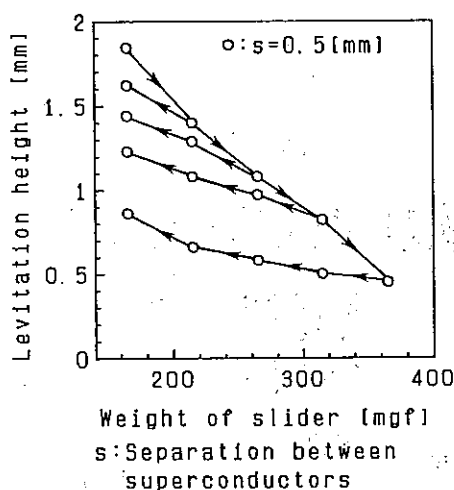


図5 浮上高さのスライダ重量変化に対するヒステリシス

図5は、スライダ重量の増減方向を変えて浮上高さを測定した結果である。スライダの重さが165[mg]で同じ時、スライダの最大重量によって浮上高さが1.84から0.86[mm]まで変化した。興味あることにスライダを軽くしてもスライダは元の高さまで浮上しないこと、即ちヒステリシス特性を示すことが分かる。これは、超電導体に加わる磁界が H_{c1} 以上となると、超電導体に磁束が侵入して、その磁束の一部が残留してしまうからと考えられる。

4. 2 駆動力

マイスナックでは一部の超電導体の超電導と常電導状態を制御して駆動力を得る。通常この制御には臨界電流以上の電流を用いることが想定されているが、拡大モデルではこの電流が1[A]以上と大きくなるため実験が難しい。このため、ステータの超電導体のうち1本を取り除くことで、常電導への転移を模擬した。5本の超電導体を一定間隔で並べた場合と、中央の超電導体を取り外し4本とした場合を比較した。即ち、図6のように、5本と4本の超電導体からなるステータで、安定に浮上したスライダが安定な位置から逸脱するための力を測定し、その差を求めることで等価的な駆動力を得た。スライダとしては、便宜上永久磁石1個(84mg)を使い、もう一

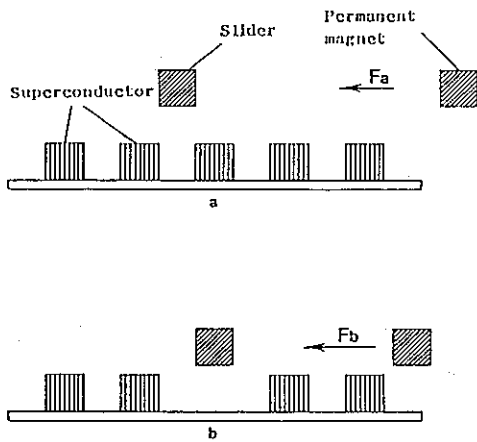


図6 駆動力の模擬実験

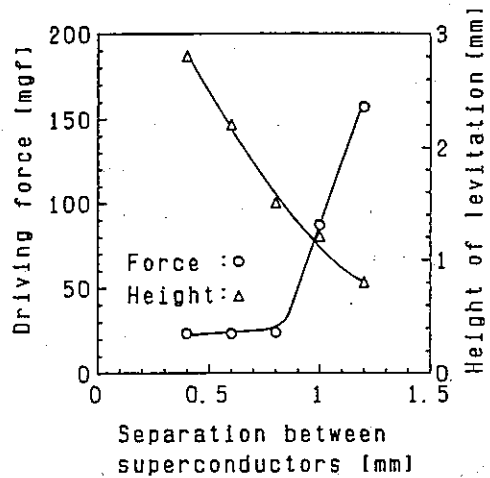


図7 等価駆動力特性

つの永久磁石を横方向から近付けてスライダーを引き付けた。この様にし、何種類かの超電導体の間隔に対して浮上高さと同価駆動力を測定した。

図7はステータの超電導体の間隔による等価駆動力と浮上の高さ（超電導体5本の時）の変化を示す。間隔を小さくすると、浮上高さは大きくなるが駆動力は小さくなる。間隔を0.8[mm]以上に大きくすると、駆動力は急激に増加するが、浮上高さが減ってスライダーがステータと接触する恐れが生ずる。従って、駆動力・浮上力について超電導体の間隔の最適値が存在する。

5. おわりに

以上、提案されたマイスナックの拡大モデルを試作し、浮上力特性と超電導体の状態による制御を模擬して等価駆動力を測定した。その結果、浮上力は浮上高さが1-2[mm]の時200[mgf]程度、駆動力は25[mgf]程度が得られた。低磁界での拡大モデルの浮上力はμmモデルの計算値と比較すると妥当な値であった。また、浮上力と駆動力はステータの超電導体の間隔に影響される事がわかった。さらに、浮上高さは重さの増減に対してヒステリシス特性を持ち、スライダーの重さを変化する方向によって浮上高さが変わった。

なお、この研究に使用した超電導体を提供して下さった日本鋼管鉄鋼研

研究所の皆様には感謝する次第である。

参考文献

- [1] M. Mehregany et al., Integrated fabrication of polysilicon mechanism, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.35, No.6 (1988) 719-723.
- [2] L.-S. Fan, et al., Integrated movable micromechanical structures for sensors and actuators, *ibid.*, 724-730.
- [3] Y.-C. Tai and R. S. Muller, Frictional study of IC-processed micromotors, Abstracts of The 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators & Eurosensors III, Montreux, Switzerland, June, 1989, pp.108-109.
- [4] K. J. Gabriel, et al., In Situ measurement of friction and wear in integrated polysilicon micromechanisms, *ibid.*, pp.109-111.
- [5] Y.-C. Tai, et al., IC-processed micro motors: design, technology, and testing, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Salt Lake City, Utah, U.S.A., February, 1989, pp.1-6.
- [6] Y.-K. Kim, et al., A proposal for a superconducting actuator using Meissner effect, *ibid.*, pp.107-112.

理学部物理学科 勝 本 信 吾
(内線 4162)

実験屋仲間からよく聞かれる事のひとつに、「OPアンプは低温で動作しないのか?」、あるいは、「He温度で動作するOPアンプはないか?」というのがあります。接触抵抗の高い試料をHe温度まで冷やすと、接触抵抗は更に高くなり、熱起電力のゆらぎなどの影響で電圧の測定値はふらつき、ケーブルの容量によって応答は遅くなり、場合によってはとんでもない実験結果が出てしまうこともあります。こんな時、試料のすぐ近くにOPアンプをおき、十分に増幅し、低インピーダンスに変換した後にクライオスタットから取り出せたら、とは誰しも考えることでありましょう。

そこで、実際何度まで動作可能なのか、バイポーラ型のOP07、JFET入力のLF356、オールCMOS型のTLC27について、10倍の反転増幅器を作り、調べてみました。結果を図1にまとめました。自己発熱についてはあまり考慮していませんが、電源は各温度でON/OFFして調べています。最も低

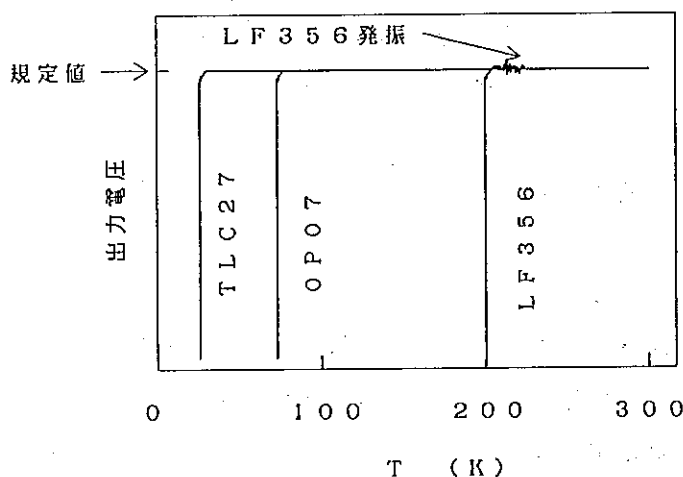


図1 OPアンプの低温出力

温まで動作したのはやはり全CMOSのTLC27で、30Kまで安定に動作しました。OP07は意外に健闘し、ぎりぎりながら、窒素温度でも動作しました。この2つは急激に利得を失い、出力が静かになりました。最も情けなかったのは最もポピュラーなL

F 3 5 6 で、2 2 5 K で発振気味になり、2 0 0 K で完全に発振して使えなくなりました。フォロワーなどで試しても、やはり窒素温度までは使えませんでした。

O P アンプも結構低温まで使えることがわかりました。しかし、H e 温度まで動作可能な O P アンプは、我々の知る限りでは現在の所存在しません。

個別素子ならば、S i の n チャンネル M O S F E T、G a A s の M E S F E T、ヘテロ接合を使った H E M T 等は大体のものは H e 温度まで使用可能です。N M R 等の高周波を使う実験ではこういった素子によるソースフォロワーをクライオスタットに取り付け、インピーダンス変換をし、また素子そのものの雑音指数を減らすことがよく行

われます。図 2 に代表的な素子の特性を示しました。

基本的には直流や低周波回路もこのような素子で組めば良いわけです。しかし、現在の O P アンプによるものと同様な性能の増幅器を個別素子で作るのは、室温でも大変な上、図 2 のような温度による特性の変化も考慮せねばならないので相当難しいと考えられます。

そこで、差動増幅器の入力段の F E T のみをクライオスタットに取り付ける事を考えてみました。できれば図 3 (a) のように初段で利得を取りたかったので

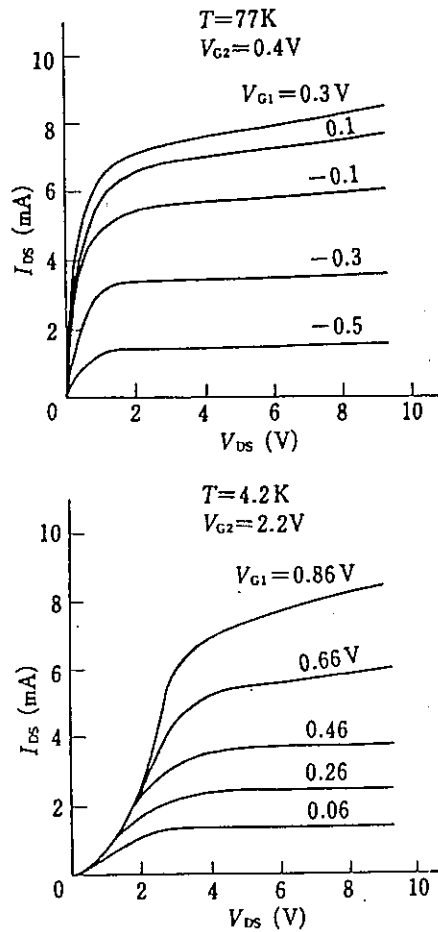
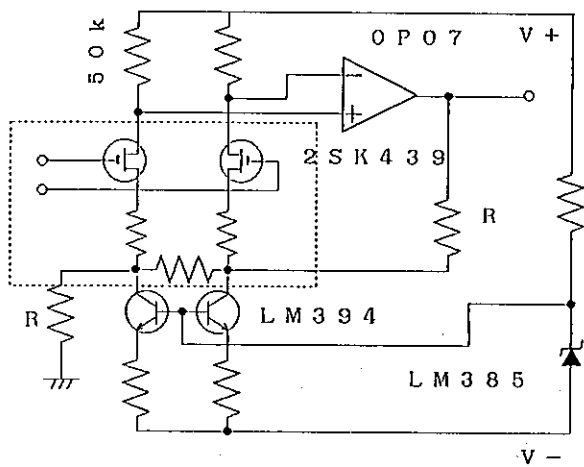
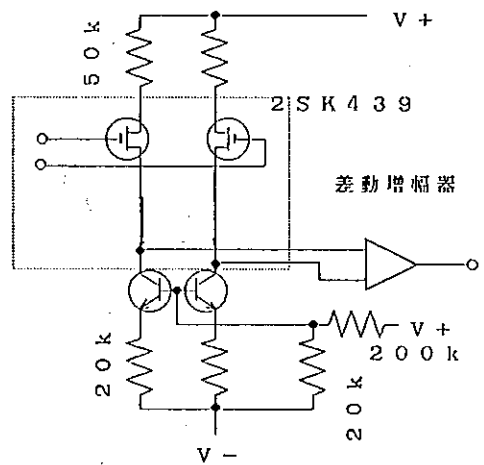


図 2 M O S F E T (3 S K 4 5) の低温特性



(a)



(b)

図 3 破線の中をクライオスタットに取り付けた

すが、帰還回路がクライオスタットの長い配線を含むことになり、発振を止めるのに一苦労しました。発振止めをクライオスタットごとに行うのは大変です。そこで、利得をあきらめ、図 3 (b) のようにフォロワーを室温の差動増幅器で受けるという方法を取りました。大変簡単なものですが、意外に有効でした。これを希釈冷凍機の断熱セルのキャップに取り付け、極低温で絶縁体的になる半導体の電気抵抗を測定した所、フォロワーを付けなかった場合より 2 桁高い抵抗まで信頼性のあるデータを得ることができました。

この方式でまずい点は、特性の良く揃った MOSFET を使わないと、大きな同相電圧除去比や直線性が得られないことです。バイポーラトランジスタや JFET は 2 素子の特性をそろえ、一つのパッケージにしたり、モノリシックのものまで出回っていますが、MOSFET のペアは手に入りにくいようです。安価な単体の品種を多数用意して片端から調べた所、同相電圧除去比は多くは 30 ~ 40 dB、良い時で 70 dB (10 Hz) でした。30 dB しかないと、例えば抵抗測定で、電流端子の接触抵抗が試料の抵抗の 10 倍あるような場合に電圧ライ

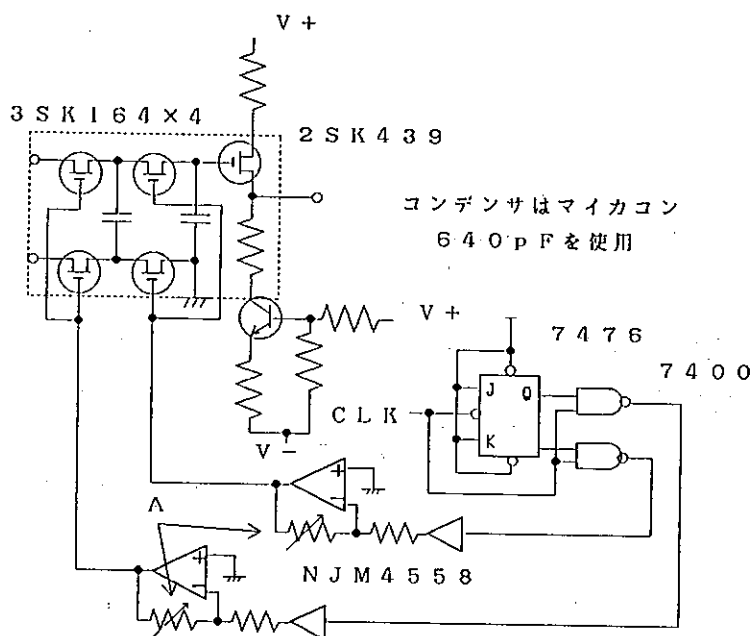


図4 フライングキャパシタ式差動増幅器

ンにこれを用いてもまともな結果は望めません。

それではというわけで、次に、大きな同相電圧除去比が得られるといわれているフライングキャパシタ方式の差動増幅器を低温で動かすことを試みました。これは、図4のように、信号源と増幅器の初段との間でスイッチの切換えによりコンデンサを往復させ、その充放電により間接的に電圧を得る方法です。通常FETスイッチをコンデンサの切換えに使います。

Si MOSFETは一般に低温では単純なスイッチングには使えません。というのは、恐らく電極部分が十分に金属的でないためでしょうが、図2のようにドレインソース電圧が低い所で抵抗が非常に大きくなってしまいうからです。そこで、パッケージの小さなGaAs MESFETによるスイッチを使い、図4のような構成にしました。

この増幅器は室温では80 dB (10 Hz) の同相電圧除去比があったのですが、He 温度では50 ~ 60 dBになってしまいました。原因は、FETスイッチのリークのようです。物理的な理由は今の所不明ですが、4.2 KでMESF

E T のゲートの逆バイアスを増やしてゆくと、ドレイン電流が減少した後、ある所から増加し始めます。図 4 の可変抵抗 A は、この電流の最少点を探すためのものです。この暗電流の増加によって十分な絶縁特性が得られなくなっているようです。この現象はメーカーの異なる幾つかの品種でみられています。

4. 2 K という温度は半導体素子にとっては厳しい環境で、思わぬ障害がおこってなかなかうまく動作してくれません。それだけに、実験屋にとっては面白い課題です。皆さんも仕事の合間に素子をヘリウム容器に（ゆっくりと）放り込んで遊んでみてはいかがでしょうか。面白い結果が得られましたら、筆者にもお知らせ下さい。

液体ヘリウム容器内の 温度分布と時間的経過

教養学部低温サブセンター 小田嶋 豊
(内線 93-302)

1、はじめに

低温センターでは液化機で液化した液体ヘリウムを1000L容器に溜め、10L、30L、50L、100Lの小型容器（位下容器と略す）に汲み出し、各サブセンサー、各研究室に配達するという一連の作業を行っている。使用している容器は窒素シールドタイプと積層シールドタイプの2種類で、保有個数は70以上、その内窒素シールドタイプが9割以上を占めている。容器の液溜め部分が充分冷えている（約20度K以下）状態で次の液体ヘリウムを汲み出す事ができるならば、汲み出しの効率は良くなる。そのための基礎データとして、今回窒素シールドタイプの容器内の温度分布およびその時間変化を測定したので報告する。

2、測定方法

液体ヘリウム蒸発量がカタログ値以下（0.98% day）の30L容器につき以下の測定を行った。

(1) 容器全体が室温の状態でシールド層に液体窒素を充填した後、24時間毎の温度を測定した。但し測定点は容器口より5cm間隔で容器の底までとした。

(2) 液体ヘリウムがなくなった後4Kから77Kまでどのように上昇してゆくか、またその時の各測定点での温度分布がどのように変化するかを24時間間隔で測定を行った。

温度測定は金鉄・クロメル熱電対とデジタルマルチメータ（分解能 $1\mu\text{V}$ ）を用い、マイコン（PC6001）による自動測定とした。

図1は容器の概略図であるが各部の寸法はメーカーにより異なる。なお、測定期間中は定期的に液体窒素を補充した。

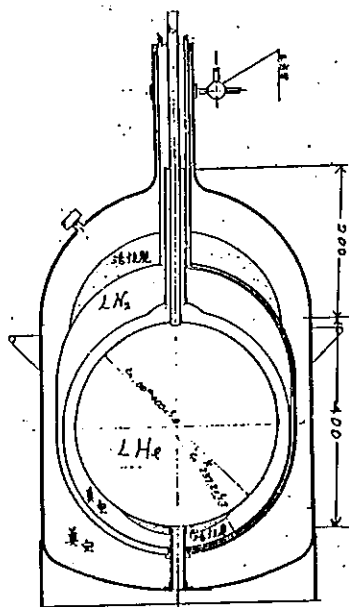


図1：30L容器

3、測定結果

図2、図3はそれぞれ温度降下時及び温度上昇時の容器全体の温度分布を示す。また容器底部の温度の時間変化を図4、図5に示す。どのメーカーの容器もほぼ同じ様な温度分布及びその時間変化を示した。

これらの測定結果をまとめると：

- (1) 25cmの位置の温度があまり変化せず、又その上部分の温度変化が早いのは、この位置で窒素温度にアンカーされており、その上部では真空断熱されていないためである。
- (2) 25cmから45cmまでは真空断熱されたパイプ部分、45cm以下は液溜め部分である。温度勾配はパイプ部分にのみあり、液溜め部分には見られない。
- (3) 液溜め部分に液体窒素を入れない場合、内部が室温から100Kに冷却されるまでには約1週間を要する。

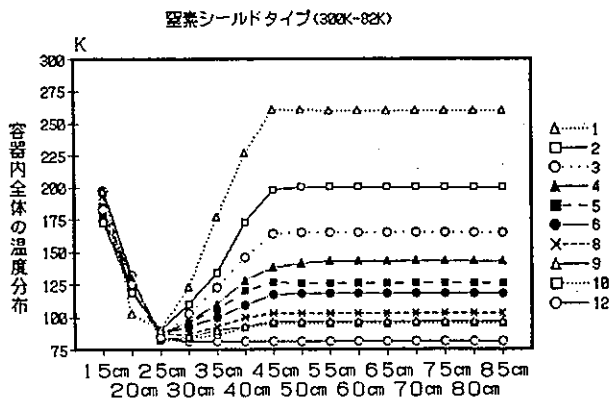


図2：温度下降時の
温度分布

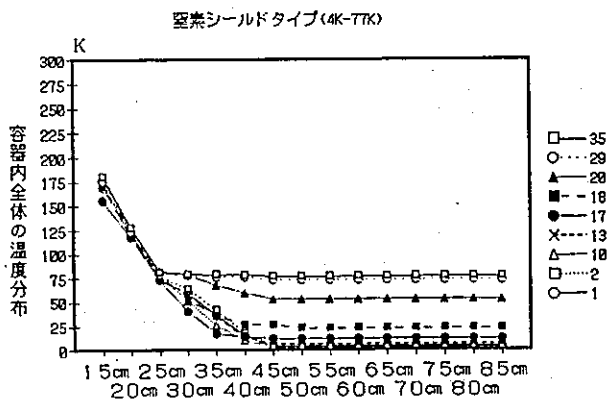


図3：温度上昇時の
温度分布

(4)液体ヘリウムがなくなっても約2週間は10K以下の低温を保つ。しかし約10Kを越えると急に温度が増し、20Kから50Kまで上昇するのにかかる時間は2、3日に過ぎない。

4、検討

測定結果から液溜め部分は熱的に一体と考えてよく、その温度（T）の時間（t）変化は次の式で表わされる。

$$C \Delta T = W \Delta t$$

ここでCは液溜め部分の全熱容量、Wは単位時間当たりの液溜め部分への全侵入熱量である。熱容量として液溜め壁（銅、直径400mm、肉厚0.5mmの球形）及び内部のヘリウムガス（30L）の熱容量を、また侵入熱として77K窒素シールドからの輻射熱とパイプ（ステンレス鋼、肉厚

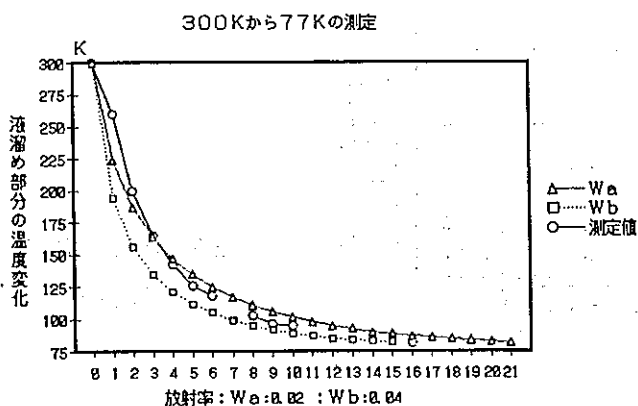


図4：温度下降時の
時間変化

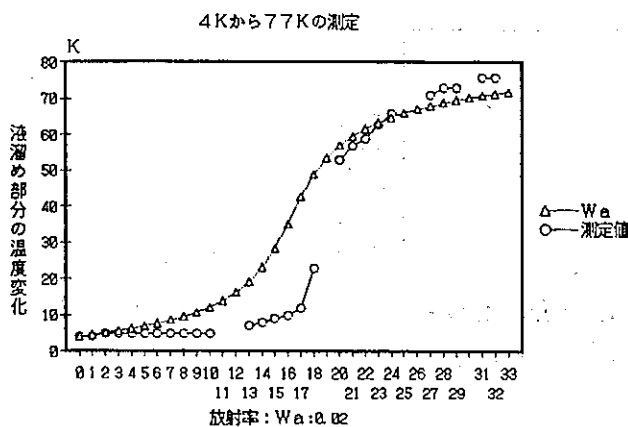


図5：温度上昇時の
時間変化

0.5mm, 長さ200mm)からの伝熱については、さらに、熱膨脹によってパイプ部分を通過するヘリウムガスと十分熱交換すると仮定した。文献にある比熱、熱伝導率等を用いて計算した結果を図4、図5に一緒に示す。

窒素温度以上では輻射熱と銅壁の熱容量が主である。図4中の二つの計算値は壁の放射率をそれぞれ0.02, 0.04とした場合を示す。図より放射率=0.02が妥当であるが、これは液体ヘリウムの蒸発量から計算した放射率とも一致している。

4Kから77Kまでの温度上昇曲線についてもほぼ一致する計算を得た。(放射率は0.02とした。)この曲線の複雑なふるまいは以下の理由によることがわかった。10K以下の低温ではヘリウムガスによる大きな熱容量を持つ。さらに温度上昇による熱膨脹が大きいため、パイプからの伝熱が大幅に減少する。このためこの温度域での上昇率は小さい。しかし温度が高くなるとヘリウムガスの熱容量は減り、また伝熱の補償も効かなくなるため上昇率が増大する。

なお測定では液溜め部の上部と底部には温度差は見られなかったが、銅の熱伝導率データと実際の侵入熱量値を使い見積もった液溜め部分の温度不均一も高々0.01Kである。

5、むすび

液体ヘリウム30L窒素シールドタイプの容器内の温度分布が時間の経過と共にどのように変化していくかを調べた結果、測定に使用した容器と熱伝導計算値との比較はほぼ一致した。その結果、結論は次の通りである。

(1)室温状態にある容器を使用する時は従来2〜3日前にシールド層に液体窒素を充填していたが、今回の結果から予冷の効果をを得るには液体ヘリウムを汲み出す一週間ほど前からシールド層に液体窒素を充填したほうがよい。

(2)液溜め部分の温度は20K付近から急激に温度上昇するので、使用者は液溜め部分に液体ヘリウムを全量汲み出したあと加圧ガスで不必要に内部を暖めないこと、できれば少し残すような汲み出し方を行ったほうがよい。

ここ数年センターでも積層タイプの容器がふえてきている。今後は積層シールドタイプの容器についても同様な測定を行うべきである。今回の報告に当たりセンター大塚洋一、助教授には多大の御指導を頂き深く感謝致します。又、早坂洋技官、佐藤幸一技官、高山敬史技官、安田誠技官の方々も測定が円滑にできるように御援助していただいたことを深く感謝致します。

昭和 63 年度寒剤供給状況

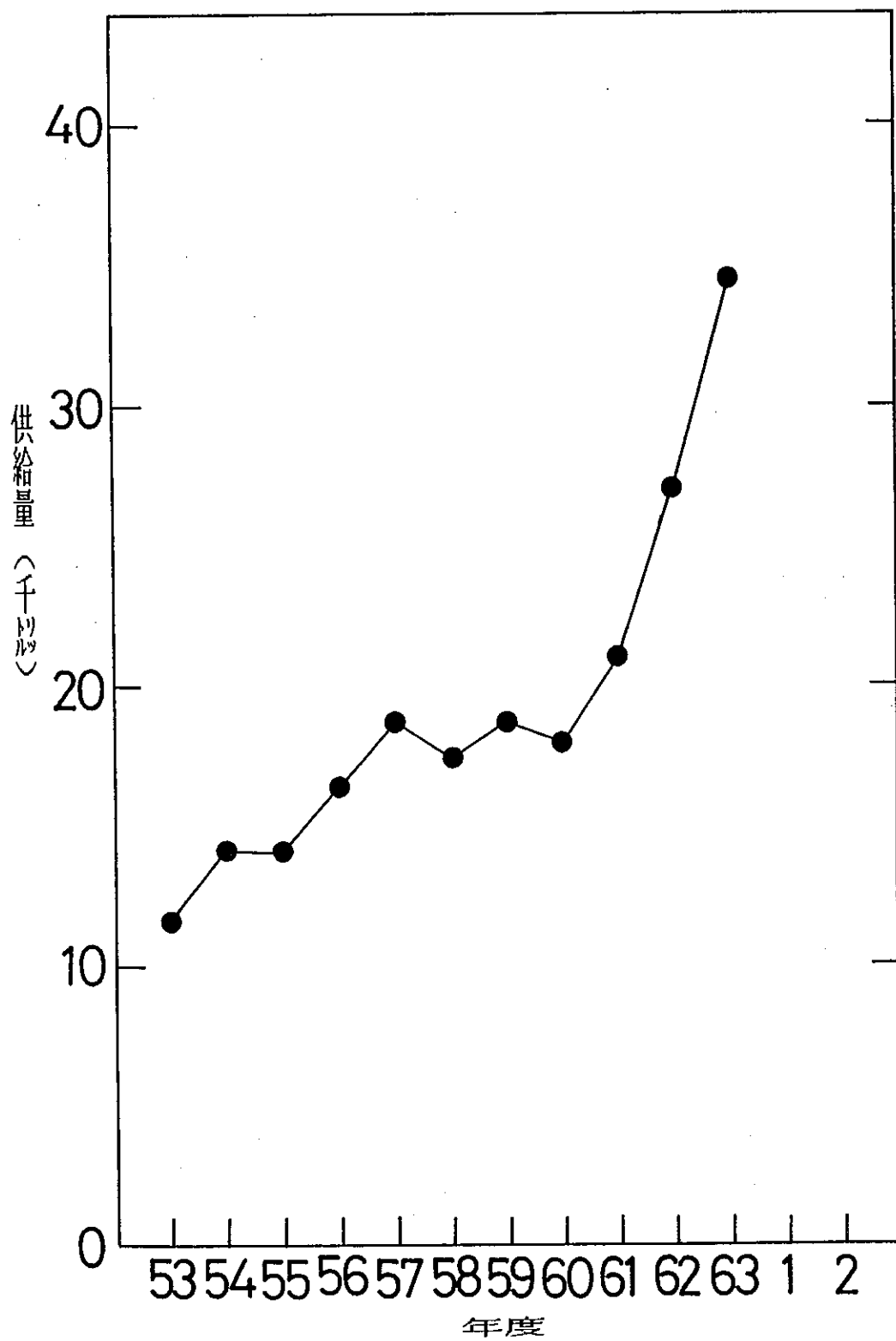
昭和 63 年度液体ハリウム供給表

学部等	供給量 (kg)	%
工学部	16,547	47.5
理学部	9,655	27.7
教養学部	6,025	17.3
農学部	530	1.5
医学部	90	0.3
薬学部	80	0.2
先端研	580	1.7
応微研	210	0.6
総合試験所	60	0.2
低温センター	1,081	3.1
計	34,858	100

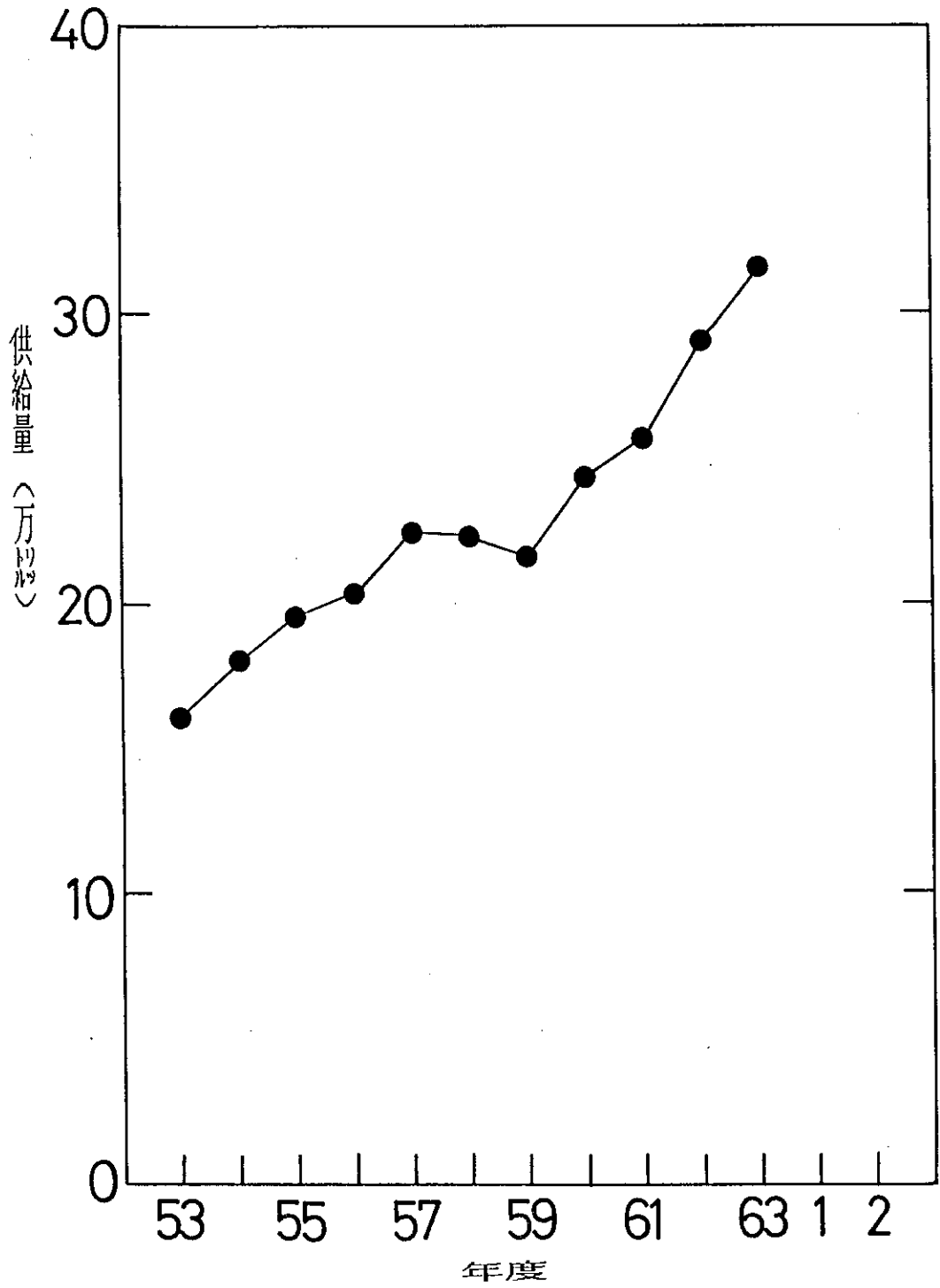
昭和 63 年度液体窒素供給表

学部等	供給量 (kg)	%
工学部	144,127	45.54%
理学部	57,215	18.08%
農学部	15,589	4.93%
薬学部	20,200	6.38%
医学部	19,089	6.03%
総合試験所	1,740	0.55%
原子力総合	8,270	2.61%
応微研	8,735	2.76%
R I センター	12,760	4.03%
地震研	120	0.04%
総合資料館	120	0.04%
付属病院	26,991	8.53%
分院	1,510	0.48%
計	316,466	100.00%

液体ヘリウム供給量の推移



液体窒素供給量の推移



低温センターだより編集委員会

(1989.11 現在)

編集委員長

小林俊一センター長 理・物理 (4157)

編集委員

池 畑 誠一郎	理・物理	(4161)
坪 野 公 夫	理・物理	(4142)
小 杉 信 博	理・化学	(4333)
内 田 慎 一	工・総合試	(7666)
前 田 京 剛	工・物工	(6848)
柴 田 浩 司	工・金属材料	(7147)
小宮山 進	養・基礎科	(93-453)
大 野 公 一	養・化学	(93-255)
湯 本 昌	医・解剖	(3335)
西 沢 直 子	農・農芸化学	(5107)
大 塚 洋 一	低温セ	(2860)
島 田 宏	低温セ	(2861)