

# 高速回転する超低温冷凍機の建設と超流動 $^3\text{He}$ の量子流体力学の研究

## Construction of High-Speed Rotating Cryostat for Ultra-Low Temperatures and Research on Quantum Fluid Dynamics of Superfluid $^3\text{He}$

石黒亮輔<sup>1\*</sup>, 早田恵美<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 低温物理学研究室

<sup>2</sup>京都大学大学院理学研究科 物理学教室

R. Ishiguro<sup>1</sup>, E. Hayata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Low Temperature Lab., Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University

<sup>2</sup> Machine Shop for R&D, Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University

### 1. はじめに

$^3\text{He}$  の超流動は典型的な巨視的量子現象で、その様々な流体的な性質は巨視的な波動関数（オーダーパラメーター）によって記述される。渦というマクロな現象も、トポロジカルな欠陥として明確に定義され、渦の周りの速度ベクトルの周積分である渦度が  $\hbar/2m_3$  に量子化され（ $\hbar$ ：プランク定数， $m_3$ ： $^3\text{He}$  原子の質量，分母の 2 はクーパー対に起因）量子渦と呼ばれている。また、超流動  $^3\text{He}$  は P 波三重項超流動であり、その内部自由度によって多彩な相や織目構造(Texture)、渦構造が存在する。実際、磁場の無い時には高压高温側で A 相、低压低温側で B 相の 2 つの相が観測される。織目構造は超流動  $^3\text{He}$  に特徴的なもので、壁や磁場、流れなどに起因するオーダーパラメーターの空間的な変化の構造である。特に細い円筒容器内に実現するとされる Mermin-Ho 織目構造(MH)[1]と呼ばれるものは円筒軸方向に自発的な角運動量ベクトルを持つ

ことで知られており興味深い。また、超流動  $^3\text{He}$  のクーパー対は P 波の対であるため 1 個当たり  $\hbar$  の固有角運動量が存在する。B 相のオーダーパラメーターは等方的だが、A 相のオーダーパラメーターは非等方的で、すべての対の持つ軌道角運動量が 1 方向に揃っている。超流動発見以来、この固有角運動量に伴う巨視的な角運動量が観測されるかどうか？は大きな問題となっているが未だ解決されていない。この問題については MH を回転させることで、NMR の共鳴周波数変化から固有角運動量が観測可能であることを高木が予言しており[2]、「固有角運動量の検証」は回転実験の大きな目標である。一方、ヘルシンキ工大では織目構造の影響の小さい広い空間の中で幾つかの量

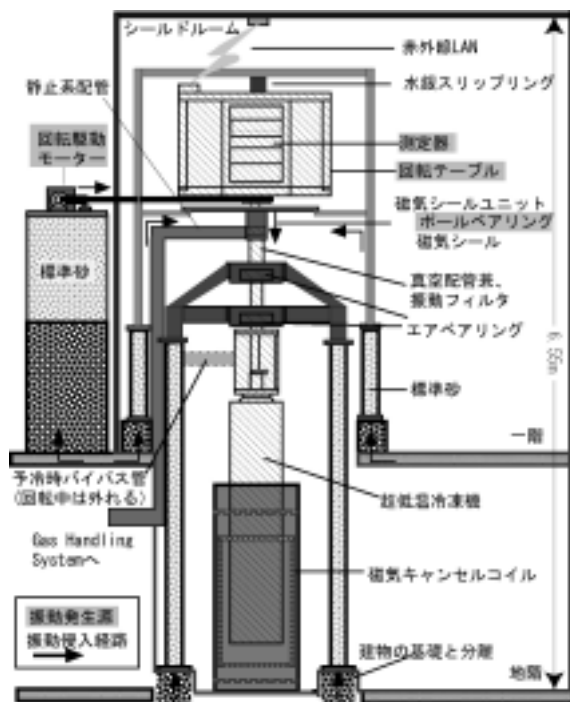


図 1 回転超低温冷凍機全体像（斜線部分が回転）

子渦を観測している[3]．制限された狭い空間内では，MH などの織目構造が存在し，そこに出来る量子渦はどのようなものか？また渦と織目構造の関係はどうなっているか？など超流動  $^3\text{He}$  に特有の問題がある．ところが狭い空間内の超流動  $^3\text{He}$  の精密な実験を行うためには，より高速な回転が必要になる．

超流動  $^3\text{He}$  の超流動転移温度は約 1 mK 程度であるため，実験の多くは核断熱消磁法を使った超低温冷凍機を用いて行われてきており，回転超流動  $^3\text{He}$  の実験には回転超低温冷凍機が不可欠である．現在，回転超低温冷凍機は世界で東大物性研を含めて 4 箇所にある．この研究の初期に，我々はカリフォルニア大バークレー校の回転超低温冷凍機を使って実験を行い，回転による織目構造の変化を観測し[4]，またその技術を学んだ．その後，日本でも回転冷凍機建設の機運が高まり，京大と東大物性研との共同研究で東大物性研に建設することになった．この実験ノートでは東大物性研に建設した世界最高速の回転超低温冷凍機[5]について紹介し製作の上で特に注意した点等について述べ，次にこの高速回転冷凍機を使った回転超流動  $^3\text{He}$  の実験について述べたい．

## 2. 高速回転する超低温冷凍機

図 1 に我々が建設した高速回転超低温冷凍機の全体像を示す．この装置は大きく分けると室温部の回転機構と 1 K ポットのない希釈冷凍機，核断熱消磁部の 3 つの部分から構成されておりそれぞれに回転実験のための工夫がなされている．

### 2-1 核断熱消磁冷凍部

核断熱消磁法は原子核の核スピンを利用した冷凍技術で，現在，超低温の最も有効な生成法である．核断熱消磁は通常，銅で出来た核ステージと超伝導マグネット，予冷のための希釈冷凍機，熱スイッチで構成されるが，回転冷凍機では加えて室温部に地磁気キャンセル用のマグネットが必要となる．核断熱消磁法による実験を行うには核ステージへの熱流入は  $\sim \text{nW}$  以下に抑える必要がある．このため，振動や磁場変化による渦電流の発生を極力抑えなければならない．渦電流は主に「断熱消磁用の磁場掃引時」，「断熱消磁用の大きな磁場中での核ステージの振動」，「地磁気中（実験室の磁場）での核ステージや金属試料の回転」などで発生する．これらを防ぐために核ステージの形状が工夫される．

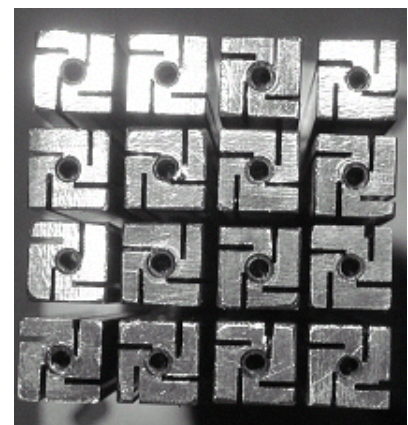


図 2 核ステージ断面写真(底部)

回転させる必要のない核ステージでは， $\omega$  の対策のため，一塊の銅から切出して断面にスリットをいれたものが一般的である．ところが一塊の銅にスリットを入れるだけでは， $\omega$  の「地磁気（水平成分）中での回転」による渦電流の発生は防ぐことが出来ない．なんだ，地磁気程度か！と思っはいけない．何の対策も採らずに 1 回転/秒で回転させた場合に発生する熱は，許容される熱流入（10 nW 程度）の 1000 倍以上になる． $\omega$  による発熱は回転速度，磁場の大きさ，核ステージ断面の対角線の長さ，それぞれの 2 乗に比例する．この発熱を防ぐために，核ステージは図 2 の写真のように  $\pi$  型にスリットを入れた棒を 16 本束ね，電子ビーム溶接によってフランジに接合した．16 本の棒に分けたのは断面の対角線の長さを 4 分の 1 にすることで発熱を 16 分の 1 に抑えるためである．さらに細くしたほうが  $\omega$  による発熱は防ぐことが出来るが，工作・組み立て精度と剛性との兼ね合いでこのような形となった．また， $\pi$  型のスリットは  $\omega$  による発熱を抑える理由で入れている（設計時は写真を撮るこ

とを考えハーケンクロイツにならない様に、その方向には特に注意した)。次に、室温部に地磁気をキャンセルするためのマグネットを作った。ここで地磁気と呼んでいるのは地磁気そのものではなく、断熱消磁の磁場によって部屋が磁化された影響も含めたものである。注意したいのはコンクリート中にある鉄筋などで、これらは核断熱消磁で磁化され磁場分布を滅茶苦茶にし磁場のキャンセルを困難にする。(パークレー校では核ステージの上下で磁場の方向が反対向きになっていた。)物性研の冷凍機の土台は核ステージから1 m 以上離れていたため、磁場はほぼ一様で(最初の励磁で大きさと方向は大きく変わったが)比較的キャンセルしやすかった。キャンセルしなければならない磁場は、一番に回転軸に対して垂直方向の横磁場であり、次に軸に平行な方向の磁場勾配である(軸に平行な一様磁場では渦電流は発生しない)。地磁気キャンセル用のマグネットは核ステージ周りの高さ±30 cm 程度の空間に一様に磁場を作るように設計し、直径80 cm 高さ2 m のボビンにコイルを巻いた。室温で3軸ガウスメーターを使い、地磁気を10%以下にキャンセルしたことを確認したが、実際には超低温で回転させて発熱が少なくなるように、キャンセル磁場の大きさと方向を最適化する必要がある。(超低温での温度変化の測定が一番感度がよい!)

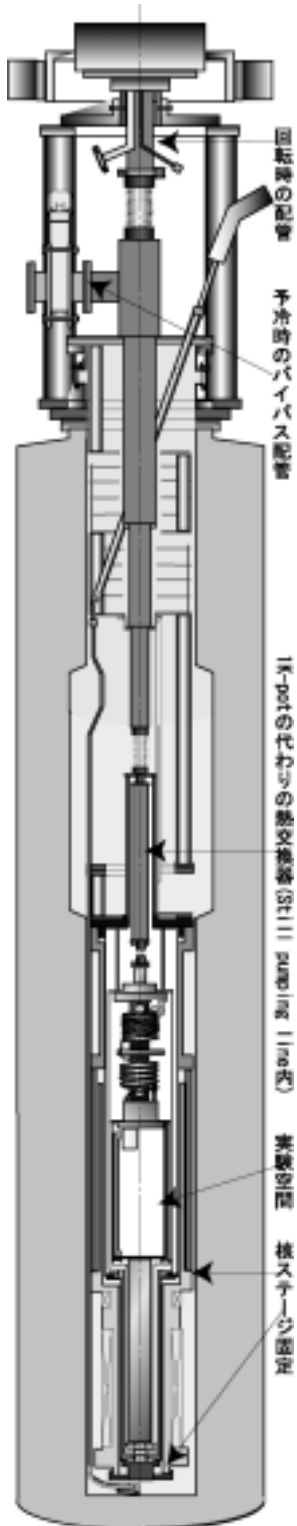


図 3 冷凍機内部

また、回転時は常に力を加えることになるため、装置は特定の回転数で固有共振を起こしやすい。パークレー校の実験ではの対策を普段通りにしたところ、共振による発熱がいくつもの回転数で起こり非常に悩まされた。このため、超伝導マグネットから核ステージまで完全に一体し、相対的な振動が起こらないようにした。核ステージは上下で熱伝導率の小さい高分子のねじを使いシールドから断熱管まで引っ張るように固定した。固定は熱収縮が起こっても常に収縮力がかかるよう注意した。また、断熱管と超伝導マグネットの間はギャップ 100 μm の同心円状のジグを使い、熱収縮の大きい縦方向の自由度を残しかつ横方向の固定を行った。この強力な振動対策によってこの冷凍機はトランスファー時や地震などの振動に対しても非常に強いものとなった。

これらの結果、熱流入は1回転/秒の回転下で7 nW 程度まで抑えることができた。静止下で核断熱消磁ステージへの熱流入が6 nW 程度なので回転に起因する発熱は1 nW 程度である。

2-2 1Kポットの無い希釈冷凍機

### 2-2 1Kポットの無い希釈冷凍機

この回転超低温冷凍機は核ステージの予冷用に1Kポットの無い希釈冷凍機を用いている。このタイプの希釈冷凍機はJT(ジュール-トムソン)予冷希釈冷凍機として市販されているが、Still(<sup>3</sup>He 蒸留部)より高温側は自作した。JT 効果あまり関係なく、1~3 気圧程度に加圧した循環ガスを Still からの戻りガスによって予冷することが1Kポットの代わりとなる。その際、減圧するためのインピーダンスは通常の希釈冷凍機の1Kポットの後に付ける主インピーダンスの10倍程度で、この冷凍機では $2.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。また、回転時にはStillの排気管を細いものにする必要があり、これでは循環量が稼げなく大きな冷凍能力を得られないため、核ステージ予

冷の時には太いパイプ管をつなげた。予冷時の循環量は  $250 \mu\text{mol}/\text{sec}$  程度で、有効モル数  $23 \text{ mol}$ 、 $9 \text{ T}$  の核ステージを 1 日で  $13 \text{ mK}$  まで予冷する。負荷のない状態での最低温度は  $8 \text{ mK}$  である。回転冷凍機では真空配管は少ないほうがよく、また  $1 \text{ K}$  ポットは何かとトラブルの原因となるため、ないに越したことはない。この冷凍機では  $1 \text{ K}$  ポットがなくとも十分な循環量を取り、核ステージの予冷が可能であることを初めて実践した。

### 2-3 室温部

回転冷凍機の室温部で重要なことは振動を発生させないことと、振動を低温部に伝えないことである。室温部の基本的な部分は物性研六本木時代に久保田研で運転していた回転希釈冷凍機の回転機構を流用したため、この対策は十分に行っており、非常に調子がよかった。静止系と回転系との接合が最も振動の発生源になりやすいため、この部分に一番注意を払う必要がある。まず、冷凍機自身はエアベアリングによって支える。エアベアリングは非常にスムーズなベアリングで回転冷凍機には欠かせない。この冷凍機では図 1 の真空配管兼振動フィルターで示された柔らかいパイプ管（ビニールホース）により「エアベアリングから下の部分」と「回転モーターに繋がっている上の部分」とが分かれており、回転テーブル等の振動が低温部に伝わらないようにしている。

希釈冷凍機の真空配管は磁気シールを用いて回転系と接続する。磁気シールは磁性流体を真空シールに使ったもので、摩擦が少なく高速でスムーズな回転が可能である。測定器等を搭載する回転テーブルはこの磁気シールユニットに付属のボールベアリングで支えている。

電源ラインは水銀を用いたスリップリングと呼ばれる回転コネクタを用いている。AC100V-20A と接地ライン(GND)をこのコネクタでつないでいる。回転冷凍機の GND は基本的にここでしか接地されていないため、回転冷凍機上は GND が弱く測定器の配線には注意を要する。また、回転させると風を切るため測定器が温度変化してしまいドリフトの原因となった、風除けは必須である。

測定信号はスリップリングを用いて静止系とつなぐ方法もあるが、ラインの数に制限を受ける。この冷凍機ではコンピューターを回転テーブルに載せ、信号は処理し赤外線 LAN で静止系に送った。コンピューターは VNC というリモート制御用のソフトを用い LAN を通じて制御し、測定用のプログラムは Labview を用いた。回転しているときには手で測定器を触ることができないので、測定はすべて自動化した。これにより週に 2 回のトランスファーのとき以外、ほとんど装置に触らずにデータをとるようになされた。また、冷凍機の状態は e-mail でチェックできるようにし、京都に戻っているときも常に監視できるようにした。

### 3. 狭い円筒容器内の超流動 $^3\text{He}$ の研究

我々は高速回転冷凍機を用いて直径  $100 \mu\text{m}$  と  $200 \mu\text{m}$  の 2 種類の細い円筒容器中の回転超流動  $^3\text{He-A}$  の研究を行った。このような大きさの円筒空間の中にできる織目構造は MH などが理論的には予測されていたが、実験的に検証されていなかった。我々は NMR によって、この円筒容器内にできる織目構造を決定し、織目構造の回転による変化、織目構造と各々の織目構造中の量子渦の生成・消滅の研究を行った。

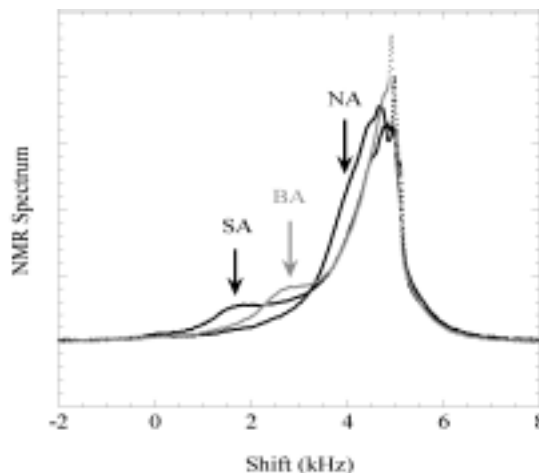


図 4 直径  $100 \mu\text{m}$  のセルに出来る 3 種類の織目構造の NMR スペクトラム。横軸はラーマー周波数からのシフト

### 3-1 直径 100 $\mu\text{m}$ の円筒空間内の織目構造と自発的角運動量

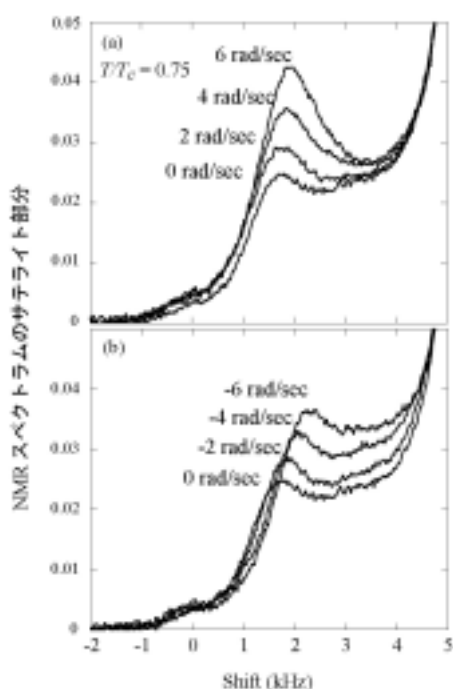


図 5 SA Texture のサテライトの回転変化。+向きで転移させた後、(a)は+方向、(b)は-方向に回転させる

特徴を反映していると考えられる。

このなかで特に興味深いのが SA の回転変化である。SA の回転に対する振る舞いは、NA や BA から転移させる時の状態によって（静止下の場合と回転下の場合）、異なる。図 5 は +6 rad/sec で回転させているとき熱擾乱（急に温度を上昇させるなどの操作）で転移させた SA の回転変化であり、明らかに回転方向による差があり回転に対して非対称である（-回転で転移をさせると、回転変化は逆）。一方、静止下で転移した場合は、その後の回転方向による差は観測されないが、静止下で転移させた SA のスペクトラムの変化は、回転下で出来る SA の正負の絶対値が等しい回転速度のスペクトラムの平均に等しい。ここで重要なのは我々のサンプルは S/N をかせぐために 150 本の円筒からのシグナルの平均値を観測していることである。このことを念頭に結果を解釈すると、SA は軸方向に巨視的角運動量を持っており、回転下で転移させるとその方向が選ばれる。静止下で転移させた場合には SA の持つ角運動量の方向は確率的で 150 本のセルの約半分は + 向きで残りは - 向きということになり、結果的に + 向きと - 向きの SA の平均が観測されるということになる。つまり、SA は冷凍機の回転の有無にかかわらず、自発的に角運動量を持っている織目構造であることを示している。これは SA が MH である可能性を強く示唆しており、計算との比較から固有角運動量の検証が期待される。

### 3-2 直径 200 $\mu\text{m}$ の円筒空間内の織目構造と量子渦[6,7]

一方、直径 200  $\mu\text{m}$  のセルでは量子渦の生成消滅現象が観測された（直径 100  $\mu\text{m}$  のセルでは渦の臨界速度が高いため量子渦は観測できていない）。200  $\mu\text{m}$  のセルでは 100  $\mu\text{m}$  のセルに比べてサテラ

イトの強度が小さく、また磁場の均一度も4倍ほど悪かったため、不安定なひとつの織目構造を除いてNMRのサテライトによる織目構造の同定は困難であり、 $100\ \mu\text{m}$ のセルの織目構造との対応は取れていない。しかし、直径 $200\ \mu\text{m}$ のセルでは回転によって渦が生成したために驚くべき結果が得られた。図6はNMRピークの高さの回転変化をプロットしており、織目構造の変化を示している。回転変化の方向は矢印で示してあり、また白丸は+向きに回転速度を変化させたときの値で、黒丸は-向きに変化させたときの値である。まず、(a)のグラフを見てもらえると分かりやすいが、加速した時ピークの高さが急激に小さくなる点がある。ここではNMRスペクトラムに量子渦に特徴的なサテライトシグナルが観測される。また減速した時にも急激な変化がありサテライトシグナルはここで消える。グラフを見て分かるように大きなヒステリシスがあり、また急激な変化は $\pm 0.5\ \text{rad/sec}$ の間で起こっており、この変化のあとにはシグナルが安定することから、一本の量子渦の生成消滅現象が観測されたと考えられる。さて、(a)と(b)の違いである。どちらも $+2\ \text{rad/sec}$ で回転させながら超流動転移させた後に $T/T_c = 0.75$ で回転変化を観測したのだが、(a)は磁場を回転と反平行に、(b)は平行にかけた状態で $T_c$ を通過している。また、 $T_c$ 通過時の磁場と回転方向を同時に反対向きにした場合、図を正に鏡に映したように反対向きの変化になる。これはエネルギーに回転と磁場に一次で結合する項があり、織目構造形成に大きな影響を及ぼしていることを示す。このような回転と磁場に1次で結合する効果はアインシュタイン-バーネット効果などが考えられるが、詳しい説明はまだ出来ていない。また、(a)は渦の生成速度は回転方向に対称であり、(b)は $T_c$ 通過時の回転方向に $0.6\ \text{rad/sec}$ ほどシフトしている。つまり、(b)では明らかに織目構造が $T_c$ 通過時の回転方向を記憶しており、織目構造が巨視的な角運動量を持っているといえる。この回転方向の記憶は渦によって壊れることは無い。(a)は一見回転方向に対称であるが、渦なし時の加速時に折れ曲がりが見られることからこの部分で織目構造が転移を起こしている可能性もある。

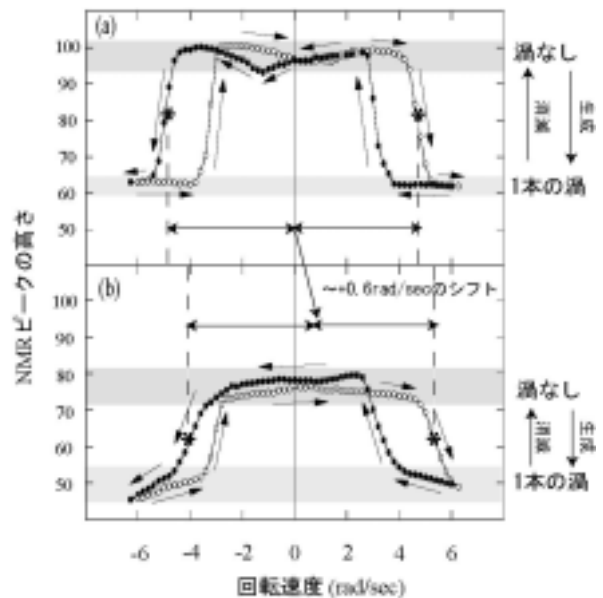


図6 直径 $200\ \mu\text{m}$ のセルのNMRピークの高さの回転変化。 $T_c$ 通過時、 $+2\ \text{rad/sec}$ で回転し(a)は磁場と回転が反平行、(b)は平行で冷却

#### 4. さいごに

この高速回転の冷凍機の回転速度はこれまでの最高速度の高々2倍である。しかし、これまで測定できなかった回転領域はなかなか多彩で、そこには多くの物理がある様である。この冷凍機の最初の実験ですら最高速の回転が大きく結果に寄与した。今後も超低温の回転実験がさらに魅力あるものになることに期待したい。

#### 5. 謝辞

この研究は多くの人の協力によって成すことができました。冷凍機の開発には物理学教室技術開発室の藤井佑生氏をはじめ他皆様、東大物性研五十嵐武氏、高橋健氏の他皆様。また、この研究全般にわたって水崎隆雄教授、佐々木豊助教授、山下穰氏、低温研の皆様、大阪市大石川修六助教授、東大

物性研久保田実助教授，石本英彦教授，京大医短福田耕治教授，また理論面からは大見哲巨教授，福井大の高木丈夫助教授に大変お世話になりました．ここに感謝致します．

#### 参 考 文 献

\* 現所属機関 パリ高等師範学校-統計物理研究所

- [1] N.D. Mermin and Tin-Lun Ho, Phys. Rev. Lett.**36**, 594 (1976).
- [2] T. Takagi, J. Phys. Soc. Jpn. **65**,1722 (1996).
- [3] O.V. Lounasmaa, E. Thuneberg, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **96**, 7760 (1999).
- [4] O. Ishikawa, *et. al.*, Physica B, **284-288** 248 (2000) 248.
- [5] M. Kubota, *et. al.*, Physica B to be publisHed (2003).
- [6] R. Ishiguro, *et. al.*,Physica B to be publisHed (2003).
- [7] R. Ishiguro, *et. al.*, to be publisHed.