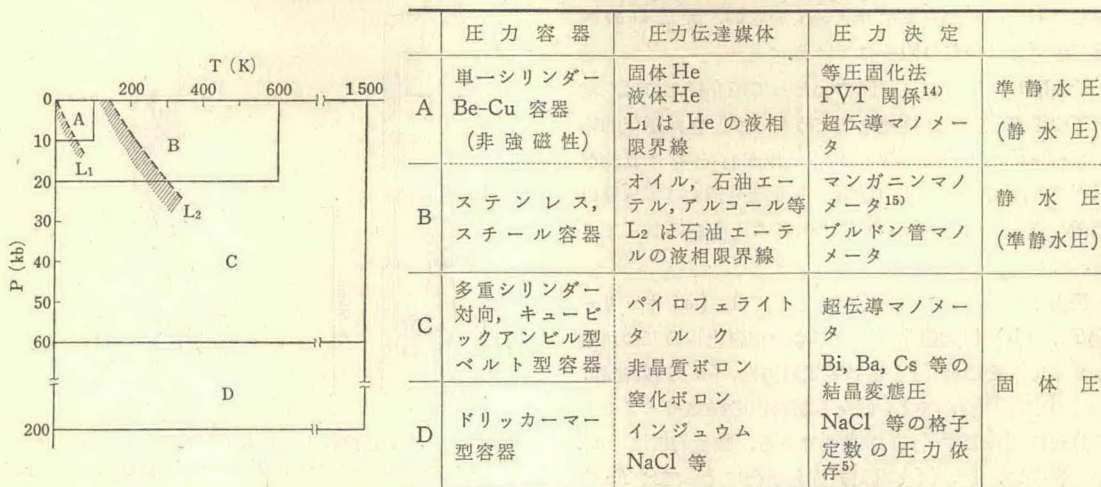


Table 1 Summary of high pressure technique for the study of magnetism.



場合を除き、常圧下の場合にはわざわざ断らないことにする。

さて、圧力効果の研究は、実験面では圧力下でも種々の磁気的測定が可能であるような加圧技術と、定性的にもせよ結果の解釈ができる磁性理論（とくに常圧下）との発展とともに進んできた。その点で、理論面での深い考察はともかくとして、各種磁性体についてその時点までの詳細な実験結果と一応の解析とをまとめた Bloch, Pavlovic<sup>4)</sup> (1969) の総合報告は労作であったが、その後今日までの約 10 年間の発展はさらに一段と目覚ましく、すべてを紹介することは出来ない。したがって、本稿では強磁性体についての最近の研究を筆者なりに幾つかの系統的な流れのなかで理解に努め、まとめてみたい。

## 2. 磁気測定と高圧技術

高圧技術の最近の進歩は目覚ましく、圧力の発生もしくは試料の加圧だけからみれば、要求する大きさの圧力が必要な温度範囲で加えられる装置はほぼ確実に揃えられる。しかし、緒言で述べたことから推察でき、また違う研究分野でも同様と思うが、ある一つの磁気的特性の測定手段自体は、常圧下でも高圧下でも同じである。したがって、それらの特性に応じた測定を可能にするためには、装置にも自ら制限があるが、また特色もあるのは当然である。たとえば、試料と測定装置の一部（コイル 熱電対、リード線などの非計測装置）を挿入・保持または封入する圧力容器 (pressure vessel, pressure bomb), または圧力セル (pressure cell)\* についてみる

\* 文献では容器とかセルの区別をせず単にセルのみを使っている場合もあるが、筆者らは後述の理由でキュービック（正六面体）アンビル用<sup>5)</sup>のセルと呼んでいる。

と、通称クランプ式圧力容器（マイクロポンと呼んだ時期もある）は低温高圧用にはいうまでもないが、トルク法による結晶磁気異方性の測定には温度にかかわらず必要であるし、また容器の材質としては多少耐圧性を犠牲にしても非強磁性ステンレスや Be-Cu などが必要である。しかし試料が強磁性体であっても、測定する物性量または測定手段が直接磁気的な場合と間接的に磁性が反映される場合とでは、実験条件を区別して選択してよいことを付け加えておく。

高圧実験で不可欠なのは、圧力決定ないしは圧力較正に使う物質（圧力マンノメータ）であるが、これも適材適所として選ばねばならない。たとえば、低温では超伝導物質 (Sn など)、マンガン線は室温をはさむ温度範囲、アンビル方式では X 線による NaCl の格子定数の測定の併用などである。

圧力媒体によって、静水圧、準静水圧、固体圧と分けられるが、たとえば、媒体は液体であった、といっても使用温度・圧力を明記しないと固化した状態で加圧している場合もある<sup>6)</sup>。

以上のようにして、経済的な面は別として、要求温度・圧力範囲、圧力容器の設計と材質、マンノメータの選択、圧力媒体の種類などの組み合わせを決めると一応圧力下の測定準備は完了する。とはいっても組み合わせには長所も短所もある。磁性の圧力効果にも有益な高圧技術一般に関する解説ないしは技術論文の幾つかを紹介すると、(1) 液体ヘリウム温度付近 (低温高圧) は、箕村<sup>7)</sup>, Paureau ら<sup>8)</sup>, (2) 室温をはさんで 100~600 K ぐらゐは、三井<sup>9)</sup>, 辰本ら<sup>10)</sup>, Kawai, Sawaoka ら<sup>11)</sup>, (3) 1400 K ぐらゐまで (高温高圧) は、Leger ら<sup>12)</sup>, Brouha, Rijnbeek ら<sup>13)</sup> である。さらに磁性に限ってみて今日まで使用されてきた加圧条件の概要を Table 1 にまとめ



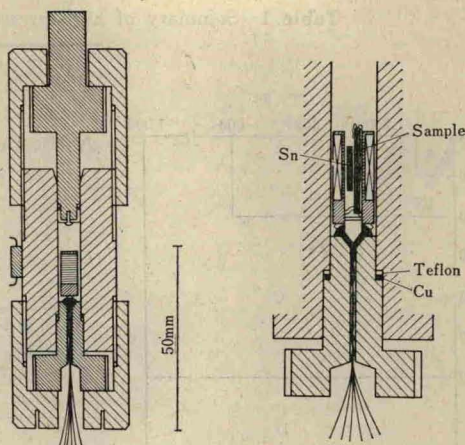
た. A, B, C, D のいずれの区分でいかなる磁性量の測定がなされているかまではまとめていない. ただ D の区分での研究はかなり限られている.

**Table 1** で広い温度範囲にわたって紹介したのは, 常圧下の温度依存性が高压下でどうなるか, また磁気的特性量- $p$ - $T$  のような三次元相図の作成なども本質的な情報を与えてくれ, 圧力効果, 温度効果相まって本質の概観, さらに解明が行なわれることもあるからである.

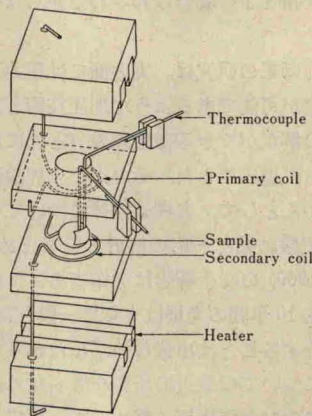
圧力下の強磁性体の磁気測定としては, (a) キュリー点  $T_c$ , (b) 自発磁化 (測定では飽和磁化) の二つが最も基本で, その他 (c) 結晶磁気異方性, (d) 内部磁界, (e) 中性子回折がある. 個々の試料内の磁気モーメントの分布に関しては (e) が必要である. 数量的には (a) が一番多い. また (f) 電気抵抗も場合によっては  $T_c$  の決定にも利用されるとともに, 磁性を反映する解析のための測定量として意義\*がある<sup>16)</sup>. 測定法の詳細はそれぞれの文献, また (a)~(c) については実験書<sup>17)</sup>にゆずり, ここでは概略だけにとどめる.

(a)  $T_c$  の決定には飽和磁化の温度・磁界依存, 磁気変態に伴う現象の利用 (たとえば試料またはサーチコイルの自己・相互誘導<sup>18,19)</sup>, 強制磁気抵抗横効果<sup>20)</sup>, 前述の電気抵抗など), (b) 磁力計による測定例<sup>21,22)</sup>もあるが, 多くは磁気誘導法による磁束の測定<sup>23,24)</sup>である. これらはいわば直接測定法であるが, 強制磁歪の測定から熱力学の公式を用いて換算する方法<sup>25)</sup>がある. 強制磁歪そのものの意味とは別に, 圧力装置を持たなくても圧力効果が求まる方法である. (c) 磁化容易方向と困難方向での磁化曲線より求めた例<sup>26)</sup>もあったが, 最近ではトルク法<sup>27)</sup>によっているのが多い. (d) は Mössbauer 効果の測定<sup>28)</sup>による.

上記の測定に対しての圧力の大きさは, いくぶん研究者にもよるが, 大まかにみて (d) がとび抜けて大きく, 次いで場合により (a) である. (b), (c) また低温で (a) の三つはほぼ同程度というところで, 高压下の物性研究一般からみると初期圧力効果または圧力微分とも呼ばれるぐらいの圧力領域といえるが, 常圧下の物性を支配しているパラメータのどれが圧力に敏感か, または圧力効果を支配するか, という研究目的には (筆者らは磁性の場合の (a), (b), (c) 項は, とくにこれに当てはまると考えている), 十分有効な圧力範囲とみてよい. 参考のために筆者らの研究室について述べさせていただくと, (i) Bridgman のピストン-シリンダ式増圧器からパイプで液体圧を圧力容器に導く方法<sup>10,18,19)</sup>, (ii) ク



**Fig. 1** Clamp pressure cell for the measurement of pressure effect on  $T_c$  or resistance at lower temperatures below the room temperature.



**Fig. 2** Cubic pressure cell for the measurement of pressure effect on  $T_c$  at higher temperatures above the room temperature.

ランプ方式<sup>11,27)</sup> (**Fig. 1** 参照) および (iii) 小さい試料室を中心部に持つ一辺 7~12 mm の立方体の圧力セルをキュービックアンビルで押す方式 (**Fig. 2** 参照) の 3 とおりで, 準静水圧, 静水圧および固体圧加圧を行ない, 現在 4.2~700 K, 圧力最高数十 kb\*\* の条件下で測定している. **Fig. 1** は, 筆者らが用いている低温高压用クランプ式 (**Table 1** にはこの名前は掲載していない) 圧力容器で, 試料室の詳細な構成もあわせのせた. プラグが電気抵抗用のためリード線の数が多いが, 取り替えて  $T_c$  の圧力効果にも用いている. 圧力マンメータ Sn と試料 (sample) を取りまくコイルは圧力による Sn の超伝導転移温度測定のためのものである.

\*\* 最近では圧力の単位としては IU 単位のパスカル (Pascal) を使うことになっているが文献参考のために kb を用いた.

\* ここで意義というのは, 必ずしも測定が強磁性領域でなされねばならぬことを意味しない, ことをさす.