

Fig. 12  $T_c, \Delta T_c/\Delta p$  as a function of  $(c - c_f)$  for Ni-Rh and Ni-Pt<sup>31)</sup>.

たとき  $T_c$  がどう変わるか、についての情報は別の意味で圧力効果の研究の一つとみてもよく、最近の代表的な結果をあげておく。Fig. 10 で引用してある化合物  $Y_6Fe_{23}, YFe_3, YFe_2$  などは、R-M 化合物と同様に水素をよく吸収する。その結果、結晶構造は変えないが、unit cell は膨張し、たとえば  $YFe_2$  は  $YFe_2H_4$  になると 20% も体積が増加する。その結果  $T_c$  はどのようなものかの例を Buschow<sup>67)</sup> から引用し Fig. 11 にあげた。点線が水素吸収後である。

Fig. 10 と比較するとすぐわかるように、 $\Delta T_c/\Delta p$  が負の物質は、水素化合物にすると  $T_c$  が増加し、その逆も成り立っている。

最近主として鉄族系の強磁性合金で、強磁性出現、逆にいえば消失、の起因の研究が活発で、そのため臨界組成  $c_f$  付近の磁性の測定の積み上げが望まれている。筆者らは最近、低温高圧研究のなかでこの問題をとり上げ、Ni-Cu, -Pd, -Pt, -Rh の  $\Delta T_c/\Delta p$  と  $T_c$  の組成依存の対応性を調べた<sup>31)</sup>。Fig. 12 は組成を  $(c - c_f)$  で表わして、Ni-Rh, -Pt の  $\Delta T_c/\Delta p$  と  $T_c$  とを示したものである。

なお  $\Delta T_c/\Delta p$  は Fig. 5 の低温部のわれわれのデータを拡大したものである。非常に興味があるのは、 $\Delta T_c/\Delta p$  の  $(c - c_f)$  依存が急に変わる組成でまた  $T_c$  のそれも変わることである。このことは Wohlfarth<sup>68)</sup> に従って  $T_c \sim (c - c_f)^n$  とすると、 $n$  が急に変わることを意味する。Ni-Cu, -Pd も Fig. 12 にのせなかったが同様の対応性があった。 $T_c$  の  $(c - c_f)^n$  依存は、物質の  $c_f$  近くでの磁気的均一性、不均一性の尺度とされており<sup>68)</sup>、図の事実は  $T_c$  の圧力効果にも明確にそれらが反映するのではないかと、という問題提起と考えている。これまでの判断からいうと、Ni-Pt の変化のない依存性はかなりの均一性の反映としてもよさそうである。なお、これら均一性、不均一性に関連して  $c_f$  近くの Pd-Ni (強磁性

になる寸前の組成) についての電気抵抗の圧力効果<sup>16)</sup>は興味がある。

#### 4.2.2 $\sigma_0$ の圧力効果

$\sigma_0$  の圧力効果は、データ・解析とも数的には  $T_c$  の圧力効果ほどではないが、既存の論文の値に変わりはない。ここでは代表的な理論的考察を二つ紹介する。

一つは Terao, Katsuki<sup>69)</sup>、いま一つは Mathon<sup>42)</sup> によるもので、s-d 遷移は前者には取り入れられていない。Terao, Katsuki の求めた最終的な式を、 $dT_c/dp$  の場合と記号を統一するよう書き換えると、 $\mu_B$  を Bohr 磁子数として、

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma_0}{dp} = \frac{5}{3} \kappa \gamma \frac{U_{\text{eff}}}{\mu_B^2} \left\{ \frac{U_{\text{eff}} - w/\gamma}{w} \right\} \chi_{hf} \quad (9)$$

となる。ここで  $w$  はバンド幅、 $\chi_{hf}$  は 0K での 1 原子当たりの高磁界磁化率である。(9) 式の  $\sigma_0^{-1} (d\sigma_0/dp)$  が  $\chi_{hf}$  に比例することは Wohlfarth<sup>70)</sup> も指摘しており、実験的にも Nakamura ら<sup>35)</sup> が Ni-Fe-Mn 合金系で認めている。また  $\chi_{hf}$  は  $1/T_c^2$  に比例するという考察<sup>71)</sup> があり、 $\Delta T_c/\Delta p$  の場合と対応さすため Fig. 7 に示したごとく  $\sigma_0^{-1} (d\sigma_0/dp)$  の横軸を  $T_c$  にとった。鉄族基金金では  $\sigma_0^{-1} (d\sigma_0/dp)$  の符号は実験結果では負である (Fig. 7 参照) が、Terao, Katsuki は (9) 式で  $U_{\text{eff}} < w/\gamma$  であれば説明がつくとしているが、推定値<sup>60)</sup> もこの大小関係を満たしているようである。

s-d 遷移を取り入れて計算した Mathon<sup>42)</sup> は、Ni の  $\sigma_0$  の圧力効果の温度依存を  $T_c$  付近まで求めた。彼の計算で比較として採用した実験値は前にも述べたごとく Tange, Tokunaga<sup>25)</sup> の強制磁歪の測定から間接的に求めたものである。

以上のようにして、鉄族基金金については、 $T_c$  の圧力効果の場合ほどではないにしても、符号なり、温度依存なりは一応理解されそうである。

しかし、Table 2 に示したように、R-M 系では  $\sigma_0$  の圧力効果の符号が正の場合もある。このため、上記の筆者たちの行なった範囲内の理論では必ずしも説明されない面がある。これは R-M 系に対しては、M だけの効果ではいけないことを示していることは当然としても、R の効果をいかなる形で考慮に入れるかについては、われわれは実験結果の積み重ねの方がさきに必要ではないかと考えている。

### 5. 幾つかの興味ある圧力効果と物質

#### 5.1 結晶磁気異方性 (単結晶試料)

これまで述べてきた圧力効果で用いた試料は多結晶である。しかし結晶というからには単結晶試料を用いての測定が基本であろうし、事実常圧下ではその傾向があ

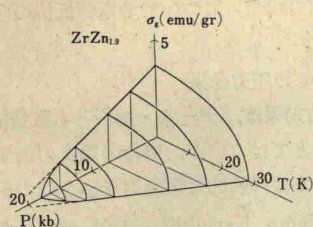


Fig. 13 Magnetization per gram of  $ZrZn_{19}$  as a function of temperature and pressure, which is made from the data of Ref. 80.

り、強磁性体であればなおさら結晶磁気異方性として意義深い。高圧下でも以前からかなりの実験はあるが、常圧下での結晶磁気異方性の理論すら、とくに鉄族では、これからというところである。トルク法でクランプ方式の圧力容器を用いての最近の研究は Franse<sup>72)</sup>, Kawai, Sawaoka<sup>11)</sup>, Kadomatsu<sup>ら</sup><sup>77)</sup>と続き、Ohishi<sup>73)</sup>の試みも貴重な情報を提供してくれている。Ni 基合金では最近常圧下の系統的な研究が続いているので、これからを期待したい。

### 5.2 内部磁界

Drickamer の解説<sup>28)</sup>でわかるように、精力的な研究がある。内部磁界の圧力効果と  $\Delta T_c/\Delta p$  との相関についての Cohen, Drickamer<sup>74)</sup>の研究も興味あるものである。内部磁界の圧力効果だけでも解説が書ける大きな題目である。

### 5.3 非晶質の磁性

最近実用面も含めて非晶質の磁性の研究は急速な進みをみせている。これは、磁性が結晶の周期性、短距離規則度の程度、対称性などにどう関連するかという意味での基本的な問題である。Mizoguchi<sup>75)</sup>の  $(Fe_{1-x}M_x)_{80}Bi_{10}P_{10}$  の  $T_c, \sigma_s$  の圧力効果、Wohlfarth の解説的まとめ<sup>76)</sup>, Biesterbos<sup>ら</sup><sup>77)</sup>の、たとえば  $Y_{13}Fe_{87}$  の  $\Delta T_c/\Delta p$  (23 kb で  $T_c$  は 70% も降下する) などあげておく。

### 5.4 弱い強磁性

$ZrZn_2$  の磁性<sup>78)</sup>において占める価値は、強磁性研究者たちに根をおろしている。高圧磁性からみて将来最も行ないたいと思う仕事は、すべての磁性体またはせめて強磁性体だけでもよいから、磁気的相図  $p-T$  の三次元相図を作ることではないかと思う。 $ZrZn_2$ <sup>79)</sup>、同じ磁性の分類になる  $UPt$ <sup>80)</sup>における圧力誘起の強磁性-常磁性転移の研究はその意味で貴重である。

本稿を終るにあたり、Huber<sup>ら</sup><sup>81)</sup>の測定値から筆者らが作った  $ZrZn_{19}$  の  $\sigma_g-p-T$  相図を Fig. 13 に示した。

### 謝辞

稿を終るにあたり今は亡き故辰本英二先生の下で筆

者が高圧磁性を勉強させていただいたことに対し感謝の気持ちで一杯である。また、これまで多くの共同研究に加えさせていただいた総合科学部の岡本哲彦教授のご指導に感謝するとともに、同教授との希土類合金の圧力効果の研究を十分紹介できなかったのを残念に思う次第である。一体となって仕事に取り組み、また組んでくれている研究室の高圧グループの諸君、さらにわれわれの研究に理解を示しておられる Wohlfarth 教授, Bloch 教授, それらの方々から謝意を表したい。

### 文 献

- 1) L. H. Adams and J. W. Green: *Philos. Mag.* **12** (1931) 367.
- 2) L. Patrick: *Phys. Rev.* **93** (1954) 384.
- 3) H. Nagaoka and K. Honda: *Philos. Mag.* **S5 46** (1898) 261.
- 4) D. Bloch and A. S. Pavlovic: *Advances in High Pressure Research* (Academic Press, New York, 1969) Vol. 3, Chap. 3.
- 5) M. Nomura, Y. Yamamoto and H. Fujiwara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **15** (1976) 1375.
- 6) Y. Yamamoto, M. Nomura and H. Fujiwara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **16** (1977) 397.
- 7) 箕村 茂: *固体物理* **3** (1968) 633.
- 8) J. Paureau: *J. Phys. E* **10** (1977) 1093.
- 9) 三井准靖: *固体物理* **9** (1974) 150.
- 10) 辰本英二, 藤原 浩, 岡本哲彦: *日本物理学会誌* **22** (1967) 593.
- 11) N. Kawai and A. Sawaoka: *Rev. Sci. Instrum.* **38** (1967) 1770.
- 12) J. M. Leger, C. L. Susse and B. Vodar: *Phys. Rev. B* **6** (1972) 4250.
- 13) M. Brouha and A. G. Rijnbeek: *High temperatures-High Pressures* **6** (1974) 519.
- 14) I. L. Spain and S. S. Segall: *Cryogenics* **11** (1971) 26.
- 15) M. Nomura, Y. Yamamoto, Y. Ochiai and H. Fujiwara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** (1979) 363.
- 16) R. A. Beyerlein and D. Lazarus: *Phys. Rev. B* **7** (1973) 511.
- 17) 近角聰信編: *実験物理講座* 17巻, 磁気 (共立出版, 1968).
- 18) H. Fujiwara, H. Kadomatsu, K. Ohishi and Y. Yamamoto: *J. Phys. Soc. Jpn.* **40** (1976) 1010.
- 19) H. Fujii: *J. Sci. Hiroshima Univ. A-II* **33** (1969) 43.
- 20) T. Okamoto, H. Fujii, M. Tsurui, H. Fujiwara and E. Tatsumoto: *J. Phys. Soc. Jpn.* **22** (1967) 337.
- 21) D. Wohlleben and M. B. Maple: *Rev. Sci. Instrum.* **42** (1971) 1573.
- 22) R. P. Guertin and S. Foner: *Rev. Sci. Instrum.* **45** (1974) 863.
- 23) D. Bloch: *Ann. Phys. (France)* **1** (1966) 93.
- 24) J. Beille, H. L. Alberts, H. Bartholin, D. Bloch