パイライト型化合物の物性

小 川 信 二* 安 達 健 五**

物質の電気的・磁氣的性質について現代の物性論の立場からの基本的な課題として、(1)物質が何故に金属と非金属に分類されるか、(2)物質の磁気発生機構と挙動の2つがあげられる。この問題に解決を与える典型的な物質として表題のパイライト(黄鉄鉱)型化合物がとりあげられる。この物質に対する研究は古くから鉱物学や無機化学の分野で行われていたが、物性の問題として系

統的な研究が始まったのは約10年程前で、3d 遷移金属パイライト型化合物に関する主要な研究は我が国(著者達の2研究室と北大理学部の毛利、宮台の2研究室)ならびにフランス国(ストラスブルグ大学)でなされた。

MX_2 (Mは遷移金属, Xはカルコゲンまたはプニコゲン元素)パイライト型構造は図1に示すように、面心立方を形作るM原子は X_2 分子によって引き離されるため、金属から非金属へ移行する境界に位置するものと考えられ、幅のせまい d バンドを形成するのが特徴である。一方Mは最近接Xによって正八面体的に取り囲まれ、配位子場に関しては弱結合と強結合の境界に位置しそれに伴ってM原子の高スピン状態と低スピン状態が実現する。特に低スピン状態では幅のせまい $d\gamma$ (または e_g) バンドの電子は強い電子相関効果を伴いながら磁性と伝導にあずかる。これらの理由から表1に示すようにその電気伝導は金属や半導体(絶縁体)そして超伝導を示すと共に常磁性(パウリ型・キュリー-ワイス型)、強磁性、反強磁性、弱強磁性やメタ磁性など多彩な磁性を示している。パイライト型化合物間の固溶体の実験結果が

○ および ↑ はらせん 2 回軸, 数値は Z-座標

原子座標

$4M(0, 0, 0)$
 $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
 $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$
 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$
 $8X(u, u, u)$
 $(\frac{1}{2}+u, \frac{1}{2}-u, \bar{u})$
 $(\bar{u}, \frac{1}{2}+u, \frac{1}{2}-u)$
 $(\frac{1}{2}-u, \bar{u}, \frac{1}{2}+u)$
 $(\bar{u}, \bar{u}, \bar{u}) \quad u \approx 0.4$
 $(\frac{1}{2}-u, \frac{1}{2}+u, u)$
 $(u, \frac{1}{2}-u, \frac{1}{2}+u)$
 $(\frac{1}{2}+u, u, \frac{1}{2}-u)$

MYX アルセノパイライト構造, T^4-P2_13 , は XY 分子の配列 (u_X, u_Y) と M 原子の変位 (u_M) を伴ったパイライト構造である。

図1 パイライト型結晶構造。

図2 パイライト型化合物のハバード模型による状態図: $n=e_g$ 電子数, $W/U=(\text{バンド幅})/(\text{クーロンエネルギー})$, WP=弱常磁性(NMにおける), WF=弱強磁性.(K.Adachi and F.Kimura: J.Phys. Soc. Jpn., 43(1977), 838).

* 電子技術総合研究所基礎部長

** 名古屋大学教授; 工学部

Physical Properties of Pyrite Type Compounds; Shinji Ogawa*, Kengo Adachi** (*Electrotechnical Lab. Ibaraki, **Faculty of Eng. Nagoya Univ. Nagoya) 1982年1月16日受理

表1 バイライト型化合物の磁性と電気伝導.

MX₂: イオン構成 M²⁺(X₂)²⁻

	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rh	Os
S ₂	AF, S (48)	Pw, S	F, M (124)	AF (50) WF (30), S	P _P , M _s (1.5)	D, S	P _P , M	Pw, S
Se ₂	AF, S (47)	* Pw, S	P _C , M	P _P , M	WF, M _s (30), (2.4)	D, S	P _P , M	, S
Te ₂	AF, S (87)	* Pw, S	* P _P , M	* P _P , M	P _P , *M _s (1.3)		, M	, S

MY₂: イオン構成 M⁴⁺(Y₂)⁴⁻

	Fe	Co	Ni	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
P ₂	Pw△S			△S	S		△S	S	S
As ₂	Pw△S	(△) S	(△) S	△S	S	S	△S	S	S
Sb ₂	Pw△S	(△) S	D (△) S	△S	S	S	△S	S	S
Bi ₂									S

MYX: イオン構成 M³⁺(YX)³⁻ アルセノバイライト構造

	Fe	Co	Ni	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
PS			M	S	M		S		
AsS		Pw, S	P _P , M	S	M	M	S	M	M
SbS			M	S	M	M	S	M	M
BiS					M	M		M	
PSe				S	M		S	M	
AsSe	S		P _P , M	S	M	M		M	
SbSe			P _P , M	S	M	M		M	M
BiSe			M		M	M		M	M
PTe				S	M			M	
AsTe				S	M	M		M	M
SbTe					M	M			
BiTe					M	M			M

その他の化合物 バイライト型 AuSb₂ [P_P, M], RuSn₂ [, M], MgTe₂ [D, S]

アルセノバイライト型 CuAsS, PdAsSb, PtPS

*: 高温・高圧合成によって得られる, △: マルカサイト構造, Pw: 温度に依存しない弱い常磁性,
P_C: キュリー-ワイス型常磁性, P_P: パウリ型常磁性, D: 反磁性,
F: 強磁性 (T_C), AF: 反強磁性 (T_N), WF: 弱強磁性,
M: 金属的伝導, M_s: 低温で超伝導 (T_s), S: 半導体的伝導

ら, *d**f* バンドの電子数と現われる磁性と伝導の種類を示したものが図2である.

他方において, いわゆる遍歴型電子(バンド電子)に起因する金属の磁気発生の問題はこの10年来格段の進歩を見せている. それは過去50年にわたって金属磁性の説明として無批判に用いられてきた有限温度における Stoner 模型の欠陥が発表され, 守谷らによって新しいスピン揺動理論が展開されたことである. この理論によって金属の常磁性, 強磁性および反強磁性の本質が明らかになり, また金属から絶縁体に至る一貫した磁性の描像が完成しつつある. この守谷理論の検証としてバイライト型化合物の示す磁性の2, 3の例があげられる.

以下物性論の立場から興味を中心となる幾つかの話題に焦点をしばらく.

上述のような狭いバンドにおいて強い電子相関をうけ

る電子の挙動(導電性と磁性)は, Hubbard 型ハミルトニアンによって記載されるものであるが, この模型に対応して *d**f* バンドが 1/4 満たされた CoS₂ は強磁性金属, NiS₂ は Mott 型絶縁体の反強磁性, バンド幅がやや広い CoSe₂ はキュリー-ワイス型常磁性金属そして NiSe₂ はパウリ型常磁性金属を示す. 興味深いことは NiS₂ に圧力を作用した場合または Ni(S-Se)₂ 系(図3)では, いわゆる Mott-Hubbard 型の金属-非金属転移が発生する. 一方 NiS₂ では低温で角度をもったスピン配列をする反強磁性でしかもネール温度以下で弱強磁性を伴うものであるが, Heisenberg 型の交換エネルギーだけではスピン構造や弱強磁性の発生は説明できない. この磁気構造の挙動は最近固体ヘリウムにおけるような4体スピン相関を取り入れることによってほぼ満足に説明された. 4体スピン相関は Hubbard ハミルトニアン の4次の摂動

図 3 $\text{Ni}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ 混晶系の相図。
AF: 反強磁性 WF: 弱強磁性
(毛利信男: 文部省科学研究費総合研究(A)1981 報告書, 「せまいバンドにおける電子相関効果の研究」p.17)。

る。更に $\text{Co}(\text{S-Se})_2$ 系の低温の電気抵抗の温度依存性も同グループの理論で説明される。 $\text{Co}(\text{S-Se})_2$ 系で最も特徴的なことは、この系の常磁性相で磁界によってメタ磁性(図 5)が発生することである。最近パイライト型化合物のバンド構造が明らかにされ、メタ磁性の発生の機構も説明されている。

このほかにもそれぞれの物質において多くの興味深い現象が見出されている。また特に 4d, 5d 遷移金属を含むパイライト型化合物や MX₂ と表わされるアルセノパイライト型化合物(表 1)の物性は、まだ明らかにされて

図 4 局在モーメント $M_l(T)$ の 2 乗平均の温度変化。
(T.Moriya: *Electron Correlation and Magnetism in Narrow-Band Systems*, Ed. by T.Moriya, Springer-Verlag, (1981), p.2~28)

図 5 $\text{Co}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$ の 4.2 K におけるメタ磁性の強磁場における磁化曲線。
(K.Adachi et al.: J.Phys.Soc.Jpn., 47 (1979), 675)

から生ずるもので、金属に近い絶縁体である NiS_2 においては、この 4 体相関は無視できぬものと解釈される。

$\text{Co}(\text{S-Se})_2$ 系の磁気と伝導の性質は、上述の守谷理論によってはじめて解明された。それはこの系のキュリー-ワイス型の常磁性帯磁率の逆数は或る温度 (T_c 以上) で折れ曲がりを生ずるもので、守谷理論によるとそれはこの物質の平均磁気モーメントが温度変化をし、その温度以上で図 4 に示すように飽和することを意味しており、 $\frac{1}{4}$ 満たされたバンドにおいて起こりやすいことが示されている。このような事からは T_c 以上でモーメントの消失する Stoner 理論(図 4)では説明のつかないことであ

いないものが多い。本集録において表 2 は物質別の測定された物性についての論文の表で、記号の数字は西暦の後 2 桁で、文字は共著者のイニシャルである。 (M, M') X_2 および $M(X, X')$ は固溶体を意味する。集録した論文は 1927 年より 1981 年までの構造や物性に関する主要な論文で、このほかにも若干の論文がある。これらの論文の全著者名と論文題目は頁数の都合で割愛したが、希望があれば著者の一人安達宛連絡されたい。最後にパイライト型化合物の物性やそれに深く関連した解説と解説的論文を示した。

表 2 $\text{FeS}_2\text{-CoS}_2\text{-NiS}_2\text{-CuS}_2$ の文献.

	FeS_2	$(\text{Fe}, \text{Co})\text{S}_2$	CoS_2	$(\text{Co}, \text{Ni})\text{S}_2$	NiS_2	$(\text{Ni}, \text{Cu})\text{S}_2$	CuS_2
結晶および その作製	67WST 68B-1 71BB	68B-2 71BB	67MJW 67WST 68B-1	68B-2 71BB	67WST 68B-1	68B-2	68BBCDS
格 子 定 数	60E 68B-2 68BBCDS 71B	68B-2 69GMS 71B 74OWT	60E 68B-2 68BBCDS 71B	68B-2 74OWT 80MYEDA	60E 68B-2 68BBCDS 69FKA 73EMM 73JBGJMW 76KLGRCS 79PKVM	68B-2 74OWT 76KLGRCS	68BBCDS
ストイキオメトリ ー (空格子密度)			74NSAW		72GKLR 73GKLR 76KLGRCS		76KPLGRE
磁 化 率 $\chi(T)$	68MT 77BS	68JCBBFG 74OWT	55B 68MT 69AST 69JW 74OWT	68JCBBFG 74OWT	69AST 69FKA 73GKLR 73MMTU 74OWT 76KLGRCS	74OWT 76KLGRCS	68BBCDS 74GKPR 76KPLGRE
磁 $M(T, H)$ 化		69GMS	55B 68MT 70JW 73JIT	74OWT	72ASYO 73GKLR 73MMTU 78KMFI 79K 79N		
キュリーおよび ネール点 $T_{C, N}$		68JCBBFG 74OWT	55B 68BBCDS 68JCBBFG 68MT 69AST 74OWT	74OWT	70HC 72ASYO 73GKLR 74OWT 76KLGRCS 78MW 79PKVM	74OWT 76KLGRCS	76KPLGRE
$T_{C, N}$ の圧力効果			69SAOT 74SIS	74MMYO	78MW 79PKVM		
中 性 子 回 折			67AFK 75IO 76ILOI 76OYWI-1 76OYWI-2		69FKA 70HC 73MMTU 75MTNIMH 78KMFI 79PKVM 77MKI 78MKI	74BHO	
NMR			75ASOYYN 79Y-2				74GKPR 76KPLGRE
ESR		73CB	68MMT 71MMT				
メスバウワー 効果	74GLP 76MS 78KS 79L	69GMS 72WWK 76WOTB 79NO-2 79NO-3	77MW	79NO-2 79NO-3	74CFSKGLR 75NOW 76KLGRCS 77MW		
磁 気 異 方 性			75ASOYYN		74ASS 76NM 79N		

(表 2 のつづき)

	FeS ₂	(Fe, Co) S ₂	CoS ₂	(Co, Ni) S ₂	NiS ₂	(Ni, Cu) S ₂	CuS ₂
磁 歪			75ATSA-1 75ATSA-2				
電 気 伝 導 (ホール効果, 磁気抵抗効果)	60DV 68BBCDS 71FMM 71H 74ES 75HS 80GRS	68JCBBFG 72OT 74OWT 78I	71OT 79AMK 79Y-1 80AMOO 80AO 81AMO	74OWT 77MYEDA 80MYEDA	68BBCDS 72KDAL 74OWT 76KLGRCS 77FM 78F 79F	74OWT	68BBCDS 76KPLGRE
抵抗の圧力依存性	74SIS	80Y	74SIS 80Y	73YMMO 74MMYO 75MMY	71WP 72GKLR 73MMY 75MMY 76KLGRCS	73YMMO 75MMY 76KLGRCS	
比 熱	76O	76O 78I	72WO 74OY 76O	76O	76KLGRCS 76O	76O	
熱 膨 張	71B		71B 73K 79Y-1	76KO	73JBGJMW 76KO 76NIM 78MW	76KO	
XPS, UPS	74LJEF 74OYW 76SNMOKG 76SSKG 79SC 80KB		74OYW 76SNMOKG 76SSKG 80KA		74LJEF 74OYW 76SNMOKG 76SSKG 80KA	77YNOW	80KA
コンプトン効果	75TWSA		75TWSA		75TWSA		
ド・ハース-フ ァン・アルヘン 効果							70MB
光 学 物 性 (ラマン効果)	68BBCDS 69VW 72U 74LJEF 74MUB 76SW 78KS 78MONS		68BBCDS 73A 78MONS 81ST	80MYEDA	68BBCDS 72KDAL 74LJEF 77SUSM 78MONS		68BBCDS
誘 電 率	78HS						
バ ン ド 計 算	76K						
理 論	76K	71S 71G 75AS	78M 78MT	75AS	77YI 78YI 79YF 81YI-1 81YI-2		

表 3 CoSe_2 , $\text{Co}(\text{S}, \text{Se})_2$, NiSe_2 , $\text{Ni}(\text{S}, \text{Se})_2$, CuS_2 の文献.

	CoSe_2	$\text{Co}(\text{S}, \text{Se})_2$	NiSe_2	$\text{Ni}(\text{S}, \text{Se})_2$	CuSe_2
結晶およびその作製	68BBCDS	69AST 70JW	46PT 68BBCDS	73BGJ	66BPGBFY
格 子 定 数	55BGHP 68BBCDS 69FKA 70JW 79PLL	69AST 70JW	56GJ 68BBCDS 69FKA	75GKLPRCFS 80KDA	70MB
磁 化 率 $\chi(T)$	55BGHP 68BBCDS 69AST 69FKA 70JW 76PKLL 79PLL	69AST 69JW 70JW 79AMK	56GJ 69FKA 69AST 80IYO	74JBGJMW 79O	66BPGBFY 76KPLGRE
磁 化 $M(T, H)$		69AST 69JW 70ASMO 70JW 79AMK 79AMOMMD 79KPLL			76KPLGRE
キュリーおよびネー ル点 $T_{C,N}$	69AST 76PKLL	69AST 70JW 79AMK		73JBGJMW 74JBGJMW 75GKLPRCFS 76CFSKLPGR	76KPLGRE
$T_{C,N}$ の圧力効果					
中 性 子 回 折	69AST 69FKA	79PKLL	69FKA	75PK	
NMR	76PKLL 79IY 79PLL	79PKLL 79YIMA 81IYMA	80IYO	75GKLPRCFS	76KPLGRE
ESR					
メスバウワー効果	77MW 77ON 79NO-3		77MW 79NO-3	76CFSKLPGR 78NOW	
電 気 抵 抗 電 流 磁 気 効 果	68BBCDS	79AMK 80AMOO 81AMO	68BBCDS	71WP 73BGJ 74JBGJMW 77O 80KDA	70MB 76KPLGRE 80KDA
電気抵抗の圧力変化				71WP 77KMM	
比 熱	77ON		80IYO		
熱 膨 張				73JBGJMW	
光 学 測 定	68BBCDS 73A 80KA		68BBCDS 80KA	80KA	68BBCDS 73A 80KA
焦 磁 効 果	75MBW				
金属 - 絶縁体転移				71WP 73BGJ 74JBGJMW 75GKLPRCFS 76CFSKLPGR 77KMM	
理 論		78M 78MT			

表 4 他のパイライト型化合物の文献.

Mn-化合物

	MnS ₂	MnSe ₂	MnTe ₂	(Mn-Mg) Te ₂	(Fe-Mn) S ₂
結晶構造 膨張率	35H 55B 59HEC 65HM	37E 59HEC 65HM 77IM	37E 59HEC 65HM	73AWIMY	Mn conc. < 5.6% 71ASKY
磁化率	35H 55B 59HEC 68LH	59HEC 77IM	59HEC 65SM 68LH 77OM	800 810MK	71ASKY
中性子回折	59HEC 76HC	59HEC 63CH	59HEC 70HCBP		
比熱	70WG		70WG		
高圧効果	71BAD				
光学物性 (ラマン効果)	74VH				
電気伝導			65SM	73AWIMY	
メスパワー効果			69PS 79NO-1		

高圧合成 (パイライト構造)

	FeSe ₂	FeTe ₂	CoTe ₂	NiTe ₂	CuTe ₂
結晶構造と光学特性	66BPCBFY 68BBCDS*	66BPCBFY 68BBCDS*	66BPCBFY 68BBCDS*	66BPCBFY 68BBCDS*	66BPCBFY 68BBCDS*
非化学量論磁性 電氣的性質					70MB (dHvA) 76KPLGRE } with CuS ₂ & CuSe ₂

	(Cu, Mn) S ₂	(Cr, Co) S ₂	(Fe, Ni) S ₂
結晶構造 膨張率 メスパワー効果	70BDCBY	71DBCF	70BDCBY 76AUTS 77NOAT 79M } Fe _{0.5} Ni _{0.5} S ₂ Ni conc. <
結晶構造 膨張率 導電	(Zn, Mn) S ₂ , (Zn, Mn) Se ₂ , (Zn, Mn) Te ₂ , (Cd, Mn) Se ₂ (Zn, Cu) S ₂ , (Zn, Cu) Se ₂ , (Cd, Cu) S ₂ , (Cd, Cu) Se ₂ (Mn, Cu) Se ₂ , (Mn, Cu) Te ₂ , (Cu, Fe) S ₂ , (Ni, Fe) Se ₂ Cu (S, Se) ₂ , Cu (S, Te) ₂		
結晶構造 膨張率 導電	66BPCBFY, 68BBCDS, 70BDCBY		

4d, 5d-化合物

	OsSe ₂	OsTe ₂	RuSe ₂	RuTe ₂	RhS ₂	PtSb ₂
結晶構造	29T	29T	29T	29T	29T	29T
電流磁気効果						72DME

アルセノバイライト化合物

	NiPS	NiAsS	NiAsSe	NiSbS	NiSbSe
結晶構造率抵抗	65HM 80AMKO	65HM 80AMKO	65HM 80AMKO	65HM 80AMKO	65HM 80AMKO
	Ni(As, S) ₂	Co(As, S) ₂	Fe(As, Se) ₂	(Co, Ni) AsS	
結晶構造率抵抗	76ATK 77AK	71MW 76ATK	74BW	74SNAW	
XPS		81SKA			

文 献

- 29T L.Thomassen : Z.Phys.Chem.B, 2(1929), 349 ; 4 (1929), 277.
- 35H H.Haraldsen : Z.anorg. allg. Chem., 224 (1935), 85.
- 37E N.Elliott : J.Am. Chem. Soc., 59 (1937), 1958.
- 46PT M.A.Peacock and R.M.Thompson : Univ. Toronto Studies, Geol. Ser. No.50 (1946), 63.
- 55B R.Benoit : J.Chim. Phys. & Phys.-Chim. Biol., 52(1955), 119.
- 55BGHP F.Bøhm *et al.* : Acta Chem. Scand., 9 (1955), 1510.
- 56GJ F.Grønvold and E.Jacobsen : Acta Chem.Scand., 10 (1956), 1440.
- 59HEC J.M.Hastings *et al.* : Phys. Rev., 115(1959), 13.
- 60DV L.D.Dudkin and V.I.Vaidanich : Sov. Phys.-Solid State, 2(1960), 1384.
- 60E N.Elliott : J.Chim.Phys., 33 (1960), 903.
- 63CH L.M.Corliss and J.M.Hastings : Coll. Int. CNRS, "La Diffraction et la Diffusion des Neutrons", No.126(1963), 133.
- 65HM F.Hulliger and E.Mooser : J.Phys. Chem. Solids, 26 (1965), 429.
- 55SM A.Sawaoka and S.Miyahara : J. Phys. Soc. Japan, 20 (1955), 2087.
- 66BPGBFY T.A.Bither *et al.* : Solid State Commun., 4 (1966), 533.
- 67AFK A.F.Andresen *et al.* : Acta Chem. Scand., 21 (1967), 833.
- 67MJW B.Morris *et al.* : J.Phys. Chem. Solids, 28 (1967), 1565.
- 67WST K.-Th Wilke *et al.* : J.Cryst. Growth, 1 (1967), 41.
- 68B-1 R.J.Bouchard : J.Cryst. Growth, 2 (1968), 40.
- 68B-2 R.J.Bouchard : Mater. Res. Bull., 3 (1968), 563.
- 68BBCDS T.A.Bither *et al.* : Inorg. Chem., 7 (1968), 2208.
- 68JCBBFG H.S.Jarrett *et al.* : Phys. Rev. Lett., 21 (1968), 617.
- 68LH M.S.Lin and H.Hacker Jr. : Solid State Commun., 6 (1968), 687.
- 68MMT T.Miyadai *et al.* : Phys. Lett., 27A(1968), 434.
- 68MT S.Miyahara and T.Teranishi : J.Appl. Phys., 39 (1968), 896.
- 69AST K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 26(1969), 631.
- 69FKA S.Furuseth *et al.* : Acta Chem. Scand., 23 (1969), 2325.
- 69GMS P.K.Gallagher *et al.* : J.Chem. Phys., 50 (1969), 4417.
- 69JW V.Johnson and A.Wold : J.Appl. Phys., 40 (1969), 1287.
- 69PS M.Pasternak and A.L.Spijkervet : Phys. Rev., 181(1969), 574.
- 69SAOT K.Sato *et al.* : J.Phys.Soc. Japan, 26(1969), 639.
- 69VW J.L.Verble and R.F.Wallis : Phys. Rev., 182 (1969), 783.
- 70ASMO K.Adachi *et al.* : J.Phys.Soc. Japan, 29(1970), 323.
- 70BDCBY T.A.Bither *et al.* : J.Solid State Chem., 1 (1970), 526.
- 70HC J.M.Hastings and L.M.Corliss : IBM J.Res. & Dev., 14 (1970), 227.
- 70HCBP J.M.Hastings *et al.* : Phys. Rev., B1(1970), 3209.
- 70JW V.Johnson and A.Wold : J.Solid State Chem., 2 (1970), 209.
- 70MB S.M.Marcus and T.A.Bither : Phys. Lett., 32A (1970), 363.
- 70WG E.F.Westrum Jr. and F.Grønvold : J.Chem. Phys., 52 (1970), 3820.
- 71ASKY K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 30 (1971), 577.
- 71B W.Bindloss : J.Appl. Phys., 42 (1971), 1474.
- 71BAD C.B.Bargeron *et al.* : Inorg. Chem., 10 (1971), 1338.
- 71BB S.R.Butler and R.J.Bouchard : J.Cryst.Growth, 10 (1971), 163.
- 71DBCF P.C.Donohue *et al.* : Mater. Res. Bull., 6(1971), 231.
- 71FMM T.Fukui *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 31 (1971), 1277.
- 71G J.B.Goodenough : J.Solid State Chem., 3 (1971), 26.
- 71H H.Horita : Japan. J.Appl. Phys., 10(1971), 1478.
- 71MMT T.Miyadai *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 31 (1971), 1591.
- 71MW J.C.Mikkelsen and A.Wold : J.Solid State Chem., 3 (1971), 39.
- 71OT S.Ogawa and T.Teranishi : Phys. Lett., 36A (1971), 407.
- 71S J.B.Sokoloff : Phys. Rev., B3 (1971), 3826.
- 71WP J.A.Wilson and G.D.Pitt : Phil. Mag., 23(1971), 1297.
- 72ASYO K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 32 (1972), 573.
- 72DME D.H.Damon *et al.* : Phys. Rev., B5 (1972), 2175.
- 72GKLR F.Gautier *et al.* : Solid State Commun., 11(1972), 1201.
- 72KDAL R.L.Kautz *et al.* : Phys. Rev., B6 (1972), 2078.
- 72OT S.Ogawa and T.Teranishi : Phys. Lett., 42A (1972), 147.
- 72U S.Ushioda : Solid State Commun., 10 (1972), 307.
- 72WO S.Waki and S.Ogawa : J.Phys. Soc. Japan, 32 (1972), 284.
- 72WWK F.W.D.Woodhams *et al.* : J.Solid State Chem., 5 (1972), 334.
- 73A E.Anastassakis : Solid State Commun., 13 (1973), 1297.
- 73AWIMY S.Anzai *et al.* : Japan. J.Appl. Phys., 12 (1973), 1289.
- 73BGJ R.J.Bouchard *et al.* : Mater. Res. Bull., 8 (1973), 489.
- 73CB R.N.Chandler and R.W.Bené : Phys. Rev., B8 (1973), 4979.
- 73EMM S.Endo *et al.* : Phys. Lett., 46A(1973), 29.
- 73GKLR F.Gautier *et al.* : J.Phys., C6 (1973), L320.
- 73JBGJMW H.S.Jarrett *et al.* : Mater. Res. Bull., 8 (1973), 877.
- 73JIT M.Jibu *et al.* : Phys. Lett., 45A(1973), 235.

- 73K N.Kasai : J.Phys. Soc. Japan, 35(1973), 1552.
 73MMTU T.Miyadai *et al.* : Phys. Lett, 44A (1973), 529.
 73MMY N.Mori *et al.* : Solid State Commun, 13 (1973), 1083.
 73YMMO S.Yomo *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 35 (1973), 1263.
 74ASS K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 37 (1974), 1170.
 74BHO H.Betsuyaku *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 37 (1974), 983.
 74BW A.Baghadhi and A.Wold : J.Phys.Chem. Solids, 35 (1974), 811.
 74CFSKGLR G.Czjzek *et al.* : J.Phys, 35 (1974), Colloque C6, Suppl. p.C6-621.
 74ES A.L.Echarri and C.Sánchez : Solid State Commun, 15 (1974), 827.
 74GKPR F.Gautier *et al.* : J.Phys, C7 (1974), L170.
 74GLP V.K.Garg *et al.* : J.Appl. Phys, 45 (1974), 70.
 74JBGMW H.S.Jarrett *et al.* : *Proc.Int.Conf. Magnetism, Moscow, 1973*, NAUKA, Moscow, 5 (1974), 161.
 74LJEF E.K.Li *et al.* : Phys.Rev.Lett, 32 (1974), 470.
 74MMYO T.Mitsui *et al.* : Solid State Commun, 15 (1974), 917.
 74MUB R.M.Macfarlane *et al.* : Solid State Commun 14 (1974), 851.
 74NSAW H.Nahigian *et al.* : J.Phys. Chem. Solids, 35 (1974), 1349.
 74OWT S.Ogawa *et al.* : Int.J.Magn, 5 (1974), 349.
 74OY S.Ogawa and T.Yamadaya : Phys. Lett, 47A (1974), 213.
 74OYW A.Ohsawa *et al.* : J.Phys.Soc.Japan, 37 (1974), 568.
 74SIS A.Sawaoka *et al.* : Japan.J.Appl.Phys, 13 (1974), 579.
 74SNAW J.J.Steger *et al.* : J.Solid State Chem, 11 (1974), 53.
 74VH J.L.Verble and F.M.Humphrey : Solid State Commun, 15 (1974), 1693.
 75AS G.F.Abito and J.W.Schweitzer : *AIP Conf. Proc.*, No.24 (1975), 345.
 75ASOYYN K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 38 (1975), 81.
 75ATSA-1 K.I.Arai *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 39 (1975), 255.
 75ATSA-2 K.I.Arai *et al.* : J.Magn. Magn. Mat, 1 (1975), 55.
 75GKLPRCFS F.Gautier *et al.* : Phys. Lett, 53A (1975), 31.
 75HS H.Horita and T.Suzuki : Sci. Rep. RITU, A-25 (1975), 124.
 75IO Y.Ito and A.Ohsawa : J.Phys. Soc. Japan, 39 (1975), 1623.
 75MBW M.L.Malwah *et al.* : *AIP Conf. Proc.*, No.24 (1975), 389.
 75MMY N.Môri *et al.* : *Proc. 4th Int. Conf. High Pressure, Kyoto, 1974*, Spec. issue of the Rev. Phys. Chem. Japan, (1975), 295.
 75MTNIMH T.Miyadai *et al.* : J.Phys.Soc. Japan, 38 (1975), 115.
 75NOW Y.Nishihara *et al.* : J. Phys. Soc. Japan, 39 (1975), 63.
 75PK R.Plumier et G.Krill : Lett. J.Phys, 36 (1975), 249.
 75TWSA O.Terasaki *et al.* : J.Phys.Soc.Japan, 39 (1975), 837.
 76ATK K.Adachi *et al.* : J.Phys, 37 (1976); Colloque C4, Suppl. p.C4-29.
 76AUTS K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 41 (1976), 1069.
 76CFSKLPGR G.Czjzek *et al.* : J.Magn. Magn. Mat, 3 (1976), 58.
 76HC J.M.Hastings and L.M.Corliss : Phys. Rev, B 14 (1976), 1995.
 76ILOI M.Iizumi *et al.* : *AIP Conf. Proc.*, No.29 (1976), 266.
 76K M.A.Kahn : J.Phys. C9 (1976), 81.
 76KLGRCS G.Krill *et al.* : J.Phys, C9 (1976), 761.
 76KO N.Kasai and S.Ogawa : J. Phys. Soc. Japan, 40 (1976), 1789.
 76KPLGRE G.Krill *et al.* : J.Phys, C9 (1976), 1521.
 76MS P.A.Montano and M.S.Seehra : Solid State Commun, 20 (1976), 897.
 76NIM N.Nagata *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 41 (1976), 2133.
 76NM H.Nagata and T.Miyadai : Japan. J.Appl. Phys, 15 (1976), 1507.
 76O S.Ogawa : J.Phys. Soc. Japan, 41 (1976), 462.
 76OYWI-1 A.Ohsawa *et al.* : J.Phys. Soc.Japan, 40 (1976), 986.
 76OYWI-2 A.Ohsawa *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 40 (1976), 992.
 76PKLL P.Panissod *et al.* : Phys. Lett, 59A(1976), 221.
 76SNMOKG C.Sugiura *et al.* : *Int.Conf. Physics of X-Ray Spectra, 1976*, National Bureau of Standards, U.S.A. (1977).
 76SSKG C.Sugiura *et al.* : J.Phys.Soc. Japan, 40 (1976), 1720.
 76SW A.Schlegel and P.Wachter : J. Phys, C9 (1976), 3363.
 76WOTB G.Wortmann *et al.* : Sov. Phys. -JETP, 42 (1976), 1064.
 77AK K.Adachi and F.Kimura : J.Phys. Soc. Japan, 43 (1977), 838.
 76BS P.Burgardt and M.S.Seehra : Solid State Commun, 22 (1977), 153.
 76FM T.Fukui and S.Miyahara : Trans. JIM, 18 (1977), 590.
 76IM H.Itoh and S.Miyahara : J.Phys. Soc. Japan, 42 (1977), 470.
 76KMM M.Kamada *et al.* : J.Phys, C10 (1977), L643.
 76MKI T.Miyadai *et al.* : Physica, 86-88B (1977), 901.
 76MW V.H.McCann and J.B.Ward : J.Phys. Chem. Solids, 38 (1977), 991.
 76MYEDA A.K.Mabatah *et al.* : Phys.Rev.Lett, 39 (1977), 494.
 76NOAT Y.Nishihara *et al.* : J.Phys.Soc.Japan, 42 (1977), 1180.
 76O S.Ogawa : Physica, 86-88B (1977), 997.
 76OM O.Okada and T.Miyadai : J.Phys. Soc. Japan, 43 (1977), 343.
 76ON S.Ogawa and Y.Nishihara : J.Phys.Soc. Japan, 42 (1977), 343.
 76SUSM T.Suzuki *et al.* : Solid State Commun, 23 (1977), 847.
 76YI A.Yoshimori and S.Inagaki : Magn. Lett, 1 (1977), 69.
 76YNOW H.Yamamoto *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 43 (1977), 1095.
 78F T.Fukui : J.Phys.Soc.Japan, 45 (1978), 1507.
 78HS D.E.Husk and M.S.Seehra : Solid State Commun, 27 (1978), 1147.
 78I S.Inagaki : J.Phys.Soc.Japan, 45 (1978), 1253.
 78KMFIT K.Kikuchi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 44 (1978), 410.
 78KS W.W.Kou and M.S.Seehra : Phys. Rev, B18 (1978), 7062.
 78M T.Moriya : Solid State Commun, 26 (1978), 483.
 78MKI T.Miyadai *et al.* : Phys.Lett, 67A (1978), 61.
 78MONS T.Matsukawa *et al.* : Japan J.Appl. Phys, 17 (1978), Suppl. 17-2, p.184.
 78MT T.Moriya and Y.Takahashi : J.Phys. Soc. Japan, 45 (1978), 397.
 78MW N.Mori and T.Watanabe : Solid State Commun, 27 (1978), 567.
 78NOW Y.Nishihara *et al.* : J.Phys, C11 (1978), 1935.
 78YI A.Yoshimori and S.Inagaki : J.Phys.Soc.Japan, 44 (1978), 101.
 79AMK K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 46(1979), 1474.
 79AMOMMD K.Adachi *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 47 (1979), 675.
 79F T.Fukui : Japan.J.Appl.Phys, 18 (1979), 1195.
 79IY N.Inoue and H.Yasuoka : Solid State Commun, 30 (1979), 341.
 79K K.Kikuchi : J.Phys.Soc.Japan, 47(1979), 484.
 79KPLL G.Krill *et al.* : J.Phys, C12(1979), 4269.
 79L Y.S.Liu : Phys. Rev, B20 (1979), 71.
 79M T.Miyadai : J.Magn. Magn. Mat, 10(1979), 29.
 79N H.Nagata : Japan. J.Appl. Phys, 18(1979), 401.
 79NO-1 Y.Nishihara and S.Ogawa : J.Phys, 40 (1979), Colloque C2, p.C2-221.
 79NO-2 Y.Nishihara and S.Ogawa : J.Phys, 40 (1979), Colloque C2, p.C2-297.
 79NO-3 Y.Nishihara and S.Ogawa : J.Chem. Phys, 71 (1979), 3796.
 79O S.Ogawa : J.Appl.Phys, 50 (1979), 2308.

- 79PKLL P.Panissod *et al.* : J.Phys. C12 (1979), 4281.
 79PKVM P.Panissod *et al.* : Solid State Commun. 29 (1979), 67.
 79PLL P.Panissod *et al.* : Solid State Commun. 31 (1979), 273.
 79SC E.D.Stevens and P.Coppens : Acta Crystallogr. A35 (1979), 536.
 79Y-1 S.Yomo : J.Phys. Soc.Japan, 47 (1979), 1486.
 79Y-2 H.Yasuoka : J.Phys. Soc. Japan, 47 (1979), 517.
 79YF A.Yoshimori and H.Fukuda : J.Phys. Soc. Japan, 46(1979), 1663.
 79YIMA H.Yasuoka *et al.* : J.Phys.Soc.Japan, 46 (1979), 689.
 80AMKO K.Adachi *et al.* : J.Phys.Soc. Japan, 49 (1980), 1629.
 80AMOO K.Adachi *et al.* : J.Magn. Magn. Mat., 15-18 (1980), 919.
 80AO K.Adachi and K.Ohkohchi : J.Phys.Soc.Japan, 49 (1980), 154.
 80GRS V.P.Gupta *et al.* : J.Phys. Chem. Solids, 41(1980), 145.
 80IYO N.Inoue *et al.* : J.Phys. Soc. Japan, 48 (1980), 850.
 80KA G.Krill and A.Amamou : J.Phys.Chem.Solids, 41 (1980), 531.
 80KB W.Krätzel and K.Berndt : Phys. Stat. Sol. (b), 97 (1980), 541.
 80KDA P.Kwizera *et al.* : Phys.Rev. B21 (1980), 2328.
 81IYMA N.Inoue, H.Yasuoka, M.Matsui and K.Adachi : J.Phys.Soc.Japan, 50 (1981), 1180.
 81OMK O.Okada, T.Miyadai and K.Kikuchi : J.Magn. Magn.Mat. 22(1981), 306.
 81SKA C.Sugiura, J.Kashiwakura and K.Adachi : Japan. J.Appl. Phys., 20(1981), 669.
 81ST K.Sato and T.Teranishi : J.Phys.Soc.Japan, 50 (1981), 2069.
 81YI-1 A.Yoshimori and S.Inagaki : J.Phys.Soc.Japan, 50 (1981), 769.
 81YI-2 K.Yosida and S.Inagaki : J.Phys. Soc. Japan, 50 (1981), 3268.
 解 説
 R-65HM F.Hulliger and E.Mooser : J.Phys.Chem.Solids, 26 (1965), 429-433, "Semiconductivity in Pyrite, Marcasite and Arsenopyrite Phases".
 R-69A 安達健五: 日本物理学会誌, 24 (1969), 518-528, 「ペイライト型化合物の磁性」.
 R-69R P.Ramdohr : *The Ore Minerals and Their Intergrowths*, Pergamon Press, (1969), p.779-860.
 R-69WY J.A.Wilson and A.D.Yoffe : Adv. Phys. 18 (1969), 193-335, "The Transition Metal Dichalcogenides : Discussion and Interpretation of the Observed Optical, Electrical and Structural Properties".
 R-72G J.B.Goodenough : J.Solid State Chem., 5 (1972), 144-152, "Energy Bands in TX₂ Compounds with Pyrite, Marcasite and Arsenopyrite Structures".
 R-72W J.A.Wilson : Adv. Phys. 21(1972), 143-198, "Systematics of the Breakdown of Mott Insulation in Binary Transition Metal Compounds".
 R-72M 守谷 亨: 日本物理学会誌, 27(1972), 470-488, 「磁性と電子相関—スピンのゆらぎと局在モーメント—」.
 R-73O 小川信二: 物性, 14 (1973), 155-165, 「ペイライト型 3d 遷移金属二硫化物の磁性と電気伝導—せまい d バンド金属—」.
 R-74O 小川信二: 日本物理学会誌, 29(1974), 688-695, 「ペイライト型磁性化合物と電子相関」.
 R-75A 安達健五: 固体物理, 10 (1975), 3-14(I), 101-112(II), 「CoS₂ とその周辺のペイライト型化合物の磁性 (I), (II)」.
 R-77O 小川信二: 固体物理, 12 (1977), 657-663, 「ペイライトの磁性」.
 R-77Y 吉森昭夫: 日本物理学会誌, 32 (1977), 1019-1022, 「4次のスピン間相互作用と NiS₂ の反強磁性構造」.
 R-79-1 T.Moriya : J.Magn.Magn.Mat., 14 (1979), 1-46, "Recent Progress in the Theory of Itinerant Electron Magnetism".
 R-79-2 守谷 亨: 日本物理学会誌, 34(1979), 473-484, 「金属強磁性理論—ひとつの統一的描像」.
 R-79O S.Ogawa : J.Appl. Phys., 50(1979), 2308-2311, "Magnetic Properties of 3d Transition-metal Dichalcogenides with Pyrite Structure".
 R-80M 守谷 亨: 固体物理, 15 (1980), 15-30, 「金属強磁性の統一的描像」.
 R-82A 安達健五: 日本物理学会誌, 37(1982), 印刷中, 「ペイライト型化合物の磁場効果」.