

大容量車両用・産業用平形 IGBT

一條 正美 (いちじょう まさみ)

関 康和 (せき やすかず)

西村 孝司 (にしむら たかし)

① まえがき

富士電機は、電気鉄道や産業用の各種の高電圧・大容量変換装置への IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 適用の要求にこたえるため、高耐圧・大電流 IGBT の開発を積極的に推進している。このようななか先般は、図 1 に示す 25kV/1kA 定格の平形 IGBT (一般形式: EMB1001RM-25) を開発し、各種変換装置への適用を推進してきた。

IGBT のコレクタ電流定格は直流定格で表現されるが、GTO (Gate Turn-Off) サイリスタの可制御アノード電流と比較する場合にはパルス定格で比較するのが妥当である。25kV/1kA の IGBT の電流定格は、2kA の GTO サイリスタに匹敵することになる。

しかしながら、GTO サイリスタではすでに 4kA の電流定格の素子が実用化されており、この電流定格に匹敵する IGBT の実用化を望む声が高まりつつあった。

このような状況下、富士電機は先に開発した 25kV/1kA 平形 IGBT の技術をさらに発展させて、27.5 × 27.5 (mm) の大面積チップの実用化、デバイス構造の最適化などにより、小形のパッケージで 25kV/1.8kA の定格を持つ平形 IGBT (EMB1802RM-25, 一般形式: EMB1801RM-25) を開発し、東海旅客鉄道(株)700系新幹線先行試作車用主変換装置(TCI2)に搭載した。

現在、富士電機では今春の完成を目標に、さらなるコストパフォーマンスの向上を目的とした改良形平形 IGBT (EMB1805RM-25, 25kV/1.8kA) を開発中である。

図 1 25kV/1kA 平形 IGBT (EMB1001RM-25) の外観



本稿では EMB1801RM-25 に採用した技術ならびに性能について説明し、開発中の EMB1805RM-25 についても概要を紹介する。

② 大容量化技術

2.1 大面積チップの実用化

EMB1001RM-25 の開発においては、20 × 20 (mm) の大面積 IGBT チップとダイオードチップを開発して搭載したが、今回の EMB1801RM-25 では、さらに大きな 27.5 × 27.5 (mm) の IGBT およびダイオードチップを開発し搭載した。

また、EMB1001RM-25 用の 20 × 20 (mm) のチップを開発する際に、MOS ゲートデバイスでは初めての富士電機独自のリペア技術も併せて開発し、この技術を新チップにも用いて不良部分を除去することにより、高良品率を実現した。

図 2 に、従来の 20 × 20 (mm) と今回開発した 27.5 × 27.5 (mm) の IGBT およびダイオードのチップ外観を示す。

2.2 チップおよびセル構造の最適化

今回開発した 27.5 × 27.5 (mm) の IGBT チップは従来の 20 × 20 (mm) の IGBT チップに比較して面積でおよそ 1.9 倍である。今回開発した 27.5 × 27.5 (mm) の IGBT チップでは、デッドスペースになっていた部分を見直すことにより、さらに電流を流しやすい構造へと改善した結果、20 × 20 (mm) の IGBT のおよそ 2.7 倍の電流定格 [20 × 20 (mm) チップ: 110 A に対して 27.5 × 27.5 (mm) チップ: 300 A] とすることができた。これにより、コンパクトなパッケージサイズで大容量素子を実現した。

また、セル構造の最適化やキャリアの注入効率および輸送効率の最適化を図ることにより、IGBT のトレードオフの改善を実現した。

図 3 に、IGBT のコレクタ-エミッタ間飽和電圧 ($V_{CE(sat)}$)



一條 正美

電力変換装置の研究開発に従事。現在、松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部 主席。



関 康和

半導体デバイスの研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所先端デバイス研究所パワーデバイスグループ 研究マネージャー。工学博士。



西村 孝司

パワーデバイスの研究開発に従事。現在、松本工場半導体開発センターパワー半導体開発部。

図2 チップの外観

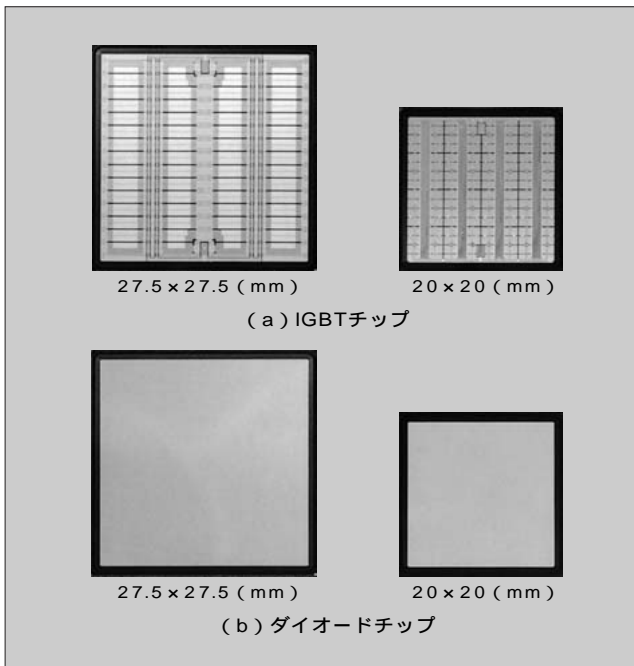
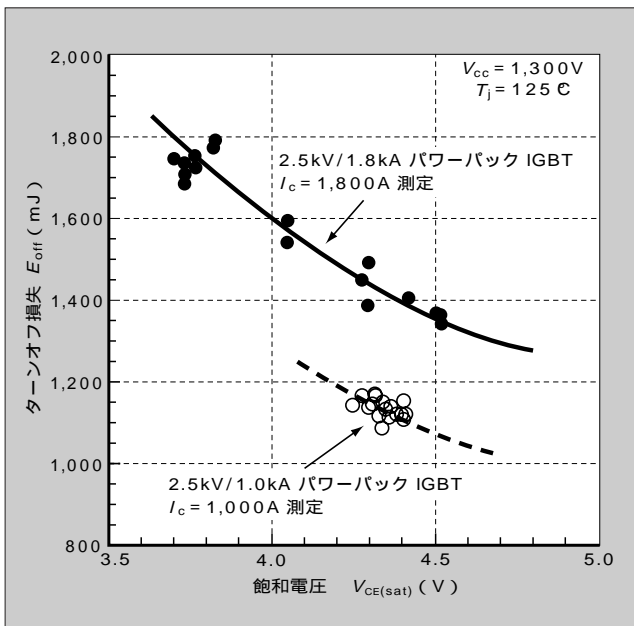


図3 IGBTのトレードオフ比較



とターンオフ損失 (E_{off}) のトレードオフ関係を EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 を比較して示す。図3は、125 の接合温度におけるトレードオフ曲線であるが、同じ $V_{CE(sat)}$ の条件での E_{off} を比較すると、例えば $V_{CE(sat)}$ が 4.4 V の条件では、EMB1001RM-25 (2.5 kV/1 kA 素子) が 1,100 mJ、EMB1801RM-25 (2.5 kV/1.8 kA 素子) が 1,400 mJ である。

1.8 kA 素子は、電流定格を 1 kA 素子の 1.8 倍にしたにもかかわらず E_{off} の増加は 1.3 倍と低く抑えられている。このように、EMB1801RM-25 は、従来の EMB1001RM-25 の技術をベースに、さらに高性能化を達成したチップを搭載している。

表1 EMB1801RM-25の定格および特性

(a) 最大定格 ($T_j = 25$)

項目	記号	定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	V_{CES}	2,500	V
ゲート-エミッタ間電圧	V_{GES}	± 20	V
直流コレクタ電流	I_C	1,800	A
	$-I_C$	1,800	
パルスコレクタ電流	$I_C(pulse)$	3,600	A
	$-I_C(pulse)$	3,600	
最大コレクタ損失	P_C	10,500	W
接合部温度	T_j	125	
圧接 接 力	-	35 ~ 50	kN

(b) 電気的特性

項目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
コレクタ-エミッタ間遮断電流	I_{CES}	$V_{GE} = 0 V$ $V_{CE} = 2,500 V$ $T_j = 125$	-	-	50	mA
ゲート-エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	$V_{CE} = 0 V$ $V_{GE} = \pm 20 V$	-	-	± 10	μA
ゲート-エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 20 V$ $I_C = 1 A$	4.0	-	8.0	V
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = 15 V$ $I_C = 1,800 A$ $T_j = 125$	-	-	4.8	V
ダイオード順電圧	V_F	$V_{GE} = 0 V$ $I_F = 1,800 A$ $T_j = 125$	-	-	3.3	V
ターンオン特性	t_{on}	$V_{CC} = 1,300 V$ $I_C = 1,800 A$ $T_j = 125$	-	3.6	-	μs
	t_r		-	2.5	-	μs
ターンオフ特性	t_{off}	$V_{CC} = 1,300 V$ $I_C = 1,800 A$ $T_j = 125$	-	3.6	-	μs
	t_r		-	1.0	-	μs
逆回復特性	t_{rr}	$-di/dt = 2,500 A/\mu s$ $I_F = 1,800 A$ $T_j = 125$	-	1.0	-	μs

(c) 熱特性

項目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
熱抵抗	IGBT	両面冷却	-	-	0.010	/W
	Di		-	-	0.019	

③ EMB1801RM-25 の性能

3.1 最大定格および特性

EMB1801RM-25 の最大定格および特性を表1に示す。

3.2 飽和電圧特性

EMB1801RM-25 の $V_{CE} \cdot I_C$ 特性および $V_F \cdot I_F$ 特性を EMB1001RM-25 と比較しながら図4および図5に示す。図4に示すように、EMB1801RM-25 の直流定格電流 (1,800 A) でのコレクタ-エミッタ間飽和電圧は、EMB1001RM-25 の直流定格電流 (1,000 A) での値と同等である。また、双方とも、接合部温度が高くなるとコレクタ-エ

図4 $V_{CE(sat)}-I_c$ 特性

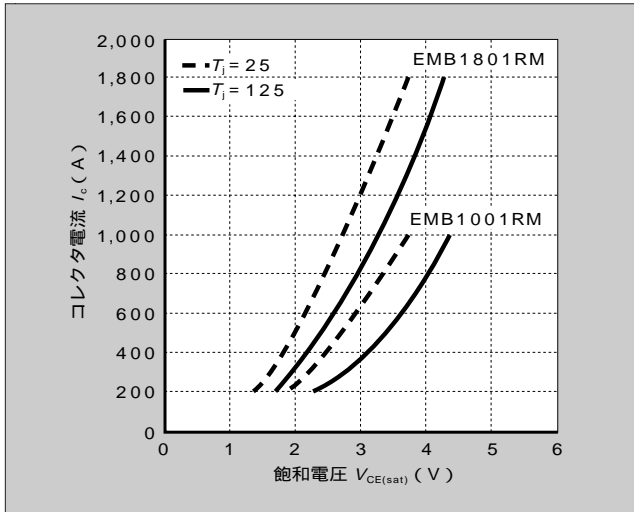
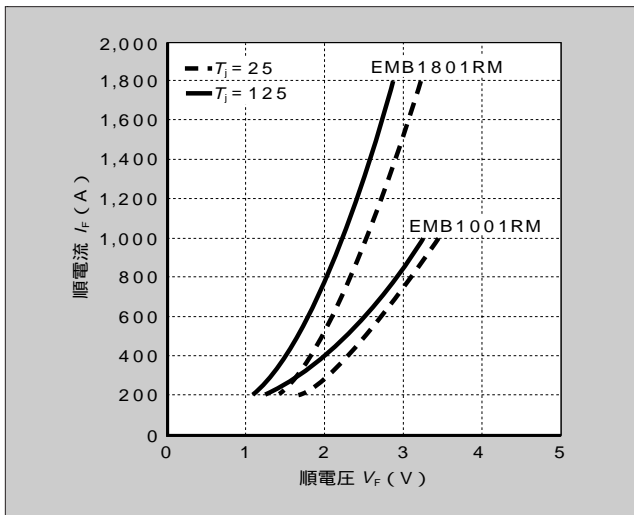


図5 V_f-I_f 特性



ミッタ間飽和電圧が上昇する傾向を有しているが、これは素子の並列接続を行う場合に電流分担の自己調整機能として作用するので有利である。

3.3 スイッチング特性

3.3.1 ターンオン特性

EMB1801RM-25 のターンオン時の動作波形例を図6に示す。図6は負荷電流が1,800 A の場合の波形であるが、IGBT にはフリーホイーリングダイオードの逆回復電流が重畳して流れるので、そのピーク値は2,900 A 程度になる。この条件下でのターンオン時間は3.2 μ s である。

3.3.2 ターンオフ特性

EMB1801RM-25 の直流定格電流 (1,800 A) を遮断したときの動作波形例を図7に、4,000 A を遮断したときの動作波形例を図8に示す。直流定格電流を遮断したときのターンオフ時間は2.4 μ s である。

また、4,000 A の電流をスパイク電圧2,400 V の条件下で遮断できており、パルス電流定格 (3,600 A) までのRBSOA (ターンオフ時安全動作領域) を十分に余裕を

図6 ターンオン波形 (1,800 A, 125)

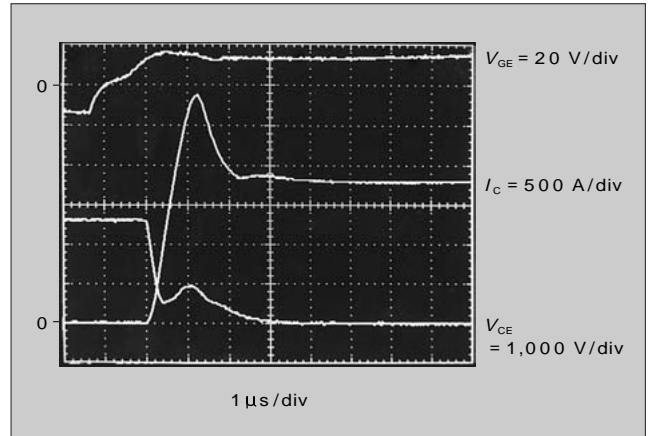


図7 ターンオフ波形 (1,800 A, 125)

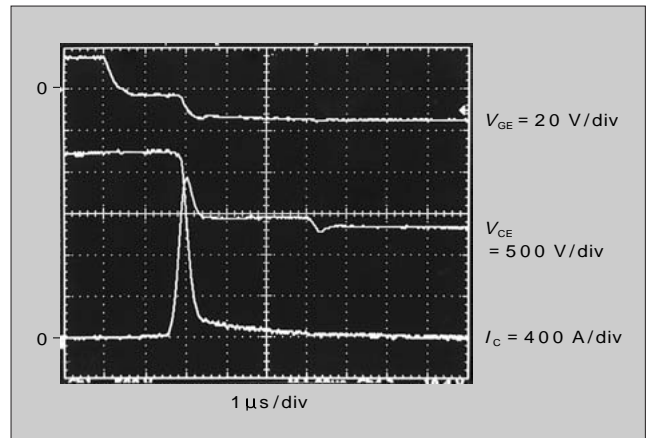
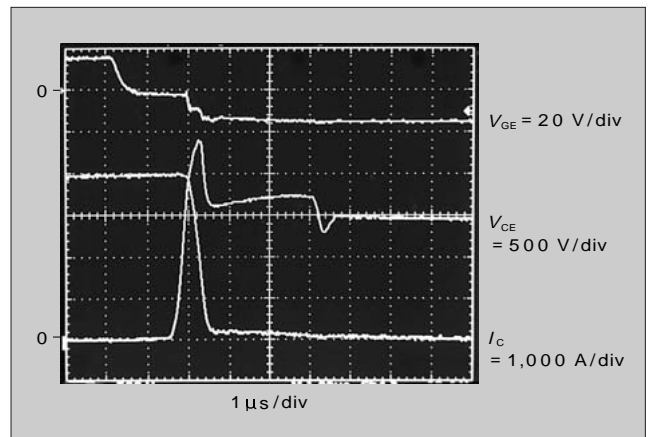


図8 ターンオフ波形 (4,000 A, 125)



持ってクリアしている。

4 外形

図9に EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 の外観を示す。図10に EMB1801RM-25 の外形を示す。EMB1801RM-25 は 140 × 140 (mm) の小形の正方形のパッケージに収納されている。EMB1001RM-25 と比較すると、約 1.3 倍のパッケージサイズで 1.8 倍の電流量を達成したことにな

図9 EMB1001RM-25 と EMB1801RM-25 の外観

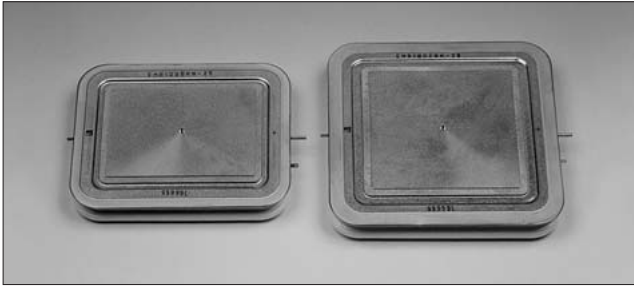


図10 EMB1801RM-25 の外形

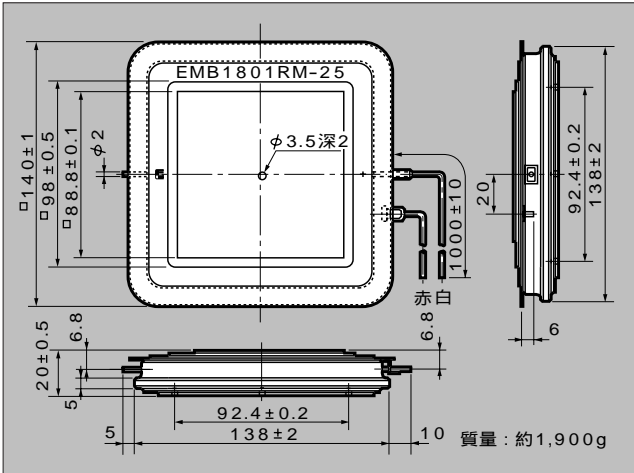


図11 新幹線 700 系先行試作車の外観



る。

⑤ 応用例

東海旅客鉄道(株)は、乗り心地の改善や対環境性の向上などを目的として、IGBTを採用した新幹線700系先行試作車(図11)を開発した。

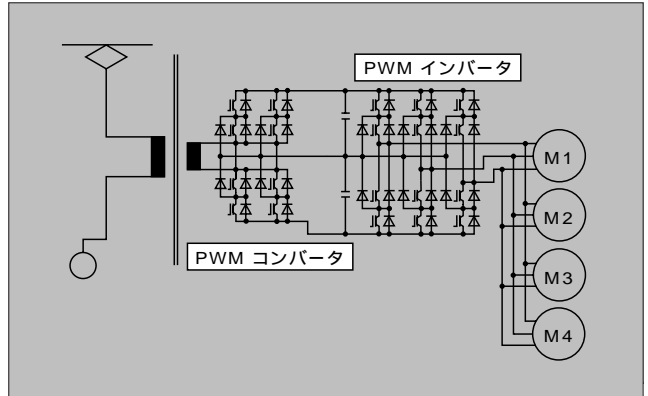
この主変換装置(TCI2)の外観を図12に、回路構成を図13に示す。

TCI2には、1台のコンバータと1台のインバータが使用されている。双方とも3レベル構成を採用しており、EMB1801RM-25相当品(EMB1802RM-25)が1並列で

図12 主変換装置の外観



図13 主変換装置の回路構成



使用されている。

TCI2では、IGBTならびに3レベル主回路構成の採用による低騒音化や制御性能の向上、そして大容量素子の採用による主回路構造の簡素化などが図られている。

⑥ 改良形 EMB1805RM-25

現在開発中のEMB1805RM-25は、EMB1801RM-25とほぼ同一の外形、電気的・熱的性能を持ちながら、チップの改良やパッケージ内部構造の改良などによって、素子組立性の向上やコストの低減をめざした素子である。

また、EMB1001RM-25やEMB1801RM-25では、チップと接するエミッタ側のモリブデン電極に島形状のものをしていたが、EMB1805RM-25ではこれをフラットなものとし、これに合わせてチップも改良したので、エミッタ側の接触面積が増え、以前より高い加圧力(スタック構成時)を許容できるようになっている。

EMB1801RM-25の許容最大加圧力は5tであるが、EMB1805RM-25では6tまで許容できると推定している。

この最大許容加圧力は、特に一つのスタックに多数個の素子を直列接続する用途(高電圧変換装置)では重要であり、EMB1805RM-25は、このような用途へも適した性能を有する素子である。

⑦ あとがき

2.5kV/1.8kAの定格を有する平形IGBT(EMB1801RM-25)に採用した技術ならびに性能、そして応用例について、

さらに開発中の EMB1805RM-25 の概要について述べた。

これらの素子は、2.5 kV クラスでは世界最大の電流定格を有しており、その実用化によって、大容量の変換装置を素子の並列接続なしに構成できるようになる。

しかしながら、4.5 kV の GTO サイリスタに置き換えるには 3 レベル主回路構成の採用あるいは素子の直列接続などが必要であり、今後は、より高い耐圧の IGBT の実用化を望む声が一段と強くなると思われる。

3 レベル主回路構成での適用が進展している状況を鑑(かんが)みると、これから開発する素子に対しては、高耐圧でしかもより高速の素子が望まれることになり、要求される技術レベルはきわめて高いものになるが、富士電機は、その実現に向けてたゆまぬ努力を積み重ねていく所存

である。

参考文献

- (1) 一條正美ほか：可変速駆動装置用パワーデバイスの動向，富士時報，Vol.68，No.12，p.682-686（1995）
- (2) 関康和ほか：2.5 kV/1 kA 平型逆導通 IGBT（パワーパック IGBT），富士時報，Vol.69，No.5，p.290-294（1996）
- (3) Takahashi, Y. et al. : Ultra high-power 2.5 kV-1.8 kA Power Pack IGBT. 1997 IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. p.233-236（1997）
- (4) Seki, Y. et al. : Ultra high-ruggedness of 2.5kV/1kA Power Pack IGBT. 7th European Conference on Power Electronics and Applications. Vol.2，p.2.049-2.053（1997）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
光触媒による NOx 除去プロセスの検討	富士電機総合研究所 " "	西方 聡 西村 智明 天野 功	光機能材料研究会第 4 回シンポジウム光触媒反応の最近の展開（1997-12）
光触媒の閉鎖系への適用に関する検討 2)	富士電機総合研究所 " "	西村 智明 西方 聡 天野 功	
ZnO パリスタ単一粒界の定量的 ICTS 解析	富士電機総合研究所 "	田中 顕紀 向江 和郎	日本 Material Research Society (MRS) 学術シンポジウム（1997-12）
燃料電池の概要	富士電機総合研究所	西原 啓徳	日本電機工業会第 18 回新エネルギー講演会（1997-12）
富士電機における平板型 SOFC の開発状況	富士電機総合研究所 " " " " "	小関 和雄 新藤 義彦 後藤平 二郎 角川 功明 竹野入 俊司 岩崎 慎司 中原 ゆかり	SOFC 研究発表会（1997-12）
半導体を用いた無誘導消型電力用限流器——三相系への拡張——	富士電機総合研究所 "	磯崎 優公 森田	
コジェネ発電設備の商用系統連系点への限流器適用効果の検討	富士電機総合研究所 " 産業システム事業部 機器制御事業部 富士ファコムシステ	磯崎 優公 岩井 弘美 小寺 昭紀 石川 熙 菅 浩幸	電気学会静止器研究会（1997-12）
簡易回生形ソフトスイッチング回路	ム	西川 幸廣 五十嵐 征輝 黒木 一男	電気学会半導体電力変換研究会（1998-1）
銅 - アルミ超音波圧接部における金属間化合物の成長に伴う信頼性検討	富士電機総合研究所 " "	山崎 和昭 北見 彰 橋本 信行	溶接学会マイクロ接合研究委員会第 4 回シンポジウム（1998-1）
表面磁石構造 PM モータを用いた駆動システムの高性能制御方式	富士電機総合研究所 " 変電システム製作所	佐藤 芳信 藤田 光悦 柳瀬 孝雄 木下 繁則	日本電動車両協会（1998-1）
微小角入射 X 線回折による Co 系面内磁気記録媒体の構造評価 2)	富士電機総合研究所 " " "	大沢 通夫 広瀬 隆之 小沢 賢治	第 11 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（1998-1）



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。