

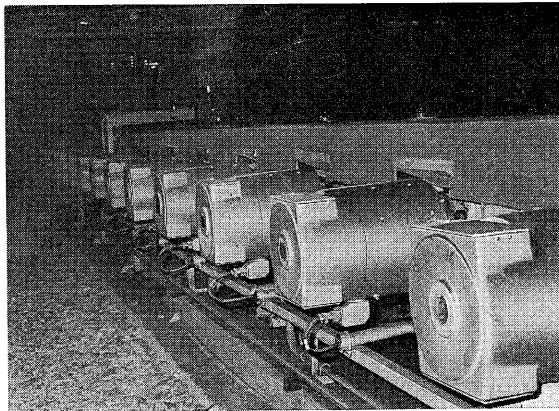
# 製鉄所テーブルローラ用永久磁石励磁直流電動機

## Permanent Magnet Excited DC Motors for Roller Tables in the Metal Industry

沢田 進\* 松本 信二\*  
Susumu Sawada Shinji Matsumoto

### I. ま え が き

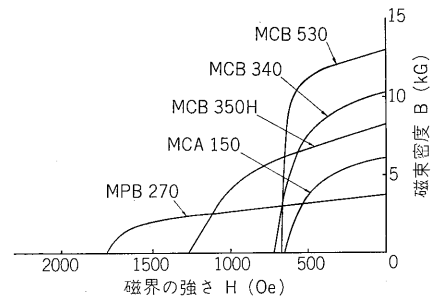
近年の工業材料の進歩は著しく、中でも永久磁石材料の性能向上は急速に発展し、磁気エネルギーおよび磁気安定性が飛躍的に進歩した。特に高い磁気エネルギーを有する鑄造磁石 Al-Ni-Co 系の出現により、従来制御用小形回転機に限られていた永久磁石の使用は、最近製鉄所補機駆動用直流電動機分野にまで利用されるようになった。一般にテーブルローラ駆動用電動機は始動時間が短かく、加減速性能にすぐれ各ローラ間のせん速制御が容易に行なわれることが必要である。永久磁石電動機はこれらの条件を満足し、同時に他励電源が不要であるため設備費の節減、保守点検が容易となる長所がある。当社は今回川崎製鉄・水島製鉄所向け No.2 厚板精整設備用テーブルローラ駆動用直流電動機として、2.2kW、3.3kW 166 台を製作納入したので以下にその概要と特長をのべる。



第1図 テーブルローラ駆動用永久磁石励磁直流電動機  
Fig. 1. Permanent magnet excited DC motors for roller tables

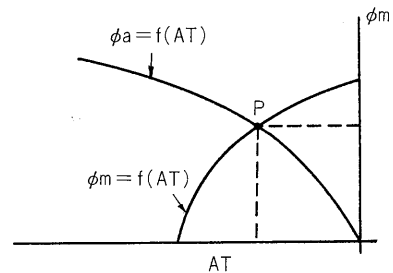
### II. 最近の永久磁石材料

近年の工業用材料の進歩とともに、永久磁石の技術的進歩は著しく、品種も多種多様化し、大幅に変わってきた。永久磁石材料は製造方法により、鍛造磁石、鑄造磁石、焼結磁石の3種類とし、特性によりさらに分類され



第2図 代表的磁石材料の減磁曲線

Fig. 2. Typical demagnetization curves of permanent materials



第3図 磁石の動作原理

Fig. 3. Operation principle of permanent magnet

第1表 永久磁石の種類

Table 1. Some permanent materials

種	類	記号	適用	
1種	1号	MFA 25	鍛造磁石	
	2号	MFA 80		
2種	甲	1号	等方性	
		2号		鑄造磁石
		3号		
	4号			
乙	1号	異方性		
	2号			
	3号			
	4号			
3種	甲	1号	等方性	
		2号		焼結磁石
	乙	1号		
		2号		

備考 記号説明

M: Magnet F: Forge C: Cast

P: Powder A: 等方性 B: 異方性

記号末尾の数字: 最大エネルギー積  $(BH)_{max}$  (MG·Oe) の下限値×100

\* 神戸工場設計部

第2表 永久磁石の特性値  
Table 2. Characteristic value of permanent magnet

種類	記号	保磁力 $H_c$		残留磁束密度 $B_r$		最大エネルギー積 $BH_{max}$		可逆透磁率* ( $\mu$ ) <sub>rev</sub>	密度* $D$	
		(Oe)	(kA/m)	(kG)	(Wb/m <sup>2</sup> )	(MG·Oe)	(kJ/m <sup>3</sup> )			
1種	MFA 25	60~90	4.77~7.16	8.5~9.5	0.85~0.95	0.25~0.35	1.99~2.79	8.0~18.0	8.2	
	MFA 80	200~240	16.0~19.1	9.5~10.0	0.95~1.00	0.8~0.90	6.37~7.16	6.0~12.0	8.2	
2種	甲	MCA 110	520~600	41.4~47.7	5.5~6.5	0.55~0.65	1.1~1.3	8.75~10.3	3.0~5.0	6.9
		MCA 130	580~700	46.2~55.7	5.5~7.0	0.55~0.70	1.3~1.5	10.3~11.9	3.0~4.5	7.0
		MCA 150	620~720	49.3~57.3	6.0~7.3	0.60~0.73	1.5~1.7	11.9~13.5	3.5~5.0	7.0
	乙	MCB 340	640~740	50.9~58.9	10.3~11.3	1.03~1.13	3.4~4.2	27.1~33.4	3.4~6.0	7.3
		MCB 450	580~660	46.2~52.5	12.3~13.3	1.23~1.33	4.5~5.5	35.8~43.8	2.5~4.5	7.3
		MCB 530	630~730	50.1~58.1	12.5~13.5	1.25~1.35	5.3~6.3	42.2~50.1	2.5~4.5	7.3
		MCB 350H	1,200~1,400	95.5~111.4	8.0~9.0	0.80~0.90	3.5~4.5	27.9~35.8	3.0~5.0	7.2
3種	甲	MPA 80	1,500~1,700	119.4~135.3	2.0~2.2	0.20~0.22	0.8~1.0	6.37~7.96	1.1~1.2	4.6
		MPB 270	1,700~2,000	135.3~159.2	3.5~4.0	0.35~0.40	2.7~3.3	21.5~26.3	1.1~1.2	5.0
	乙	MPB 210	2,200~2,600	175.1~206.9	3.0~3.5	0.30~0.35	2.1~2.5	16.7~19.9	1.1~1.2	4.9

- 備考 1. \*印は参考値とする。  
 2. 可逆透磁率は、最大エネルギー積を示す点、またはその近傍における値とする。  
 3. この表の特性は、JIS C 2501 (永久磁石試験方法) の試験片についての数値である。  
 4. CGS単位をMK S単位に換算する式はつぎによる。  

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m} \quad 1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ Wb/m}^2 \quad 1 \text{ G} \cdot \text{Oe} = 7.958 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$$
  
 5. 保磁力は、磁束密度が0になる磁界の強さである。

第3表 永久磁石材料の化学成分 (参考値)  
Table 3. Chemical components of permanent magnet materials

種類	記号	C	Cr	W	Co	Ni	Al	Cu	Ti	Fe		
1種	1号	MFA 25	1	4	1	3	—	—	—	残		
	2号	MFA 80	1	5	6	35	—	—	—	残		
2種	甲	1号	MCA 110	—	—	—	<3	25	13	—	<3	残
		2号	MCA 130	—	—	—	4	23	11	<3	<1	残
		3号	MCA 150	—	—	—	12	21	10	<6	<1	残
	乙	1号	MCB 340	—	—	—	24	15	8	3	1	残
		2号	MCB 450	—	—	—	24	14	8	3	—	残
		3号	MCB 530	—	—	—	24	14	8	3	—	残
		4号	MCB 350H	—	—	—	34	15	7	4	5	残
3種	甲	1号	MPA 80	Ba 0.6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 他に少量の添加物								
	乙	1号	MPB 270	Ba 0.6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 他に少量の添加物								
		2号	MPB 210	Ba 0.6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 他に少量の添加物								

ている。JIS C 2502 (1966) に規定されている性能、化学成分の概略値を第1~3表に示す。直流機主極励磁用永久磁石は最大磁気エネルギー積  $(BH)_{max}$  が大きく、磁気特性の安定している Al-Ni-Co 系鑄造磁石が一般に使用される。第2図は代表的な永久磁石材料の減磁特性曲線である。

### III. 永久磁石寸法の仕様決定

永久磁石を使用する場合磁気回路の諸特性、電動機運転仕様を検討し最小の寸法で性能を満足するよう経済設計を行なう必要がある。永久磁石の動作は、第3図に示すように空隙を含む磁気回路の磁気飽和特性と、磁石の

減磁曲線との交点  $P$  にて定まる。したがって、所要磁束  $\phi_m$  は、

$$\phi_a = \phi_m = \phi_g + \phi_o$$

ここで  $\phi_g$ : 有効空隙磁束  $\phi_o$ : 漏れ磁束

$$\phi_o = \sigma \cdot \phi_g \quad \sigma: \text{漏れ係数}$$

したがって  $\phi_m = (1 + \sigma) \phi_g$

いま動作点の磁束密度を  $B_m$  とすれば、

$$B_m \cdot A_m = (1 + \sigma) B_g \cdot A_g$$

$$\therefore A_m = (1 + \sigma) A_g \cdot \frac{B_g}{B_m} \dots \dots \text{所要磁石断面積}$$

$B_g$ : 空隙磁束密度  $A_g$ : 空隙面積

次に所要起磁力  $AT_m$  は、

$$AT_m = (1 + \gamma) AT_g$$

$AT_g$  : 空際起磁力  $\gamma$  : 磁気抵抗係数

磁石動作点の磁界の強さを  $H_m$  とすれば,

$$H_m \cdot l_m = (1 + \gamma) H_g \cdot g$$

$$\therefore l_m = (1 + \gamma) g \cdot \frac{H_g}{H_m} \dots \dots \text{所要磁石高さ}$$

$H_g$  : 空際における磁界の強さ  $g$  : 空際の長さ  
 所要磁石体積  $V_m$  は,

$$V_m = A_m \cdot l_m = (1 + \sigma)(1 + \gamma) \cdot V_g \cdot \frac{H_g \cdot B_g}{H_m \cdot B_m}$$

ここで,  $V_g = A_g \cdot g \dots \dots$  空際容積

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \text{ であるから,}$$

$$V_m = (1 + \sigma)(1 + \gamma) \frac{V_g \cdot B_g^2}{\mu_0 \cdot H_m \cdot B_m}$$

磁石体積  $V_m$  は, 空際磁束密度  $B_g$  の 2 乗に比例し, 磁気エネルギー ( $B_m \cdot H_m$ ) に反比例する. したがって経済的寸法は ( $B_m \cdot H_m$ ) が最大となるよう選定すべきである.

$$V_m(H_m \cdot B_m) = (1 + \sigma)(1 + \gamma) \cdot V_g \cdot (H_g \cdot B_g)$$

であるから

$$\therefore V_m \cdot W_m = (1 + \sigma)(1 + \gamma) V_g \cdot W_g$$

$$\therefore W_g = \frac{1}{(1 + \sigma)(1 + \gamma)} \cdot \frac{V_m}{V_g} \cdot W_m$$

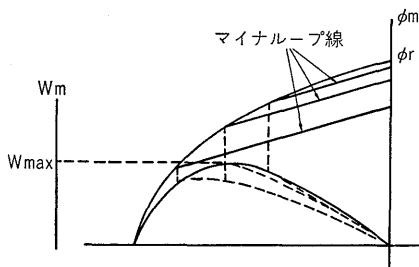
$W_g$  : 空際の磁気エネルギー

$W_m$  : 磁石の磁気エネルギー

磁石の磁気エネルギー  $W_m$  は,

$$W_m \propto B_m \cdot H_m = \frac{\phi_m \cdot AT_m}{V_m}$$

第 4 図の各動作点における磁気エネルギー  $W_m$  の変化を示したものである.

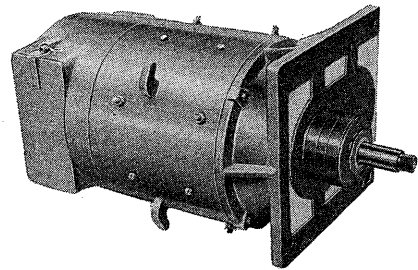


第 4 図 動作点と磁気エネルギー

Fig. 4. Internal magnetic energy characteristics of stabilized point

#### IV. 永久磁石励磁直流電動機

一般にテーブルローラ駆動電動機は加減速性能がすぐれ各テーブル間のせん速制御を行なうため, 他励直流電動機が多く使用される. 直流電動機をレオナード制御により各テーブル間のせん速を行なう場合界磁電源変動, 温度による界磁抵抗変動などのため主極磁束が変動し速

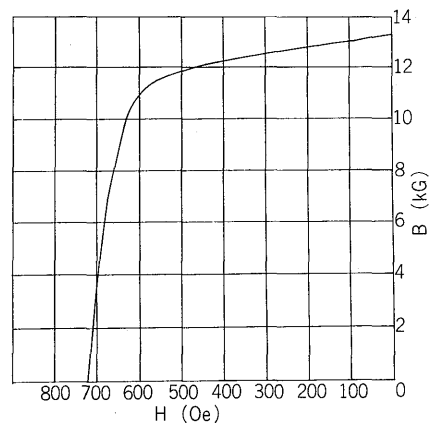


第 5 図 aEPMG 57/18 形ローラ駆動用永久磁石直流電動機

Fig. 5. Permanent magnet excited DC motor, type aEPMG 57/18 for roller tables

度差を生ずることがある. これらの現象は巻線付他励電動機の場合さげがたいが主極励磁に永久磁石を使用すれば界磁電源が不要であるため, その影響をうけず, 主極磁束の変動がなくなり, 定安した速度特性が得られる. 第 5 図は永久磁石励磁によるテーブルローラ用直流電動機の外観である. 永久磁石には, 高い磁気エネルギー ( $BH$ )<sub>max</sub> の Al-Ni-Co 系で磁気特性の安定したものを使用している. 第 6 図は減磁曲線である. 以下にその特長をのべる.

- ① 界磁損失がないため効率が低い。
- ② このため全閉形電動機に適し, 小形軽量設計となり  $GD^2$  が小さく, 高ひん度使用に有利である。
- ③ 温度変動が生じても安定した速度特性が得られる。
- ④ 過負荷時の速度特性が安定している。
- ⑤ 界磁回路が不要のため, 制御回路が簡単で設備費が安価である。
- ⑥ 保守点検が容易である。

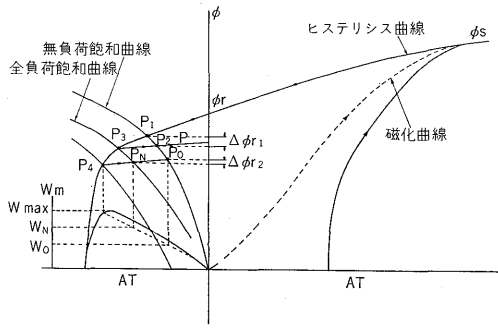


第 6 図 Al-Ni-Co 磁石の減磁曲線

Fig. 6. Demagnetization curve of Al-Ni-Co magnet

#### 1. 永久磁石電動機の動作点

永久磁石を磁化すると, 磁化曲線をえがき飽和磁束  $\phi_s$  まで磁化される. 空際をもつ磁気回路に組込まれた磁石は, ヒステリシス曲線の第 2 象限のいわゆる減磁曲線上の磁気状態となる. 第 7 図は動作原理を示したもので



第7図 永久磁石励磁直流電動機動作説明

Fig. 7. Magnetic relationships of a permanent magnet excited DC motor

ある。減磁曲線と無負荷飽和曲線との交点  $P_1$  は、安定減磁前の動作点である。負荷時は電機子反作用の影響のため、動作点は  $P_3$  に移動することになり、再び無負荷になった場合、可逆透磁率  $\mu_r$  により定まる、 $P$  線上をたどり、磁束が  $\Delta\phi_{r1}$  減少した、点  $P_2$  になり速度上昇することになる。そこであらかじめ  $P_4$  点まで強制減磁して、動作点を  $P_4 \leftrightarrow P_0$  の可逆マイナーループ上に調整すれば、負荷による減磁は、 $\Delta\phi_{r2}$  と非常に少なくなる。マイナーループとの交点  $P_N, P_0$  は、全負荷、無負荷の磁束動作点である。磁気エネルギー  $W$  の変化は、マイナーループにしたがって、 $W_N \leftrightarrow W_0$  と変化する。

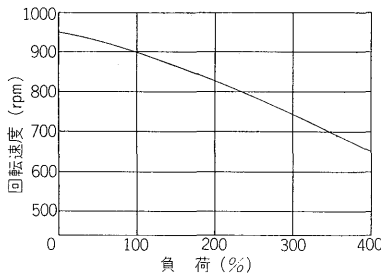
2. 速度特性

直流電動機の回転速度は次式で表わされる。

$$n = k \cdot \frac{V - I_a R_a}{\phi - \Delta\phi}$$

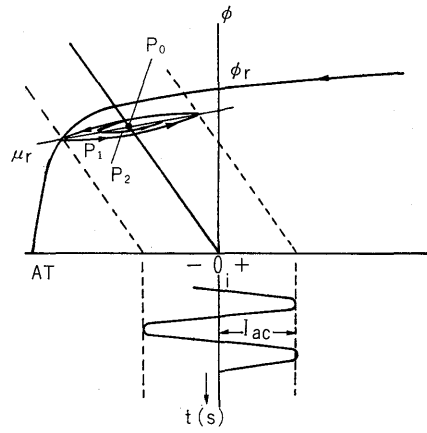
$k$ : 定数  $V$ : 電動機端子電圧  $I_a$ : 電機子電流  
 $R_a$ : 電機子回路抵抗  $\phi$ : 無負荷時主極磁束  
 $\Delta\phi$ : 主極磁束の変化量

電機子起磁力の影響および、磁石の温度ドリフトにより、主極磁束はいくらか減少することになるが、電機子抵抗  $R_a$  による電圧降下と、温度上昇による抵抗増大のためその影響は打消され、安定した速度特性が得られる。実測した結果、6h 端子電圧一定のもとで全負荷運転したとき、回転速度変動は、1%~2.2% 以内であっ



第8図 3.3kW 永久磁石励磁直流電動機負荷特性 (75°Cにて)

Fig. 8. Load characteristic curve of 3.3kW permanent magnet excited DC motor (at 75°C)



$$i = I_{ac} \sin \omega t$$

$P_1, P_2$  = マイナーループ  
 $P_0$  = 安定動作点  
 $\mu_r$  = 可逆透磁率

第9図 永久磁石の交流減磁動作

Fig. 9. Demagnetization effects of AC excitation a permanent magnet circuit

た。第8図は 3.3kW 220V 900rpm 電動機の負荷特性である。テーブルローラは各個駆動方式であるため、各電動機回転速度のばらつきは極力小さくしなければならない。着磁後商用周波による交流減磁によって、無負荷回転速度のばらつきは  $\pm 1.0\%$  以内に調整できた。第9図は交流減磁説明である。着磁コイル端子間に交流を印加し、その値を加減することにより磁束調整を行ない任意の回転速度に設定することができる。この場合動作点を安定させるため、交流電流を漸減し、マイナーループ  $P_1$  から  $P_2$  に移動させ、 $P_0$  交点にて動作させるよう調整することが必要である。

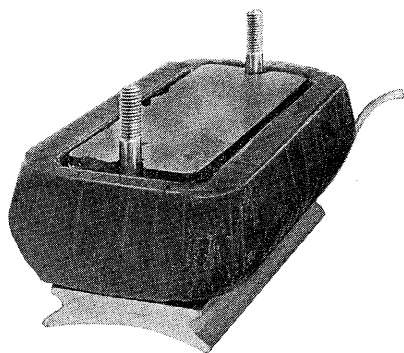
3. 永久磁石の温度変動による磁束変化

加熱による減磁は、保磁力を低下させる方向に温度変化させた場合、熱エネルギーの増加による磁壁、あるいは磁化ベクトルの再配列によって可逆減磁を生ずることがあるが、300°C 以下であればこの影響は少ない。磁束変化の値は磁石のパーミアンスをはじめいろいろな要素が影響する。この値は通常可逆温度変化率で表わされ、Al-Ni-Co 系磁石では  $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$  程度と実用上問題とならない。300°C 以上の場合不可逆減磁を生ずることがあるが、電動機の絶縁許容温度から考えて、通常運転では可逆温度変化のみ考えればよい。

4. 磁束の経時変化

永久磁石は一度磁化されたあと、一定条件で長時間使用している間にわずかながら減磁がおこる。一般に経年変化といわれている。この影響をなくするには着磁後 5%~10% の交流安定減磁を行ない、不安定な磁区配列を安定な状態にすれば磁束変化はきわめて少なく、その影響は無視される。

5. 過負荷特性



第 10 図 着脱磁コイル外観  
Fig. 10. Outer view of exciting coil

他励直流電動機は過負荷時電機子反作用により、主極磁束が減少し負荷特性が不安定になりやすいが、永久磁石励磁の場合適切な強制減磁をあらかじめ行なっておくことにより安定した特性が得られる。電機子起磁力の影響を極力小さくするよう主極極片設計、電気設計には充分検討を加え、瞬間過負荷については 500%~600% まで考えた。

6. 着 磁

電動機組立解体を容易に行なうため磁石に着磁コイルを設け完全に飽和するまで磁化起磁力を与えた。着磁コイルは 2~3 s 通電に耐えるようコンパクト設計されて

いる。

第 10 図は着磁コイルの組立外観である。一般に磁化起磁力は、直流電源を用いて (保磁力  $H_c$ ) × (磁石高さ  $l_m$ ) × 5 以上が必要である。磁化方法には直流磁界を用いるほかに、イグナイトロンのパルス電流が用いられることもあるが、磁石寸法が比較的大きい場合には、表皮作用のため充分磁石の中央まで磁化されないことがある。このため直流電源により 2~3 s 間通電する磁化を採用した。

V. む す び

以上永久磁石励磁直流電動機について紹介したが、高性能磁石材料の実用化が今後ますます発展し、製鉄所テーブルローラのほか、一般補機用電動機にも利用されることと思う。今後もお一層応用分野を広げ研究開発する所存でありご愛用をお願いする次第である。

参考文献

- (1) I. Sečić: DC Motors with Permanent Magnet Excitation for Roller Tables, Brown Boveri Review Vol. 55 No. 10/11 618 (1968)
- (2) James C. Wachob: Permanent-Magnet DC Motors, Control Systems Vol. 42 158 (1969)
- (3) 牧野昇: 最近の磁石とその応用 119.(昭 33-10)
- (4) 日特技報: 4-2, 72 (昭 43-12)

発明の紹介

永久磁石式同期機の回転子製作方法

(特許 第 512275 号)

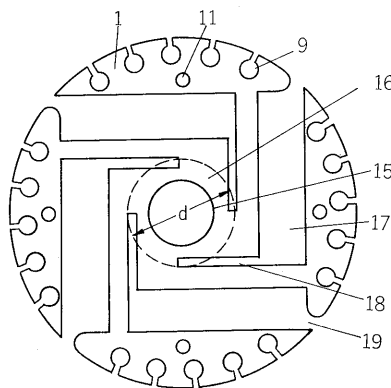
この発明は紡錘駆動用電動機などとして用いられる同期電動機の回転子製作方法に関するものであり、この電動機は当社商品名「パーモソン」と称せられる。

この電動機の構造上の特徴は回転子鉄心に組み込まれる永久磁石片が周面に出ないように配置されるものであり、したがって磁極面積が大きく小形でありながら出力が大きい。永久磁石片のNS両極磁束を打抜鉄心内で巧妙に磁極面に導くように配慮しているために磁極片を含むセグメントは極数に応じて分割されており、これがこの種の回転子の製作を工数的に不利にしている。

この発明では各セグメントを軸孔近くで結合する環状橋絡部を設けて打抜き、鉄心組立て、永久磁石片そう入、かご形導体の鑄込みの各工程の後にボール盤などにより所定の軸径まで軸孔を広げて橋絡部を除去する。図において 1 はセグメント、16 は環状橋絡部、17 は永久磁石片そう入孔、9 はかご形導体用スロットで

ある。

この製作方法により回転子の製作が容易となりかつ安価に製作されるようになった。これに関連するものとして特許第 521133 号および実用新案登録第 861593 号がある。





\*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。