巻線形誘導電動機間欠運転時の温度特性*

岡本孝治**・武田幸男**・田中貞雄***

Temperature Characteristics of Intermittent Operation
of Wound-rotor Induction Motor

By Takaharu Okamoto, Yukio Takeda, Sadao Tanaka

The temperature rise characteristics of the induction motor can be calculated, if the copper loss, the iron loss and thermal model constants are given. Thermal model constants include thermal conductivity from coil to core (λ_{cf}), heat transfer coefficient from coil to air (λ_{ca}), heat transfer coefficient from core to air (λ_{fa}), $\lambda_a \equiv \lambda_{cf} + \lambda_{ca}$, $\lambda_b \equiv \lambda_{cf} + \lambda_{fa}$, thermal unit capacities of coils (H_c) and iron cores (H_f). The time constant of temperature rise of the induction motor increases with the load increasing. In this case, values of H_c and H_f are made to hold constant and λ_a , λ_b and λ_{cf} decrease as the load increases. In this paper, the temperature rise characteristics of the continuous operation, intermittent operation and the repeated on-off operation are analyzed and calculated by using the afore mentioned method.

1. ま え が き

誘導電動機¹⁾や同期機²⁾の固定子のコイルや鉄心の温度上昇値の計算方法については、すでに各種の発表がされている。筆者等も誘導電動機(以下IMと称す)の負荷が増加してもスリップがほとんど増加しないばあいについては、すでに発表した³⁾。巻線形IMは負荷の増加とともにスリップが大きく増加し、温度上昇時の時定数が増加する。このばあいの温度上昇特性の計算方法と、熱モデル定数の求め方について前回の方法を発展させ、さらにトルクループを用いた方法、くりこみ式計算方法について検討を行った。

2. 誘導電動機の熱モデル

図1はIMの固定子での熱の流れを示し、伝達または伝導される熱量、温度上昇を生じる各点の位置を示している。

単位時間あたりの固定子の銅損、鉄損をそれぞれ W_c 、 W_f ；コイル及び鉄心の熱容量をそれぞれ H_c 、 H_f ；コイル及び鉄心の温度上昇値をそれぞれ θ_c 、 θ_f とし、微小時間経過後のコイル及び鉄心の温度上昇値をそれぞれ $d\theta_c$ 、 $d\theta_f$ とすると、

Q_{ca} : コイルから空気へ伝達される熱量
 Q_{fa} : 鉄心から空気へ伝達される熱量
 Q_{cf} : コイルから鉄心へ伝導される熱量
 θ_c : コイル温度上昇値
 θ_f : 鉄心温度上昇値
 θ_{ff} : 内部鉄心温度上昇値

図1 固定子での熱の流れ

$$W_c \cdot dt - \lambda_{cf}(\theta_c - \theta_f)dt - \lambda_{ca} \cdot \theta_c \cdot dt = H_c \cdot d\theta_c \quad (1)$$

$$W_f \cdot dt - \lambda_{cf}(\theta_f - \theta_c)dt - \lambda_{fa} \cdot \theta_f \cdot dt = H_f \cdot d\theta_f \quad (2)$$

上式で λ_{ca} は θ_c を示すコイルから空気へ、 λ_{fa} は θ_f を示す鉄心から空気への熱伝達率、 λ_{cf} は熱伝導率を θ_c の点から θ_f までの距離で除した値である。

上式をラプラス変換し初期値を0とすれば、

* 原稿受付 昭和59年8月1日

昭和59年春季学術講演(昭和59年5月24日)

** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

$$\theta_c(s) = \frac{\lambda_{cf}}{H_c \cdot s + \lambda_a} \cdot \theta_f(s) + \frac{W_c(s)}{H_c \cdot s + \lambda_a} \quad (3)$$

$$\theta_f(s) = \frac{\lambda_{cf}}{H_f \cdot s + \lambda_b} \cdot \theta_c(s) + \frac{W_f(s)}{H_f \cdot s + \lambda_b} \quad (4)$$

ただし,

$$\lambda_a \equiv \lambda_{cf} + \lambda_{ca}, \quad \lambda_b \equiv \lambda_{cf} + \lambda_{fa} \quad (5)$$

上式から図2に示す熱モデルのブロック図が得られる。熱モデル定数の求め方についてはすでに発表³⁾したが、飽和後の θ_c , θ_f をそれぞれ $\theta_c(\infty)$, $\theta_f(\infty)$ とすると,

$$\theta_c(\infty) = \frac{W_c}{\lambda_c} + \frac{W_f}{\lambda_f} \quad (6)$$

$$\theta_f(\infty) = K \cdot \theta_{ff}(\infty) = \frac{W_c}{\lambda_g} + \frac{W_f}{\lambda_g} \quad (7)$$

ただし, θ_{ff} は図1に示すように、コイルに近い鉄心の位置での温度上昇値(以後内部鉄心温度上昇値と称する)で、この位置まで外部から熱電対を挿入して鉄心の温度を測定するものとし、 $\theta_{ff}(\infty)$ はその飽和値である。 K は比例定数で、 λ_a , λ_f , λ_g は λ_a , λ_b , λ_{cf} の関数である。

$$A \equiv 1 / \left(\frac{1}{\lambda_g \cdot \lambda_c} - \frac{1}{\lambda_f^2} \right) \quad (8)$$

とおくと,

$$\lambda_a = \frac{A}{\lambda_g}, \quad \lambda_b = \frac{A}{\lambda_c}, \quad \lambda_{cf} = \frac{A}{\lambda_f} \quad (9)$$

であらわされる。

図2 誘導電動機の熱モデルブロック図

3. 銅損と鉄損が求められており、かつ 時定数が負荷の増加とともに増加する ばあいの温度上昇特性の計算方法

3.1 AC 220 [V] 印加のとき この論文で用い

る時定数とは、温度上昇時には上昇値が0から飽和値の63.2%に上昇するまでの時間を称し、下降時には飽和値から飽和値の36.8%に下るまでの時間をあらわしている。温度上昇時及び下降時の温度上昇特性はほぼ指数関数に従っている。

この実験に用いた巻線形IMは2.8 [kW], 6極, 60 [Hz], AC 220 [V], 1200 [rpm]のクレーンモータで、その等価回路図を図3に示している。ただし各定数は25 [°C]における値を示している。2章の方法で熱モデ

図3 誘導電動機の等価回路図

表1 AC 220 [V]印加時の熱モデル定数
(H_c , H_f を入力により変えたとき)

IMへの 入力	λ_a	λ_b	λ_{cf}	H_c	H_f	H_f/H_c
W	W/°C	W/°C	W/°C	W·min/°C	W·min/°C	
320	98.6	2125.6	446.3	102	259	2.539
460	同上	同上	同上	107	261	2.439
1050	同上	同上	同上	113	272	2.407
1610	同上	同上	同上	120	290	2.417
2300	同上	同上	同上	136	334	2.456
3050	同上	同上	同上	154	377	2.448

ル定数を求めると表1のように、 $\lambda_a = 98.6$, $\lambda_b = 2125.6$, $\lambda_{cf} = 446.3$ となる。 H_c , H_f は電算機により時定数が実測値にあうように求めると、表1に示すように H_c , H_f は負荷が増すとともに増加する。図2のブロック図からわかるように、温度上昇の時定数をきめるのは H_c/λ_a 及び H_f/λ_b であり、負荷が増加するにつれて時定数も増加することをあらわしている。しかし熱容量は比熱と質量の積であるから、負荷の増加にかかわらず一定であるべきであるから、負荷が増加しても H_c , H_f は一定で、その逆に λ_a , λ_b が減少すると考える方が合理的である。そこで H_c , H_f の値は一定とし、負荷が増加しても表1の各負荷に対し、 H_c/λ_a , H_f/λ_b の値が変らぬように λ_a , λ_b を定めたのが表2である。

λ_{cf} については図2の H_c/λ_a , H_f/λ_b の項を0にすると θ_c , θ_f はそれぞれ $\theta_c(\infty)$, $\theta_f(\infty)$ をあらわすから、

表2 AC 220 [V]印加時の熱モデル定数
(λ_a , λ_b , λ_{cf} を入力により変えたとき)

IMへの 入力	λ_a	λ_b	λ_{cf}	H_c	H_f	λ_b/λ_a	λ_{cf}/λ_a
W	W/°C	W/°C	W/°C	W·min/°C	W·min/°C		
320	115.9	2380.0	513.8	120	290	20.53	4.427
460	110.5	2361.8	499.1	同上	同上	21.37	4.515
1050	104.7	2266.3	475.9	同上	同上	21.66	4.547
1610	98.6	2125.6	446.3	同上	同上	21.57	4.529
2300	87.0	1845.6	389.6	同上	同上	21.22	4.480
3050	76.8	1635.1	343.1	同上	同上	21.29	4.468

$$[(\theta_c(\infty) \times \lambda_{cf} + W_{cf}) \times \frac{\lambda_{cf}}{\lambda_b} + W_c] \times \frac{1}{\lambda_a} = \theta_c(\infty) \quad (10)$$

$$\therefore \lambda_{cf} = \frac{-W_f + \sqrt{W_f^2 - 4\theta_c(\infty) \cdot \lambda_b \cdot (W_c - \lambda_a \cdot \theta_c)}}{2\theta_c(\infty)}$$

(11)

(11)式に $\theta_c(\infty)$ の実測値、 W_c 、 W_f 、 λ_a 、 λ_b の値を代入すれば λ_{cf} が得られる。表2は前述の方法で求めた熱モデル定数で、物理的に解釈すると、負荷が増すとスリップが増し、ファンの効果も下り、熱伝達率や熱伝導率が低下し、時定数が大きくなることを示している。このモデル定数を用いて連続運転時及び間欠運転時の温度上昇特性を示したのがそれぞれ図4、図5である。ただし、

両者とも銅損、鉄損は連続運転の温度上昇飽和時の値を用いている。

3.2 AC. 160 [V]印加のとき AC. 220 [V]印加時の λ_a 、 λ_b 、 λ_{cf} を検討してみると、表2からわかるように λ_b/λ_a 、 λ_{cf}/λ_a の値はIMへの入力に関せず一定である。 λ_b/λ_a が一定である理由は、

$$\frac{H_c/\lambda_a}{H_f/\lambda_b} = \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \cdot \frac{H_c}{H_f} \quad (12)$$

$$\therefore \frac{\lambda_b}{\lambda_a} = \frac{H_c/\lambda_a}{H_f/\lambda_b} \cdot \frac{H_f}{H_c} \quad (13)$$

表3から(13)式の右辺の第1項は負荷にかかわらず一定であり、 H_c 、 H_f は表2から一定であるからである。前者の理由は、表4に示すように鉄心の温度上昇の時定数とコイルの温度上昇の時定数の比が一定であるためと推定される。この現象は別途実験した4/8極極数変換形IMについても同じ結果が得られている。 λ_{cf}/λ_a が一定である理由の証明はやや複雑となるので省略するが、表2に示すように一定になる。この結果、 $\lambda_b = 21.3 \times \lambda_a$ 、 $\lambda_{cf} = 4.50 \times \lambda_a$ が得られた。この関係がAC. 160 [V]印加時にも成立すると考え(10)式に代入すると、

$$\lambda_a = \frac{W_c + 0.211 \times W_f}{0.05 \times \theta_c(\infty)} \quad (14)$$

が得られ、IMの各負荷に対し $\theta_c(\infty)$ の実測値、 W_c 、 W_f の値を代入すると λ_a が求められる。また $\lambda_b = 21.3 \times \lambda_a$ 、 $\lambda_{cf} = 4.50 \times \lambda_a$ から λ_b 、 λ_{cf} の値が得られる。また H_c 、

表3 AC. 220 [V]印加時のIMへの入力と

$\frac{H_c/\lambda_a}{H_f/\lambda_b}$ の関係

IMへの入力	H_c/λ_a	H_f/λ_b	$\frac{H_c/\lambda_a}{H_f/\lambda_b}$
W	min.	min.	
320	1.035	0.122	8.484
460	1.086	0.123	8.830
1050	1.146	0.128	8.953
1610	1.217	0.136	8.949
2300	1.380	0.157	8.790
3050	1.563	0.177	8.831

表4 AC. 220 [V]印加時の鉄心の温度上昇時の、時定数とコイルの温度上昇時の時定数

IMへの入力	コイルの温度上昇時の時定数	鉄心の温度上昇時の時定数	鉄心の温度上昇時定数 コイルの温度上昇時定数
W	分	分	
320	17.6	16.4	0.932
460	18.1	16.8	0.928
1050	20.0	18.5	0.925
1610	21.9	20.4	0.932
2300	24.2	22.9	0.946
3050	27.4	25.8	0.942

図4 連続使用(S1)温度上昇特性

図5 反復使用(S3)温度上昇特性

表5 AC. 160 [V] 印加時の熱モデル定数

IMへの 入力	λ_a	λ_b	λ_{cf}	H_c	H_f
W	W/°C	W/°C	W/°C	W·min/°C	W·min/°C
320	79.5	21.3×79.5	4.50×79.5	120	290
600	80.5	21.3×80.5	4.50×80.5	同上	同上
1050	77.9	21.3×77.9	4.50×77.9	同上	同上
1150	77.4	21.3×77.4	4.50×77.4	同上	同上
1500	80.4	21.3×80.4	4.50×80.4	同上	同上
2000	71.9	21.3×80.4	4.50×71.9	同上	同上

H_f は AC. 220 [V] 印加時と同じ値を用いる。これをまとめると表 5 のようになる。

温度上昇の時定数を検討のため H_c/λ_a , H_f/λ_b を計算すると, AC. 220 [V] 印加時の H_c/λ_a , H_f/λ_b に対する時定数の実測値と, AC. 160 [V] 印加時の H_c/λ_a , H_f/λ_b に対する時定数の実測値は全く一致している。たとえば, AC. 220 [V] 印加時の IM への入力が 3050 [W] のとき $H_c/\lambda_a = 120/76.8 = 1.56$ で, AC. 160 [V] 印加時の IM への入力が 1050 [W] のとき $H_c/\lambda_a = 1.54$ でコイル

図6 λ_a -スリップ関係曲線

図7 連続使用(S1)温度上昇特性

図8 反復使用(S3)温度上昇特性

の温度上昇の時定数の実測値は前者は 35.8 [分], 後者は 32.1 [分] であった。また, AC. 220 [V] 印加時の $H_f/\lambda_b = 290/1635.1 = 0.177$ で, AC. 160 [V] 印加時の IM への入力が 1050 [W] のとき $H_c/\lambda_a = 0.169$ で内部鉄心の温度上昇の実測値は前者は 37.9 [分], 後者は 34.3 [分] であった。

λ_a はスリップが増すにつれて減少するが, 印加電圧が減少するにつれてその値が減り, これを図 6 に示している。AC. 160 [V] 印加時の連続運転及び間欠運転時の温度上昇特性を図 7, 図 8 に示している。ただし, 両者とも銅損, 鉄損は連続運転の温度上昇飽和時の値を用いている。

4. トルクループを用いる計算方法

3 章に述べた方歩は IM のスリップが既知として銅損, 鉄損をあらかじめ計算し, その値を用いて温度上昇値を求めている。しかし IM の等価回路図から出力トルクを求め, かつ負荷トルクとスリップの関係式が求められていれば, 図 9 に示すトルクループブロック図からスリップを求めることができ, これにより銅損, 鉄損を求め温度上昇値を求めることができる。IM 発生トルクを $T(\omega)$, 負荷トルクを $T_L(\omega)$, 慣性性能率を J , 制動係数を R_ω , 回転角速度を ω とすれば,

図9 トルクループブロック図

$$T(\omega) - T_L(\omega) = (J \cdot s + R_\omega) \cdot \omega \quad (15)$$

$$\therefore \omega = \frac{T(\omega) - T_L(\omega)}{J \cdot s + R_\omega} \quad (16)$$

$$\text{slip} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s} \quad (17)$$

ただし、 ω_s は同期角速度、 $s = \frac{d}{dt}$ である。負荷トルクは次の式を用いた。

$$T_L(\omega) = [1 - (\text{slip})] \tan \beta$$

$$= \tan \beta - (\text{slip}) \cdot \tan \beta \quad (18)$$

ただし、 $\tan \beta$ は負荷トルクとスリップの関係曲線の勾配で、 $y_0 \equiv \tan \beta$ である。スリップと印加電圧がきまれば銅損、鉄損が求められ、温度上昇特性が計算でき、3章と同じ結果が得られた。ただし、このばあいの IM の等価回路定数の r_1 、 r'_2 は連続運転の温度上昇飽和時の値を用いている。

5. 始動、停止をくりかえす反復作用時の温度上昇特性

4章のトルクループを用いる計算により、AC. 160 [V]印加時の始動時の、銅損の時間に対する過渡現象を計算すると図10のようになり、実測値によく近似している。AC. 160 [V]印加時の始動、停止をくりかえす反復作用時の温度上昇特性は、表5の熱モデル定数と図9のトルクループを用いて計算できる。図11は10[秒]間電源 on, 10[秒]間電源 off のばあいの計算結果を示している。ただし、このばあいの IM の等価回路定数の r_1 、 r'_2 は連続運転時の温度上昇飽和時の値を用いている。

6. くりこみ式計算方法

前章までの計算では、IMの等価回路定数の r_1 、 r'_2 、及びそれらを用いて計算した銅損、鉄損は連続運転の温度上昇飽和時の値を用いて計算してきた。しかし実際の運転では、始動時は温度上昇値は0で r_1 、 r'_2 の値も常温(25 [℃])の値で、運転の経過とともに温度上昇し、抵抗値が増加してくる。そこで図12に示すように、始

図10 起動時の銅損-時間特性

図11 始動の影響のある反復使用(S4)温度上昇特性

図12 コイル温度上昇値と保持値の関係

動時から10[分]まではコイルの温度上昇値は0 [℃]に保持し、10[分]をこえ20[分]までは固定子コイル温度上昇値は θ_{c1} に、回転コイル温度上昇値は θ_{r1} に保持し、20[分]をこえ30[分]までは固定子コイル温度上昇値は θ_{c2} に、回転コイル温度上昇値は θ_{r2} に保持し、かつスリップも時間の経過とともに増加させ、以下これをくりかえしていけば、最終的にはコイル抵抗、銅損、鉄損が飽和値に安定することになる。この方式をくりこみ式計算方法と称する。図13はくりこみ式計算により計算した間欠運転時の温度上昇特性を示している。

図13 反復使用(S3)温度上昇特性

7. 考 察

7.1 温度上昇特性の計算結果と実測値の比較

表6に連続運転時の固定子コイルと内部鉄心の温度上昇特性の, 表7に間欠運転時の固定子コイルの温度上昇

特性の, 表8に間欠運転時の内部鉄心の温度上昇特性の計算結果と実測値の比較を示している. 温度上昇値については約 ± 3 [°C], 時定数については約 ± 8 [分]の誤差に入っている.

7.2 鉄心温度と内部鉄心温度を示す位置

図1に示す鉄心温度と内部鉄心温度の比 K は(7)式に示され, $K=0.222$ となった. このことから鉄心温度 θ_f は固定子鉄心の外側表面から少しだけ内側に入った位置の温度であることがわかる.

7.3 固定子における熱の流れ (5)式と表2, 表5を検討すると $\lambda_a < \lambda_{cf}$ となる. これは λ_{ca} が負の値をもつことを示しており, 回転子コイルに発生した熱が空隙を通して固定子に流れこんでいることをあらわしている. 図14に回転子コイル温度上昇値と固定子コイル温度上昇値の関係を示しており, 回転子コイルの方が固定子コイルよりも温度上昇値が高いことから上記のことが推定される. IMのメーカの試験成績表によれば固定子コイル, 回転子コイルの定格運転時の温度上昇値はそれぞれ56 [°C], 72 [°C]であり, 絶縁階級はそれぞれE種, F種であった.

8. ま と め

負荷が増加し, スリップが増加するとともに温度上昇

表6 連続運転時の固定子コイル及び鉄心の温度上昇特性一覧表

		固定数 コイル						内 部 鉄 心						図 番	関 係 の 章
印加 電圧	IM への 入力	定 測 値			計 算 値			実 測 値			計 算 値				
		温 度 上昇値	上 り 時定数	下 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	下 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	下 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	下 り 時定数		
V	W	℃	分	分	℃	分	分	℃	分	分	℃	分	分		
220	1610	34.6	29.8	84.1	32.9	29.8	84.1	32.2	32.9	64.7	31.7	32.9	64.7	4	3.1
同上	3050	43.4	35.8	84.1	43.2	35.8	84.1	40.8	37.9	64.7	41.4	37.9	64.7		
160	1050	21.4	32.1	75.0	21.0	32.1	75.0	17.8	34.3	59.0	20.3	34.3	59.0	7	3.2
同上	2000	31.2	34.4	84.0	30.4	34.4	84.0	27.8	38.8	70.8	29.3	38.8	70.8		

表7 間欠運転時の固定子コイルの温度上昇特性一覧表

S3, 5分間電源 on, 5分間電源 off

印加 電圧	IMへの 入 力	固定子コイル上側包絡線				固定子コイル下側包絡線				図番	関係 の章
		実測値		計算値		実測値		計算値			
		温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数		
〔V〕	〔W〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕		
220	1610	25.8	36.4	24.6	34.8	21.6	47.4	22.9	41.0	5 a	3.1
同上	3050	36.8	50.5	33.3	37.2	31.2	63.1	31.3	43.0		
160	1050	17.2	29.8	15.0	35.2	15.1	37.8	13.6	41.4	8 a	3.2
同上	2000	24.2	46.2	21.8	39.9	21.2	54.6	20.0	45.6		
220	1610	25.8	36.4	26.1	30.0	21.6	47.4	25.0	38.6		4
同上	3050	36.8	50.5	33.6	33.2	31.2	63.1	31.4	40.7		
同上	1610	25.8	36.4	26.4	42.9	21.6	47.4	25.0	54.6	13 a	6
同上	3050	36.8	50.5	33.9	37.5	31.2	63.1	32.1	48.2		

表 8 間欠運転時の内部鉄心の温度上昇特性一覧表
S 3, 5 分間電源 on, 5 分間電源 off

印加 電圧	IMへの 入 力	内部鉄心上側包絡線				内部鉄心下側包絡線				図番	関係 の章
		実測値		計算値		実測値		計算値			
		温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数	温 度 上昇値	上 り 時定数		
〔V〕	〔W〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕	〔℃〕	〔分〕		
220	1610	21.6	39.6	24.2	32.1	17.0	45.0	22.4	40.3	5 b	3.1
同上	3050	30.0	46.2	31.9	36.0	26.0	62.4	29.3	43.4		
160	1050	11.2	34.2	14.9	40.6	8.5	40.5	12.8	46.8	8 b	3.2
同上	2000	18.0	46.5	21.1	41.8	16.0	47.5	20.0	50.7		
220	1610	21.6	39.6	24.6	31.1	17.0	45.0	22.9	33.2		4
同上	3050	30.0	46.2	32.1	34.3	26.0	62.4	29.6	38.6		
同上	1610	21.6	39.6	25.0	41.8	17.0	45.0	23.9	54.6	13 b	6
同上	3050	30.0	46.2	32.5	38.6	26.0	62.4	30.0	51.4

図 14 回転子コイル温度上昇値—固定子コイル
温度上昇値関係曲線

の時定数が増加する誘導電動機の熱モデル定数については、負荷の変化にかかわらずコイル、鉄心の熱容量 H_c 、 H_f は一定とし、熱伝達率、熱伝導率が負荷の増加とともに減少するという考え方で、連続運転時及び間欠運転時の温度上昇特性の計算ができる。トルクループを用いれば始動、停止をくりかえす運転の温度上昇特性の計算ができる。また、くりこみ式計算方法を用いれば、始動時のコイル抵抗が求められていれば温度上昇特性の計算ができる。この研究にあたっては本学の坂本研也助教授、片木威助手及び趙弘大学院生の多大の御協力をいただいた。厚く感謝申上げる次第である。

文 献

- 1) 中島，誘導機，134 ページ，東京電機大学出版局刊(昭和 49 年)
- 2) 糸井，船用交流発電機の温度上昇特性について，船機誌，Vol. 11, No. 5(昭和 51 年 5 月，349 ページ)
- 3) 岡本，武田ほか 2 名，誘導電動機間欠運転時の温度特性，船機誌，Vol. 17, No. 4(昭和 57 年 4 月，311 ページ)