

マイクロ波 3 段形 PIN ダイオード減衰器の諸特性

今 井 弘*

Characteristics of Microwave 3-PIN Diode Attenuator

Hiroshi IMAI*

(Received September 13, 1977)

The purpose of this paper is to describe the performance characteristics of a microwave 3-pin diode attenuator in the 10 GHz range. The pin diode attenuator is constructed of 3-pin diodes mounted as shunt elements and spaced at quarter wavelength intervals in the rectangular waveguide.

The VSWR and attenuation characteristics of this attenuator are shown in this paper, and the comparison between theoretical and experimental results shows the validity of design equations. The measured VSWR is less than 1.76 and the measured insertion loss is approximately 2 dB at zero bias in the 9.1-9.6 GHz frequency band, but by applying a condition of optimum design, good VSWR characteristics are easily obtained and the VSWR becomes less than 1.40. The flatness of attenuation is quite good, for example, at the 25 dB attenuation level with a forward bias current of $210\mu\text{A}$ the variation is less than 1 dB in the 9.1-9.6 GHz frequency band.

1 まえがき

マイクロ波周波数領域において抵抗膜を機械的に可変させて減衰量を変化させる可変抵抗減衰器が従来より主として利用されてきたが、この周波数領域でのダイオードの発展により pin ダイオードを可変素子とした小型軽量で経済性に優れた電流制御形の減衰器を構成することができるようになってきた。pin ダイオード減衰器は導波管に pin ダイオードを並列装荷し、ダイオードに加える順バイアス電流の変化によるインピーダンス変化を利用して減衰量を制御している。

4 分の 1 波長接続 2 段形 pin ダイオード減衰器において四端子定数を用いて理論式を求め、さらに実験的検討を加えて諸特性を明らかにしてきた⁽¹⁾。しかしこの減衰器において可変素子として用いられている pin ダイオードのインピーダンスは順バイアス電流が増加してその値が低下してもリアクタンス分はほぼ一定で、主として抵

抗分が低下していく。このインピーダンス変化を利用して反射量または吸収量を制御して減衰量を得ている⁽²⁾。しかし順バイアス電流を増加させて減衰量を大きくすると、反射量も大きくなり入力定在波比特性が悪化する欠点を持っている。

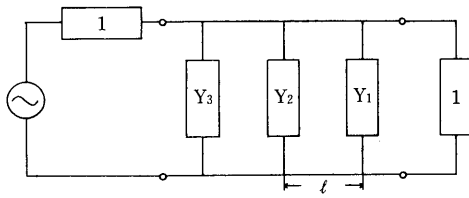
この入力定在波比特性悪化の欠点を改善するため pin ダイオードが 3 段以上で構成された減衰器の減衰量、入力インピーダンス、定在波比などの一般式を四端子定数を用いて求め、4 分の 1 波長接続 3 段形、4 段形および 5 段形 pin ダイオード減衰器の最適設計法を明らかにした^{(3),(4)}。

本論文は以上述べた最適設計法に用いられている理論式の有効性を 4 分の 1 波長接続 3 段形減衰器によって実験的に検討し、合わせてこの減衰器の基本的諸特性を明らかにすることを目的としている。

2 3 段形 PIN ダイオード減衰器の一般式

これまでに規格化アドミッタンス $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)



図一 3 段階pinダイオード減衰器等価回路

の pin ダイオード減衰量, 入力インピーダンスおよび反射係数などの一般式はすでに明らかにした⁽⁴⁾。

明らかにした結果より, 図1のように規格化アドミタンス $Y_1=G_1+jB_1$, $Y_2=G_2+jB_2$, $Y_3=G_3+jB_3$ の pin ダイオードを3個, 間隔 l で接続して構成した3段階減衰器の減衰量 α は次式によって与えられる。

$$\alpha = 20 \log_{10} |I_s| \quad (1)$$

$$2I_s = (b_{20} \cosh \gamma + b_{21} \sinh \gamma) \times \{(Z_{in}(2)Y_3 + 1) \cosh \gamma + (Z_{in}(2) + Y_3) \sinh \gamma\} \times (Z_{in}(3) + 1) \quad (2)$$

(2) 式の γ は伝搬定数で, $\gamma = j\theta = j\beta l = j(2\pi/\lambda)l$, λ は波長である。また $Z_{in}(2)$, $Z_{in}(3)$ は2段階, 3段階の場合の入力インピーダンスで次式によって与えられる。

$$Z_{in}(2) = \frac{a_{20} + a_{21}T(\gamma)}{b_{20} + b_{21}T(\gamma)} \quad (3)$$

$$Z_{in}(3) = \frac{a_{30} + a_{31}T(\gamma) + a_{32}T(\gamma)^2}{b_{30} + b_{31}T(\gamma) + b_{32}T(\gamma)^2} \quad (4)$$

ただし, $T(\gamma) = \tanh \gamma$ である。

$$\left. \begin{aligned} \text{また, } a_{20}=1, a_{21}=1+Y_1 \\ b_{20}=1+Y_1+Y_2, b_{21}=1+Y_2+Y_1Y_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{30}=1, a_{31}=a_{21}+b_{20}, a_{32}=b_{21} \\ b_{30}=b_{20}+a_{20}Y_3 \\ b_{31}=a_{20}+b_{21}+(a_{21}+b_{20})Y_3 \\ b_{32}=a_{21}+b_{21}Y_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで, 入力インピーダンス $Z_{in}(3)$, 反射係数 S , 定在波比 ρ の関係は

$$S = \frac{Z_{in}(3) - 1}{Z_{in}(3) + 1} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{1 + |S|}{1 - |S|} \quad (8)$$

で与えられる。

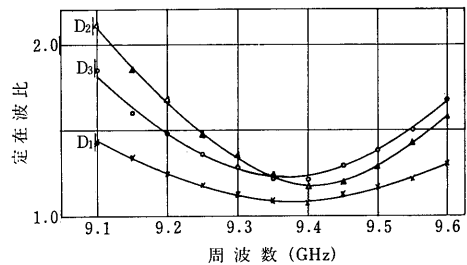
3 3 段階減衰器の構成

これまで, 明らかにした2段階減衰器は減衰量が増加していくにしたがって入力定在波比特性が悪化していく欠点を持っている。この欠点を改善するために, 減衰器を3段階以上で構成し, 設計中心周波数においてダイオードの規格化サセプタンスを $B=0$ とした3段階, 4段階および5段階減衰器の場合について, 許容定在波比において減衰量域を最大にすることのできる最適設計法を

明らかにしてきた。

本論文は最適設計法に用いた理論式の有効性を3段階 pin ダイオード減衰器によって実験的に検討し, 合わせてこの減衰器の基本的な諸特性を明らかにする。

pin ダイオード減衰器において, pin ダイオード (S-3023) は導波管 (WRJ-10) に同軸形で並列装荷し, 設計中心周波数 9.4GHz にて pin ダイオードのリアクタンス分を打消すようにしてある⁽⁵⁾。しかし, 中心周波数よりずれるにしたがって, リアクタンス分が増加していく周波数特性を示す。3段階減衰器に使用される3個の pin ダイオードの測定結果を規格化アドミタンスで表わして表1, 表2に示す。表1は零バイアス状態の周波数 9.1GHz から 9.6GHz までの測定結果で, 表2は周波数が 9.4GHz でバイアス電流を変化させたときの測定結果である。また, これらのダイオードによる1段階の場合の入力定在波比周波数特性を図2に示す。



図二 1 段階の零バイアス状態での定在波比周波数特性

図1に示したような3段階 pin ダイオード減衰器は上記の3個の pin ダイオードを利用し, それぞれを中心周波数 9.4GHz における導波管 WRJ-10 の管内4分の1波長で接続して構成する。しかし, 実際には実験の都合上ダイオード間の距離は4分3波長として減衰器を構成した。

最適設計法によると, 図1の各ダイオードの規格化アドミタンス $Y_1=G_1+jB_1$, $Y_2=G_2+jB_2$, $Y_3=G_3+jB_3$ の各規格化サセプタンス B_1, B_2, B_3 が各規格化コンダクタンス G_1, G_2, G_3 に比べて非常に小さい値のとき, G_1, G_2, G_3 がそれぞれ G_1, K_2G_1, G_1 で $K_2 > 1$ なる適当な値を取るときに, 入力定在波比をある値以下に保ちながらバイアス電流によって変化していく減衰量の範囲を最大にすることができる。したがって, 表1, 2に示した3個の pin ダイオードを $K_2 > 1$ となるように構成する。すなわち, 各ダイオードを D_1, D_2, D_3 と配列する。

表一 零バイアス状態での各pin ダイオードの規格化アドミッタンス測定値

$F(\text{GHz})$	$D_1, Y_1=G_1+jB_1$		$D_2, Y_2=G_2+jB_2$		$D_3, Y_3=G_3+jB_3$	
9.10	0.0937	-0.3642	0.2765	-0.6462	0.2062	-0.8135
9.15	0.1101	-0.2892	0.2974	-0.4511	0.2363	-0.6534
9.20	0.0886	-0.2067	0.2519	-0.3625	0.2680	-0.5264
9.25	0.0881	-0.1425	0.2507	-0.2373	0.2159	-0.3675
9.30	0.0797	-0.0868	0.2390	-0.1279	0.2052	-0.2593
9.35	0.0765	-0.0229	0.2086	-0.0229	0.1811	-0.1186
9.40	0.0666	0.0212	0.1884	0.0772	0.1572	-0.0151
9.45	0.0745	0.0909	0.2140	0.1826	0.1588	0.0909
9.50	0.0665	0.1382	0.1804	0.3016	0.1466	0.2157
9.55	0.0811	0.1764	0.1827	0.4047	0.1522	0.3422
9.60	0.0692	0.2631	0.1689	0.5415	0.1244	0.4732

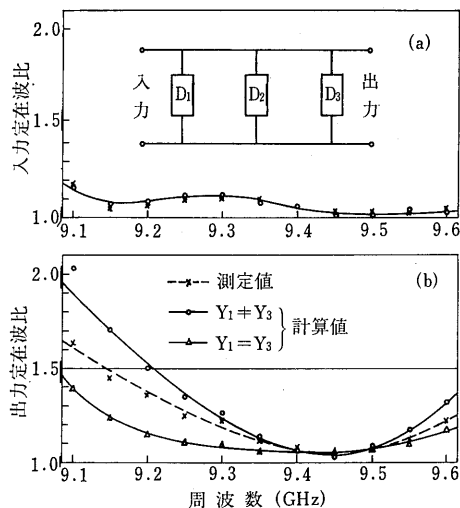
表二 順バイアス状態、周波数9.4GHzにおける各 pinダイオードの規格化アドミッタンス測定値

バイアス電流 μA	$D_1, Y_1=G_1+jB_1$		$D_2, Y_2=G_2+jB_2$		$D_3, Y_3=G_3+jB_3$	
0	0.0463	0.0187	0.1854	0.0577	0.1247	-0.0085
1	0.0728	0.0179	0.3446	0.0570	0.1800	-0.0071
2	0.0869	0.0228	0.4435	0.0701	0.2200	-0.0101
3	0.1070	0.0247	0.5167	0.0537	0.2598	-0.0101
5	0.1486	0.0199	0.6948	0.0757	0.3300	-0.0050
7	0.1781	0.0248	0.8550	0.0813	0.4000	0.0119
10	0.2338	0.0222	1.0955	0.0857	0.4983	0.0375
20	0.4062	0.0514	1.9073	0.0827	0.8546	0.0845
30	0.5776	0.0515	2.3185	0.3087	1.1858	0.1566
50	0.9156	0.0783	3.7090	0.6399	1.8506	0.3518
70	1.2444	0.1001	4.9796	1.1324	2.4959	0.5788
100	1.7795	0.2228	6.6046	1.7197	3.3765	0.9641
200	3.2333	0.5165	8.3691	2.4183	5.1567	2.2520
300	4.7841	1.1014	10.7196	1.8066	6.6004	4.0613

4 3段形減衰器の諸特性

4-1 零バイアス状態での特性とその検討

3章で述べたようにダイオードのコンダクタンス比



図一 3 零バイアス状態での入出力定在波比周波数特性

K_2 が1より大になるように配列した3個のpinダイオードより構成された4分の1波長接続3段形減衰器において、全てのダイオードの順バイアス電流を零としたときの入出力定在波比周波数特性を図3-a, bに示す。ここで、計算値○印は2章で与えた理論式(4)~(8)式に表1の規格化コンダクタンス、規格化サセプタンスの値をそれぞれ代入して求めた値であり、測定値とはほぼ一致している。また、△印は最適設計条件の一つである $G_1=G_3$ を適用して、 $Y_1=Y_3$ として同様に計算によって求めた値で、 K_2 が約2.8の場合である。図3-bに示されているように、最適設計条の一つを適用すれば、明らかに入力定在波比周波数特性の改善がなされる。

図4に各ダイオードの順バイアス電流が零のときの挿入損失の測定値と理論式(1)~(6)式に定在波比の場合と同様に表1の値をそれぞれ代入して求めた計算値を示す。ここで、○印はダイオードの配列が D_1, D_2, D_3 および D_3, D_2, D_1 の場合の計算値で両者は同じ値を示す。また、△印は定在波比の場合と同様に最適設計法の条件の一つを適用した計算値で、挿入損失の改善もなさ

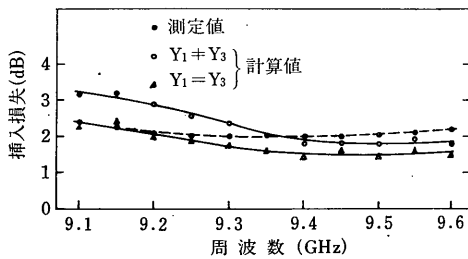


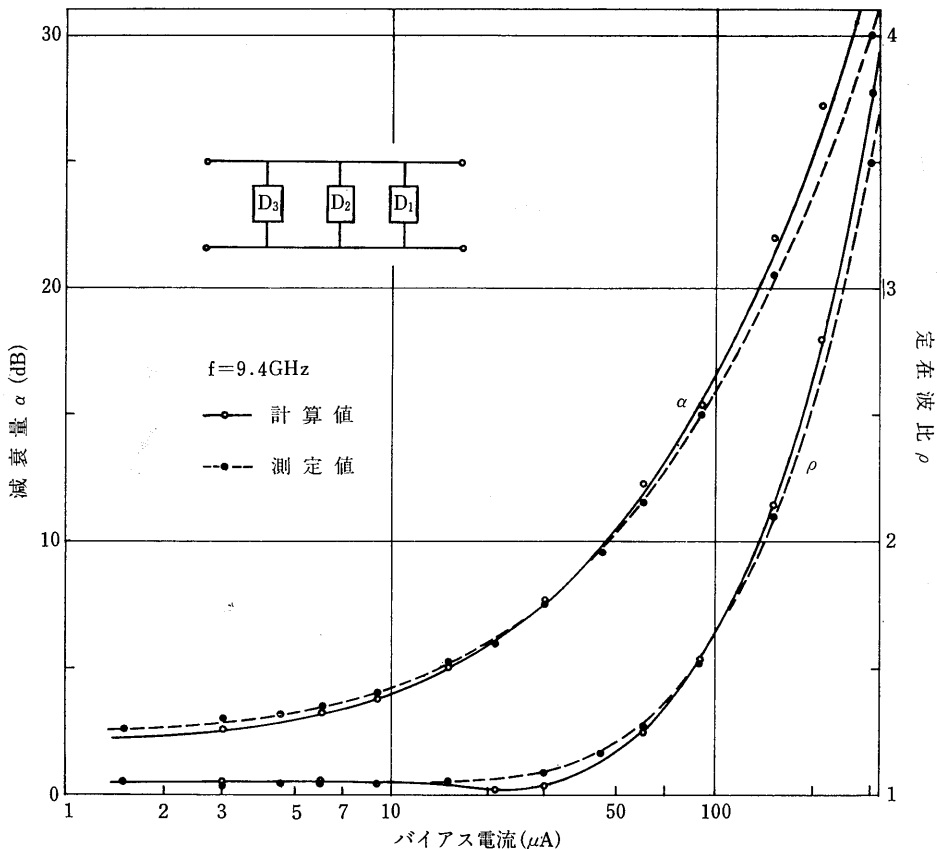
図-4 零バイアス状態での挿入損失周波減特性

れており、平坦性も0.4dB良くなっている。

中心周波数9.4GHzにおいて挿入損失測定値は約2dBとなっているが、並列装荷したpinダイオードを再調整して、全てのアドミタンス値を $Y=0.0666+j0.0$

212にすれば、挿入損失は約0.86dBとすることができる。このアドミタンス値は測定値の一つであり、他のアドミタンス値も同程度の値にすることは可能で、3段形ダイオード減衰器の零バイアス、中心周波数9.4GHzの挿入損失を1dB以下におさえることは容易である。

異なったアドミタンス値を持ったダイオードの配列の仕方によって挿入損失の値が異なることはないが、入力定在波比は大きく異なる。したがって、零バイアス状態においても最適設計法にしたがって入力定在波比ができるだけ小さくなるようにダイオードを配列しなければならない。

図-5 周波数9.4GHzにおける減衰量 α と定在波比 ρ の順バイアス特性

4-2 順バイアス状態での特性とその検討

これまで述べてきた3段形減衰器の中心周波数9.4GHzにおいて、各ダイオードに同量の順バイアス電流を加えたときの減衰量と入力定在波比のバイアス電流特性を図5に示す。図5において示されているバイアス電流値はダイオード D_1 、 D_2 、 D_3 のバイアス電流の和であ

る。図5の破線は測定値で、実線は2章で述べた理論式に表2の各バイアス電流に対する規格化コンダクタンス、規格化サセプタンスの値をそれぞれ代入して求めた計算値であり、両者は非常に良く一致している。したがって、四端子定数を用いて求め2章に再び示した3段形pinダイオード減衰器の減衰量、入力インピーダンス、

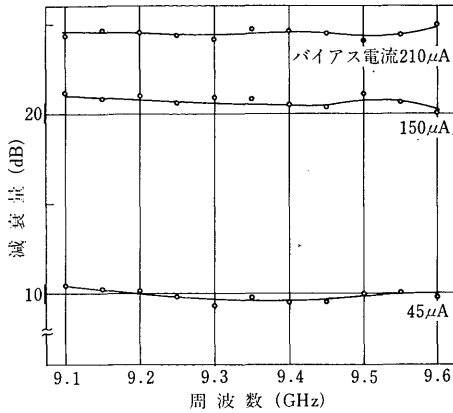


図-6-a 減衰量周波数特性

定在波比などを与える式⁽⁴⁾がすでに明らかにした2段階の場合⁽¹⁾と同様、有効であることが判る。

次に図6に各ダイオードに加える順バイアス電流を図5の場合と同様に同量の順バイアス電流、すなわちダイオード D_1 , D_2 , D_3 の順バイアス電流の和を $45\mu\text{A}$, $150\mu\text{A}$ および $210\mu\text{A}$ としたときの減衰量, 入力定在波比の周波数特性を示す。図6-aに示した減衰量はほぼ平坦な特性を示しており, 周波数が 9.1GHz の範囲で順バイアス電流 $210\mu\text{A}$ で約 1dB の変動となっている。しかし, 入力定在波特性は周波数が中心よりずれるにたがって悪化していくが, 零バイアス状態のところで述べたように最適設計法を適用すれば特性の改善がなされ

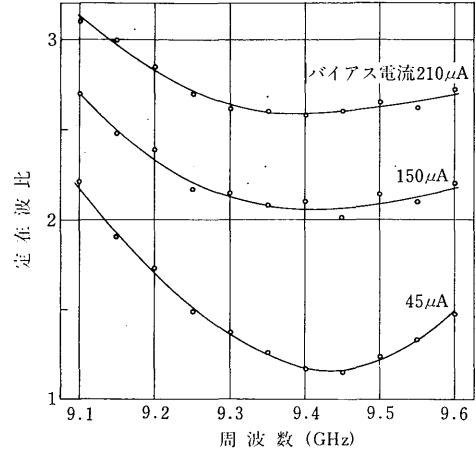
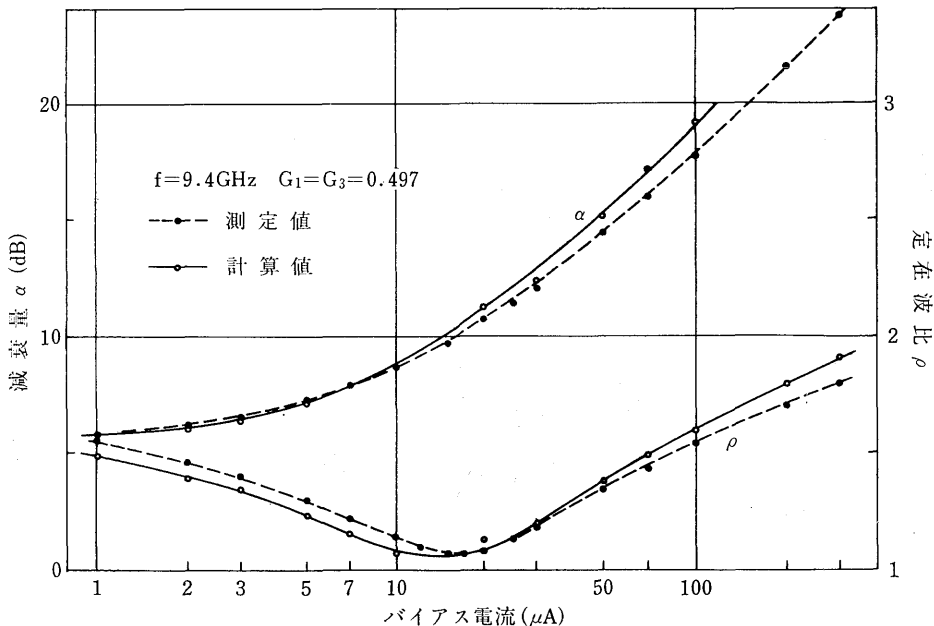


図-6-b 定在波比周波数特性

る。さらに, 図7にダイオード D_1 , D_3 の規格化コンダクタンスが $G_1=G_3=0.497$ になるように D_1 , D_3 の順バイアス電流を設定し, D_2 の順バイアス電流によって G_2 を変化させたときの減衰量と入力定在波比特性を示した。図7において示した計算値と測定値においても, 両者は非常に良く一致している。この測定値において, D_2 の順バイアス電流が $12\mu\text{A}$ から $22.5\mu\text{A}$ の範囲, 規格化コンダクタンス比 K_2 が 2.53 から 4.04 で, 9.2dB から 11.1dB の減衰量域を定在波比 1.1 以下で満足し, 順バイアス電流が $7.7\mu\text{A}$ から $31\mu\text{A}$ の範囲, 規格化コンダクタンス比 K_2 が 1.83 から 4.93 で, 8.0dB から 12.4dB の減衰量域を定在波比 1.2 以下で満足する。

図-7 周波数 9.4GHz において, $G_1=G_3=0.497$ としたときの減衰量 α と定在波比 ρ の順バイアス特性

以上のことは規格化コンダクタンス比を $K_2 > 1$ になるように適当に設定すれば所要の定在波比以下にする減衰量域を求められることを示しており、すでに明らかにした最適設計法^{(3),(4)}，すなわち，4分の1波長接続3段形ダイオード減衰器の各ダイオードの規格化コンダクタンス比およびそれらの値の設定により，所要の定在波比において零から始まる減衰量域を最大にする設計法の有効性を一部示している。

5 結 言

最適設計法を適用して構成した4分の1波長接続3段形pin ダイオード減衰器において，実験的検討を加え，理論式と比較検討することによって，四端子定数を用いて求めた減衰量，入力インピーダンス，定在波比などの理論式の有効性を示した。また，零バイアス状態，順バイアス状態において，最適設計法を適用すれば，減衰量，入力定在波比周波数特性の改善がなされ，特に，入力定在波比特性の改善が著るしくなされることを示した。さらに，ダイオードの規格化コンダクタンス比を適

当に設定することにより所要の定在波比以下で減衰量域を最大にできる最適設計法の有効性を一部示した。

中心周波数において最適設計法によって得られた減衰器についての理論，実験のサセプタンスを考慮した詳細な比較検討は別の機会において行ない，今後の問題として，この最適設計法の周波数特性について理論的実験的検討を行なっていく。

本研究は本学特別研究費の援助によって行なったもので，関係各位に心から感謝致します。

参考文献

- (1) 今井 弘：中工大紀要，第11巻A，p. 113～117，1975年12月
- (2) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p. 186，1975年10月
- (3) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p. 229，1976年10月
- (4) 今井 弘：中工大紀要，第12巻A，p. 55～61，1976年12月
- (5) 今井 弘：中工大紀要，第10巻A，p. 48，1974年10月