

実用RF回路の基礎と設計

工学博士 小西良弘



ケイラボ出版

概要

受動 RF 回路の研究は 1900 年代の半ばから後半にかけて数々研究され、諸々の発明及び回路の設計技術が開発された。また 1900 年代後半からは、コンピュータの急速な進歩とともに上記の回路設計技術の結果を取り込んだ設計ソフトや、また形状の境界条件から直接に求める形状シミュレーションソフトが進歩し、これらによって開発スピードが早められ効率化が進められている。

さて技術革新を含めたイノベーションが今後必要とされる現在、コンピュータによる出来たものの解析はもとより、どのようにすれば欲するものが得られるかという合成技術が更に必要となる。そのためには過去行なわれた基本的な原理や先人により残された大事な結果をもとにして、新しい技術に展開していくことが極めて重要である。

そこで本書では、RF 受動回路の分野において基本的な原理を述べ、これに基づいて導かれた設計公式を記述した。また過去求められていなかった部分に関しては、筆者によりそれらの公式や設計に必要なデータを新たに求め、これらを同時にまとめた。

さて筆者によりこの種の図書がいくつか発行されたが、ここではそれらの重要な点をまとめると共に記載されていない部分を重点的により詳しく記述した。しかしながら読者に、説明を理解し易くするために、筆者による既刊図書の一部を再び掲載して話を繋げる努力を行ったので、重複せざるを得なかった部分もある。また本書で始めて筆者により求められた結果も多々あるので、この場合には読者が理由を理解するために特に結果のみ記さず、その結果が如何にして得られたか知るための過程も記した。

第 1 章では、TEM 波を伝送する分布定数線路の性質や、線路を伝わる進行波及び反射波にともなうインピーダンスそしてそれを示すスミス図表の説明、更に数式的な取り扱いを述べた。

第 2 章では、集積回路などに用いられる平面構造形線路として、マイクロストリップ線路、コプレーナガイド、スロットガイド及びサスペンデッドラインの構造や特性をまとめた。

第 3 章では、TE、TM 波の説明とそれを伝送する導波管を述べ、リッジガイドや誘電体装荷導波管を物理的意味を理解する等価回路を含めて説明した。

第 4 章では、種々の導波路のもつ基礎的事項として、導波管の電圧電流の定義、導波路内のエネルギー、損失などをまとめた。

第 5 章では、これらの導波路につながる回路の解析に必要な最小限度の基礎知識、即ち Z、Y、S 行列、回路定数と内部エネルギーの関係、有限長分布定数線路の集中定数等価回路と応用、更に結合分布定数線路の等価回路と定数を示した。

第 6 章は RF 技術者に常に必要な整合回路で、特に既刊図書には記述されていない部分として、LC 梯子形回路による広帯域インピーダンス変成器、分布定数線路で L 及び C を近似して整合する場合のより精度ある設計法、またコネクタと回路との接続する領域の広帯域整合法などを、実務的な立場から詳しく述べた。

第 7 章では、方向性結合器と分配器に関して述べたが、特に分布結合形に関しては遮蔽箱の形状により大きく変化する内部導体の寸法や、製作を写真と共に示した。インターディジタル方式や、結合度を増す方法及び広帯域化の方法について、種々の具体例や設計公式などを過去の実例の引用とともに記述した。またラットレス形に関しては、一部の線路をインターディジタル結合線路やスロット線路で置き換える方法により、小形広帯域化できることも詳しく述べている。また、最近論じられている右手系お

よび左手系線路に対する LPF 及び HPF で、ラットレス回路の構成を BOODE の振幅位相特性を用いフィルタ設計理論から構成する方法を述べた

また、対向面方向性結合器の実際のところでは構造の寸法を決めるために、求めた公式の誘導も記した。更に筆者の考案した縦形平面回路の設計理論や、設計公式並びに製作例も写真と共に示した。ここでは従来 2 次元境界値問題として解析されていたものを、わかり易い物理的意味に基づいて設計できる公式を導いた。

第 8 章の平衡不平衡変換器及び付録 7 では、特に結合定数分布線路形のものにつき、理論的な解析結果をフィルタ理論の立場から示し、種々の組み合わせの特性を表でまとめている。

第 9 章の非可逆回路では、筆者により出版された図書とほぼ同じ内容になるので、集中定数形と Y ストリップ線路形サーキュレーターの設計手順を詳しく表にまとめた。

以上述べたような本書独特の趣旨と内容を含むので、設計技術者が今後新しい開発にチャレンジ・工夫する場合、基本に戻って過去にどのような考え方で、どのような設計公式を作り出したかを理解し、それを現在進んだ精細な加工技術や材料の力をかりて達成することに役立てば筆者の幸いである。

目次

第 1 章	電波と TEM 分布定数線路	1
1.1	TEM 波の性質	1
1.2	TEM 線路の減衰定数	8
1.2.1	α_c の求め方	8
1.2.2	同軸線路とストリップ線路の α_c	9
1.2.3	α_ϵ 及び α_μ	10
1.3	進行波と反射波の合成	11
1.4	インピーダンス、アドミッタンス、スミス図表	12
1.5	有限長線路の性質と応用	13
1.5.1	行列式	13
1.5.2	種々の負荷インピーダンスに対する入力インピーダンス	14
1.5.3	無損失線路の種々の用途	14
	(a) $l \ll \lambda$ のとき	14
	(b) $l = \frac{\lambda}{4}$ または $l = \frac{\lambda}{2}$ のとき	14
	(c) $\frac{\lambda}{4}$ 変成器	14
第 2 章	平面構造形導波路とその特性	17
2.1	マイクロストリップ線路	17
2.1.1	構造、実効誘電率 ϵ_w と特性インピーダンス Z_c	17
2.1.2	線路の減衰定数 α	22
	導体損による減衰定数 α_c と Q 値、 Q_c	22
	基板の誘電体損に基づく Q 値、 Q_d	24
	輻射損に基づく Q 値、 Q_r	25
2.2	コプレーナ線路	26
2.2.1	構造とモード	26
2.2.2	特性インピーダンス、実効比誘電率及び Q_c 値	27
2.3	スロットラインの構造とモード及び特性	28

2.4	サスペンデッドラインの構造とモード及び特性	30
2.5	各種平面構造導波路 (伝送線路) の比較	30
第3章 TE, TM 波と導波管		33
3.1	TE, TM 波と導波管	33
3.1.1	2枚の無限金属板間を TE 波が伝播しうる	33
3.1.2	2枚の無限金属板間を TM 波が伝播しうる	33
3.1.3	2枚の金属板間の TE 波と TM 波のモードから、矩形及び円形導波管の TE 波と TM 波への変換	36
3.1.4	TE, TM 波の性質	36
	TE, TM 波の位相速度は TEM 波より速い	36
	TE, TM 波の管内波長 λ_g は TEM 波の波長 λ より長い	37
	波動インピーダンスは TEM 波に比べ TE 波は高く、TM 波は低い	37
	周波数 f_c より低い電波は導波管を伝播しない	37
3.2	種々の導波管のモードと遮断波長 λ_c 及び減衰定数 α	39
3.2.1	矩形導波管と円形導波管	39
3.2.2	リッジ導波管 (リッジガイド)	42
3.2.3	誘電体装荷矩形導波管	46
	(a) 中央に装荷した場合—図 3.14(a)	47
	(b) 片側の E 面に接して装荷した場合—図 3.14(b)	48
	(c) 両側の E 面に接して装荷した場合—図 3.14(c)	48
3.2.4	同軸線路の高次モード	49
第4章 導波路の基本事項		51
4.1	導波路の電圧・電流の表わし方と定義 1 を用いた時の集中定数等価回路	51
4.2	導波路内のエネルギー分布と大きさ	53
4.2.1	進行波の電界と磁界の分布	53
4.2.2	進行波の電界と磁界のエネルギーの大きさは等しい	53
4.3	導波路の損失	54
4.4	横共振法の原理と手法	56
4.4.1	原理	56
4.4.2	手法	57
	均一媒質で一般的な構造の場合	57
	等価回路網から求める方法	58

第 5 章 回路解析の基礎事項	61
5.1 回路定数を示す行列とパラメーター	61
5.1.1 n 開口回路の Z、Y、S 行列 [5]	61
5.1.2 S パラメータのデシベルによる表示	63
5.1.3 2 開口回路の行列と要素	63
(a) 行列の種類	63
(b) 各行列の要素間の関係	66
(c) 回路の行列例	68
(d) 2 開口回路の接続で得られる回路の行列	69
(e) 回路の入出力に並列または直列に素子が接続された場合	70
5.2 回路定数と種々の物理量との関係	70
5.2.1 無損失回路の電力損失比と F 行列要素の関係 (文献 [5],p.199-200)	70
5.2.2 回路のインピーダンス、アドミッタンスと回路内のリアクティブエネルギー及び損失電力との関係	71
(a) 固有値と固有ベクトル	71
(b) エネルギーとインピーダンス及びアドミッタンスの関係	72
(c) 無損失回路のリアクタンス又はサセプタンスの周波数成分と回路内のリアクティブエネルギーの関係 (文献 [1],p.252-256)	73
5.2.3 X と $\frac{dX}{d\omega}$ の値を満たす L_s と C_s の直列等価回路及び B と $\frac{dB}{d\omega}$ の値を満たす L_p と C_p の並列等価回路 (文献 [1],p.258)	73
集中定数回路と分布定数回路	74
5.3 均一媒質中の平行多線路の電圧、電流を示す式	75
5.4 分布定数線路を含む回路の等価回路例	75
5.4.1 抵抗負荷をもつ長さ $\frac{2n+1}{4}\lambda$ の分布定数線路の入力インピーダンスの第 1 近似等価回路	75
5.4.2 抵抗負荷をもつ長さ $m\frac{\lambda}{2}$ の分布定数線路の入力インピーダンスの第 1 近似等価回路	76
5.4.3 対称結合分布定数線路を用いた 2 開口回路の等価回路	77
第 6 章 整合回路	79
6.1 整合に関する主な事項	79
6.1.1 整合の意味と共軛整合	79
6.1.2 反射係数 $\dot{\Gamma}$	81
6.1.3 無損失 2 開口回路が縦続接続されたとき、反射係数の絶対値はどの位置でも変わらない	81
6.1.4 反射係数と S パラメータとの関係及びそれらのデシベル表示	83

6.2	スミス図表を用いた整合回路の求め方	84
6.2.1	スミス図表の使い方の予備知識	84
	(1) インピーダンスとアドミッタンスのスミス図表上でのプロット	84
	(2) インピーダンスの直列接続	84
	(3) アドミッタンスの並列接続	85
	(4) 負荷インピーダンス Z_L' に長さ l の分布定数線路を接続したときのスミス図表上の動き	85
6.2.2	スミス図表による整合法の例	86
	(1) 分布定数線路と集中定数素子による方法	86
	(2) 2素子の集中定数回路による整合	86
6.3	整合回路の構成法 入出力負荷が実数の場合	89
6.3.1	入力と出力インピーダンスの高い方に並列リアクタンスを挿入したのち直列リアクタンスを接続する方法	89
	(1) 考え方	89
	(2) 実際回路	90
6.3.2	リアクタンス(コンデンサまたはインダクタ)を分割したのち,分割点に直列の異符号のリアクタンスを用いる方法	91
6.3.3	$\lambda/4$ 変成器及びその集中定数等価回路を用いる方法	92
6.3.4	集中定数素子を波長に比べて短い長さ l の分布定数線路で置き換える方法	95
6.3.5	梯子形集中定数回路による広帯域整合	98
	(1) リアクタンスステップアップ形	98
	(2) LPF 形	102
	(3) HPF 形	103
	(4) 各種の例題と帯域幅の比較	103
	(5) 集中定数素子を分布定数回路で実現したときの特性比較	103
6.3.6	$\lambda/4$ 多段変成器を用いる方法	106
	(1) 2段変成器の構造,設計公式及び比帯域幅	106
	(2) 3段変成器の場合	107
	(3) 4段変成器の場合	108
	(4) 最大平坦特性の場合	110
	(5) $\mathcal{R} > 1$ の場合,各部のインピーダンスは負荷に近づくとつれて大となる理由	111
	(6) l (長さ) $\ll \lambda$ (波長) の Z_c (特性インピーダンス) $> R_0$ (線路の両端が接続される端子インピーダンス) の線路を整合させる方法	114
第7章	方向性結合器	117
7.1	原理と概論	117
7.1.1	方向性結合器の特性と S パラメータ	117

7.1.2	回路構成の原理	118
7.1.3	進行波と反射波のモードの違いを利用したもの	119
	(a) ループ方向性結合器	119
	(b) 分布結合方向性結合器	120
	(c) ベーテ方向性結合器	122
	(d) 十字形方向性結合器	125
7.1.4	マルチパスを利用する方法	125
	(a) $\frac{\lambda}{4}$ 分布定数線路を用いた回路	125
	(b) 双孔方向性結合器	127
7.2	分布結合形方向性結合器の実際	127
7.2.1	$\lambda/4$ 分布結合線路形方向性結合器	127
7.2.2	結合線路の構造と偶モード及び奇モード特性インピーダンス Z_e 及び Z_o	128
	(イ) ブロードサイド結合形	129
	(ロ) エッチ結合形	132
	(ハ) オフセット結合形	137
	(ニ) 角形平行結合棒形	138
	(ホ) 2 芯同軸形	142
	(ヘ) インターデジタル形	144
	(ト) オーバーレイ及びリエントラント構造形	146
	(チ) 縦形平面構造形	149
5.5.3	$\lambda/4$ 方向性結合器の縦続接続による広帯域化	150
7.2.3	$\lambda/4$ 方向性結合器の縦続接続による広帯域化 (文献 [33],p.95-99)	150
7.2.4	テーパ結合線路を用いた方向性結合器と 180° ハイブリッド回路への応用	155
	(イ) 方向性結合器	155
	(ロ) 非対称テーパ形方向性結合器を用いた 180° ハイブリッド回路	156
7.3	分岐線路方向性結合器の実際	158
7.3.1	2 分岐線路形	158
7.3.2	多分岐線路形	162
7.3.3	1.5λ ラットレス方向性結合器	163
7.3.4	$(3/4)\lambda$ 線路をインターデジタル $\lambda/4$ 結合線路で置き換えた方向性結合器	170
7.3.5	$(3/4)\lambda$ 線路をスロットラインに置き換えたラットレス方向性結合器	174
7.3.6	フェライト利用巻線形のもの	174
7.4	製作例と設計データ	175
7.4.1	遮蔽箱中の対向面 (ブロードサイド) 結合ストリップ線路方向性結合器の製作データとノウハウ	175
	(1) 対向面結合ストリップ線路の寸法は遮蔽箱の形状により異なる	175

(2) $a = b$ の場合の 2 導体の寸法の近似公式の誘導と形状シミュレーションとの比較	187
(3) 製作例と注意事項	189
(4) 誘電体装荷型対向面結合ストリップ線路方向性結合器	190
(5) 容量性窓を付加した対向面結合ストリップ線路方向性結合器	191
7.4.2 容量装荷形 VIP 方向性結合器	193
(1) 概要	193
(2) 有限長 VIP 線路の等価回路とその定数測定	193
(3) 下基板の比誘電率 ϵ_{r1}' が必要な実効比誘電率 $\epsilon_{r,eff}$ を得るための値 ϵ_{r1} よりも 小さな時, VIP の垂直基板に容量 C_{ad} を負荷して調整できる	196
(4) VIP 方向性結合器の設計に必要な定数の近似値	196
(5) 設計例と製作	201
7.4.3 対面結合マイクロストリップ方向性結合器	203
第 8 章 電力分配器の構成	205
8.1 ウィルキンソン分配器の原理	205
8.2 電力分配、合成回路の用途例とこれらに要求される特性	205
8.2.1 大電力増幅システム	205
8.2.2 共同受信システム	206
8.2.3 電力分配・合成回路に要求される特性	206
8.3 電力分配、合成回路の構成と原理	206
8.3.1 n 分配ウィルキンソン型分配器	206
8.3.2 対称 2 分配回路とそれを用いた多分配回路	209
8.3.3 非対称 2 分配回路の構成と原理	210
8.4 広帯域化の例	210
8.5 方向性結合器及びウィルキンソン分配器を用いた多分配・合成回路の構成と特性例	212
8.6 その他の回路	214
8.6.1 平衡・不平衡変換器を用いる方法	214
8.6.2 共振器による電力合成	215
第 9 章 平衡不平衡変換器	217
9.1 平衡不平衡変換器と平衡電流及び不平衡電流	217
9.2 平衡不平衡変換器において不平衡電流を阻止する方法	217
9.3 種々の構造	219

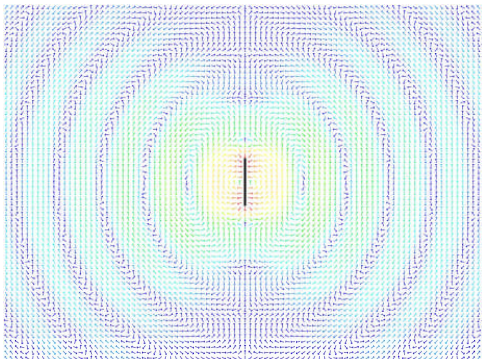
9.4	実験による確認 9.3の(1)の実験	222
第10章	非可逆回路 サーキュレータとアイソレータ	227
10.1	直流磁界で磁化されたフェライトの透磁率	227
10.2	サーキュレータとアイソレータ	229
10.2.1	サーキュレータの原理と構造 [45]	229
10.2.2	Yサーキュレータの固有ベクトルと固有値による考察	231
10.2.3	Yサーキュレータの設計公式のまとめ [45]	233
	(1) ストリップラインサーキュレータ	233
	(2) 集中定数形サーキュレータの公式と設計法 [46]	236
付録		245
[付録 1]	無限媒質中の進行波(電磁波)の電界と磁界	245
[付録 2]	TEM線路の単位長当たりのインダクタンス、キャパシタンス、特性インピーダンス及び位相速度の関係	247
[付録 3]	ω (角周波数)- β (均一導波路の位相定数)曲線(分散特性)と応用	251
(i)	種々の表現の $\omega - \beta$ 曲線及び v_g, v_p との関係	251
(ii)	同一直列リアクタンス及び同一並列サセプタンスをもつ無限梯子形構成と等価な線路の等価定数とその $\omega - \beta$ 曲線	253
	(イ) 直列インダクタと並列にキャパシタをもつLPF形構成	253
	(ロ) 直列キャパシタと並列にインダクタンスをもつHPF形構成	254
	(ハ) 直列に直列共振回路、並列に並列共振回路をもつ構成	254
[付録 4]	スネルの屈折の法則	256
[付録 5]	無限媒質中のファラデー回転 [20]	257
[付録 6]	対称結合分布定数線路を用いたBalunの特性解析	259
[付録 7]	多段 $\lambda/4$ 分布結合方向性結合器の格段における結合度	262

第1章 電波とTEM分布定数線路

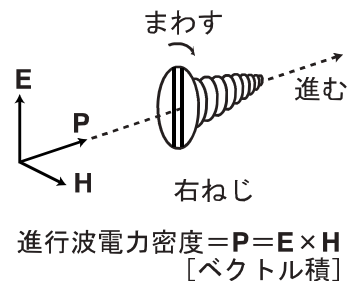
1.1 TEM波の性質

アンテナから自由空間に放射される電磁波は、アンテナから遠く離れた所では電界と磁界が共存するTEM波となる。そして、時間を止めて眺めると、空間中に波長 λ の間隔で周期的に強弱を繰り返して分布している。例えば、垂直ダイポールから放射される電界の分布は図(a)のようになり、そこに共存する磁界の強さはTEM波の部分では電界の強さに比例する。そして、これらの電界と磁界の分布は時間と共にアンテナから離れる方向に移動し、その速度は真空の媒質中では光速 $v_0(=3 \times 10^8 \text{ [m/s]})$ で移動する。

いま、電界及び磁界のベクトルをそれぞれ \mathbf{E} 及び \mathbf{H} とすると、 \mathbf{E} と \mathbf{H} の向きは直交し、 \mathbf{E} と \mathbf{H} を含む面に右ネジの頭の面をあわせ、そのネジを \mathbf{E} から \mathbf{H} の方向に回転するとき、ネジの進む方向が電波の進む方向となる。この模様を図1.1(b)に示す。



(a) ダイポールアンテナから放射する電波



(b) 電波の進行方向と \mathbf{E} 及び \mathbf{H} との関係

図 1.1 電波の放射と電界 \mathbf{E} 及び磁界 \mathbf{H}

図1.1(a)の左右両端の電界分布からわかるように、アンテナから遠く離れると均一平面波となり、従ってTEM波となる。そして \mathbf{E} と \mathbf{H} との大きさの比は真空中では(1.1)式となる。

$$Z_{W0} = \left. \begin{aligned} \left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right| &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi [\Omega] = 377 [\Omega] \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] = \text{真空中の透磁率} \\ \epsilon_0 &= 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}] = \text{真空中の誘電率} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

これを真空中の電波の波動インピーダンスと呼び Z_{W0} で示した。

次に比誘電率 ϵ_r 、比透磁率 μ_r の無限媒質の場合には、電波の進む速度 v 及び波動インピーダンス Z_W

は

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \tag{1.2}$$

$$Z_W = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_{W0} \tag{1.3}$$

以上、無限媒質中に TEM 波が伝播することを述べたが、平行な 2 導体で出来た均一線路にも TEM 波が存在する。この 2 つの線路間に負荷 $Z_c[\Omega]$ を接続するとき、 Z_c を適当な値にすると、負荷の方向にのみ伝わる電波が存在する。この電波を進行波と呼び、この Z_c を線路の特性インピーダンスと呼ぶ。同軸線路の進行波の \mathbf{E} と \mathbf{H} の分布を図 1.2 に示す。いま 2 つの線路間の単位長当りのインダクタンス

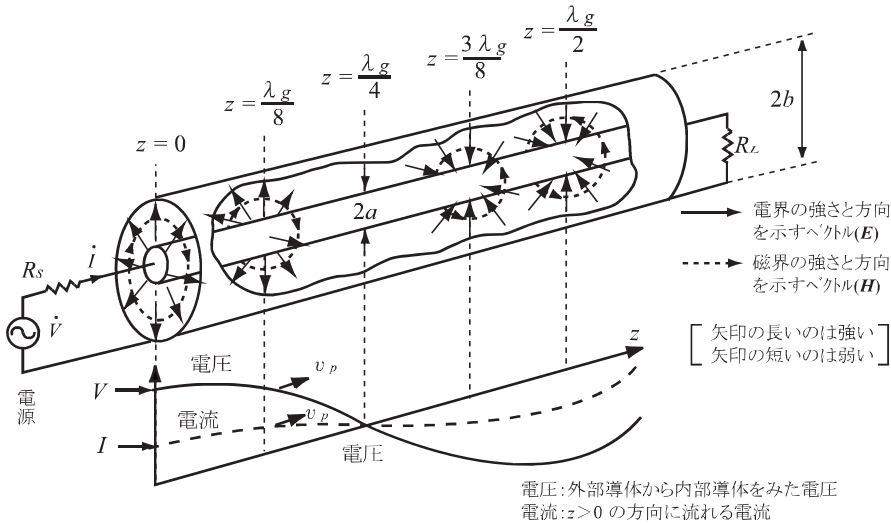


図 1.2 同軸線路内の電界と磁界との $t = 0$ における正弦波分布

を $L[\text{H/m}]$ 、キャパシタンスを $C[\text{F/m}]$ とすると、線路間を進む TEM 波の進行波の速度を v_p とすると、

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1.4}$$

である事が証明できる (文献 [1] の p.15)。またこの進行波の場合、当然 2 導体間には電圧 V を生じ、往復電流 I が生じる。この時、前述の定義でわかるように、 $V/I = Z_c$ である。また無限媒質中と同様に $|\mathbf{E}/\mathbf{H}| = Z_W$ も定義できる (文献 [1] の p.15)。そして、これらの量は次式で示される事が証明できる。

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{Cv_p} = Lv_p \tag{1.5}$$

$$Z_W = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_{W0} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tag{1.6}$$

種々の断面構造は表 1.1 に示した。[これは文献 [1] の p.18 と同じであるが、便利のために再びここに示した]