超短波領域における山岳多重回折 電界強度の計算法および計算例

東北大学 工学部 佐藤 利三郎
太田 悦

テレビジョン放送局の増加につれて、山岳多重回折電界強度の実例についての計算をときおり行なってきた。計算法は種々あるが、ここでは野呂雄吉氏（東北大学名誉教授）の理論を用いた。

1. ま え が き

一般に回折波は常に変動し、数 dB の変化は実測の結果得られているので、計算値は正確なものとはいえないが、一応の目安を知る点においてこの計算法は便利である。

以下野呂教授の理論による、電界強度の計算法を述べ、この方法による計算例を示す。関係各位の参考となれば幸いである。

2. 計 算 方 法

送受信の両点を含む鉛直断面図において、各峯をそれぞれ断面に垂直におかれた鉛直障壁の水平稜線とみて理論を適用する。すなわち、断面において山を切らないように峯を連結して、送受信点を両端とする開多角形を可能なかぎり作る。各多角形に沿って伝搬する回折波の強度を次に示す公式によって計算し、それらを合成するのである。辺数の多い多角形に沿う回折波は無視してもよい。

m 番目の開多角形を図 1 のようなものとして、それに沿う回折波の強度と自由空間伝搬における強度との比

を S_m とすると、

$$S_m = \frac{\sin \frac{\delta_1}{2} \sin \frac{\delta_2}{2} \cdots \sin \frac{\delta_n}{2}}{\left| \sin \frac{\delta_1}{2} \sin \frac{\delta_2}{2} \cdots \sin \frac{\delta_n}{2} \right|} f(T_1) f(T_2) \cdots f(T_n) e^{-jk\Delta_n}$$

ここで

$$\Delta_n = R_n - \overline{PQ}$$

$$T_i = 2\sqrt{\frac{ka_i}{2R_n}} \left| \sin \frac{\delta_i}{2} \right| \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$a_i = \frac{d_{i-1}(d_i + d_{i+1} + \cdots + d_n)}{d_{i-1} + d_i + d_{i+1} + \cdots + d_n} R_n \quad (i=1, 2, \cdots, n)$$

$$R_n = d_0 + d_1 + d_2 + \cdots + d_n$$

（ただし、図 1 では、 $\delta_1 > 0$, $\delta_2 < 0$, $\cdots$, $\delta_{n-1} < 0$, $\delta_n > 0$ とする）

山頂の高さの差が山頂間の距離に比してはなほだしく小さい場合には $d_0, d_1, \cdots, d_{n-1}, d_n$ を水平距離とみなしてよく

$$R_n = \overline{PQ}, \quad \Delta_n = 0, \quad \sin \frac{\delta_i}{2} \doteq \frac{\delta_i}{2}$$

としてよい。また、 $f(T_i)$ は複素数であるが、それらの偏角は $T_i = 0 \sim 3$ に対して $0 \sim 0.73$ であるから、

$$f(T_i) = |f(T_i)|$$

としてよい。したがって

$$S_m = \pm |f(T_1) f(T_2) \cdots f(T_n)|$$

ただし

$$T_i = \sqrt{\frac{ka_i}{2\overline{PQ}}} |\delta_i|$$

となる。複号は負の回折角が偶数個のとき正、奇数個の

筆者紹介

さとう りさぶろう
佐藤利三郎 昭和 19 年 9 月 東北大学 工学部
通信工学科卒業、工学博士、東北大学教授（工学部通信工学科）第二講座通信方式学担当、電波技術審議会専門委員、正会員。

おお た たい
太田悦 昭和 16 年 12 月宮城県女子専門学校卒業、昭和 18 年東北大学電気通信研究所に実験補助として入所、現在東北大学工学部通信工学科技官

"On the Method and Examples of Estimating Electric Field Intensity in V.H.F. Propagation in Mountainous Region" by Risaburo Satō and Tai Ōta (Tohoku University, Sendai)

図 1

とき負をとる。

ここで関数 $f(T)$ は

$$f(T) = \frac{1}{2} e^{jT^2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{j\frac{\pi}{4} + jT^2} \{C(T) - jS(T)\}$$

と定義され

$$C(T) = \int_0^T \cos \lambda^2 d\lambda$$

$$S(T) = \int_0^T \sin \lambda^2 d\lambda$$

である。

T に対する $|f(T)|$ の算出値を表 1 に示す。

回折角を算出するにあたっては地球のわん曲を考慮しなければならない。

いま、図 2 のように $H_1 H_0 H_2$ によって生ずる回折角 δ について考えてみると

$$\delta = \delta_1' + \delta_2' = \tan^{-1} \frac{h_1}{D_1'} + \tan^{-1} \frac{h_2}{D_2'}$$

と与えられるが、地球の半径 R が D_1, D_2 に比して、はるかに大きいとすると $D_1' \doteq D_1, D_2' \doteq D_2$ となり、また、 $h_1, h_2 \ll D_1, D_2$ とすれば

$$\delta \doteq \frac{h_1}{D_1} + \frac{h_2}{D_2}$$

となる。ここで h_1 および h_2 は

図 2

$$h_1 - h_1' = [R + H_1] \{1 - \cos \theta_1\} \doteq R \left\{1 - 1 + \frac{\theta_1^2}{2} \dots\right\}$$

$$\doteq \frac{R\theta_1^2}{2}$$

$$h_2 - h_2' \doteq \frac{R\theta_2^2}{2}$$

$$\theta_1 = \frac{D_1}{R}, \quad \theta_2 = \frac{D_2}{R}$$

などの関係から

$$h_1 \doteq h_1' + \frac{D_1^2}{2R}, \quad h_2 \doteq h_2' + \frac{D_2^2}{2R}$$

となり、前の δ を与える式から

$$\begin{aligned} \delta &\doteq \frac{h_1}{D_1} + \frac{h_2}{D_2} \\ &\doteq \frac{h_1'}{D_1} + \frac{D_1}{2R} + \frac{h_2'}{D_2} + \frac{D_2}{2R} \\ &= \frac{H_0 - H_1}{D_1} + \frac{H_0 - H_2}{D_2} + \frac{D_1 + D_2}{2R} \end{aligned}$$

と得られる。

ここで R は 8500 km (実際の地球平均半径の約 4/3) とする。

3. 計 算 例

次に、下記の計算条件によって計算をしてみる。

送信所：仙台市八木山 (標高 120m アンテナ高 60 m)

受信点：岩手県釜石市郊外篠倉山頂 (標高 570m)

送信電力：5 kW

送信空中線利得：7 dB

周波数：105 Mc (3 ch.)

(位置関係は図 4 参照)

- (1) 送受信点を結ぶ直線に沿ってプロフィールを描く。地図は 5 万分の 1 程度のものを用いる (図 3)
- (2) すべての電波径路を想定する。(図 3)
- (3) 各電波径路に関して各地点の回折角を求める。

表 1

T	$ f(T) $	T	$ f(T) $	T	$ f(T) $	T	$ f(T) $
0.00	0.5	0.28	0.401	0.62	0.309	1.45	0.179
0.01	0.496	0.29	0.397	0.64	0.305	1.50	0.175
0.02	0.492	0.30	0.394	0.66	0.301	1.55	0.171
0.03	0.488	0.31	0.391	0.68	0.297	1.60	0.167
0.04	0.485	0.32	0.388	0.70	0.292	1.65	0.163
0.05	0.481	0.33	0.385	0.72	0.288	1.70	0.158
0.06	0.477	0.34	0.382	0.74	0.284	1.75	0.154
0.07	0.473	0.35	0.379	0.76	0.280	1.80	0.149
0.08	0.469	0.36	0.376	0.78	0.276	1.85	0.144
0.09	0.466	0.37	0.373	0.80	0.272	1.90	0.142
0.10	0.462	0.38	0.370	0.82	0.268	1.95	0.139
0.11	0.459	0.39	0.367	0.84	0.265	2.00	0.137
0.12	0.455	0.40	0.365	0.86	0.261	2.5	0.112
0.13	0.452	0.41	0.362	0.88	0.258	3.0	0.095
0.14	0.448	0.42	0.359	0.90	0.254	3.5	0.080
0.15	0.445	0.43	0.356	0.92	0.251	4.0	0.070
0.16	0.441	0.44	0.354	0.94	0.247	4.5	0.062
0.17	0.437	0.45	0.351	0.96	0.244	5.0	0.056
0.18	0.434	0.46	0.348	0.98	0.241	5.5	0.051
0.19	0.430	0.47	0.346	1.00	0.238	6.0	0.047
0.20	0.427	0.48	0.343	1.05	0.230	6.5	0.043
0.21	0.423	0.49	0.340	1.10	0.223	7.0	0.040
0.22	0.420	0.50	0.338	1.15	0.216	7.5	0.037
0.23	0.417	0.52	0.333	1.20	0.209	8.0	0.035
0.24	0.413	0.54	0.328	1.25	0.203	8.5	0.033
0.25	0.410	0.56	0.323	1.30	0.197	9.0	0.031
0.26	0.407	0.58	0.319	1.35	0.191	9.5	0.030
0.27	0.404	0.60	0.314	1.40	0.185	10.0	0.029

表 2

 $f(T_i)$ 欄の () は負の回折角を示す。

角	H_1	H_0	H_2	H_0-H_1	H_0-H_2	D_1	D_2	$\frac{H_0-H_1}{D_1}$	$\frac{H_0-H_2}{D_2}$	$\frac{D_1+D_2}{17000}$	δ_i	$d_{i-1}+$ $d_i+\dots$	d_{i-1}	d_i+ $d_{i+1}+\dots$	$d_{i-1}(d_i$ $+\dots)$	$\frac{a_i}{PQ}$	$\frac{k}{2}$	$\frac{a_i}{PQ}$	$\sqrt{\frac{k}{2} \frac{a_i}{PQ}}$	T_i	$f(T_i)$
Aab	m	180	m	m	m	km	km	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	km	km	km		$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$			
AaB	"	"	710	-20	-550	"	68.5	-1.18	-0.73	2.62	0.71	140	17	123	2090	14.9	16.4	0.128	0.091	0.466	
ABd	"	710	640	530	70	85.5	27.5	"	-8.03	5.03	-4.18	"	"	"	"	"	"	"	0.535	(0.329)	
ABC	"	"	780	"	-70	"	43	"	-1.63	7.55	12.12	"	"	"	"	"	"	"	2.32	0.121	
abc	160	180	270	20	-90	27.5	25.5	0.73	-3.53	3.12	0.32	123	27.5	95.5	2625	21.3	23.5	0.153	0.049	0.481	
abB	"	"	710	"	-530	"	41	"	-12.9	4.03	-8.14	"	"	"	"	"	"	"	1.25	(0.203)	
aBd	"	710	640	550	70	68.5	27.5	8.03	2.54	5.65	16.22	"	68.5	54.5	3730	30.3	33.4	0.183	2.97	0.095	
aBC	"	"	780	"	-70	"	43	"	-1.63	6.55	12.95	"	"	"	"	"	"	"	2.37	0.118	
bcB	180	270	710	90	-440	25.5	15.5	3.53	-28.4	2.41	-22.46	95.5	25.5	70	1786	18.7	20.6	0.143	3.22	(0.089)	
bBd	"	710	640	530	70	41	27.5	12.9	2.54	4.03	19.47	"	41	54.5	2230	23.4	25.7	0.16	3.12	0.092	
bBC	"	"	780	"	-70	"	43	"	-1.63	4.94	16.21	"	"	"	"	"	"	"	2.6	0.109	
cBd	270	"	640	440	70	15.5	27.5	28.4	2.54	2.53	33.47	70	15.5	54.5	845	12.1	13.3	0.155	3.86	0.072	
cBC	"	"	780	"	-70	"	43	"	-1.63	3.44	30.21	"	"	"	"	"	"	"	3.49	0.08	
Bde	710	640	630	-70	10	27.5	3	-2.54	3.33	1.79	2.58	54.5	27.5	27	742	13.6	15.0	0.122	0.316	0.389	
BdC	"	"	780	"	-140	"	15.5	"	-9.04	2.53	-9.05	"	"	"	"	"	"	"	1.11	(0.222)	
BCD	"	780	740	70	40	43	3.5	1.63	11.43	2.74	15.8	"	43	11.5	495	9.1	10.0	0.1	1.58	0.169	
deC	640	630	780	-10	-150	3	12.5	-3.33	-12.0	0.91	-14.42	27	3	24	72	2.7	2.9	0.054	0.78	(0.276)	
dCD	"	780	740	140	40	15.5	3.5	9.04	11.43	1.12	21.59	"	15.5	11.5	178	6.6	7.25	0.085	1.84	0.145	
eCD	630	"	"	150	"	12.5	"	12.0	"	0.94	24.37	24	12.5	11.5	144	6.0	6.6	0.081	1.98	0.137	
CDE	780	740	570	-40	170	3.5	8	-11.43	21.25	0.68	10.5	11.5	3.5	8.0	28	2.44	2.7	0.052	0.55	0.326	

表 3

$$\delta_i = \frac{H_0-H_1}{D_1} + \frac{H_0-H_2}{D_2} + \frac{D_1+D_2}{17000}$$

(表 2)

(4) 各回折角に対する T_i を求める。(表 2)

$$T_i = \sqrt{\frac{ka_i}{2PQ}} |\delta_i|$$

$k=2\pi/\lambda=2.2$ λ : 波長

$$\frac{a_i}{PQ} = \frac{d_{i-1}(d_i+d_{i+1}+\dots+d_n)}{d_{i-1}+d_i+d_{i+1}+\dots+d_n}$$

$$\times R_n \cdot \frac{1}{PQ}$$

$$= \frac{d_{i-1}(d_i+d_{i+1}+\dots+d_n)}{d_{i-1}+d_i+d_{i+1}+\dots+d_n}$$

$$S_1(ABCDE)=0.121 \cdot 0.169 \cdot 0.326=0.00666$$

$$S_2(AaBCDE)=(0.329) \cdot 0.118 \cdot 0.169 \cdot 0.326=-0.00214$$

$$S_3(AabBCDE)=0.466 \cdot (0.203) \cdot 0.109 \cdot 0.169 \cdot 0.326=-0.00057$$

$$S_4(AabcBCDE)=0.466 \cdot 0.481 \cdot (0.089) \cdot 0.08 \cdot 0.169 \cdot 0.326=-0.000088$$

$$S_5(ABdCDE)=0.096 \cdot (0.222) \cdot 0.145 \cdot 0.326=-0.00101$$

$$S_6(ABdeCDE)=0.096 \cdot 0.389 \cdot (0.276) \cdot 0.137 \cdot 0.326=-0.00046$$

$$S_7(AaBdCDE)=(0.329) \cdot 0.095 \cdot (0.222) \cdot 0.145 \cdot 0.326=0.000328$$

$$S_8(AabBdCDE)=0.466 \cdot (0.203) \cdot 0.092 \cdot (0.222) \cdot 0.145 \cdot 0.326=0.000091$$

$$S_9(AabcBdCDE)=0.466 \cdot 0.481 \cdot (0.089) \cdot 0.072 \cdot (0.222) \cdot 0.145 \cdot 0.326=0.000015$$

$$S_{10}(AaBdeCDE)=(0.329) \cdot 0.095 \cdot 0.389 \cdot (0.276) \cdot 0.137 \cdot 0.326=0.00015$$

$$S_{11}(AabBdeCDE)=0.466 \cdot (0.203) \cdot 0.092 \cdot 0.389 \cdot (0.276) \cdot 0.137 \cdot 0.326=0.000042$$

$$S_{12}(AabcBdeCDE)=0.466 \cdot 0.481 \cdot (0.089) \cdot 0.072 \cdot 0.389 \cdot (0.276) \cdot 0.137 \cdot 0.326=0.000007$$

$$S=S_1+S_2+\dots+S_{11}+S_{12}=0.003025$$

$$=S_1+S_2+S_3+S_4+(S_5+S_6) \frac{S_1+S_2+S_3+S_4}{S_1}$$

$$=S_1+S_5+S_6+(S_2+S_3+S_4) \frac{S_1+S_5+S_6}{S_1}$$

(5) 表1により T_i から $|f(T_i)|$ を求める。(表 2)

(6) 各径路について径路利得 S_m を求める。(表 3)

$$S_m = \pm |f(T_1)f(T_2)\dots f(T_n)|$$

複号は負の回折角が偶数個のとき正, 奇数個のとき負をとる。

(7) 径路利得の総和 S を求める。(表 3)

$$S=S_1+S_2+\dots+S_m$$

(8) 自由空間電界強度 E_0 を求める。

$$E_0 = 20 \log \frac{7\sqrt{P}}{D} + 60 + \text{送信空中線利得 (dB)}$$

$$= 20 \log \frac{7\sqrt{5000}}{140} + 60 + 7 = 77.96 \text{ (dB)}$$

P : 送信電力 (W)

D : 送受信点間の距離 (km)

図 3

地 点	距 離	高さ (海拔)
	km	m
A	0	180
a	17	160
b	44.5	180
c	70	270
B	85.5	710
d	113	640
e	116	630
C	128.5	780
D	132	740
E	140	570

表 4

送 信 所	送信電力	アンテナ利得	受 信 点	送受信点間の距離	計 算 値			実 測 値
					野邑方式	郵政省 (1)	郵政省 (2)	
長野県美ヶ原	1 kW	11.6 dB	軽井沢町	49.7 km	53.3 dB		58.6 dB	65
"	"	"	屋代町	34.9	53.8		62.7	54~58.5
"	"	"	松本市	12.2	71.9		87.8	59~80.5
"	"	"	上田市	23.5	80.2		83.1	74.5~79
"	"	"	長野市	48.4	82.5	74.6 dB	84.8	60~75
北九州市皿倉山	1 kW	8.6 dB	大牟田市	96.9	28.8		52.3	30~34
"	"	"	太宰府町	44	47.4		51.7	53
"	"	"	行橋市	21	52.1		55	49~51
"	"	"	山田市	30.8	52.8		62.8	43
"	"	"	久留米市	64.8	55.7		61.8	50~59

(9) 受信点の電界強度 E を求める。

$$E = E_0 - 20 \log S$$

経路利得は

$$20 \log S = 20 \log 0.003025 = -60 + 9.61 = -50.49 \text{ (dB)}$$

求める受信点の電界強度 E は

$$E = 77.96 - 50.49 = 27.47 \text{ dB}$$

これで篠倉山における仙台からの電波の電界強度計算値は 27.47 dB と知られたわけである。

なお、この計算例について実測した結果は 20~30 dB であった。

以上の方法により計算した各地の計算値を、位置図、プロフィールとともに図 4~図 11 に示す。

4. む す び

計算法には郵政省告示「TV 波の電界強度計算法」がある。これは

(1) 不規則な起伏のある球面大地の CCIR のカンヌ専門家会議による計算法

(2) 山岳回折がある場合の計算法

とに分けてある。前述の例題の数地区について(1)、(2)の方法で計算した結果および電波監理局の測定結果をまとめて表 4 に示す。

これより山岳回折のない場合は計算法(1)が比較的一致し、回折の多い地形に対しては(2)および野邑方

○計算条件

送 信 所 盛岡市内新山(標高552m)
アンテナ高 58m)

送 信 電 力 1 kW

周 波 数 184 Mc (6 ch.)

アンテナ利得 0 dB

○計算結果

福岡町 7.7 dB (標高 100m)

遠野市 13.7 " (" 260 ")

篠倉山 32.7 " (" 570 ")

図 4

○計算条件

送 信 所 福島市郊外笹森山(標高 650m アンテナ高50m)

送 信 電 力 1 kW

周 波 数 213 Mc (11 ch.)

アンテナ利得 0 dB

○計算結果

若松市 14.9 dB (標高 200m)

平 市 16.72 " (" 10 ")

水石山 61.3 " (" 735 ")

図 5

式がよく一致する。野呂方式が(2)より実測値に近く
計算法(2)は一般に値が大きく出る傾向がある。

以上、山岳の多い多重回折の場合には野呂方式計算法
によるものが、ほぼ実際の電界強度を示すものと思われ
る。今後、FM放送、UHF放送に対し参考となれば幸
いである。

本報告にあたり計算に協力された大場徳喜、大柳武夫
の両氏に謝意を表する。(昭和39年1月6日受付)

〔参考文献〕

- 1) Nomura: On the Method of Estimating Electric Field Intensity

in V. H. F. Propagation in Mountainous Region, SCI REP. RI-
TU, B- (Rep. Res. Inst. Elect. Comm, Tohoku Univ.), Vol 6
No. 3, 4. March (1955) 157.

- 2) 佐藤利三郎: 超短波領域における山岳多重回折電界強度計算法
(野呂教授の方法による)並びに実験結果の一例について、電力
線搬送通信委員会資料(昭32.2.20)
- 3) 古津宏一: 電波研究所報, Vol 2, No. 9, Oct. (1956).
- 4) 超短波領域における山岳多重回折電界強度の計算例および実験結
果の一例について、電波技術審議会第部会資料, 4-2-P-11 (昭36).
- 5) 超短波放送の電界強度計算資料, 電波技術審議会第4部会資料,
4-2-P-13 (昭36).
- 6) 山岳回折に關係する超短波放送を行なう放送局の電界強度計算法
電波技術審議会第4部会資料, 4-2-P-10 (昭36).

○計算条件

送信所	美ヶ原 (標高 2030m)
送信電力	1 kW
周波数	213 Mc (11 ch.)
アンテナ利得	0 dB

○計算結果

軽井沢町	41.7 dB (標高 950m)
上田市	68.6 " (" 450 ")
星代町	42.2 " (" 350 ")
長野市	70.9 " (" 370 ")
松本市	60.3 " (" 590 ")

図 6

○計算条件

送信所	福井市内足羽山 (標高 80m)
送信電力	3 kW
周波数	213 Mc (11 ch.)
アンテナ利得	0 dB

○計算結果

大野市	12.5 dB (標高 170m)
勝山市	14.7 " (" 120 ")
敦賀市	17.5 " (" 5 ")

図 7

○計算条件

送信所	鳥取県針伏山 (標高 514m)
送信電力	1 kW
周波数	93 Mc (1 ch.)
アンテナ利得	0 dB

○計算結果

智頭町	25 dB (標高 150m)
米子市	43.4 dB (" 10 ")
江府町	32.2 " (" 150 ")
岩井町	46.2 " (" 22 ")
西伯町	35.4 " (" 30 ")
鳥取市	69.6 " (" 10 ")
舟岡町	35.8 " (" 60 ")

図 8

○計算条件
 送信所 徳島市内眉山 (標高 280 m アンテナ高 30m)
 送信電力 1 kW
 周波数 93 Mc (1 ch.)
 アンテナ利得 0 dB

○計算結果
 日佐町 6.3 dB (標高 10m)
 半田町 18.7 " (" 35 ")
 池田町 48 " (" 10 ")
 引田町 55 " (" 10 ")
 由岐町 56.1 " (" 10 ")

図 9

○計算条件
 送信所 北九州市皿倉山 (標高 626m アンテナ高30m)
 送信電力 1 kW
 周波数 195 Mc (8 ch.)
 アンテナ利得 0 dB

○計算結果
 大牟田市 20.2 dB (標高 5 m)
 太宰府町 38.8 " (" 50 ")
 行橋市 43.5 " (" 10 ")
 山田市 44.2 " (" 60 ")
 久留米市 47.1 " (" 10 ")

○計算条件
 送信所 宮崎県鰐塚山 (標高 1119m アンテナ高20m)
 送信電力 1 kW
 周波数 207 Mc (10 ch.)
 アンテナ利得 0 dB

○計算結果
 延岡市 28.3 dB (標高 10m)
 日向市 40 " (" 10 ")
 加久藤町 51.2 " (" 110 ")

図 11