

1. 地面アンテナの定義

地面アンテナとは、地表浅く打ち込んだ複数の接地極間に誘起する高周波信号を検出し、および信号を地表を通じて地中または空間に放射する仕組みを言います。地面アンテナは筆者らの命名です。

当面の実験および論議を、アース棒の深度を数 m 以下 アース極間の距離を数 10m 以下 アース極数を 2 信号の周波数は 1MHz 以下の条件で行います。

地面アンテナの基本的な構成を、図 1 に示します。両極と受信機または送信機を接続する被覆導線は、これが空間波を直接受信しないように、地面に這わせませす。

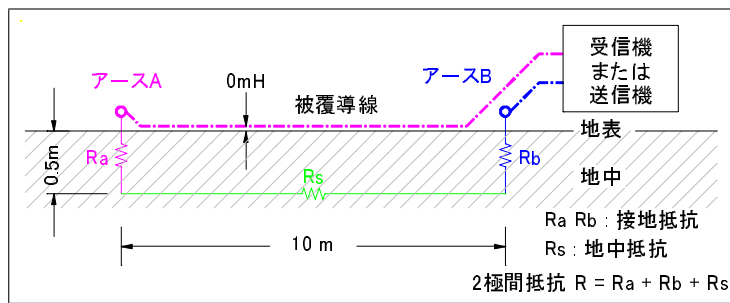


図 1: 地面アンテナの標準的構成

空間に置かれたダイポールアンテナとは形状が大きく異なる「スネークアンテナ」、「ビバレージアンテナまたは波アンテナ」あるいは「EWE アンテナ」が考案され、それらを受信専用とした実用例は多く報告されていますが、動作原理を十分説明した文献は見られません。そこで筆者らは、既成概念を排してその伝播特性を実験によって取得し、動作原理と応用範囲を検討してきました。

本稿で実験の中間総括を行い、さらなる実験の方向を探ります。

2. 伝播発見の端緒は相模クラブ

筆者が地面アンテナを知ったのは、次の情報が発端です。

2009年5月にアマチュア無線の相模クラブが神奈川県内の休耕田において 42.19kHz の地中通信の送受試験を行っていたところ、JJY 40kHz の強力な混信に出会った。送信側は 1.6m 長のアース棒を地面に打ち込んだ約 10m 間隔の 2 極で、その間に電気信号を加える。受信側も同様のアース棒 2 極を送信側と平行方向に配置し、2 極間の信号を観測する。

送信出力 40W 程度で、490m まで通信可能であった。

詳細な実験記録は <http://www.fc2-lab.com/CirQ034.pdf> に掲載されている。

この実験は地中通信の可能性を探るのが目的でしたが、大久保氏 JH1FCZ はそれよりも 40kHz JJY おおたかどや山標準電波送信所 (福島県田村市都路町) の電波が約 250km 離れた受信アースの 2 極間に強く誘起することに、不思議を感じたと語っています。氏の卓越した観察力が、垂直アンテナやフェライトコア入りコイルで信号を検出する従来の方式とは明ら

かに異なる受信方式を発見しました。

では、その原理は何であるか。信号のエネルギーは電波なのか、電界あるいは磁界なのか。それが電波であるとする、伝播路は空間波、地表波あるいは地中波なのか。受信のみならず送信にも使えるのか…。疑問は沢山出てきますが、解答が得られる教科書がありません。

そこで相模クラブをはじめ四街道のアマチュア無線家が、実験方法や理論付けの方向を論議してきました。まず自然現象を把握することから動き始め、大久保氏 JH1FCZ、栗原氏 JA1HOF、金子氏 JA1CNM と間 JA5FP が基礎的データを取得する実験を行いました。

3. 伝播試験に使用する装置

前記の相模クラブの報告を再確認し、実験結果を普遍的なものにするために次の諸元を決めて測定機材を準備しました。

- レベルメータ

次の内一つを使用しますが、いわゆるアースアンテナによる電源ラインからの信号混入とノイズの影響をなくすため、電池駆動が必須です。

(1) SLM-17C 選択レベル計:測定周波数範囲は 4kHz ~ 1,200kHz

(2) Eee PC 900 ノートパソコンと SpecLab V2.73 by DL4YHF ソフトウェア:測定周波数範囲は 0Hz ~ 48kHz(PC のオーディオ入力周波数が 23kHz 以下に限定されている場合は不可)
SpecLab は freenet-homepage.de/dl4yhf/spectra1.html からダウンロード可

- アース棒

1 対 2 本 DIY 店または電器店で販売している簡易アース棒:0.6m 長

- 被覆導線

アースとレベルメータ間を接続:5m 長および 10m 長の 2 本

- インピーダンスメータ

この実験には必須ではないが、2 極間の土質による電気的特性の確認用
VLF/LF 帯の 10Ω ~ 1kΩ が測れるもの

- 信号源

24 時間連続発射されている JJY 40kHz を長距離電波伝播の測定に利用するほか、20kHz 100W の自作送信機を近距離伝播の信号源とします。

測定には図 1 の地面アンテナの基本的構成を用います。アースの打ち込み地点によりアース間抵抗が異なりますので、測定の際に計測します。

4. 垂直偏波 40kHz 地表波の受信結果

JJY 40kHz 電波を対象としてとりあえず 2 箇所ですり試行的な測定を行い、表 1 のとおり信号強度特性を取得しました。

表 1: 地面アンテナによる受信レベルの測定結果 (対象波:JJY 40kHz)

測定ポイント	1	2
場所と環境	佐倉城址公園内の芝生	四街道市内の水田
土質	乾燥地 (赤土山砂)	湿地 (泥)
アース間抵抗の傾向	430 ~ 700Ω	62 ~ 75Ω
信号強度 (dB_m)	(000) -53	(000) -59 (017) -58 -50(注) (030) -59 (060) -62
(***) は、アース B から 見たアース A の方向 (度)	(090) -57	(090) -69 (120) -69 (150) -62
	(180) -55	(180) -59 (210) -59 (240) -63 (197) -58
	(270) -62	(270) -73 (300) -68 (330) -61

(注) 標準地面アンテナではアース間隔 10m としていますが、比較のためにアース間隔を 30m に上げたところ最大指向方向でレベルが 8dB 上昇しました。

いずれも 9 月中旬の正午前後、晴天時での測定です。なお、JJY 40kHz おおたかどや山標準電波送信所の方向は真方位 017 ° 距離 192km です。

測定ポイント 2 のデータから作成した指向特性を図 2 に示します。

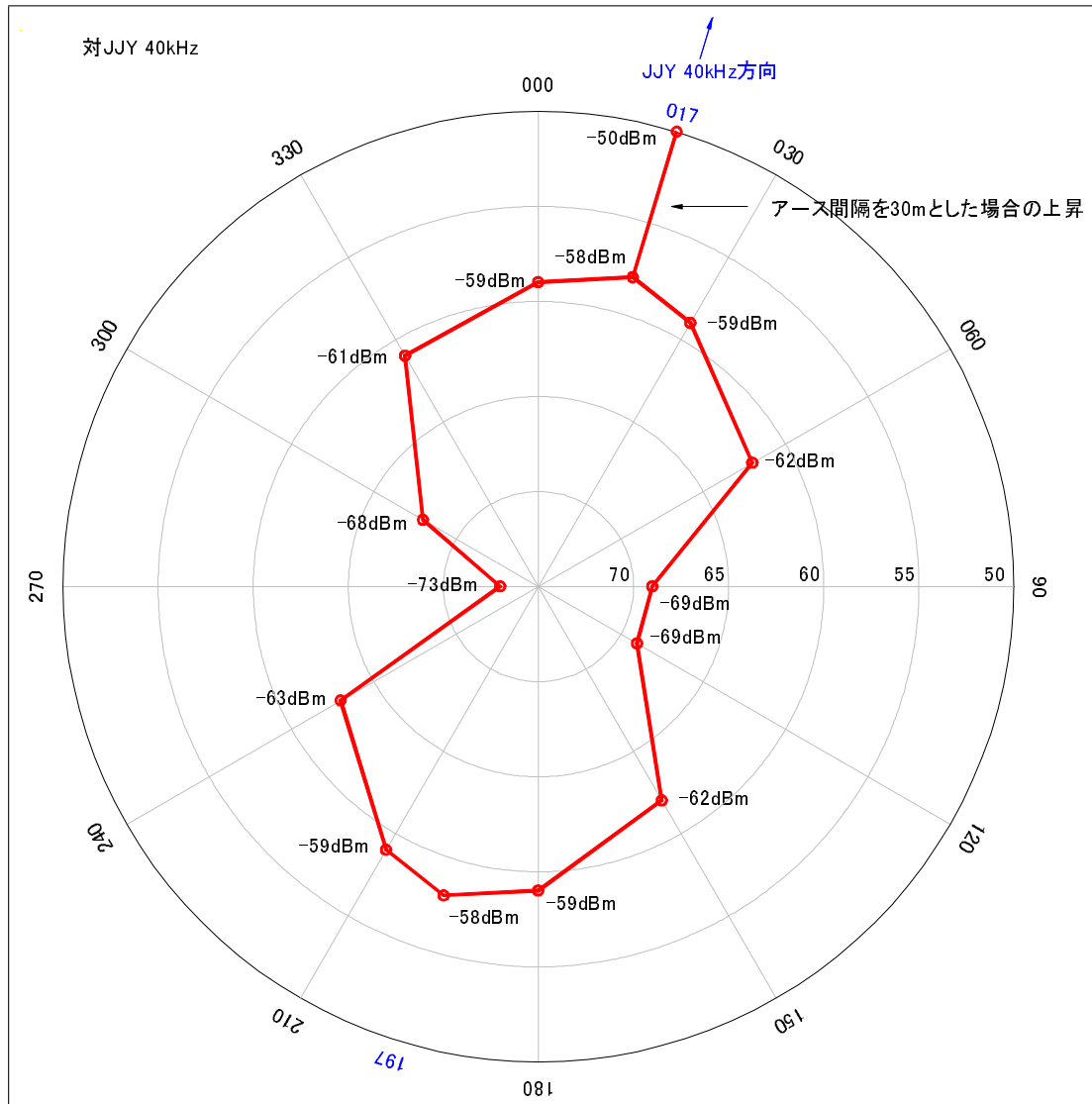


図 2: 典型的な 8 字特性を示す地面アンテナの受信指向性

測定は試行段階であるのでデータ項目に足りない部分があるかも知れませんが、今この結果から判る事実は次のとおりです。

- 1 アンテナ動作 アース A またはアース B の一方を引き抜くと受信不能になるので、地面アンテナはアンテナとして働いている。
- 2 指向性 図 2 が示すように、電力利得が典型的な 8 字特性になる。ただし、ダイポールアンテナがエレメントの直角方向に最大利得を持つものに対して、地面アンテナ受信では 2 極を結ぶ方向に向く。
- 3 場所による利得 湿地よりも乾燥地に設置した方が数 dB レベルが上昇する。
- 4 間隔利得 地面アンテナ間隔を 3 倍 (9.5dB) にすると 8dB レベルが上昇した。つまり、受信レベルはほぼアース間隔に比例する。

- 5 電波の受信と周波数選択性 VLF/LF は九州や東北からの遠距離電波でも受信できる。MF/HF では感度が比較的低下する。

5. 地面アンテナでの送信受信による近距離伝播

地面アンテナを送信と受信の双方に用いるとどのような特性になるかも興味が沸きます。

そこで筆者らは、図1の構成の標準アンテナを送信および受信に用いて、20kHz 100W を信号源とする伝播特性把握実験を行いました。それによると、送信側地面アンテナの線方向に向かっておおむね3km以下の距離の地点では受信レベル-70dBm以上であり、送信側地面アンテナの横方向にも良く伝播しました。(横方向については距離約150m地点での測定だけを実施し、それ以遠の地点は適当な環境がなかったので未実施です。)

ここで際立った特徴が認められるのは、送信側と受信側の地面アンテナの配置方向により受信感度が大きく異なることです。図3のように送信側と受信側の地面アンテナの軸が一致した場合が最大感度になり、互いの軸が直角では受信できないことが確認できました。なお図3では具体的には示していませんが、送信地面アンテナの線方向から斜め方向においても両アンテナの軸が一致しておれば受信できます。要するに、送信受信アンテナ間での軸の一致が伝播の必要条件となります。

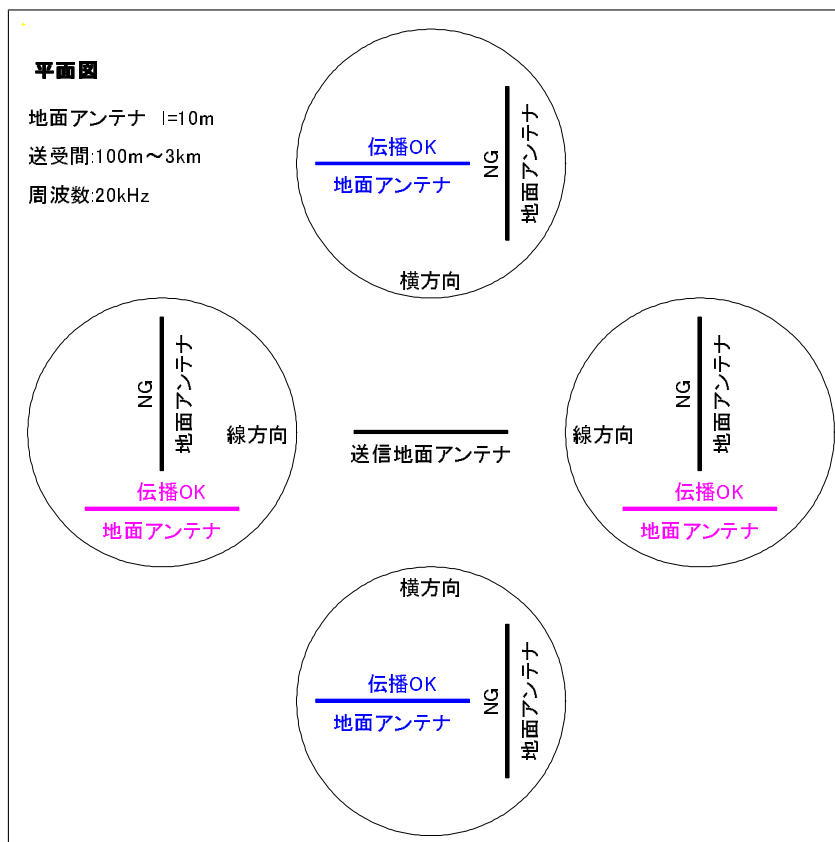


図3: 地面アンテナから地面アンテナへの伝播パターン

図3上でマゼンタ色で示した伝播は、信号の到来方向と地面アンテナの軸方向が一致している伝播であり、図2で確認済みの垂直偏波電波の受信指向性と同じ向きです。しかし、図3上の青色で示した横方向の伝播はこれまでに遭遇していない現象です。そこには何かの理

由があるのでしょうかから、次項で理論的検討を加えます。

6. 波長に比べて極端に短い地面アンテナの解釈

本論にはいる前に、電波の定理と定義を復習しましょう。電磁理論によると、電極間に生じた電気力線が信号源によって変化するとそれに応じて磁力線を電気力線と直角方向に発生させ、その繰り返しのよって電波が発射されると説かれています。ここで電気力線、磁力線、電波の進行の各ベクトルは互いに直交しており、一般に電気力線の方向をもって偏波面の方向と呼びます。つまり、電気力線の方向が水平(すなわち磁力線の方向が垂直)である状態を水平偏波とし、電気力線の方向が垂直(磁力線は水平)である場合を垂直偏波とします。

誰もが良く知っている $\lambda/2$ ダイポールでは、自由空間でエレメントを水平に置くと水平偏波の電波がエレメントと直角方向に 8 字型で放射されます。周が λ 長のループアンテナを下端給電すると、同じく水平偏波の電波がエレメント面の直角方向に 8 字型に放射されます。

これらの共振型アンテナの特性から地面アンテナを理解しようとする、図 2 で表された線方向と横方向の双方への 8 字特性が得られる理由が判らなくなります。実は、地面アンテナが共振型アンテナではなく、波長に比べてエレメント長が極端に短い微小ダイポールまたは微小ループアンテナであることに原因があります。実験で用いた 20kHz 信号源の波長は、空中において約 15km ありますし、土壌中であっても 10km 程度あります。標準地面アンテナのアース間隔は 10m ですから、それは波長と比べると極めて微小なエレメントでしかありません。

共振していない微小ダイポールあるいは微小ループアンテナの放射特性を MININEC によってシミュレーションしますと、図 4 の結果が得られます。

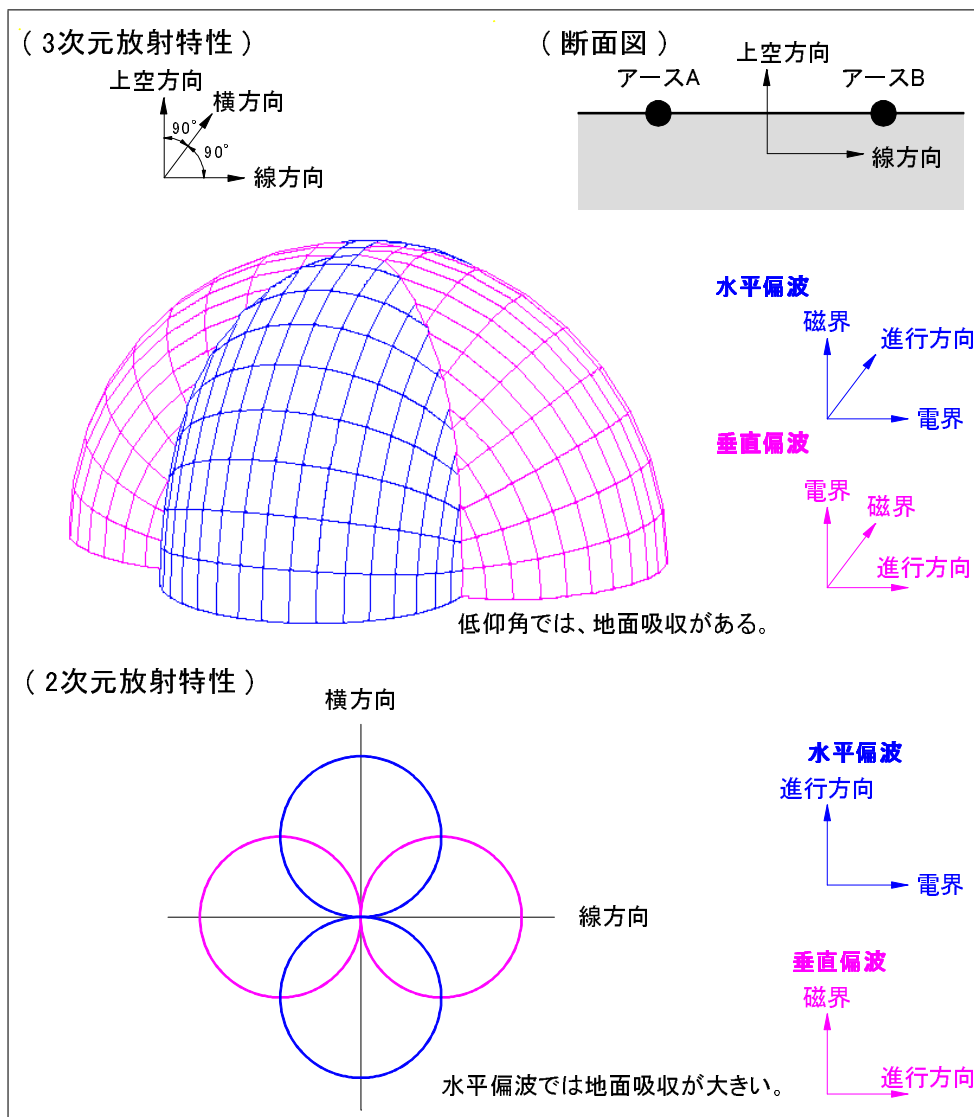


図 4: 微小ダイポールまたは微小ループアンテナの放射特性

これによると、地面アンテナの横方向の半円面を中心に水平偏波の電波が放射され、線方向の半円面を中心として垂直偏波が放射されていることとなります。つまり、微小ダイポールや微小ループアンテナでは、水平偏波と垂直偏波の電波が交差して放射されるのです。これが非共振型アンテナである地面アンテナ固有の放射特性です。共振型アンテナでは水平偏波か垂直偏波かのどちらかが圧倒的に他より優勢であるのと異なり、非共振型アンテナでは両者が大差なく放射されます。

これでもう十分理解できたでしょう。地面アンテナが、水平偏波による横方向への指向性と垂直偏波による線方向への指向性を併せ持つ理由が解りました。

図 4 には詳しく表現していませんが、地面による電波の吸収損失が存在します。そのため、仰角が低い方向へのエネルギーは大幅に弱められます。また、水平偏波成分は大地土壤による損失が大きいため、垂直偏波分比べて比較的弱くなります。

以上の検討では、地面アンテナが微小ダイポールであるのかそれとも微小ループアンテナ

であるのかを特定しませんでした。結果論ですが、それをあえて断定する必要がないと考えます。その理由は、放射電波の偏波特性と指向特性がどちらも同じなのですから、どちらのアンテナをイメージしても構わないということです。一般に地面アンテナのアース間抵抗が60~800Ωになりますので、給電点がハイインピーダンスである微小ダイポールと見たほうが理解し易いでしょう。肝心なことは、地面アンテナの線方向に垂直偏波の指向性があり、横方向に水平偏波の指向性が出ることです。

地面アンテナを微小ダイポールとみなすと、第4項で述べたところの乾燥地よりも湿地の方が利得が低くなる現象の原因が、地面アンテナのアース間抵抗がハイインピーダンスである電極間を短絡するためであることにありと解ります。微小ループアンテナは給電点インピーダンスが極めて低いと認識する方が自然ですが、地面アンテナのアース間抵抗値とはかけ離れているので、どちらかという微小ダイポールと観念した方が良いでしょう。

第5項で扱った地面アンテナ間の伝播は、近傍電界および近傍磁界内の現象ですから伝播損失は距離の3乗に比例して増加するために、伝播距離は数kmが限界です。一方の第4項で実験報告したVLF/LF電波の受信は、伝播損失が距離および周波数に比例するのでVLF/LFでは数100kmに及ぶ遠距離伝播が可能になります。

7. VLF/LF 帯アンテナ等への発展の可能性

地面アンテナは高い鉄塔や柱を使わずに安全に建設できるので、VLF/LF 帯用低雑音・高利得アンテナとして実用化できそうです。

具体的な用途としては、40kHzまたは60kHz JJY 受信用、潜水艦等での海中通信用、136kHz 帯アマチュア無線、LF 帯海外放送の受信用などがあります。4.63MHz 非常通信用の緊急予備アンテナにもなります。

8. HF 帯で送受信の実績

以上では主として地面アンテナのLF帯での受信性能を検証してきましたが、このアンテナが送信アンテナとして働く可能性も否定できる理由がありません。そこで、筆者は短時間になるべく多数の応答が期待できるアマチュア無線コンテストにおいて、地面アンテナがどの程度の成績を出せるか試してみました。

<JARL 2010 フィールドデー・コンテスト 3.5MHz CW 部門>

自局: JA5FP/1 送信 NR: 12M 空中線電力: 50W

移動運用場所: 千葉県印旛郡栄町 利根川堤防

地面アンテナ: アース棒間隔 30m ATU 使用

伝搬の様子は次のログをご覧ください。北海道から九州まで広く交信できることが分かりました。アンテナ能率はもちろんダイポールには及びませんが、設置が簡単なわりには良い結果が得られていると思います。

yyyy-mm-dd	hh-mm(JST)	QRZ	NR(Received)
2010-08-07	21:00	JO1ZQG/1	10M
2010-08-07	21:01	JA7DLE	03H
2010-08-07	21:02	JA2ZDU/2	20M
2010-08-07	21:05	JA0ZTP/0	08M
2010-08-07	21:08	JH1YAK/1	16M
2010-08-07	21:11	JF2YJA/2	20M
2010-08-07	21:14	JM1RPV/1	14P
2010-08-07	21:16	7M2GCW/0	09M
2010-08-07	21:19	JH4RCK/3	27L
2010-08-07	21:21	JA0DVE/0	09M
2010-08-07	21:24	JA1COU/1	13M
2010-08-07	21:25	JK2EIJ/2	18M
2010-08-07	21:29	JF1YYZ/1	12M
2010-08-07	21:39	JR4PMX/1	11M
2010-08-07	21:41	JJ3YGB/3	25M
2010-08-07	21:43	JF2IWL/2	19M
2010-08-07	21:44	JA0YEH/0	08M
2010-08-07	21:52	JA5CQH/4	31M
2010-08-07	21:54	JJ2JQF/3	26M
2010-08-07	21:57	7M2WNR/1	14M
2010-08-07	21:59	JJ4UEN/4	33M
2010-08-07	22:01	JG1FKV/1	12M
2010-08-07	22:02	JJ1JJD/1	17M
2010-08-07	22:07	JR2SCJ/2	18M
2010-08-07	22:08	JA2ZLF/2	20L
2010-08-07	22:19	JH8SLS	106H
2010-08-07	22:26	JA1FWY	11M
2010-08-07	22:30	JE8KKX/8	103M
2010-08-07	22:32	JK2RCP/2	18M
2010-08-07	22:36	JE9WEO/9	30M
2010-08-07	22:39	JR3EOI/3	27M
2010-08-07	22:40	JM1LRQ/1	16M
2010-08-07	22:43	JA1IZZ/1	15M
2010-08-07	22:45	JS1PWV/6	44M
2010-08-07	22:51	JO3JYE/3	27M
2010-08-07	22:54	JH7UJI/7	06M
2010-08-07	22:59	JG7IJM/7	05M
2010-08-07	23:01	JA0ZSM/0	08M
2010-08-07	23:04	JK1YMM/2	18M
2010-08-07	23:07	JA1ZGO/1	17M

yyyy-mm-dd	hh-mm(JST)	QRZ	NR(Received)
2010-08-07	23:11	JA7YAT/7	06M
2010-08-07	23:19	JH7IXX	15M
2010-08-07	23:22	JH2CMH/2	20M
2010-08-07	23:24	JA4YBR/4	35M
2010-08-07	23:32	JM3CRK/3	23M
2010-08-07	23:35	JA7YCE/7	03M
2010-08-07	23:48	JR2AWS	19H
2010-08-07	23:49	JH3CUL	25M
2010-08-07	23:54	JA8YDO/8	110M
2010-08-07	23:55	JA0YBS/0	09M
2010-08-07	23:58	JF1ISC/2	19P
2010-08-08	00:04	JJ4NZO/1	16M
2010-08-08	00:11	JR3NZC/3	24M
2010-08-08	00:13	JE8KGH/7	06M
2010-08-08	00:18	8N1F/1	17M
2010-08-08	00:20	JR3KQJ/3	27M
2010-08-08	00:21	JQ3YKV/3	25M
2010-08-08	00:24	7K1PEO/2	18M
2010-08-08	00:31	JH0NEC/0	08M
2010-08-08	00:37	JJ1YTF/1	16M
2010-08-08	00:43	JA4GWE/4	31M
2010-08-08	00:49	7N4MXU/1	17M
2010-08-08	01:05	7L1ETP/1	12M
2010-08-08	01:08	JA1ZCX/1	15M
2010-08-08	01:12	JF2OZH/2	12M
2010-08-08	01:15	JA1PBV/1	14M
2010-08-08	01:29	JA1YHC/1	12M
2010-08-08	01:46	JR8OGB/8	103M
2010-08-08	02:29	JA1ZEK/1	11M
2010-08-08	02:45	JG1RRU/1	10M
2010-08-08	04:17	JA3YAQ/3	22M
2010-08-08	04:20	JR1GMK/1	11M
2010-08-08	04:21	JA5SQH/5	37M
2010-08-08	04:24	JH0NVX/1	16M
2010-08-08	04:26	7L1FFH/1	13M
2010-08-08	04:32	JA2UFH/0	09P
2010-08-08	04:39	JK1JHU/1	13M
2010-08-08	04:43	JH0MUC/0	09M
2010-08-08	05:13	JA3ZFN/3	27M
2010-08-08	05:19	JA3YBL/3	27M

yyyy-mm-dd	hh-mm(JST)	QRZ	NR(Received)
2010-08-08	05:25	JQ1DSK/1	13M
2010-08-08	05:36	JL1BNE	10M
2010-08-08	05:43	JG1RVN/1	17M
2010-08-08	05:46	JN1ZUA/1	13M
2010-08-08	05:49	JL3YSP/3	26M
2010-08-08	05:59	JA2ODB	18H

以上