

3-7 APAA 健全性確認実験報告

赤石 明 大川 貢 高橋 卓

WINDS に搭載されている APAA の健全性確認実験として、衛星と地上局との間で素子電界ベクトル回転法 (REV 法) による確認試験を実施した。本稿では WINDS APAA の概要を述べるとともに、衛星と地上局間の軌道上の REV 法固有の課題と解決策、データ取得方法、データの評価方法及び位相補正実験結果を報告する。

軌道上 REV 法の課題として、REV 計測時のタイミングが同期していないこと及び大気擾乱による受信信号の変動の問題があるが、前者は 1 つの位相設定の計測期間に同じ測定を 2 回行うこと、後者は 1 回の測定で得られた複数個のデータの平均化処理により問題を解決した。

REV 実験の評価として振幅と位相のトレンド評価を行った結果、全ての素子の振幅と位相は初期の値をほぼ再現しており、WINDS APAA の健全性が確認された。

1 まえがき

WINDS APAA (Active Phased Array Antenna) のアンテナビームは静止軌道から見た地球上の任意の方向に向けることができる機能を有している。このアンテナは送信系及び受信系とも 128 素子のアンテナ素子、増幅器及び BFN (Beam Forming Network) で構成されており、送信系及び受信系とも同時に 2 つのビームを形成することができる。2 つのビームはアンテナ素子と増幅器を共用として、BFN がビームごとに独立に実装されている。一般的に APAA は部品点数が多く、しかも Ka 帯での搭載実績がないため長期間の健全性の確認が必要である。ここでは、APAA の健全性確認の重要項目であるアンテナ素子の給電振幅と給電位相に着目し、その測定方法として軌道上での素子電界ベクトル回転法 [1] (REV: Rotating Element Electric Field Vector Method) を適用して

WINDS APAA の長期の健全性を確認した結果を報告する。さらに、REV 法の応用として APAA の系統間誤差を補正して利得を最大化する位相補正実験も実施したので報告する。

なお、WINDS APAA の REV 評価は同時に JAXA 側でも実施 [2] している。

2 WINDS APAA の概要

図 1 に APAA の RF 系統の機能ブロック図を示す。受信系と送信系とも平面上に配列した 128 素子の小型のホーンアンテナと増幅器及び 2 系統の BFN (Beam Forming Network) で構成される。BFN は移送器と合波器または分配器で構成される。各移送器は 5 ビットのアナログ移送器であり、1 ビットごとに 11.25° ずつ位相を変化させることができる。受信系は 128 素子のアンテナの受信信号を BFN の移送器で必要な位相

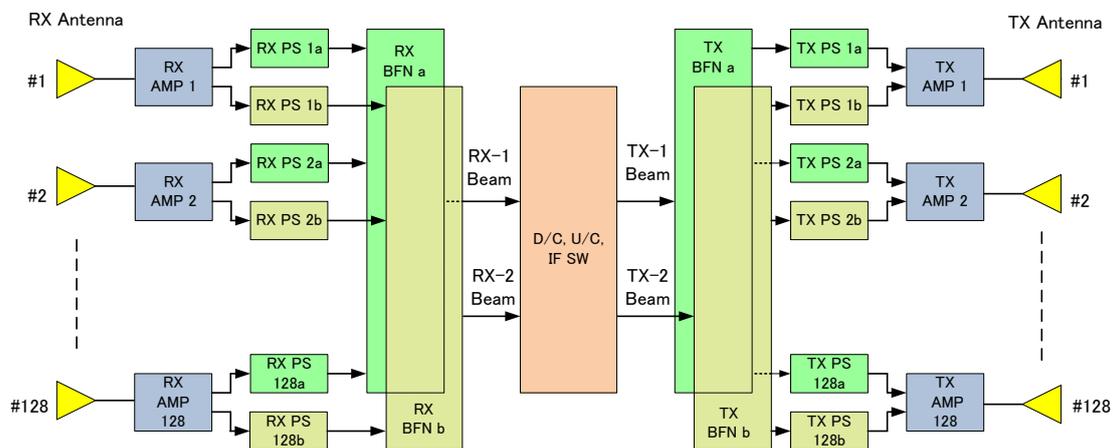


図 1 APAA ブロック図

変位が与えられ、合波器で合成することにより受信ビームを形成してダウンコンバータに入力する。送信系はアップコンバータからの送信信号を分配器で128分配して移送器に入力し、移送器を通過した送信信号は128素子のアンテナ素子から放射することにより送信ビームを形成する。

3 REVの概要

REV法の特長はアンテナに実装された移送器を利用し、対向するアンテナで振幅測定のみを行うことによりアレー状態での給電振幅と給電位相を同時に測定することができる点である。さらに、アンテナ利得を最大とする最適の給電位相を補正位相として求めることができる。また、REV法はAPAA全素子に適用することにより、素子の故障診断ができる。

REV法の概要を図2に示す電界ベクトルの模式図を用いて説明する。REV法において初期位相設定時のAPAAの電界ベクトル $\vec{E}_0 = E_0 e^{j\phi_0}$ とする。これに対し n 番目の素子の位相を実装されている移相器で変化させると、位相回転時の合成電界ベクトル \vec{E} が得られる。合成電界ベクトル \vec{E} の相対電力は余弦関数状に変化するため、得られたデータを余弦関数にフィッティングさせ、その振幅と初期値から素子の相対電界ベクトルである $\vec{E}_n = E_n e^{j\phi_n}$ を求めることができる。また、余弦関数の最大値からアンテナ利得を最大とする補正位相を求めることができる。

ここで、素子の相対位相とは \vec{E}_0 と \vec{E}_n の位相差 $\phi_n - \phi_0$ を示す。補正位相とは、着目素子の電界ベクトルを回転させたときの電界ベクトルの最大合成電界の方向と着目素子の電界ベクトルの角度 (Δ_0) である。すなわち、着目素子の位相を補正位相分だけ回転すると着目素子の寄与による合成電界が最大となる。これをすべての素子に適用することによりアンテナ利得が

最大になる。

4 実施方法

4.1 REVデータの取得

WINDSの軌道上REVは図3に示す測定系で実施した。REVの実施はJAXA側の素子位相制御コマンドにより、WINDSの受信または送信APAAの位相を最小位相設定ステップである 11.25° ごとに 360° 変化させる。受信APAAのREVは送信APAAのビームを関東地方に向けて位相を固定して実施する。送信APAAのREVは受信APAAのビームを関東地方に向けて位相を固定して実施する。衛星の中継器は非再生中継モードである。

WINDS APAAのREVは送信APAAと受信APAAが各2系統あるため、合計で4回実施する。各アンテナ素子に実装されている移相器は5ビットの移相器であるため、1ビットあたりの位相の変化は 11.25° で、32回移相器を設定すると 360° 変化する。WINDS REVでは80msごとに1つの位相状態を保持する。さらにREV開始ポイントの識別のため、位相回転開始時に素子ごとに $0^\circ, 112.5^\circ, 236.25^\circ$ のトランジェント位相が付加される。WINDS REVではアンテナ1素子ごとに移相器を 0° から 11.25° ごとにプラス方向(進相方向)に 348.75° まで32ポイントの位相設定とトランジェント位相設定の3ポイントを含め、合計で35回位相を設定する。

REVの計測時間は128素子のREVで約6分間である。さらに、計測開始時刻は衛星側と地上側は同期していないため、計測はREV開始1分前からスタートして、REV終了後は1分延長して、合計8分間とした。さらに、衛星側の位相設定のタイミングと受信側の計測タイミングも一致しないため、1回の計測時間は80msの半周期の40msで行っている。これにより

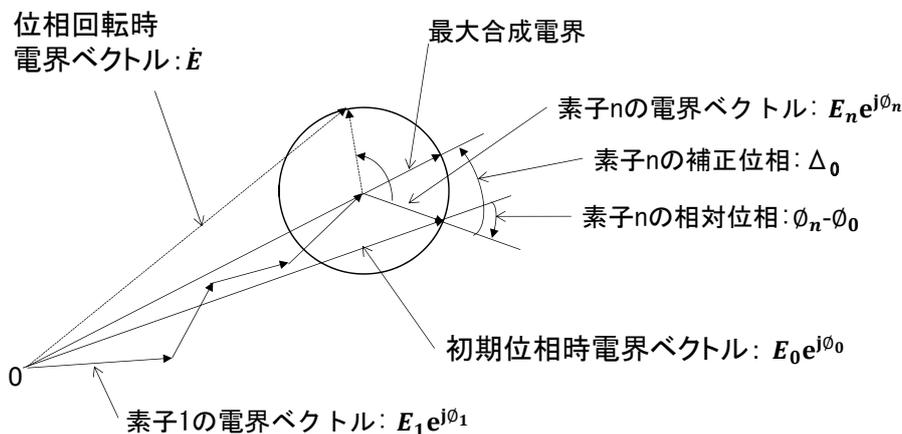


図2 REV時の電界ベクトル

40 ms のいずれかの区間が 80 ms の中に入るようにしており、80 ms 中に入る真データと 80 ms をまたぐ偽データは交互に現れるがデータ処理の段階で識別している。図 4 は REV データの計測タイミングの模式図を示す。

なお、APAA 側の位相設定タイミングと REV データ計測タイミングはそれぞれ GPS 時計に同期しているため、計測タイミングのずれは生じない。

4.2 REV データの処理方法

アンテナ素子の位相変化に対する受信電力の REV データは、リアルタイム・スペクトラム・アナライザの設定で 40 ms の区間で 1024 個のデータを取得する。これらのデータには大気揺らぎを含んだ信号成分と雑音が含まれているため、1024 個の電力平均を取ることにより大気ゆらぎの影響を軽減している。

平均化処理した REV データは真データと偽データの 2 組のデータセットが得られる。このうちの一方の偽データは、80 ms の切れ目を挟んだデータであるため捨てる必要がある。判定方法としては、切れ目を挟んで取得したトランジェント波形は切れ目を挟まない

トランジェント波形よりも同等もしくは小さくなるため、全体のトランジェント波形に着目し、小さいトランジェント波形の多いデータセットを偽のデータセットとして捨てる。図 5 は REV データの平均化処理結果の例であり、トランジェント位相の振幅の大きい真データセットである。図 6 は同じくトランジェント位相の振幅の小さい偽データセットの例である。

上記で選定した真データの各素子のデータの波形は大気のゆらぎなどでひずんでいるため、各素子のデータセットを余弦関数に最小二乗法を用いてフィッティングする。図 7 はフィッティング結果の一例を示す。フィッティングした余弦関数曲線から素子 n の相対振幅を最大とする補正位相 ($\Delta\theta$) を求め、さらに受信レベルの最大値と最小値の差を r として $\Gamma = (r - 1)/(r + 1)$ と定義すると、給電素子の相対振幅と相対位相は以下の式で与えられる [1]。

なお、すべての素子で補正位相をもとめて位相補正すると、REV 観測地点でのアンテナ利得が最大になり、APAA のアンテナビームが観測地点を向いたことになる。

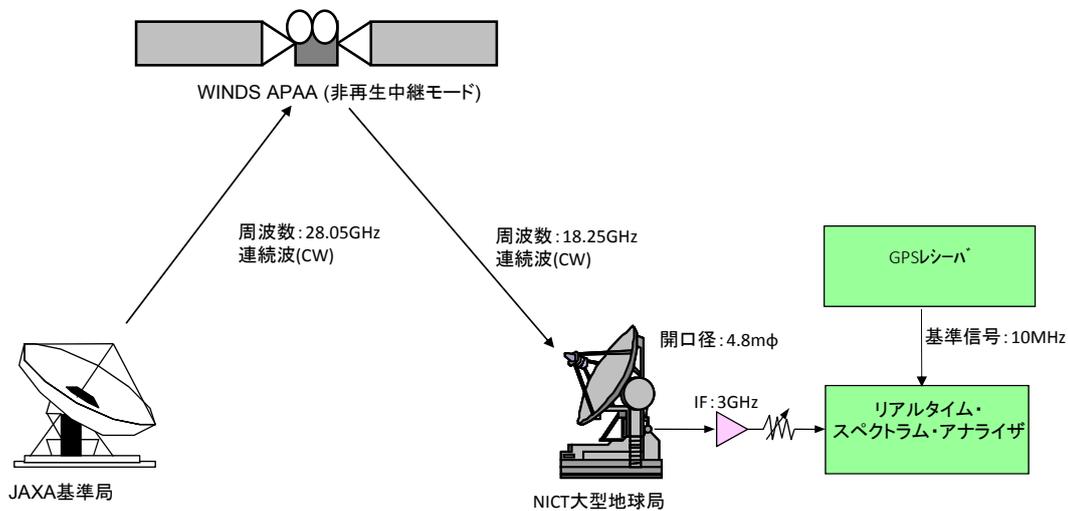


図 3 REV 信号測定系

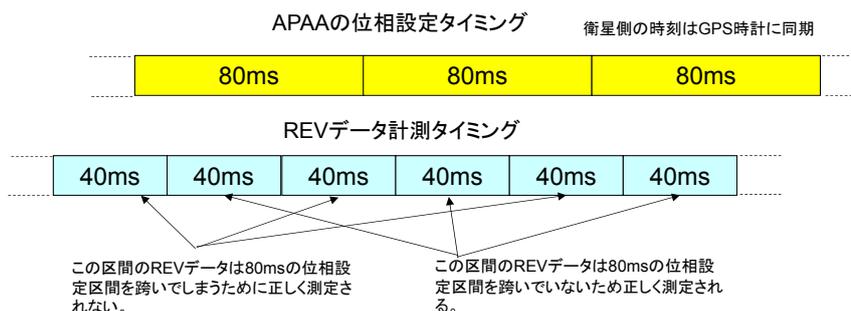


図 4 REV データ計測タイミング

$$\text{素子相対振幅} : \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos\Delta\theta + \Gamma^2}} \quad (1)$$

$$\text{素子相対位相} : \tan^{-1} \left(\frac{-\sin\Delta\theta}{\cos\Delta\theta + \Gamma} \right) \quad (2)$$

5 試験結果

5.1 受信波形

一例として、2017/2/6 に実施した REV データの受信結果を示す。本 REV データは、REV の更新周期である 80 ms ごとに 2048 点 (40 ms 区間で 1024 点) の受信レベルをリアルタイム・スペクトラム・アナライザで取得し、40 ms 区間ごとに平均化してグラフ化したものであり、結果を図 8 ~ 11 に示す。各図はそれぞれアンテナ RX-1、RX-2、TX-1 及び TX-2 である。図において受信レベルの最初の部分は、REV 無しの連続波、これに続く REV 区間が 128 素子分あり、最後に REV 無しの連続波で終了している。

REV 区間の波形は余弦関数をしており、これは各素子が正常に動作していることを示している。なお、余弦関数の波形は、REV 時の各素子の初期位相を故意にランダム化しているため同一ではない。これは、アンテナのピーク利得を下げて、REV 時の素子のレベル変化を相対的に大きくするためである。なお、受信系に対して送信系のレベル変化が小さいが、これは初期位相の設定に起因している。

5.2 振幅・位相の評価

REV 波形から算出した、各アンテナの放射素子の相対振幅と相対位相を図 12 ~ 19 に示す。各図はアンテナ RX-1、RX-2、TX-1 及び TX-2 の結果であり、2008/10/9 と 2017/2/6 の結果をそれぞれ系列 1 と系列 2 に示す。系列 1 と系列 2 の結果はほぼ一致していることから、WINDS APAA は約 8 年半の運用を経過しても各アンテナ素子は正常に機能していると判断できる。

WINDS APAA の REV は 2008/10/9 から 2017/2/6 までに合計 19 回実施した。REV 結果において、代表的なアンテナ RX-1 の素子番号 1 及びアンテナ TX-1 の素子番号 1 の相対振幅及び相対位相の評価結果の時系列を図 20 ~ 23 に示す。時系列結果によるとアンテナ RX-1 の素子番号 1 の振幅変動は 3.7 dBp-p、位相変動は 25.9° p-p 及びアンテナ TX-1 の素子番号 1 の振幅変動は 4.1 dBp-p、位相変動は 23.2° p-p、であった。この結果、振幅変動幅及び位相変動幅はやや大きい、変化は進行していないと判断できる。また、その他の素子についても同様の結果であった。

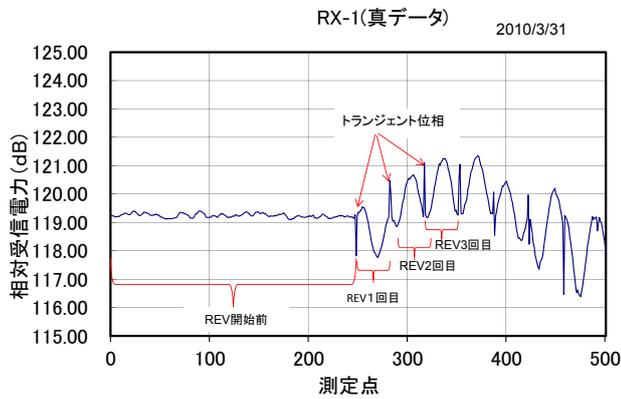


図5 データ処理結果例(真データセット)

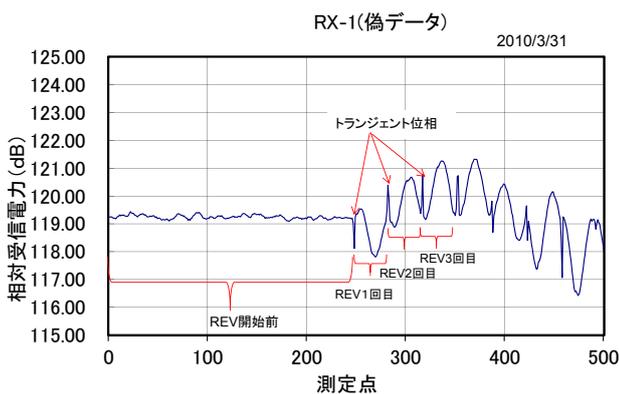


図6 データ処理結果例(偽データセット)

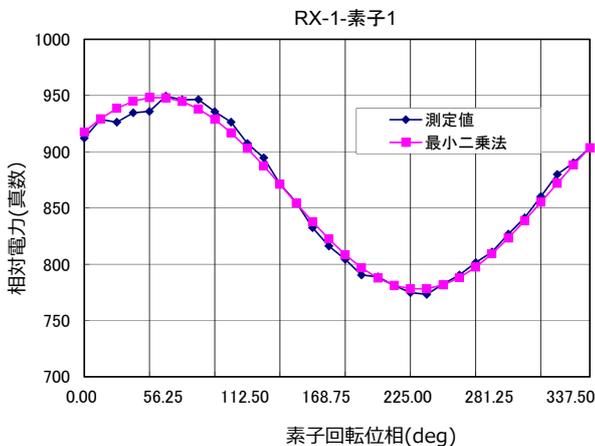


図7 データ処理結果例

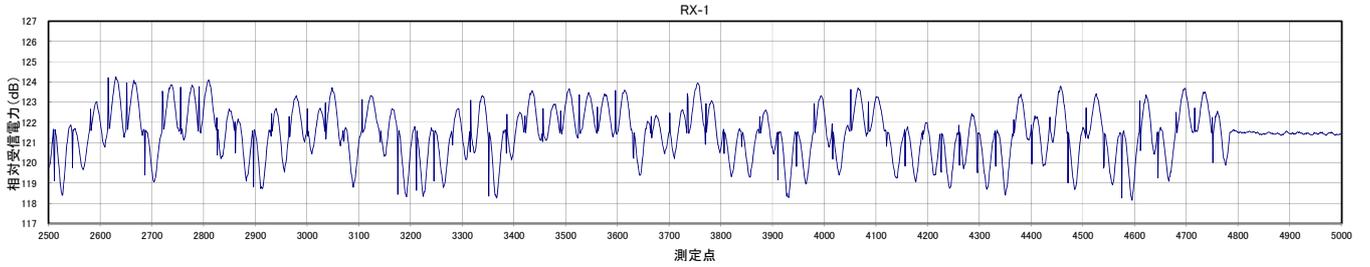
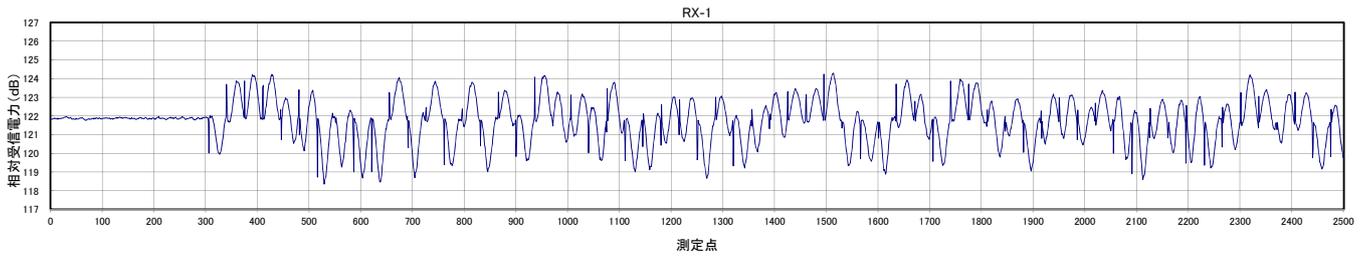


図 8 REV データ (RX-1)

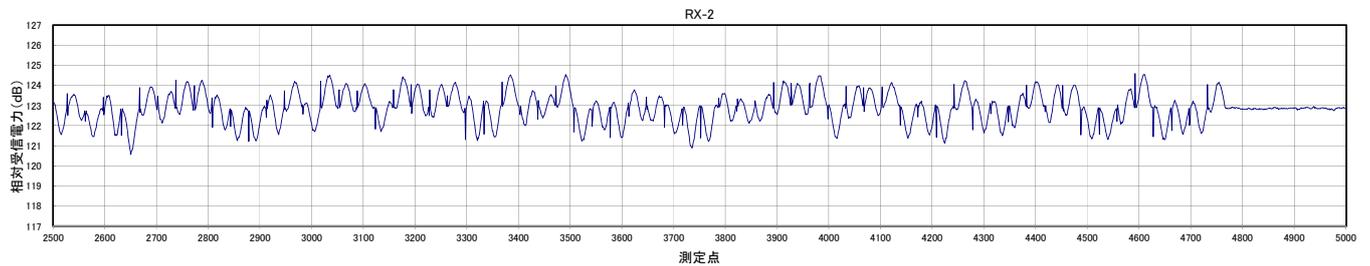
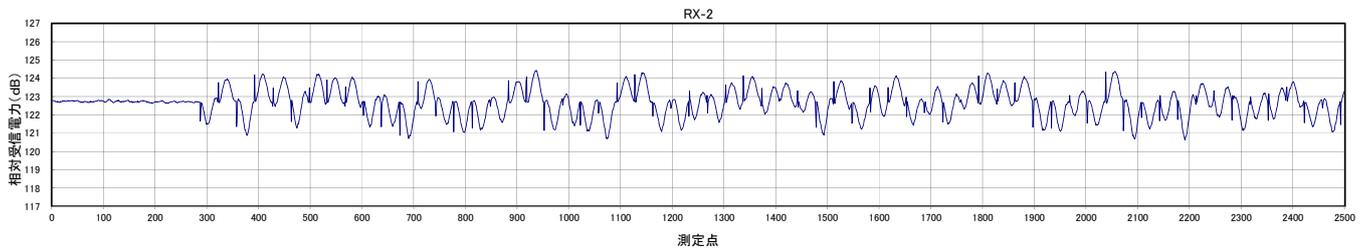


図 9 REV データ (RX-2)

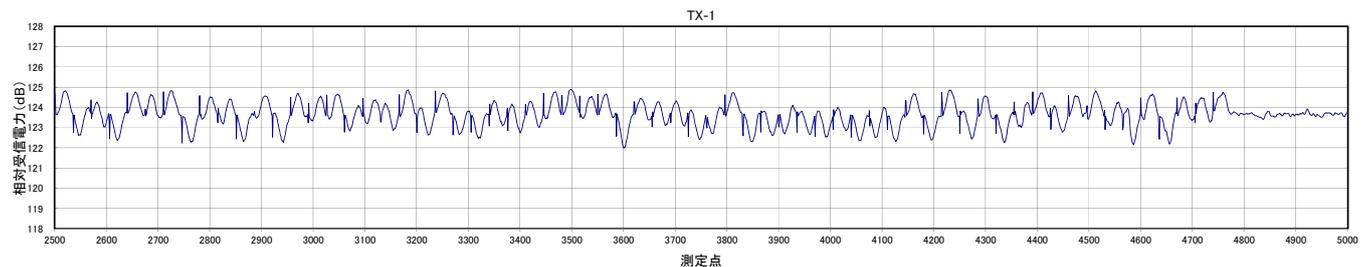
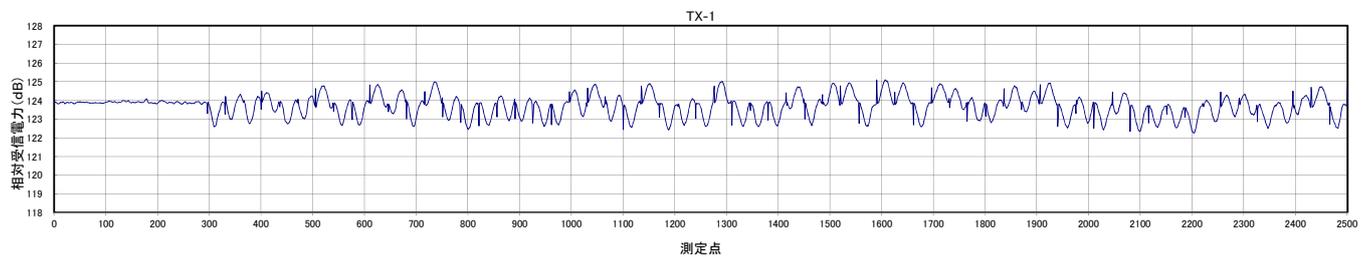


図 10 REV データ (TX-1)

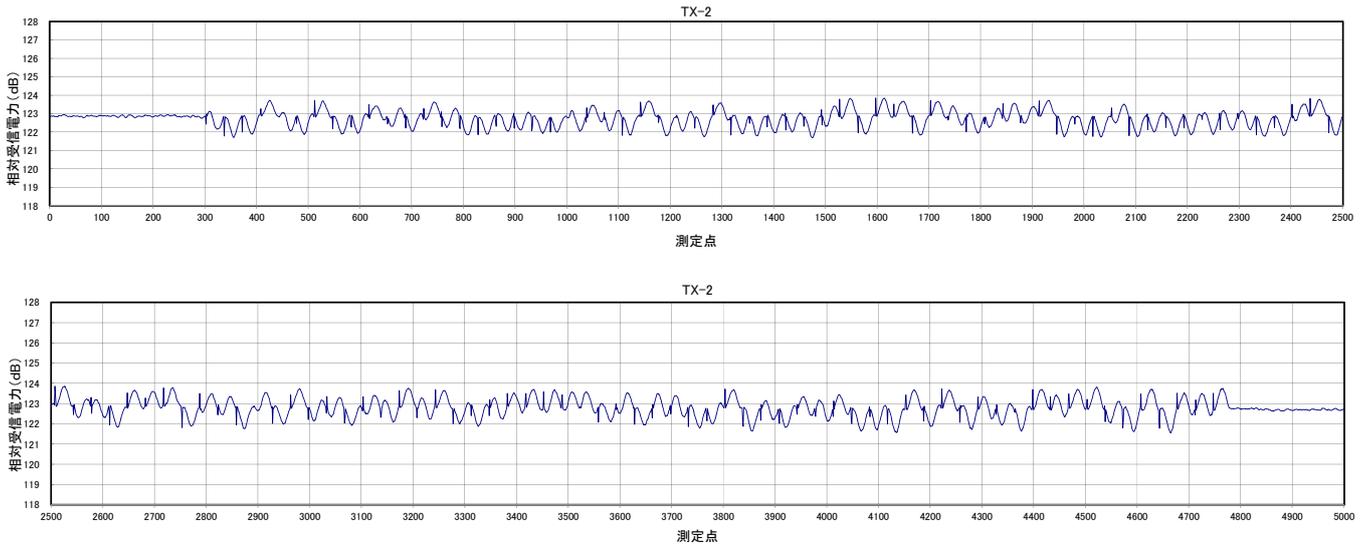


図 11 REV データ (TX-2)

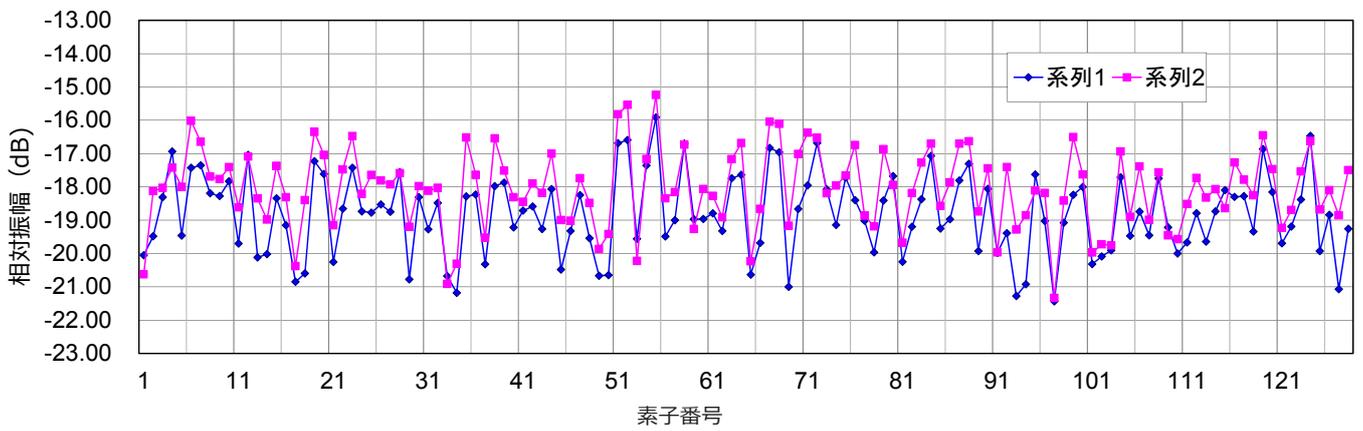


図 12 アンテナ RX-1 相対振幅

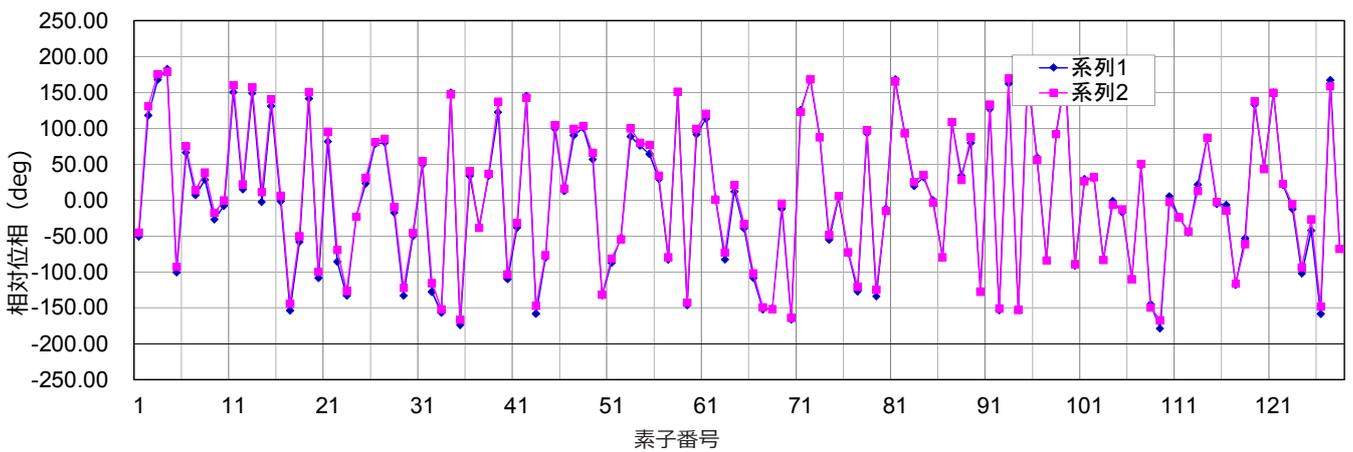


図 13 アンテナ RX-1 相対位相

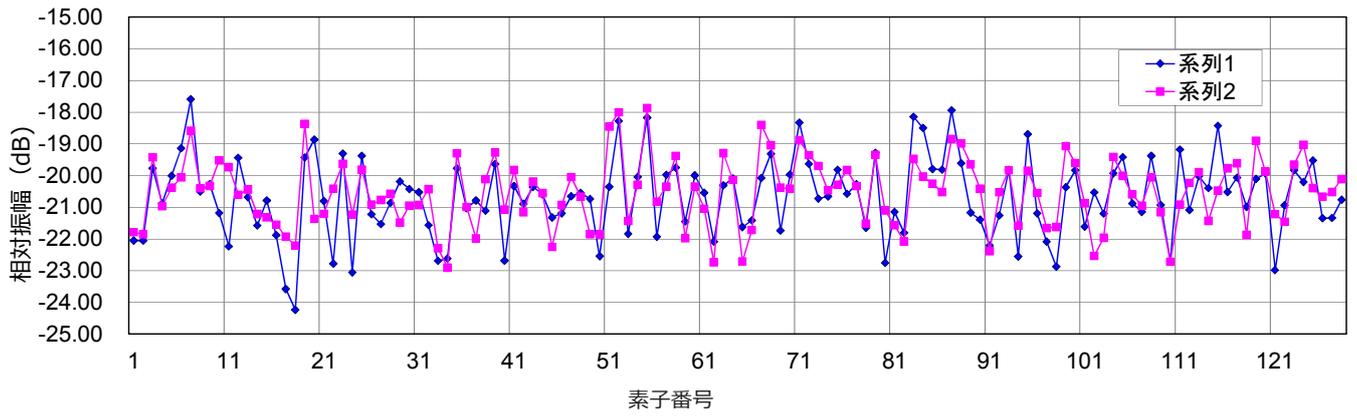


図 14 アンテナ RX-2 相対振幅

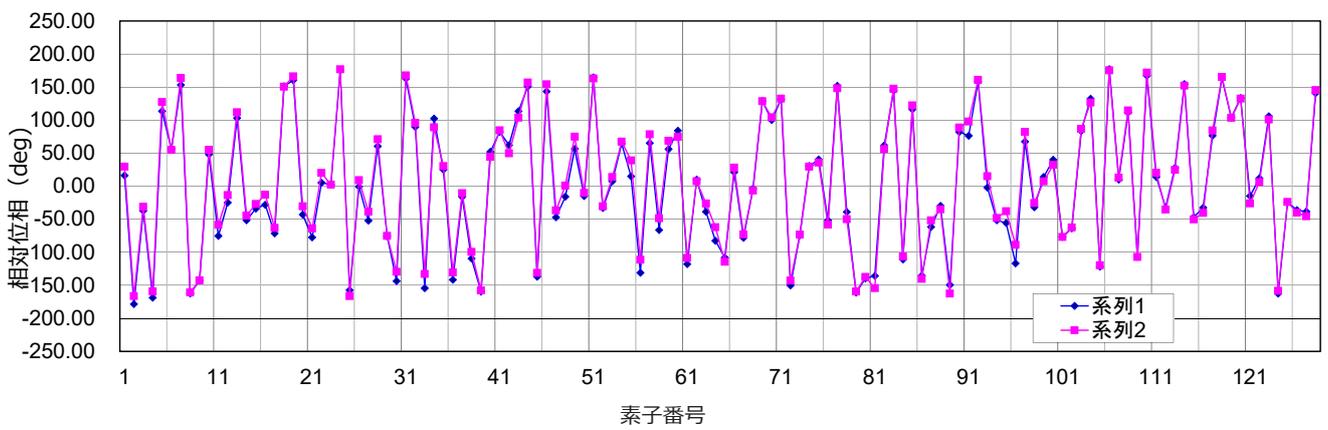


図 15 アンテナ RX-2 相対位相

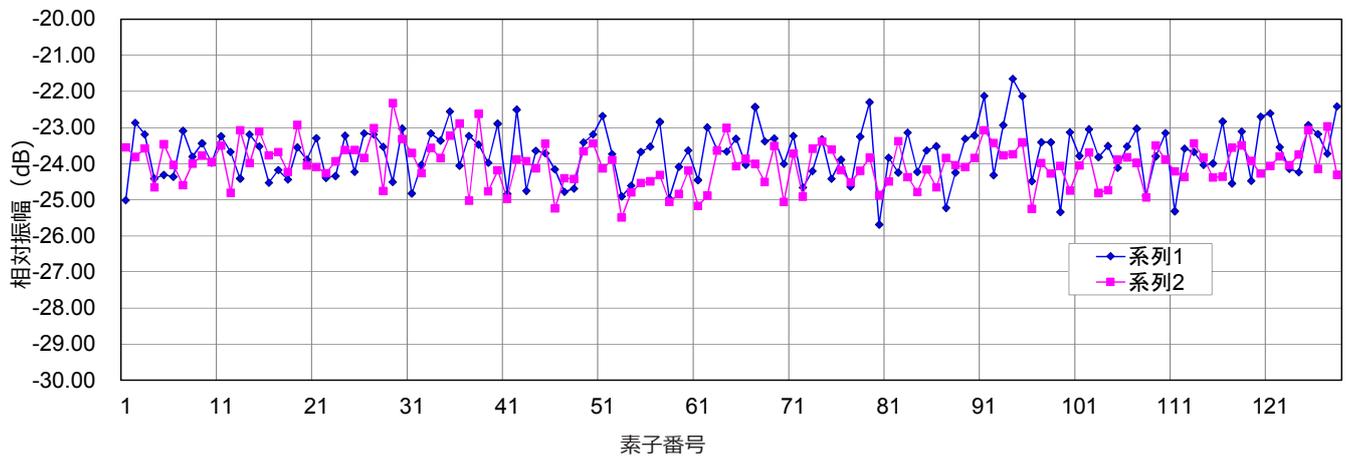


図 16 アンテナ TX-1 相対振幅

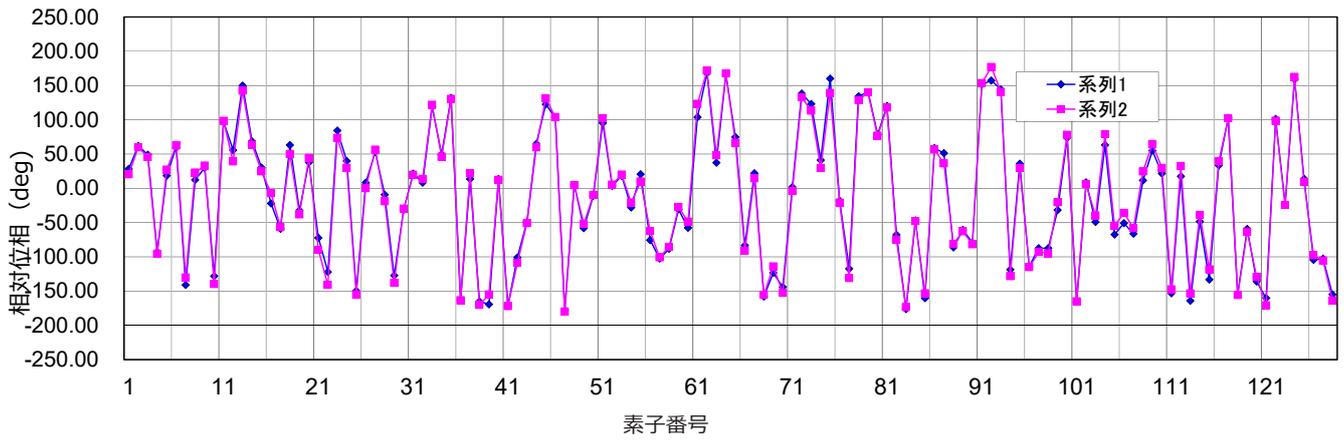


図 17 アンテナ TX-1 相对位相

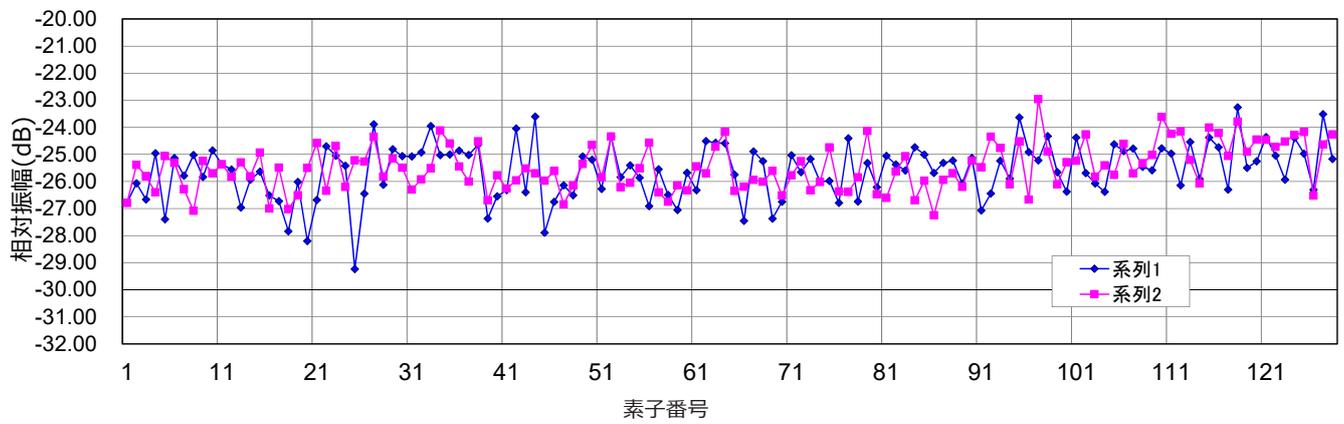


図 18 アンテナ TX-2 相对振幅

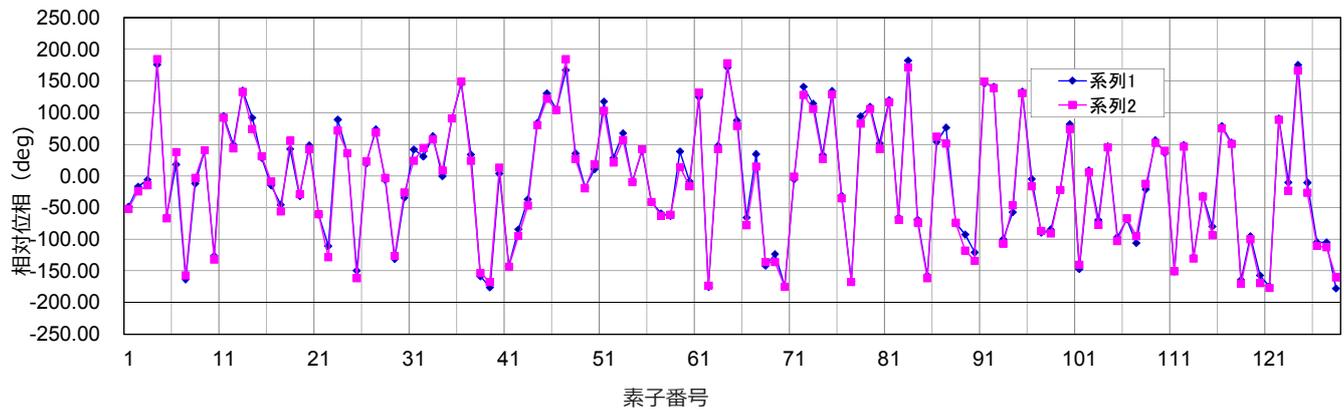


図 19 アンテナ TX-2 相对位相

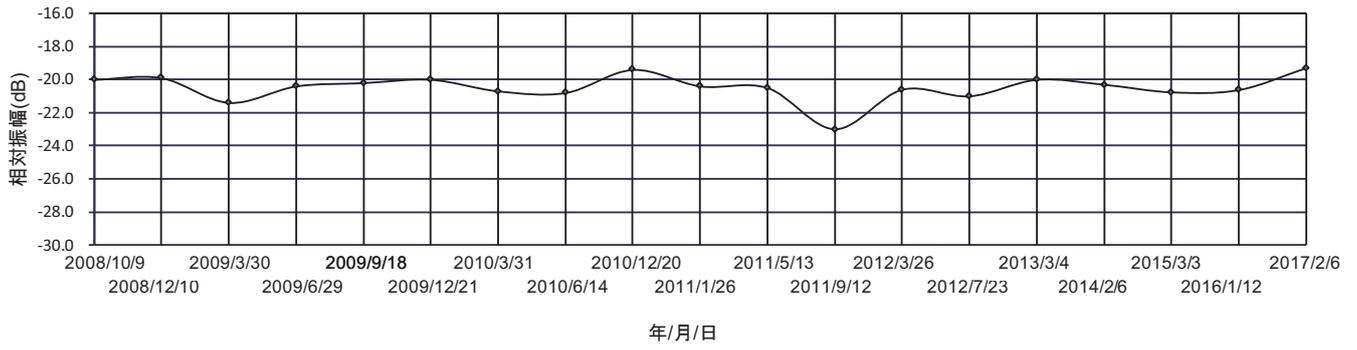


図 20 振幅トレンド (RX-1 素子番号 1)

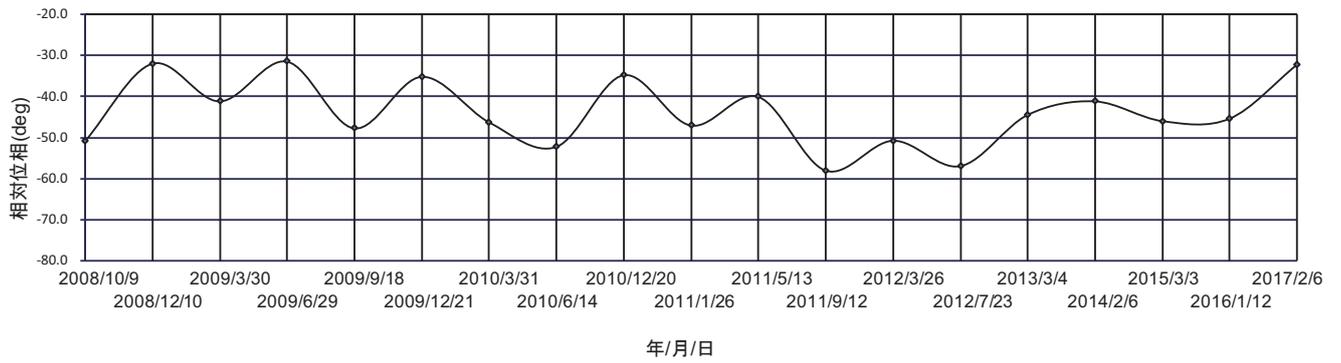


図 21 位相トレンド (RX-1 素子番号 1)

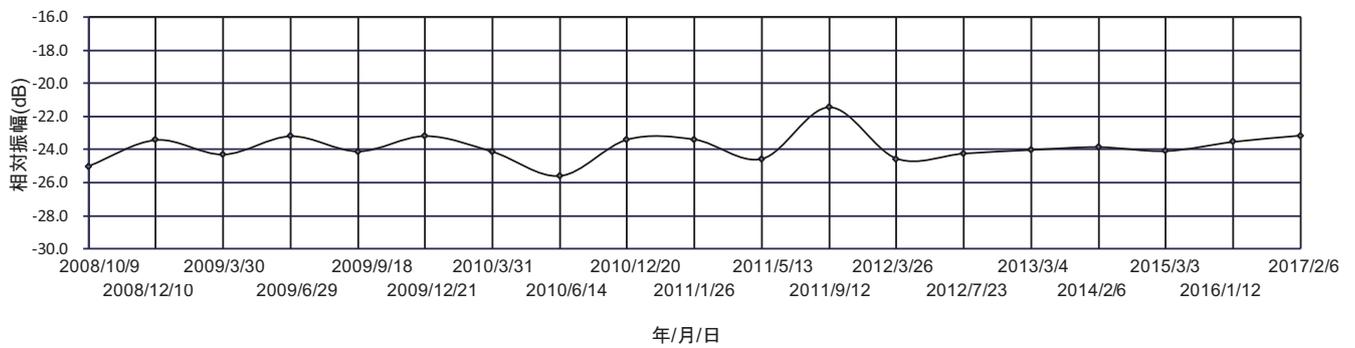


図 22 振幅トレンド (TX-1 素子番号 1)

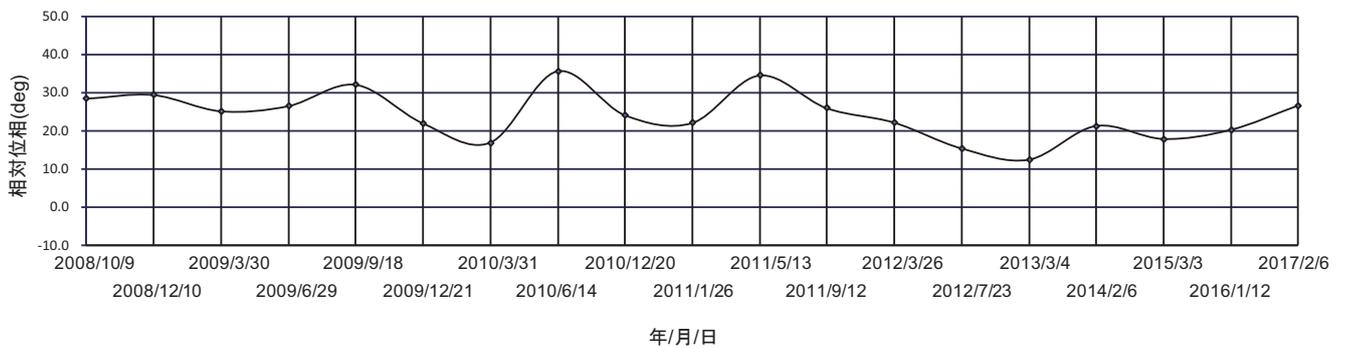


図 23 位相トレンド (TX-1 素子番号 1)

6 位相補正実験

REV法の目的の1つとして、設定位相の初期値を補正して、APAAの利得を最大化することができる。この実験を2012/7/23(RX-1実施)及び2012/9/6(TX-2実施)にJAXA筑波とNICT鹿島間で実施した。試験の評価方法はビーム設定のための移相器の位相を鹿島方向にビームを指向させたときの方向余弦から求める方法(通常のビーム指向方向決定方法)とREVの初期位相に補正位相を加えた場合の受信レベルを比較した。測定は位相を固定した状態で1分間連続波の受信レベルを40msごとに取得し、平均化処理を行った結果をグラフ化した。

図24、25はRX-1の鹿島局の受信結果であり、方向余弦を用いてビームを設定した場合とREVの補正位相でビームを設定した場合をそれぞれ示す。この結果、前者の方が0.13dBレベルが高い。これはRXビームの場合、送信地球局が筑波であるため、補正を行うとAPAAのRXビームは筑波方向の利得が最大になるように補正されるため、鹿島方向の利得が低下することで説明できる。このため、APAAの受信アンテナの位相補正は鹿島から試験信号送信する必要がある。

一方、図26、27はTX-2の鹿島局の受信結果であり、方向余弦を用いてビームを設定した場合とREVの補正位相でビームを設定した場合をそれぞれ示す。この結果、鹿島方向のレベルが方向余弦でビーム方向を設定した場合よりも0.23dBレベルが高く、利得向上の効果がわずかながら認められた。これはTXビームの場合、受信地球局が鹿島であるため、補正により鹿島方向の利得が向上することで説明できる。

7 むすび

WINDS APAAの健全性評価としてREV法を適用とすると、軌道上REVの固有の課題がある。この課題は、衛星上のREV実施時の素子位相の回転タイミングと地球局の計測タイミングが同期していないこと、及び大気ゆらぎにより受信信号の変動が大きいことである。前者は1つの位相設定の計測期間に同じ測定を2回行うこと、後者は得られた1回の測定で得られた1024個のデータの平均化処理と最小二乗法によるスムージング処理により課題を解決した。

本REV試験は2008/10/9から2017/2/6までの間で合計19回実施してトレンド評価を行った結果、全ての素子の振幅と位相は初期の値をほぼ再現しており、WINDS APAAの健全性が確認された。また、APAAの位相補正実験の結果、わずかながら利得の改善効果が認められた。

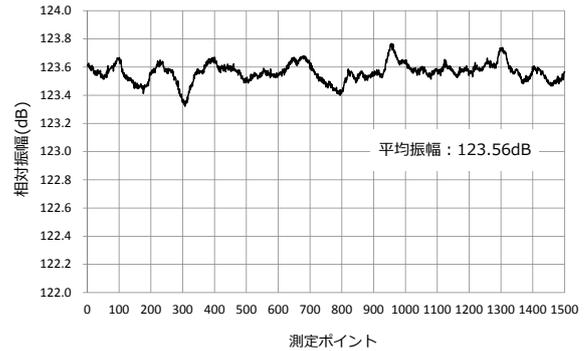


図 24 方向余弦によるビーム設定 (RX-1)

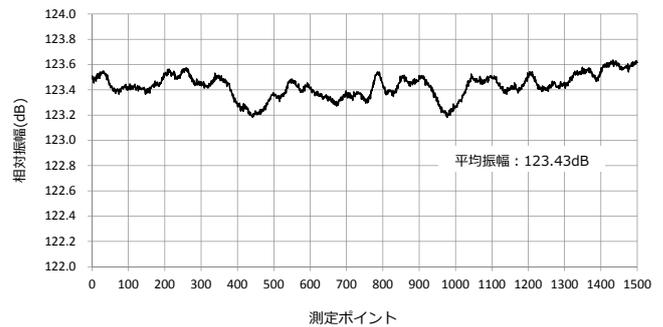


図 25 位相補正によるビーム設定 (RX-1)

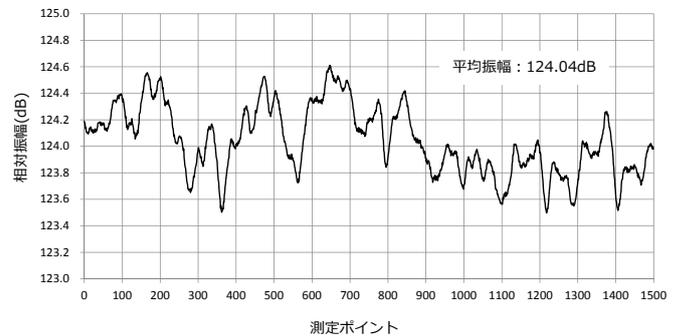


図 26 方向余弦によるビーム設定 (TX-2)

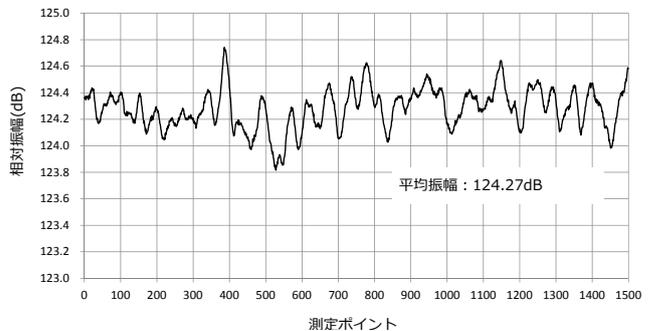


図 27 位相補正によるビーム設定 (TX-2)

【参考文献】

- 1 真野、片木 「フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法」電子通信学会論文誌 1982/5 vol.J65-B no.5
- 2 谷島、堀内、中尾、赤石、大川、高橋 「2局同時測定によるきずな (WINDS) 搭載アクティブフェイズドアレーアンテナの健全性確認実験」信学技報 vol.111 no.7 2011/4/14 SANE2011-7.



赤石 明 (あかいし あきら)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
技術員(当時)
衛星通信システム



大川 貢 (おおかわ みつぐ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員
博士(工学)
衛星通信システム



高橋 卓 (たかはし たかし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
副室長
衛星通信