

# 三菱電機技報

7

2024  
Vol.98 No.7

安心・安全な社会の実現に向けて  
～我が国の安全保障への貢献～

## No.7

## 特集

安心・安全な社会の実現に向けて ～我が国の安全保障への貢献～

Realizing a Secure and Safe Society —Contribution to Featured Security—

## 巻頭言

安心・安全な社会の実現に向けて

～我が国の安全保障への貢献～…………… 1-01  
洗井昌彦Realizing a Secure and Safe Society —Contribution to Featured Security—  
Masahiko Arai

## 特集論文

高速高機動目標の追尾技術…………… 2-01  
亀田洋志・舟木信貴・増田和也・前田咲穂・伊藤聡宏Radar Tracking for Hypersonic Glide Vehicle Using Multiple Model  
Hiroshi Kameda, Nobutaka Funaki, Kazuya Masuda, Sakiho Maeda, Toshihiro Itoペネトレーションテスト自動化に向けた  
サイバー攻撃手段の定量的評価法…………… 3-01  
酒井康行・木下洋輔・木藤圭亮・河内清人・加藤 駿Cyber Attack Technique Scoring Method toward Automatic Penetration Test  
Yasuyuki Sakai, Yosuke Kinoshita, Keisuke Kito, Kiyoto Kawauchi, Shun Kato高出力レーザーシステムの実現に向けて…………… 4-01  
鈴木れん・落水秀晃・秋山智浩・原口英介For Realization of High Energy Laser  
Ren Suzuki, Hideaki Ochimizu, Tomohiro Akiyama, Eisuke Haraguchi表面実装型サーキュレーター…………… 5-01  
柴田博信・杉山勇太・垂井幸宣Surface-mount Type Circulator  
Hironobu Shibata, Yuta Sugiyama, Yukinobu Tarui高周波送受信モジュール向け  
小型・高放熱デバイス技術…………… 6-01  
稲垣隆二・垂井幸宣・木村実人Small Size and High Heat Dissipation Device Technology for High Frequency Transmit/  
Receive Module  
Ryuji Inagaki, Yukinobu Tarui, Makoto Kimura

## 一般論文

美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステム…………… 7-01  
吉田武司Misasa Deep Space Station Antenna Subsystem  
Takeshi Yoshida

執筆者の所属は執筆時のものです。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネス・プラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集ではインフラ領域の“安心・安全な社会の実現に向けて ～我が国の安全保障への貢献～”をご紹介します。

# 巻頭言

## 安心・安全な社会の実現に向けて ～我が国の安全保障への貢献～

Realizing a Secure and Safe Society  
— Contribution to Featured Security —



洗井昌彦 Masahiko Arai

執行役員 防衛・宇宙システム事業本部 副事業本部長  
Corporate Executive Group Senior Vice President, Defense & Space Systems Group

我が国周辺では、核・ミサイル戦力を含めた軍事力の拡大が急速に進展し、それを背景とした力による一方的な圧力が常態化しつつある中、我が国が位置するインド太平洋地域は日に日に緊張感を増しており予断を許さない状況です。

このような状況下、政府は2022年12月に戦略3文書（“国家安全保障戦略、国家防衛戦略、防衛力整備計画”）を決定しました。2013年に策定後、初めての改訂になる“国家安全保障戦略”は、外交、防衛に加えて、経済安全保障、技術、サイバー、情報等の国家安全保障戦略に関連する分野の政策に戦略的指針を与える最上位の政策文書です。また、防衛目標の設定、その達成アプローチの手段を示す“国家防衛戦略”は、これまでの“防衛計画の大綱”に代わり、新たに策定されました。そして、“中期防衛力整備計画”に代わり、保有防衛力の水準及び中長期的な整備計画を定めた“防衛力整備計画”が新たに策定されました。

さらに、2023年6月に改訂された“宇宙基本計画”でも、宇宙科学・探査に加えて、“宇宙安全保障の確保”が宇宙政策の目標として掲げられており、併せて、2023年6月、政府の宇宙開発戦略本部で“宇宙安全保障構想”が策定されました。このように、宇宙空間の利用に関しても安全保障は不可欠な状況になっています。

三菱電機は、半世紀以上にわたって防衛装備品の開発等、日本の安全保障を支えてきました。2023年4月1日付けで、事業本部名称も“防衛・宇宙システム事業本部”に改称し、日々変化する安全保障環境に対応するため、各種センサー、電子戦(EW)、ミサイルシステム及び宇宙開発等の研究開発に積極的に取り組んで、最先端のソリューションを提供し続けています。

また、政府と連携し、“防衛装備移転三原則”(2014年)に基づいて、同盟国及び同志国との連携による抑止力の更なる強化のための取組みとして、各国政府・企業との共同開発、装備品の移転、サプライチェーンへの参画を図っています。2020年には、日本企業として初めて、海外ユーザーへの防衛装備品の移転に成功しました。さらに、日英伊3か国の関係各社と連携して、次期戦闘機搭載用ミッションアビオニクスシステムの共同開発、豪州政府とは今までにない新たな共同開発も進めています。

そこで、今号では、防衛システムに関する特集号として、当社のレーダー技術、サイバーセキュリティー、基盤技術等について掲載します。

当社は、これまでにレーダー・電子戦など数多くの装備品を開発・納入するなど、防衛エレクトロニクス分野のトップメーカーとして、安心・安全を支えるインフラ分野で社会に貢献しています。

レーダー技術は、今までにも搜索／探知／追尾技術やセンシング技術の開発があり、その技術は数多くの防衛装備品にも適用されていますが、今回は追尾技術開発の最新状況について紹介します。また、サイバーセキュリティー技術に関するペネトレーションテストのほか、防衛装備品開発に向けて、ゲームチェンジャー等の開発に寄与するコヒーレントビーム結合技術、各種レーダー等の開発に寄与する高周波モジュールの要素技術について紹介します。

政府の国家安全保障戦略では、“我が国の防衛生産・技術基盤は、いわば防衛力そのもの”と位置付けられており、当社は、今後も安全保障を担う企業として、保有技術を結集して防衛装備品の開発・生産を行い、私たちと家族が暮らす、我が国及びアジア太平洋地域の安心・安全な社会の実現に貢献していきます。

## 高速高機動目標の追尾技術

Radar Tracking for Hypersonic Glide Vehicle Using Multiple Model

\*情報技術総合研究所(工博)

†同研究所

‡電子通信システム製作所

## 要 旨

近年、極超音速滑空弾(HGV: Hypersonic Glide Vehicle)が脅威になっている。極超音速滑空弾の複雑な軌道は、入力変数である迎角とバンク角によって生成されるものであるが、レーダー装置ではこれらの変数は観測できない。その結果、目標に対する機動予測値が外れて追尾を著しく困難にする。これに対して、目標の機動変化に対応する加速度仮説型多重運動モデルを適用したレーダー追尾技術によって、その課題を軽減することが可能である。この技術によって従来手法に比べて追尾性能が向上することが計算機シミュレーションで確認できる。

## 1. ま え が き

近年、極超音速滑空弾が新たな脅威として注目されている。この極超音速滑空弾は、極超音速で弾道飛しょう体とは異なる低い軌道で侵入することから、レーダー覆域内に捕捉可能になる距離が短い。その結果、レーダーで継続観測できる時間が短い、という脅威を持つ。また、変則的な動きをすることから、追尾フィルター予測値に基づくレーダーの受信ビーム内に目標を捕捉することが極めて困難になる。これらの理由から、極超音速滑空弾の継続的な追尾を実現する必要がある。本稿では、特に後者の問題について扱う。

極超音速滑空弾の追尾技術としては、機動の非線形性を考慮した追尾フィルターが考案されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。極超音速滑空弾の追尾では非線形性も課題ではあるが、複雑な軌道の入力変数である迎角とバンク角がレーダー側では観測できないことが追尾を困難にしている。この問題を軽減するため、目標の機動変化に対応する加速度仮説型多重運動モデルを検討した。多重運動モデルとしては複数の追尾フィルターで構成するIMM(Interacting Multiple Model)が広く研究されているが<sup>(4)</sup>、未知の入力変数によって生じる加速度を仮説化して多重化するものである<sup>(5)</sup>。この構成によって、目標の機動への追従性を向上させる。

本稿では、2章で極超音速滑空弾の追尾を実現する追尾フィルターの構成について述べて、3章で計算機シミュレーションによる性能予測を行う。最後に4章でまとめと今後の課題を示す。

## 2. 極超音速滑空弾向け追尾フィルターの構成

この章では、極超音速滑空弾向け追尾フィルターの構成を示す。

## 2.1 モデリング

目標の運動モデルを式(1)~(6)のように表す。なお、運動モデルでの重力加速度は一定値 $g$ と仮定する。

$$\dot{x}_k = V_k \cos \gamma_k \sin \eta_k \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{y}_k = V_k \cos \gamma_k \cos \eta_k \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{z}_k = V_k \sin \gamma_k \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{V}_k = -D_k - g \sin \gamma_k \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{\gamma}_k = \frac{L_k \cos v_k - g \cos \gamma_k}{V_k} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{\eta}_k = \frac{L_k \sin v_k}{V_k \cos \gamma_k} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$ ,  $V_k$ ,  $\gamma_k$ ,  $\eta_k$ はそれぞれ、目標位置のx座標、y座標、z座標、速度、飛行経路角、方位角を表している。また、 $D_k$ ,  $L_k$ はそれぞれ、抗力、揚力を表すもので、式(7), (8)によって表現される。 $v_k$ は機体バンク角である。

$$D_k = \frac{1}{2} \rho V_k^2 C_D S / m \quad \cdots \cdots (7)$$

$$L_k = \frac{1}{2} \rho V_k^2 C_L S / m \quad \cdots \cdots (8)$$

式(7), (8)で,  $m$ ,  $S$ ,  $\rho$  はそれぞれ, 目標の質量, 基準面積, 空気密度である。また,  $C_D$ ,  $C_L$  は, 抗力, 揚力係数である。例えば, 迎角  $\vartheta$  と音速を単位とする機体速度  $Ma$  で近似したもので表す<sup>(6)</sup>。

$$C_D = C_{D0} \vartheta^2 + C_{D1} \exp(-C_{D2} Ma) + C_{D3} \quad \cdots \cdots (9)$$

$$C_L = C_{L0} \vartheta + C_{L1} \exp(-C_{L2} Ma) + C_{L3} \quad \cdots \cdots (10)$$

レーダー装置では, 機体に依存する質量  $m$ , 基準面積  $S$ , 機動を発生させる入力変数の迎角  $\vartheta$ , バンク角  $v_k$  は観測できない。従来, 式(1)から(6)に関わる状態変数, 式(7), (8)での機体に関わる変数をまとめて状態ベクトル  $y_k$  として定義するが, 入力変数の迎角  $\vartheta$ , バンク角  $v_k$  の変化に対応できない可能性が高い。本稿では, この課題を加味し, 目標の運動モデルを式(11)のように運動仮説型のモデルに拡張する。 $f(\cdot)$  は式(1)~(6)を離散化形式で表現した関数である。

$$y_{k+1} = y_k + f(y_k + \Gamma_{k-1} u_{k-1}) \Delta t \quad \cdots \cdots (11)$$

右辺第2項()内の  $u_k$  はサンプリング時刻  $t_k$  で  $N$  個の運動モデル(運動仮説)を構成する定数空力ベクトルであり, 式(12)で定義する。 $\Gamma_k$  はサンプリング時刻  $t_k$  での定数空力ベクトルの変換行列で, 式(13)で表される。 $I_{n \times n}$  は  $n$  次の単位行列,  $0_{n \times m}$  は  $n$  行  $m$  列のゼロ行列を表す。

$$u_k = a_1 \text{ 又は } u_k = a_2 \text{ 又は } \cdots \text{ 又は } u_k = a_n \quad \cdots (12)$$

$$\Gamma_{k-1} = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad \cdots \cdots (13)$$

北基準直交座標系での追尾対象である目標の観測値ベクトルを  $z_k$  とし, 北基準直交座標系の位置で定義する。

すなわち,

$$z_k = [x_k \ y_k \ z_k]^T \quad \cdots \cdots (14)$$

である。このとき, 目標の観測モデルを次のように定義する。

$$z_k = H x_k + v_k \quad \cdots \cdots (15)$$

$H$  は観測行列であり,

$$H = [I_{3 \times 3}, 0_{3 \times 6}] \quad \cdots \cdots (16)$$

になる。また, 式(15)の右辺第2項は観測雑音ベクトルであり,

$$E[v_k] = 0 \quad \cdots \cdots (17)$$

$$E[v_k v_k^T] = R_k \quad \cdots \cdots (18)$$

の性質を持つものとする。

## 2.2 追尾フィルターの構成

今回検討した追尾フィルターの構成を図1に示す。2.1節で述べた運動仮説の考え方としては, 図2のように加減速, 左右回頭, 上昇下降の定数空力ベクトルを定義して, 式(11), (12)の運動モデルに与える。

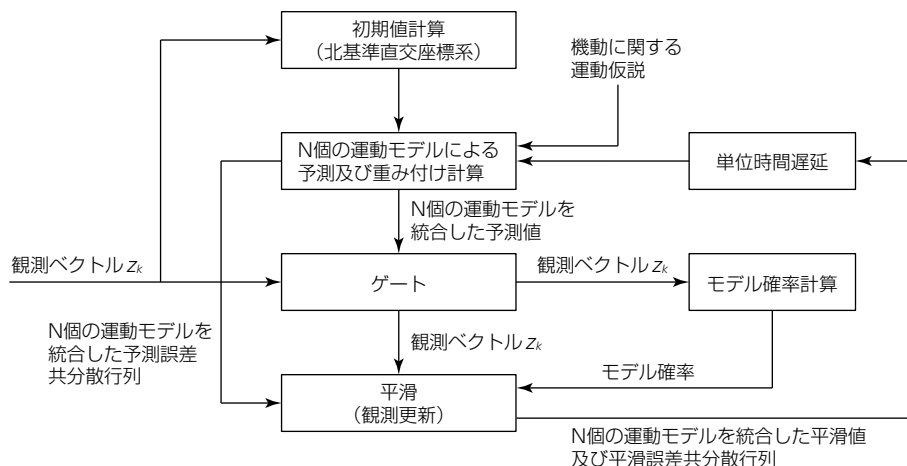


図1-今回検討した手法での追尾フィルターの構成

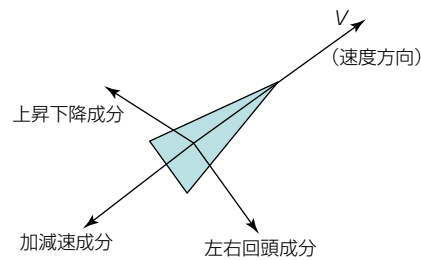


図2-運動仮説の考え方

3. シミュレーションによる性能評価

計算機シミュレーションによって今回検討した手法の有効性を評価する。

3.1 目標の軌道

評価用軌道を図3に示す2種類とする。これらは参考文献(6)の設計条件を考慮した。評価用軌道での初期条件として、高度120km、初速3,000m/s、飛行経路角を-0.1rad、方位角を0degに設定する。その他の機体パラメーターを表1に示す。

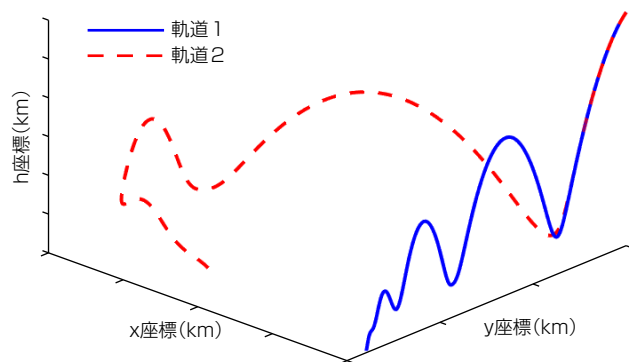


図3-シミュレーション評価用軌道

表1-機体パラメーターの設定値

番号	項目	設定値
1	機体質量 $m$	907.2(kg)
2	基準面積 $S$	0.4839(m/s <sup>2</sup> )
3	抗力係数( $C_{D0}$ , $C_{D1}$ , $C_{D2}$ , $C_{D3}$ )	(0.0513, 0.2945, 0.1028, 0.2317)
4	揚力係数( $C_{L0}$ , $C_{L1}$ , $C_{L2}$ , $C_{L3}$ )	(0.000724, 0.406, 0.323, 0.024)

3.2 レーダー及び追尾フィルター

レーダーのサンプリング間隔を1sとし、観測雑音として距離で30m、角度(仰角、方位角)で6mradの標準偏差を持つ白色ガウス雑音を与える。レーダーの探知確率を0.9とする。追尾フィルターのパラメーターの設定値は以下の二つである。

- (1) 空気力考慮(揚力、抗力を北基準直交座標系に変換した9次元モデル)<sup>(1)</sup>
- (2) 今回検討した加速度仮説型多重運動モデル

3.3 評価結果

3.2節の評価条件に従い100回のモンテカルロシミュレーションを行った。追尾維持成功率(追尾の継続に成功した試行回数を百分率で定義したもの)を比較した結果を図4に、追尾に成功した試行回による位置誤差のRMS(Root Mean Square)値を比較した結果を図5に示す。どちらも今回検討した方式の有効性が確認できる。



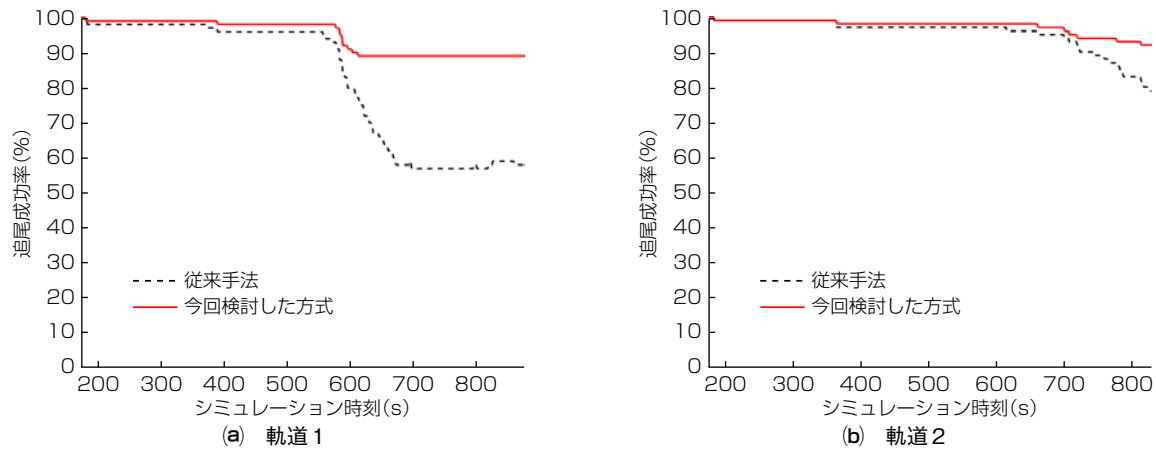


図4-追尾維持成功率の比較結果

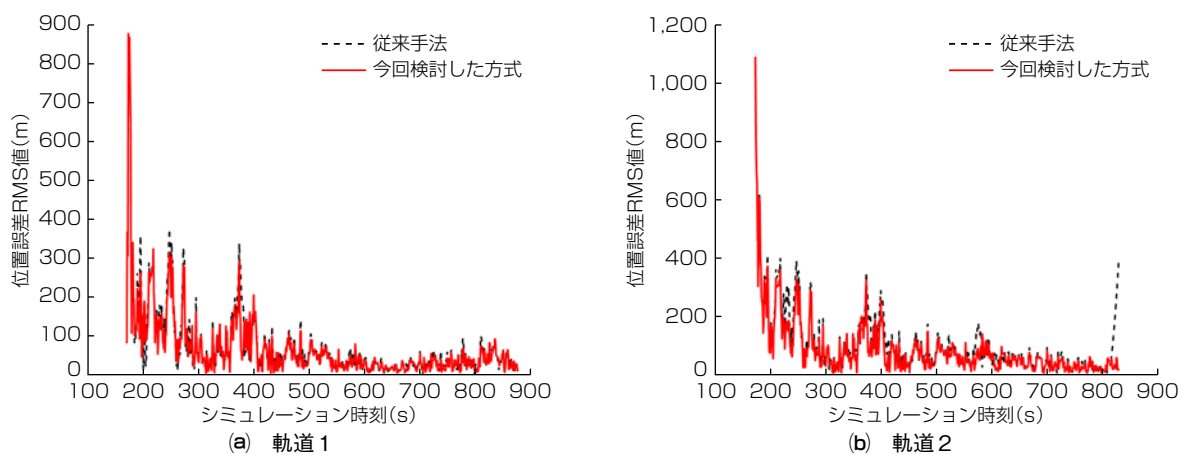


図5-位置誤差RMS値の比較結果

## 4. む す び

極超音速滑空弾を継続追尾可能な追尾フィルターについて検討した。極超音速滑空弾の軌道シナリオに対して今回検討した方式の有効性を示した。引き続き、方式改良を進めるとともに、異なる機動シナリオに対する感度分析、さらに追尾開始性能の向上策についても検討を進める。

## 参 考 文 献

- (1) Huang, J., et al. : Radar Tracking for Hypersonic Glide Vehicle Based on Aerodynamic Model, 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (2017)
- (2) Hu, G., et al. : Model Predictive Based Unscented Kalman Filter for Hypersonic Vehicle Navigation With INS/GNSS Integration, IEEE Access Vol.8, 4814~4823 (2020)
- (3) Zeng, J., et al. : Position and Tracking Performance Analysis of Hypersonic Vehicle Based on Cubature Kalman Filter, International Conference on Transportation & Logistics, Information & Communication, Smart City (TLICSC 2018) (2018)
- (4) Li, S., et al. : Multiple Model Tracking for Hypersonic Gliding Vehicles with Aerodynamic Modeling and Analysis, IEEE Access Vol.7 (2019)
- (5) 小菅義夫, ほか: 複数運動モデルによる旋回目標追尾法の比較, 電子情報通信学会論文誌B, **82**, No.1, 132~141 (1999)
- (6) Feng, S., et al. : Analysis of Near Space Hypersonic Glide Vehicle Trajectory Characteristics and Defense Difficulties, 5th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (2016)

# ペネトレーションテスト自動化に向けたサイバー攻撃手段の定量的評価法

Cyber Attack Technique Scoring Method toward Automatic Penetration Test

酒井康行\*  
Yasuyuki Sakai  
木下洋輔†  
Yosuke Kinoshita  
木藤圭亮‡  
Keisuke Kito

河内清人‡  
Kiyoto Kawauchi  
加藤 駿‡  
Shun Kato

\*電子通信システム製作所(博士(工学))  
†同製作所  
‡情報技術総合研究所

## 要 旨

ペネトレーションテスト(以下“ペンテスト”という。)は、実際にサイバー攻撃を行うことでシステムの脆弱(ぜいじゃく)性を発見する、サイバー攻撃対策に有効な手法である。ペネトレーションテスター(以下“ペンテスター”という。)が適切な攻撃手段を選択するとき、攻撃手段が成立するか、発覚するか、攻撃で得られる効果の大きさ、の三点を基に判断していると仮定し、攻撃手段をスコア化するCATS(Cyber Attack Techniques Scoring)法を開発した。CATS法によって適切な攻撃手段の選択を自動化でき、ペンテストが自動実行可能となる。ペンテスト自動実行によって、システムの脆弱性発見とサイバー攻撃対策を迅速に行えるようになる。

## 1. はじめに

サイバー攻撃対策にはシステムの脆弱性を積極的に発見し修正することが重要である。脆弱性発見手法として、実際にサイバー攻撃を試みるペンテストがある。NIST SP800-115<sup>(1)</sup>では、ペンテストを“アプリケーション、システム、ネットワークのセキュリティー機能を回避する方法を特定するために評価者が実際の攻撃を模擬して行うセキュリティーテスト”と定義する。ペンテストでは“適切な攻撃手段”の選択と実行を目的達成まで繰り返す。ここで適切な攻撃手段とは、攻撃効果が高く、攻撃成立見込みが高く、発覚しにくい手段のことである。適切な攻撃手段の選択にはペンテスターと呼ばれる専門家が必要である。

この研究では、ペンテスターが適切な攻撃手段を選択するとき、攻撃手段が成立するか、攻撃が発覚するか、攻撃の結果得られる効果の大きいか、の三点を基に判断していると仮定し、攻撃手段を $eVc$ (Evaluation Value of Capture: 攻略評価値)、 $eVd$ (Evaluation Value of Detectability: 発覚評価値)、 $eVe$ (Evaluation Value of Effectiveness: 効果評価値)としてスコア化する手法であるCATS法を開発した。CATS法の評価実験の結果、ペンテスターによる攻撃手段選択とCATS法による攻撃手段選択がほぼ一致した。また、対象システムに関する構成情報が十分に入手できていない場合でも、ペンテスターが選ぶ攻撃手段とほぼ一致した攻撃手段を選択することができた。これらの結果から、攻撃手段の選択を自動実行可能であることが分かった。今後は、 $eVc$ 、 $eVd$ 、 $eVe$ がそれぞれ表す攻撃の成立見込み、攻撃検知可能性、攻撃で得られる効果を統合的に取り扱う方式を導入し、より実際のサイバー攻撃に近いペンテストを模擬することを目指す。なお、参考文献(8)に、より詳細な研究内容を記したので参照されたい。

## 2. 従来のペンテスト自動化研究

従来研究A2P2V<sup>(2)</sup>は、攻撃ゴール達成までの手順をアタックツリー形式で出力する。アタックツリーのうち一つのパスを攻撃シナリオとして、対応する攻撃手段を実行する。課題は二点ある。第一は、システムに関する完全な情報が必要なことである。テスト対象の脆弱性情報等は実際には完全には入手できない場合が多い。構成情報が欠落している場合、成立しない攻撃手段を実行してしまうことがある。第二は、適切な攻撃手段選択が行えないことである。A2P2Vでは列挙した攻撃手段のうち、実行回数が少ない攻撃シナリオから実行される。攻撃成否見込みは考慮されているが、見つかりにくさや効果を考慮した攻撃手段選択が行われない。適切な攻撃手段は攻撃シナリオにも依存する。例えば見つかりにくさを優先するか、攻撃が検知されてもよいので攻撃の確実性を優先するかで選ぶべき攻撃手段が異なる。これらの攻撃手段選択はペンテスターの暗黙知によって行われる。そのため、従来はペンテストを自動化することは困難であった。



### 3. 提案手法CATS法

この章では、サイバー攻撃手段をスコア化するCATS法について述べる。本稿で使用する記号の定義を表1に示す。

表1-記号の定義

記号	定義
$A$	実行可能な攻撃手段の集合
$A_i$	攻撃手段, $A_i \in A$ ( $i$ は自然数)
$S$	攻撃対象システム
$K_S$	攻撃者が持つ $S$ に関する知識
$a_j$	$S$ の属性 ( $j$ は自然数)
$at_{a_j,k}$	属性 $a_j$ が取り得る値 ( $k$ は自然数)
$C_{A_i}$	$A_i$ が成功するために必要な $a_j$ の組の集合
$D_S$	$S$ を監視する攻撃検知システム
$E_{A_i}$	$A_i$ によって $S$ 上で発生する事象の集合

#### 3.1 ペンテスターのモデル化

ペンテスターは次の考え方で攻撃手段を選択すると仮定する。

- (1) 実行したい攻撃手段が攻撃対象で成立するか
- (2) 攻撃手段実行時に攻撃対象で攻撃が検知されるか
- (3) 攻撃手段が成功したときに得られる効果が高いか

(1)は、対象がWindows<sup>(注1)</sup>である場合、ペンテスターはWindowsの脆弱性を突くExploitを選択することなどを意味する。攻撃手段成功見込みのスコアを攻略評価値 $eVc$ とする。

(2)は、ペンテスターが攻撃手段を実行するとき、ネットワーク上のトラフィックがIDS(Intrusion Detection System)などで検知され得ることを考えて、より検知されにくい攻撃手段を選択することなど意味する。この考え方に基づくスコアを発覚評価値 $eVd$ とする。

(3)は、ペンテスターが遠隔でファイル閲覧できる攻撃手段よりも遠隔でコード実行できる攻撃手段の方が攻撃効果が高いと考えて、より攻撃効果が高い攻撃手段を選択することなどを意味する。この考え方に基づくスコアを攻撃効果値 $eVe$ とする。

(注1) Windowsは、Microsoft Corp.の登録商標である。

#### 3.2 スコア化方法

- (1) 定義1：攻撃対象システム $S$ に関する知識 $K_S$

攻撃者が攻撃対象システム $S$ の構成情報に関して持つ知識 $K_S$ を、 $K_S = (f_{\text{estimated}}, I_S)$ と定義する。ここで $f_{\text{estimated}}$ は、 $S$ の属性値に対する確率推定する関数である。また $I_S$ は攻撃者が取得済みの $S$ に関する知識の集合である。

- (2) 定義2：攻略評価値 $eVc$

$eVc$ を、知識 $K_S$ を持つ攻撃者が、ある攻撃手段 $A_i$ を攻撃対象システム $S$ に対して行うとき、 $A_i$ が成功する確率と定義する。 $eVc$ は次式で与えられる。

$$eVc_{A_i, S, K_S} = P(C_{A_i}; K_S) \cdot P(A_i | C_{A_i}; K_S)$$

ここで $P(C_{A_i}; K_S)$ は、 $S$ の知識 $K_S$ を持つ攻撃者が、 $A_i$ が成功するための各属性 $a_j$ の組の集合 $C_{A_i}$ を $S$ が全て満たしている確率である。また $P(A_i | C_{A_i}; K_S)$ は、ある $A_i$ が成功するための各属性 $a_j$ の組の集合 $C_{A_i}$ が成立していると仮定したとき、知識 $K_S$ を持つ攻撃者による $A_i$ が成功する確率である。

- (3) 定義3：発覚評価値 $eVd$

攻撃手段 $A_i$ によって攻撃対象システム $S$ 上で発生する事象の集合を $E_{A_i}$ とする。 $D_S$ を $S$ 上で発生する攻撃を検知するシステムとして、 $d_{D_S}$ を $E_{A_i}$ に投入し $D_S$ によって攻撃が検知される確率を出力する関数とする。 $S$ が検知システム $D_S$ に監視さ

れているとき、攻撃手段 $A_i$ が $D_S$ によって検知される確率として発覚評価値 $eVd$ を次式のように定義する。

$$eVd = d_{D_S}(E_{A_i})$$

例えば、 $E_{A_i}$ は攻撃手段実行後に発生するネットワーク通信や、攻撃対象システムで記録されるログなどを意味する。

#### (4) 定義4：効果評価値 $eVe$

$S$ に対して、攻撃手段 $A_i$ を実施することで獲得できる効果 $eVe_{S,A_i}$ を次式のように定義する。

$$eVe_{S,A_i} = (\text{CVSS影響度}(A_i), \text{CVSS環境値}(S))$$

$eVe$ ではCVSS(Common Vulnerability Scoring System) v3<sup>(3)</sup>を使用する。CVSS影響度は攻撃手段 $A_i$ が成功したときに攻撃者が $S$ に与える影響を表して、CVSSの影響度算出法を用いる。CVSS環境値は攻撃手段を $S$ に対して実行したときの影響度を表してCVSS環境値の算出法を用いる。

## 4. CATS法の評価

### 4.1 評価方法

CATS法の評価は、次の観点で行う。

- (1) 攻撃手段 $A_i$ を正しくスコア化できるか
- (2) スコア値で選ぶ攻撃手段とペンテスターが選ぶ攻撃手段が同じか
- (3) 知識 $K_S$ が不足する場合もスコア化できるか

評価は次のステップで行う。

S1：評価条件の設定  $S$ ,  $K_S$ ,  $D_S$ , 評価対象とする $A_i$ を定める。

S2：CATS法によるスコア化 S1で設定した $S$ ,  $K_S$ ,  $D_S$ の条件下で $eVc$ と $eVd$ を $A_i$ ごとに算出し、スコア値の高い順で順位を導出する。

S2'：ペンテスターによる順位付け S1で設定した $S$ ,  $K_S$ ,  $D_S$ の条件下で、評価対象の攻撃手段をペンテスターが $eVc$ と $eVd$ の観点で総当たりで評価し、優れている攻撃手段の順に順位を導出する。

S3：比較 S2とS2'の結果を比較する。

### 4.2 S1：評価条件の設定

MITRE ATT&CK Enterprise<sup>(4)</sup>のTacticsの一つである、Lateral Movement(以下“LM”という。)に属するTechniquesを評価対象の攻撃手段とした。LMには攻撃手段が多数ありLMの攻撃手段を適切に選択できれば他のTacticsの攻撃手段も適切に選択できる。実際の攻撃手段として、ペンテストツールのデファクトであるMetasploit<sup>(5)</sup>(<sup>(注2)</sup>)から、LMのTechniquesに相当するモジュールを選択した。 $S$ は一般的なIT環境として、二つの $S_1$ ,  $S_2$ を考える。 $S_1$ ,  $S_2$ の詳細を表2に示す。

表2-攻撃対象システム $S$ の設定

$S$	$S$ の詳細( $a_1$ = “OS”, $a_2$ = “開放ポート”, $a_3$ = “脆弱性”, $a_4$ = “稼働サービス”とする)
$S_1$	$at_{a_1,1}$ = Windows10 1909 $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 3389, $at_{a_2,3}$ = 5900, $at_{a_2,4}$ = 5985, $at_{a_2,5}$ = 135, $at_{a_2,6}$ = 8030 $at_{a_3,1}$ = CVE-2020-0796, $at_{a_3,2}$ = CVE-2009-3028, $at_{a_3,3}$ = CVE-2009-4655 $at_{a_4,1}$ = SMB 3.1.1, $at_{a_4,2}$ = Altiris 6.9.x, $at_{a_4,3}$ = eDirectory 8.8.5, $at_{a_4,4}$ = VNC
$S_2$	$at_{a_1,1}$ = linux <sup>(注3)</sup> $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 22, $at_{a_2,3}$ = 5901, $at_{a_2,4}$ = 8888, $at_{a_2,5}$ = 8030 $at_{a_3,1}$ = CVE-2021-25646, $at_{a_3,2}$ = CVE-2009-4655 $at_{a_4,1}$ = samba <sup>(注4)</sup> , $at_{a_4,2}$ = SSH, $at_{a_4,3}$ = Apache <sup>(注5)</sup> Druid 0.20, $at_{a_4,4}$ = eDirectory 8.8.5, $at_{a_4,5}$ = VNC

(注3) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

(注4) Sambaは、Software Freedom Conservancy, Inc.の登録商標である。

(注5) Apacheは、The Apache Software Foundationの登録商標である。

攻撃者が持つ $K_S$ は、ネットワークスキャンなどの偵察行為を段階的に行うことを想定し、次の4段階を対象にした。

- (1) 何も知識を持っていない
- (2) ネットワークスキャナーで得られる情報に相当する知識

(3) 脆弱性スキャナーで得られる情報に相当する知識

(4) (3)に加えて、ドメイン管理者の認証情報

(1)はSに関する情報がない状態である。攻撃者は客観的な情報を基に $K_S$ を定める。Sの属性値に対する確率推定に $f_{\text{estimated}}$ を使用する。例えば開放ポート番号推定にはOSの確率分布とデフォルトの空きポート番号を基に特定のポート番号が開いている確率が計算できる。

(2)はネットワークスキャナー<sup>(6)</sup>で得られる情報の知識を持つ状態である。例えばIP(Internet Protocol)アドレス、動作ソフトウェアのバージョン、OS情報である。

(3)はNessus<sup>(7)</sup>(注6)などの脆弱性スキャナーで得られる情報に相当する知識とCVE番号のような具体的脆弱性情報を持つ状態である。

(4)は(3)に加えてドメイン管理者の認証情報を持っている状態である。評価では何も知識がない状態 $K_0$ と、 $S_1$ 、 $S_2$ それぞれに対して3段階の知識を持つ状態、計7種類を $K_S$ の条件とした。 $K_S$ の詳細を表3に示す。

表3-知識 $K_S$ の設定

知識 $K_S$	知識 $K_S$ の詳細( $a_1$ ="OS", $a_2$ ="開放ポート", $a_3$ ="脆弱性", $a_4$ ="稼働サービス"とする)
$K_{S0}$	知識なし
$K_{S11}$	$at_{a_1,1}$ = Windows $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 3389, $at_{a_2,3}$ = 5900, $at_{a_2,4}$ = 5985, $at_{a_2,5}$ = 135, $at_{a_2,6}$ = 8030 $at_{a_3,1}$ = SMB 3.1.1, $at_{a_3,2}$ = eDirectory, $at_{a_3,3}$ = VNC 保有クレデンシャル=一般ユーザー
$K_{S12}$	$at_{a_1,1}$ = Windows10 1909 $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 3389, $at_{a_2,3}$ = 5900, $at_{a_2,4}$ = 8888, $at_{a_2,5}$ = 8030 $at_{a_3,1}$ = CVE-2020-0796, $at_{a_3,2}$ = CVE-2009-3028, $at_{a_3,3}$ = CVE-2009-4655 $at_{a_4,1}$ = SMB 3.1.1, $at_{a_4,2}$ = Altiris 6.9.x, $at_{a_4,3}$ = eDirectory 8.8.5, $at_{a_4,4}$ = VNC 保有クレデンシャル=一般ユーザー
$K_{S13}$	$at_{a_1,1}$ = Windows $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 3389, $at_{a_2,3}$ = 5900, $at_{a_2,4}$ = 5985, $at_{a_2,5}$ = 135, $at_{a_2,6}$ = 8030 $at_{a_4,1}$ = SMB 3.1.1, $at_{a_4,2}$ = eDirectory, $at_{a_4,3}$ = VNC 保有クレデンシャル=ドメイン管理ユーザー
$K_{S21}$	$at_{a_1,1}$ = linux $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 22, $at_{a_2,3}$ = 5901, $at_{a_2,4}$ = 8888, $at_{a_2,5}$ = 8030 $at_{a_4,1}$ = samba, $at_{a_4,2}$ = SSH, $at_{a_4,3}$ = Apache Druid, $at_{a_4,4}$ = eDirectory, $at_{a_4,5}$ = VNC 保有クレデンシャル=一般ユーザー
$K_{S22}$	$at_{a_1,1}$ = linux $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 22, $at_{a_2,3}$ = 5901, $at_{a_2,4}$ = 8888, $at_{a_2,5}$ = 8030 $at_{a_3,1}$ = CVE-2021-25646, $at_{a_3,2}$ = CVE-2009-4655 $at_{a_4,1}$ = samba, $at_{a_4,2}$ = SSH, $at_{a_4,3}$ = Apache Druid 0.20, $at_{a_4,4}$ = eDirectory, $at_{a_4,5}$ = VNC
$K_{S23}$	$at_{a_1,1}$ = linux $at_{a_2,1}$ = 445, $at_{a_2,2}$ = 22, $at_{a_2,3}$ = 5901, $at_{a_2,4}$ = 8888, $at_{a_2,5}$ = 8030 $at_{a_4,1}$ = samba, $at_{a_4,2}$ = SSH, $at_{a_4,3}$ = Apache Druid, $at_{a_4,4}$ = eDirectory, $at_{a_4,5}$ = VNC 保有クレデンシャル=ドメイン管理ユーザー

Sを監視する $D_S$ も一般的IT環境に導入されているものとして、 $D_S$ を次の3段階に設定する。

①ウイルス対策ソフトウェア：ウイルス対策ソフトウェアだけをSに導入する。シグネチャーにマッチするファイルがSに書き込まれたとき検知される。

②ウイルス対策ソフトウェア、IDS(①)に加えてIDSを導入する。シグネチャーにマッチする攻撃通信が確認された場合に検知される。

③ウイルス対策ソフトウェア、IDS、EDR(Endpoint Detection and Response)(②)に加えてEDRをSに導入する。

EDRはS上の挙動が正常から逸脱する場合に検知される。

(注2) Metasploitは、Rapid7 LLCの登録商標である。

(注6) Nessusは、Tenable, Inc.の登録商標である。

### 4.3 S2：CATS法によるスコア化と、S2'：ペンテスターによる順位付け

S1で設定した前提条件を基に、CATS法による攻撃手段 $A_i$ のスコア化を行う。今回の評価では $eVc$ 及び $eVd$ についてスコア化を実施した。S2と独立してS1で設定した前提条件を基に、ペンテスターによる攻撃手段の順位付けを行った。今回 $eVc$ の観点、 $eVd$ の観点での順位をそれぞれ2名のペンテスターによって評価した。(スコア値は参考文献(8)を参照)

## 5. む す び

評価結果をまとめる。評価の結果、 $eVc$ の観点では、 $A_{11}$ 及び知識 $K_{s23}$ 、 $K_{s0}$ の場合を除いて上位5位は同じ $A_i$ であった。したがって $eVc$ のスコア値に基づいて攻撃手段 $A_i$ を選択すれば、実際に攻撃が成功しやすい攻撃手段を選択できる。またネットワークスキャン結果相当の知識である $K_{s11}$ 、 $K_{s21}$ に着目すると、CATS法のスコアとペンテスターの順位付けは1～5番目までの攻撃手段は一致した。 $S$ の知識 $K_s$ が不足しても正しくスコア化できることが分かった。また、 $S$ の情報が全く得られていない場合でも適切にスコア化できることも分かった。これらの結果から、攻撃手段の選択を自動実行可能であることが分かった。

## 参 考 文 献

- (1) NIST, SP800-115 Technical Guide to Information Security Testing and Assessment (2008)  
<https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/115/final>
- (2) Nakanishi, F., et al.: Automated Attack Path Planning and Validation (A2P2V), Black Hat USA 2021 Arsenal (2021)
- (3) 独立行政法人 情報処理推進機構 セキュリティセンター：共通脆弱性評価システムCVSS v3概説 (2022)  
<https://www.ipa.go.jp/security/vuln/CVSSv3.html>
- (4) MITRE: ATT&CK  
<https://attack.mitre.org>
- (5) RAPID7: metasploit  
<https://www.metasploit.com>
- (6) NMAP.ORG: NMAP Free Security Scanner  
<https://nmap.org>
- (7) tenable: Tenable Nessus  
<https://jp.tenable.com/products/nessus>
- (8) 木藤圭亮, ほか: ペネトレーションテスト自動化に向けたサイバー攻撃手段の定量的評価法の提案, 2022年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2022), 2B3-2 (2022)

## 高出力レーザーシステムの実現に向けて

For Realization of High Energy Laser

鈴木れん\*

Ren Suzuki

落水秀晃\*

Hideaki Ochimizu

秋山智浩†

Tomohiro Akiyama

原口英介†

Eisuke Haraguchi

\*鎌倉製作所

†情報技術総合研究所(博士(工学))

## 要 旨

防衛装備品での高出力レーザー(HEL: High Energy Laser)システムは、近年、急速な技術発展によって脅威を増している小型～中型サイズの無人機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)に対して、費用対効果に優れた対処手段として早期装備化の実現が期待されているシステム<sup>(1)</sup>である。日本を含む世界各国で、高出力・高い集光性能を持つHELシステムの開発が進められており、その中でも、特にビーム結合技術が重要になっている。三菱電機では、高出力化かつ高い集光性能のビーム出力が可能なコヒーレントビーム結合(CBC: Coherent Beam Combining)の開発に取り組んでおり、その基盤技術の確立を進めている。早期装備化の実現に向けた開発を継続し、日本の安全保障を担う企業として社会に貢献していく。

## 1. ま え が き

日本を含む各国で開発が進められているHELシステムは、より高いレーザー出力と高い集光性能が求められており、その要求を満たすためビーム結合技術の重要性が増している。

本稿では、2章でHELシステムの開発動向を示し、3章でHELシステムにおいて重要な技術であるビーム結合方式とその特徴について述べる。最後に4章で当社が着目し開発を進めているCBC技術の開発取組み状況について述べる。

## 2. HELシステムの開発動向

近年、急速に技術進歩を遂げているUAVは軍事利用が進んでおり、特に小型～中型サイズのUAVに対して費用対効果に優れた対処手段が求められている。この候補の一つであるHELシステムは、高出力なレーザーを直接照射することで対処する装備品であり、弾薬を使わないことから継戦性、費用対効果に優れるため、早期実現が期待されている。

図1に2005～2025年の国内外の主要なHELシステムの開発プロジェクトを示す。

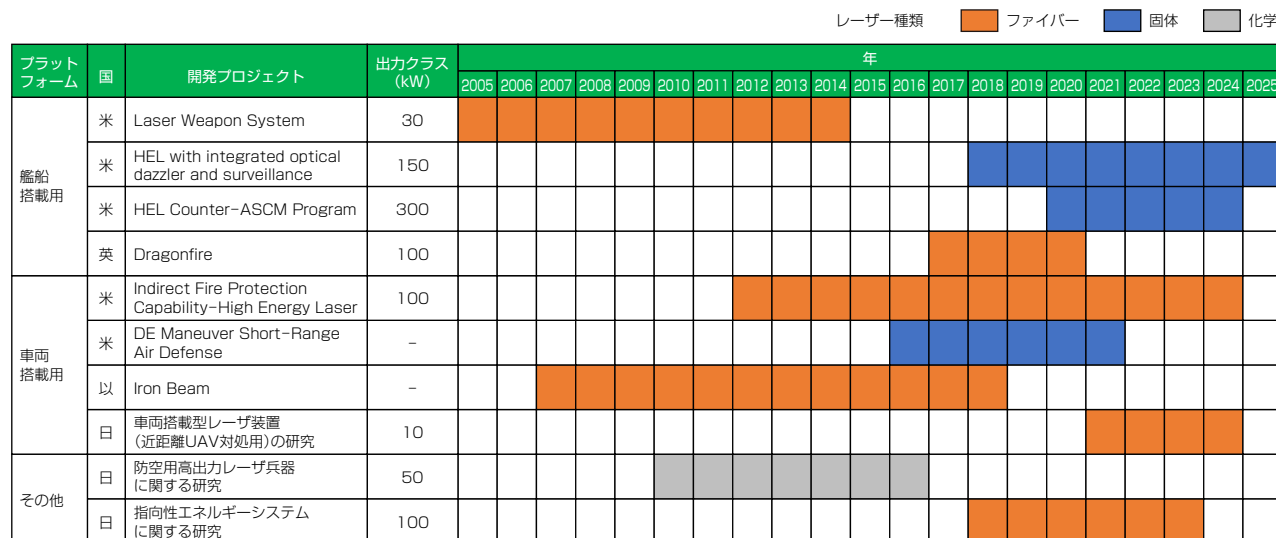


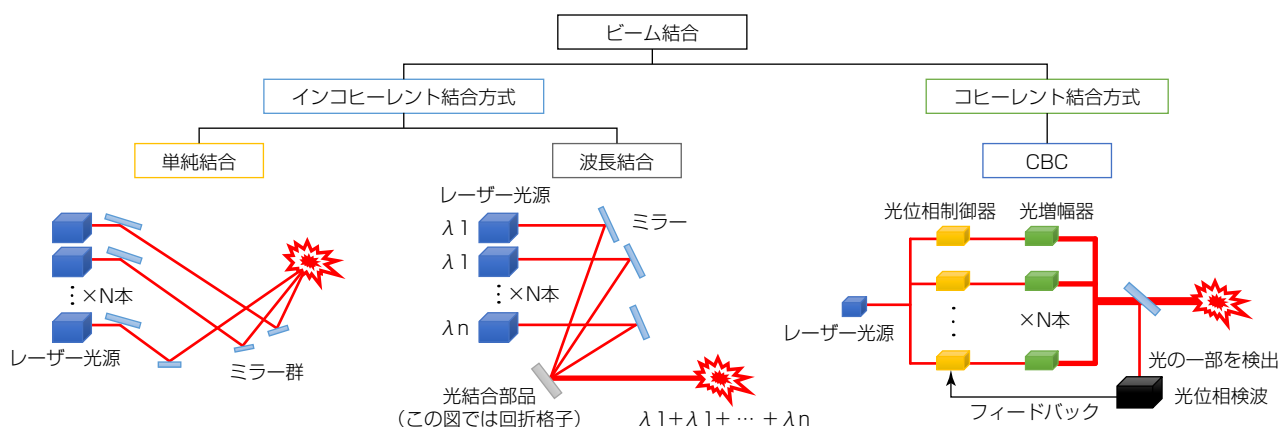
図1-国内外でのHELシステムの主要な開発プロジェクト



国外では既に数10kW級のHELシステムが実現されており、2025年までに100kW超級のHELシステムの開発が進行中である。更なる高出力化に向けて、ビーム結合技術(単一レーザー光でなく、複数のレーザー光を束ねて出力することで高出力化する技術)の重要性が増してきており、各国でその高度化開発が盛んに進められている。ビーム結合技術は、高出力化以外に集光性能にも寄与することから、HELシステムでのキー技術として注目されている。

### 3. ビーム結合方式とその特徴

この章ではビーム結合方式の概要について述べる。図2に代表的なビーム結合方式を示す。図に示すとおり、ビーム結合方式はインコヒーレント結合方式とコヒーレント結合方式に大別される。各方式の特徴について述べる。



#### 3.1 インコヒーレント結合方式の特徴

インコヒーレント結合方式には単純結合方式と波長結合方式があり、単純結合方式は、目標点に複数のビームを集光する方式でシステムは最も単純で、集光性能が低い。波長結合方式は、異なる波長のレーザー光を光結合部品で同軸上に重ねるため、高い集光性能を得ることが可能であるが、光結合部品、光源の性能に限界があり、結合できるビームの本数には上限が生じる。

#### 3.2 コヒーレント結合方式の特徴

CBC方式は、集光点での各レーザー光の位相をそろえることで、集光中心部のエネルギー密度が高まり、ピークパワーを結合ビーム本数倍(N本のレーザー光を結合する場合、理論上は位相をそろえていない場合と比較してN倍になる)にすることが可能な方式である。これによって、他方式より早い目標の溶融又は破壊が期待できる。また、他方式ではレーザー光が集光点に伝搬する過程で大気の影響を受けて、集光性能が劣化してしまうが、各ビームの光位相を大気の影響を加味して適切に制御することで、その環境に合わせた伝搬ビームプロファイルを形成でき、大気影響によるビームの拡散を抑制する効果が期待できる。一方、他方式に比べて、システム自体が複雑・大型化しやすいため、小型化技術がHELシステム搭載上の重要な開発要素になる。

### 4. 当社でのCBC技術の開発

HELシステムの実現に向けた社内の開発取り組み状況について述べる。

#### 4.1 CBCの基本原理解説

CBCの基本原理解説のため、図3に示す構成の実証系を構築した。図3(a)は、CBCの機能ブロック図であり、基準光源と基準光源を分割する光分配器、分割したレーザー光の位相を制御する光位相制御器、レーザー光の出力増幅のため



の光増幅器，ビーム結合後の位相を検出する光検出器と光位相制御器へフィードバックをかける制御部で構成している。レーザー光の位相は，参照光を重畳したレーザー光を光検出器で検出し，その光ビート信号から位相を検波する光ヘテロダイン干渉法によって測定される。図3(b)に示すとおり，図3(a)の青破線枠内は空間光学系で構成しており，その他の部分は光ファイバーによってレーザー光を伝送する。

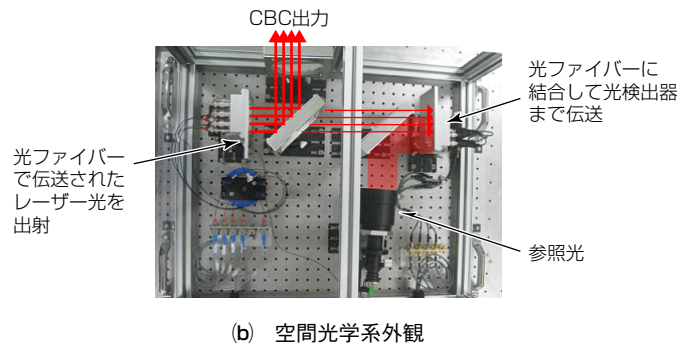
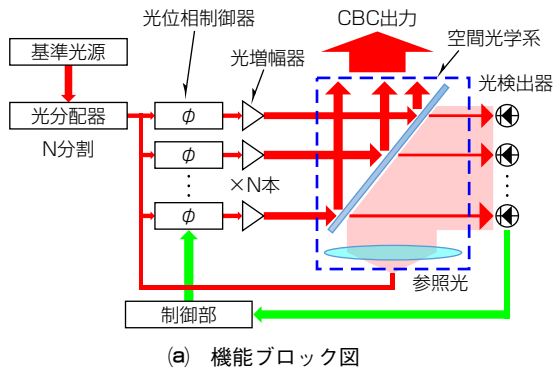
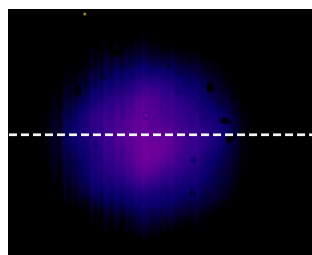
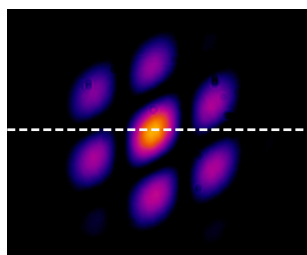


図3-CBC基本原理実証系

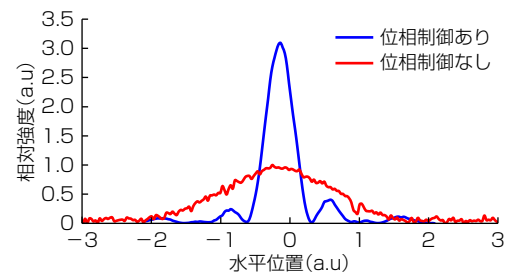
図4に四つのビームをビーム結合した結果を示す。図4(b)に示すとおり，位相制御によって中心にパワーが集中し，ピークパワーが向上(ピーク強度比3.1倍)していることを確認し，CBCの基本原理を実証できた。



(a) 位相制御なし



(b) 位相制御あり



(c) ラインプロファイル

図4-CBC基本原理実証結果

## 4.2 CBC方式の小型化に向けた検討

4.1節で示した構成の場合，ビーム数と同数の光検出器が必要になり，ビーム数の増加に比例してシステム規模が拡大する。この課題を解決するため，単一光検出器で複数ビームの位相検出が可能なマルチディザリング同期方式<sup>(2)</sup>を検討した。マルチディザリング同期方式は，光位相制御器で各レーザー光に周波数の異なる微弱なディザリング信号を付加することで，単一の光検出器でまとめて検出した信号を信号処理によって周波数分離し，各レーザー光の位相情報として識別を可能にする方式である。同時に検出できるビームの本数は光位相制御器と光検出器の性能によって決定される<sup>(3)</sup>。

マルチディザリング方式によるCBCの機能ブロック図と実証器材を図5に示す。この構成では，光ヘテロダイン検波に用いる参照光は1ビームだけに重畳し，検出器上で他ビームと合わせて検出することで，システムを単純化している。

図6に，四つのビームをビーム結合した結果を示す。図3の構成と同様に，位相制御によって中心にパワーが集中し，ピークパワーが向上(ピーク強度比2.9倍)しており，マルチディザリング方式によるCBCの実現性を確認できた。

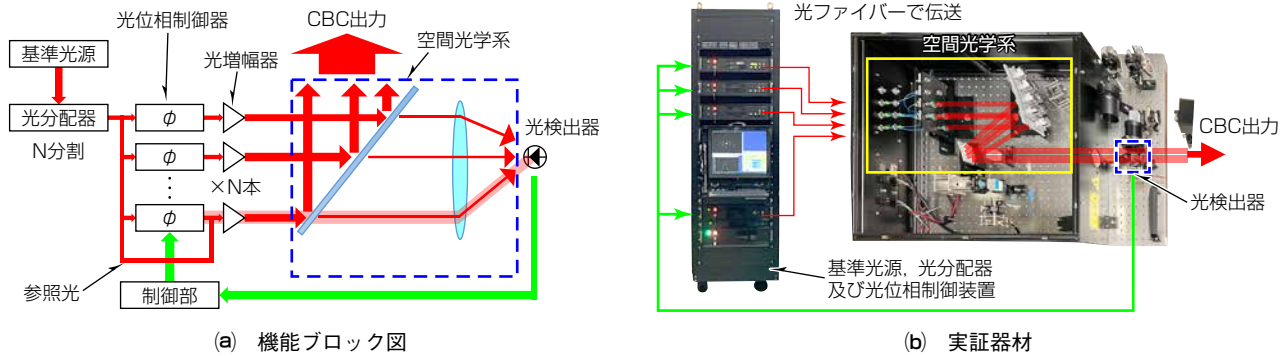


図5-マルチディザリング方式でのCBC実証系

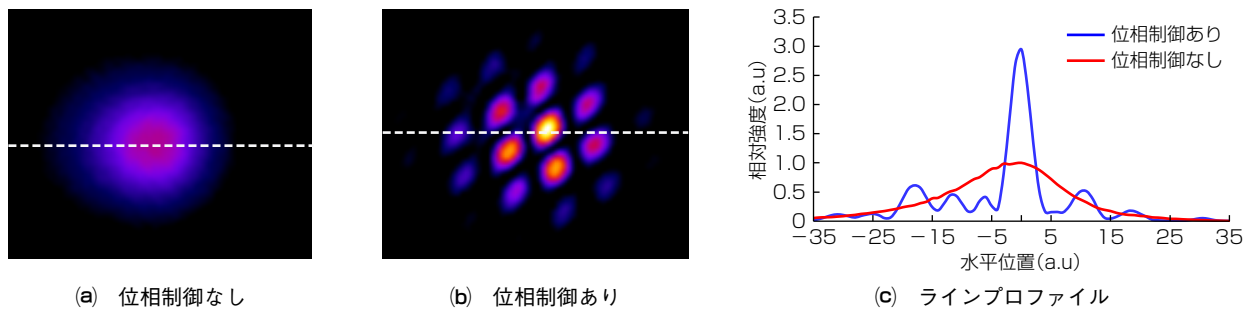


図6-マルチディザリング方式でのCBC位相同期結果

### 4.3 CBCの高出力化に向けた取組み

CBCを適用したHELで、目標に照射されるレーザーの出力は、各ビーム出力の総和になるが、各ビームの最大出力は光増幅器の特性によって決定される。光増幅器の最大出力は、誘導ブリルアン散乱(SBS: Stimulated Brillouin Scattering)という基準光源の光周波数が僅かにシフトした散乱光の発生によって制限され、基準光源の光周波数幅が狭いほど生じやすくなる。一方、位相同期には基準光源の光周波数幅が狭い方が有利であるため、基準光源に対して相反する要求になる。この課題の解決方法として、光周波数幅が狭い基準光を高速に変調することで、変調周期の中では光周波数幅が広い基準光が光増幅器に入力される方式が提案されている<sup>(4)(5)</sup>。

基準光源の変調によるSBS抑制効果の確認のため、光増幅特性の評価を行った。図7(a)に光出力パワーの設定値と測定値の関係を示す。変調がない場合に見られた光出力の飽和傾向が、基準光源の変調によって解消されていることが確認できる。図7(b)に光周波数シフト量測定結果を示す。変調なしの場合、SBSに由来した光周波数のシフト成分が観測されるが、変調時にはこの成分が観測されずSBSの発生が抑制されていることが分かる。

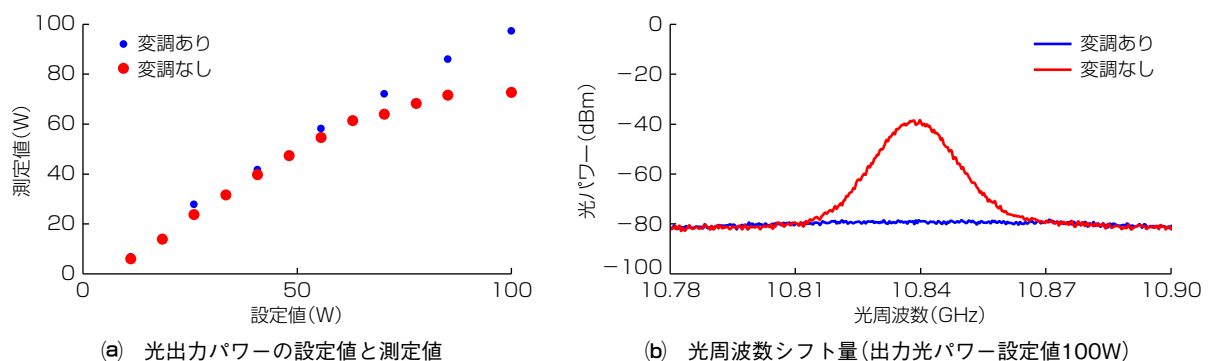


図7-基準光源変調有無での光増幅特性の評価結果

CBCの高出力化実現に向けては、先に述べたように基準光源の光周波数幅を変調することで光増幅器の出力制約を緩和させながら、同時にCBCを成立させる必要があります、2024年度末を目途にこの課題の解決に向けた検討を進めていく。

## 5. む す び

HELシステムのキー技術の一つとして着目されるCBC方式について、次のとおり開発成果を述べた。HELシステムの装備化実現を目指して、今回の成果を更に発展させ、日本の安全保障に貢献していく。

- (1) 開発成果1：CBCの基本原理実証
- (2) 開発成果2：CBCの構成小型化実証
- (3) 開発成果3：出力向上に向けた基準光源の変調によるSBS抑圧の取組み

## 参 考 文 献

- (1) 防衛省：令和5年版防衛白書, 165 (2023)  
[https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2023/w2023\\_00.html](https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2023/w2023_00.html)
- (2) Thomas, M. S. : Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam, Optics Express, **14**, No.25, 12188~12195 (2006)
- (3) 原口英介, ほか : Simultaneous detection of beam pointing and optical phase errors for multiple beams using a quadrant photo detector for high-efficiency coherent beam combining systems, Applied Physics Express, **12**, No.10, 102012 (2019)
- (4) 原口英介, ほか : 広帯域な位相変調による誘導ブリルアン散乱抑圧に関する検討, レーザー学会第525回研究会“ファイバレーザー技術”, 1 (2018)
- (5) J. O. White, et al. : Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using a linearly chirped diode laser, Optics Express, **20**, No.14, 15872~15881 (2012)

~~~~~

## 表面実装型サーキュレーター

Surface-mount Type Circulator

\*鎌倉製作所  
†情報技術総合研究所  
‡鎌倉製作所(博士(工学))

## 要 旨

AESA(Active Electrically Scanned Array)は、気象用レーダーなどに適用されている。近年、様々なレーダーシステムへのAESAの適用が増加している<sup>(1)</sup>。また、防衛レーダーシステムへも適用されている。AESAは、多数の高周波送受信モジュールで構成されている。従来型高周波送受信モジュールは、アルミニウム筐体(きょうたい)に構成部品をねじで固定し、部品間を金リボンなどで接続する構成のため、小型化、低コスト化が課題であった。そこで、高周波送受信モジュールの全構成部品をリフロー実装で高周波回路基板に一括はんだ付けする構成に変更した。高周波送受信モジュールの構成部品の一つであるサーキュレーターをリフロー実装可能な表面実装型にすることで、高周波送受信モジュールの小型化、低コスト化に貢献した。

## 1. ま え が き

三菱電機が担う、艦船、航空機、飛しょう体などの防衛システムに用いられるレーダーシステムとして、AESAがある。AESAは、防衛システム以外に、気象用レーダー、人工衛星の地球観測用レーダー、衛星間通信などに適用されている。近年、様々なレーダーシステムへのAESAの適用が増加している<sup>(1)(2)</sup>。高周波送受信モジュールは、AESAを差別化するキーパーツである。一つのAESAは数十個から数千個の高周波送受信モジュールで構成される。高周波送受信モジュールへの要求としては、高出力、高効率、小型・軽量、低コストが挙げられ、当社では、それらを実現するための研究、開発、設計、製造を行っている。

図1に高周波送受信モジュールの構成例を示す。従来型高周波送受信モジュールは、構成部品の各々をアルミニウム筐

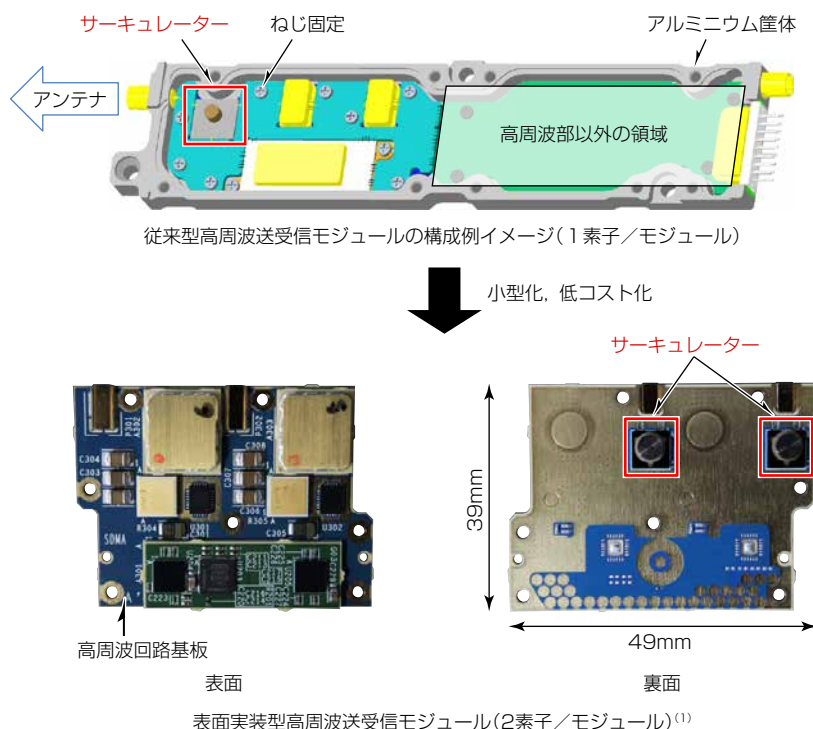


図1-高周波送受信モジュールの構成例

体にねじで固定し、金リボンなどで接続する構造のため、小型化、低コスト化が課題であった。そこで、高周波送受信モジュールに必要な全構成部品を、リフロー実装で高周波回路基板にはんだ付けする表面実装型に変更した。さらに、小型化、低コスト化を実現するため、構成部品の一つであり、高周波信号の方向を制御する受動素子であるサーキュレーターについて、リフロー実装に対応できる表面実装型サーキュレーターの開発を行った。

## 2. サーキュレーターの概要

サーキュレーターの主な構成要素は、フェライト、磁石である。フェライトは、一般的に酸化鉄を主体とした焼結セラミックスであり、1930年に東京工業大学で発明された。磁石は、一般的に保磁力が高いネオジム磁石やサマリウムコバルト磁石などを適用し、磁気回路の調整のために金属キャップを適用することもある。磁石はフェライトに接着し、固定される。フェライトには、高周波信号を伝送する電氣的配線が施され、磁石で発生する直流磁場をフェライトに印加することによるファラデー効果によって、高周波信号の方向制御が可能になる。

サーキュレーター適用回路例を図2に示す。Port 1 のアンテナからの入力信号は、Port 3 の受信回路には伝送するが、Port 2 の送信回路には伝送しない。これは、Port 3 とPort 2 間、Port 2 とPort 1 間も同様である。こうした特性を利用し、サーキュレーターはアンテナと高周波送受信モジュール間の高周波信号の送受信経路切替えに適用されている。サーキュレーターを高周波送受信モジュールに適用する主なメリットは次のとおりである。

- (1) 受動素子であるため、半導体チップなどの能動素子と異なり、電源供給が不要である。
- (2) 送受信一体の高周波送受信モジュール構成が可能になり、小型化できる。

なお、逆方向への高周波信号の伝送は、磁石の極性を逆にすることで可能になる<sup>(3)(4)</sup>。

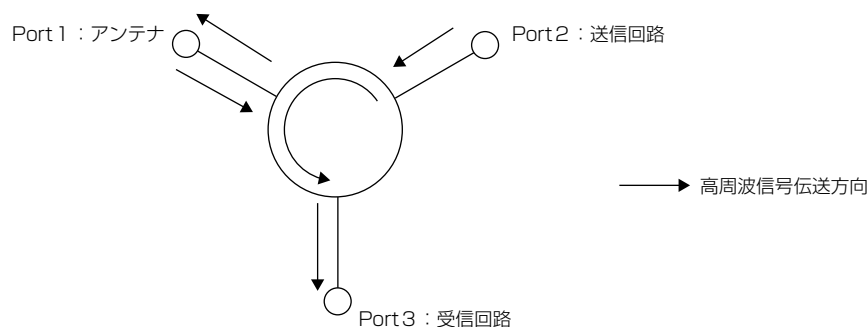


図2-サーキュレーター適用回路例<sup>(3)</sup>

## 3. 表面実装型サーキュレーターの開発結果

### 3.1 サーキュレーターの表面実装化

一般的に表面実装が可能な構造としては、主として、FC(Flip Chip)型、LGA(Land Grid Array)型、BGA(Ball Grid Array)型、PGA(Pin Grid Array)型などの構造があり、どれも高周波回路基板へのリフロー実装が可能になることから、高周波送受信モジュールの小型化、低コスト化が可能である。高周波回路基板と部品間の接合材料は、はんだ、金バンプ、ピンなどがある。各々部品の寸法、材質、温度、湿度、振動、衝撃、寿命などの組立て仕様、製品要求仕様によって適正な構造を選定する必要がある<sup>(5)</sup>。

このことを考慮し、サーキュレーターを表面実装化するに当たって、従来型との主な変更点を図3と次に示す。

- (1) フェライト表裏面導通構造(スルーホール構造)
- (2) 高周波回路基板、フェライト、接合材料のBGA／はんだ構造による立体接合構造

(1)(2)の詳細に関してはそれぞれ、3.2節、3.3節に示す。



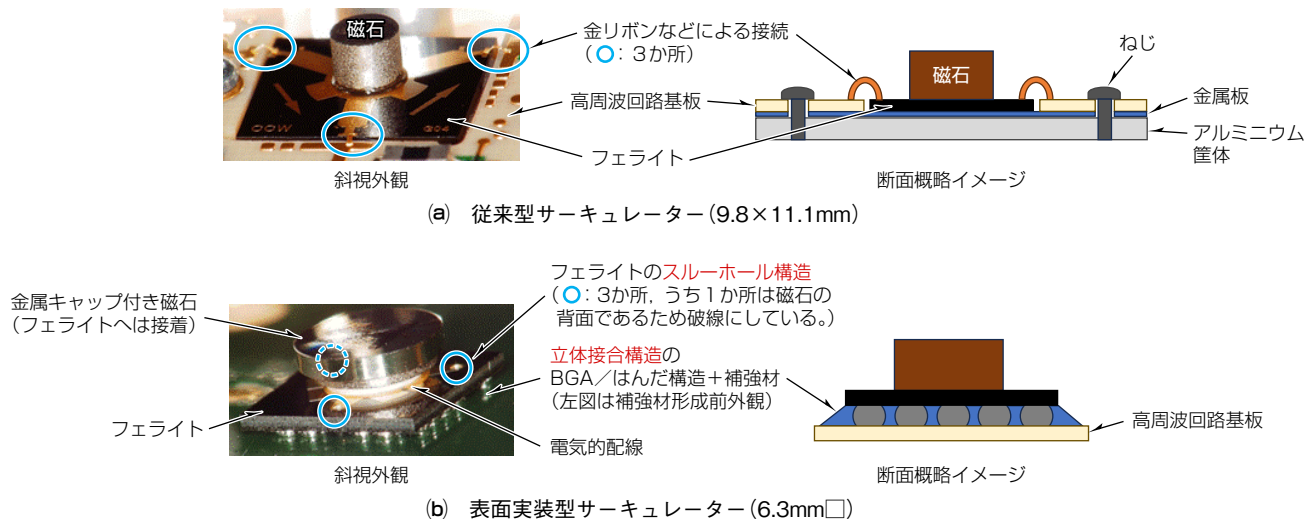


図3-サーキュレーターの構成例

### 3.2 表面実装型サーキュレーターの電気性能

フェライトは焼結セラムックスであるため、一般的な高周波回路基板のようにドリル加工によるスルーホールの形成ができない。また、サーキュレーターに適用するフェライトの原材料は特殊であるため、グリーンシート法などによる多層フェライト基板は市場に出ておらず、研究開発のリスクが高い。そのため、表面実装型サーキュレーター向けに、ドリル加工などの機械加工によらない、スルーホール形成技術確立した。

スルーホールを設けずに、フェライトの表裏に形成した配線間の容量結合によって信号を伝送した場合(以下“容量結合方式”という。)と、フェライト基板にスルーホールを設けた場合(以下“スルーホール方式”という。)とで高周波信号伝送特性の比較を行い、スルーホール形成技術の適用効果を示す。

両方式の概念図を図4に示す。磁石は省略している。両方式とも高周波回路基板上の配線とフェライトの底面配線とは、3.3節で詳細を述べる接合材料を介して接続されている。容量結合方式は、フェライトの底面配線と天面配線間の容量結合を用いて信号を伝送する方式である。一方、スルーホール方式は、フェライトに設けられたスルーホールを介して、表裏面を電氣的に接続することで、信号を伝送する方式であり、図3に示す表面実装型サーキュレーターの構成である。

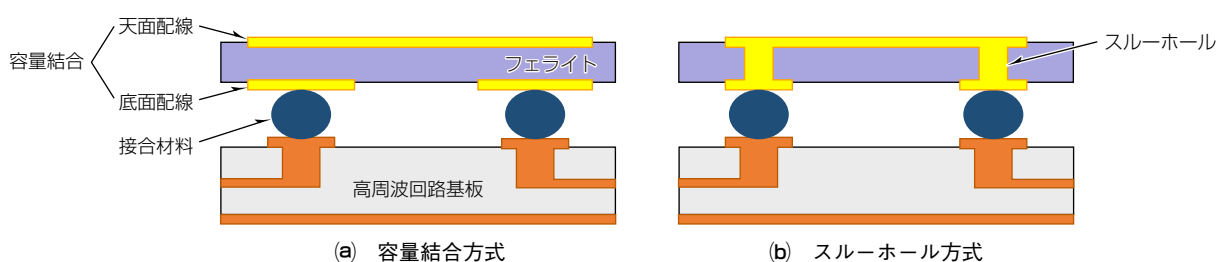


図4-フェライトの高周波信号伝送方式の違い

解析モデルの斜視図を図5に、解析結果を図6に示す。磁石は省略している。規格化周波数0.89から1.11の範囲で、反射特性目標を-15dB以下、アイソレーション特性目標を-15dB以下、通過特性目標を-0.75dB以上とした場合、容量結合方式からスルーホール方式に変更することで、電気性能が大幅に改善し、目標を達成した。

### 3.3 表面実装型サーキュレーターの構造設計

サーキュレーターを表面実装化するには、高周波回路基板に対して、フェライトは接合材料を介して立体接合する必要がある。図3に示したとおり、従来型サーキュレーターでは金リボンなどでの接続によって、アルミニウム筐体や他部品との線膨張差の影響を吸収する構造になるため、フェライトなどのサーキュレーターを構成する部材又は接合材料の構造強度がサーキュレーターの機能性能に与える影響はほぼなかった。



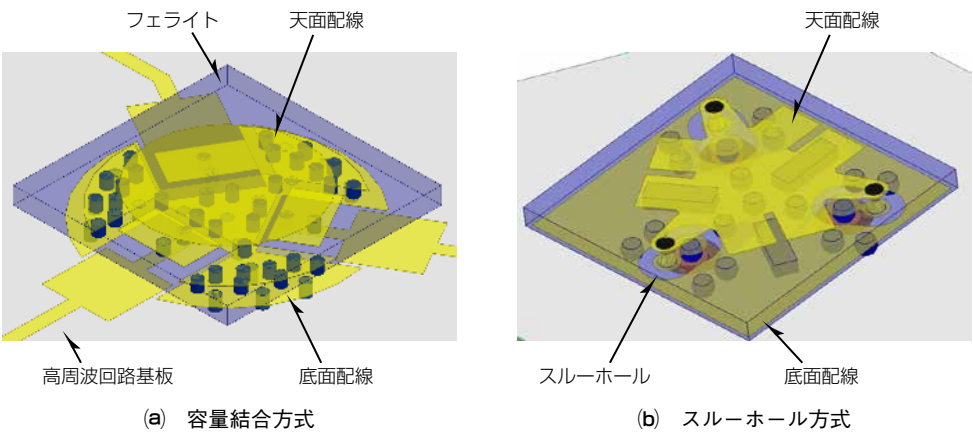


図5-解析モデル

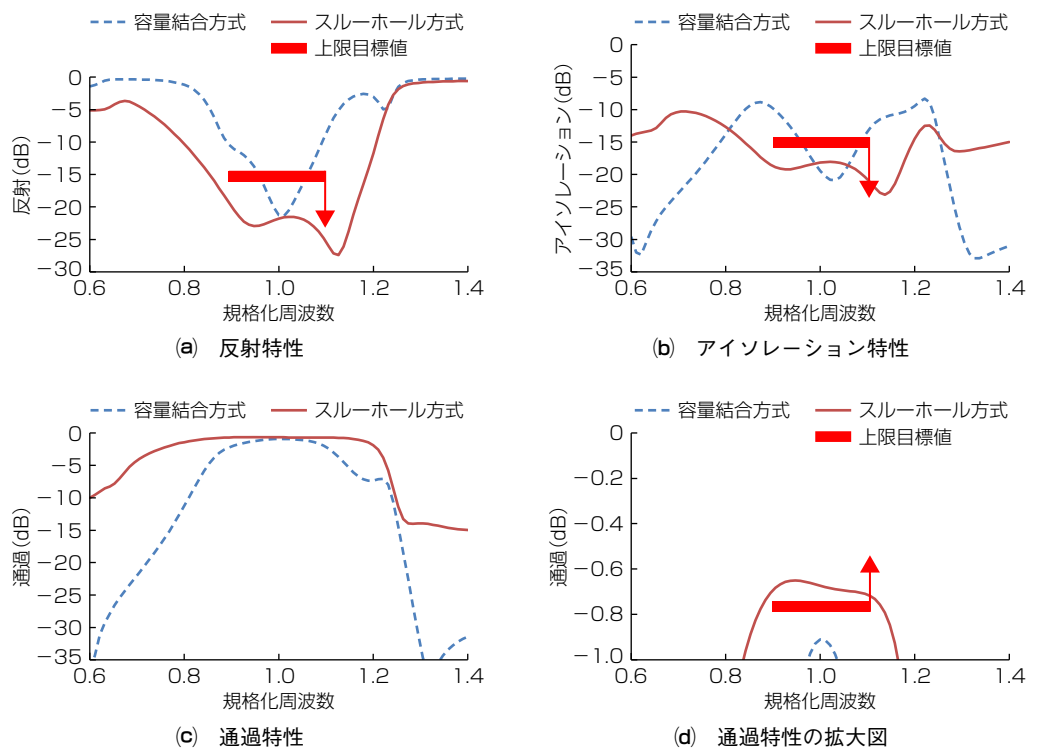


図6-解析結果

一方、立体接合の場合は、高周波回路基板の線膨張率(約16ppm/K)に対して、フェライト(約11ppm/K)を表面実装するため、フェライト、及び接合材料の構造強度の確保が重要である。組立て条件や製品使用環境によってフェライトや接合材料に発生する応力が、構造強度以上になった場合、フェライトの破損や接合材の破断によって機能が喪失するリスクがある。

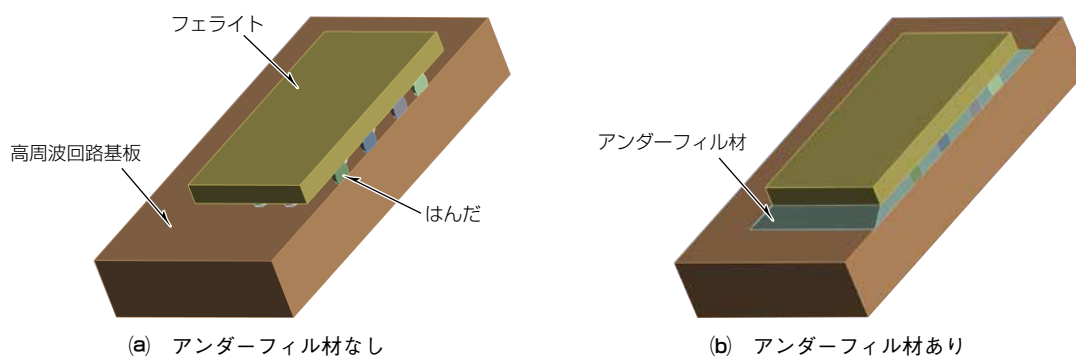
最初に、接合構造と接合材料の選定を行った。一般的には表1に示す接合構造、材料がある<sup>(5)</sup>。FC／金バンプ構造は半導体ベアチップなどの微小サイズの適用が一般的であるため、サーキュレーターのような大型構造では応力緩和効果が

表1-接合構造／材料比較<sup>(5)</sup>

| 凡例：良◎>○>△>否× |      |     |      |
|--------------|------|-----|------|
| 接合構造／材料      | 応力緩和 | コスト | 当社実績 |
| BGA／はんだ      | ○    | ○   | ○    |
| FC／金バンプ      | ×    | △   | △    |
| LGA／はんだ      | ×    | ◎   | △    |
| PGA／ピン       | ○    | ×   | △    |

得られない。LGA／はんだ構造も、高周波回路基板とフェライトの接合厚みが薄いため同様である。PGA／ピン構造は、接合構造にピンなどの構造材料を用いる構造であるが、新たにピンなどの構造材料が必要であり、高コストになる。したがって、表面実装型サーキュレーターでは、応力緩和効果を得られ、かつ、小型化、低コスト化が実現可能であり、当社での実績があるBGA／はんだ構造を適用した。

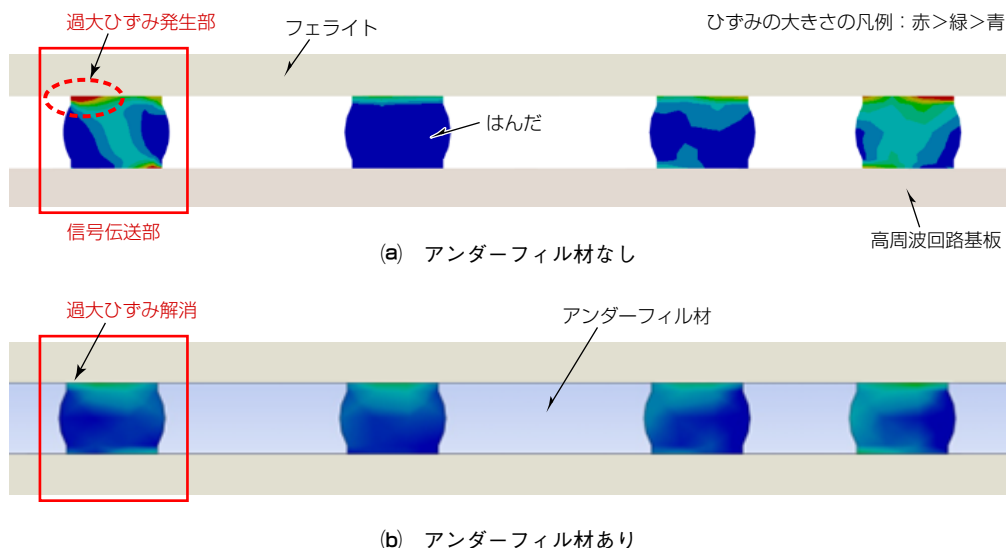
次に、選定したBGA／はんだ構造での、補強材有無での熱応力解析結果を示す。補強材には、アンダーフィル材を適用した。アンダーフィル材は、流動性が高い接着剤であり、一般的に高周波回路基板などに部品の構造強度を補強するため、はんだ付けした後に、部品と高周波回路基板の間に毛細管現象を利用して注入し、固定する。解析モデルを図7に示す。アンダーフィル材の補強効果を見極めるため、フェライト、はんだ、高周波回路基板だけの構成とし、フェライトの対称軸で2分割し、アンダーフィル材有無の2水準とした。温度変化範囲は、製品要求に応じて最高温度+125℃から最低温度-55℃とし、高周波信号伝送部のはんだに発生するひずみ(%)で比較を行った。



解析結果を表2と図8に示す。図8は図7の対称軸面の解析結果である。アンダーフィル材の適用によって、高周波信号を伝送するはんだ接合部に発生するひずみが1.4%から0.2%と大幅に低減され、目標とするひずみ1.0%以下を達成した。

表2-高周波信号伝送部のはんだに発生するひずみ比較結果

| 構造             | ひずみ(%)<br>目標<1.0 | 結果 |
|----------------|------------------|----|
| (a) アンダーフィル材なし | 1.4              | ×  |
| (b) アンダーフィル材あり | 0.2              | ○  |



## 4. む す び

防衛レーダーシステムのAESAに適用されている高周波送受信モジュールの小型化，低コスト化を実現に向けて，表面実装型サーキュレーターの開発を完了した。表面実装型サーキュレーターは，フェライトへのスルーホール構造の適用，BGA／はんだ構造の適用，及びアンダーフィル材による補強によって，防衛レーダーシステムの厳しい機能性能の要求仕様を満足できた。

今後，防衛レーダーシステムは，更なる高出力化，高効率化，軽量化，小型化，低コスト化の要求が加速されると予想されるため，本稿で述べた表面実装型サーキュレーターへの更なる厳しい機能性能の要求が見込まれる。高難易度の開発が必要になるが，社内外の技術力の結集によるイノベーションの加速によって，魅力的な製品を開発していく。

## 参 考 文 献

- (1) Tarui, Y., et al.: X band low-cost GaN TR module with anti-radiation structure, 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1~4 (2016)
- (2) Holpp, W.: The new generation of European E-scan fighter radars, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 530~533 (2010)
- (3) 岡村宗治：マイクロ波フェライトサーキュレータの比帯域幅に関する工学的研究，京都大学 (1976)
- (4) 岡本 明：フェライトの発明と成長の80年，粉体および粉末冶金，**57**，No.10，667~671 (2010)
- (5) 半導体技術ロードマップ専門委員会：WG7 実装2007年度報告書，第9章 (2007)  
<https://semicon.jeita.or.jp/STRJ/report/2007/09.pdf>



高周波送受信モジュール向け  
小型・高放熱デバイス技術Small Size and High Heat Dissipation Device Technology for High  
Frequency Transmit/Receive Module\*鎌倉製作所  
†同製作所(博士(工学))

## 要 旨

防衛・宇宙用途の合成開口レーダー(SAR: Synthetic Aperture Radar)等では、複数の高周波送受信モジュールの位相を制御することで電子走査を行うAESA(Active Electrically Scanned Array)の適用が主流になっている。AESAの性能向上のために、高周波送受信モジュールには高出力化の要求があり、GaAs(ガリウムヒ素)からGaN(窒化ガリウム)デバイスへの移行が進んでいる。三菱電機では長年、GaNデバイスを継続開発しており、その技術を適用した小型・高放熱デバイス技術を開発し、高周波送受信モジュールに適用している。今後、更なる高出力化を図って、防衛、宇宙機器に用いられるAESAレーダーの高性能化に貢献していく。

## 1. ま え が き

AESAは数百～数千素子の高周波送受信モジュールを使用している。AESAの高出力化は高周波送受信モジュールの高出力化によって実現する。当社では長年、GaNデバイスを継続開発しており、その技術を適用した高周波送受信モジュールも並行して開発を進めている。本稿では、高周波送受信モジュールに対する開発課題である、小型化と高放熱化を両立するGaNデバイス及びモジュール開発に対する取組みを述べる。

## 2. 高周波送受信モジュールの概要

図1に高周波送受信モジュールの概要(ブロック図)を示す。高周波送受信モジュールは送受信信号の増幅及び信号の利得・位相制御、送受信信号切替機能を持つ。モジュール内部には増幅回路として送信信号を増幅するための高出力増幅器(HPA: High Power Amplifier)、ドライバー増幅器(DA: Driver Amplifier)、受信信号を増幅するための低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)を備えて、制御回路として信号の位相を制御する移相器、振幅を制御する減衰器、送受信信号を切り替えるスイッチ1、LNAを送信出力から保護するスイッチ2と終端を備えて、アンテナからの入力信号、アンテナへの出力信号はサーキュレーターによって振り分けている。

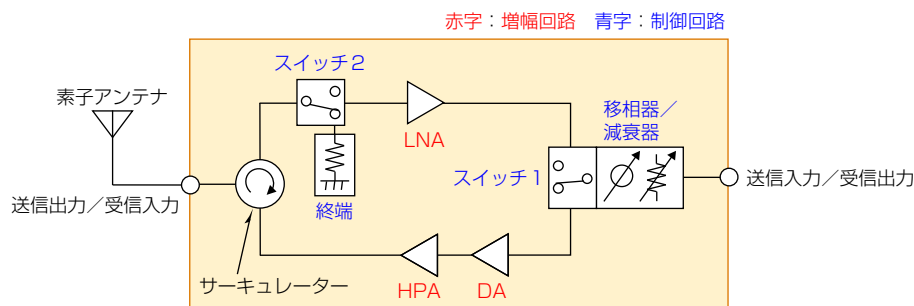


図1-高周波送受信モジュールの概要(ブロック図)

図2にAESAでの高周波送受信モジュールの実装形態を示す。ブリック型<sup>(1)</sup>は、図1のモジュール構成品を一つの筐体(きょうたい)に実装し、素子アンテナに対して1対1で接続する。この構成では、故障等によるモジュール交換は1素子単位で容易に行えるため、整備性に優れている。ブレード型<sup>(2)</sup>は主に小型アンテナ向けで、一枚基板に複数素子の送受信モジュールを実装しており、1素子単位のブリック型に比べてシャシ等の構造体を省略できることから小型・軽量化が図

れる。タイル型<sup>(3)</sup>は主に薄型アンテナ向けで、アンテナ素子面と平行な面方向に高周波送受信モジュールを実装する。アンテナを薄くできるが、アンテナ1素子の限られた面積内にモジュールを実装する必要があるため、モジュールの小型化、すなわち高密度化が必要になる。GaNトランジスタは従来マイクロ波帯で使用されてきたGaAsトランジスタと比べて数倍の高電圧動作が可能であり、それに比して数倍の出力電力が期待できるが、発熱量も増加するため、トランジスタの性能、寿命を担保するためにトランジスタのチャンネル温度の低減、すなわち高放熱化が課題になる。

当社ではこれらの課題に対応する技術として小型・高放熱デバイス技術の開発を進めており、3章で開発事例を述べる。なお、本稿ではICをパッケージングしてモジュールに実装可能な状態としたものをデバイスと定義する。

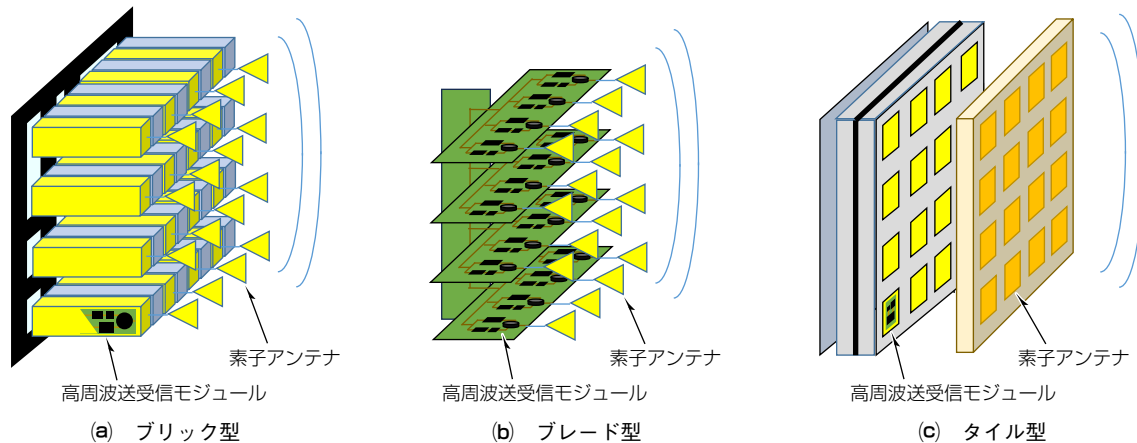


図2-AESAでの高周波送受信モジュールの実装形態

### 3. 小型・高放熱デバイス技術

#### 3.1 小型・高放熱デバイス技術1 (SMART MDL)

当社で開発した表面実装非放射／SMART MDL<sup>(4)</sup> (Surface Mounted Anti-Radiation Tr MoDuLe)は、電磁シールド化したデバイスを表面実装することでEMI(Electro Magnetic Interference)対策用の構造体を不要にし、低コストかつ小型化を実現したモジュールであり、ブリック／ブレード型に適用可能である。この節ではSMART MDLのGaN IC部に適用した小型・高放熱デバイス技術について述べる。

図3に小型・高放熱デバイスの実装断面模式図を示す。このデバイスの基材は低コストを目的に樹脂基板を選定し、金属カバーでGaN ICをパッケージする構造とした。樹脂基板は熱伝導性が低い対策として銅コインを挿入し、母基板側にも銅コインを挿入することで冷却板までの熱抵抗を低減させた。GaN ICと銅コインの間のCu-Mo(銅-モリブデン)キャリアはGaN ICと銅コイン及び樹脂基板との線膨張係数差の不整合を緩和している。小型・高放熱デバイスの裏面電極と母基板ははんだ接続しており、放熱シートを介して冷却板に母基板ごとねじ止める構造とした。

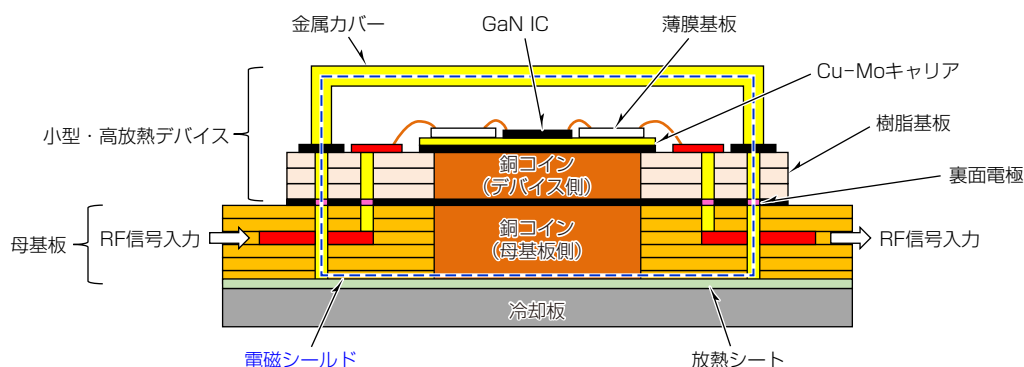


図3-小型・高放熱デバイスの実装断面模式図

メタルパッケージ、プラスチックパッケージ等、従来のパッケージ構造では、入出力のRF(Radio Frequency)信号ラインや端子が露出する構造になっており、基板との接続部からマイクロ波が放射することで発振や周波数リプルが発生する問題があった。これに対して、このデバイスは外周をグランド端子で囲ったRF信号端子とバイアス端子をデバイス裏面に配置し、はんだ接続する母基板も含めてRF信号ライン、バイアスラインを図3の青点線で示す疑似グランド壁で電磁シールドする構造にすることによってマイクロ波の放射を抑制するとともに、従来用いていた金属筐体や電波吸収体などを不要にし、高密度実装・小型化を実現した。また、従来のプラスチックパッケージではモールド材による出力低下が課題になっていたが、小型・高放熱デバイスではカバー内を中空構造にでき、出力低下の課題も解決している。

図4にSMART MDLの外観を示す。サイズ49×32mm(2素子)、質量17g、周波数はX帯で、小型・高放熱デバイス技術を適用した2素子一体の表面実装非放射モジュールである。ブリック型の送受信モジュールとして2素子ごとにモジュール交換が可能であり、小型化によって従来のブリック型配置に比べてアンテナ素子数を増やすことが可能になった。さらに、一枚のモジュール基板上に更に多数のデバイスを配置することも可能であり、ブレード型の高周波送受信モジュールにも適用可能である。

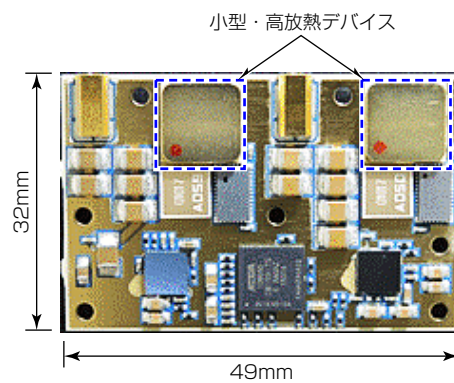


図4-SMART MDL

図5にSMART MDLの出力電力及び電力付加効率特性を示す。横軸は規格化した周波数で表記している。X帯で比帯域15%にわたって出力41.5～43dBm、効率29.0～33.5%の良好な性能が得られている。

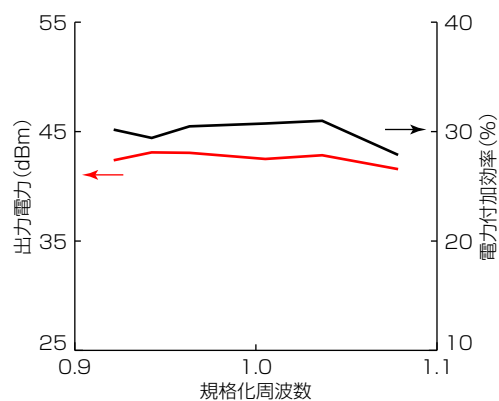


図5-SMART MDLの出力電力及び電力付加効率特性

### 3.2 小型・高放熱デバイス技術2 (eSTT MDL)

図2(c)のタイル型に対応する高周波送受信モジュールを実現するため、小型電磁シールド・高放熱/eSTT MDL<sup>(5)</sup> (em-shielded Superior Thermal conductive Tr MDL)を開発した。タイル型アンテナに対応する高周波送受信モジュールは、配置制約上1素子当たりの実装面積をアンテナ素子ピッチよりも小型にする必要があり、高度な集積化が要



求される。一方、高集積化した高周波送受信モジュールでは放熱パスを十分確保することが難しく、高出力動作時の発熱量増加が原因でブリック型やブレード型と同等の送信出力を確保することが困難であった。eSTT MDLでは電気信号と放熱パスを別方向にすることで放熱パスを確保するとともに、高周波送受信モジュールに必要な増幅回路、制御回路の機能を一つのデバイスに集約することで小型化・高放熱化を実現した。

図6にeSTTの実装断面模式図を示す。増幅回路、制御回路に用いる各ICはデバイスパッケージ基板上に銅ピラーとハンダを介してフリップチップ実装し、IC背面にはヒートシンクを取り付ける。電気信号であるRF信号、バイアス、制御信号はパッケージ基板を介して図6で示すデバイス下面のモジュール基板に接続し、ICで発生する熱はヒートシンクを介して上面の冷却板に伝達される。電気信号をデバイス下面に、放熱パスをデバイス上面に分けたことでデバイス上面全面を放熱エリアとして使用でき、従来のブリック型と同等の優れた放熱性能を得ることができる。また、このデバイスの構成はフリップチップしたIC以外の部品は表面実装部品であり、従来デバイス製造で用いている部品間のワイヤー配線等のプロセスが不要になるため、組立てコストを抑制できる。

電磁シールドについては、IC、ヒートシンク、表面実装部品を樹脂でモールドした後に、デバイス外周をメタライズ（電磁シールドコーティング）することで実現する。電磁シールドによって近接デバイスへの電磁干渉を抑圧し、複数デバイスを近接に配置し、高密度実装が可能になる。

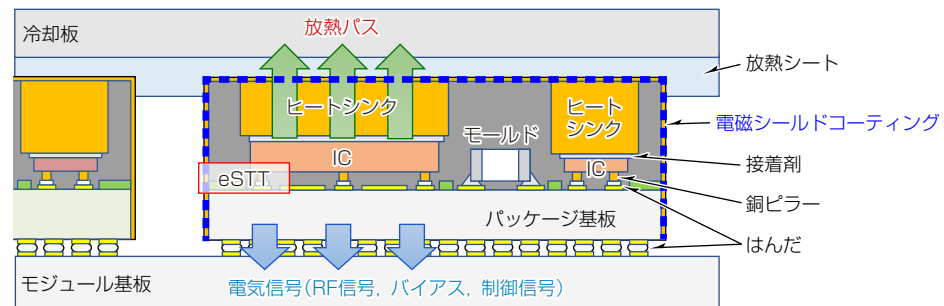


図6-eSTTの実装断面模式図

図7にeSTT及びメタルパッケージについて、GaNトランジスタのチャネル温度を熱解析した結果を示す。ブリック型のモジュールに実装した状態で解析を行い、IC上のGaNトランジスタと同じ発熱条件にしてチャネル温度を算出した。解析結果からチャネル温度に大きな差はなく、高密度なeSTTでもブリック型に実装したメタルパッケージと同等の放熱性能が得られることを確認した。

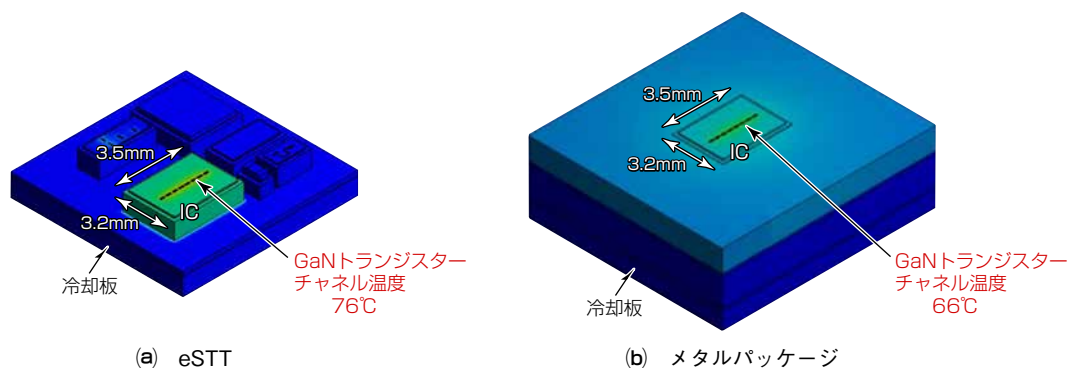


図7-熱解析結果

図8に当社で開発した試作eSTT MDLの外観を示す。モジュール基板上にeSTTを2個実装している。複数のICをワンパッケージ化することで一つのデバイスだけで増幅回路／制御回路の機能を備えている。試作eSTT単体は、寸法9.2×9.4mm(厚さ2.3mm)である。

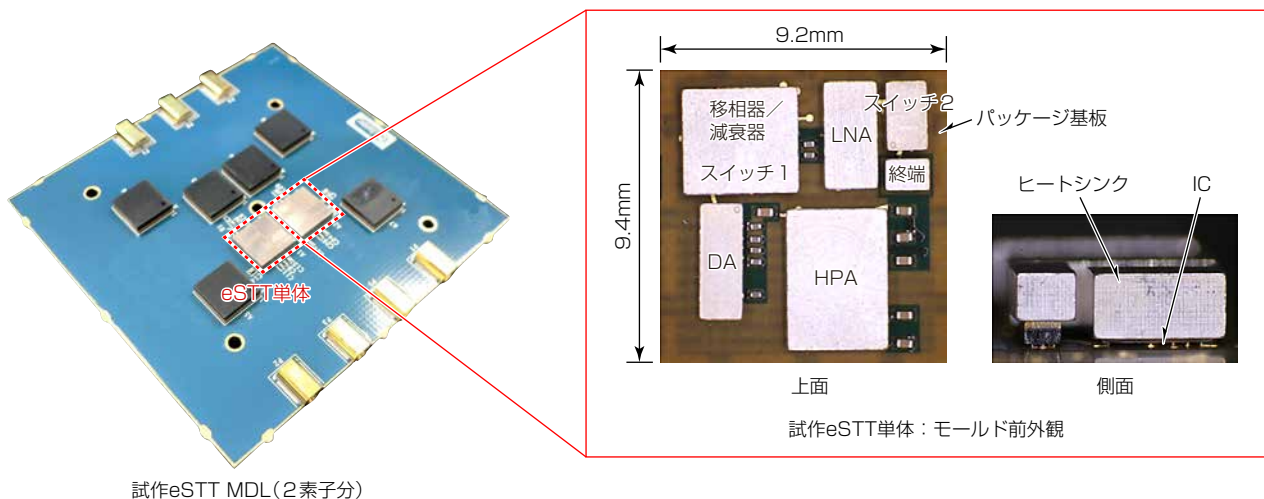


図8-試作eSTT MDL

図9に試作eSTT MDLの出力電力及び電力付加効率特性を示す。横軸は規格化した周波数で表記している。X帯20%の帯域幅で出力電力は43dBm以上、電力付加効率は15%以上が得られている。

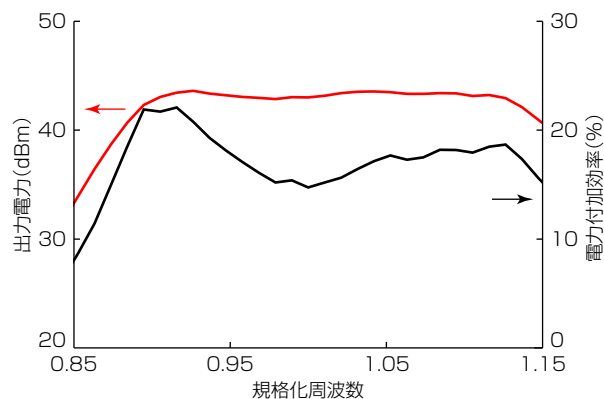


図9-試作eSTT MDLの出力電力及び電力付加効率特性

#### 4. 更なる高放熱化に向けた今後の取組み

3章で小型・高放熱デバイス技術について述べた。更なる高出力要求に対しては、ICとヒートシンクの接続に、優れた熱伝導性の接合材を使用すること、ICの発熱をより広範囲に熱拡散するヒートシンク材を適用することが有効である。パワーデバイスの分野ではAg(銀)粒子を用いた焼結接合による高放熱化を実現しており<sup>(6)</sup>、半導体ICの接合材として金属粒子による焼結結合が適用可能か検討を開始した。ヒートシンク材としては、高熱伝導率材を複合化したAg-Diamond<sup>(7)</sup>や、熱異方性のあるグラファイトブロック<sup>(8)</sup>の製品適用化を検討している。今後、高周波のGaNデバイスにこれらの高熱伝導材を適用することで、高周波送受信モジュールの更なる高出力化を進めていく予定である。

#### 5. む す び

高周波送受信モジュールの技術開発として、SMART MDLに適用した小型・高放熱デバイス技術、eSTT MDLに適用した小型電磁シールド・高放熱デバイス技術について述べた。今後、高熱伝導材を適用することで高周波送受信モジュールの更なる高出力化を図り、防衛、宇宙機器に用いられるAESAレーダーの高性能化に貢献していく。

## 参考文献

- (1) Rieger, R., et al. : GaN Based Wideband T/R Module for Multi-Function Applications, 2015 European Microwave Conference, 514~517 (2015)
- (2) Navarro, J.A. : Affordable electronically scanned apertures through heterogeneous integration, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (2005)
- (3) Billstrom, N., et al. : X-band sub-antenna for low cost AESA radars, 2009 European Microwave Conference (2009)
- (4) Tarui, Y., et al. : X Band Low-Cost GaN TR Module with Anti-Radiation Structure, 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2016)
- (5) Kimura, M., et al. : An X-band High Power Tile-Type GaN TR Module for Low-Profile AESA, 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2021)
- (6) 中原健太, ほか : 高温動作パッケージ構造, 三菱電機技報, **92**, No.3, 167~170 (2018)
- (7) 株アライドマテリアル : 次世代放熱基板開発(MAGSIC, Ag-Diamond, CPC-300)  
<https://www.allied-material.co.jp/research-development/heatspreader.html>
- (8) 山田 靖, ほか : 高熱伝導グラファイトのパワー半導体モジュール放熱板への適用可能性, エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, **30**, 442~445 (2016)

~~~~~

# 美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステム

Misasa Deep Space Station Antenna Subsystem

\*電子通信システム製作所

## 要 旨

美笹(みささ)深宇宙探査用地上局アンテナサブシステムは、臼田宇宙空間観測所64mアンテナ設備の後継として、長野県佐久市の臼田宇宙空間観測所美笹局に建設した大型アンテナ設備である。

X帯送受信及びKa帯受信の探査機運用に対応しており、将来の機能拡張に向けて段階的に装置を追加できる拡張性も持っている。三菱電機の大型アンテナや望遠鏡設計のノウハウを集約し、高効率な鏡面修整リングフォーカスカセグレ方式、周波数選択反射鏡を含む集束ビーム給電方式、実績のあるマスターコリメーター方式及び55kW ACサーボモーターを用いたアンチバックラッシュ駆動方式を採用している。高い鏡面精度と指向精度を実現するため、熱・構造設計に空冷ファンによる日射への熱対策を積極的に取り入れており、従来設備の臼田宇宙空間観測所64mアンテナ設備と同等以上の受信性能を実現している。

このアンテナは、2016年1月に設計着手し、2020年9月に納入した。2023年5月には機能付加工事も完了し、現在は主小惑星探査機“はやぶさ2”の運用に利用されている。

## 1. ま え が き

美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステムは、深宇宙探査機の追跡管制やミッションデータの受信を行うことを目的に整備された大型アンテナである(図1)。この設備は当社の大型アンテナや望遠鏡設計のノウハウを集約することで、既存の臼田宇宙空間観測所64mアンテナより開口径が10m小さいにもかかわらず同等以上の性能を実現している。

本稿では、設備の概要と採用した技術について述べる。



©JAXA/GREAT2 プロジェクト



図1-美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステム

## 2. アンテナサブシステムの概要

### 2.1 アンテナサブシステムの特長

美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステムは、はやぶさ2、MMO(Mercury Magnetospheric Orbiter)など深宇宙探査機の追跡管制やミッションデータの受信を行うことを目的に、臼田宇宙空間観測所美笹局に建設した地上局システムである。当社以外が整備した送受信サブシステムや低雑音受信増幅設備、基準信号／時刻標準装置、施設／基盤設備とインターフェースし、相模原キャンパス及び筑波宇宙センターからの探査機の追跡管制及びミッション運用を行うことが可能である。

### 2.2 アンテナサブシステムの主要性能

アンテナサブシステムの主要性能諸元を表1に示す。

表1-美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステムの主要性能諸元

アンテナ開口径	54m $\Phi$	
アンテナ形式	修整リングフォーカスカセグレン	
周波数帯	X帯送受信, Ka帯受信	Ka帯(32GHz帯, 19GHz帯, 22GHz帯, 26GHz帯)
X帯受信G/T	54.02dB/K以上(実測値, Effective G/T)	仰角15°, 現地実測値を設計条件に換算した値
Ka帯受信G/T	59.61dB/K以上(設計値, Effective G/T)	仰角15°(詳細設計報告書)
X帯送信利得	70.14dBi以上(設計値)	仰角80°(詳細設計報告書)
送信耐電力	20kW以上	
アンテナ駆動範囲	AZ: 北を0°として, 180° $\pm$ 270°以上	
	EL: 水平を0°として, 7°から90°まで	
最大駆動速度	AZ/EL共に1°/s以上	
最大駆動加速度	AZ/EL共に1°/s <sup>2</sup> 以上	

AZ: Azimuth, EL: Elevation

## 3. アンテナサブシステムの構成

アンテナサブシステムは、アンテナ装置、アンテナ給電装置、アンテナ制御装置、アンテナ付帯装置で構成している。アンテナサブシステムのシステム系統図を図2に示す。

### 3.1 アンテナ装置

アンテナ装置は直径54mの主反射鏡、直径5mの副反射鏡及び集束ビーム給電系を持つ修整リングフォーカスカセグレンアンテナであり、高い鏡面精度を得るためにホモロジー設計法を応用している。アンテナ装置には2階建てのアンテナ機器室を設けており、アンテナサブシステムの機器だけでなく、低雑音受信増幅装置、送受信サブシステムの装置を取納している。

アンテナ装置は高い鏡面精度や指向精度を要求されている。その実現のため構造系設計で実施した対策の一例について述べる。

#### (1) バックキングストラクチャー

主反射鏡を支持するバックキングストラクチャーは鏡面精度や指向精度に対する熱変形感度が高いため、図3に示す熱対策を採用している。

主反射鏡パネルと日よけカバーの表面には白色塗装をすることによって入熱を抑制し、さらにそれぞれの裏面は低放射率塗料を塗装することで輻射(ふくしゃ)による温度上昇を抑制している(特許出願済み)。

また強制空冷用ファンでメインリブ内に外気を取り込んで外気温に追従させることで外気温とアンテナ構造物の間の温度差発生を抑制し、構造物内の熱変形の偏在に起因するひずみを最小化させて、鏡面形状を高精度に保持している。さらに日よけカバーの内側やメインリブ内の温まった空気を自然換気できるように日よけカバーに隙間を設けている。



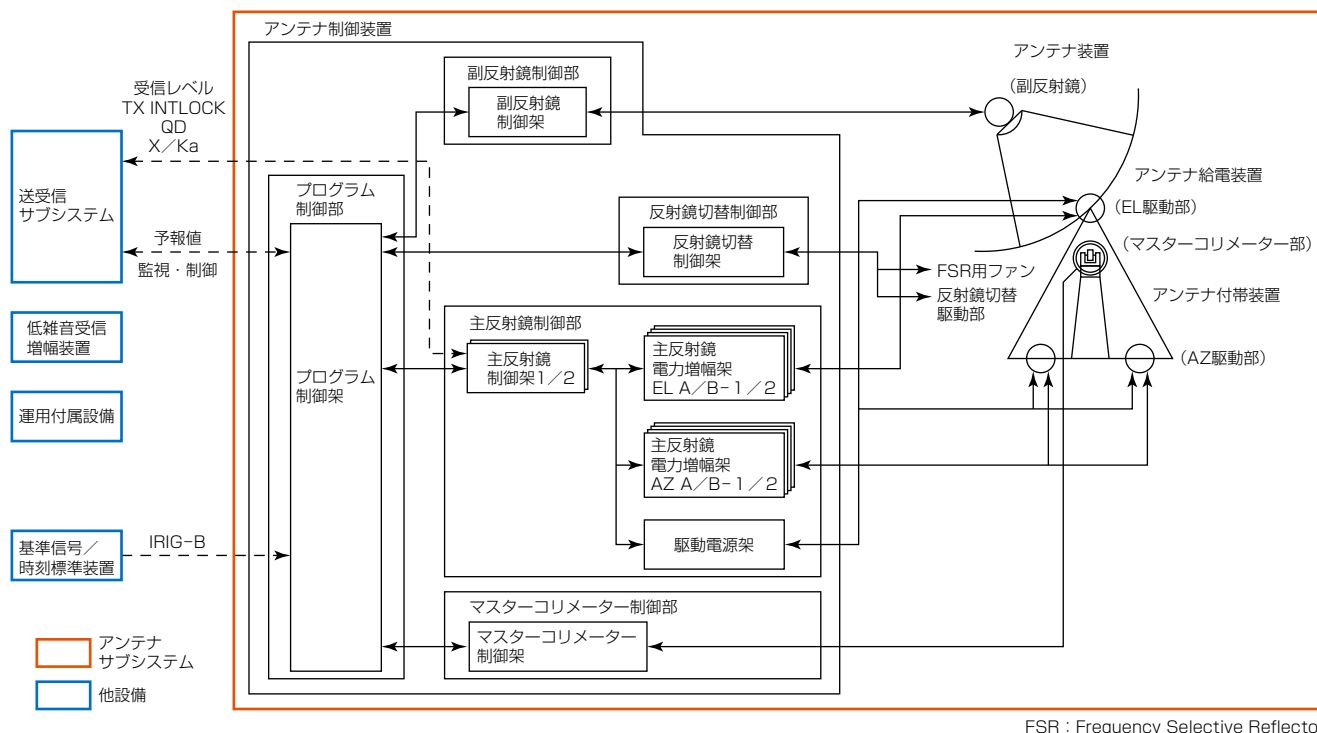


図2-アンテナサブシステムのシステム系統図

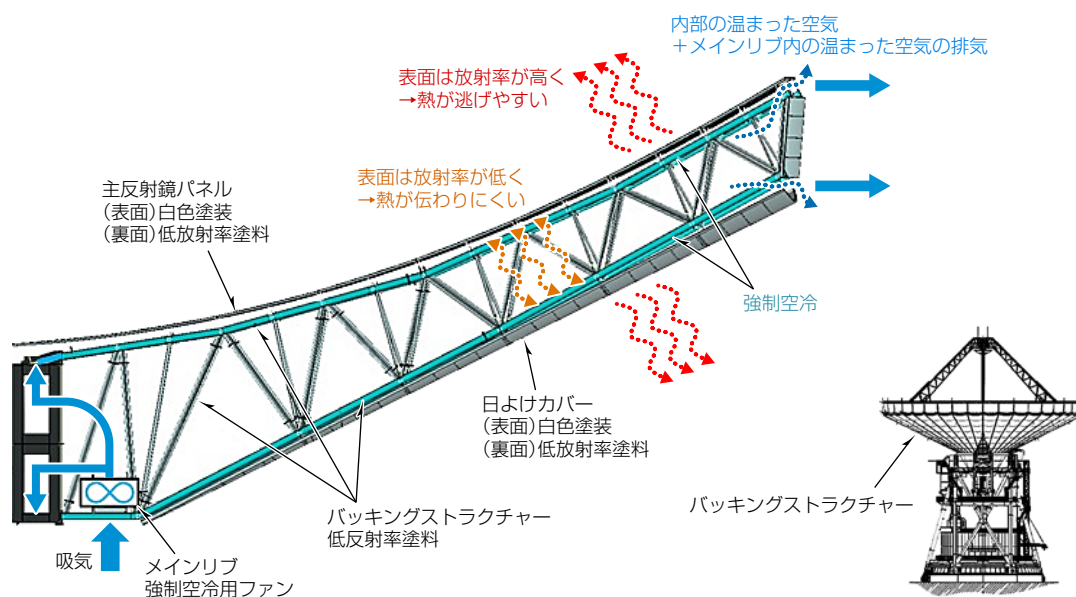


図3-バックングストラクチャーの熱対策

## (2) マスターコリメーター

マスターコリメーターのイメージを図4に示す。大型アンテナで高い指向精度を満たすためには、通常のAZ、EL軸での角度検出ではなく、主反射鏡そのものの指向方向を直接測定することが有効である。そこで、主反射鏡構造の束ねであるセンターリングに固定された平面鏡(コリメーターミラー)に光を当てて、その反射方向をコリメーターで測定することによって、主反射鏡そのものの指向方向を測定する。アンテナ基礎とは独立したタワー構造を設けAZ・EL交点にマスターコリメーターを設置することで、マスターコリメーターを基準とした角度誤差の検出・補正を行い、高い指向精度を得る方式を採用している。熱変形によって、基準になるマスターコリメーターの位置に誤差が生じてしまうと、正確に補正を行うことができないため、マスターコリメーターを支えるマスターコリメータータワーには、日よけカバー・断熱材の取付けによる入熱抑制や強制空冷による温度むら抑制を行っている。温度むら抑制の方法は空気攪拌(かくはん)ダクトを介してタワー内にファンの空気を送り込むことで、温度の均一化を図り、タワーの周方向の温度むらを抑制している。



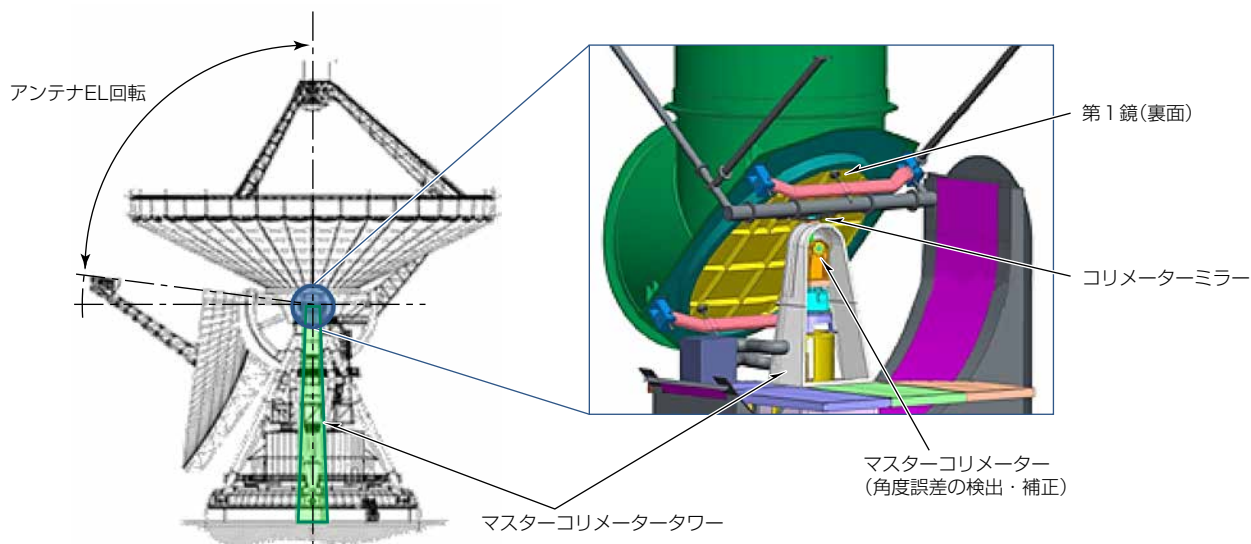


図4-マスターコレレーターのイメージ図

### 3.2 アンテナ給電装置

アンテナ装置，集束ビーム給電系を含めたアンテナ放射給電系のブロック図を図5に示す。

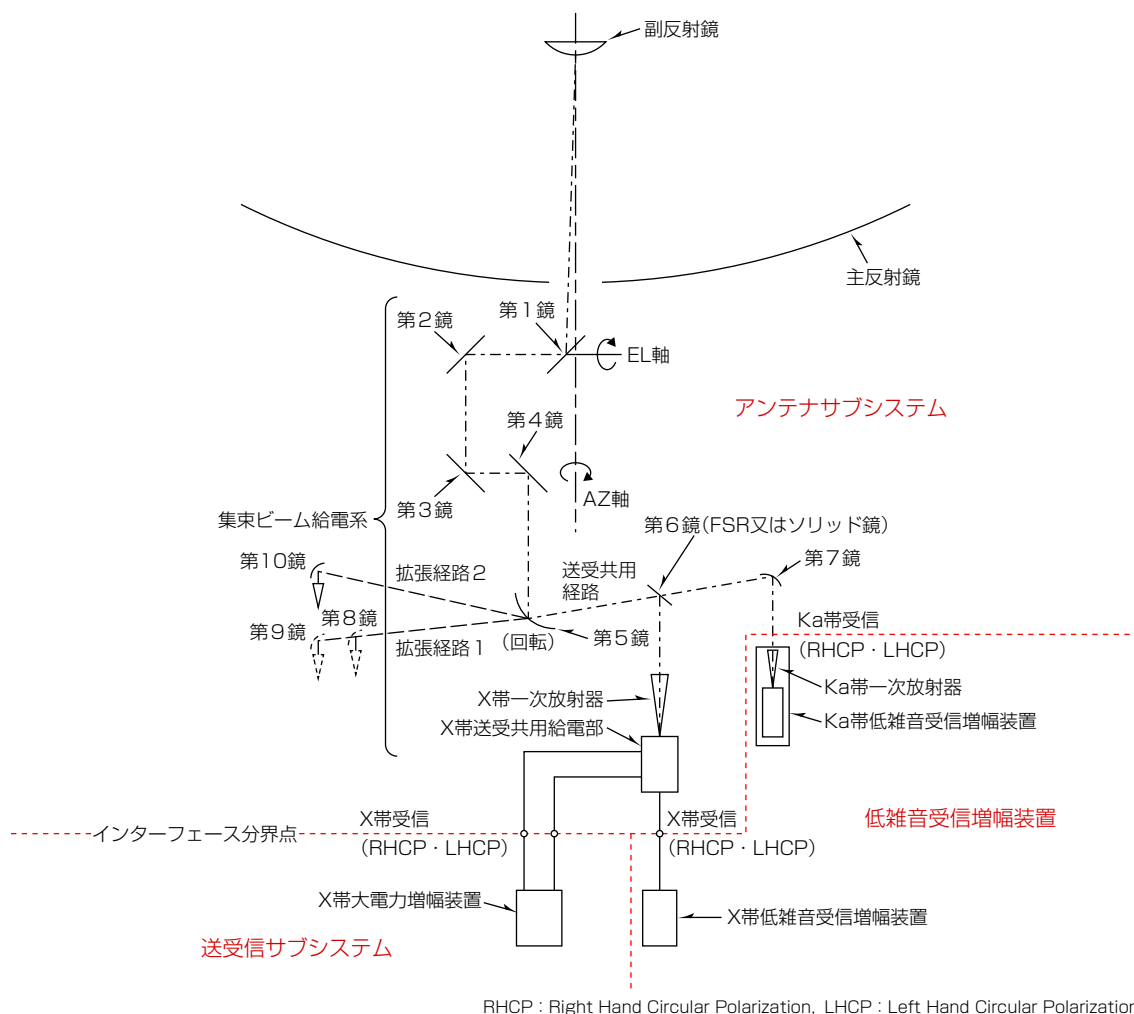


図5-アンテナ放射給電系ブロック図

アンテナ放射給電系は、X帯送受信及びKa帯受信を行う送受共用経路(第6鏡下、第7鏡下)のほかに拡張経路を2系統設けている。経路の切替えは第5鏡を回転することによって実現する。

拡張経路1(第8鏡下、第9鏡下)は将来拡張用としており、拡張経路2(第10鏡下)には将来衛星対応として送受共用経路(第6鏡下、第7鏡下)とは異なる周波数帯(19GHz帯、22GHz帯、26GHz帯)を受信できるよう整備されている。

送受共用経路(第6鏡下、第7鏡下)の動作と設計内容を次に述べる。

#### (1) X帯送信系

X帯送受共用給電部は、送受信サブシステムとのインターフェースから入力されたX帯送信信号を円偏波に変換し、X帯一次放射器に給電する。X帯一次放射器は、X帯送信信号を集束ビーム給電系に照射し、副反射鏡、主反射鏡を介して、自由空間へ放射する。

#### (2) X帯受信系

自由空間から到来するX帯受信信号は、主反射鏡、副反射鏡を介して集束ビーム給電系に伝えられる。集束ビーム給電系の第6鏡はFSRとソリッド鏡の選択方式になっている。FSR使用時は第6鏡でX帯受信信号とKa帯受信信号の分波が可能になる。X帯一次放射器で受信したX帯受信信号は、円偏波の状態のままX帯送受共用給電部から低雑音受信増幅装置とのインターフェースに伝えられる。

#### (3) Ka帯受信系

自由空間から到来するKa帯受信信号は、主反射鏡、副反射鏡を介して集束ビーム給電系に伝えられる。第6鏡にFSRを使用することでX帯受信信号とKa帯受信信号を分波し、第7鏡を介してKa帯一次放射器でKa帯受信信号を受信する。

Ka帯一次放射器は低雑音受信増幅装置のクライオスタット内部に設置されるため、低雑音受信増幅装置とのインターフェースはKa帯一次放射器開口になる。

### 3.3 アンテナ制御装置

アンテナ駆動制御系は、図2に示すように主反射鏡制御部、副反射鏡制御部、マスターコリメーター制御部の3系統で構成している。主反射鏡制御部はアンテナ装置のAZ及びEL各4台のモーターによるアンチバックラッシュ駆動を制御している。副反射鏡制御部は主反射鏡の重力変形に応じて副反射鏡の位置及び姿勢が最適になるよう制御している。マスターコリメーター制御部はマスターコリメーターのAZ及びELを制御している。

探査機の軌道予報値に従ってマスターコリメーターを駆動し、マスターコリメーターを基準とした光学角度誤差によって主反射鏡を駆動することで高い指向精度を実現している。

## 4. む す び

美笹深宇宙探査用地上局アンテナサブシステムの概要と、採用した技術について述べた。この設備は2020年9月にJAXA(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構)に納入した。また、2023年5月にはアンテナサブシステムとしての機能付加工事を完了しており、地上局としては2024年3月まで機能付加後の施行運用を行った。今後、水星磁気圏探査機“みお”、火星衛星探査計画“MMX(Martian Moons eXploration)”，深宇宙探査技術実証機“DESTINY+”，NASAが開発を進めるナンシー・グレイス・ローマン宇宙望遠鏡、二重小惑星探査計画“HERA”等の運用に利用される計画である。開発に際して、JAXAの多大な支援を始め、多くの関係者からの支援・協力に深謝する。

## 参 考 文 献

- (1) 大西 徹，ほか：GREATのシステム設計，第62回宇宙科学技術連合講演会講演集，3C05 (2018)
- (2) 阿戸弘人，ほか：GREATのX帯/Ka帯アンテナ技術，第62回宇宙科学技術連合講演会講演集，3C06 (2018)

三菱電機株式会社