

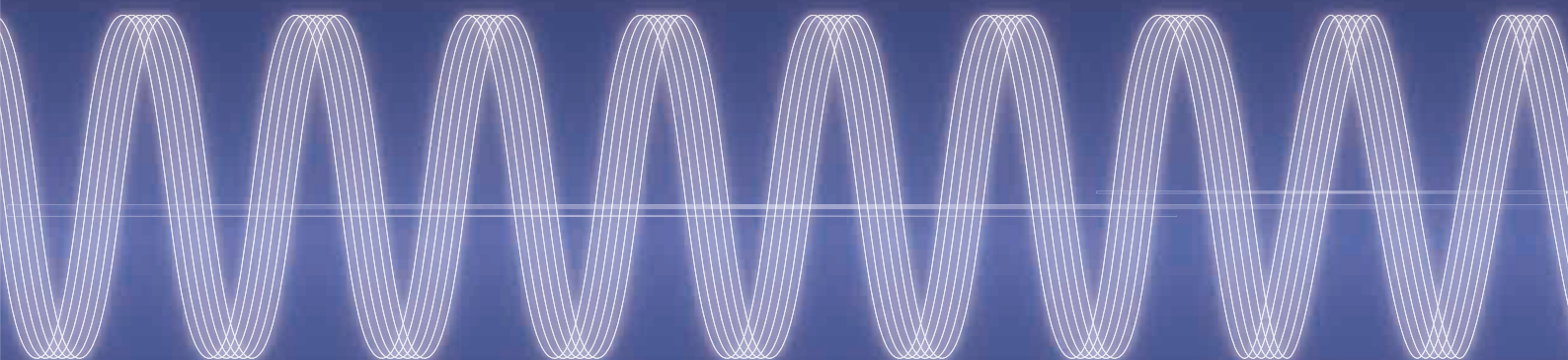
島田理化技報

No.28 (2023)

SPC Technical Report

特集

- カーボンニュートラル社会に向けたパワーエレクトロニクス技術
- マイクロ波・ミリ波技術の進化と社会への貢献



目 次

■巻頭言

高周波技術で時代のニーズに応える	1
田中 智明	

■寄稿

EV用非接触給電の大容量化～SAE J2954 コイルの性能評価と複数台合成駆動の検討～	2
埼玉大学 理工学研究科教授 金子 裕良	
SYNSPECTIVEビジネス概要と地球観測を行う小型SAR衛星「STRIX」（ストリクス）の実用化	7
株式会社Synspective 小畑 俊裕	

■特集論文 カーボンニュートラル社会に向けたパワーエレクトロニクス技術

カーボンニュートラル社会へ向けたIH技術と製品展開	14
末松 岳春	
電気自動車（EV）向けワイヤレス給電実証実験装置	17
浜田 深造 / 片岡 辰雄 / 田内 良男	
I H用高効率PWMインバータの製品ラインナップ	23
松原 佑輔 / 石間 勉	

■特集論文 マイクロ波・ミリ波技術の進化と社会への貢献

我々の生活を支えるマイクロ波製品	29
高橋 利昌	
6バンド対応広帯域低雑音Q-Band LNBの開発	31
佐藤 守 / 日下 洋 / 北上 景一 / 池田 篤史	
ミリ波帯広帯域アイソレータの開発	36
生駒 俊治 / 田添 晃 / 浅利 哲	
ローカル5Gや衛星通信用モジュールへの適用を目指したKa帯BGAサーキュレータの開発	41
北上 景一 / 佐藤 圭 / 田添 晃 / 浅利 哲	
マイクロ波コンポーネントの3Dプリンティングと性能評価	46
根本 淳一 / 百地 俊也	

■トピックス

「優秀省エネ脱炭素機器・資源エネルギー庁長官賞」受賞	51
広帯域チューナブルフィルタ	52
導波管コンポーネントにおける地球温暖化対策	53

■製品紹介

タカシミュレータ	54
マイクロ波／光変換（RoF）モジュール	55
LINAC用Sバンドパルスクライストロン	56
小型衛星SAR用給電導波管	57

■特許紹介

プリント配線基板 特許第7001734号	58
インバータ装置およびインバータ装置の制御方法 特許第6959432号	59
インバータ装置およびインバータ装置の制御方法ならびにヒートヒーター 特許第7060737号	60
インバータ回路 特許第7157220号	61

■コラム

当社の技術開発の歩みと将来	
松本 操一	62

■ 巻頭言

高周波技術で時代のニーズに応える

代表取締役社長
田中 智明
Tomoaki TANAKA



1. 島田理化工業について

島田理化工業は創業以来培ってきた高周波技術（マイクロ波・ミリ波技術、高周波パワーエレクトロニクス）を軸として通信電子分野と産業機器分野でコンポーネントからシステムまでさまざまな製品とサービスの提供をしてまいりました。これらの事業分野と関連する技術は日々進歩しており、お客様のニーズも社会の変化と共に多様化・高度化しています。私たち、島田理化工業は社会の変化と技術の潮流を俊敏に感じ取り、時代のニーズに応えていく所存です。

2. 変化する社会、多様化・高度化するお客様からのニーズ

近年、世界では新型コロナウイルス感染症の大流行、気候変動による災害激甚化、国際情勢の変化など数多くの課題が発生しています。また、これらの危機感から世界的なニーズとしてサステナビリティが重要視されるようになり、中でも脱炭素社会の早期実現は気候変動対策として社会全体で取り組むべき最重要課題となっております。

更にコロナ禍を転機に社会全体がニューノーマル（テレワークの普及、DXの加速）に変化しており、中でも急速に展開されつつあるのが小型衛星コンステレーションサービスであります。航空機、船舶、離島、災害地といった地上通信ネットワークが利用できない場所におけるデジタルデバインド解消のための衛星通信サービスや、リアルタイム地球観測による災害監視、安全保障上のニーズも高まっております。

3. 高周波技術で時代のニーズに応える

今回の技報では、このような社会の変化と時代のニーズに応えるべく、島田理化工業がいち早く技術開発を行ってきた内容を紹介いたします。

脱炭素社会の早期実現ニーズに対しては、省エネ IH インバータに当社独自の PWM 制御方式を開発、従来比最大約 30%の業界トップクラスの省エネ化を実現・製品化し、22 年度の「優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰 資源エネルギー庁長官賞」を受賞いたしました。更に、脱炭素需要に伴い普及が予測される電気自動車（EV）の運用に不可欠なワイヤレス給電用インバータの開発。また、電子・通信機器分野においても、従来は導波管コンポーネントの耐電力確保に使用されていた温室効果ガス（SF6）の代替ガス使用に向け、導波管コンポーネントの耐電力向上開発を実施いたしました。

小型衛星コンステレーションサービスの需要増加に向けては、衛星通信地球局用の広帯域低雑音 LNB 及びミリ波帯広帯域アイソレータ、高密度実装ミリ波帯 BGA MIC サーキュレータ、小型衛星 SAR 用給電導波管など、サービスの実現に貢献するさまざまな技術開発を実施いたしました。

島田理化工業は、刻々と変化する時代のニーズに対し、高周波技術を軸にタイムリーに応えてゆくと共に、品質の高い魅力ある製品の実現に向けて社員全員で取り組んでまいります。

今後とも引き続き変わらぬご愛顧を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

■ 寄稿

EV用非接触給電の大容量化 ～SAE J2954 コイルの性能評価と 複数台合成駆動の検討～

埼玉大学
教授



金子 裕良

Yasuyoshi KANEKO

1. まえがき

近年、CO₂ 排出の低減のため電気自動車 (Electric Vehicle, 以下 “EV”) の普及が進んでいる。バッテリーで駆動する EV への充電方法として、安全・保守・利便性の観点から非接触給電 (Wireless Power Transfer, 以下 “WPT”) 技術が注目されている^[1-2]。EV 向けの非接触給電システムは、米国の自動車技術者協会 (Society of Automotive Engineers, 以下 “SAE”) によって SAE J2954^[3] として規格が発行され広く研究^[4] や製品化が進められている。SAE J2954 において、コイルパラメータや参考コイル形状、回路方式などが示されているが、コイル最大電力は入力電力 11.1 kVA であった。2022 年 12 月により大電力な非接触給電の規格化として SAE J2954/2^[5] が発行され、出力電力 20 kW から 500 kW までの大電力の非接触給電システムが定義され、大電力非接触給電を実現する際に考慮すべき点を周知されている。大電力給電では回路内の電流や電圧が大きくなるが、先行研究^[1] では 2 系統に分け伝送することで各素子に要求される定格を緩和している。SAE J2954/2 においても、大電力給電に際して複数コイルを用いた給電の可能性について言及している。

本稿では、設計指針が示されている SAE J2954 の最大電力のクラス WPT3、かつ最もギャップ長が大きいクラス Z3 を選択し、規格書に参考表記された円形コイル (SAE J2954 WPT3/Z3 コイル) を作製して補償回路を含めた特性を解析すると共に、これらを 2 セット組み合わせた複数台合成駆動についても検討したのでこれを紹介する。

2. SAE J2954 WPT3/Z3 単独コイルの性能評価

2.1 SAE J2954 WPT3/Z3 の回路とコイル

図 1 に SAE J2954 WPT3/Z3 の回路図^[3]を示す。これは図 2 に示す DS-LCC 回路として解析できる。

簡素化のために、コイルや配線における銅損，アルミ板やフェライトにおける渦電流損やヒステリシス損といった鉄損，コンデンサにおける誘電損失は無視すると，DS-LCC 回路の入出力特性は (1) 式で表せる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & jX_{GA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} \frac{L_{GA}}{M} & \frac{(\omega M)^2 - \omega^2 L_{GA} L_{VA}}{j\omega M} \\ 1 & \frac{L_{VA}}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_4} + \frac{1}{j\omega C_5} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_{VA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

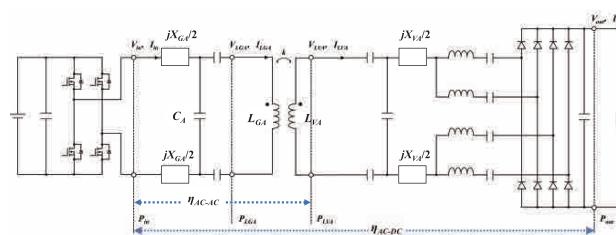


図1 SAE J2954 WPT3/Z3の回路図

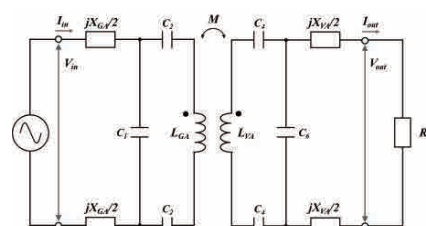


图2 DS-LCC回路



図3 SAE J2954 WPT3/Z3コイルの外観

送受電コイルのコイル形状、コイル定数や、 $C_1 \sim C_6$ のコンデンサ容量は本規格に記載されている。設計者には可変インピーダンスとして $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ が与えられ、負荷やギャップ長変動による入出力調整は送受電側各々の回路素子 jX_{GA} と jX_{VA} で調整している。また、SAE J2954 WPT3/Z3 参考の送受電コイル(円形コイル)を規格の仕様に沿って作製した。この外観を図 3 に示す。SAE J2954 WPT3/Z3 が定める $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$, 送受電コイル自己インダクタンス L_{GA} , L_{VA} , 結合係数 k を表 1 に、コイル間ギャップを Z3 に準じて 170mm から 250mm まで変化させときの L_{GA} , L_{VA} , k の測定値を表 2 に示す。

2.2 単独コイルでの 11 kW 給電 [6]

SAE J2954 WPT3 では、系統からの入力に 11.1 kVA とされているが、今回はより厳しい条件での性能を評価するため、出力電力を 11 kW に調整し実験を行う。何れのギャップ長、負荷抵抗値でも出力が 11 kW を超える可変インピーダンス $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ の組み合わせを回路シミュレーションにより検討し、実験は $jX_{GA}/2 = 8.0 \Omega$, $jX_{VA}/2 = 0 \Omega$ で行った。その際、出力のバッテリーを模擬した電圧源 (280 V, 332 V, 450 V) は、抵抗負荷 (7.13 Ω , 10.0 Ω , 18.4 Ω) に置き換えた。各ギャップ長、各負荷抵抗値に対する効率の実験値とシミュレーション値を図 4 に示す。どの条件でも給電効率は 85% を超えていることを確認した。また、接続配線や整流器などの素子の損失分だけ実験値は低下しているが、負荷抵抗値およびギャップ長変動に対する傾向はシミュレーション結果を一致している。

2.3 VA 側なしでの給電

VA 側が存在しない状態で電圧が入力された場合について検証した。GA コイルには前節の 11 kW 出力時の電圧 1000 V を印可した。回路入力部 (Input), 並列コンデンサ部 (CA), GA コイル部 (LGA) それぞれの電流、電圧、力率を表 3 に示す。各部の力率は非常に低く損失も小さい。また、コイルの中心から垂直方向 500 mm, 水平方向 1,000 mm の位置において narda 製の磁界測定器 ELT400 を用いて磁束密度を測定したところ 3.41 μT となり、ICNIRP 2010 の公衆向けの制限値 27 μT を下回っている。

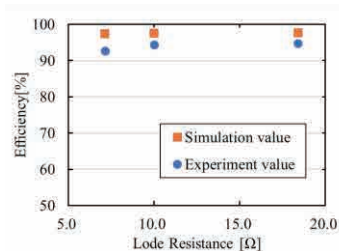
3. 複数台合成駆動の検討

表1 WPT3/Z3の各変数の範囲

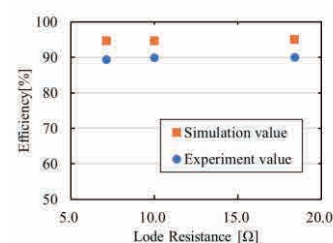
Parameter	Range
$jX_{GA}/2[\Omega]$	4~16
$jX_{VA}/2[\Omega]$	-15~0
$L_{GA}[\mu\text{H}]$	37.4~38.7
$L_{VA}[\mu\text{H}]$	39.3~40.0
k	0.087~0.229

表2 実機コイルの測定結果

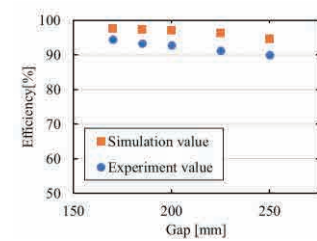
Gap [mm]	170	185	200	225	250
$L_{VA}[\mu\text{H}]$	37.40	37.35	37.50	37.76	37.93
$L_{GA}[\mu\text{H}]$	38.30	38.17	38.03	37.95	37.98
k	0.16	0.14	0.12	0.10	0.07



a) Gap 170 mm



b) Gap 250 mm



c) 負荷抵抗10.0 Ω

図4 単独コイル11kW出力時の効率

表3 VAコイルなしの測定値

	Voltage [V]	Current [A]	power factor
Input	115.36	22.73	0.0462
C_A	476.81	69.66	-0.0010
L_{GA}	1010.40	47.17	-0.0047
Magnetic flux density	3.41 μT		

3.1 コイル間の相互インダクタンス

コイル 2 台を並べて配置した外形を図 5 に、回路図を図 6 に示す。 r_{GA1} , r_{GA2} , r_{VA1} , r_{VA2} は各コイルの巻き

線抵抗, L_{GA1} , L_{GA2} , L_{VA1} , L_{VA2} は各コイルの自己インダクタンス, $M_1 \sim M_6$ はコイル間での相互インダクタンスである。それぞれのコイルにかかる電圧と電流の関係は (2) 式で表される。

$$\begin{bmatrix} V_{GA1} \\ V_{VA1} \\ V_{GA2} \\ V_{VA2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{GA1} + j\omega L_{GA1} & j\omega M_1 & & & & \\ j\omega M_1 & r_{VA1} + j\omega L_{VA1} & & & & \\ j\omega M_2 & j\omega M_4 & r_{GA2} + j\omega L_{GA2} & & & \\ j\omega M_3 & j\omega M_5 & j\omega M_6 & r_{VA2} + j\omega L_{VA2} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{GA1} \\ I_{VA1} \\ I_{GA2} \\ I_{VA2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

これを用いて, コイル単体の自己インダクタンス, 巻線抵抗から各コイル間の相互インダクタンスを求めることができる。コイル 2 台の中心間距離を 800 mm, コイル間ギャップは Z3 の範囲で最も結合が大きくなる 170 mm 時の $M_1 \sim M_6$ を測定した結果を表 4 に示す。横, 斜め方向のコイル間の結合 (M_2 , M_3 , M_4 , M_5) は正対するコイル間の結合 (M_1 , M_6) に比べて無視できる程度に小さい。

3.2 合成回路の分割と可変インピーダンスの決定⁷⁾

2 台での給電時の合成方法には図 7 に示す直列接続と並列接続が考えられる。出力電圧 280~450 V となるようにしたとき, 出力電力が 11 kW となる負荷抵抗 R_L を $R_L=R$ とすると, R を並列に接続, $R/4$ を直列に接続すると負荷抵抗全体でそれぞれ 22 kW の出力を得る。ここで正対するコイル間以外の結合は無視できるので, 負荷抵抗に対して対称となる 2 つの回路を各々独立した単体の回路として考える。単体の回路において $R_L=R$, $R/4$ で出力電力が 11 kW となる回路であれば, 2 台接続することで 22 kW の出力電力を得ることが可能となる。

単体の回路において $R_L=R$, $R/4$ のとき, 入力電圧 500 V 一定で 11 kW 以上の出力電力を得る $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ の組み合わせをシミュレーションで求めた。コイル間ギャップ 170mm で, 並列 ($R=7.13\Omega$), 直列 ($R/4=1.78\Omega$) それぞれの出力を表 5, 表 6 に示す。網掛けとなっている部分は, コイル間ギャップ (170, 185, 200, 225, 250 mm), 負荷抵抗 $R_L(R=7.13, 10.89, 14.65, 18.40 \Omega, R/4=1.78, 2.72, 3.66, 4.60 \Omega)$ が全ての組み合わせで出力電力が 11 kW (2 台で 22 kW) を超える $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ の組み合わせを示している。並列では 11kW 以上の出力を得られる $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ の組み合わせの範囲は限定的であるが, 直列では $jX_{GA}/2=8.8 \sim 10.0 \Omega$ のとき, $jX_{VA}/2$ の値が広い範囲で 11kW 以上の出力電力を得ている。コイル 2 台で 22 kW 給電する際は, 直列接続時には $jX_{GA}/2=8.8 \Omega$, $jX_{VA}/2=-15 \Omega$, 並列接続時には $jX_{GA}/2=7.6 \Omega$, $jX_{VA}/2=-15 \Omega$ に調整する。



図5 複数台駆動時のコイル外観

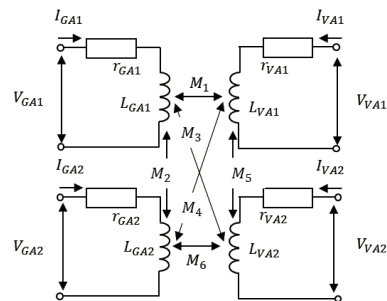


図6 複数台駆動時のコイルパラメータ

表4 複数台駆動時の相互インダクタンス

M_1 [μ H]	M_2 [nH]	M_3 [nH]	M_4 [nH]	M_5 [nH]	M_6 [μ H]
6.36	0.40	0.35	0.10	0.04	6.14

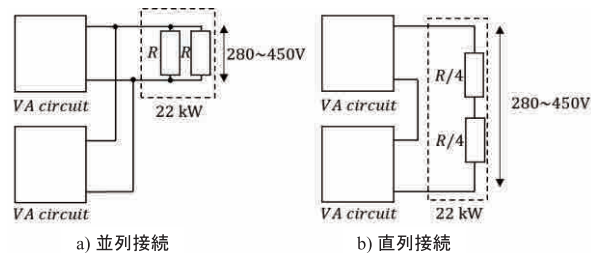


図7 複数台駆動時の回路図

表5 $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ と出力の関係 ($R=7.13\Omega$)

	unit: kW										
$jX_{GA}/2 \setminus jX_{VA}/2$	-15.0	-13.5	-12.0	-10.5	-9.0	-7.5	-6.0	-4.5	-3.0	-1.5	0.0
4.0	35.09	32.40	29.26	26.02	22.91	20.08	17.57	15.39	13.52	11.91	10.54
5.2	39.08	34.30	30.11	26.48	23.37	20.69	18.39	16.43	14.73	13.27	11.99
6.4	28.95	26.41	24.18	22.20	20.44	18.88	17.48	16.23	15.10	14.08	13.16
7.6	18.06	17.55	17.06	16.59	16.14	15.70	15.29	14.89	14.50	14.13	13.77
8.8	11.35	11.56	11.76	11.98	12.20	12.42	12.65	12.89	13.14	13.39	13.65
10.0	7.54	7.91	8.30	8.72	9.18	9.67	10.20	10.78	11.40	12.08	12.82
11.2	5.29	5.65	6.06	6.50	7.00	7.55	8.17	8.87	9.65	10.53	11.53
12.4	3.88	4.21	4.57	4.98	5.44	5.97	6.57	7.27	8.06	8.98	10.05
13.6	2.96	3.24	3.55	3.91	4.32	4.79	5.34	5.98	6.72	7.58	8.60
14.8	2.33	2.56	2.83	3.14	3.49	3.91	4.39	4.96	5.62	6.39	7.29
16.0	1.87	2.07	2.30	2.57	2.87	3.23	3.65	4.15	4.72	5.40	6.17

表6 $jX_{GA}/2$, $jX_{VA}/2$ と出力の関係 ($R/4=1.78\Omega$)

	unit: kW										
$jX_{GA}/2 \setminus jX_{VA}/2$	-15.0	-13.5	-12.0	-10.5	-9.0	-7.5	-6.0	-4.5	-3.0	-1.5	0.0
4.0	13.44	13.57	13.65	13.66	13.62	13.51	13.34	13.13	12.86	12.55	12.21
5.2	25.74	25.46	25.07	24.59	24.02	23.39	22.70	21.97	21.21	20.43	19.63
6.4	48.82	46.86	44.92	43.01	41.15	39.35	37.61	35.93	34.32	32.77	31.30
7.6	51.79	50.42	49.09	47.82	46.59	45.41	44.27	43.17	42.10	41.08	40.09
8.8	28.30	28.76	29.23	29.71	30.20	30.70	31.22	31.74	32.28	32.84	33.41
10.0	14.59	15.12	15.67	16.26	16.88	17.52	18.21	18.92	19.68	20.48	21.32
11.2	8.40	8.77	9.16	9.58	10.01	10.47	10.96	11.47	12.01	12.58	13.18
12.4	5.36	5.61	5.88	6.16	6.45	6.76	7.09	7.43	7.79	8.17	8.56
13.6	3.68	3.86	4.05	4.25	4.45	4.67	4.89	5.13	5.38	5.63	5.89
14.8	2.68	2.81	2.95	3.09	3.24	3.40	3.56	3.73	3.90	4.08	4.26
16.0	2.03	2.13	2.23	2.34	2.46	2.57	2.69	2.82	2.95	3.08	3.21

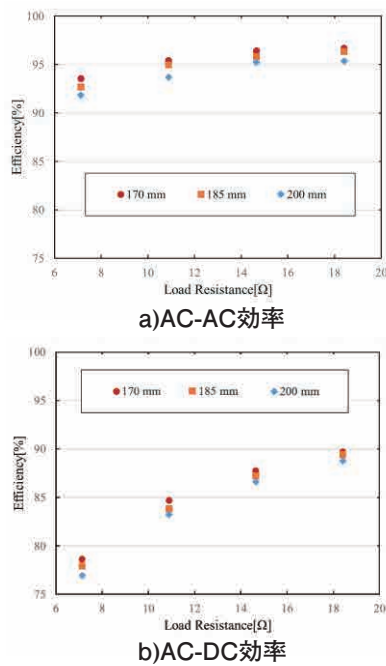


図8 直列接続給電時の効率

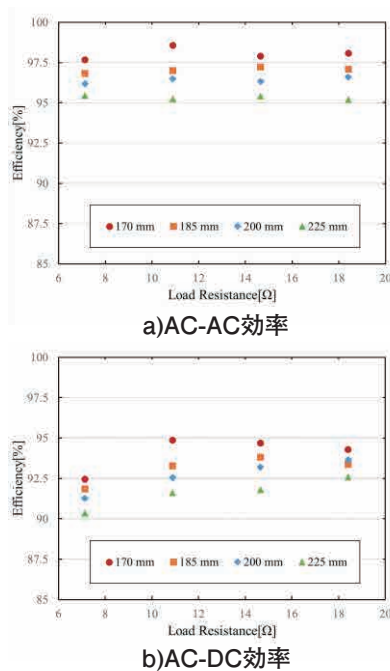


図9 並列接続給電時の効率

3.3 2.2kW 合成駆動給電実験

製作した複数コイルと回路で合成駆動給電が可能かどうか確認するため、2.2kW 出力の給電実験を行った。直列接続および並列接続での合成駆動時の給電効率を図 8 および図 9 に示す。2 台での合成駆動給電と個別に給電したときの結果を比較すると効率、測定値の傾向はおおむね一致し、独立した 2 つの回路で解析可能であることを確認した。1 回路

当たりの負荷抵抗値が小さくなる直列接続では、AC-AC 間効率で 90 % 以上を維持しているが、整流器に流れ込む電流が大きく整流器での損失により AC-DC 間効率が 70 % 台となる条件もある。1 回路当たりの負荷抵抗が大きくなる並列接続では効率が高い値で推移し、どの条件でも給電効率は 85% 以上となった。

4. むすび

本稿では、SAE J2954 WPT3/Z3 コイルを 2 台用いた合成駆動による大電力給電を検討した。需要が高まっている配送商用車の EV 化や充電の時間短縮のために、大電力の非接触給電技術の確立は必要不可欠であり、今回行った複数コイル使用時の回路特性解析の他に、漏洩電磁界の低減対策や電源の小型化・低コスト化など解決すべき課題は多い。今後は、合成駆動時に漏洩低減と充電効率を共に高める方法を検討したい。なお、本稿のデータは当研究室の真保宏基氏と濱本総一郎氏が主体的に進めた実験結果を元になっている。両氏に深く感謝すると共に、今回の執筆の機会を与えて頂いた島田理化工業(株)の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- [1] 石田ほか, “EV バス向けワイヤレス急速充電システムの開発”, 平成 28 年度電気学会産業応用部門大会, Vol.4, No.9, pp.101-104 (2016)
- [2] 日下ほか, “デルタ結線三相 12 コイル非接触給電システムの実機検証”, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.96, pp.439-442 (2017)
- [3] SAE INTERNATIONAL “Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954_202010” (2020)
- [4] Dongwook Kim, etc., “Analysis and Introduction of Selective Permeability with Additional Air-Gaps on Wireless Power Transfer Coils for Electric Vehicle Based on SAE J2954 Recommended Practice” energies Vol.12, No.24, pp.1-11 (2019)
- [5] SAE INTERNATIONAL “Wireless Power Transfer for Heavy-Duty Electric Vehicles J2954/2_202212” (2022)

- [6] 真保ほか, “SAE J2954 WPT3/3 コイルの性能評価”, 令和 4 年度電気学会産業応用部門大会, 1-111 (2022)
- [7] 濱本ほか, “SAE J2954 WPT3/Z3 コイルの複数台合成駆動の検討”, 令和 5 年度電気学会全国大会, (2023)

■ 寄稿

SYNSPECTIVEビジネス概要と 地球観測を行う小型SAR衛星 「STRIX」(ストリクス)の実用化

株式会社
Synspective小畑 俊裕
Obata TOSHIHIRO

1. Synspective(シンスペクティブ)について

1.1 事業概要

Synspective は、小 型 SAR (Synthetic Aperture Radar) 衛星の開発・運用と衛星データの販売、データ解析によるソリューションの提供等を行なう衛星ビジネスのスタートアップです。

自社製造による SAR 衛星コンステレーションを保有するソリューションプロバイダーであり、日本のみならず、世界が抱える様々な課題に、衛星データに基づいたソリューションを提供しています。

2018 年 2 月に創業し、185 名 25 カ国のメンバーが集結し (2023 年 6 月現在)、事業を進めています。

1.2 創業

「持続可能な開発」のビジネスによる実現を目指し、再生可能エネルギー、水・衛生分野での社会インフラ開発に携わっていた当社創業者 (現 当社代表取締役 CEO) の新井元行が、防災性能向上を目的とした小型 SAR 衛星開発を進めていた ImPACT プログラムのプログラママネージャーを務めていた白坂成功 (現 共同創業者・顧問) と創業しました。

1.3 ミッション

「新たなデータとテクノロジーにより人の可能性を拡張、着実に進歩する『学習する世界』を実現する」をミッションに掲げ、衛星コンステレーションにより全地球の経済・社会・環境に関わるあらゆる事象を観測し、統合的に解析する社会情報プラットフォームの構築を目指し、事業を展開しています。

1.4 事業内容

(a) 小型 SAR 衛星の製造・開発・SAR データの提供

"Synthetic Aperture Rader" (日本語:「合成開口レーダー」) を搭載した小型人工衛星の製造・開発を行うとともに、地球を周回する小型 SAR 衛星コンステレーションから取得する地形・構造物のデータを政府・民間企業向けへ提供します。

(b) 解析ソリューションの開発・提供

自社による小型 SAR 衛星によるデータ以外の外部による多様なデータから、データサイエンスや機械学習を活用して必要な情報を抽出、目的に合わせて整理し、顧客の課題に対するソリューションを開発・提供しています。

1.5 ビジネスモデル

提供するサービスは、データ販売と解析ソリューション提供の 2 つです。

(a) データ販売では、全天候・全時間帯で地上観測の可能な自社小型 SAR 衛星により取得した画像データを提供します。当該データは主に国防／防災でのニーズが強く、顧客は各国政府が中心となります。

(b) 解析ソリューション提供は、データサイエンスや機械学習を活用して取得データを解析し、顧客が意思決定や業務効率化に利用し易い形で情報を提供する、クラウドベースのサービスです。顧客の課題に合わせ、自社 SAR 衛星データのみならず、他社衛星、地図、IoT、スマートフォン等の様々なデータを組み合わせで解析します。顧客はインフラ計画・建設・運用・メンテナンス・リスクマネジメントに関わる企業を中心に、エネルギー開発、保険／金融、都市

計画等を手掛ける企業などです。

衛星の開発から衛星データを活用したソリューション提供までを一貫して行うことで、安定したデータ取得とマーケットニーズを捉えたサービスの開発・提供が可能となると考えています。

また、いずれのサービスも、特定の場所の定点観測を行うためのデータ利用や、長期プロジェクトに有効なソリューション提供といった形で、継続的なリカーリング収益¹を形成することが可能です。

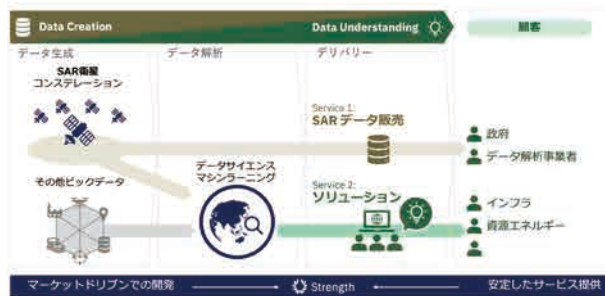


図1 ビジネスモデル

*1:「リカーリング(Recurring)」は「繰返し／循環する」の意。リカーリング収益は商品・サービスを一度提供して終わりではなく、継続的な価値提供により対価を得る収益。基本契約と従量課金により構成されることが多く、スマホ契約や電気・ガス・水道などの契約が該当する。

2. 小型 SAR 衛星について

2.1 SAR・小型 SAR 衛星とは

“SAR”とは、“Synthetic Aperture Radar”の略語で、日本語では「合成開口レーダー」と呼ばれます。SAR 衛星は電波の一種であるマイクロ波を使って地表面を観測する衛星です。従来の SAR 衛星は 1,000 キログラムを超えるものでしたが、小型 SAR 衛星では、100-150 キログラム程度に小型化しています。

2.2 SAR の特徴

人工衛星は目的に応じて通信・測位・地球観測衛星などの種類が存在し、当社の衛星は地球観測衛星に属します。さらに、地球観測衛星にも光学、SAR 衛星のようなタイプに分けられます。当社はこのうち、SAR 衛星の開発・製造・運用を手掛けています。

光学衛星は主にカメラを用いて写真を撮影するので直感的に理解しやすく、Google Earth をはじめとする様々な WEB サービスで利用が進んでいます。

しかし、地球の多くの地域が雲に覆われており、それにより視界が妨げられます。また太陽光が当たらない部分は夜間となり視認性が落ちるため、情報取得の機会が限定されます。それに対して、SAR 衛星は自らが雲を透過する波長の電波を照射し、地上からの反射波を観測するため、天候や時間帯に依存せず、高頻度でデータ取得が可能です。またデータには、地形や構造物の形・物性の把握に資する情報が含まれています。これらの特徴から、SAR 衛星データは時系列分析や変化抽出に強く、経済・環境の連続的な変化を捉えるのに適していると言えます。

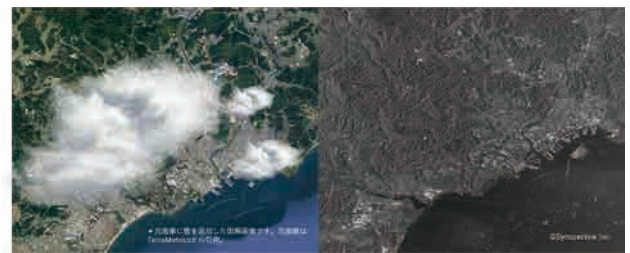


図2 光学衛星とSAR衛星の違いイメージ図

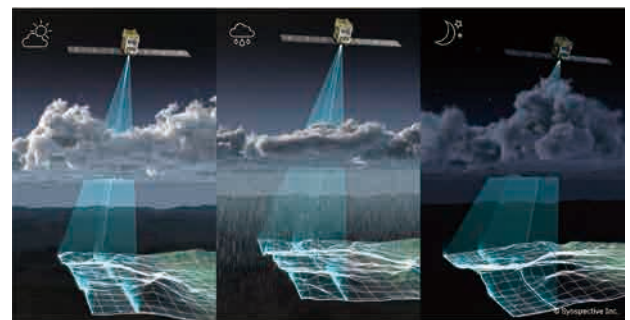


図3 曇り・雨天・夜間時のSAR衛星イメージ

2.3 当社の小型 SAR 衛星「StriX」(ストリクス)について

(a) 開発の背景

当社の小型 SAR 衛星は、政府が主導する革新的研究開発推進プログラム（以下、ImPACT プログラム）の成果を応用した独自の小型 SAR 衛星です。

ImPACT プログラムとは、政府の科学技術・イノベーション政策の司令塔である総合科学技術・イノベーション会議が、ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を促進し、持続的な発展性のあるイノベーションシステムの実現を目指したプログラム（参考文献*1）です。

同プログラムでは、JAXA、東京大学、東京工業大学、慶應義塾大学等との連携により、性能・コスト・製造容易性を意識した開発と研究が進められ、小型 SAR 衛星開発に係るプログラムは 2015 年度から

2019 年度まで実施されました。それらの技術を継承し応用して完成したのが当社の小型 SAR 衛星「StriX」(ストリクス)です。

(b)「StriX」の特徴

「StriX」は折り畳み可能な SAR アンテナ、高出力化と高度な熱制御等により、衛星サイズの小型化と大型 SAR 衛星と遜色ない撮像能力を実現しています。また、搭載機器開発と既製品の積極利用、並びに小型化により、従来の大型のものと比較し打上げと製造費用をあわせ、およそ 1/20 の低コスト化に成功しました。

多くの宇宙機メーカーが世界中に存在している中、小型 SAR 衛星がこれまで実現されなかったのは、小型化に伴う SAR アンテナの開発と高度な熱制御が大きな障壁となってきたためです。大型衛星に匹敵する撮像能力(高い分解能と広い観測幅)を実現するには、大きなアンテナサイズと高出力が必要になります。また、高出力であることは同時に発熱量も大きくなるため、宇宙空間で機器が故障しないような高度な熱制御も求められます。StriX では、展開時には大型 SAR 衛星と同等の 5m になる折り畳み方式のアンテナ(展開型スロットアレーアンテナ)を採用し、1kW 級の高出力アンプを搭載、さらにバランスのとれた熱制御を実現しました。結果として、従前の大型衛星(例えば AIRBUS 社の TerraSAR-X は 1t 級)に比べて重量比で約 1/10 の小型化を達成しています。

「StriX」はこの折り畳み可能な SAR アンテナ、高出力化と高度な熱制御等により、衛星サイズの小型化と大型 SAR 衛星と遜色ない撮像能力を実現しています。

また、品質安定性に優れており、軌道上でも故障可能性が小さく、多数機の安定的生産・運用に強みがあります。当社は、SAR アンテナとして 7 枚の独立パネルから構成される展開型スロットアレーアンテナを採用していますが、これはアンテナ表面の電波射出スロットと導波管の設計において、電波位相を考慮した緻密な物理計算が必要である一方、一度設計が完了すれば製造や検査が容易、という特長があります。また、他方式と比較して軽量で部品点数が少ないこと、壊れやすい電子機器への依存性が低いこと、並びに構造的に頑強であることも先の特長に貢献しています。

島田理化様も、この SAR アンテナの部品生産を通じて貢献頂いています。

従前の大型機		Synspectiveによる 小型SAR衛星「StriX」のコンステレーション	
			
重量	1,000 kg 級	重量	100 kg 級
コスト	122億円 / 1ミッション ⁽¹⁾	コスト	10~15億円 ⁽²⁾ / 1機
データ取得	高	データ取得	低
観測エリア ⁽³⁾	100 ~ 1,000 km ² +	観測エリア ⁽³⁾	100 ~ 1,000 km ² +
観測頻度 ⁽⁴⁾	衛星1機：観測〜月1回の再訪例	観測頻度 ⁽⁴⁾	コンステレーション(30機)：準リアルタイム

図4 従前機との比較図(参考文献*2)

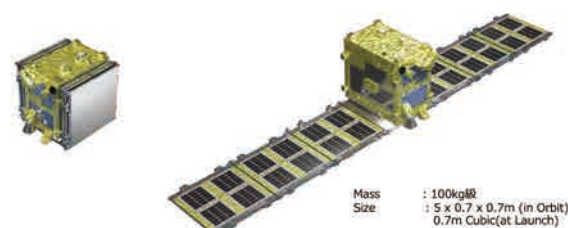


図5 StriX CG画像 左図：展開前、右図：展開後

(c)「StriX」コンステレーション

衛星の大小を問わず、衛星の位置は物理的に決定されます。即ち、1機の衛星では同一時刻に1か所しかデータ取得ができず、また同一地点の再訪には、例えば高度約500kmの場合には2週間程度かかる、という制約があります。多くのビジネス、災害対応においては、よりリアルタイム性の高い情報が必要となるため、先の制約は SAR 衛星データ利用にとって大きな障害となります。しかし、当社の衛星は毎日回帰の太陽同期軌道に投入します。この場合、地球上の同じ場所を毎日同時間、同条件で撮影することができ、特定の場所の地表の変化とトレンドを把握するための良質なデータをより多く取得することができます。当社は将来的に小型 SAR 衛星を30機打上げをことを目標としています。当社の試算では、小型 SAR 衛星を30機稼働させることができれば、高頻度で定点観測可能となり、世界のどこで災害がおきても、準リアルタイムで地上データの取得が実現可能です。また、従前の大型衛星に比べて約1/20の低コスト化に成功したため、より低予算で衛星コンステレーション(複数の人工衛星を連携させて一つの機能やサービスを達成するシステム。constellation とは「星座」の意)を実現し、この制約

を解消することができます。

(d)「StriX」(ストリクス) 名前の由来

フクロウの学名である「Strix uralensis」にちなんで名付けました。

フクロウは聴覚および視覚が非常によく発達しており、完全な暗闇(くらやみ)の中でも採食することができます。夜間でもモノが見えるというフクロウの特徴はSARの特徴でもあります。また広げたアンテナが鳥の翼に見えるといったところも名前をつけた由来になります。そして、フクロウは知恵のシンボルとも呼ばれます。ギリシャ神話に登場する知性や学問の女神のアテナは、人々が賢くなるよう力を尽くし、必要なときには知略に富んだ武器や道具を与えました。そのアテナの聖鳥として、使者や化身となったのがフクロウと言われており、そこからあやかり名付けました。

2.4 実績

これまで当社が打ち上げた衛星は、2020年12月に自社初の実証機「StriX- α 」、2022年3月に実証二号機の「StriX- β 」、そして、将来的な衛星の多数機生産や運用を見据え、ビジネス拡大を目指すための実証商用初号機「StriX-1」を2022年9月に打上げそれぞれ軌道投入に成功し、打上げ後の画像取得も成功しています。

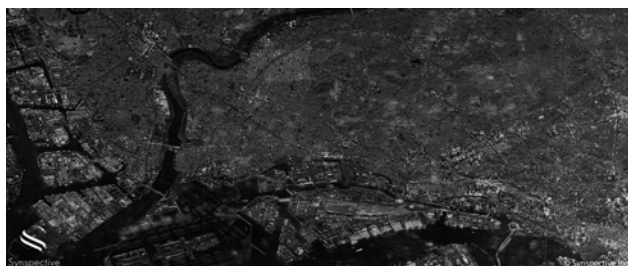


図6 StriX- α 撮像によるSAR画像

3. 解析ソリューションについて

3.1 衛星データ解析ソリューションに必要なエンジニアリング技術

当社が提供する解析ソリューションには、SAR、リモートセンシング*1、データサイエンス*2の3つの技術領域にまたがる高いレベルのエンジニアリングが要求されます。また、様々な顧客ニーズに対応するため、写真、熱赤外、気象等、自社SAR衛星以外の衛星やドローン等、広範な地理空間データを組

み合わせて解析する必要があり、ここで種々のデータの所在、フォーマット、ツール等を組み合わせて最適なモニタリング手法を構成します。これらの多様な数値／画像データを扱うには従来の統計解析に加え、膨大なデータを扱うための機械学習等のアルゴリズムの適用が必要であり、当社エンジニアが日々、最新の技術成果を調査・開発を進めています。

これら広範なテクノロジーが必要となるため、SAR衛星データ解析を顧客が自社技術化するには至らず、外部の解析技術が必要とされる理由となっています。

SAR衛星データの解析においては前述の衛星ハードウェアの技術特性を理解し、観測対象の形状・物性を解釈する必要があります。加えて、SARデータには干渉SAR解析*3と呼ばれる特殊な解析手法を適用することができ、これにより広域のインフラや地盤の変動を分析することができるようになります。一連のSAR解析には一定の理論的知見と実務経験が必要とするため、当社の解析能力を特徴づけています。

*1 リモートセンシング (Remote sensing) とは

「離れた位置から物を触らずに調べる」技術で、主に人工衛星や航空機に専用の測定器(センサ)を載せ、光学的に、あるいは電磁波等を用いて地球の表面を観測する技術を指します。衛星に搭載したセンサは、地球上の海、森、都市、雲などから反射したり、自ら放射する電磁波を観測し、植生分布の把握、地表面形状の観測、水域の水質・水温の観測、雲や雨などの気象状況の観測など、幅広い分野に適用されています。

*2 データサイエンス (Data science) とは

データを用いて新たな科学的および社会に有益な知見を引き出そうとするアプローチを指します。応用性を重視し、データを扱う手法である情報工学、統計学、データマイニング、機械学習、その他アルゴリズム等を横断的に扱います。

*3 干渉SAR解析 (Interferometric SAR analysis) とは

SARデータに含まれる反射波の位相情報を用いて地盤や構造物の変動を解析する手法です。位相にはSAR衛星から地表までの距離の情報が含まれるため、同じ軌道上にあるSAR衛星から同一地点を2回観測すれば、その観測結果を重ねて(干渉させて)

差をとることによって、地表のわずかな変動を得ることができます。計測精度は波長依存であり、X バンドを利用する当社衛星の場合は数 mm オーダーの変動を捉えることができます。

3.2 当社の解析ソリューションに関わる主な解析技術

(a) リモートセンシングデータ解析技術

多様なユーザーニーズに対応するため、当社の解析ソリューションには様々な衛星データが利用されます。つまり、SAR データだけでなく、衛星写真、分光データ、熱赤外データ、気象データなどの広範なりモートセンシングデータへの理解が必要となります。実用のためには、現在稼働中の世界の衛星種別やデータ所在、分析のためのフォーマットやツール等の利用経験が求められます。加えて、航空機やドローンでの観測データを利用するケースもあります。ユーザーニーズを技術要件に落とし込み、先の多様なデータソースを組み合わせる最適なモニタリング手法を組み上げる技術であり、当社のソリューション技術の発展を支えています。

(b) データサイエンス関連技術

上記のように、多様な数値／画像データを扱うには従来の統計解析に加え、昨今進歩の著しいコンピュータビジョンや膨大なデータを扱うための機械学習等の適用が必要です。この領域は近年の AI／ビッグデータ市場の成長に伴い新しい手法が日々公表されており、当社の解析チームは学術的な成果も含めて継続的にキャッチアップ、または自らアルゴリズム開発を行い、それを当社ソリューションへ組み込んでいます。

3.3 当社の解析ソリューションについて

(a) 開発の背景

2017 年に衛星データの最大市場である米国で SAR データの商用利用について規制緩和があり、この時期から今日までに小型 SAR 衛星事業者が次々と衛星打上とデータ取得に成功しました。

データ取得後にそのデータの解析と理解が不可欠ですが、分析に専門性が要求される SAR 衛星データの利活用は、自ら解析能力を持つ政府系ユーザーや一部の解析事業者が中心です。

近年、衛星データの利活用が拡大しつつある産業セクターでは、前述したリモートセンシングデータ解析技術に加えデータサイエンス関連技術が必要になるため、産業セクターのユーザーが SAR 衛星デー

タを購入して自社で解析することは難しく、自組織内に衛星データ解析要員を持ってないケースがほとんどです。

当社は SAR 衛星データを既存ユーザー（政府・解析事業者など）に提供しつつ、新たな解析ソリューションを通じて新規ユーザーを拓ける、独自のビジネスモデルを持ちます。一気通貫でのサービス構築は、マーケットドリブンでのプロダクト開発と、希少な SAR 衛星データサービスの安定した提供を可能とし、この包括する情報ソリューションがユーザーにとって有意なものとなり当社のバリュープロポジションの基礎となっています。

(b) 当社の解析ソリューションの特徴

当社の SAR 衛星「StriX」や他社衛星から取得した SAR 衛星データを、データサイエンスや機械学習を活用して解析し、顧客が理解／利用し易い形で情報を表示するクラウドベースのサービスです。顧客の課題に合わせて、他社衛星、地図、河川水位、移動体 GPS、その他 IoT データと組み合わせることで、現場の意思決定や業務効率化に有意な情報を提供することができます。そして、民間（産業セクター）のユーザーはデータから得られる情報に興味があります。例えるなら、分かりづらい X 線画像だけを見ても患者が知りたい病巣は分からず、データを理解するには医者が介在する必要があるのと同様です。当社サービスは使い易い、分かりやすい情報を Web サービスとして提供することに注力しています。また、当社のソリューションは世界中どの地域でも適用可能であり、「StriX」のコンステレーションの数・機能向上により、さらに高頻度・多地点の異変や事故の分析・予測が可能になります。さらに、ソリューションリリース後は、データ／解析アルゴリズムが継続的にアップデートされ、顧客はデータソースや処理アルゴリズムの技術的な進展を意識することなく利用することができます。

(c) 解析ソリューションの紹介（参考文献*3）

1. 地盤変動モニタリングソリューション (Land Displacement Monitoring : LDM)

SAR 衛星データを用いて広域の地盤変動を解析し、その結果を提供するソリューションサービスです。当社独自の InSAR 解析技術により、広域な地表面の変動量を mm 単位で検出し時系列で表示します。また、地下工事等によって発生する陥没事故の

領域予測機能が追加実装されています。当ソリューションにより、以下のような課題を解決できるようになります。

- ・一日停滞すると数億円の追加コストが生じる大規模地下工事のリスク管理
- ・多額の測量コストがかかる地下資源／エネルギー採掘の地表への影響調査
- ・脆弱な地盤や海上に建設した発電プラント、港湾のメンテナンス管理
- ・コロナ禍などの移動制約下での遠隔地／広域の地滑りリスク調査

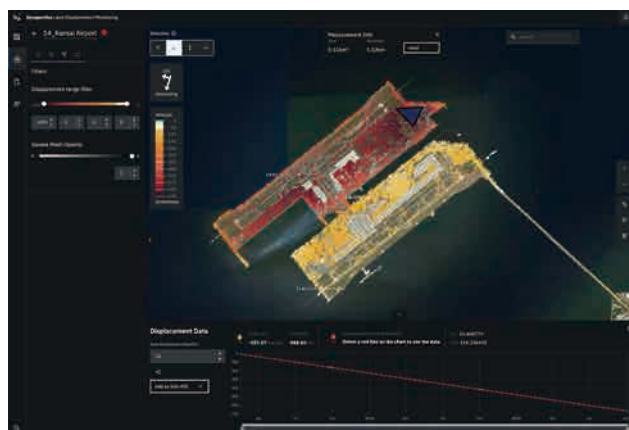


図7 地盤変動モニタリングソリューション
(Land Displacement Monitoring : LDM) イメージ図

II. 洪水被害分析ソリューション

(Flood Damage Assessment : FDA)

SAR 衛星データを用いて、浸水被害（浸水域、浸水深、被害道路、被害建物）の分析結果を提供するソリューションサービスです。台風などにより洪水被害が発生した際、従来の光学衛星や飛行機・ドローンでは天候が一定程度回復した後にしか状況把握ができませんでしたが、悪天候に強い SAR 衛星を用いれば天候に左右されず広域の浸水状況を観測可能です。さらに、データサイエンスや機械学習を利用して即時に自動データ解析を行い、道路・建物などの施設への影響範囲を特定します。以下のような課題を解決できます。

- ・大規模災害で大きなコスト・リードタイムのかかる損害保険調査
- ・新興国／途上国において迅速な復興支援が必要な国際機関の現地ニーズアセスメント
- ・迅速な人命救助が求められる政府や自治体の初動計画



図8 洪水被害分析ソリューション
(Flood Damage Assessment : FDA) イメージ図

III. その他ベータ版のソリューションプロダクト

III-i. Disaster Damage Assessment (DDA)

大雨や強風に伴う土砂災害や家屋倒壊、火山噴火に伴う火山灰堆積など、様々な自然災害によって生じた被害・変化状況を災害前後の SAR 衛星画像を用いて解析することにより、広範囲で被害度合いや変化状況を把握することができます。

III-ii. Offshore Wind Assessment (OWA)

広範囲な海域に対して遠隔で洋上風速推定とモニタリングがメートル毎秒 (m/s) 単位で行えます。高解像度かつ海面に近い風速の把握が行えるため、地形や他洋上風力発電群による影響の把握も定期的に行えます。洋上風力発電所の適地選定を行う上で、一つのデータとしてご利用頂けます。

III-iii. Forest Inventory Management (FIM)

遠隔から樹高推定やバイオマス量推定、林相区分、伐採検知、CO₂ の吸収固定量算出など様々な観測を行うことができ、管理コスト削減や管理区域を広げることが可能です。



図9 各種ソリューションサービス イメージ図

3. むすび

当社では、2020 年代後半には 30 機のコンステレーション（衛星群）とアナリティクスプラットフォームにより準リアルタイムで世界の変化を理解できる統合システムの構築を計画しています。これらを利用して世界の平和、レジリエントなインフラ開発、そして持続可能な資源エネルギー利用の実現を目指します。

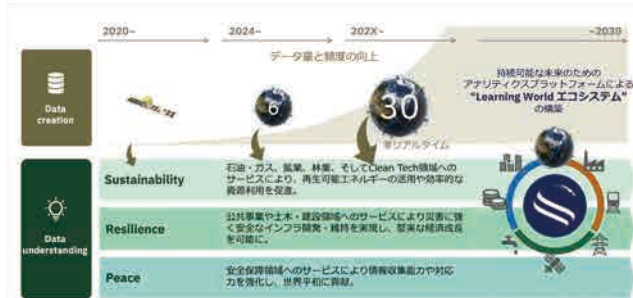


図10 ロードマップ

参考文献

- *1 革新的研究開発プログラム ImPACT
「オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ衛星システム」
<https://www.jst.go.jp/impact/program/13.html>
- *2 European Space Agency, company disclosures and news release を元に作成。
 - (1) 詳細は SAR ジャーナル (<http://syntheticapertureradar.com/sar-satellite-missions/>) より参照。
 - (2) コストは衛星 1 機あたりのもの。全体コストはコンステレーションターゲットの大きさによって異なる。原文は USD 100MM だが、1USD=JPY1221 に基づいて日本円に換算。
 - (3) 衛星のコストは、当社の将来の衛星 1 基あたりの平均的なコストに基づき試算。数値は撮像モードにより変化する可能性がある。比較は超高解像度（3m 未満）下で算出。
- *3 Synspective HP より
<https://synspective.com/solutions/>

カーボンニュートラル社会へ向けたIH技術と製品展開

IH engineering and products for carbon neutrality society

末松 岳春

Takeharu SUEMATSU

1. まえがき

昨今、日本を含む世界中で地球温暖化の影響と思われる異常気象が発生しており、温室効果ガス(CO₂)削減・カーボンニュートラル社会の実現に向けた動きが加速している。そのような中で、金属を熱処理する分野では、従来の加熱方式やエネルギー効率の見直しによりCO₂排出量の低減、省エネルギー・省資源化が推進されており、クリーンな電気エネルギーを用いる誘導加熱(Induction Heating: IH)の利用がますます注目されている。^[1]

2. IHインバータの移り変わり

IH技術は、1940年代から商用周波数や電動発電機を用いた50Hzから3kHzが鍛造・溶解用加熱に利用され始め、1960年代に半導体スイッチング素子であるサイリスタ(SCR)が開発され低周波数帯の大容量インバータが主流となり、現在はIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に移行している。又、高周波焼入用として20kHz以上の周波数帯では真空管式電源が使用され1980年代にSIT(Static Induction Transistor)が、2000年代にFET(Field Effect Transistor)の高速スイッチング素子のトランジスタが開発され高周波数帯のIHインバータで利用され

ようになり、現在でも、サイリスタ式電源や真空管式電源、SIT及びFETインバータ電源が様々な用途で使われている。^[2]

当社は、1948年から高周波誘導加熱装置の販売を開始して以来、トランジスタインバータメーカーの先駆けとして、IH技術の研究開発・製品化に取り組み、今日までに幅広い分野で数多くの製品を世の中に送り出してきた。今回、省エネに貢献する最新技術を搭載したIHインバータとその製品展開について紹介する。

3. PWM制御IHインバータの製品化

IHインバータは、電磁誘導の原理によって様々な金属の熱処理を行うために、商用電力を高周波電力に変換する装置である。インバータの消費電力は加熱対象物の素材や形状、加熱温度や加熱時間などによって左右されるが、電源効率を改善することによって消費電力を大きく削減することが可能になる。

当社は、①最新のパワー半導体SiC(Silicon Carbide)の採用、②整流回路方式の見直し、③新規開発した独自のPWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)制御方式の搭載、④FPGA(Field Programmable Gate Array)によるデジタル制御化

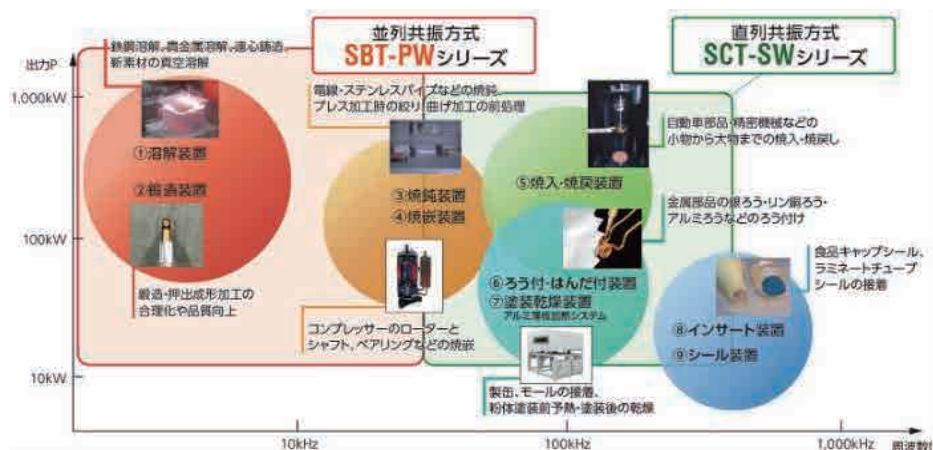


図1 PWM制御IHインバータの適用範囲

を実現することにより、従来製品に比べて電源力率と電源効率を大幅に改善する「電源力率・電源効率改善型PWM制御IHインバータ」を開発し、鍛造・溶解などの低周波数帯はIGBTを搭載した並列共振方式の「SBT-PWシリーズ」を、焼入れなどの高周波数帯はSiCを搭載した直列共振方式の「SCT-SWシリーズ」を製品化した。図1にその適用範囲を示す通り幅広い用途に対応している。^[3]

紹介してきたPWM制御IHインバータは、一般社団法人日本機械工業連合会が主催する令和4年度優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰において、電源力率・電源効率の改善が高く評価され、「資源エネルギー庁長官賞」を受賞した(写真1)。



尚、詳細は本誌のトピックスに記載している。

写真1 資源エネルギー庁長官賞

4. 今後の製品展開

2023年度にはPWM制御技術を搭載したインバータのラインアップ化が完了し、「SBT-PWシリーズ」は、周波数0.3kHz～30kHz、出力20kW～3,200kWに対応し、「SCT-SWシリーズ」は周波数30kHz～300kHz、出力20kW～1,000kWに対応しており、さまざまな熱処理用途に対応できる製品が揃った。

両シリーズとも高速なPWM制御によって、電源力率、電源効率共に大幅に向上し、冷却水量は当社従来製品と比べ30%以上の削減が可能となり、ユニットの小型・軽量化を実現している。^[4]

また、当社従来製品のラインアップを網羅することで、スムーズな置き換えが可能となった。

5. EV用ワイヤレス給電市場への取り組み

近年の自動車産業のEV (Electric Vehicle) へのシフトにともない、図2に示すように、EV用ワイヤレス給電が新たな電力供給方法として期待されており、世界的に標準規格化が進んでいる。

当社では、2023年度にSAE規格WPT3給電に対応する地上側インバータの実証機による実証実験を行い、実証機の販売開始と製品開発を進めるなか、高効率なインバータ技術をさらに進化させ、次世代インフラとしてのEV用ワイヤレス給電の開発・製品化、事業化に向けて積極的に取り組んでいる。

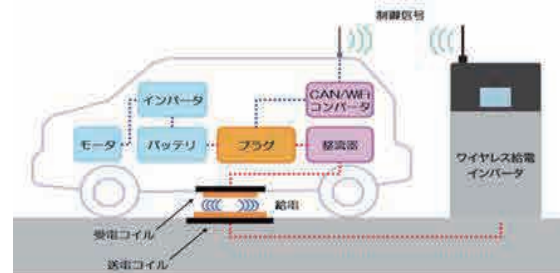


図2 自動車のワイヤレス給電

6. むすび

脱炭素に向けた取り組みが全世界で加速しているなか、IHでの加熱は金属を自己発熱させる高効率な熱処理方法で、電源効率を改善することでCO2の排出量を低減させ、省エネへの貢献が期待できる。また、安全性にも優れており、加熱効率、省エネ性、操作性などの向上も可能となる。

当社は、IHインバータのリーディングカンパニーとして、最新のパワーエレクトロニクス技術を駆使し、さらなる高効率な製品の開発に取り組み、カーボンニュートラル社会の実現に貢献するとともに、EV用ワイヤレス給電など、差別化した電磁誘導技術の新たな利用拡大を目指していく。

参考文献

- [1] 工業加熱VOL.60 No.1 特集「工業炉の脱炭素への取り組み」, 2023.1
- [2] 田内 “次世代半導体SiCを用いたIHインバータの開発の取り組み”, 島田理化技報, No.26, 2018
- [3] 日本機械工業連合会, 第42回優秀省エネ機器・システム表彰機器概要パンフレット, 2023.2
- [4] 杉本 “省エネに貢献するIH製品とラインアップ”, 島田理化技報, No.27, 2020

筆者紹介

事業本部 パワエレ営業部
末松 岳春

電気自動車 (EV) 用ワイヤレス給電実証実験装置

EV Wireless Power Supply Inverter

浜田 深造
Shinzo HAMADA

田内 良男
Yoshio TANAI

片岡 辰雄
Tatsuo KATAOKA

要 旨

近年、世界の自動車産業は、時代の流れとしてEV化が盛んになってきており、当社では、その流れの一端を担うアプローチの一つとして、得意分野の一つである高周波電磁誘導技術を応用したワイヤレス給電用インバータの開発をここ数年にわたって実施してきた。^[1]

弊社の着手したワイヤレス給電技術は、SAE（米国自動車技術者協会）で区分けされている出力クラスの中で、実用範囲内では最大仕様となる11.1kW (SAE J2954/WPT3)をベースとしている。

また、市場のターゲットとしては、トラック、バス等の大型車両の給電機能をカバーする目的として、これを4系統搭載し、最大で44.4kW (11.1kW×4系統)まで出力可能な、EV用ワイヤレス給電実証実験装置（以下 実証機）を製作した。（下図）

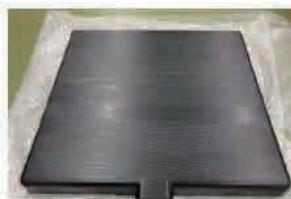
ワイヤレス給電実証機の開発にあたっては、大日本印刷(DNP)殿のシート型コイルユニットをご提供頂き、名古屋で開催された「人とするまのテクノロジー展2023」に出展し、高評価を得た。

Table 1 - SAE J2954 WPT power classifications

	WPT1	WPT2	WPT3
Range of Input Volt-Amps	0 to 3.7 kVA	0 to 7.7 kVA	0 to 11.1 kVA

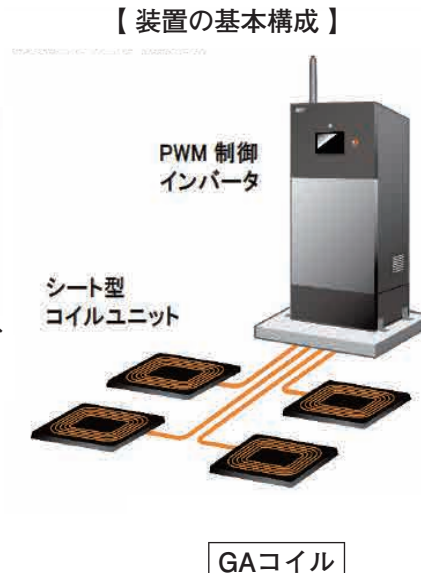


インバータ



DNP:シート型コイルユニット

VAコイル



EV用ワイヤレス給電実証実験装置

1. まえがき

EV用のワイヤレス電力伝送は、SAE J2954で規定されている。本規格では、地上側に設置する送電コイル（GAコイル）と、EV側に搭載される受電コイル（VAコイル）とを利用し、ハンドフリーかつ自動運転でEVに給電することを最終目標としている。

当社で開発したワイヤレス給電装置は、SAE規格WPT3に対応して製作した実証機となる。

プレスリリースでも発表済みであるが、タクシープールにおける乗客待ち待機中のEVタクシーへの給電や、トラックヤードにおける荷物作業中のEVトラックへの給電を主として市場展開を目指している。（図1）

本稿では、実証機の仕様、およびGAコイル・VAコイルを使用した伝送効率などの評価結果について紹介する。

2. 実証機について

今回製作した実証機（図2, 図3）は、1台で4系統を個別に出力制御ができるように構成されている。各系統、11.1kWとし、用途に応じた出力合成を可能にする製品を実現した。

実証機の製作にあたっては、当社が保有する従来のパワエレ技術¹²⁾³⁾⁴⁾をできる限り活用し、誘導加熱用PWMインバータのFPGA (Field Programmable Gate Array) 制御基板をほぼそのまま流用、4系統分を実装することで開発コストの削減と製作期間の短縮を図っている。

給電に使用される周波数はSAE規格79～90kHzの中間である85kHzをベースとしている。（実証機では、SAE規格内での周波数可変が可能。）

なお、各ユニットの出力は、各々電氣的に絶縁されている。また、系統の組み合わせにより合成された出力は、全系統に対し指定された周波数で同期制御により給電を行う。（表1）



図1 EV用ワイヤレス給電システム 実証実験の想定例

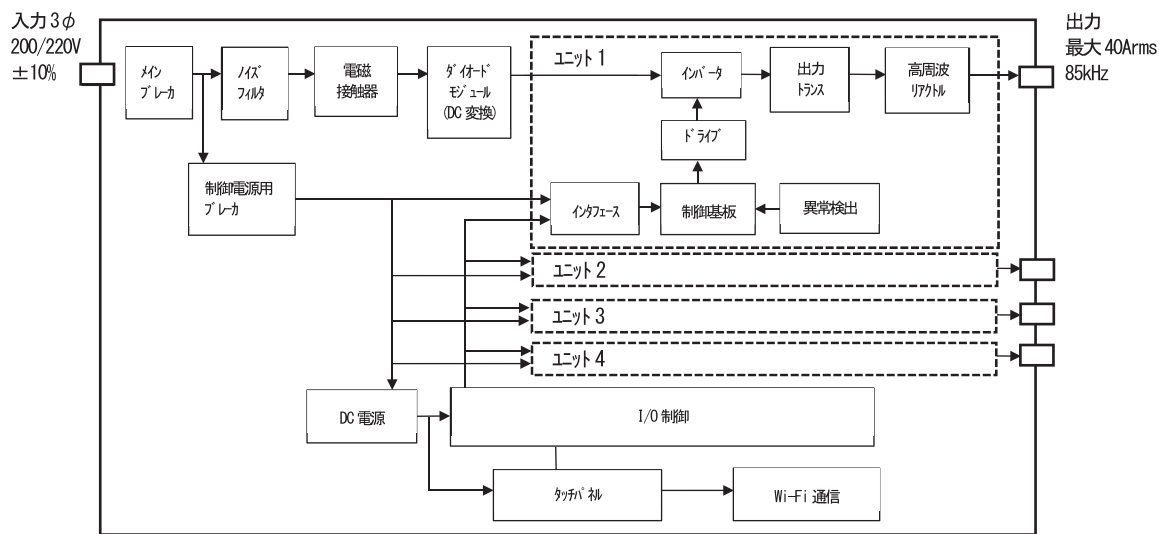


図2 実証機／機能ブロック図

表1 実証機仕様

項目	実証機仕様
定格出力	11.1kW×4, 電圧500V, 電流40Arms
発振周波数	85kHz 周波数固定他励発振 (79～90kHz 10Hz単位で設定可)
電源入力	3φ 200V/220V 55kVA以下
制御方式	位相シフト式PWM制御
操作／表示器	タッチパネル, 多色表示灯
I/O	リレー式接点信号相当 (0-24V,および0-12V)
リモート操作	Wi-Fi通信
冷却方式	強制空冷
外観寸法 (W*H*D(mm))	800*1750*500
質量	220kg以下
発振素子	SiC素子

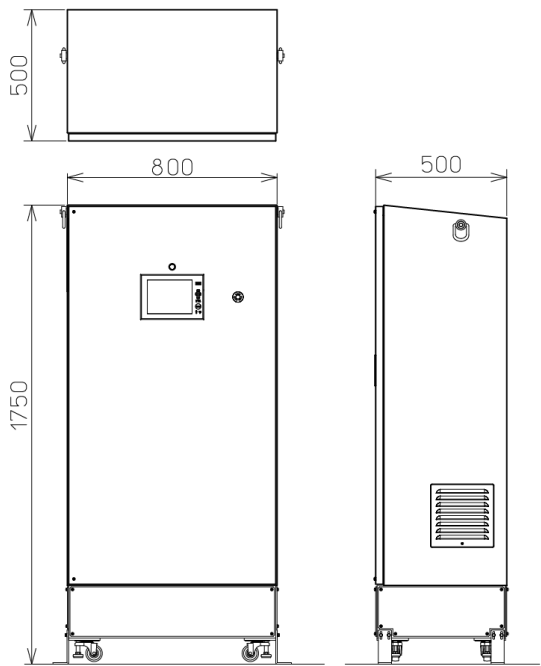


図3 実証機 / 外観図

3. 実証機に使用するSAE規格コイルについて

当社は、実証機に使用するためのGAコイルとVAコイルの製作は、埼玉大学殿にご協力を頂き、評価試験を実施し、SAE規格であるコイル伝送効率を評価した。

(1) コイル伝送効率

インバータの出力 (P1) に対するGAコイルの効率は97~98%、VAコイルの効率は約95%、最終出力 (P2) に対するシステム効率 (P2/P0) は85%以上となっており、SAE規格に準拠した

結果が得られている。(図4)

(2) インバータ、コイル間ケーブル

インバータとコイル間のケーブルは、同軸ケーブルを使用し、現状では最長で30mで試験を実施しており、最大GAP(250mm)でもSAE規格の伝送効率85%以上を確保している。(図5)

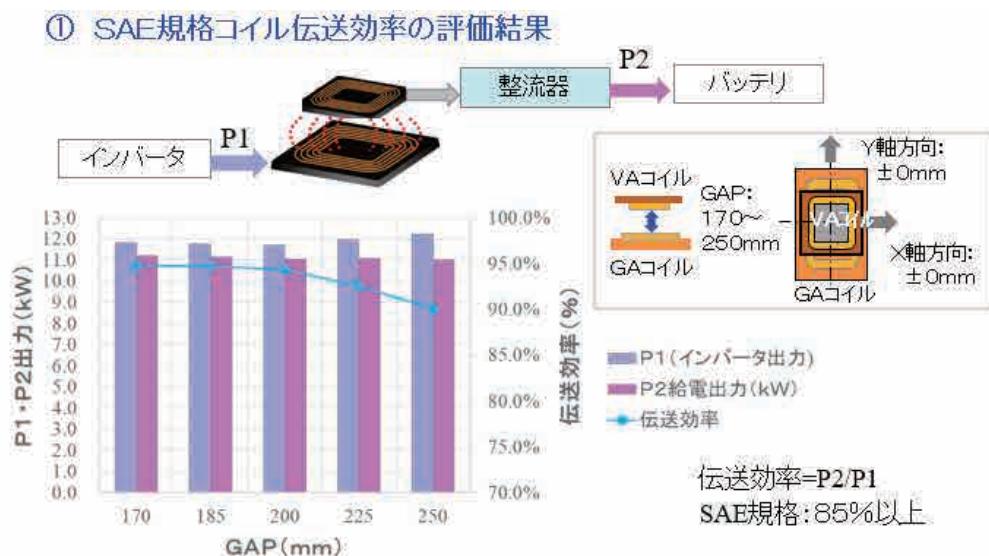


図4 SAE規格コイル伝送効率の評価結果

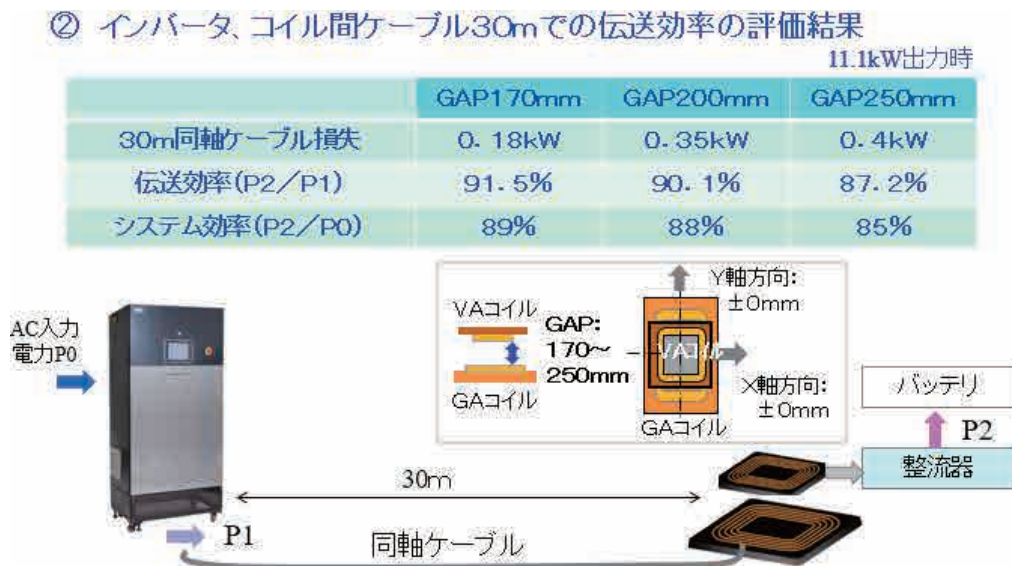


図5 インバータ、コイル間ケーブル30mでの伝送効率の評価結果の評価結果

4. 今後の課題

今回は、ワイヤレス給電用インバータの製作およびSAE規格に対する技術の習得、コイルのEMC測定を実施した。今後は、以下改善点を考慮しつつ製品化に向けての開発を継続する。

(1) 通信機能

SAE規格における通信機能は、自動車側に対する位置誘導の通信機能が定義されている。また、決済や人の操作を伴う通信については、Wi-Fi (SAE通信規格: J2847) を使用することが定義されている。

なお、実証機ではこれらの機能は、試験用のリモート操作に限定されているため、今後の用途先に応じた機能の実装を目標としている。

(2) 筐体

実証機の筐体構造は、筐体自身はIP45に対応すべく見直していく。また、サイズについても省スペース化を考慮したものとし、これらを最適化する。

(3) EMC対応

電磁界強度に対する規定については、設置を可能とするための電磁界抑制が必要である。

また、放射ノイズ測定に対する規定についても対応が必要であるため、これらの測定を随時実施していく予定である。

なお、人体防護指針対応については、総務省で規定されている磁界強度以下となっている。(図6)

5. むすび

本稿では、EV 用ワイヤレス給電インバータを中心に実証実験装置の開発状況を報告した。今後数年間で世界的に EV 需要は高まると予想され、それに伴い充電器などのインフラ設備も急速に整備されると考えられる。現在はプラグイン充電器が主流となっているが、今後の自動運転技術の発展と共に、受電操作に対するハンドフリーのニーズからもワイヤレス給電の需要が高まることが予想される。

当社では、まず実証実験に使用される設備の提供を目指し、実使用に向けた課題を抽出して量産設計に展開した上で、世の中の利便性をさらに高めるための製品提供が可能となるように技術開発を継続する所存である。

③ 人体防護指針対応の磁界測定評価結果



図6 人体防護指針対応の磁界測定評価結果の評価結果

参考文献

- [1] 高田, 石間 “ワイヤレス給電用高速インバータの開発”,
島田理化技報, No.27, 2021.
- [2] 田内 “次世代半導体 SiC を用いた IH インバータの開発の取り組み”,
島田理化技報, No.26, 2018.
- [3] 守上, 高田, 浜田, 永月 “PWM制御大電力誘導加熱インバータの開発”,
島田理化技報, No.27, 2021.
- [4] 石間 “省エネに貢献する IH 用新型 PWM インバータの製品ラインナップ”,
機関誌エレクトロヒート, No.245号, 2022.

著者紹介

生産本部
パワーエレクトロニクス技術部
浜田 深造

事業本部
新事業推進プロジェクトグループ
田内 良男

生産本部
パワーエレクトロニクス技術部
片岡 辰雄

〈特集論文〉

IH用高効率PWMインバータの製品ラインナップ

High efficiency PWM inverter lineup for induction heating

松原 佑輔
Yusuke MATSUBARA

石間 勉
Tsutomu ISHIMA

要 旨

製造現場では、脱炭素社会の早期実現に向けて機器の省エネ化や生産の効率化への取り組み、また電源環境の改善に向けては、電源力率や電源高調波の低減などの要求が急速に拡大している。

当社では、このような市場要求に対して、2020年に下図(a)に示す30kHz以下の低周波用の新型PWM(Pulse Width Modulation)インバータの販売を開始し、省エネ機器として順調に販売拡大中である。

今回、さらに下図(b)に示す30kHz～300kHzの高周波帯の用途に対して、「SCT-SWシリーズ」としてPWMインバータを開発・製品化し、IH用途のほぼ

全周波数範囲を新方式のPWMインバータで製品ラインナップ化した。

なお、2023年1月に、今回紹介する新型PWMインバータ(電源力率・電源効率改善型PWM制御誘導加熱インバータ)が、一般社団法人日本機械工業連合会が選定する令和4年度優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰にて、資源エネルギー庁長官賞を受賞した。(本技報のトピックス参照)

本稿では、受賞対象製品となった並列共振方式の「SBT-PWシリーズ」と、直列共振方式の「SCT-SWシリーズ」に関する4つの技術を中心に紹介する。

 <p>SBT-PW シリーズ (並列共振方式)</p> <p>〈2020年7月販売開始〉</p>	 <p>SCT-SW シリーズ (直列共振方式)</p> <p>〈2021年9月販売開始〉</p>
<p>独自のパワエレ技術をベースに、最新デバイスの採用とデジタル化を実現 (特許第6959432号)</p>	
<p>(1)高効率化・省エネ化</p> <ul style="list-style-type: none"> ①電源力率約95%、インバータ効率約95%を実現 ②最大約30%の電源効率化実現 (当社従来製品SBTシリーズとの比較、アルミ材・非磁性SUS材等) <p>(2)大電力対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ①200～400kWインバータの並列接続が可能 ②最大3200kWまで対応(8連結) <p>(3)タッチ式コントロールパネル採用</p> <ul style="list-style-type: none"> ①大型タッチパネルを採用 ②加熱条件設定、多段階加熱等のプログラムが容易 	<p>(1)高効率SiC素子搭載</p> <ul style="list-style-type: none"> ①10%の省エネ化を実現 (当社従来製品SFTシリーズとの比較) ②高周波数(～300kHz)対応 <p>(2)FPGAを用いたデジタル化による信号処理の高速化</p> <ul style="list-style-type: none"> ①加熱立ち上がり時間を半減(50ms以下) ②出力電力可変幅の最大化(0.1%～定格) ③加熱対象物変更時の周波数切替が容易に実現

(a) 低周波数用PWMインバータ

(b) 高周波数用PWMインバータ

電源力率・電源効率改善型PWM制御IHインバータ

1. まえがき

誘導加熱 IH(Induction Heating)は、加熱対象物を非接触で自己発熱させるためエネルギー効率が高く、家庭用電磁調理器やIHジャー炊飯器など社会に広く普及するとともに、工場で使用される熱処理工程でもIHを利用する取り組みが増えている。工場では機器の容量が大きくなるため効率アップによる省エネ効果も大きなものになる^[1]。

脱炭素社会の早期実現に向けて喫緊の課題となっている機器の省エネ化への取り組み、また電源環境の改善に向けては、電源力率や電源高調波の低減などの要求が急速に拡大している。

IH電源は周波数変換のためのインバータが必須であり、そのIHインバータはパワー半導体とパワーエレクトロニクス技術の発展と共に、より大電力へ、より高周波へ、より高効率へと進化している。

本稿では省エネに貢献できる独自の制御技術を採用したIH用高効率PWMインバータを紹介する。

2. 新型PWMインバータの特長

2.1 IHと周波数の一般的な関係

加熱用途から周波数を決める場合、ビレットヒータや溶解などの全体加熱は周波数を低く設定し、通常は10kHz未満を選択する。一方、部分加熱は周波数を高くする必要があるが、表面焼き入れなどは焼き入れ深さから最適周波数が決められ、100kHz以上の周波数が必要となることが多い。キュリー点以上の鋼板加熱も浸透深さの関係で高い周波数が必要となる。

2.2 並列共振方式と直列共振方式

IH電源は、共振コンデンサを使って共振回路を構成することで加熱コイルに高周波大電流を流している。

共振方式には、並列共振と直列共振の2つの方式がある。並列共振では、加熱コイルは共振コンデンサに並列に接続され、直列共振では、加熱コイルは共振コンデンサに直列に接続される。10kHz未満の低周波領域では主に並列共振方式が、100kHz以上の高周波領域では主に直列共振方式が使用される。中間帯の10kHzから100kHzについてはどちらの方式も使用されている^[2]。

2.3 PWMインバータの特長

PWMインバータシリーズの特長を示す^{[3][4]}。

・ SBT-PWシリーズの特長

- (1) 並列共振負荷に対応
- (2) 周波数0.3kHz～30kHz対応
- (3) 電源力率約95%、電源効率約95%を実現
- (4) 大電力最大3,200kWまで対応
- (5) 電源入力高調波対策のための12パルス対応

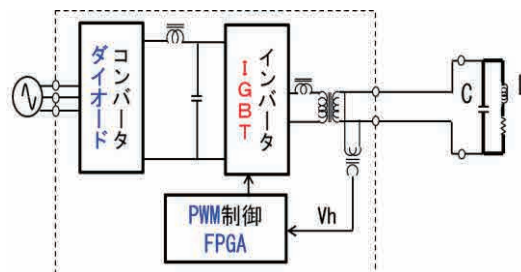
・ SCT-SWシリーズの特長

- (1) 直列共振負荷に対応
- (2) 周波数30kHz～300kHz対応
- (3) 電源力率約95%
電源効率約95%(インバータ部出力まで)
- (4) 加熱立上り時間を半減(50ms以下)
- (5) 出力電力可変幅の最大化(最低出力0.1%)
- (6) 周波数切替が容易
- (7) 共振コンデンサ内蔵(標準)
- (8) 電源入力高調波対策のための12パルス対応

3. 新型インバータの4つの技術

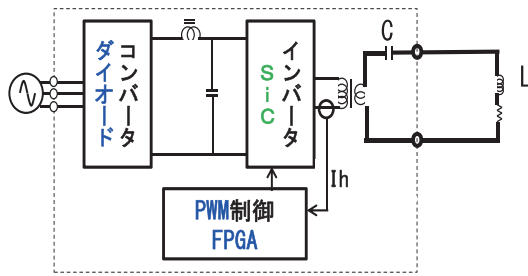
3.1 新型PWMインバータの構成と4つの技術

図1にSBT-PW(並列型)、図2にSCT-SW(直列型)の構成と4つの技術をまとめた。



- ① IGBT素子採用
- ② 整流方式をサイリスタ式からダイオード式へ
- ③ 独自に新規開発したPWM制御搭載
- ④ FPGAによるデジタル制御化

図1 SBT-PWの構成と4つの技術



- ① 最新のパワー半導体(SiC)の採用
- ② 整流方式をサイリスタ式からダイオード式へ
- ③ 独自に新規開発したPWM制御搭載
- ④ FPGAによるデジタル制御化

図2 SCT-SWの構成と4つの技術

3.2 新型インバータ4つの技術の説明

① 最新のパワー半導体の採用

SCT-SWでは、インバータ回路スイッチング素子をシリコンからSiC(Silicon Carbide)に変更した。これにより、大電力の高速スイッチングが可能になり、PWM制御時のインバータ損失を大幅に低減できた。図3にSiCを採用した電圧型インバータ部の系統図内の配置を示す。

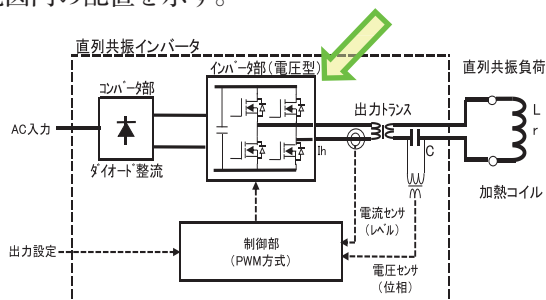


図3 SiCの採用

② 整流方式をサイリスタ式からダイオード式へ

ダイオード整流により、従来のようなサイリスタを使った商用電圧の点弧制御がなくなり、大幅な力率改善と回路電流低減による効率向上を実現した。図4に系統図内でのダイオード整流の配置を示す。

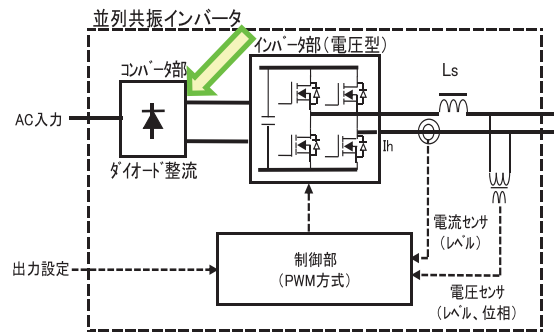


図4 ダイオード式整流回路

③ 独自に新規開発したPWM制御搭載

下記の2つを同時に高速制御する独自のPWM制御技術を開発した⁵⁾。図5にPWM制御搭載のインバータ系統図を、図6に制御部での2つの制御について説明する。

制御1：誘導加熱負荷変動にともなう共振周波数変化への周波数自動追尾。最小パルス幅で追尾することによりインバータ部に流れる高周波電流を最小限にしている。

制御2：目標とする共振周波数でロックしパルス幅可変による出力電力制御。

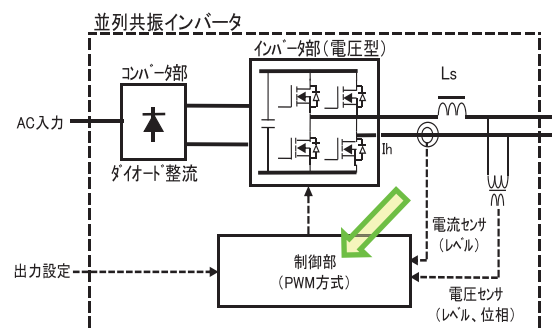


図5 PWM制御系統

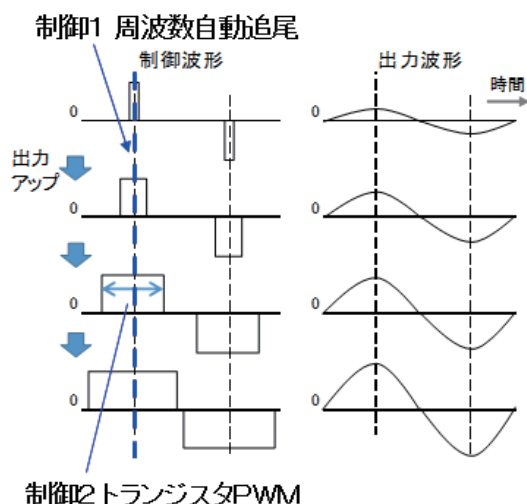


図6 PWM制御の説明

④ FPGAによるデジタル制御化を実現

新開発のPWM制御では、図7の制御基板に搭載したFPGA(Field Programmable Gate Array)を使ったデジタル制御化を実現した。これにより、出力立ち上がり時間が50ms以下に高速化され、出力電力可変幅は最小約0.1%まで可能となった。

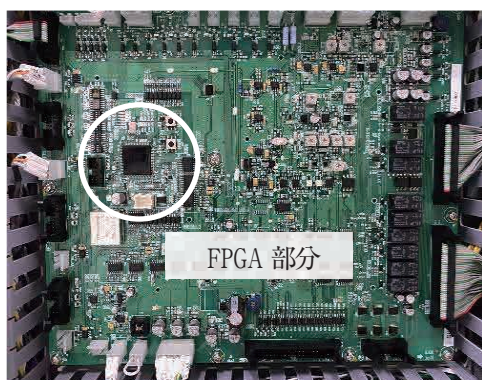


図7 FPGA制御基板

4. 電源力率・電源効率の向上

4.1 電源力率の向上

IHでは、一般的には定格出力の約40%から80%程度の範囲で使用することが多い。

図8に、新型PWM方式のSBT-PWインバータと従来型サイリスタ方式のインバータの出力電力に対する電源力率特性の比較を示す。新型PWMでは全体的に力率が改善しており、特に、出力が80%以下では方式の違いが顕著に現れるため改善度合いが大きくなっている。

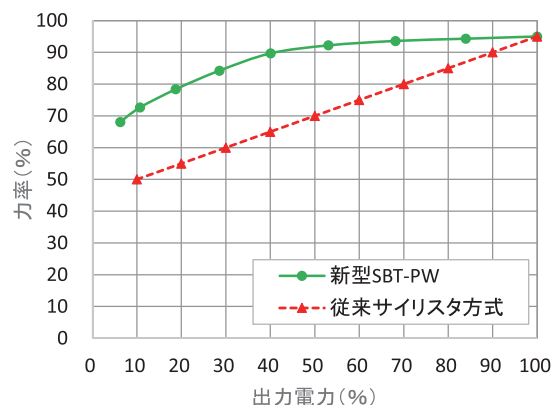


図8 従来型サイリスタ方式との電源力率比較

図9に、新型PWMSiC方式(ダイオード整流)と当社製従来型IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)方式(サイリスタ整流)の電源力率の比較を示す。新型SCT-SWではほぼ全出力電力範囲で約95%の良好な力率となっている。一方、従来型IGBT方式では従来のサイリスタ方式同様に力率が悪化している。

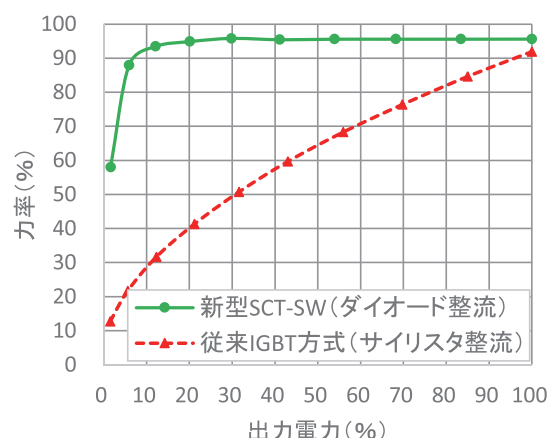


図9 従来型IGBT方式との電源力率比較

4.2 電源効率の向上

新型PWMインバータでは出力可変手段は、インバータ部でのPWM制御になる。したがって、従来のようなサイリスタを使ってAC電圧の導通角を制御して直流電圧を可変する必要はなくなり、コンバータ部はダイオードのみとなる。

また、インバータ部は従来の電流型インバータ回路ではなく、電圧型インバータ回路を採用しており、従来のような大きな直流リアクトルは不要であり、小型の高周波バイパスコンデンサ構成になっている。IGBTに直列接続する逆阻止ダイオードも不

要である。

図10に新型PWM方式のSBT-PWインバータと従来型サイリスタインバータの電源効率(インバータ出力電力/AC入力電力の値)の比較を示す。通常使用される出力40%から80%では、約10%の効率アップとなっていることがわかる。

なお、図9の電源力率、図11の電源効率ともに、新型PWM方式は周波数2kHzにおける実測値であり、従来型サイリスタ方式は周波数1kHz以下の値で機関誌「工業加熱」から引用した⁶⁾。

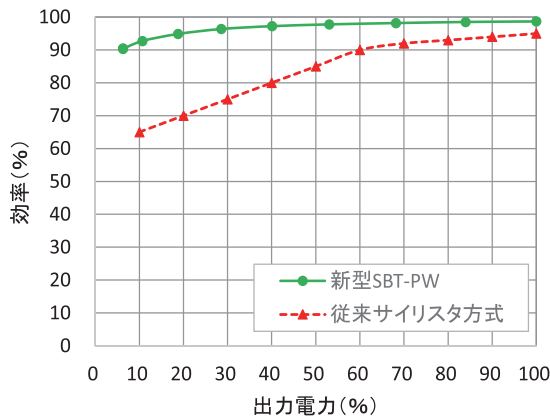


図10 従来型サイリスタ方式との電源効率比較

図11に、新型PWMSiC方式(ダイオード整流)と当社製従来型IGBT方式(サイリスタ整流)の電源効率の比較を示す。

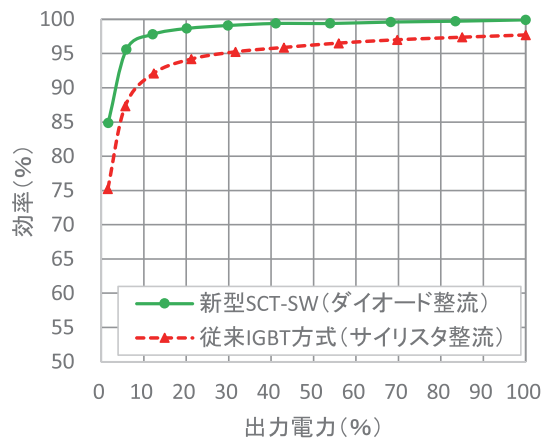


図11 従来型IGBT方式との電源効率比較

両方式ともに直列共振方式であり共振コンデンサは筐体に内蔵されている。

周波数30kHzの条件でインバータ部出力電力/AC入力電力の値で効率を表示している。

グラフより、新型SCT-SWでは損失は極めて小さく効率は97%以上となっている。一方、従来型IGBT方式では効率が3%程度悪化傾向にあることがわかる。

5. SCT-SW400インバータ

今回製品化したSCT-SW400について説明する。SCT-SW400は、出力400kW、周波数30kHz～300kHzであり、外観は図12に示すように、長さ2,000mm、高さ1,850mm、奥行850mmとなっている。コンパクト設計によりSBT-PW400と同一寸法に標準化されている。

図13に示すように200kWユニット2台で構成され、出力トランスの2次側で合成されている。200kWを標準ユニット化し、それを複数連結することで大容量化しており、受電の12パルス仕様にも対応可能である⁷⁾。

共振コンデンサの電圧位相に基づく周波数制御により、誘導加熱特有の負荷変動に伴う共振周波数変化に対し、精度よく周波数自動追尾を行うことが出来る⁸⁾。



図12 SCT-SW400外観
(長さ2,000mm、高さ1,850mm、奥行850mm)

筐体内部の熱解析も実施している。図14に、筐体内部における熱解析の結果を示す。ダイオードモジュール、SiCインバータ等を60℃とし、その他は発熱量が最大となる条件を設定し解析を行った。PLC等の耐熱性の低い部品は55℃以下となる必要があるが、解析の結果筐体内温度が温度仕様を満たしていることを確認している。

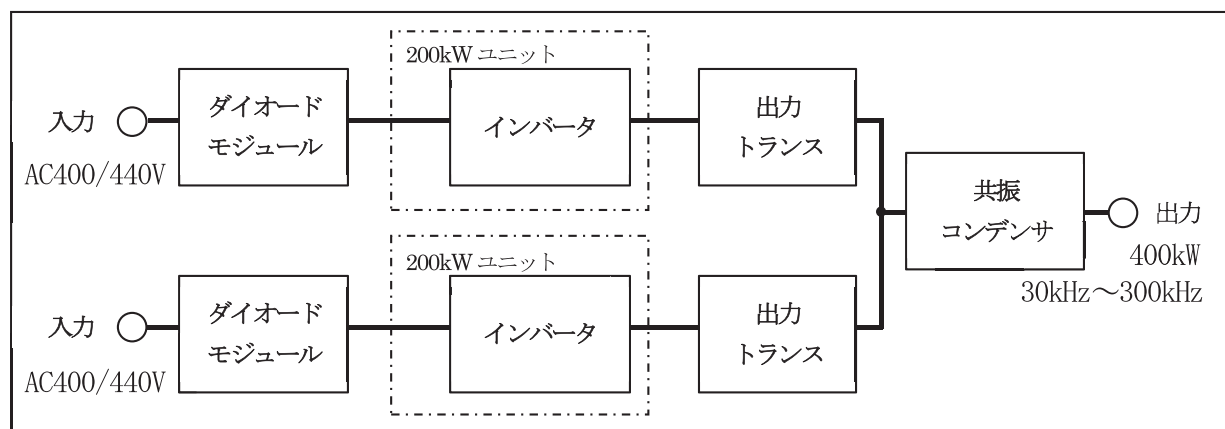


図13 SCT-SW400 ブロック図

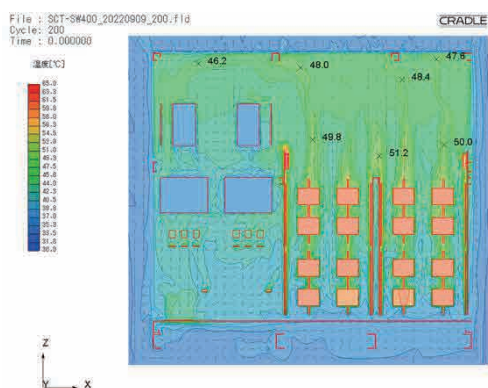


図14 SCT-SW400正面熱解析結果

6. むすび

今回、IH用新型PWMインバータの製品ラインナップに採用した4つの新技术を中心に紹介した。

今後もIH装置の技術革新への取り組みを継続し、さらなる工場の省エネ化を実現し、早急な対応が求められている脱炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- [1] 石間 “省エネに貢献するIH用新型PWMインバータの製品ラインナップ”
機関誌エレクトロヒートNo.245号,2022.
- [2] 石間 “省エネに貢献するIH用新型PWMインバータの開発・製品化”
機関誌エレクトロヒートNo.236号,2021.
- [3] 田内 “次世代半導体SiCを用いたIHインバータの開発の取組み”,
島田理化技報,No.26,2018.
- [4] 守上, 高田, 浜田, 永月 “PWM制御大電力誘導加熱インバータの開発”,
島田理化技報,No.27,2021.

- [5] 特許第6959432号 “インバータ装置およびインバータ装置の制御方法”
- [6] 太田 “高周波誘導炉における新しい1電源2炉運転方式 “パワーシェア” ”
機関紙工業加熱Vol.34, No.4
- [7] 特許第4134059号 “電源装置”
- [8] 特許第6832402号 “インバータ装置およびインバータ装置の制御方法”

著者紹介

生産本部
パワーエレクトロニクス技術部
松原 佑輔

生産本部
パワーエレクトロニクス統括
石間 勉

我々の生活を支えるマイクロ波製品

Microwave products that support our lives

高橋 利昌

Toshimasa TAKAHASHI

1. まえがき

当社の前身は昭和初期に日本海軍が、後にノーベル物理学賞を受賞する朝永振一郎氏らを招聘し、設立したマイクロ波に関する研究所である。

マイクロ波とは電磁波の1つで、波長と周波数によって特徴やその用途が図1のように異なる。



図1 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴^[1]

生活の身近なところでは電子レンジ、これはマイクロ波を加熱用途として利用している。また、携帯電話、無線LANや衛星放送などは通信用途として利用している事例である。他にも、マイクロ波の直進性を活用したシステムとして気象レーダや船舶用レーダ等にも幅広く利用されている。

なお、マイクロ波は、図2に示すようにその周波数帯によっていくつかの種類に分類される。

周波数帯域(GHz)	名称	電波天文以外の主な用途
0.2-0.25 GHz	G ^h バンド	公共業務(移動)・航空管制通信
0.25-0.5 GHz	P ^h バンド	公共業務(移動)・航空管制通信・計画着陸システム(LS)・アマチュア無線・特定小電力無線・公共(一般業務)固定・移動
0.5-2.0 GHz	L ^h バンド	F ^h 放送(13-53ch)・エフ放送・携帯電話・ITS・アマチュア無線・特定小電力無線・航空無線航行・各種レーダー・アマチュア無線・無線LAN等
2-4 GHz	S ^h バンド	公共業務(固定・移動)・放送事業・移動衛星・各種レーダー・アマチュア無線・無線LAN等
4-8 GHz	C ^h バンド	携帯電話・航空無線航行・D-カス5G・無線LAN・各種レーダー・放送事業(固定・移動)
8-12 GHz	X ^h バンド	宇宙研究・地球探査衛星・航空無線航行・アマチュア無線・放送事業(固定・移動)・各種レーダー
12-18 GHz	K ^u バンド	CS放送・電通業務(固定衛星)・放送事業・移動衛星・BS CS2(イター)・公共業務(移動)
18-26 GHz	K ^a バンド	電通業務(固定衛星)・無線アクセスシステム・公共(一般業務)固定・各種レーダー・アマチュア無線・衛星間通信
26-40 GHz	K ^a バンド	各種レーダー・公共(一般業務)固定・移動・アマチュア無線・放送事業(移動)
33-50 GHz	Q ^h バンド	各種レーダー・公共(一般業務)固定・移動・アマチュア無線・放送事業(移動)
40-75 GHz	V ^h バンド	小電力データ通信システム等・放送事業(移動)・衛星間通信・公共業務(移動)
75-111 GHz	W ^h バンド	自動車レーダー(特定小電力)・アマチュア無線・放送事業(移動)

図2 マイクロ波の周波数帯域呼称の例^[2]

近年では、ミリ波帯と呼ばれる周波数30~300GHzにおいてデータの大容量化が可能であり、電波の直進性が高いことから脚光を浴びている。

その特性を生かし、車載レーダ、金属探知機に代わるセキュリティ、列車のワンマン化やホーム管理などへも利用分野が広がっている。

当社は創業以来培ってきたマイクロ波・ミリ波技術を進化発展させ、無線通信やレーダなどの社会インフラ機器から、人工衛星や放射線機器用コンポーネントまで新たな製品を供給し続けてきた。

本稿では、米国を初め各国で打ち上げ競争が激しい通信衛星に向けた関連機器等について、これらの市場動向や技術動向を踏まえて開発した最新の当社製品について紹介する。

2. Q-Band LNBの開発

衛星通信は、1964年に設立された国際電気通信衛星機構(INTELSAT)により商業衛星通信が開始された。1980年代には超小型衛星通信地球局VSAT(Very Small Aperture Terminal)システムが登場し、1m前後の小口径アンテナを持つ小型化されたユーザ端末により多数の地点のユーザを収容できるネットワークが構築されることとなった。

近年では、地球表面から2000km以下の軌道を周回している低軌道衛星を多数連携・同調させる衛星コンステレーション化を図り、絶えず地球全土を覆うことで、途切れずカバー範囲の広い衛星通信を可能にしているが、更なる逼迫する電波資源への対策として地上との通信周波数には広い帯域が確保できるQ帯が国際電気通信連合(ITU)で周波数割り当てされており、衛星通信においてもQ帯の活用が期待されている^[3]。

これまで培ってきたミリ波技術を活用し、RF周波数37.5GHz~42.5GHz、帯域幅5GHzで6バンド対応、雑音指数 2.5dB typ、の広帯域低雑音Q-Band LNB(図3)を開発した。



図3 Q-Band LNB外観

3. Q-Band広帯域アイソレータ及びKa帯BGAサーキュレータの開発

アイソレータ及びサーキュレータはマイクロ波伝送に不可欠な部品であり、アンテナから入った電波をスムーズに回路に送り込むとともに、異常反射を起こした電波は抵抗体に吸収させ、熱として消費させる。

先の広帯域低雑音Q-Band LNBを実現するためのアイソレータを開発した。

Q-Bandでは37.5～42.5GHzの帯域が割り当てられている。LNBに入力される信号がどの位相でも安定した性能を得るにはアイソレータを取り付ける必要があるが、従来のミリ波帯におけるアイソレータは通過周波数帯域が狭く、また信号がアイソレータを通過する際に発生する電力損失が大きい。今回、比帯域が10%以上と広帯域で低損失を実現した広帯域アイソレータ（図4）を紹介する。



図4 Q-Band アイソレータ外観

また、リフロー実装することが可能なBGA（Ball Grid Array）タイプのKa帯サーキュレータ（図5）を開発した。

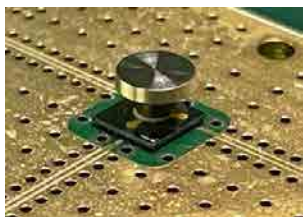


図5 Ka帯BGAサーキュレータ外観

Ka帯とは26-40 GHzまでの周波数帯域を示し、第5世代移動体通信システム、ローカル5G並びに衛星通信システムなど利用領域は広がりを見せ、それらの機器への利用が期待される。

当社が製造したBGAサーキュレータは、従来のマイクロストリップライン型やドロップイン型と比べ小型化（当社比）を実現した。また、表面実装部品としてリフロー実装が可能のため、生産コストの削減に貢献している^[4]。

4. マイクロ波コンポーネントの3Dプリティンクと性能評価

3Dプリンタによる造形がブームとなり、樹脂製であれば10万円程度のプリンターが販売され更に認知度が向上した。金属の3Dプリンタも進歩し、従来手作業で製造していたマイクロ波コンポーネント（ロータリージョイント及びサーキュレータ：図6）へも応用、複雑な形状や微細な構造を一体で実現するという課題解決に挑んだ。



【ロータリージョイント】



【サーキュレータ】

図6 3Dプリンタで製作した製品外観

5. むすび

以上、当社の最新のマイクロ波・ミリ波製品の概要を紹介した。今後もタイムリーに需要を取込んだ製品を拡充しつつ、顧客満足度向上を目指した小型高性能製品を開発し、公共インフラの高度化に貢献していく。

参考文献

- [1] 総務省,電波利用ホームページ
周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴
- [2] 国立天文台,周波数資源保護室ホームページ
電波天文観測と天文観測を継続するために
知っておきたい用語集
- [3] 電子情報通信学会,知識ベース知識の森
ホームページ5群7編衛星通信
- [4] 島田理化技報 No.27 (2021)
“公共インフラに貢献するマイクロ波新製品”

筆者紹介

事業本部 電子営業部
高橋 利昌

6バンド対応広帯域低雑音Q-Band LNBの開発

Development of 6-band wideband low noise Q-Band LNB

佐藤 守
Mamoru SATO

日下 洋
Hiroshi KUSAKA

北上 景一
Keiichi KITAGAMI

池田 篤史
Atsushi IKEDA

要 旨

第5世代移動通信システム（5G）を始めとした高速大容量で超低遅延な通信が始まり、IoTによる人・モノの動き、社会基盤の変革が期待されている。IoTの進展には地球上のあらゆる場所で「いつでも、どこでもつながる」ことが極めて重要であり、デジタルデバイドの解消や航空機、船舶など移動体との通信には衛星通信が欠かせない。特に低軌道衛星は比較的地球から近い距離を周回する軌道を描き、低遅延と低損失などの伝送上の特長があるため、既に多く打ち上げられている。

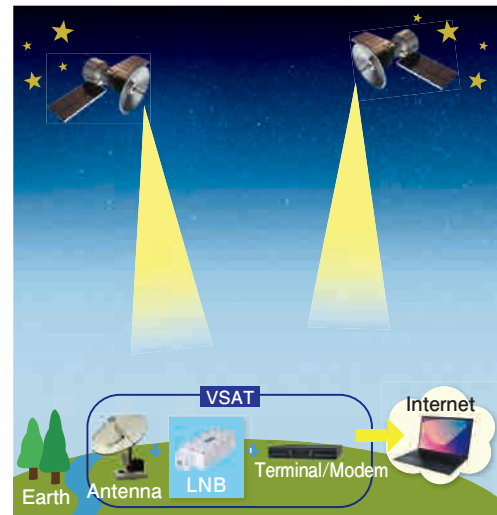
低軌道衛星通信の利用周波数はKa帯が先行するが、ひっ迫する電波資源への対策として地上との通

信周波数には広い帯域が確保できるQ帯が国際電気通信連合（ITU）で周波数割り当てされており、衛星通信においてもQ帯の活用が期待されている^[1]。

当社は、衛星通信におけるVSAT（超小型地球局）用のLNBを事業の一つとしており、これまでC帯、X帯、Ku帯、Ka帯のLNBを開発、製造、販売してきた。低軌道衛星による衛星コンステレーション時代を迎えるなか、当社のLNB事業はQ帯LNBの開発に着手し、RF周波数37.5GHz～42.5GHz、帯域幅5GHzで6バンド対応、雑音指数(以下、Noise Figure) 2.5dB typ.の広帯域低雑音Q-Band LNBを開発した。



衛星コンステレーション



衛星通信ネットワーク

周波数 [GHz]	37	38	39	40	41	42	43	44	
開発目標	37.5	帯域幅 5GHz					42.5		
ITU	37.0 - 37.5	37.5 - 38.0	38.0 - 39.5	39.5 - 40.0	40.0 - 40.5	40.5 - 41.0	41.0 - 42.5	42.5 - 43.5	サービス
									固定、移動、宇宙研究
									固定、移動、宇宙研究、地球探査衛星
									固定、固定衛星、移動、地球探査衛星
									固定、固定衛星、移動、移動衛星
									地球探査衛星、固定衛星、移動衛星、宇宙研究
									固定、固定衛星、放送、放送衛星
									固定、固定衛星、移動、放送、放送衛星
									固定、固定衛星、電波天文

ITUによるQ帯周波数配置とサービス

1. まえがき

VSATシステムにおける地球局はアンテナ、送受信モジュールならびにネットワーク接続機能を有したTerminal/Modem等で構成され、通信インフラの整っていないエリアとの通信を可能にし、地上・海上問わず、移動車両、航空機など世界中で幅広く利用されている^[2]。

加えて高速大容量通信など多様なサービスを提供するために低軌道衛星による様々な衛星コンステレーションシステムが計画されており、地上との通信周波数には広い帯域が確保できるQ帯の活用が期待されている。

当社は、VSAT地球局用送受信モジュールを構成するQ-Band LNBの開発に着手し、試作機を開発した。他社を凌駕する広帯域かつ低雑音な特性を実現するために、まずはキーとなる主要パーツの要素技術開発を実施し、その技術を取り込んで製品開発を実施した。RF周波数37.5GHz～42.5GHzで6バンドに対応し、Noise Figure 2.5dB typ.の広帯域かつ低雑音なQ-Band LNBは様々なエリアやサービスに対応可能であり、インフラ整備を効率化し、デジタルデバインドの解消とIoTの発展に貢献することができる。

本稿では、Q-Band LNBの要素技術開発、製品構成、主要性能、課題と対策、今後の計画について紹介する。

2. 要素技術開発

2.1 広帯域アイソレータ

従来品より広帯域かつ低損失の導波管アイソレータを開発した。詳細については、後稿の特集論文「ミリ波帯超広帯域アイソレータの開発」で紹介する。本稿では、以降WG-ISOと称す。

2.2 導波管／マイクロストリップライン変換

図1に導波管／マイクロストリップライン変換（以下WG/MSLと称す）の解析モデルを、図2にリターンロスと挿入損失の評価結果を示す。

図1の解析モデルは片側が導波管（WG）で他方がマイクロストリップライン（MSL）であるが、この形態では評価する時に校正ができないため、図2の評価においては両側を導波管インターフェースで実施している。リターンロス、挿入損失ともに計算値と測定値はよく一致しており、良好な結果が得られた。

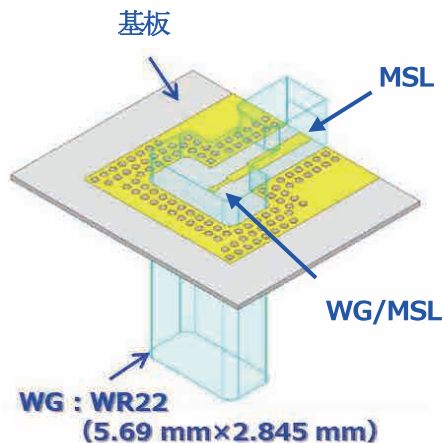


図1 解析モデル

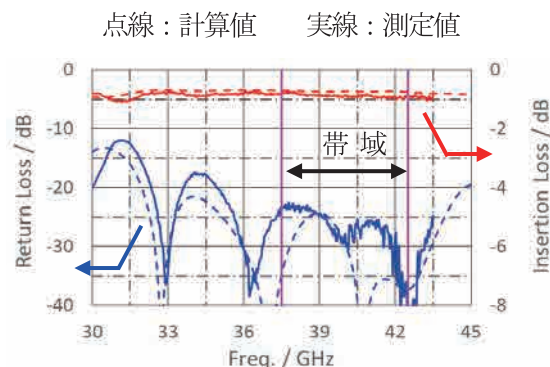


図2 リターンロスと挿入損失
(計算値と測定値)

2.3 MCM (Multi-Chip-Module)

Q帯で使用できるIC (Integrated Circuit) はベアチップが主流であるため、耐環境性、信頼性を確保するためパッケージに入れる必要がある(MCM)。このパッケージ実装は自社で行い、容易に模倣できない構造としている。

図3にMCMの評価方法を示す。MCM単体を基準面にして評価することは難しいため、導波管インターフェースで測定する基板と治具を製作し、その測定値から不要なパラメータを除去(de-embed)してMCMのみのデータを抽出した。図4にMCMのNoise FigureとGainの評価結果を示す。周波数帯域37.5GHz～42.5GHz(帯域幅5GHz)において、Noise Figure 1.9dB以下、Gain 27.5dB以上の良好な性能を達成することができた。

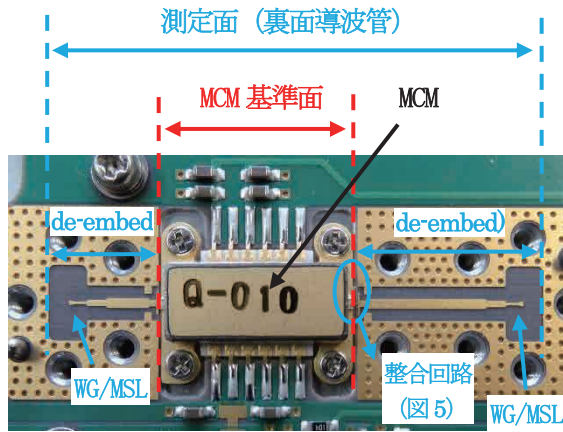


図3 MCM評価方法

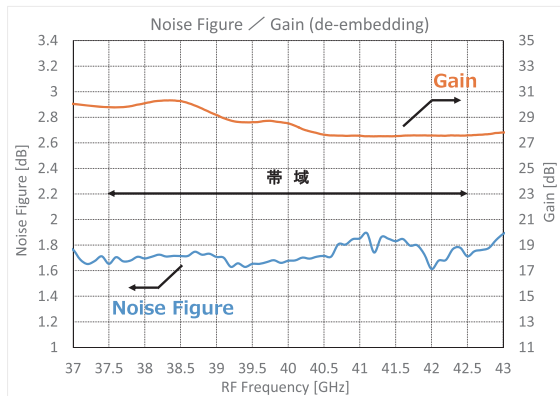


図4 MCMの雑音指数とGain (測定値)

図5はMCMを基板に実装する際の整合回路の解析モデルを、図6は解析結果のリターンロスを示す。パッケージ内部は理想的な50Ωラインとして計算しており、帯域でのリターンロスは20dB以上を確保している。

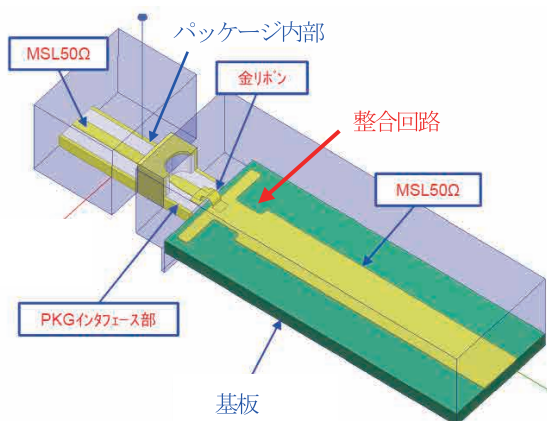


図5 整合回路の解析モデル

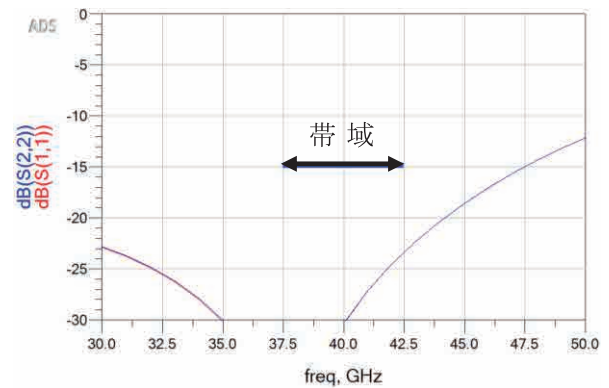


図6 リターンロス (計算値)

3.1 製品構成

図7にQ-Band LNBのブロックダイアグラムを示す。2章で要素開発した技術を取り込み、製品開発を実施した。RF周波数37.5GHz～42.5GHzはITUによるQ帯周波数配置の6バンドに対応し、様々なエリアやサービスに対応可能である。

本LNBの構成は、周波数変換を2回行うダブルコンバージョン方式である。RF周波数(37.5GHz～42.5GHz)を1回の周波数変換でIF周波数(1.0GHz～3.5GHz)にするよりも、1段目のミキサ(MIX1)によって高い周波数(8.7GHz～13.7GHz)に変換することにより、イメージ妨害(15.1GHz～20.1GHz)を容易に除去することが可能となり、RFフィルタ(RF-BPF)なしでも優れた妨害特性を実現することができる。実際には、増幅器(MCM)の雑音成分がMIX1に入力されるとNoise Figureが劣化するため、MIX1の入力にはイメージ妨害を除去するRF-BPFを配置している。かつ、送信帯域(47.2GHz～51.4GHz)の漏れ込みによる特性劣化や不要波の除去も考慮して、このRF-BPFは送信帯域も除去する急峻な導波管型としている(減衰量65dB以上)。

1段目のMIX1によって変換した周波数は帯域幅5GHzであるが、帯域幅が広く2段目のミキサ(MIX2)によってIF周波数に変換する際に帯域内に発生する不要波を除去できないため、周波数はLow-BANDとHigh-BANDに2分割し、帯域幅は半分の2.5GHzで切り替える方式としている。この切り替えはRFスイッチ(RF-SW)とLOCAL周波数(LO2)の設定により可能であり、ピアノスイッチにより機械的に行う。

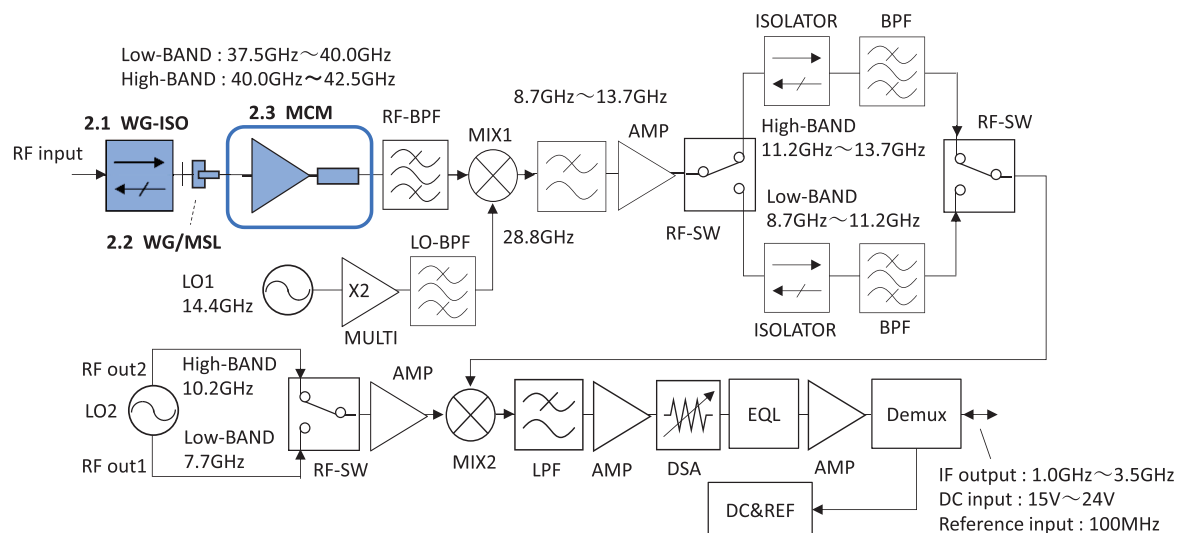


図7 ブロックダイアグラム

3.2 主要性能

表1にQ-Band LNBの主要性能を示す。図8にLow-BANDのNoise FigureおよびOverall Gainの測定値を、図9にHigh-BANDのNoise FigureおよびOverall Gainの測定値を示す。横軸はRF周波数で記載しているが、Low-BAND、High-BANDともにIF周波数では1.0GHz～3.5GHzに相当する。Noise FigureはLow-BANDで2.3dB、High-BANDで2.4dB（いずれも帯域内の平均値で算出）、Overall GainはLow-BANDで60dB～63dB、High-BANDで59dB～62dBの結果を得ることができた。

また、入力部のWG-ISOにより、入力VSWRは1.2以下を達成している。

図10にQ-Band LNBの外観図を示す。

表1 Q-Band LNBの主要性能

RF Frequency [GHz]	Low-BAND	High-BAND
LO Frequency [GHz]	37.5 to 40.0	40.0 to 42.5
IF Frequency [GHz]	28.8(LO1), 7.7(LO2)	28.8(LO1), 10.2(LO2)
Noise Figure [dB] @+25°C	1.0 to 3.5	
Overall Gain [dB]	2.5 typ. with Isolator (2.8 max.)	
Input VSWR	55 to 65 (DSA Gain Step 0.5dB)	
P1dB [dBm]	1.5 max. with Isolator	
Phase Noise [dBc/Hz]	+10 min.	
	-72 @1kHz max.	
	-82 @10kHz max.	
	-92 @100kHz max.	
	-102 @1MHz max.	
External Reference [MHz]	100	
DC Voltage [V]	15 to 24	
Power Consumption [W]	11 typ.	
Size [mm]	W75×H45×D200	
Weight [g]	approx. 980	

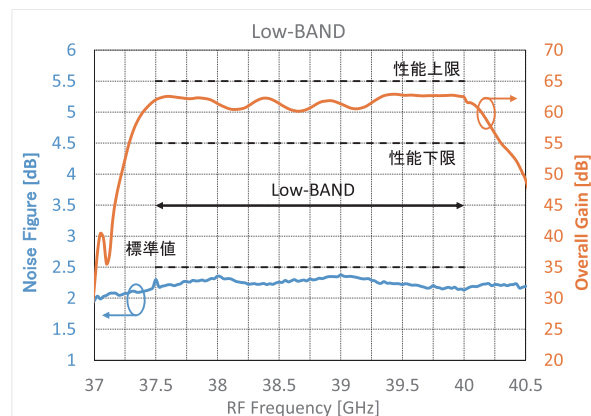


図8 Noise FigureおよびOverall Gain (Low-BAND)

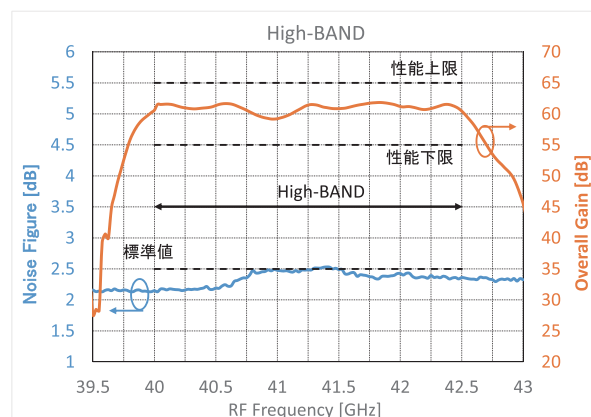


図9 Noise FigureおよびOverall Gain (High-BAND)

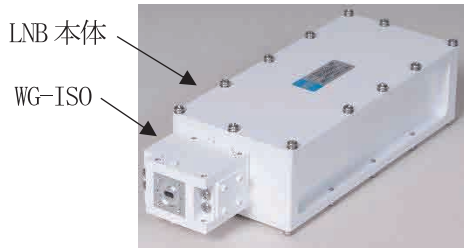


図10 Q-Band LNB外観図

3.3 課題と対策

今回の開発試作機においては、良好な RF 性能を達成することができたが、Gain の周波数特性（リップル）が課題であった。整合回路の最適化によりリップル対策を実施したが、LNB 総合では複雑な回路構成により発生するリップルが大きいいため、図8および図9の Overall Gain で示すようにリップルが若干残っている（波打っている）。更なる改善に向けて回路構成の簡素化を図る計画である。

一方、MCM 単体では、図4の Gain で示すように周波数は 40GHz 帯と高く、帯域幅も 5GHz と広いが、整合回路に加えて実装時の GND 配線を配慮することでリップル改善を実現している。

4.今後の計画

今回の開発試作機の結果を踏まえて、量産に向けて回路構成の簡素化を図り、小型化、低消費電力化も含めた検討を実施し、継続して開発を行う計画である。

5.むすび

本稿では、Q-Band LNB 試作機の開発内容と今後の計画について紹介した。RF フロントエンドにおける主要パーツの要素技術開発は重要なタスクであり、確実な成果を得ることで世界最高水準の低雑音特性を達成した。

Q 帯は今後需要が高まると予想されており、早急に量産化できるよう開発を進めていく。

6.謝辞

本製品開発は、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の国際研究開発／コファンド事業「低軌道衛星通信分野に Q-BAND LNB を活用する研究開発」として、事業

助成を得てカナダの Orbital Research Ltd. と共同で実施しました。ご支援、ご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “低軌道衛星通信における Q-Band LNB の研究開発”，島田理化技報，No.27(2021)
- [2] 吉野 浩輔，笠原 康司，唐木 靖，宮本 和広，“C-Band LNB の製品メニュー拡大”，島田理化技報，No.27(2021)

著者紹介

生産本部
電子システム技術部
佐藤 守

生産本部
電子システム技術部
日下 洋

生産本部
電子システム技術部
北上 景一

生産本部
電子システム技術部
池田 篤史

ミリ波帯広帯域アイソレータの開発

Development of Wide Band Millimeter-Wave Waveguide Isolator

生駒 俊治
Toshiharu IKOMA

田添 晃
Akira TAZOE

浅利 哲
Satoshi ASARI

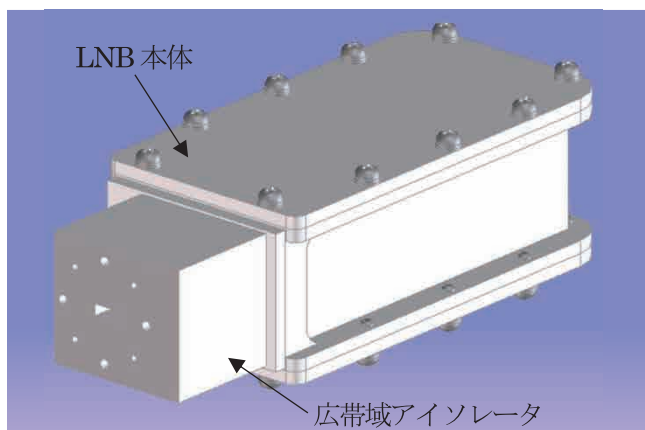
要 旨

当社は、VSAT (Very Small Aperture Terminal) 衛星通信用地球局のLNB (Low Noise Block down converter) を事業の一つとしており、これまでC帯、X帯、Ku帯、Ka帯のLNBを開発、製造、販売してきた。低軌道衛星によるメガコンステレーション時代を迎えるなかで当社ではKa帯に続くQ帯に適合したLNBの開発に着手した。低軌道衛星通信の利用周波数帯はKa帯が先行するが、逼迫する電波資源への対策としてQ帯が国際電気通信連合 (ITU) で割り当てられており、この帯域で高速大容量なブロードバンド通信の実現が大いに期待され

ている。北米市場のQ帯では37.5~42.5GHzの帯域が割り当てられている。LNBに入力される信号がどの位相でも安定した性能を得るにはアイソレータを取り付ける必要があるが、従来のミリ波帯におけるアイソレータは、使用出来る通過周波数帯域が狭く、また信号がアイソレータを通過する際に発生する電力損失が大きい。そのため、比帯域が10%以上と広帯域で低損失を実現するアイソレータを開発した。



低軌道衛星メガコンステレーション



試作したアイソレータの外観



Q-Band LNB外観図

1. はじめに

一般的なアイソレータは、図1.1に示すように3ポートサーキュレータの端子①から入った電波を低損失で端子②へ伝搬するが、端子②から入った電波は③のダミーロードで吸収されて、端子①へ伝搬されない。このように決まった方向にのみ伝送され、逆方向には伝送しないという非可逆性を有する。このような特性を持つアイソレータは増幅器のインピーダンス整合、合成器の混変調防止など反射波による悪影響を除去するために使用される。

本論文では導波管3ポートサーキュレータを用いたミリ波帯の超広帯域導波管アイソレータの開発結果を報告する。

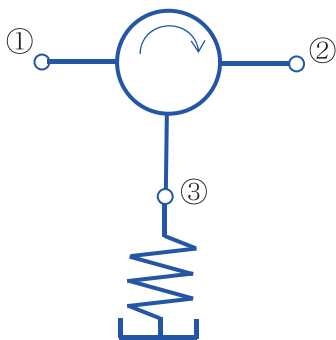


図1.1 アイソレータ

2. 広帯域アイソレータの設計

2.1 導波管3ポートサーキュレータの構造

3ポートサーキュレータは図2.1に示すように、3つの導波管を120°の角度を持たせて接合し、接合部の中心にフェライトと呼ばれる磁性体を配置、これに導波管の外部より磁石で直流磁界を印加する構造になっている。図2.2に円偏波透磁率（ $\mu+$ 、 $\mu-$ ）の磁界による透磁率の変化のグラフを示す。図2.1のように導波管の外部より直流磁界を加え、フェライトに高周波磁界を加えると直流磁場方向を軸として回転する力を受け、歳差運動が起こる。歳差運動の回転方向は直流磁界の向きに対して右ネジの関係にあり、歳差運動と同じ回転方向の高周波磁界の場合は正の円偏波、逆の回転方向の場合は負の円偏波という。また、正の円偏波に対する透磁率を $\mu+$ 、負の円偏波に対する透磁率を $\mu-$ と呼ぶ。図2.2に示すように正の円偏波および負の円偏波に対して異なった透磁率を持つことが分かる。この特性を利用することで、サーキュレータのような非可逆装置が可能になる。

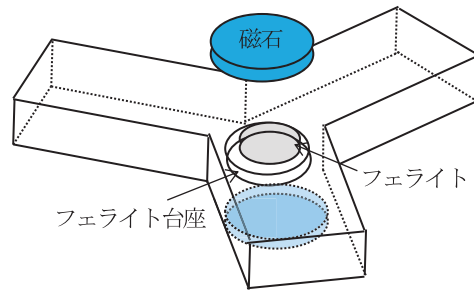


図2.1 3ポートサーキュレータ構造

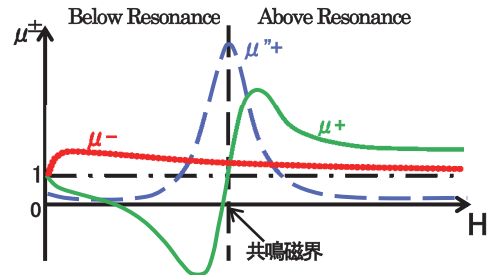


図2.2 磁界による円偏波透磁率の変化

2.2 導波管サーキュレータの広帯域化

一般的に、マイクロ波帯（3～30GHz）の導波管3ポートサーキュレータにおける帯域幅は10～15%と比較的広く設計されている物もあるが、ミリ波帯（30GHz～）の導波管3ポートサーキュレータの帯域幅は10%以下と狭く、また挿入損失が大きい問題があった。そのためミリ波帯で広帯域で低損失なサーキュレータの開発が必要となっている。

図2.3に導波管の中にフェライト台座とフェライトがそれぞれ1個になる最も簡易的な構造の導波管サーキュレータの構造を示す。この場合、図2.6の単峰性の特性例に示すように反射減衰量のピークが一つとなり、帯域幅が約10%となることが分かる。図2.4に広帯域化のため、フェライトとフェライト台座がそれぞれ2個になるようなサーキュレータの構造を示す。この場合、図2.6の双峰性の特性例に示すように反射減衰量のピークが二つとなり、帯域幅が約18%となることが分かる。さらに広帯域にするには、サーキュレータに図2.5に示すように並列共振回路を付加することで、三峰性の特性になることが知られている。この場合、図2.6の三峰性の特性例に示すように反射減衰量のピークが三つとなり、帯域幅は約25%程度と広帯域になることが分かる。

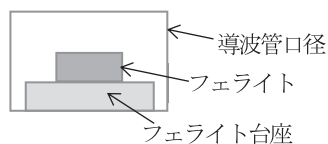


図2.3 単峰性特性のサーキュレータ構造例

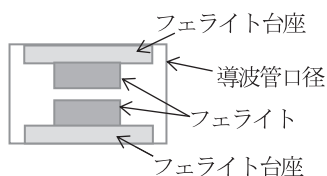


図2.4 双峰性特性のサーキュレータ構造例

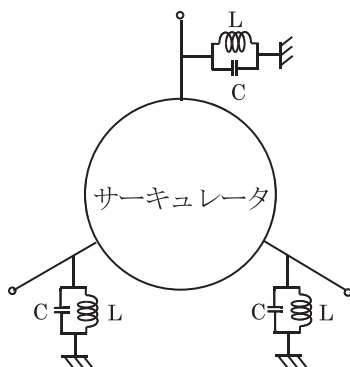


図2.5 外部付加回路による三峰性回路例

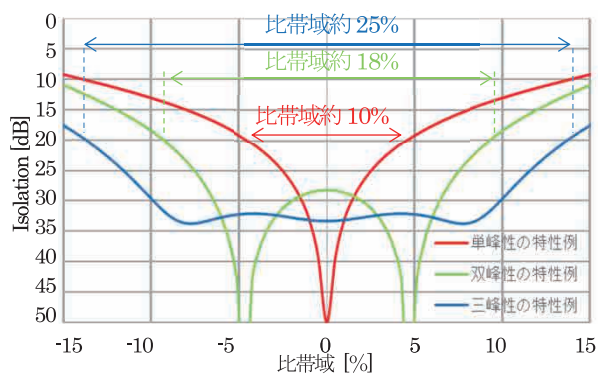


図2.6 サーキュレータの比帯域例

2.3 導波管サーキュレータの広帯域設計

2.2項に記載した三峰性のサーキュレータを設計する。設計仕様を表2.1に示す。目標とする周波数範囲は37.5～42.5GHzとして、比帯域は中心周波数 $f_0=40\text{GHz}$ の12.5%とした。反射減衰量およびアイソレーションは20dB以上とし、挿入損失は0.3dB以下を目標として設計した。設計はフェライト、フェライト台座を各2個用いて、フェライト台座周りに共振回路を接続し、三峰性の特性として電磁界解析により最適化を行った。設計した結果を図2.7に、計算モデルを図2.8に示す。図2.7から分かるように三峰特性になっており、反射減衰量の20dB帯域幅が34～44GHzの約10GHzで比帯域で25%と広帯域に設計が出来ている事が分かる。

表2.1 仕様値と設計値

項目	目標値	設計値
周波数[GHz]	37.5～42.5	同左
挿入損失[dB]	0.3以下	0.25
反射減衰量[dB]	25以上	25
アイソレーション[dB]	24以上	24

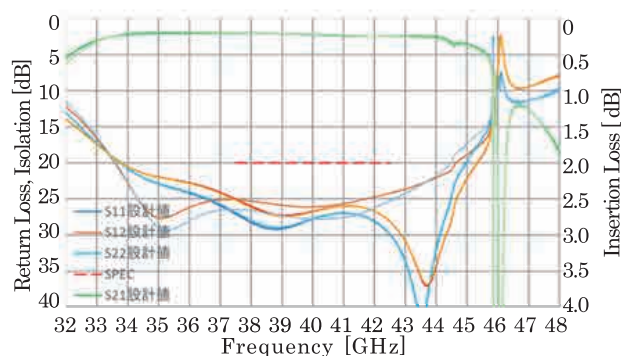


図2.7 広帯域サーキュレータ計算結果

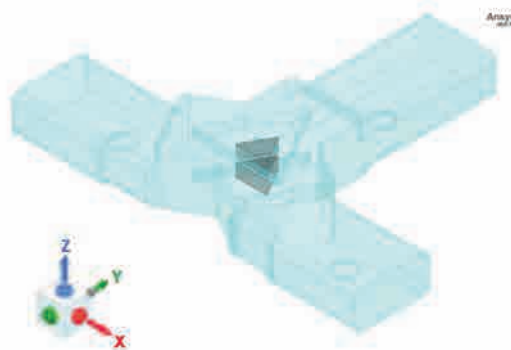


図2.8 計算モデル図

2.4 ダミーロード

ダミーロードはサーキュレータをアイソレータにする為、サーキュレータの1端子を終端する部品となる。ダミーロードの吸収体はエコソープを用いて電磁界解析により反射減衰量が30dB以上になるような形状を何種類か設計・試作し、性能の良い形状を採用した。試作したダミーロードの性能を図2.9に示す。

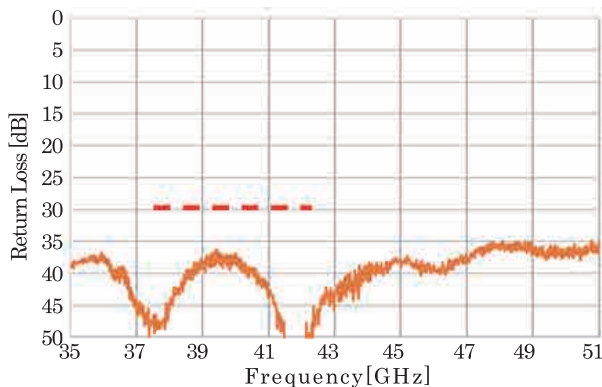


図2.9 ダミーロードの試作結果

3. 測定結果

図3.1に設計値と実測値のSパラメータを、表3.1に設計値と実測値を示す。設計した帯域幅37.5～42.5GHzにおいて、挿入損失は設計値0.25dBに対して0.21dB、反射減衰量は25dBに対して23dB、アイソレーションは24dBに対して25dBとなった。また、反射減衰量の20dB帯域幅は設計値の約10GHzに対して約9GHzとなり、比帯域20%の広帯域なアイソレータが完成した。

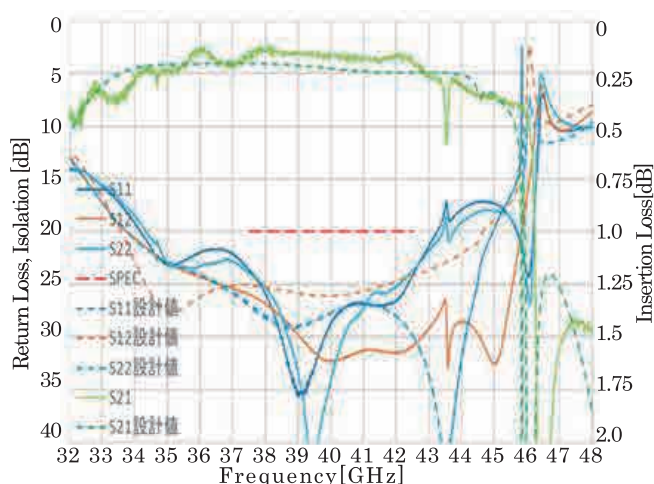


図3.1 設計値と実測値の比較

表3.1 設計値と実測値

項目	設計値	実測値
周波数[GHz]	37.5～42.5	同左
挿入損失[dB]	0.25	0.21
反射減衰量[dB]	25	23
アイソレーション[dB]	24	25

4. むすび

今回、ミリ波帯広帯域アイソレータの開発内容を紹介した。従来はミリ波帯で比帯域10%以上の広帯域の製品は無かった。今回の開発で外部付加回路による広帯域化に取り組み、これが実現した。当社ではQ帯以外にも様々な周波数帯のアイソレータの市場投入を随時行っている。

アイソレータ、サーキュレータ等のマイクロ波立体回路技術は、伝送線路中の反射波の除去、インピーダンス整合、発振機などの安定動作に不可欠である。今後も当社のコア技術として市場の変化に対応した製品開発を進めていく。

5. 謝辞

本製品開発は、NEDOの国際研究開発／コファンド事業「低軌道衛星通信分野にQ-BAND LNBを活用する研究開発」として、事業助成を得て実施しました。ご支援、ご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 小西良弘, “実用マイクロ波技術講座” (2001)
- [2] 橋本忠士, “マイクロ波フェライトとその応用技術” (1997)
- [3] 田島隼人, 根本淳一, 萩原栄治, 浅利哲 “金属3DプリンタによるX帯導波管サーキュレータの試作評価” 電子情報通信学会講演論文集 (2022)
- [4] 北上景一, 佐藤圭, 鈴木君尚, 田添晃, 浅利哲 “表面実装(BGA)型Ka帯サーキュレータの評価” 電子情報通信学会講演論文集 (2022)
- [5] 北上景一, 佐藤圭, 田添晃 “BGAサーキュレータの量産開発” 島田理化技報 No.27, PP31-36 (2021)

著者紹介

生産本部
電子システム技術部
生駒 俊治

生産本部
電子システム技術部
田添 晃

生産本部
電子システム技術部
浅利 哲

ローカル5Gや衛星通信用モジュールに適用可能な Ka帯BGAサーキュレータの開発

Development of Ka-band Ball Grid Array Circulator
for Application to Local 5G and Satellite Communication Modules

北上 景一
Keiichi KITAGAMI

佐藤 圭
Kei SATOH

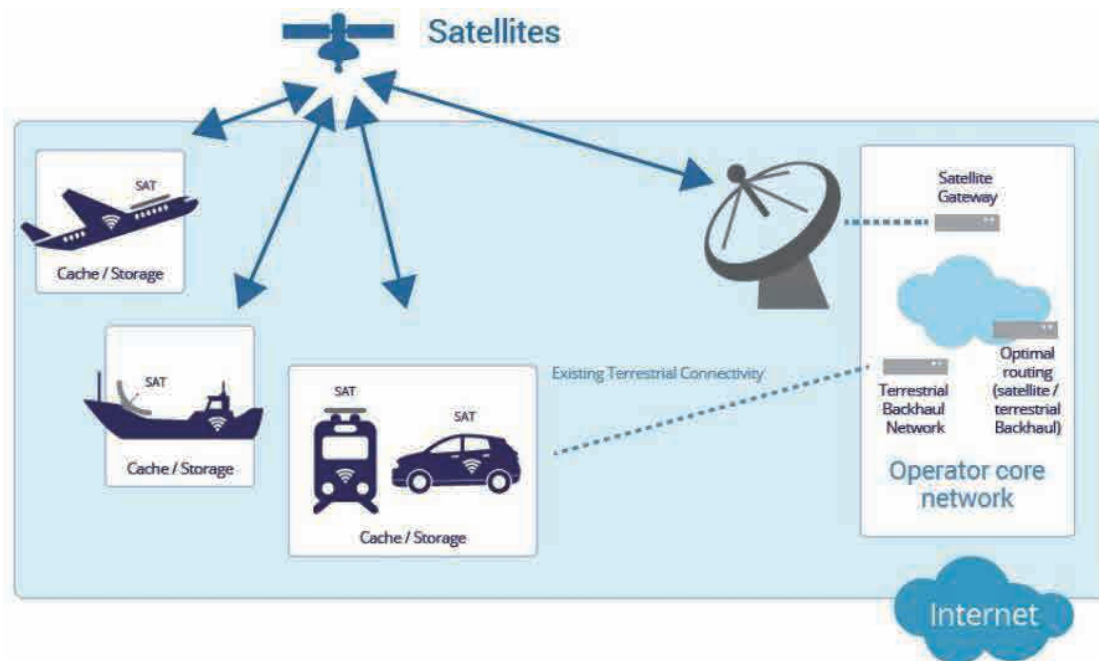
田添 晃
Akira TAZOE

浅利 哲
Satoshi ASARI

要 旨

本稿で紹介するBGA（Ball Grid Array）サーキュレータは、キャリアを有しないマイクロストリップライン型である。従来のマイクロストリップライン型やドロップイン型の実装には、実装基板側とリボンボンディングする必要があるが、本サーキュレータは他の部品とともにリフロー実装することが可能であり、組立てコストの削減が可能となる。さらに、BGA化することにより、サーキュレータを構成するフェライト基板の裏面を使用することが可能となるため、モジュール等の小型化も実現できる。

国内では2020年に第5世代移動体通信システム（5G）のサービスが開始され、同時に5Gにおける衛星通信の役割についても注目されている。欧州では官民共同プロジェクトが活動を活発化しており、3GPP（Third Generation Partnership Project）等において5Gの標準化でも衛星との接続が検討されている。そのような中、当社ではローカル5Gや衛星通信用モジュールへの適用を目指してKa帯のBGAサーキュレータの開発を進め、製品販売を目標に活動している。



引用元：ITU-R M.2460-0

Ka帯BGAサーキュレータの適用可能分野の目標例

1. はじめに

サーキュレータは、入力信号と出力信号を分離することができるデバイスであり、例えば、無線機の送受信機において、送受共用アンテナの実現に用いられている。従来のマイクロストリップライン型やドロップイン型のサーキュレータ/アイソレータは、はんだ付けや接着、またはねじで固定した後に金属リボン等で実装基板の線路と接続する必要がある。一方で、本稿で紹介する開発品（図1、図2）はリフロー実装することで被実装基板の線路と接続することができる。そのため、他のチップ部品と同時実装することが可能となり、組立て作業において非常に大きなコストメリットを得ることができる。

当社では、リフロー実装可能なX帯BGAサーキュレータの量産化を実現している。その経験を活かして現在はKa帯BGAサーキュレータの開発をおこなっている。本稿ではKa帯BGAサーキュレータの開発概要、評価器の設計と実測の比較、課題や今後の展望等について述べる。

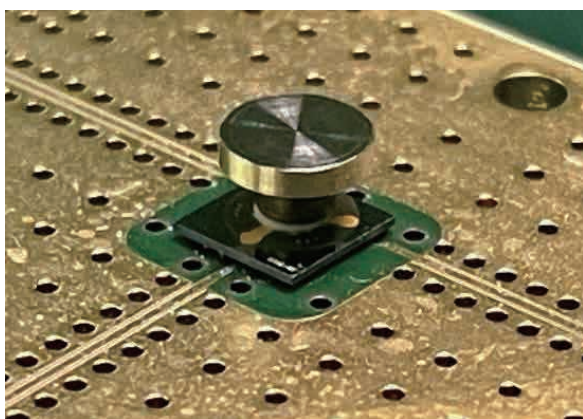


図1 Ka帯BGAサーキュレータの外観

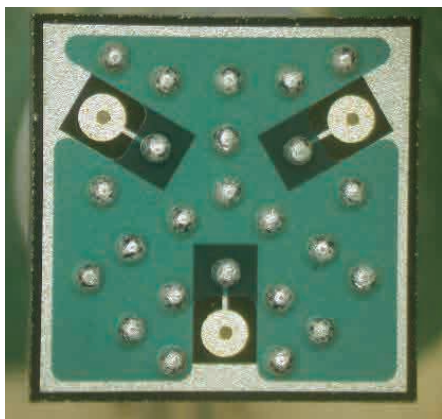


図2 Ka帯BGAサーキュレータの裏面

2. サーキュレータ^[1]

2.1 BGAサーキュレータについて

本稿で紹介するサーキュレータは、リボンやワイヤーで接続する一般的なマイクロストリップ型サーキュレータとは異なり、キャリアを有しておらず、裏面にはんだボールが格子状に並べられている特長がある（図2）。これをBGA構造という。フェライト基板の表面にあるマイクロストリップラインはスルーホールを介して裏面のパターンにつながっている。更に裏面のパターンは、はんだボールへ接続される。そのため、被実装基板にサーキュレータをリフロー実装すればサーキュレータの各端子と被実装基板の回路が接続され、金属リボンによる接続が不要になる^[2]。ただし、アンダーフィルの種類やその使用有無、被実装基板におけるBGAサーキュレータが接続される回路（ランドパターン等）の影響を受けるため注意が必要である。

3. 当社におけるKa帯BGAサーキュレータの開発^[3]

3.1 開発概要

当社では、三菱電機（株）殿と共同開発したX帯BGAサーキュレータの量産化を実現している。その設計・製造技術を集約し、ラインナップ拡充を目的として新規周波数帯の開発をおこなっている。そして、技術的に難易度が高いKa帯の開発を進めることで、その他周波数帯への製品化に向けた設計能力と生産能力を習得することを目標として開発を進めている。

3.2 Ka帯BGAサーキュレータの構成

Ka帯BGAサーキュレータはX帯と同じでヨーク、磁石、スペーサ、フェライト基板、及びはんだボールから構成されている。図3に分解斜視図を示す。フェライトとスペーサの間、スペーサと磁石の間、磁石とヨークの間は、各々接着剤で固定されている。ヨークを取り付けていることで防磁性能を上げ、外部へ漏れ出る磁場を小さくしている。それにより、周辺部品への磁場の影響を抑えることができる。また、ヨークの使用には、フェライト基板へ印加される磁場を強くする働きも兼ねている。ヨークの最外径は、性能的な観点からは、図3のサイズよりも小さくすることが可能である。しかし、

組立て上の制約で大きくしなくてはならない理由があり、ヨークの小型化については今後の課題の1つとしている。

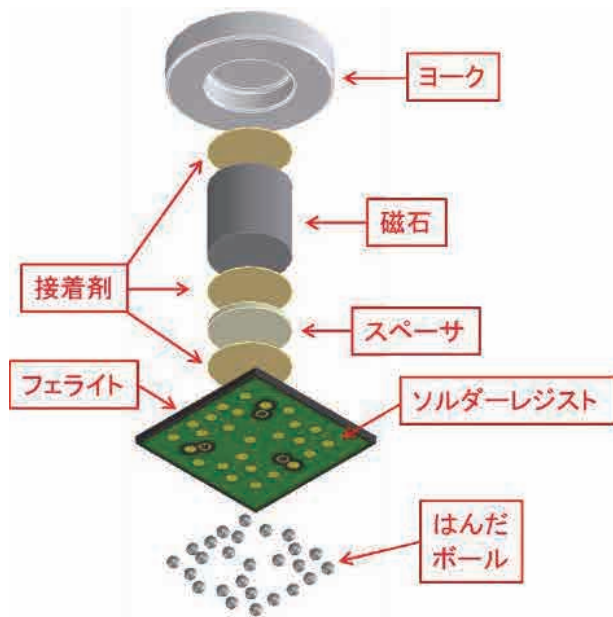


図3 分解斜視図

3.3 Ka帯BGAサーキュレータのRF性能

現在開発中の Ka 帯 BGA サーキュレータ（図 1）の主要性能について、目標性能と試作機の RF 特性の代表例を紹介する。目標性能を表 1 に、反射損失特性を図 4 に、アイソレーション特性を図 5 に、通過損失特性を図 6 に示す。非常に広帯域にサーキュレータ動作をしているが、通過損失の実測値が大きい実用的ではないと考えている。挿入損失の開発目標性能は 1 dB 以下であり、達成に向けて改良設計をおこなっていく。また、周波数範囲に関しても、より高い周波数（最低でも 31 GHz）をカバーできるよう併せておこなっていく。

ここで、図 4～図 6 には実測結果と解析結果を重ね合わせたものを示している。低域側の RF 特性は解析と実測とで比較的一致しているが、高域側は実測の方が狭帯域になっていることが確認できる。この差異は決して無視することができないレベルのものであり、性能を改善する上で原因を特定する必要がある。

表1 開発目標性能

項 目	性能
周波数範囲	26～30 GHz
反射損失	15 dB以上
アイソレーション	15 dB以上
通過損失	1 dB以下

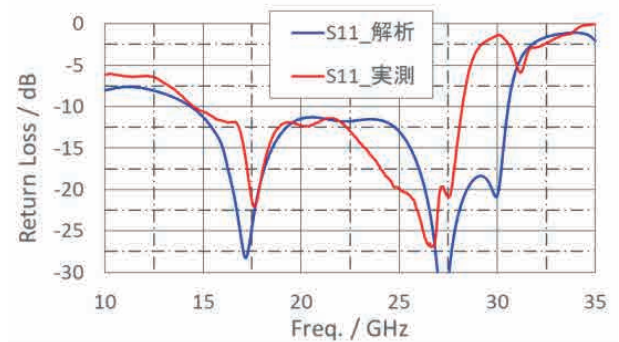


図4 反射損失特性

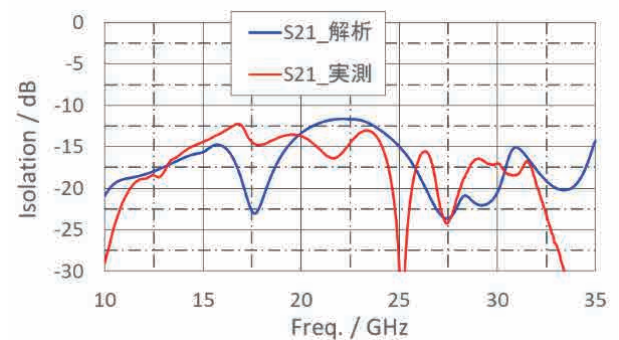


図5 アイソレーション特性

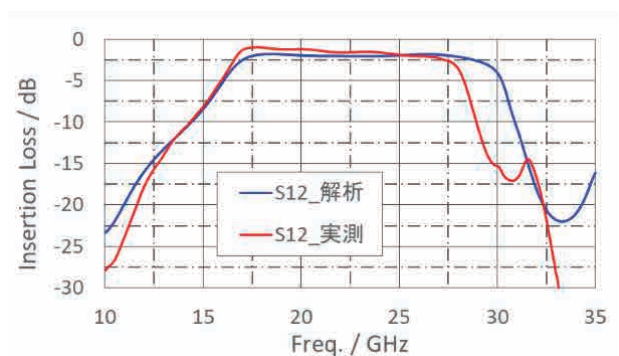


図6 通過損失特性

3.4 バックシミュレーションによる原因特定

3.3 で記載した設計と実測の差異について、電磁

界解析によるバックシミュレーションを実施したところ、フェライトの誘電率が関係していることが分かった。フェライトの誘電率を変化させた場合の解析結果を図7に示す。図7では明確に差が現れている通過損失特性のみを示しているが、反射損失特性やアイソレーション特性にも同様の傾向を確認できている。この傾向は、誘電率が高いほど帯域が狭まる方向に変化する点が共通している。

バックシミュレーションの裏付けとして、同一ロットのフェライトの物性値測定を実施した。その結果、概ね期待通りの結果を得ることができ、バックシミュレーションの妥当性を確認することができた。フェライトの比誘電率の測定結果を図8に示す。なお、図8の所々に見られるスパイクは測定エラーに依るものである。カタログに記載されているフェライトの比誘電率は12.5だが、その値は9.4 GHzでの測定値であると注記で謳われており、Ka帯における誘電率は不透明だった。今回の評価器の結果と物性値の影響を考慮した上で、次の試作機開発に取り組んでいる。

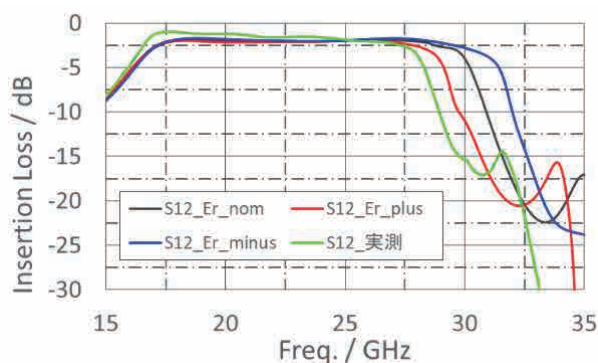


図7 比誘電率の影響（通過損失）

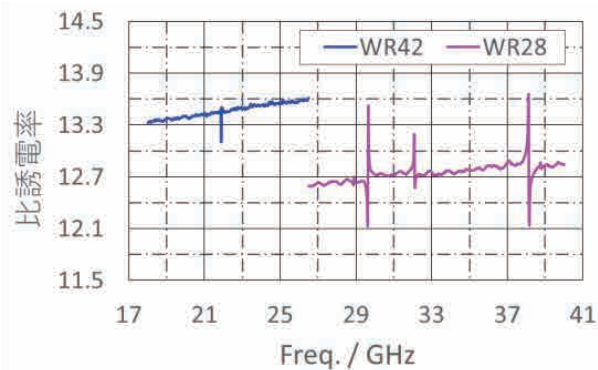


図8 比誘電率の周波数特性

4. 開発品の組立て方法の紹介

4.1 Ka帯BGAサーキュレータの組立て方法

BGA サーキュレータの組立ては、各部品を接着で積み上げる。部品の接着は、位置精度が RF 性能に影響を及ぼすため、設計で定められた位置精度で接着する必要がある。従来の X 帯 BGA サーキュレータは、設計要求の位置精度を満足するため専用治具を使った手動での組立て、および自動機により組立てている。どちらも年間 10,000 台以上の生産が可能であり量産体制を確立している¹⁴⁾。一方、Ka 帯 BGA サーキュレータの部品が小型化しているため、従来と同じ組立てができない。専用治具を使い手動により組立てたが、工程が増えてしまい生産性が低い。生産性向上を課題とし、自動機の適用に取り組んでいる。

4.2 はんだボールの搭載

BGA サーキュレータはフェライト基板の実装用ランドにはんだボールを接合するため、フラックスの塗布、はんだボールの搭載、リフローによる接合の工程から成る。

Ka 帯 BGA サーキュレータのはんだボールは、RF 性能への影響を抑えるため直径 0.3 mm のものを搭載している。X 帯 BGA サーキュレータは、はんだボール搭載治具を使い直径 0.5 mm のはんだボールを搭載している。Ka 帯は、はんだボールが小さいため自動機ではんだボールを搭載した。フラックス塗布からはんだボール搭載までを自動機による作業とするため、最適なフラックス塗布用ノズル、はんだボール吸着ノズルを選定した。はんだボールをノズルで吸着している状態を図9に、はんだボール搭載後のフェライト基板を図10に示す。はんだボール吸着ノズルは、はんだボール1個を吸着するため搭載時間がかかる。搭載時間短縮を課題とし、はんだボール一括吸着ノズルの適用、はんだボール搭載治具の小ボール対応に取り組んでいる。

6. むすび

今後、社会のデジタル化を支えるための ICT インフラの高度化・強靱化が一層進められると考えられる。また、宇宙の通信技術の多面的発展や先端的な地上の通信技術との協調等が目指されていることから、5G 関連事業は更に進んでいくと考えられる。市場の変化にタイムリーに対応していき、製品開発を進めていくと共に公共インフラの高度化に貢献していくことを目指す。

参考文献

- [1] 北上 景一, 佐藤 圭, 田添 晃, “BGA サークュレータの量産開発”, 島田理化技報, No.27 (2021)
- [2] 石橋 秀則, 北上 景一, 佐藤 圭, 島貫 昌喜, 鈴木 君尚, 浅利 哲, “表面実装型サーキュレータの試作評価”, 2016 年ソサイエティ大会講演論文 C-2-63
- [3] 北上 景一, 佐藤 圭, 鈴木 君尚, 田添 晃, 浅利 哲, “表面実装 (BGA) 型 Ka 帯サーキュレータの試作評価”, 2022 年ソサイエティ大会講演論文 C-2-19

著者紹介

生産本部
電子システム技術部
北上 景一

生産本部
生産管理部
佐藤 圭

生産本部
電子システム技術部
田添 晃

生産本部
電子システム技術部
浅利 哲

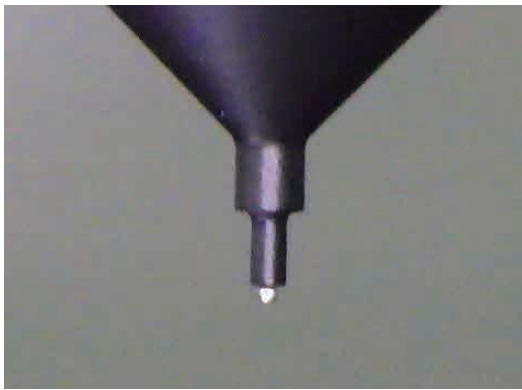


図9 はんだボールの吸着

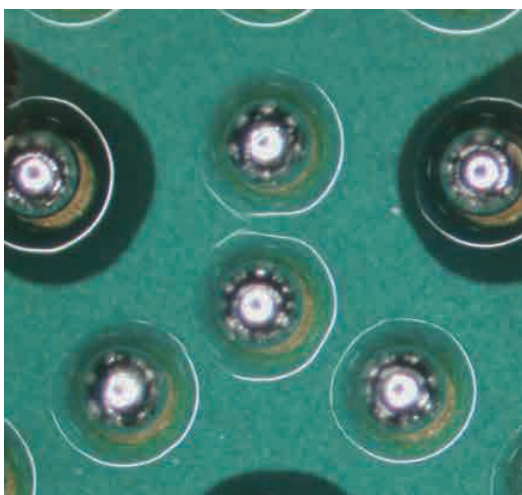


図10 はんだボール搭載後のフェライト基板
(リフロー前)

5. 技術的課題と今後の展望

試作開発品の基板の厚みは 0.2 mm と非常に薄くなっており、外注業者の高い加工能力が必要である。今後、外注業者にて条件出しが行われていく中、改善を更に進め、歩留まり向上につなげる必要がある。

BGA タイプのサーキュレータは製品ラインナップや生産数が増える見込みである。品種により、製品形状、はんだボールの大きさ等が異なるため、工程を変更し最適工程とする必要がある。製品仕様に合った最適工程とするため、新たな工法に取り組む必要がある。

マイクロ波コンポーネントの3Dプリンティングと性能評価

3D Printing and Performance Evaluation of Microwave Components

根本 淳一
Junichi NEMOTO

百地 俊也
Toshiya MOMOJI

要 旨

マイクロ波コンポーネントは、高周波を利用した電子機器や通信システム機器において重要な役割を担っている。その製作は公知の製造方法だけでは複雑な形状や微細な構造を一体化することが難しい。そこで、金属3Dプリンタを用いることでこれらの課題を解決し、安価で短納期かつ安定した品質のマイクロ波コンポーネントの製作を目指し電気性能および機構性能の評価を実施した。

製作は次に示す3種の導波管コンポーネントで検証し実現性を探った。

(1)ロータリージョイント（以下“R/J”）は、回転するユニット間で信号やエネルギーを伝達するための重要な部品である。通常は各々の部品をろう付けで接合していた。ろう付けは専門技能が必要で作業者が限定される。

(2) サーキュレータは、マイクロ波信号を一方方向に伝搬する機器であり、送受共用器として用いられ、一端を終端することで信号の逆行を防ぐことが可能となる導波管コンポーネント。通常は切削加工で製作した部品をねじで締結し組み立てていた。

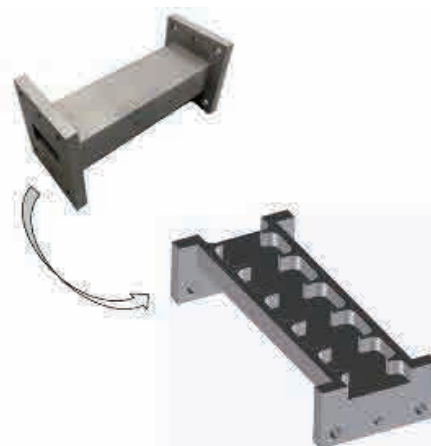
(3) バンドパスフィルタ（以下“BPF”）は、特定の周波数帯域の信号を通過させる機能を有するコンポーネント。通常は切削加工で製作した部品をねじで締結し組み立てていた。



ロータリージョイント



サーキュレータ



バンドパスフィルタ

3Dプリンティングによる製品外観

1. はじめに

近年、マイクロ波通信および無線通信の急速な発展により、高性能なマイクロ波コンポーネントの需要が増加している。これに伴い、マイクロ波コンポーネントの設計と製造方法においても革新的なアプローチが求められている。3Dプリンタは、通常の製造方法とは異なる手法で、物質を精密に積層して立体的な形状を作り出すことが可能である^{[1][2][3]}。この技術は、マイクロ波コンポーネントの製造において多くの利点をもたらす可能性がある。例えば、通常の製造方法では難しく、かつ複雑な内部構造や部品点数の削減が可能になる。

3Dプリンタを用いてマイクロ波コンポーネントを製作し電気特性を検証した。

2. 従来工法の課題と3Dプリンタの活用

現在、当社では、マイクロ波コンポーネントの製造において、ろう付け（銀ろう付けやDIPブレーシング）を採用している。ろう付けは、導電性の金属ろう材を使用して部品同士を接合する技術である。マイクロ波コンポーネントは、内部を複雑な形状で構成する必要があるため、そのためにさまざまな部品を組み合わせて形成している。各部品の隙間は電気性能に影響するため金属ろう材を流し隙間を埋め、電氣的接触および機械的強度も向上させている。

この方法では、ろう材が溶ける温度まで十分に部品を加熱した後、必要な部分にろう材を差す、または加熱前にろう材を配置しておくことでろう材が溶け、毛細管現象を利用してコンポーネントの部品同士を接合する。ろう付けは、手作業に依存しており、熟練した技能者による作業を要する。ろう付けには加熱や冷却のサイクルが必要であり、時間がかかるため、製造プロセスの短縮化に課題がある。加熱冷却の工程により材料が歪み、所望の形状でなくなってしまう可能性もある。また、ろう付けでは作業者の技量や経験によって接合の品質が左右されるため、同じ製作条件のコンポーネントでも品質のばらつきが生じる。手作業で行われるため、作業者の疲労やヒューマンエラーによる不具合のリスクも潜在する。

その他、ろう付けを用いないコンポーネントにおいては、部品同士をねじにより固定するため、分割数が多く部品点数が増えてしまう課題もある。マイクロ波コンポーネントの場合、部品間の隙間により電氣的接触が不十分になり、所望の電気特性が得ら

れなくなる可能性があるため、機械強度を保つ目的以外にもねじによる固定が必要になる。このねじにより部品点数がさらに増える。

これらの課題を解決するため、3Dプリンタ技術を活用し、ろう付けからの置き換えを検討した。3Dプリンタは、デジタルモデルデータから直接物体を造形することができるため、部品の形状や構造に制約を受けず、モデルに忠実な製造が可能となる。また、造形のためのプログラムにより設備が動作するため、作業者の技能によらないモノづくりが可能になる。さらに、一体造形品として製作できるため、部品点数の削減にもつながる。

このように、通常のろう付けによる製造方法では、手作業や作業者の熟練度に依存し、製造期間、品質、部品点数に課題があった。3Dプリンタを用いることは、これらの課題を解決する足掛かりになると考え、試作評価し検証した。

3. マイクロ波コンポーネントにおける3Dプリンタ造形と性能評価

3.1 ロータリジョイント検証

マイクロ波コンポーネントにおいて、R/Jは一般的にマイクロ波信号の伝送に使用される。R/Jは、信号の損失や干渉を最小限に抑えるように設計されており、信号の安定性と高い品質が求められる。

R/Jは、レーダーアンテナや通信アンテナなど回転する機構に組み込まれる。そのため、R/Jは回転部分と静止部分に分かれた機構を有する。回転部分には軸があり、静止している部分にはハウジングがある。図3.1-1に部位を示す。

静止部分と回転部分を要し、内部はマイクロ波で所望の性能を得る必要があるため、内部の構造は複雑な形状となっている。そのため、これを実現するため通常は多数の部品を製作し各々の部品をろう付けで接合することで複雑な内部形状を形成していた。熟練者による作業が必須であること、熱歪みによる形状変化など製造の難易度が高い製品である。

3Dプリンタで製造することにより、造形プログラムを作成すれば加工者に依存せず同等の仕上がりになることが期待される。今回試作品として、X帯のR/Jを製作した。R/Jは導波管部分、中心導体、その他回転用部品、固定部品に分かれている。製品の断面図を図3.1-1に示す。導波管部分は3Dプリンタにより製作した。

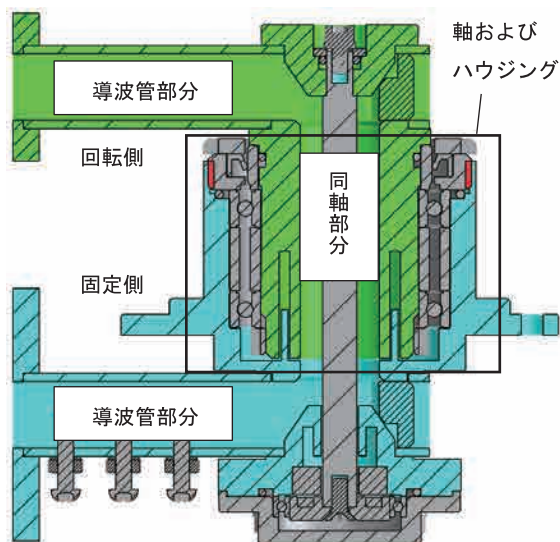


図3.1-1 R/J断面図

R/J は内部寸法に高い精度を求められるため、3D プリンタの方式は最も造形精度が高い Powder Bed Fusion 法（以下“PBF 法”）を採用した。また、マイクロ波コンポーネントにおいて、表面粗さは製品性能を確保するための重要な要素の一つである。

従来製造品は部品を切削加工で製作していたため、マイクロ波コンポーネントとしては十分な表面粗さ $R_z: 6.3S$ を確保している。一方 3D プリンタの表面粗さは一般的に $R_z: 50S \sim 100S$ 程度とされており、この値はマイクロ波コンポーネントの場合挿入損失の増加などの事象が生じる可能性もある。そのため、表面粗さを改善する工法として最も研磨量の多い流体研磨を実施した。表 3.1-1 に 3D プリンタ品の電気特性の目標値を示す。

表3.1-1 ロータリージョイント目標値

項 目	目標値	
周波数範囲[GHz]	7.9～8.0	8.0～8.4
定在波比	1.10以下	1.20以下
定在波比回転変動	1.05以下	1.10以下
挿入損失[dB]	0.22以下	0.25以下
挿入損失回転変動[dB]	0.1 p-p以下	0.15 p-p以下
通過位相回転変動[deg.]	5.0 p-p以下	

電気特性の実測結果を表 3.1-2 に示す。測定にはネットワークアナライザを使用し、定在波比、挿入損失などの電気特性を評価した。電気特性評価の結果、3D プリンタによって製作された R/J でも目標である電気特性を満足することができた。

表3.1-2 電気特性の実測結果

項 目	実測結果	
周波数範囲[GHz]	7.9～8.0	8.0～8.4
定在波比	1.09	1.17
定在波比回転変動	1.05	1.02
挿入損失[dB]	0.12	0.16
挿入損失回転変動[dB]	0.02	0.03
通過位相回転変動[deg.]	2.6	

3.2 サークュレータ検証

サーキュレータは反射波の分離、ダミーロードと組み合わせることによる反射波の吸収などの機能を有し、マイクロ波やミリ波の通信システム、レーダーシステム、衛星通信などの多くの応用分野で使用されている。

従来、導波管を形成するために2つ以上の機械加工品部品をねじで固定するという構成で製作してきた。この場合、2つの部品を組み合わせた際、フランジ面に段差ができないよう、さらに合わせ加工を実施する必要がある。図 3.2-1 に構成図を示す。

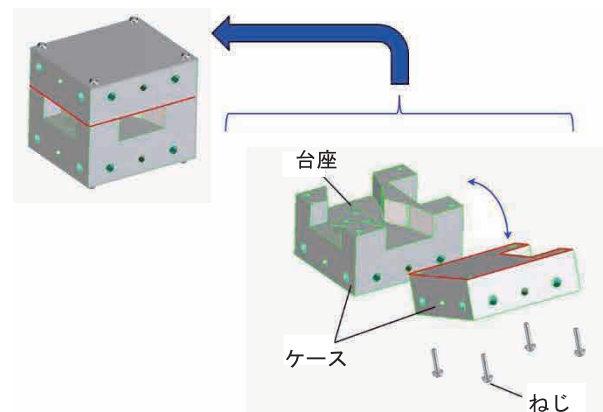


図3.2-1 サークュレータ構成図

3D プリンタで製作することにより、サーキュレータを形成するための部品が1つに出来、合わせ加工が不要になるため、合わせ加工後めっきを実施するための、分解、再組立などの工程も不要になる。また、接触面がなくなることにより電氣的な隙間が解消され、挿入損失の改善も見込まれる。

サーキュレータは内部寸法に高い精度を求められるため、3D プリンタの方式は R/J と同様に PBF 法を採用した。さらに表面粗さを改善するための内面研磨も実施した。3D プリンタ品の電気特性の目標値を表 3.2-1 に示す。

表3.2-1 サークュレータ目標値

項 目	目標値
周波数範囲[GHz]	9.1～9.6
定在波比	1.3以下
挿入損失[dB]	0.3以下
アイソレーション[dB]	20.0以上

電気特性の実測結果を表 3.2-2 に示す。

測定にはネットワークアナライザを使用し、定在波比、挿入損失などの電気特性を評価した。

表3.2-2 電気特性の実測結果

項 目	実測結果
周波数範囲[GHz]	9.1～9.6
定在波比	1.13
挿入損失[dB]	0.11
アイソレーション[dB]	25.1

電気特性評価の結果、3D プリンタによって製作されたサーキュレータでも要求された電気特性を満足できることを確認した。一体造形品にすることで、挿入損失の改善も確認できた。

3.3 バンドパスフィルタ検証

BPF は周波数選択、ノイズ除去、帯域幅制御など、電気信号または電磁波の特定の周波数範囲を通過させるために様々な機能を有し、無線通信、衛星通信、レーダーシステムなどの応用分野で広く使用されている。

従来、導波管を形成するために2つの機械加工品をねじで固定するという構成を採用し製作してきた。2つの部品を組み合わせた際、フランジ面に段差ができないよう、合わせ加工を実施している。図 3.3-1 に構成図を示す。

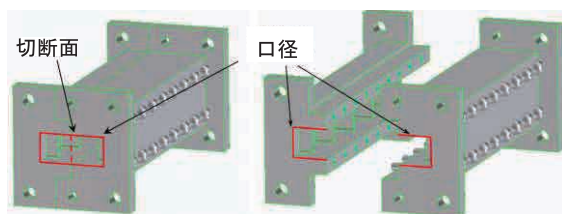


図3.3-1 BPF構成図

3D プリンタで製作することにより、導波管を形成するための部品が1つに出来、合わせ加工が不要になるため、合わせ加工後めっきを実施するための、分解、再組立などの工程も不要になる。また、接触面がなくなることにより電氣的な隙間が解消され、挿入損失の改善も見込まれる。

BPF は内部寸法に高い精度を求められるため、3D プリンタの方式はR/J、サーキュレータと同様にPBF法を採用した。BPFは従来製品からの置き換えではなく、新たに設計したものである。そのため、性能評価は設計値との比較とする。表面粗さを改善するための内面研磨を実施した。

3D プリンタ品の評価は電磁界解析（HFSS）との比較で評価する。表 3.3-1 に目標値を記載する。図 3.3-2 に解析と実測結果を示す。

表3.3-1 BPF目標値

項 目	目標値
共振モード	TE101
段数	5段
中心周波数[GHz]	10.0
通過帯域幅[GHz]	0.8
挿入損失[dB]	0.4以下
反射損失[dB]	20以上
減衰量[dB]	10.0以上 (通過帯域 ± 1 GHzにて)
導波管口径	WRJ-10 (X帯)

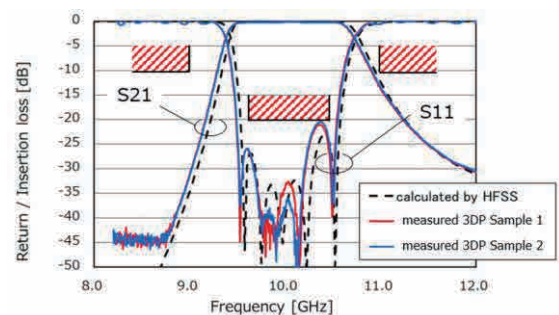


図3.3-2 電磁界解析と実測値の比較

電気特性評価の結果、3D プリンタによって製作された BPF は電磁界解析とほぼ一致する結果が得られた。一体造形品にすることで、挿入損失も設計値に近づくと考える。製品への適用を目指していく。

4. むすび

3D プリンタ技術を用いて当社製品を製作できることを確認した。部品点数の削減, 特殊技能が必要無いモノづくり, 複数機能を持たせた一体造形による電氣的なメリットなど, 当社製品において課題となる項目をクリアできる技術である。今後製品に適用していくことで, より安価で短納期かつ安定した品質で付加価値の高いモノづくりが可能である。

さらに 3D プリンタの特性に適用した製造工法の確立に向けて生産プロセスの標準化も併せて進めていく。

参考文献

- [1] 湯川秀憲, 牛嶋優, 高橋徹, 米田尚史, 宮崎守泰, ”2 本の分岐端子を短絡端に対し 45 度傾けて接続した T 分岐形 OMT”, 信学技報, vol. 119, no. 242, MW2019-70, pp. 27-32, 2019 年 10 月.
- [2] 萩原栄治, 根本淳一, 浅利哲, 電子情報通信学会, C-2-37, 2021 年 9 月.
- [3] 田島隼人, 萩原栄治, 根本淳一, 電子情報通信学会, C-2-40, 2022 年 3 月

本内容は 2021 年度, 2022 年度電子情報通信学会ソサイエティ大会で一般講演として発表した。

著者紹介

生産本部
電子システム技術部
根本 淳一

生産本部
電子システム技術部
百地 俊也

「優秀省エネ脱炭素機器・資源エネルギー庁長官賞」受賞

1. はじめに

この度、一般社団法人日本機械工業連合会が主催する令和4年度「優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰」において、最新のパワーエレクトロニクス技術を結集した電源力率・電源効率改善型PWM制御誘導加熱インバータ「SBT-PWシリーズ」、「SCT-SWシリーズ」が「資源エネルギー庁長官賞」を受賞した。

2. 受賞の背景

近年、脱炭素社会の早期実現に向けて、製造現場では機器の省エネ化や生産の効率化への取組みが急速に拡大している。電源力率・電源効率改善型PWM制御誘導加熱インバータは、最新のパワー半導体（SiC）の採用と、整流回路の見直し、新規開発したPWM制御方式の搭載、FPGAによるデジタル制御化を実現することにより、従来に比べて電源力率と電源効率を大幅に改善した点が、金属熱処理プロセスの省エネ化に貢献するものとして高く評価され、今回の受賞となった。図1及び図2に受賞製品となった2つのシリーズの外観を、表1、表2に省エネ効果を示す。

3. 製品の特長

4つの改善により電源力率95%，電源効率95%※¹，従来比10～30%の省エネ化※²を実現した。

- ① SiC（Silicon Carbide）の採用によるインバータの低損失化（SCT-SWシリーズに使用）
- ② 整流回路をサイリスタ式からダイオード式へ変更，力率を改善し回路電流を低減
- ③ 独自に開発したPWM（Pulse Width Modulation）制御により，負荷変動に伴う共振周波数変化への自動追尾とパルス幅可変による出力電力制御を高速処理（特許第6959432号他）
- ④ FPGA（Field Programmable Gate Array）搭載によるデジタル制御化で，出力立ち上がり時間を50ms以下に高速化し，出力可変幅を0.1～100%に最大化
※¹ SCT-SWシリーズはインバータ効率の比較による
※² 当社従来製品SBT/SFTシリーズとの比較において

4. むすび

最新技術を搭載し，高い省エネ性能を実現した電源力率・電源効率改善型PWM制御誘導加熱インバータの特長を踏まえた，資源エネルギー庁長官賞受賞製品を紹介した。両シリーズは着実に納入実績を積み重ねており，顧客の金属熱処理工程に対し，省エネ化に貢献している。今後も技術・製品開発を積極的に進め，脱炭素社会の実現に向けた取り組みを行っていく。



図1 SBT-PWシリーズ(並列共振)

(出力電力：20kW～3200kW，周波数：0.3kHz～30kHz)



図2 SCT-SWシリーズ(直列共振)

(出力電力：20kW～1000kW，周波数：30kHz～300kHz)



表1 省エネ効果 (出力 50%時)

並列	SBT-PW	従来 サイリスタ式	改善効果
力率	90%	70%	20ポイント
効率	98%	85%	13ポイント

表2 省エネ効果 (出力 50%時)

並列	SCT-SW	従来 IGBT 式	改善効果
力率	96%	65%	31ポイント
効率	99%	96%	3ポイント

参考文献

- [1] 守上，高田，浜田，永月，“PWM制御大電力誘導加熱インバータの開発” 島田理化技報No.27 p.10-15

(田内良男)

広帯域チューナブルフィルタ

1. はじめに

当社は、同軸・導波管コンポーネント適用領域の拡大を目的とし、2022年4月よりチューナブルフィルタの開発に着手している。

チューナブルフィルタとは、中心周波数や帯域幅などの周波数特性を変えることができるフィルタのことである。

当社実績や他社製品動向を踏まえ、今回可変帯域の広帯域化を図るべく要素開発を行ったので結果を報告する。

2. 要素試作

コムライン型の3段バンドパスフィルタで構成し、単一のフィルタで2～8GHzまでの中心周波数可変の評価を行った。

将来の可変方式は高速モータによる容量可変方式を予定しているが、本要素試作はモータ等の可変機構は設けず手動による可変帯域の広帯域化に限定したものとした。チューナブルフィルタの外観図と設計諸元を図1に示す。

今回の要素試作では、フィルタの周波数特性として周波数に比例して、3dB帯域幅が広がる比帯域幅一定型とした。

3. 要素試作結果

図2に要素試作器の評価結果を示す。ここに示すとおり2～8GHzまでの広範囲にわたりチューナブル性能を取得できた。

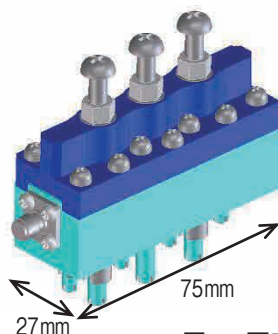
3dB帯域幅は評価結果の方が狭い結果となったが、これは共振素子の形状がシミュレーション形状と試作品の形状に差が生じていたことによるものである。電磁界解析の計算結果と評価結果を比較して、概ね良好なチューナブルフィルタの性能を取得できた。

市場調査を進める中で、中心周波数に関係なく、常に一定の通過帯域幅を持つ帯域幅固定型での要望もあったため、帯域幅固定型での電磁界解析を行った。計算結果を図3に示す。図1に記載のほぼ同サイズのまま、2～8GHzまで周波数可変で、ほぼ一定の3dB帯域幅を持つシミュレーション結果を得られた。

4. むすび

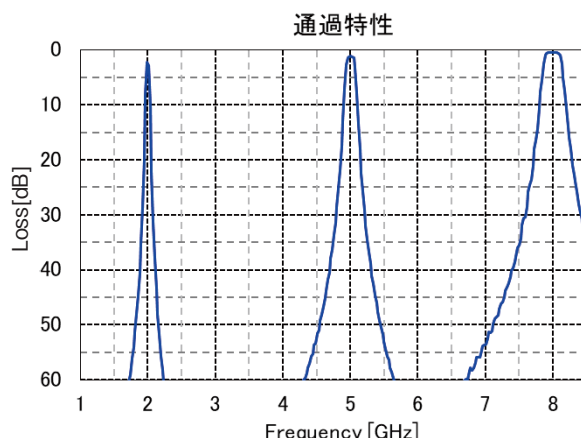
今回の要素試作では、単一のフィルタで2～8GHzまで中心周波数の可変が行えたこと、そして比帯域幅がおおよそ一定であったことが確認できた。

今回の要素試作で比帯域幅一定型と帯域幅固定型のフィルタ特性のチューナブル化を見出すことができたので、今後は、高速モータや電子制御による自動可変をするチューナブルフィルタの製品化を進める。



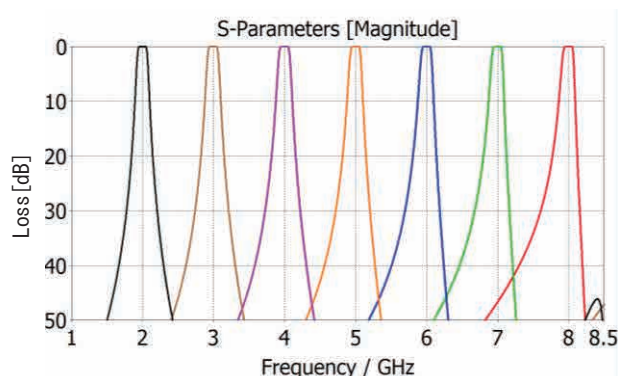
項目	主要性能
可変周波数	2～8GHz
3dB帯域幅	3～4%
VSWR	1.5以下
挿入損失	2dB以下
同調方式	手動

図1 要素試作器外観と主要性能



調整周波数	2GHz	5GHz	8GHz
3dB帯域幅	54MHz	170MHz	297MHz
比帯域	2.7%	3.1%	3.7%
VSWR	1.15	1.3	1.17
挿入損失 (比帯域1%)	1.1dB	1.1dB	0.6dB
スプリアス抑制量	60dB 8.5GHz	80dB 10GHz	80dB 10GHz

図2 要素試作器通過特性評価結果



調整周波数 [GHz]	2	3	4	5	6	7	8
3dB帯域幅 [MHz]	154.6	163.9	165.3	162.8	160.3	159.7	166.0

図3 帯域幅固定型チューナブルフィルタ計算結果

(三神 幸治)

導波管コンポーネントにおける地球温暖化対策

1. はじめに

加速器やレーダ機器などのメガワットクラスの高電力を扱う製品では、導波管内に空気の約3倍と高い絶縁性能を有するSF₆ガスを充填し、耐電力性能を満足している。しかし、SF₆ガスは地球温暖化対策の規制対象ガス（CO₂の約23,500倍）であり、管理と適切な処理ならびに、今後の規制が検討されている。

当社では温暖化対策のため、導波管コンポーネントの耐電力性能を高めることで、SF₆ガスを使用しない機器（SF₆フリー）の開発を進めている。2022年度に導波管ロータリージョイントについて開発を行ったので結果を報告する。

2. 試作

SF₆フリーの試作として、加速器で使用されているS帯のロータリージョイントを設計・試作した。本ロータリージョイントは入出力が導波管TE₁₀モードで、回転部を円形のTM₀₁モードで伝送するロータリージョイントである。

図1に従来品のロータリージョイントの電界強度と試作品の電界強度のシミュレーション結果を示す。電界の集中する矩形導波管と円形導波管のモード変換部の構造を見直すことで、電界の最大値が従来品の2,211V/mに対し、試作品では1,151V/mと約半分となり、耐電圧と耐電力は2乗の関係であるため、耐電力比約4倍に改善している事が確認できる。

3. RF性能

図2に従来品ロータリージョイントと試作品の電気特性を示し、表1にVSWR、VSWR回転変動、挿入損失、挿入損失回転変動を測定した結果を示す。計算結果とほぼ一致し、従来品とほぼ同等の結果が得られた。

4. むすび

上述の通り地球温暖化対策のため、モード変換部への電界の集中を抑え、耐電力性能の優れた設計をすることにより、SF₆フリー化を推進している。今後も当社のコア技術として、SF₆フリーに対応した製品の開発を進めていくことで地球温暖化抑制に取り組んでいく。

参考文献

- [1] 森 智之, 細田 裕一, 島貫 昌喜, 伊藤 久人, “当社のマイクロ波ロータリージョイント” 島田理化技報No.18 p.35-43

(生駒 俊治)

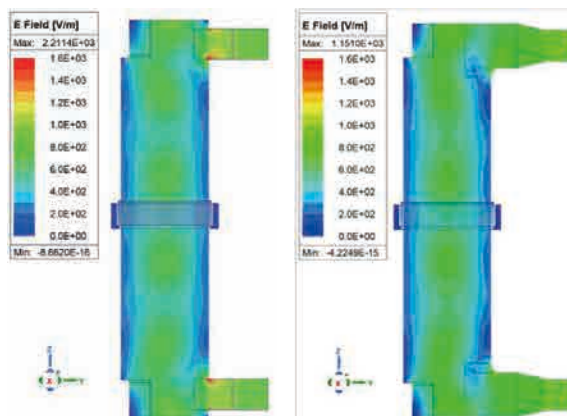


図1 従来品と試作品の電界分布

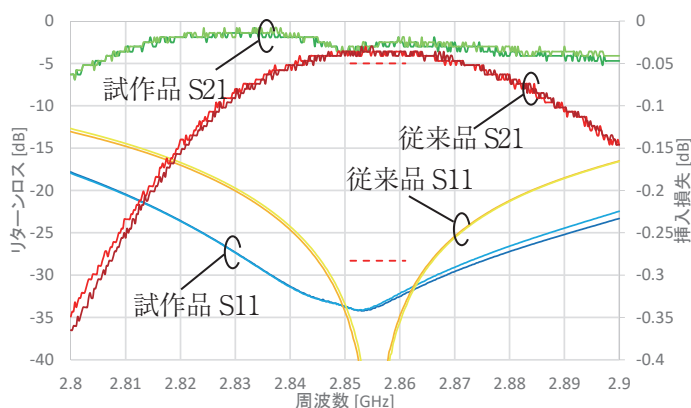


図2 従来品と試作品の性能比較

表1 従来品と試作品のロータリージョイントの性能比較

項目	従来品	SF ₆ フリー試作品
周波数[MHz]	2,856 ± 5	2,856 ± 5
VSWR (反射減衰量[dB])	1.045 (33.32)	1.053 (31.85)
VSWR回転変動	0.01	0.01
挿入損失[dB]	0.04	0.04
挿入損失回転変動[dB]	0.01	0.01
電界強度最大値[V/m]	2,211	1,151



図3 試作したロータリージョイントの外観

タカンシミュレータ12S400

■概要

タカンシミュレータは、航空機の電波航法に用いられるTACAN機上装置の性能試験を行う装置です。航空機が航行中に得られるTACAN航法に必要な情報（方位、距離等）を擬似的に発生させ、試験実施が可能です。

* TACAN : Tactical Air Navigation System
(戦術航法装置)

■特長

- ①TACAN航法で用いられるAM+ガウシアンパルス信号の生成をデジタル処理（FPGA+DACの構成）することにより信頼性を高めた。
- ②大型液晶ディスプレイにタッチパネルを採用、扱いやすい画面構成。
- ③GP-IB標準装備、自動試験に対応。

■主要性能

項目		性能
方位	範囲	0.0°～359.9° , 0.1° ステップ
	確度	±0.05° 以内
	回転速度	CW, CCW, 0～39° / s, 1° / s ステップ
	15Hz 移相	0±39° , 1° ステップ
距離	範囲	0.0～399.9NM, 0.1NMステップ
	確度	± {0.01+(0.01+設定距離 ×0.005%)} NM以内
	速度	INC(離脱), DEC(進入), 0～9999knot, 1knotステップ
	応答率	G/Aモード0～100% , 1% ステップ (MRB ^{*1} , ARB ^{*2} 除いた場合)
外形寸法		W426×D473×H250mm
質量		19kg

*1 MRB : Main Reference Burst

*2 ARB : Auxiliary Reference Burst

■製品外観



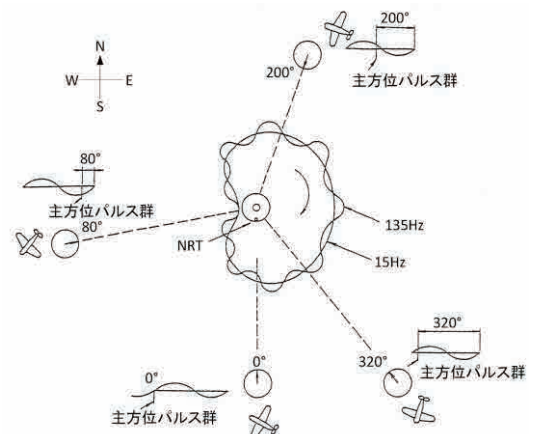
【TACANとは】

航空機に、方位と距離情報を同時に提供するものです。

方位測定は、15Hz+135Hzで変調されたパルス波によって行われ、基準波（15Hz）との位相差により、航空機は方位情報を得ます。

距離測定は、TACAN機上機が地上TACANに質問信号を発射し、地上TACANが応答することで距離情報を得ます。

電波の放射パターンとTACAN地上局と航空機の位置関係を以下に示します。



TACAN 運用イメージ

(藤澤 幸則)

マイクロ波／光変換（RoF）モジュール

■概要

本装置はRF信号を光信号に変換することで伝送ロスを抑制し、最長15kmの長距離伝送を可能とするマイクロ波／光変換（RoF（Radio over Fiber））モジュールです。マイクロ波を光に変換するE/Oモジュールと光からマイクロ波に変換するO/Eモジュールで構成されています。

■特長

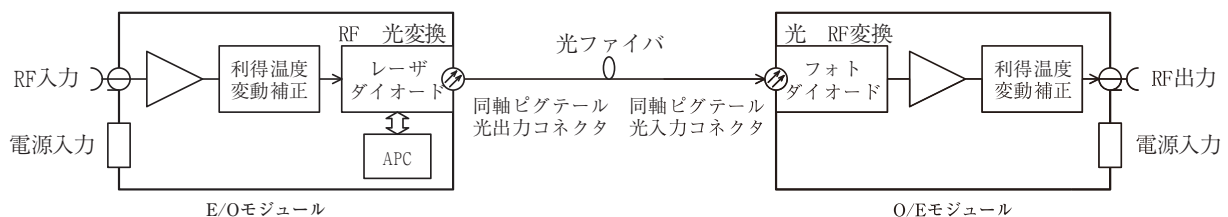
- ①RFアンプを内蔵しており、高伝送利得を実現。
- ②温度による伝送利得の変動を低減する回路を内蔵。
- ③APC(Automatic Power Control)により、光出力レベルが一定となるように制御することで、安定したRF性能(NFおよびIM3等)を実現。

(濱野 聡)

■主要性能

項目	性能	備考
RF周波数範囲	1.0～1.1GHz	1～3GHz での任意の100MHz帯域で対応可能
伝送利得	+5dB±3dB	1.0～1.1GHz, 伝送損失0dB時
帯域内利得偏差	2dBp-p以内	1.0～1.1GHz, 伝送損失0dB時
NF	20dB以下	1.0～1.1GHz, 伝送損失0dB時
IM3	60dBc以上	1.05GHzと1.051GHz, 2波合計入力電力-20dBm 伝送損失0dB時
VSWR	2:1以下	1.0～1.1GHz
光出力レベル	+3dBm(ノミナル)	
波長	1,310nm(ノミナル)	オプションにて1,550nmも対応可能
供給電源	DC+12V±0.5V	
動作温度	-10～+40℃	ヒートシンク(オプション)取付により温度範囲の拡張が可能
外形寸法	W107×D60×H16mm	E/OモジュールおよびO/Eモジュールの外形寸法は同じ

■構成図



■製品外観



E/Oモジュール



O/Eモジュール

LINAC用Sバンドパルスクライストロン

■概 要

クライストロンは電子管に属する高電力のマイクロ波増幅器です。当社では長年に亘りクライストロン用RFドライバをはじめ様々なマイクロ波コンポーネントを製造・販売してきており、これらの実績を活かしLINAC (Linear Accelerator, 直線加速器) 用Sバンドパルスクライストロンの販売を開始しております。

■特 徴

- ①加速器として世界でもっとも多用されている動作周波数2,856MHzのクライストロン
- ②納入後ただちに使用可能となるノウハウと製造プロセス
- ③オペレータに配慮した低放射線漏洩設計
- ④年間数百台が生産可能な設計, 製造管理

■使用用途例

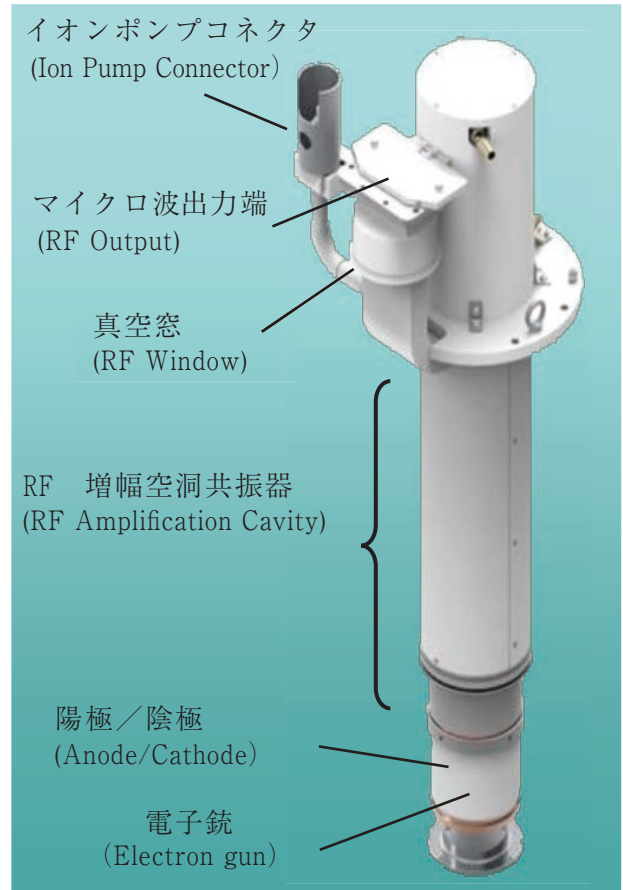
- ・医療用治療器
- ・セキュリティー用透視装置
- ・航空管制レーダ, 気象用レーダ
- ・研究開発用加速器

■主要性能

製造元：キヤノン電子管デバイス株式会社

項 目	性 能
動作周波数[MHz]	2,856 ± 5
尖頭電力[MW]	5.5 Typ.
平均電力[kW]	5.7 Typ.
パルス幅[μs]	9.0 Max.
繰り返し周波数[Hz]	400 Max.
導波管サイズ	WR284
ヒーター電圧[V]	7.8
X線漏洩量[μSv/h]	30 Max.
質量[kg]	55 Max.
高さ[mm]	930 Max.

■製品外観



(浅利 哲)

小型衛星SAR用給電導波管

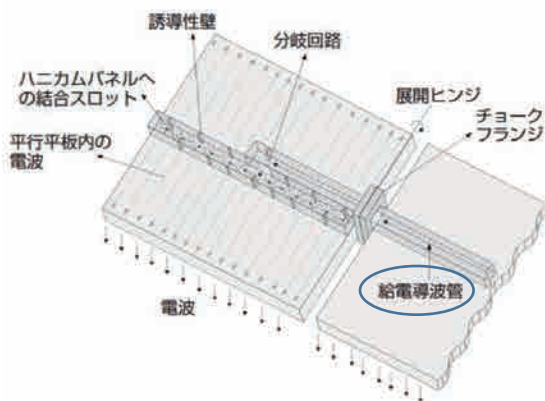
■概 要

100kg 級の小型衛星に搭載可能な合成開口レーダ（SAR）に使用する給電導波管です。

■特 徴

- ①同軸ケーブル，マイクロストリップラインに比べ圧倒的に低損失な導波管スロットアレイによるアンテナ給電方式。
- ②展開ヒンジ部に特殊フランジを用いることにより導波管同士の非接触対向給電を実現。
- ③アルミディップブレイジングによる軽量，長尺かつ精度の高い平面度を有した導波管スロットアレイアンテナ。

（根本 淳一）

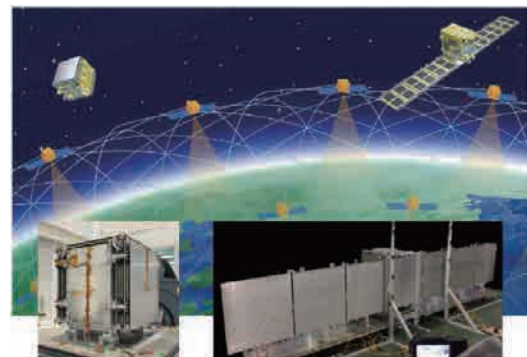


給電導波管衛星実装図

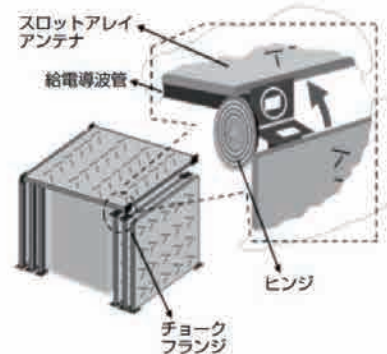
出典：ISASニュース2019.2 No.455（JAXA）

■主要性能

項目	性能
導波管サイズ	WR90（WRJ-10）
全長	約700mm
材質	アルミニウム合金
部品接合方法	アルミディップブレイジング



小型SAR衛星 外観図



■製品外観



給電導波管（2連タイプ）Top view



給電導波管（2連タイプ）Bottom view

プリント配線基板 【特許第7001734号】

出願／2020年4月

発明者／茂野 大作

■概 要

高周波回路におけるマイクロストリップ線路の電気特性に影響を与えることなく、実装部品のはんだ付けで発生する熱応力を緩和させ、はんだクラックを防止することができるようにしたプリント配線基板を提供する。

■従来技術の課題

プリント配線基板のたわみや、はんだ付けにより実装部品の外側に生じる応力が原因で発生するはんだクラックを防止するために、従来は図1（a）に示すような部品実装ランドを形成する方法や、図1（b）に示すような近傍にスリットを設ける方法などがあるが、マイクロストリップ線路を構成するためには、所望の特性インピーダンスを得ることができず、電気特性に多大な影響を与える問題点があった。

■発明の手段と効果

本発明は、図2に示すようにマイクロストリップ線路となる銅箔パターンに部品実装ランドの周囲を回り込むような空隙を形成することで、プリント配線基板のたわみで発生する部品外側へ向けた応力や、はんだ付けの熱膨張・熱収縮で発生する熱応力を緩和して、はんだクラックを防止することができる。

また、図3に示すように高周波領域における表皮効果により、空隙が配置される付近の高周波電流の電流密度が著しく減少するため、低損失で良好な特性インピーダンスのマイクロストリップ線路を構成することができる。

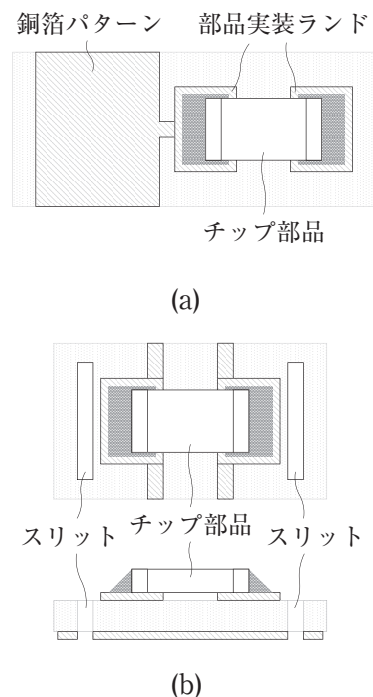


図1 従来のはんだクラック防止対策例

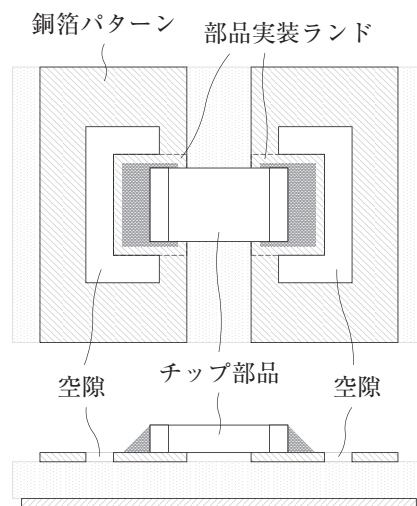


図2 本発明のプリント配線基板

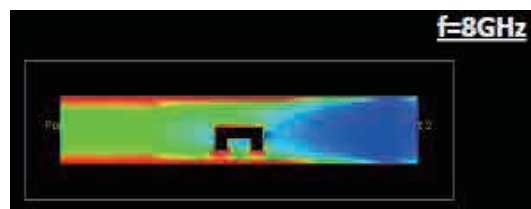


図3 高周波電流の様子

インバータ装置およびインバータ装置の制御方法 【特許第6959432号】

出願／2019年1月 発明者／石間 勉，田内 良男，守上 浩市，高田太郎，辻 寛樹，伊藤 政浩，茂野 大作

■概 要

共振負荷が接続されるインバータ装置において、インバータ部で幅狭パルスで共振周波数から離れた周波数を起点にスタートして共振周波数にロックさせ、その後に設定出力までPWM制御することにより、共振周波数が変動する負荷への追尾特性を改善、コンバータ部での出力制御を不要としたことにより、インバータ装置の力率、効率を改善した。

■従来技術の課題

図1のように、共振負荷200を接続するインバータ装置100において、出力制御は商用電圧102をコンバータ回路104をコンバータ制御部110で直流電圧に変換して可変させ、共振周波数追尾はインバータ部106をPLL(Phase Locked Loop)回路112で制御していたが、別々の回路部での制御のため装置の大型化や効率の悪化、電源力率の悪化、出力制御応答速度の遅延、などの課題があった。

■発明の手段と効果

図2に本発明のPWMインバータ装置を示す。従来の課題を解決するために、コンバータ部302は制御無しのダイオード整流とし、インバータ部106で出力制御と共振周波数追尾制御の両方を機能させる制御部12を提案した。幅狭パルスで共振周波数より離れた周波数からスタートして高速で共振周波数にロックさせ、その後、設定の出力になるようにPWM制御する。これにより、従来のインバータ装置と比較して、高力率、高効率、高速応答、小型化を達成することが可能となった。

図3は並列共振負荷22に本発明のPWMインバータを適用した例であり、出力電圧をセンサ26からフィードバックして出力電圧一定制御を行う。

図4は直列共振負荷62に本発明のPWMインバータを適用した例であり、出力電流をセンサ64からフィードバックして出力電流一定制御を行う。

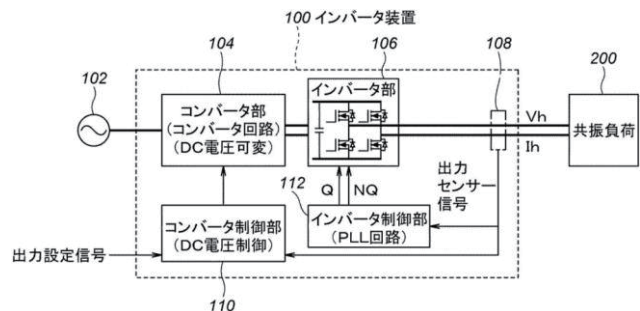


図1 従来のインバータ装置

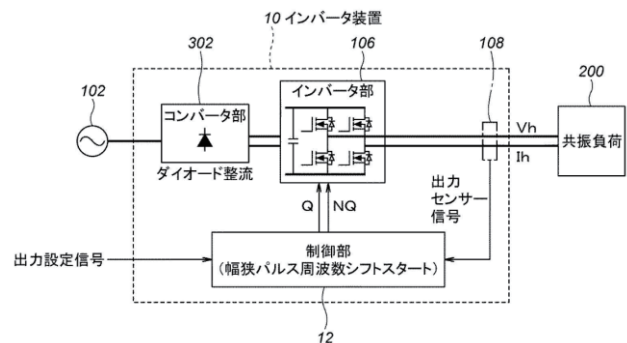


図2 本発明のPWMインバータ装置

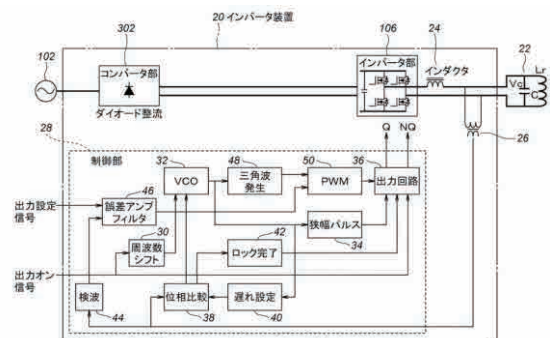


図3 本発明の並列共振負荷PWM実施例

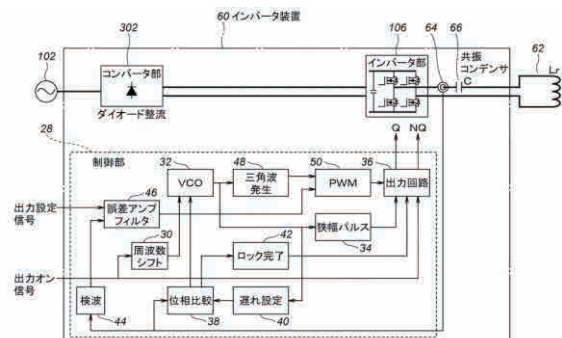


図4 本発明の直列共振負荷PWM実施例

インバータ装置およびインバータ装置の制御方法 ならびにビレットヒーター【特許第7060737号】

出願／2021年3月 発明者／石間 勉，浜田深造，守上浩市

■概要

並列共振インバータ装置において、投入される負荷数が増減する場合でも、負荷の温度変動を防止する制御方法を提供する。

■従来技術の課題

図1に従来の並列共振インバータ装置の構成を示す。従来の出力電圧 V を一定にする制御では、コイルに投入される負荷数の増減などにより、負荷の温度が変動する問題点があった。

■発明の手段と効果

図2に本発明の並列共振インバータ装置の構成を示す。従来の構成に補正回路（太枠部；22）を追加している。補正回路で基準周波数と実際の周波数を比較した結果に基づいて、出力電圧を補正して投入電力を一定に制御している。

図3のように複数のコイルに投入される負荷数が増減する場合や、図4のようにビレットが順にコイルに投入される場合など、負荷数が増減する場合でも、負荷の温度を一定に保つことが可能になる。

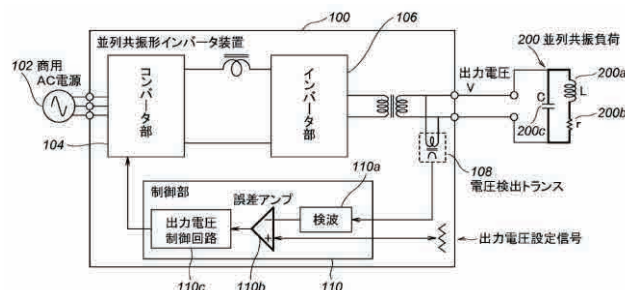


図1 従来の並列共振型インバータ装置

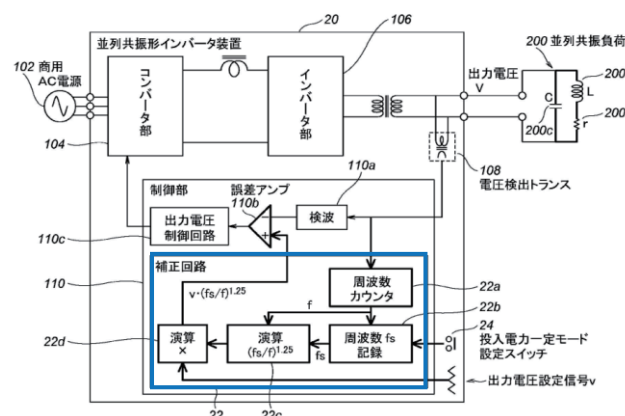


図2 本発明の並列共振型インバータ装置

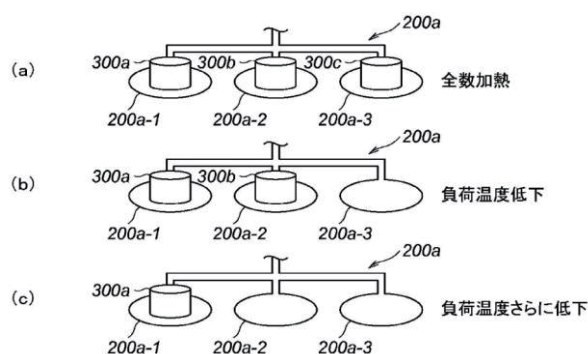


図3 本発明の説明図1

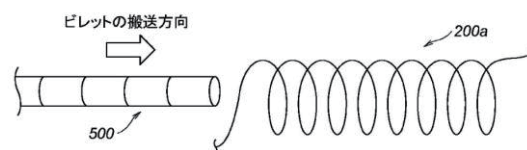


図4 本発明の説明図2

インバータ回路 【特許第7157220号】

出願／2021年8月 発明者／石間 勉, 田内 良男, 守上 浩市, 高田 太郎

■概 要

複数のインバータ回路ブロックで分割しそれらを並列構成したインバータで、各ブロックの素子出力部から合成端子部までを繋ぐ導体において、各ブロックの素子出力部から合成部までの距離を等しく低インダクタンスとなるよう配置し、各ブロック出力部間の結合を少なくするようにインダクタンス成分を機構的に設けることで、各素子の電流ばらつきを抑制した。

■従来技術の課題

図1のように、複数のインバータブロックを並列に接続した際に各インバータ部から出力合成導体までを簡単に直線でつなぐ導体とした場合、合成導体4.5の距離の違いによる各ブロックー出力合成端子間のインダクタンスの影響から各インバータ素子に流れる電流にばらつきが生じていた。

■発明の手段と効果

複数のインバータブロックを並列接続して出力合成する構成において、それぞれのインバータブロックの非反転出力に接続する板状導体と、それぞれの反転出力に接続する板状導体とに長穴またはスリットを空けることにより、複数のインバータブロックのそれぞれの出力部から出力合成端子まで通電する導体の実効長をほぼ等しくし、両導体間のインダクタンスを等しく近づけることで各素子の電流ばらつきを抑制した。図2は、4つのブロックの場合に出力銅板に長穴を空けた実施例であり、図3は、5つ以上のブロックの場合にスリットを設けた実施例である。

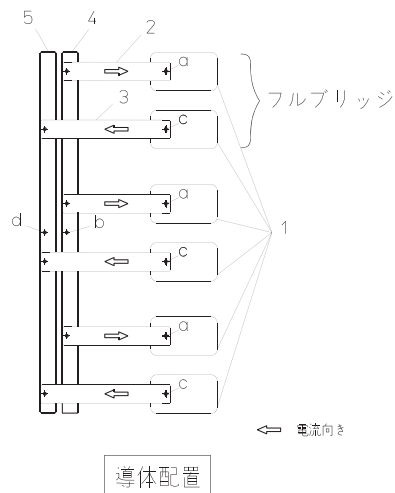


図1 従来インバータブロック

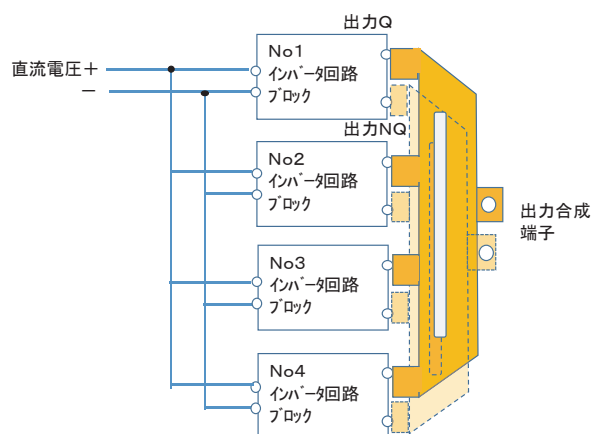


図2 本開発の実施例1

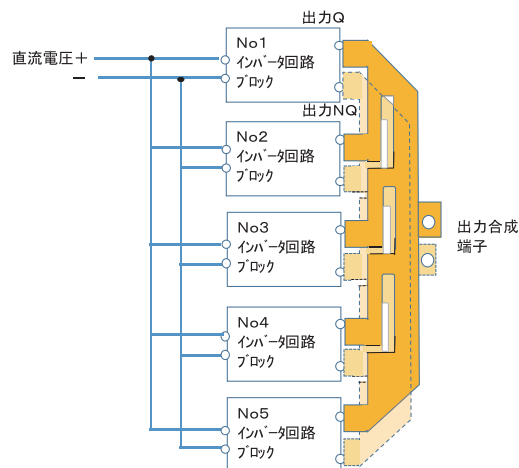


図3 本開発の実施例2

■コラム

当社の技術開発の歩みと将来

The Progress and Future of Our High-Frequency Technology Development

相談役
松本 操一

Soichi MATSUMOTO



1. はじめに

当社は1946年(昭和21年)に、これまで研究開発をしていた高周波の技術を、戦後の社会に役立てようと集まった19人の技術者・研究者が創業しました。会社名に「理化工業」とつけたのは、「物理」と「化学」とを「工業」という面で一体化しようとの創業メンバ全員の想いを表したものです。

この創業から今日に至るまで、「高周波技術で社会に貢献しよう」との創業精神のもと、戦後すぐに高周波を使った製品として当時画期的な「ペニシリン乾燥装置」や「高周波ミシン」等を、開発・製品化しました。

その後、この創業精神を受け継ぎながら、日々の技術の蓄積と飛躍的な技術進歩を取り入れて、新しい技術開発に取り組んできました。

現在は国内外の通信機器、放射線機器、人工衛星、レーダ、高周波加熱装置等、社会の安心、安全、省エネ、利便性等を実現する社会インフラを中心に、様々な分野で活用いただいています。

創業からの3四半世紀以上の間、取り組んできた技術開発にスポットを当てて、その変遷を振り返るとともに、将来に向けての取り組みの最新状況を紹介いたします。

2. 高周波技術と当社の歩み

当社創業の基盤である「高周波技術」について、最初に少し触れたいと思います。

高周波は無線通信では一般的に電波と言うものの、その定義は必ずしも明確ではありません。電波法では「高周波利用設備」の定義の中で、10kHz以上を高周波としており、ここではこの定義で以下の説明をします。

高周波を使った設備は、社会の安心・安全はもとより様々な分野で利用され、今日は益々その重要性は拡大しており、今や社会経済活動の重要な基盤に

なっています。

表2-1に使用する周波数毎に通信・放送、センサ、加熱等に分類して、主な用途を纏めています。身近なところでは、携帯電話や放送、WiFi、非接触IC(Integrated Circuit)カード、ETC(Electronic Toll Collection System)、スマホへのワイヤレス充電、IH(Induction Heating)クッキングヒータ等の多くの機器が我々の生活に広く浸透していることは言うまでもありません。

表2-1 高周波を使った主な用途

略称	周波数	主な用途			
		通信・放送	センサ	加熱	その他
VLF	3kHz ~ 30kHz	水中通信	無線心拍計	誘導加熱(IH)ヒータ	標準電波(電波時計)
LF	30kHz ~ 300kHz		船舶/航空機用ビーコン	誘導加熱(IH)ヒータ	ワイヤレス給電
MF	300kHz ~ 3MHz	船舶通信、AM放送、アマチュア無線	船舶/航空機用ビーコン	電気メス	ワイヤレス給電
HF	3MHz ~ 30MHz	航空機通信、船舶通信、アマチュア無線、国際短波放送	津波監視レーダ		ラジオコン
VHF	30MHz ~ 300MHz	消防無線、警察無線、航空管制通信、FM放送、アナログテレビ			交通ICカード、電子マネー、MRI
UHF	300MHz ~ 3GHz	携帯電話、スマホ、タクシー無線、無線LAN、防災行政無線、デジタルテレビ	航空管制レーダ、気象レーダ	マイクロ波加熱(電子レンジ等)	GPS、カプセル内視鏡
SHF	3GHz ~ 30GHz	衛星通信、衛星放送、マイクロ波中継、ETC、無線LAN	気象レーダ、航空監視レーダ		電波望遠鏡、マイクロ波給電
EHF	30GHz ~ 3THz	衛星通信、大容量データ通信	自動車衝突防止レーダ		電波望遠鏡、電子スピン共鳴

3. 当社の技術開発の歩み

図3-1に当社の技術開発の歩みを示します。その時代毎に必要なとされていた社会ニーズに合わせて、高周波技術を軸にさまざまな先端技術を取り入れて取り組んできました。

<1940年代>高周波を利用した社会への貢献の幕開け

～高周波ミシン、高周波ペニシリン乾燥装置、超短波調理機等～

<1950年代>マイクロ波、高周波誘導加熱への発展・挑戦

～地上マイクロ波回線網分波器、高周波誘導加熱装置～

<1980年代>衛星通信・ライナック用コンポ等への拡大と海外展開

～VSAT用受信機、ライナック用マイクロ波コンポ等～



図 3-1 当社の技術開発の歩み

<2000 年代>人工衛星搭載機器、さらなる高周波数化(ミリ波)への拡大

～衛星搭載用マイクロ波コンポ、ミリ波通信機器等～

<2020 年代以降>先端技術を駆使し、さらなる技術革新へ

～ PWM 制御方式高周波誘導加熱インバータ、コンステレーション衛星対応 Q 帯 LNB、EV ワイヤレス給電用インバータ等～

し、高速回転させながら排気し、超短波で乾燥させる装置で、生産量は従来の数百倍に向上し、かつ品質安定にも大きく寄与しました。



図3-2 高周波ペニシリン乾燥装置

3.1 高周波を活用した社会への貢献

～1940年代～

冒頭に述べたように、当社は戦時中に「高周波技術」を研究していた技術者・研究者が、この「高周波技術」を使って、世の中に役立てたいとの強い想いから創業しました。戦後まもなくの物資不足や食料難の時代において、生活に身近なものを高周波で効率よく、あるいはこれまで実現できなかったものを実現しようと、さまざまな製品を開発し市場に送り出しました。

代表的なものとして、高周波ペニシリン乾燥装置、超短波調理機、高周波マシン等の製品が挙げられます。

たとえば、当時ペニシリンを乾燥させて固化することは大変な労力を要していました。生産性も上がらない中、開発した国産初の高周波ペニシリン乾燥装置は、ペニシリン原液の入った瓶を円盤に固定

また、高周波マシンは、塩化ビニール等の合成樹脂をギザギザに押し付けながら高周波を照射し溶着するもので、これにより各種機器等の包装袋や雨具等のさまざまなビニール製品の生産性が大きく向上しました。



図3-3 高周波マシン

その他にも、米麦類を5分程度超短波で乾燥させ、必要に応じて熱湯または水を注入することでご飯ができる超短波料理機や、再製タイヤの生産におい

て、蒸気と高周波を組み合わせたタイヤの加硫用乾燥装置等、高周波技術を活用したさまざまな製品を開発しました。

3.2 マイクロ波技術・高周波誘導加熱への発展・挑戦 ～1950年代～

1950年代に入ると、日本全国にマイクロ波通信回線網を施設する計画が具体化する中で、さらに周波数の高い GHz 帯のマイクロ波技術の開発に取り組みました。通信回線網でアンテナ・送受信器と並んで基幹製品である IR-1 形「分波器」を開発し、以降 30 年以上にわたり当社の主力製品として、IR-41 形、IR-63 形等々、様々な分波器を開発製品化するとともに、今日の当社の主要事業分野であるマイクロ波の礎を築くことになりました。

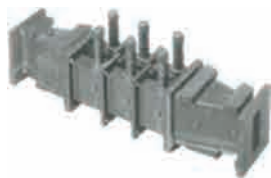


図3-4 マイクロ波中継回線用分波器(IR-1形)

また一方、焼入れ、焼戻し、焼鈍、溶解等さまざまな金属熱処理の分野で活用される高周波誘導加熱装置を開発し、サイリスタ方式、トランジスタ方式等、常に先端の技術を取り入れ、より効率向上を実現しながら、今日の主力機種の一つとしての礎を築きました。



図3-5 サイリスタ方式誘導加熱インバータ

また、超音波を使った各種技術開発にも取り組み、超音波メッキ装置、超音波水中無線電話、超音波車両感知器、超音波洗浄装置等の製品化にも繋がりました。

3.3 衛星通信・ライナック用コンポ等への 拡大と海外展開

～1980年代～

1980年代に入ると、これまで培ってきたマイクロ波技術を駆使して、小型衛星通信地球局 (VSAT) 用の LNB (Low Noise Block down converter) をシリー

ズ化し、C 帯 (4GHz 帯)、X 帯 (8GHz 帯)、ku 帯 (12GHz 帯)、ka 帯 (20GHz 帯) のラインナップを揃えました。北米を中心に海外展開を図り、いまなお現在の主力製品のひとつとなっています¹⁾。



(X帯LNB)



(ka帯LNB)

図3-6 VSAT用各種LNB

また、分波器製品化以降、継続して培ってきた立体回路 (導波管等) の技術をさらに発展させ、より高電力が求められる製品への展開を図りました。その代表例がライナック用製品で、ピーク電力が MW 級の高電力に耐えられるロータリジョイントやサーキュレータ等を開発して海外展開し、現在では世界中の多くの X 線放射線装置に使われています¹⁾。



(ロータリジョイント) (3ポートサーキュレータ)

図3-7 ライナック用高電力立体回路

この他にも、気象レーダ、空港レーダ等の各種レーダ装置や、研究用の大型加速器にも利用されており、高電力が要求される多くの製品を実現し、今日に至っています。

3.4 人工衛星搭載機器、さらなる高周波数化(ミリ波)への拡大

～1990年代～

1990年代に入ると、衛星通信のさらなる拡大の市場環境の中、人工衛星搭載用の超薄肉軽量導波管、各種フィルタ等多数の立体回路製品を製品化し、国内の人工衛星の多くで活用されてます。



(薄肉導波管)



(分配器)

図3-8 衛星搭載用マイクロ波コンポ

また、より周波数の高い準ミリ波、さらにはミリ波の通信容量の拡大の社会要求に対応して、38GHz デジタル無線装置、50GHz デジタル無線装置、ミリ波送受信モジュール等の各種ミリ波装置を開発しました²⁾。

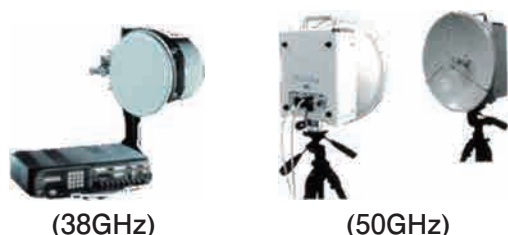


図3-9 ミリ波デジタル無線装置

(Coffee Break) 衛星通信システム

ここで少し脇道に逸れますが、衛星通信用 LNB という当社の主力製品であり、高周波を活用した主要な分野の一つである衛星通信システムについて、SF 作家の発想から始まったその歴史等について、少し触れたいと思います。

(1)衛星通信の歴史

衛星通信は、「2001 年宇宙の旅」で有名な SF 作家 Arther.C.Clarke が、当社創業の前年にあたる 1945 年に雑誌「Wireless World」に赤道上空 36,000km の円軌道が静止軌道であり、「地球外の中継器」を 3 つ配置することにより全世界で通信が可能になるとの発表をしたのが最初です。これは、まさにその後 1960 年代以降の衛星通信の主流となる「静止衛星による衛星通信」の概念でした。

その後、ロケットの高性能化を含めた宇宙関連機器の技術革新により、1960 年以降、周回衛星による受動型衛星（中継器を搭載しない球体反射型衛星）、能動型衛星（中継器を搭載）の打上げを経て、1963 年に現在の静止衛星による衛星通信の先駆けである初の静止軌道の能動型衛星へと、衛星通信が実用化への階段を確実に上っていくことになります。詳細は、表 CB-1 を参照ください。

表CB-1 衛星通信実用化誕生の歴史

1945年	衛星通信の概念発表	SF 2001 年宇宙の旅の作者 Arther C. Clarke が「Wireless World」誌に、「赤道上空 36,000km の円軌道が静止軌道であり、「地球外の中継器」による全世界通信の原理を発表
1960年	受動型周回衛星による衛星通信実証成功	米国(NASA)が世界初の受動型衛星(中継器は無く、球形反射体)エコー1A号を打上げ、大陸間国際電話、TV伝送等に成功
1962年	能動型周回衛星による衛星通信実証成功	米国(AT & T、ベル研他)が、世界初のの中継器を搭載した能動型衛星テルスター1号(周回衛星:Cバンド)を打上げ
1963年	周回衛星による日米間テレビ中継実験成功	日米間で、リレー衛星1号(周回衛星)による太平洋横断テレビ衛星中継実験に成功。(最初の映像は、ケネディ暗殺のニュース速報)
	能動型静止衛星打上成功	米国(NASA)が世界初の静止衛星シンコム2号が打上げ成功
1964年	東京オリンピックでの静止衛星を使った米加への生中継	シンコム3号(静止衛星)による東京オリンピックの米加への生中継に使用
	国際衛星通信網の構築	国際衛星通信機構(インテルサット)が設立し、国際共同により、静止衛星による国際通信網運営組織が発足
1965年	衛星通信の実用化	インテルサット1号(アーリーバード)が打上げ成功し、衛星通信の実用化スタート
1977年	日本初の衛星通信スタート	日本初の通信衛星さくらが打上げ成功。実用化と研究開発(世界に先駆けてKaバンド通信実験他)をスタート
1979年	移動体衛星通信スタート	国際海事衛星機構(インマルサット)設立、Lバンドを使用した移動通信業務を開始
1989年	日本初の民間衛星通信スタート	3月に日本初の民間通信衛星JSAT1号、および6月にスーパーバードA号を打上げ、日本の民間衛星通信ビジネスがスタート

(2)衛星通信で使われる周波数帯

表 CB-2 に衛星通信で使われる周波数帯とその主な用途を示します。固定衛星通信では、C 帯、X 帯、ku 帯、ka 帯へ、船舶・航空機等の移動体衛星通信では、L 帯、S 帯、X 帯、ku 帯、ka 帯と高速・大容量化に合わせて、高周波数帯へと拡大しており、当社も LNB のラインナップを揃えて今日にいたっています。

表CB-2 衛星通信の使用周波数とその用途

呼称	周波数帯 (Up/Down)	固定衛星業務	放送衛星業務	移動衛星業務	当社 LNB製品メニュー
VHF	137MHz	—	—	○	—
UHF	400MHz	—	—	○	—
L	1.6/1.5GHz	—	—	○	—
S	2.6/2.5GHz	—	○	○	—
C	6/4GHz	○	○	—	●
X	8/7GHz	○	—	○	●
Ku	14/12GHz	○	○	○	●
Ka	30/20GHz	○	○	○	●
Q(V)	50/40GHz	○	○	○	●

また、2020 年代に入り、コンステレーション衛星を活用した衛星通信が拡大しており、現在は ku 帯 /ka 帯が中心であります。さらなる高速化を目指して、2020 年代後半から Q 帯へのさらなる高周波数化が加速すると予想されます。



4. 先端技術を駆使し、さらなる技術革新で 社会への貢献を

さて、これまで 77 年の当社の歩みをざっと紹介しました。いくつかの製品例を示したように、「高周波技術」はさまざまな社会の安心、安全の実現にとって、益々重要性を増しています。

当社も、今後とも社会のさまざまなニーズに応えるため、先端技術を駆使し、新たな技術革新を続けており、最近の製品をいくつか紹介します。

まず最初に、衛星通信用 LNB の分野です。Coffee Break で述べたように、衛星通信は当社の創立とほぼ同じ年に原理発表がされてから 77 年で大きく変化しています。昨今では、第 5 世代移動通信システム (5G) 等高速大容量で超低遅延な通信システムの構築が進んでいる中、多くのコンステレーション衛星が打ち上げられており、ku 帯や ka 帯が活用されていますが、電波資源ひっ迫の対策として、将来 Q 帯の活用が期待されています。当社はこれまで培ってきたミリ波技術をさらに発展させ、そのような要求に対応した超広帯域低雑音の Q 帯 LNB を開発・製品化しました^[3]。今後の高速大容量通信に貢献すると期待されます。



図4-1 超広帯域低雑音Q帯LNB

一方、高周波誘導加熱の分野では、益々製造現場での生産性向上や、カーボンニュートラル実現に向けた省エネが求められており、2018 年にこれまで蓄積した高周波インバータ技術をもとに、当社独自の高速 PWM(Pulse Width Modulation) 制御技術を開発し、従来に比べて大幅な省エネ化を実現した SBT-PW シリーズ /SCT-SW シリーズを開発・製品化しました^{[4][5]}。なお、その成果は「令和 4 年度優秀省エネ脱炭素機器表彰 資源エネルギー長官賞」受賞^[6]となり、その省エネ性能を高く評価されました。益々カーボンニュートラルの社会要求が増していく中、省エネ・効率化に貢献するものと期待しています。



図4-2 PWM制御方式誘導加熱インバータ

また、これらの高周波誘導加熱技術を応用して、今後益々拡大していくと予想される EV(Electric Vehicle) へのワイヤレス給電用インバータを開発^[7]して実証実験を進めており、来るべく自動車の電動化に大きく寄与すると期待しています。



図4-3 EVワイヤレス給電用インバータ



図4-4 EVワイヤレス給電用インバータの実用例

その他にも高電力導波管コンポーネントで耐電力向上のため一般的に使われている SF6 ガスのフリー化による地球温暖化対策^[8]等の技術開発についても取り組んでいます。

5. おわりに

創業から 77 年間の当社の技術開発の歩みの一部を紹介いたしました。なお、ここで取り上げた製品はその一部であり、その他の様々な製品については、「島田理化技報 (No.27: 2021 年)」の P56-P57 も参照ください^[9]。

私自身、1970 年代後半から 1980 年代の学生時代に電波・電磁波・高周波 (=WAVE) の持つ無限の可能性に強く興味を持って 40 年以上「WAVE」に携わってきましたが、駆け出し技術者の頃、先輩から「電波が見えるようになれ」と指導されました。当社は 77 年間高周波という言わば目に見えないものを取扱う中で、この物理的本質や特性を「見える」ようにし、これを駆使して先進的な技術開発を進めながら、製品という「見える」形にして、さまざまな社会に役立つ製品を開発し展開してきました。

現在、SDGs(Sustainable Development Goals) 実現のため、住みやすい社会、気候変動対策、強靱なインフラ構築、クリーンなエネルギー等々を目指して、省エネ、生産の効率化、5G/6G 等の通信の高速化等の要求は益々増しており、その中で「高周波技術」が果たす役割はより拡大していると考えています。

当社は、「高周波技術で社会に貢献する」との創業の精神を今後も受け継ぎながら、今後の新しい時代の社会の要求に合致した製品を常に生みだしていくよう、日々技術開発、製品開発に挑戦を続けて参ります。

参考文献

- [1] 萩原, 森, 浅利, 四分一, “社会に貢献する電子・通信機器”, 島田理化技報, No.25, 2016
- [2] 日下, 鈴江, 森, “当社におけるミリ波・準ミリ波技術への取組み”, 島田理化技報, No.26, 2018
- [3] トピックス, “低軌道衛星通信における Q-Band LNB の研究開発, 島田理化技報, No.27, 2021
- [4] 守上, 高田, 浜田, 永月, “PWM 制御大電力誘導加熱インバータの開発”, 島田理化技報, No.27, 2021
- [5] 松原, 石間, “IH 用高効率 PWM インバータの製品ラインナップ”, 島田理化技報, No.28, 2023

- [6] (一般社団法人) 日本機械工業連合会「第 42 回 (令和 4 年度) 優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰対象決定について”, 2023
- [7] 高田, 石間, “ワイヤレス給電用高速インバータの開発”, 島田理化技報, No.27, 2021
- [8] トピックス, “導波管コンポーネントにおける地球温暖化対策”, 島田理化技報, No.28, 2023
- [9] “島田理化工業 技術と製品の歩み”, 島田理化技報, No.27, 2021



営業分野及び主要製品

【電子機器】

同軸・導波管コンポーネント

- ・通信/給電部品
- ・通信用コンポーネント
- ・レーダー給電系コンポーネント
- ・衛星搭載用コンポーネント

通信機器

- ・衛星通信コンポーネント
- ・準ミリ波/ミリ波送受信製品

電子機器

- ・マイクロ波発振器
- ・高周波電力増幅器
- ・シミュレータ
- ・マイクロ波/ミリ波アクティブコンポーネント

【パワエレ機器】

パワエレ機器

- ・溶解/蒸着製品
- ・熱処理製品
- ・予熱/加熱製品
- ・接合製品
- ・高周波電源
- ・薄板加熱製品
- ・塗装乾燥製品
- ・高温加熱製品
- ・ワイヤレス給電製品

島田理化技報編集委員会

委員長 江馬 浩一

副委員長 野田 幹一朗
四分一 浩二
杉山 裕通

委員 浅 利 哲
石 間 勉

事務局 堀米 義嗣
鈴木 康祥
高野 正和

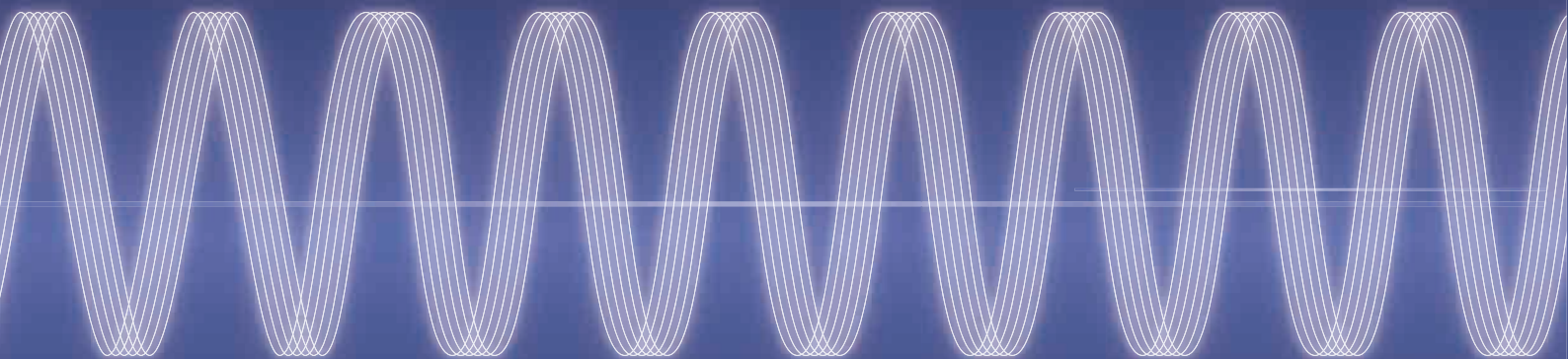
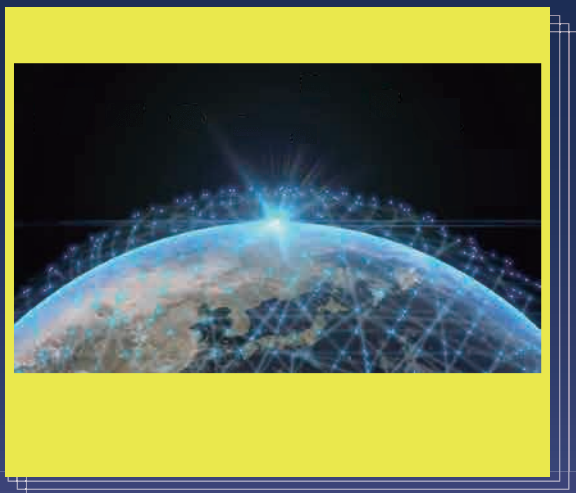
島田理化技報 No.28(無断転載を禁ず)

2023年12月8日 発行

発行所 東京都調布市柴崎2丁目1番地3
島田理化工業株式会社
TEL (042) 481-8510 (代表)
FAX (042) 481-8596 (代表)
URL <https://www.spc.co.jp/>

編集兼発行人 島田理化技報編集委員会

印刷所 東京都立川市上砂町5丁目1番地1
株式会社 弘久社
TEL (042) 536-3511
URL <https://www.kokyusha.com/>



島田理化工業株式会社