低ＲＣＳ目標を見つける
ＧａＮ送受信モジュール

TRDI
Technical Research & Development Institute
Ministry of Defense

電子装備研究所　センサ技術研究部
レーダ研究室
防衛技官　入江　寿憲

発表内容

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 送受信モジュールについて
4. GaN*スイッチの測定結果
5. GaN送受信モジュールの測定結果
6. 研究の成果について
7. まとめ

* GaN: Gallium Nitride 窒化ｶﾞﾘｳﾑ

研究背景 (1/2)

将来の脅威目標の一例

低RCS

弾道ミサイル(弾頭部)

低RCS

ステルス機

低RCS

低高度CM*

RCS(Radar Cross Section)
ﾚｰﾀﾞ反射断面積：
反射物の大きさ、材質、形状等によって値が変わる。

低RCS目標はﾚｰﾀﾞ探知が困難。

目標からの反射波

レーダ

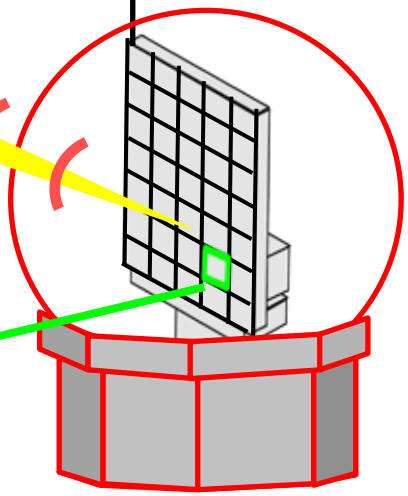
* CM:ｸﾙｰｼﾞﾝｸﾞﾐｻｲﾙ

研究背景 (2/2)

ステルス機
(低RCS)

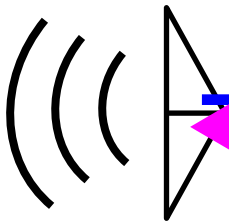
探知距離 (遠方)

強力な電波

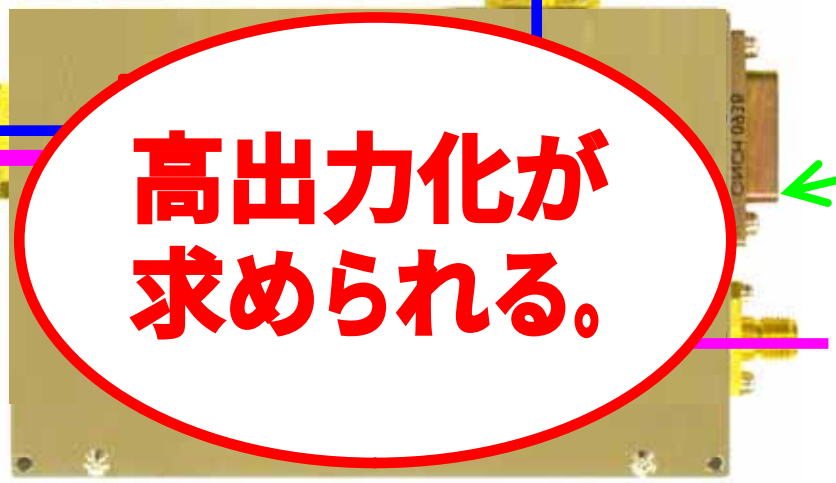


レーダ

(アクティブフェーズドアレイ方式)



アンテナ



高出力化が
求められる。

←:送信信号
←:受信信号

送受信モジュール

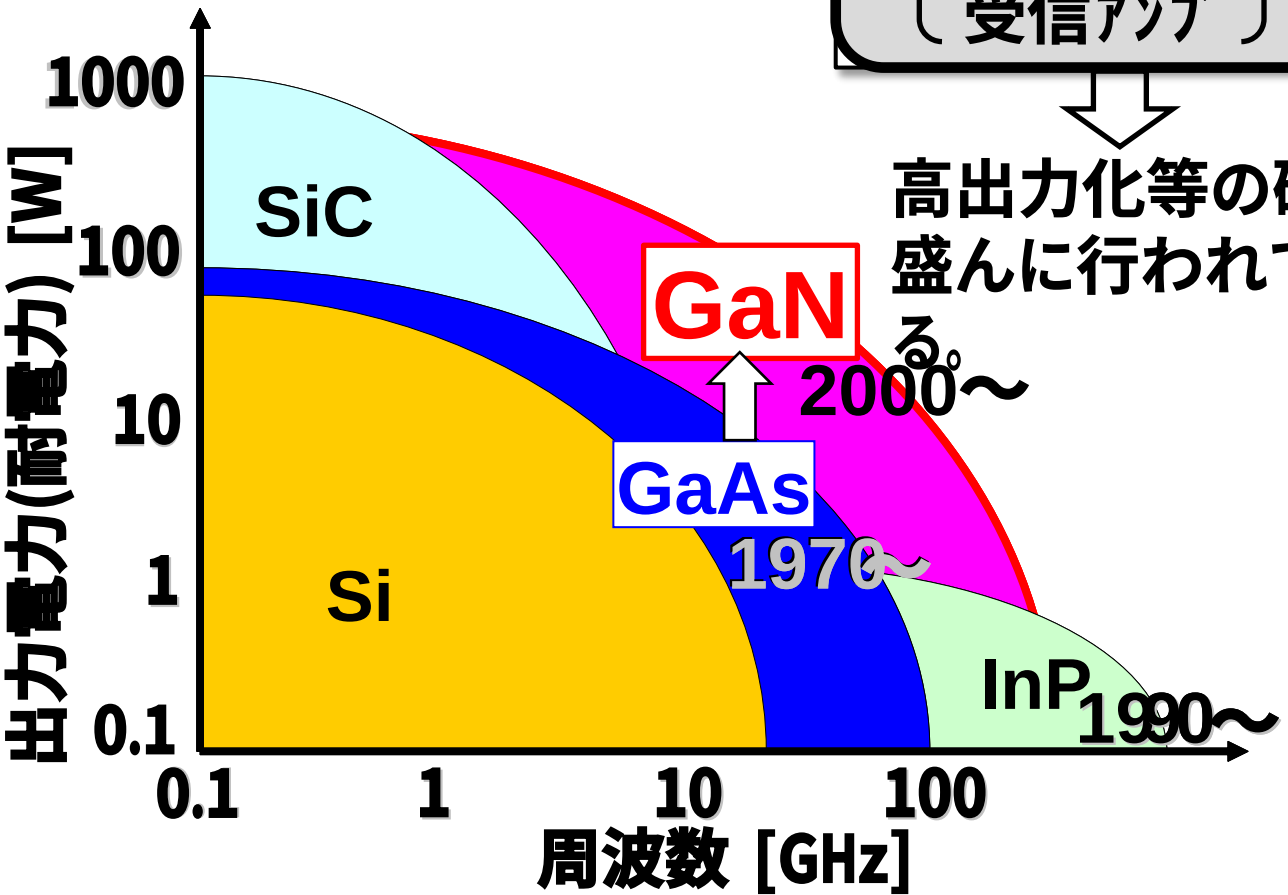
半導体の研究動向

送受信モジュール

半導体とは：電流をコントロールできる性質をもつ。

アンプ機能：
〔送信アンプ 受信アンプ〕

スイッチ機能：
〔保護回路〕



高出力化等の研究が盛んに行われている。

GaNスイッチの研究は不十分。

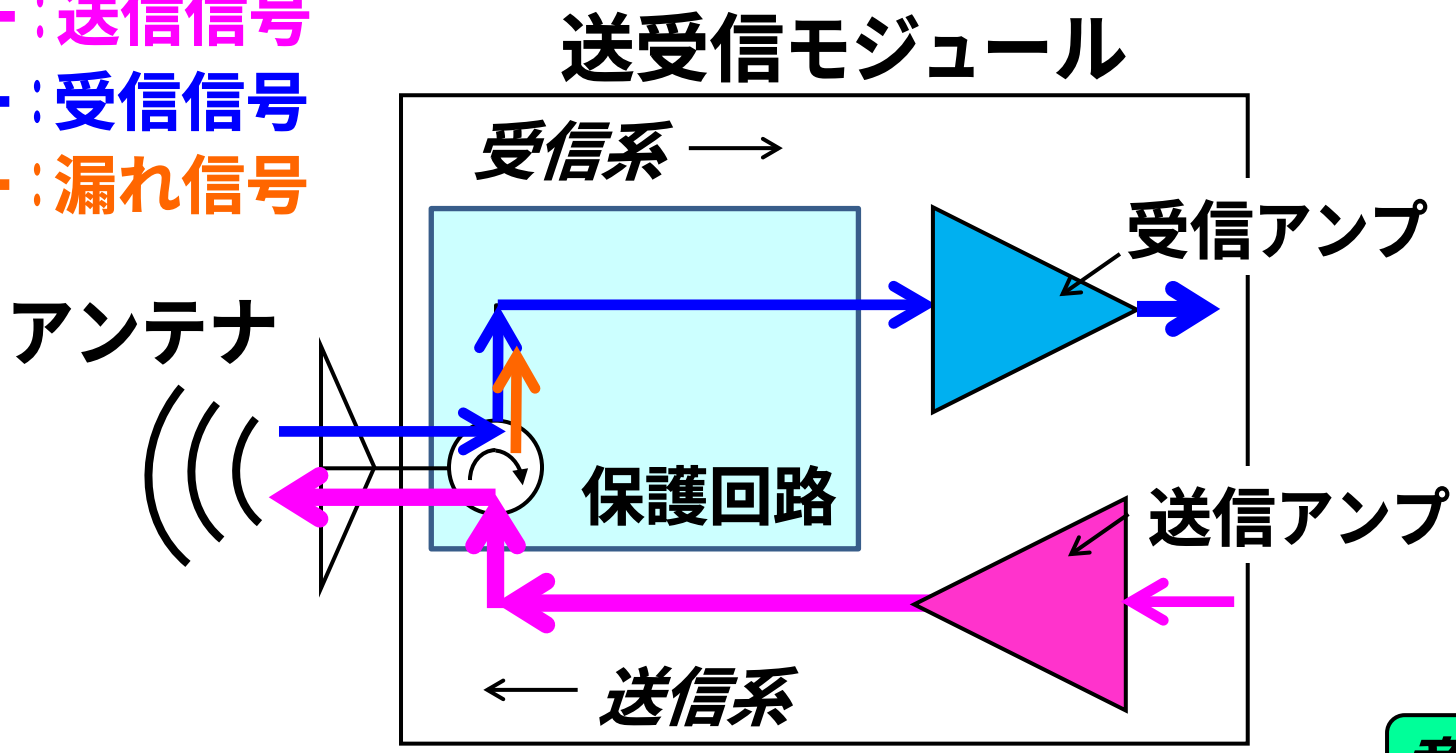
研究目的

・送受信モジュールを構成する保護回路をGaNスイッチに置換することにより送受信モジュールの高性能化を図る。

・GaNスイッチを適用した送受信モジュールの送信電力はL帯で世界最高レベルの 200 W以上をねらう。

送受信モジュールについて

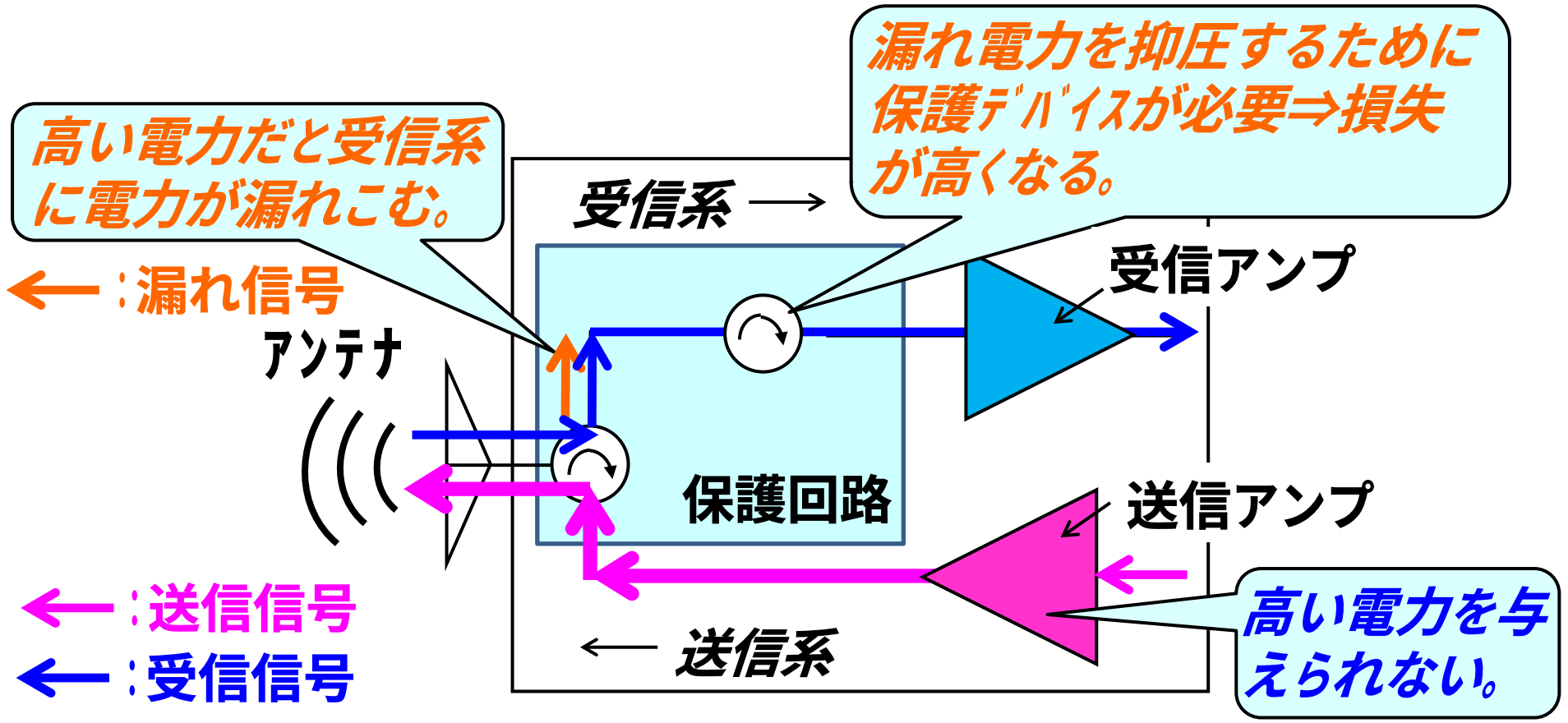
←：送信信号
←：受信信号
←：漏れ信号



送受信ﾓｼﾞｭｰﾙ
1. 送信ｱﾝﾌﾟ ⇒ 高い電力を作り出す。
2. 受信ｱﾝﾌﾟ
3. 保護回路 ⇒ 受信ｱﾝﾌﾟを保護する等。

意外と重要

高性能化の課題



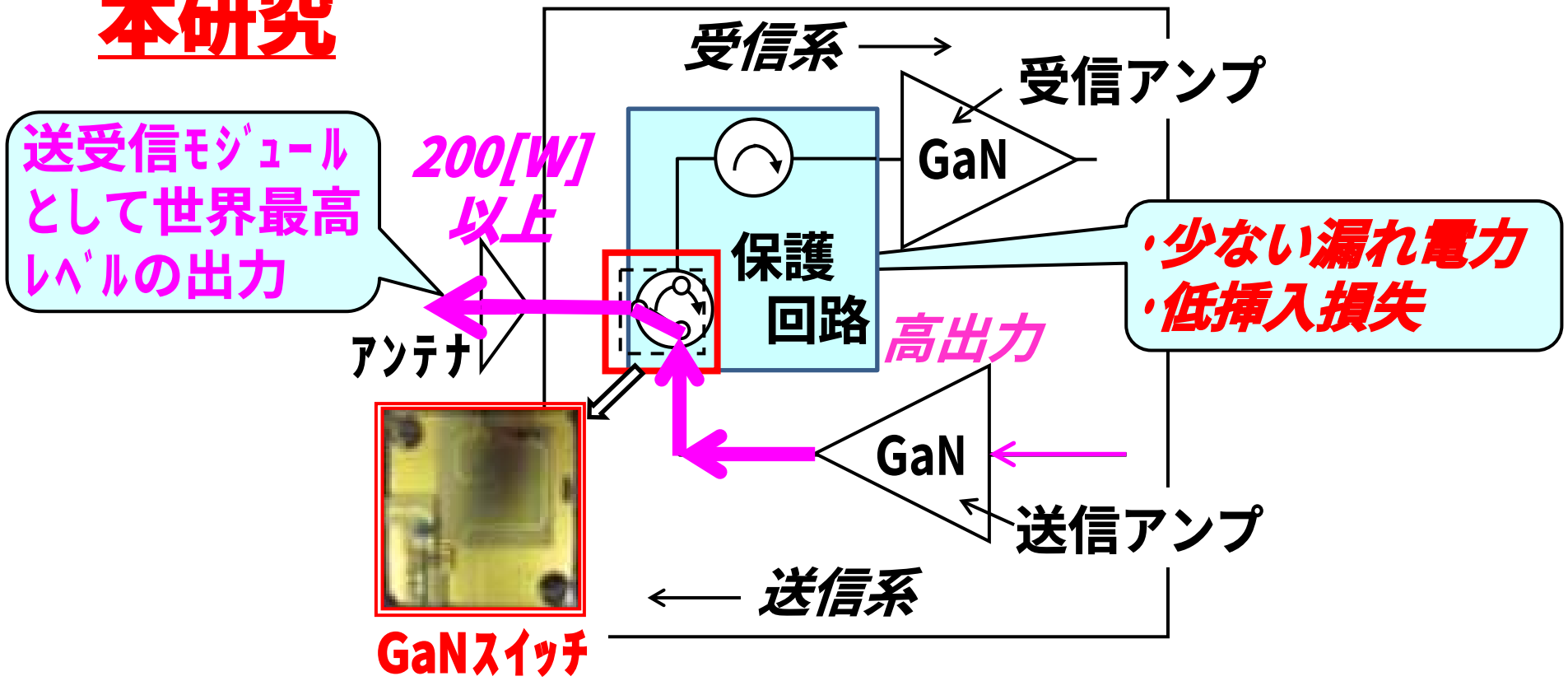
・耐電力の低い半導体　・高い漏れ電力　・高い挿入損失

⇩

低RCS目標の探知が困難。

GaNｽｲｯﾁについて

本研究



少ない漏れ電力、低挿入損失な GaNｽｲｯﾁが送受信ﾓｼﾞｭｰﾙに求められる。

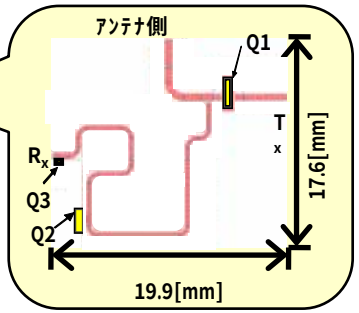
⇩

低RCS目標の探知につながる。

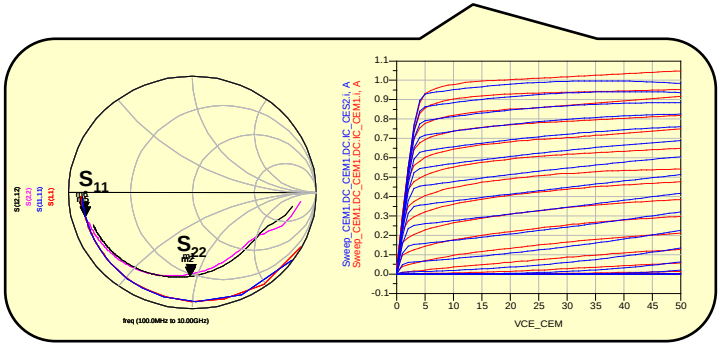
本研究の流れ

GaNスイッチ

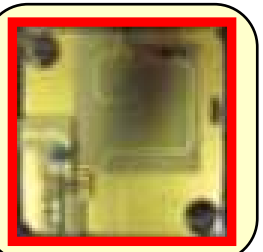
1. 設計



⟺ シミュレーション



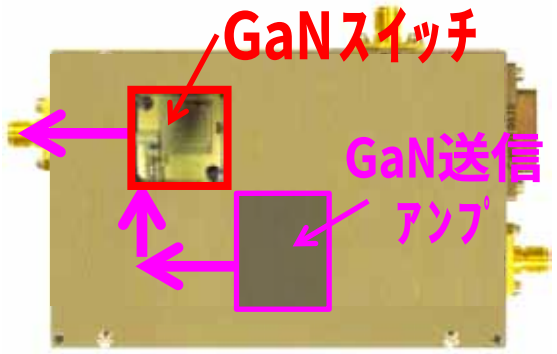
2. 製造



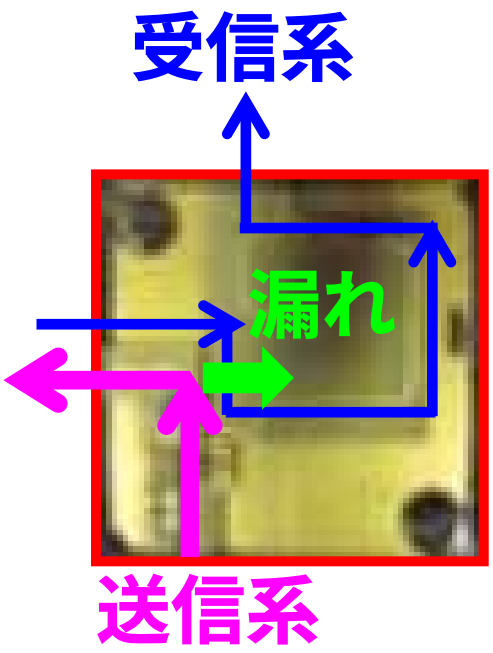
3. 測定・評価

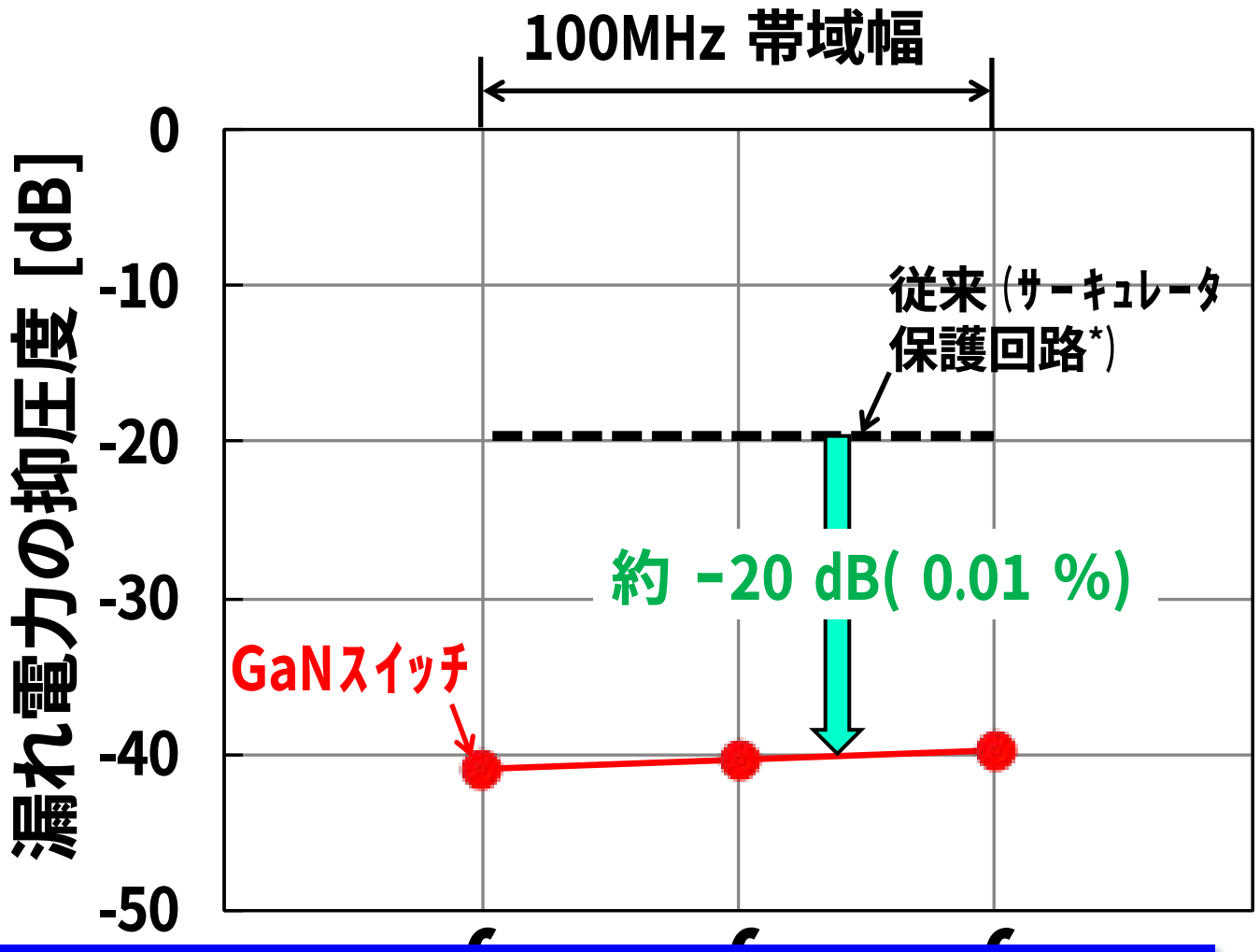
GaN送受信モジュール

4. 設計 ⟺ シミュレーション
5. 製造
6. 測定・評価



GaNスイッチの測定結果

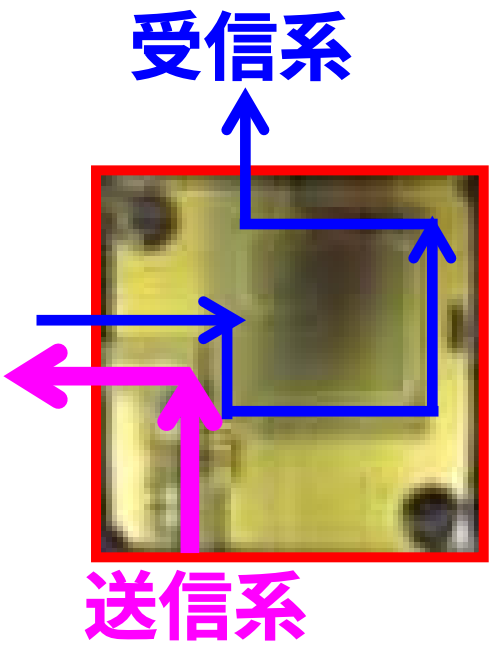


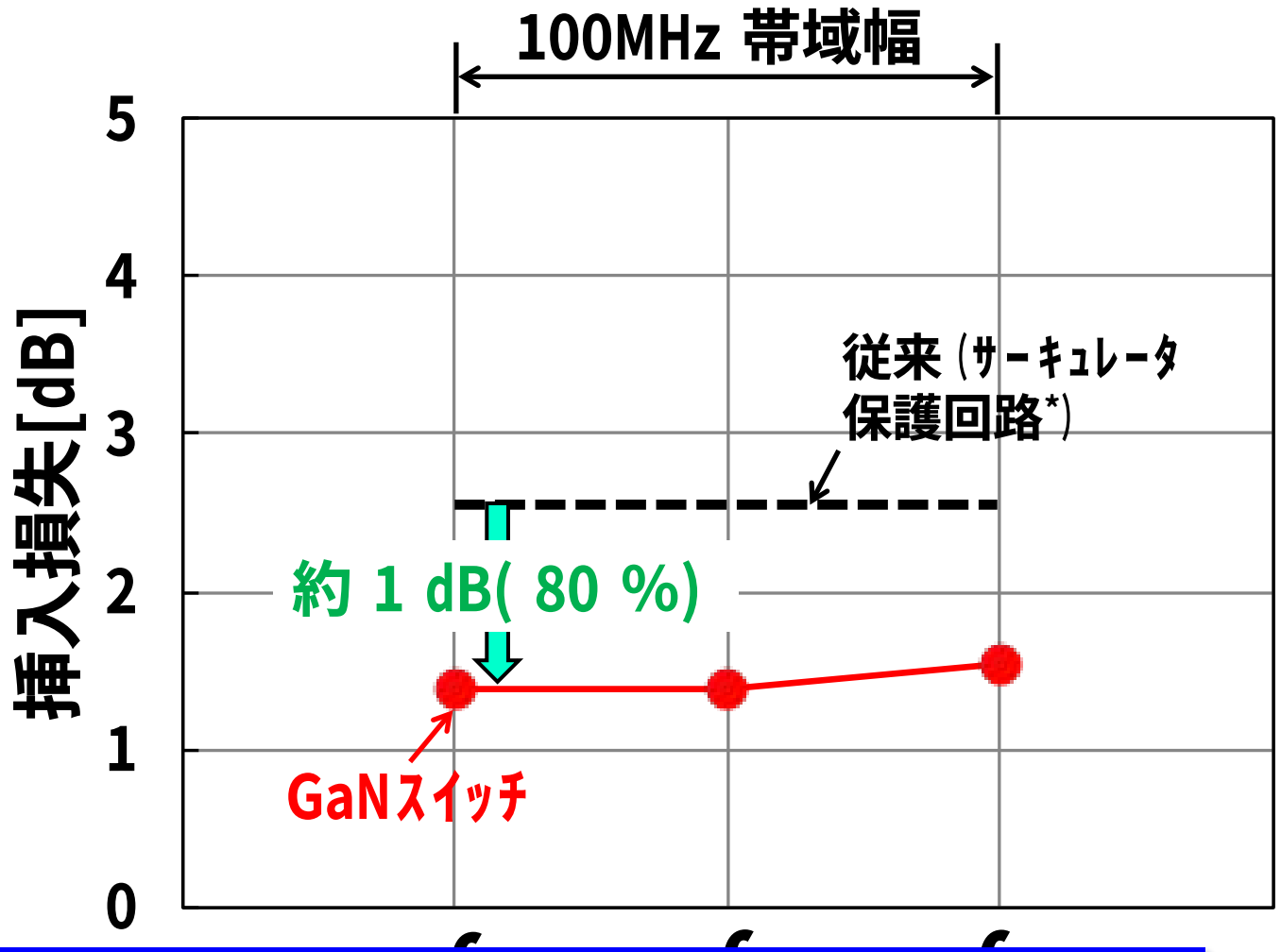


100 MHz帯域幅にわたり、漏れ電力の抑圧度を約 −20 dB(従来の 0.01 %以下) 低く抑えることができた。

＊:類似の性能をもつカタログ品の値

GaNスイッチの測定結果



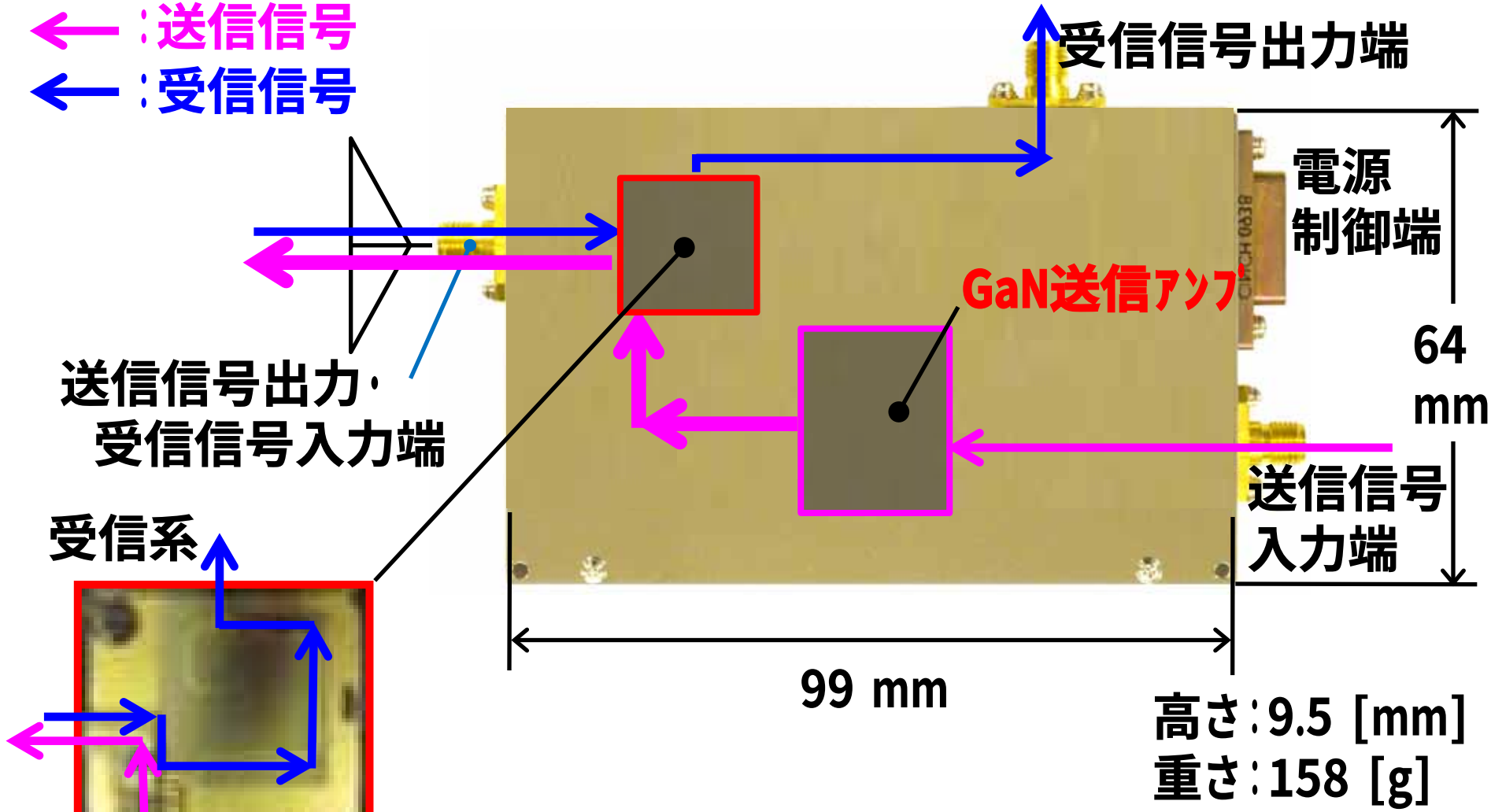


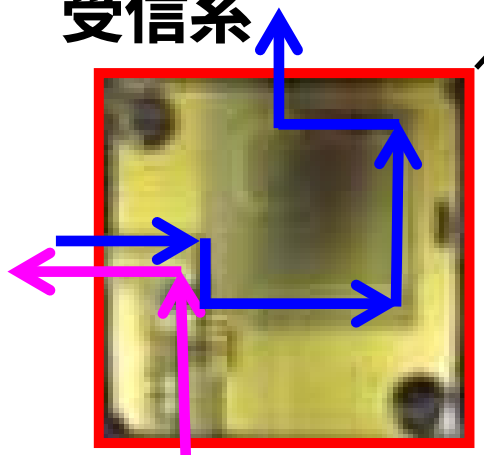
100 MHz帯域幅にわたり、挿入損失を約 1 dB(従来の 80%以下)低くできた。

＊:類似の性能をもつカタログ品の値

GaN送受信モジュール

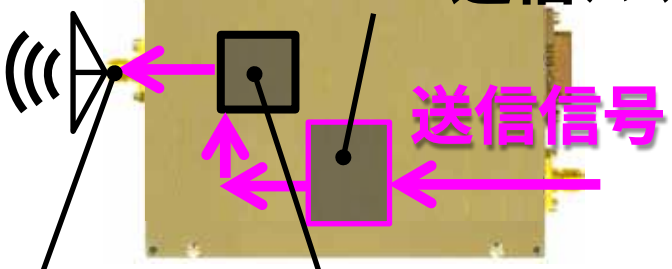
←：送信信号
←：受信信号



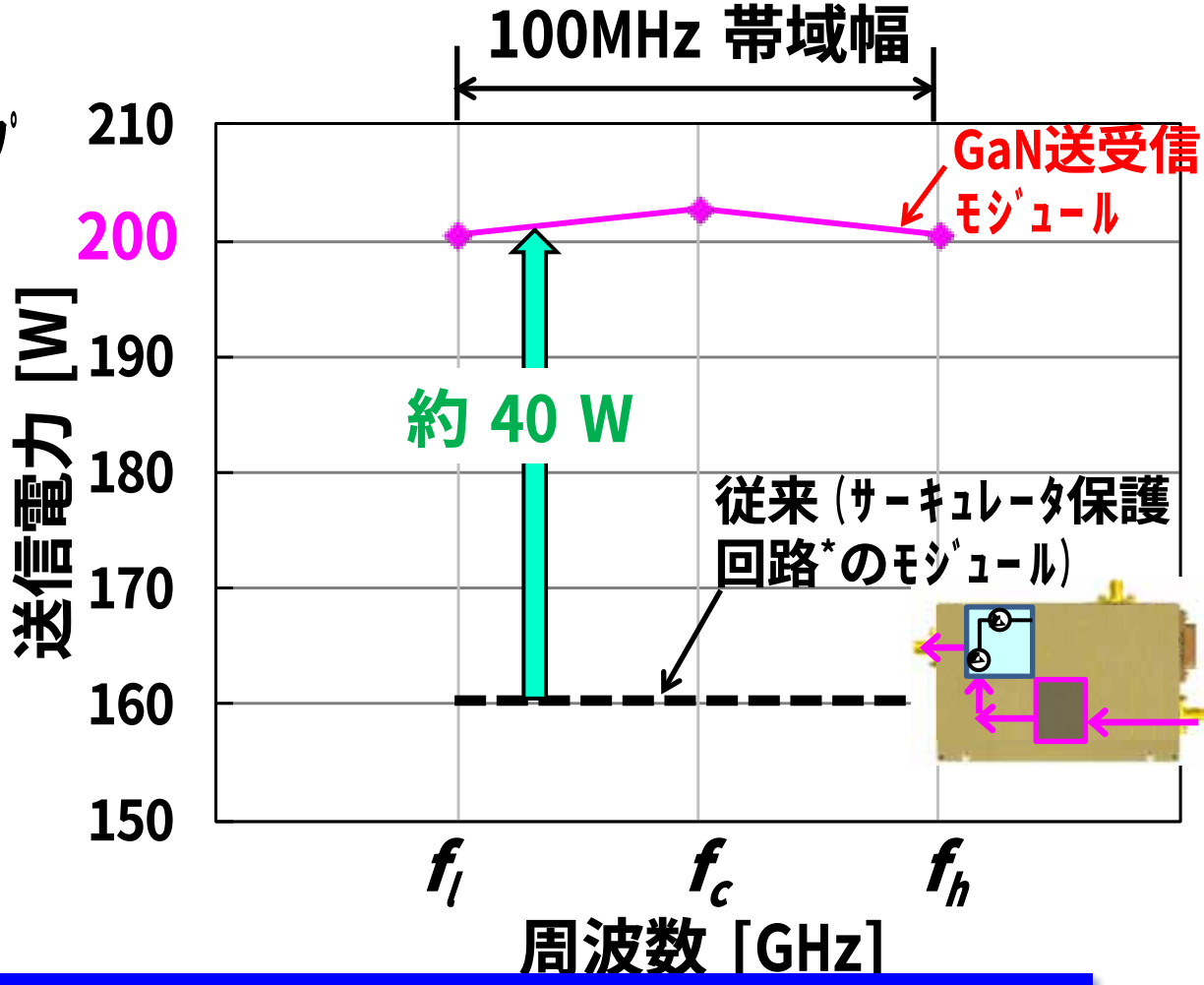


展示ブースにおいて展示していま

GaN送受信ﾓｼﾞｭｰﾙの測定結果



GaN送受信ﾓｼﾞｭｰﾙ



100 MHz帯域幅にわたり、200 W(送受信ﾓｼﾞｭｰﾙとして世界最高ﾚﾍﾞﾙ) 以上の高出力な送信電力を実現。

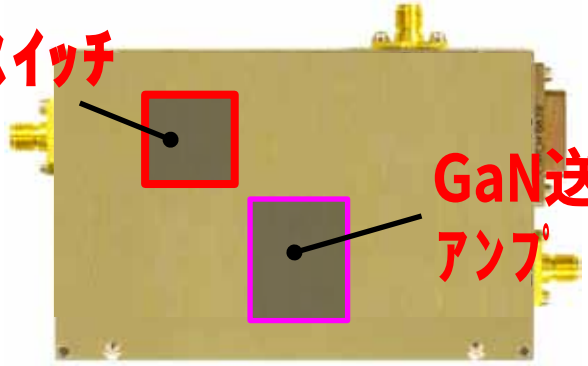
＊:カタログ値より算出した値

研究の成果について

低RCS目標の遠方での探知につながる。

高性能なレーダ

GaNｽｲｯﾁ



GaN送信ｱﾝﾌﾟ

GaN送受信ﾓｼﾞｭｰﾙ

まとめ

・GaNスイッチの適用により、高出力にもかかわらず約 −20 dB (従来の 0.01 %以下)の漏れ電力の抑圧度の向上等の高性能化を図った。

・本研究において、GaNスイッチを適用したL帯GaN送受信モジュールを設計及び製造し、世界最高レベルの送信電力 200 W以上の高性能な送受信モジュールを実現した。

・本研究の成果を反映し、低RCS目標の探知を目的とする高性能なレーダの実現を目指す。

ＲＣＳの低減に寄与するメタマテリアル

TRDI
Technical Research & Development Institute
Ministry of Defense

電子装備研究所　センサ技術研究部
電子戦基盤研究室
防衛技官　櫻　井　宗　晃

説明項目

1．研究の背景

2．研究の成果

3．今後の方向性

4．まとめ

研究の背景

将来の戦闘機

- **第5世代機に対抗できるステルス性の確保が必要。**

ステルス技術

- **形状ステルス：エッジアラインメント、ウェポン内装化、インテークダクト等**
- **ステルス材料：電波吸収体、メタマテリアル等**

メタマテリアル技術を活用した電波反射制御材の研究
（我が国の最先端技術を適用したステルス材料）

敵を凌駕するステルス

敵レーダから見えなくするために

電気的に同様な効果が
得られないか・・・

反射レーダ波

入射レーダ波

反射レーダ波

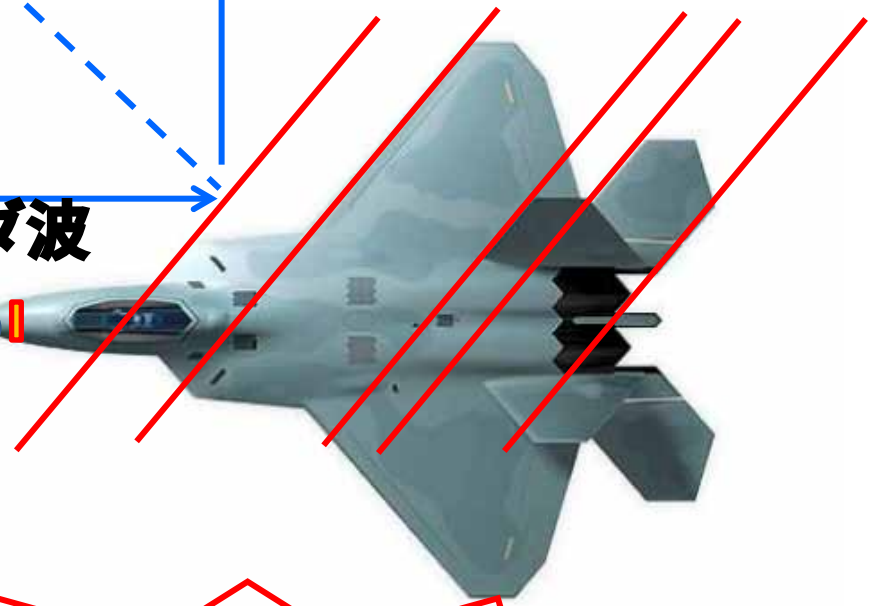
電気的な
反射面

物理的な
反射面

電波を元に戻さない形状

反射レーダ波

入射
レーダ波



物理的にエッジを傾けることで、入射レーダ波を到来方向へ反射させない工夫

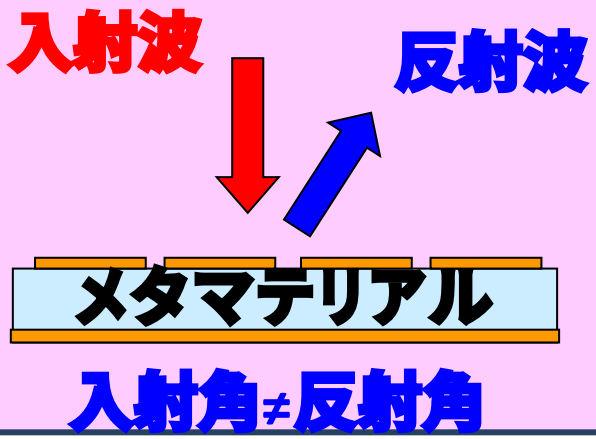
メタマテリアルの活用

メタマテリアルは、自然界には存在しない人工媒質である。

- 金属、誘電体等の**小片からなる単位素子**
- **波長に比べ十分小さい間隔**で並べて構成
- 元の物質・材料とは異なる電気的・磁気的性質な特性
  - **反射位相制御**
  - 周波数選択
  - 負の屈折率等

反射位相制御：
エッジのアラインを電気的に実現する手法

反射の法則に従わない反射



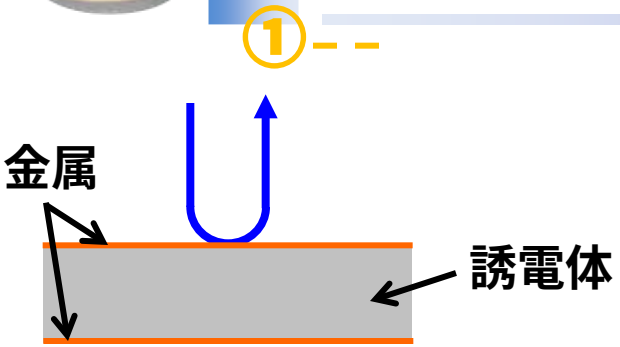
本研究の成果

新たなステルス材料として、仮作した電波反射制御材の**反射特性を測定**し、その有効性を検証した。

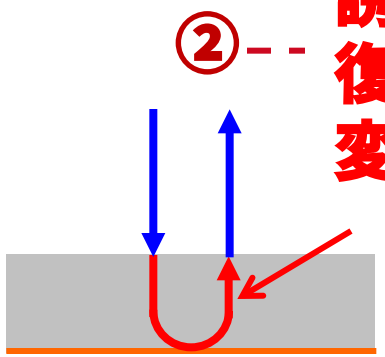
（1）仮作基板#1の測定結果

（2）仮作基板#2の測定結果

反射位相制御の概要（1／2）

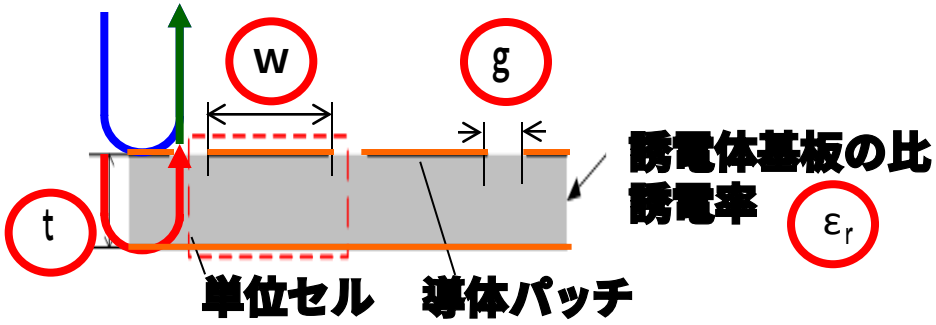


①金属板の場合
（反射位相：180°）

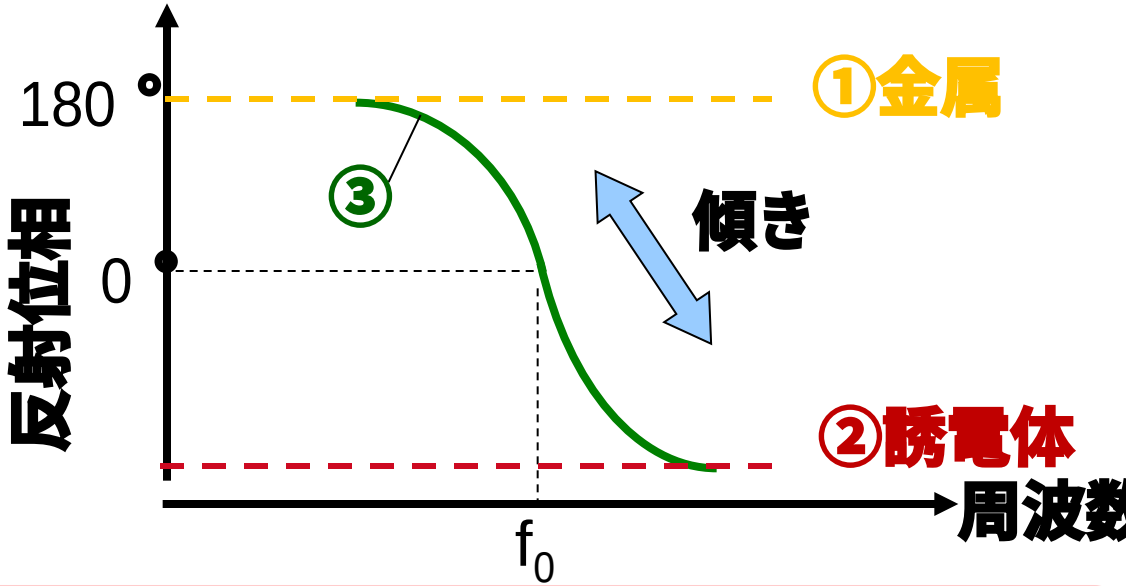


誘電体内往復分の位相変化が生じる

②誘電体基板の場合



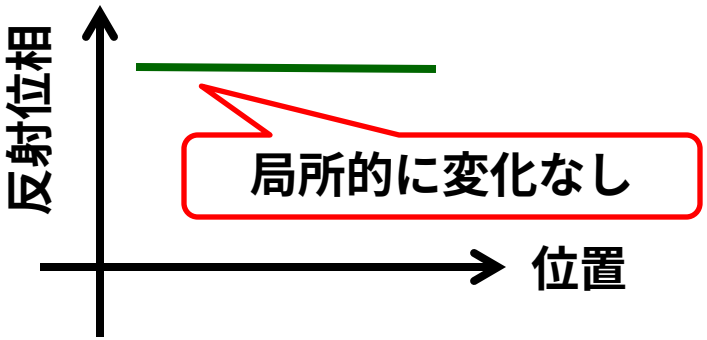
③メタマテリアルの場合
（①と②の中間状態に相当）

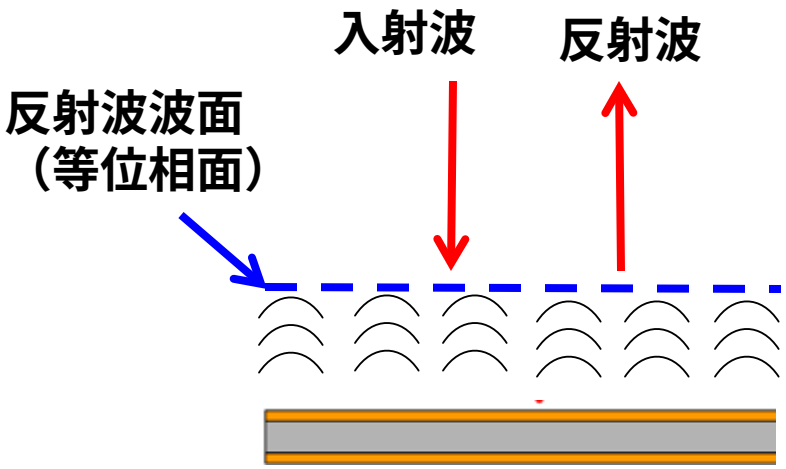


f_0: 導体パッチの幅(w)、間隔(g)で決まる
傾き: 比誘電率(ε_r)、厚さ(t)で決まる

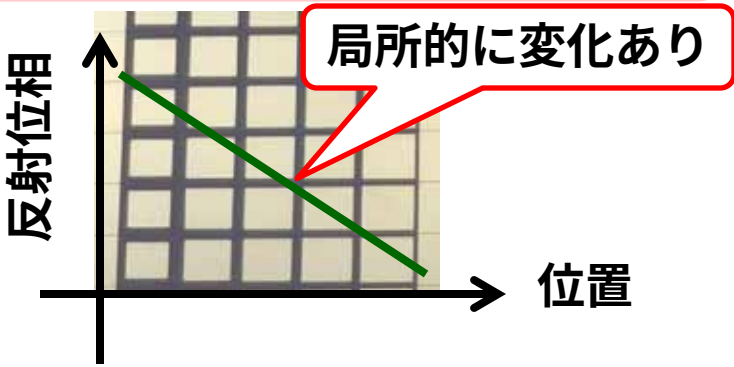
反射位相制御の概要（2／2）

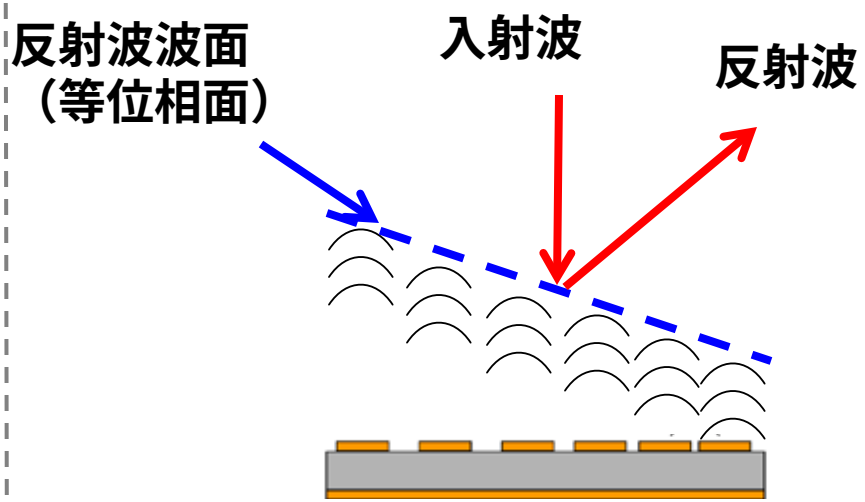
導体パッチ幅を変化➡ 反射位相を制御➡ 電気的な反射波面を傾斜➡ 反射波の方向を変える





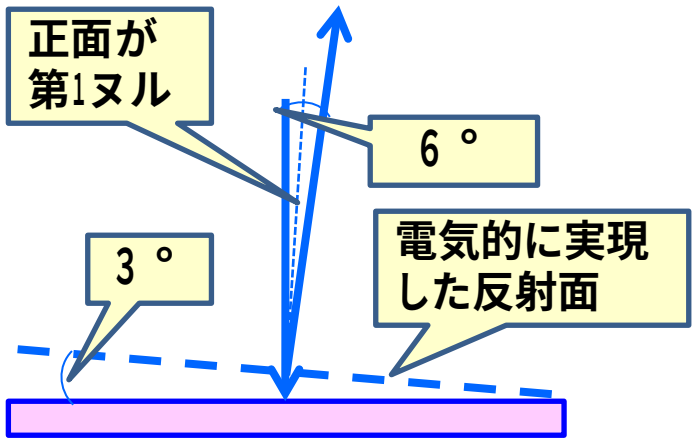
金属板の場合





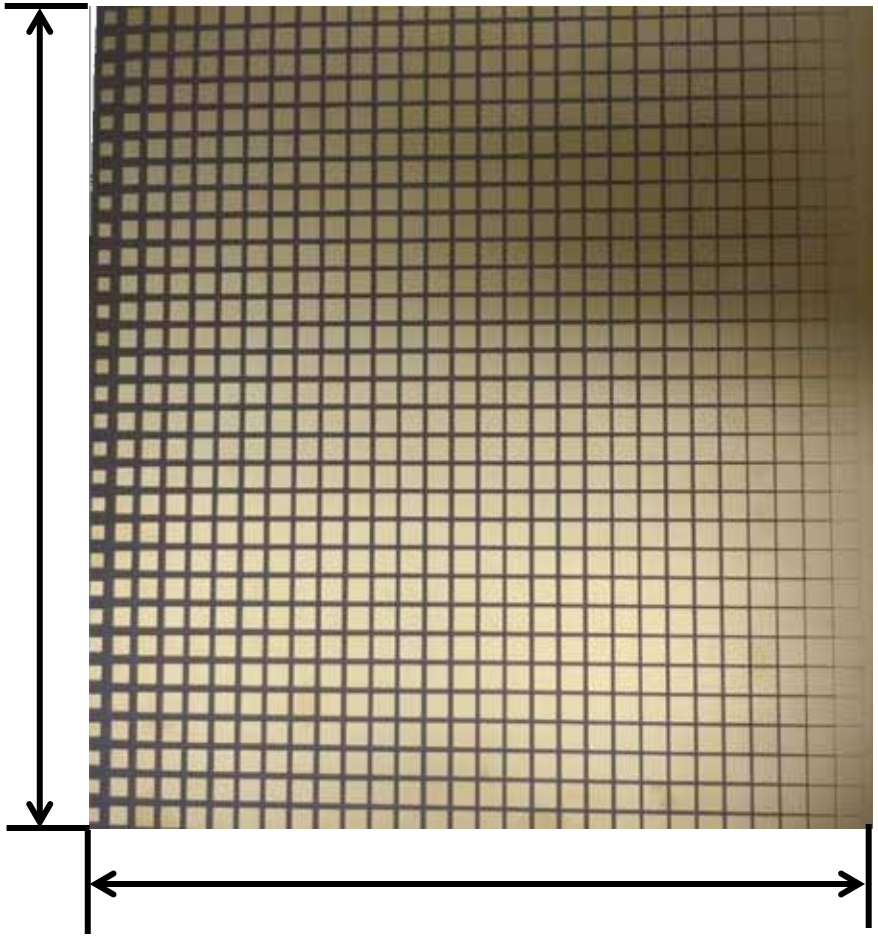
電波反射制御基板の場合

仮作基板の概要（1／2）

	設計指針
#1	電波入射方向に第1ヌルを指向 （周波数：10GHz） 

300mm

外観

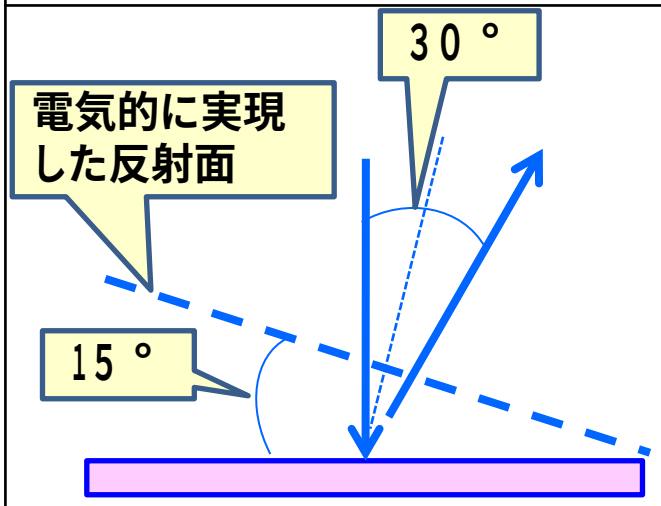


300mm

θ:**反射制御角**　θ=6 **° 仮作基板**#1

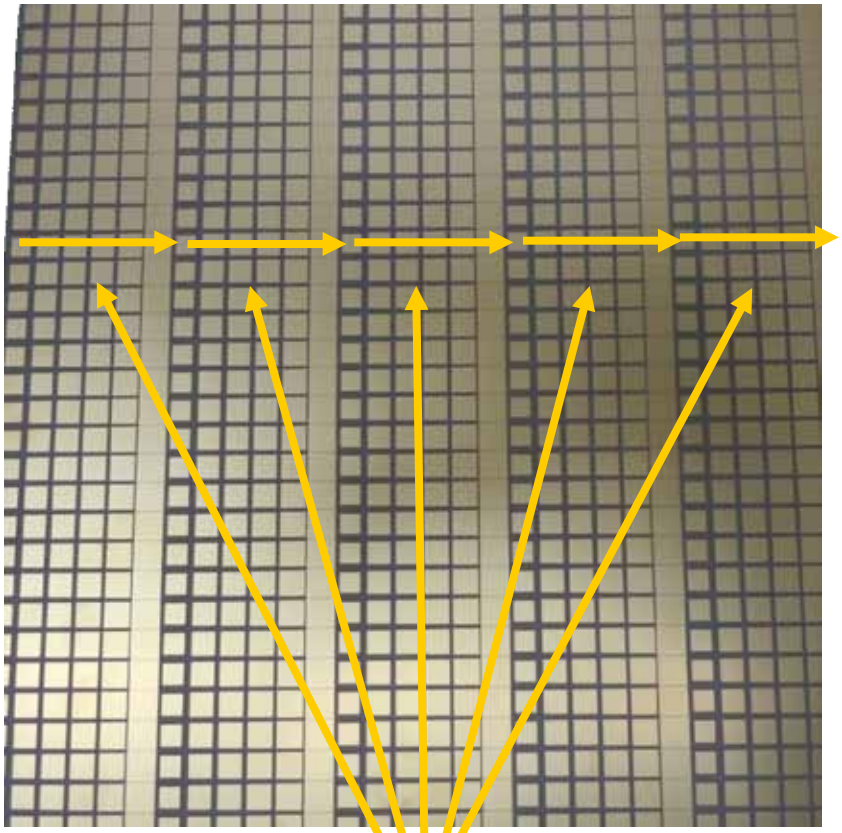
仮作基板の概要（2／2）

	設計指針
#2	RCSの最大値を30度方向に指向 （周波数：10GHz）



θ:反射制御角 θ=30°仮作基板#2

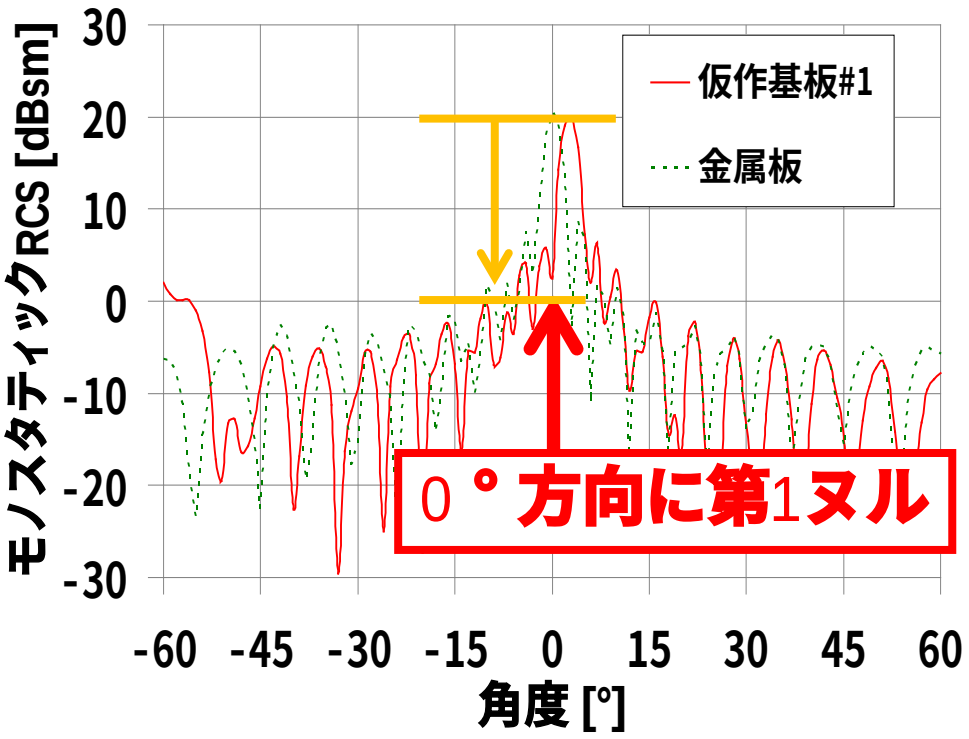
外観

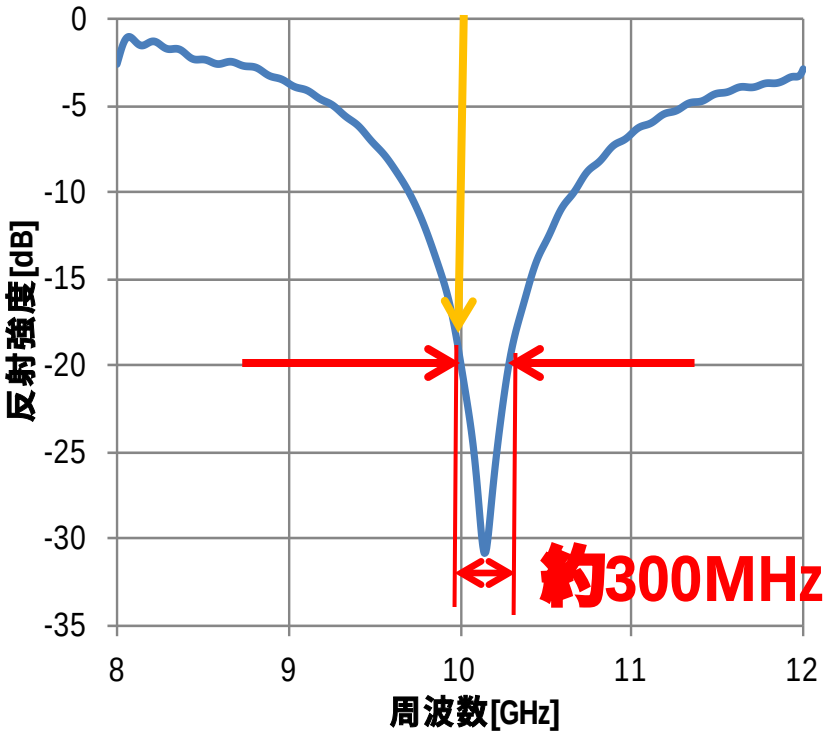


同配列が並ぶ構造（主反射方向の他にグレーティングローブが生じる可能性有り。）

測定結果（仮作基板#1）

電波入射方向に第1ヌルを指向





モノスタティックRCS（10GHz）

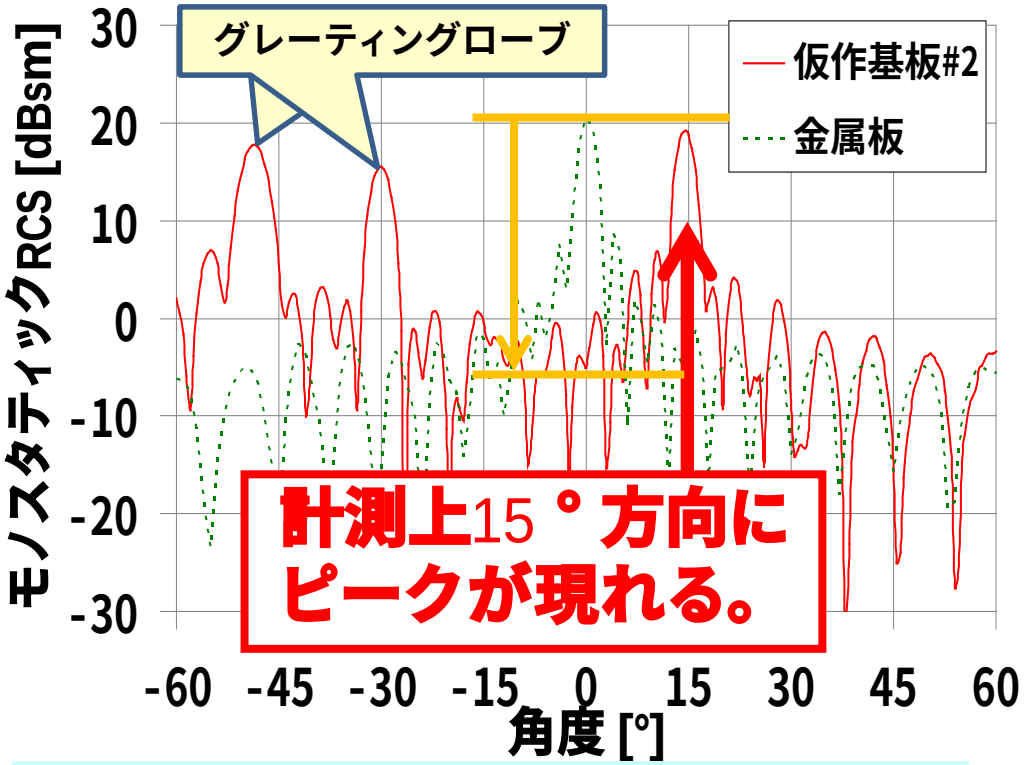
【結果】
電波の入射（0°）方向に第1ヌルを形成し後方散乱波を低減

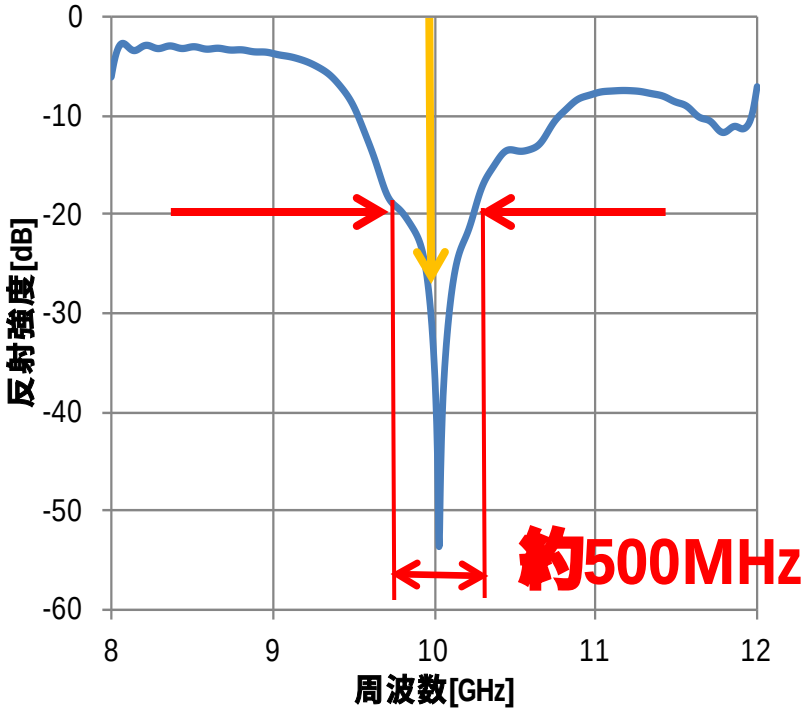
周波数特性（角度0°）

約300MHzの帯域でRCS低減量20dBを実現。

測定結果（仮作基板#2）

最大値を30度方向に指向





モノスタティックRCS （10GHz）

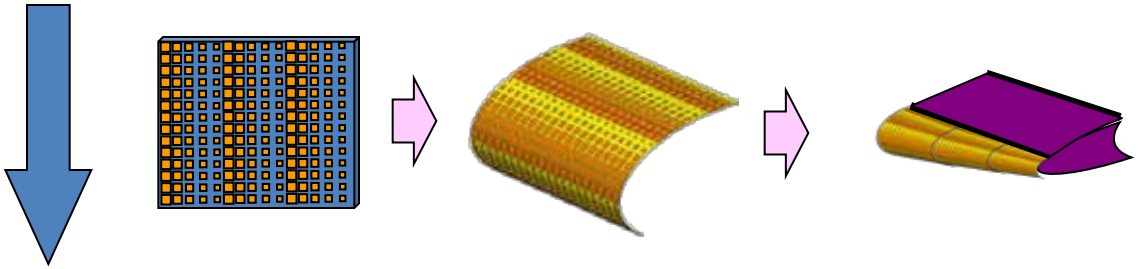
周波数特性（角度0°）

【結果】
RCSの最大値を+30°方向に指向させ後方散乱波を低減

約500MHzの帯域でRCS低減量20dBを実現。

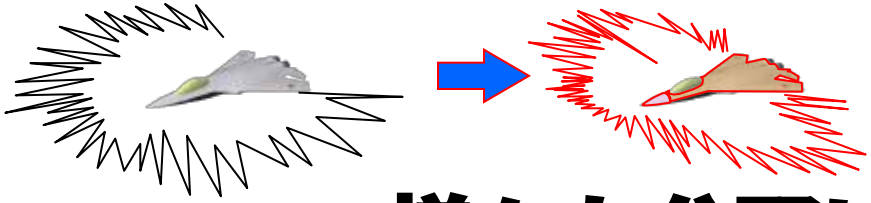
今後の方向性

段階的な設計解析手法の確立



RCS設計・解析技術の確立

耐環境性評価



アプリケーションに合わせた最適設計

様々な分野に適用可能

- 将来のミサイル
- 将来の護衛艦
- 将来の戦闘機
- 将来の大型機

まとめ

（1）レーダ波の反射方向を制御できるメタマテリアルの電波反射制御基板を仮作し、実測することで、**設計どおりの特性**を確認。

（2）レーダ波を任意の方向へ反射制御して、到来方向への反射波を抑制する手法は、**ＲＣＳの低減に有効**であることを確認。

（3）**将来の戦闘機**を含めた様々なプラットフォームの**ＲＣＳ低減に寄与**すべく、ステルス材料の設計技術の確立に向けて研究を推進。

目標が動いているときのＲＣＳを見極めるために

TRDI
Technical Research & Development Institute
Ministry of Defense

技術研究本部　電子装備研究所
飯岡支所　電磁特性研究室
技官　松林　一也

発表内容

1. 研究背景
2. ＲＣＳシミュレーション概要
3. モデル概要
4. 角柱モデル
5. 艦艇モデル
6. 結論

1－1　研究背景

現状

F22ラプターやヴィズビー級コルベットを始め、各国においてステルス装備品の開発及び研究が盛んに実施されており、我が国においても、ステルス性を考慮した装備品の開発が計画されている。

ステルス性の評価は新規装備品開発を行う上で必要不可欠となっていく

レーダの最大探知距離

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \times RCS}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{1/4}$$

RCS : $RadarCrossSection$ } 我

P_t : 送信電力

G : 空中線利得

λ : 波長

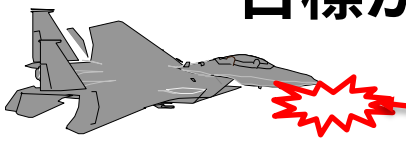
$S_{\min}$: 最小探知信号 } 彼

RCSの評価が重要

RCS：Radar Cross Section（**レーダ反射断面積**）

目標がレーダ波をどれだけ反射するかを表す量

目標



レーダアンテナ

RCS	1/10(10dB減)	1/100(20dB減)	1/1000(30dB減)
探知距離	0.56	0.32	0.18

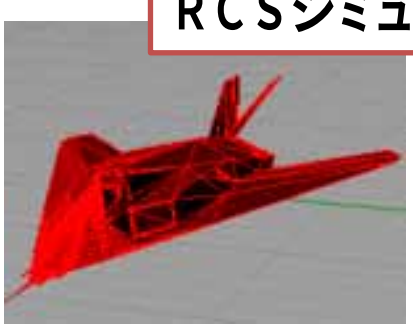
1－2　研究背景

問題点

技術研究本部では各種ＲＣＳ計測及びＲＣＳシミュレーションにより、装備品のステルス性の評価及び推定を実施

ＲＣＳ計測

ＲＣＳシミュレーション



ただし

その多くは静止した状態での検討であり、実運用化においては、推定した艦艇や航空機等のRCSの値と異なる可能性が生じる。

動的状態のRCS特性の検討が必要

本研究では

目標が動揺した場合のRCS特性の初期段階の検討をRCSシミュレーションにより実施

将来的には

RCSシミュレーションと実測と比較検討し、精度を向上

２－１　ＲＣＳシミュレーション概要（機能の紹介）

GESS　Gihon Evaluation Scattering System

機能及び特徴

飯岡支所独力で開発（言語：matlab)

(1) RCSシミュレーションで広く用いられているPO法を使用
(2) 目標の動揺を考慮したRCSの計算
(3) 電波が反射されない個所については、計算から除外する
　陰面処理機能の搭載

	高周波近似解法 PO法、EEC法等	厳密解法 MOM(モーメント)、MLFMM法等
計算負荷	○	×
精度	○	◎

２－２　ＲＣＳシミュレーション概要（フローチャート）

3次元モデルデータ（CADソフトを用いて作成）

計算パラメータ設定
- 周波数
- 角度範囲
- 偏波
- モデル姿勢角の変化

モデル姿勢角を決定

電波照射方向の決定

アジマス角度のループ

電波照射部抽出

各メッシュからの電界算出（PO法）

全メッシュからの電界を合計

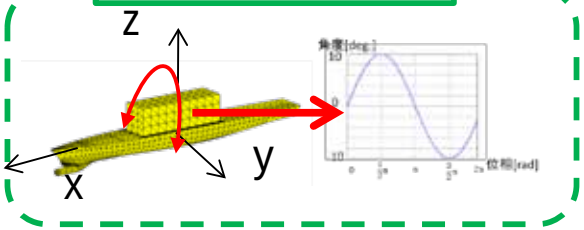
RCS（単一角度）を算出

RCS（角度特性）

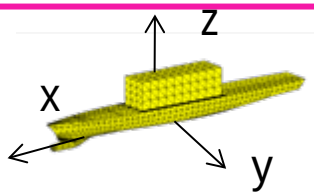
RCS（角度及び動揺特性）

モデル姿勢角のループ

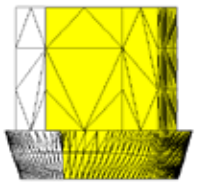
モデル姿勢角の決定



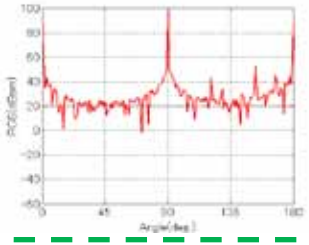
3次元モデルデータ



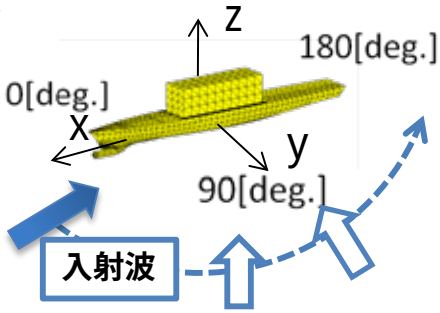
電波照射部抽出



角度特性

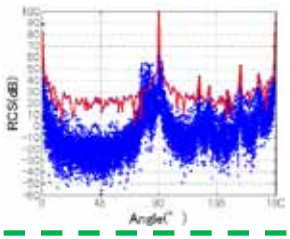


電波照射方向の決定



※本報告では範囲は0～180[deg.]

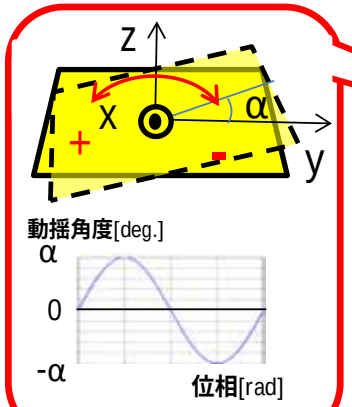
動揺時の角度特性等



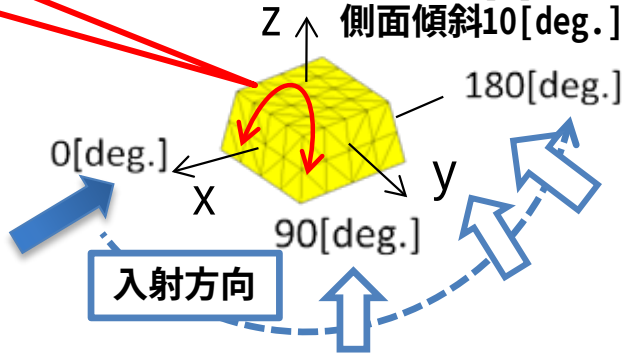
２－３　ＲＣＳシミュレーション概要（計算結果概要）

※１周期分のＲＣＳ（水平方向）を各入射角度ごとに算出

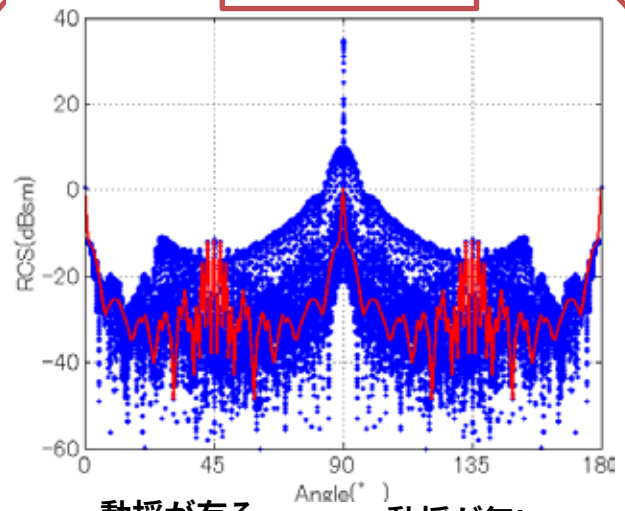
ロール軸（X軸）方向に正弦的な動揺を仮定



※参考モデル
底面0.3[m]×0.3[m]
高さ0.15[m]
側面傾斜10[deg.]



角度特性

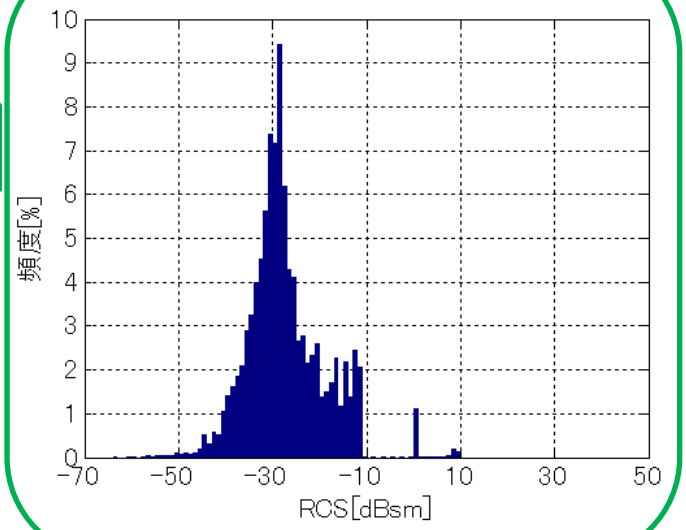


● 動揺が有る場合のRCS　— 動揺が無い場合のRCS

角度軸上にプロット

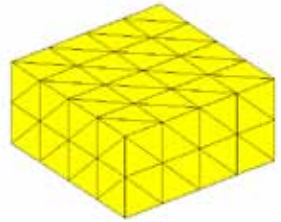
確率分布

確率分布



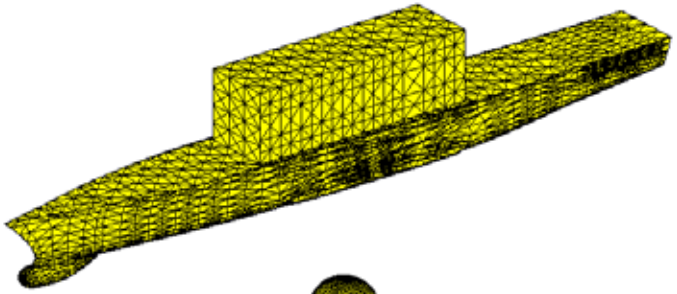
3－1　モデル概要

角柱モデル



	底面	高さ	側面傾斜
角柱モデル	10× 10[m]	5[m]	無し

艦艇モデル



	水線長 (喫水線での船の長さ)	幅	全高
艦艇モデル	150[m]	20[m]	28.3[m]

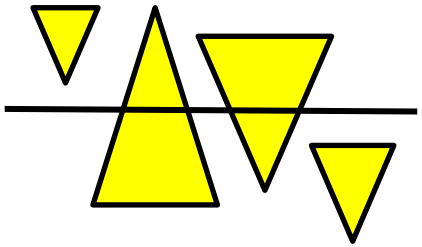
	球状部　半径	棒状部　長さ
付加物モデル	1[m]	10[m]

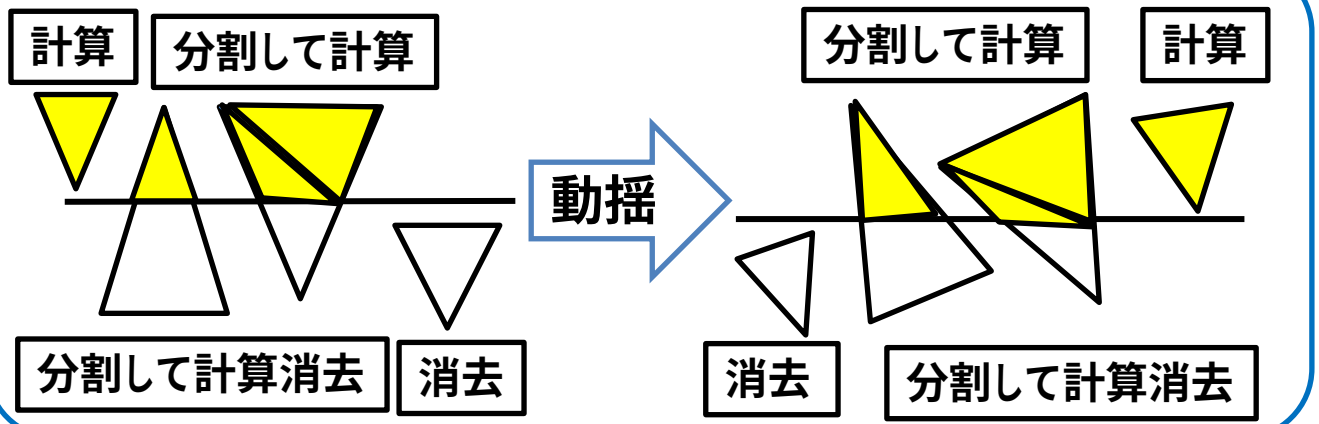
※モデルの材質はすべて完全導体と仮定した。

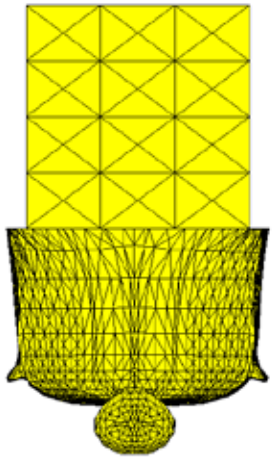
３－２　モデル概要
（艦艇モデルの計算方法）

艦艇モデルについては、Z=0の平面を海面として、各姿勢角ごとに海面と交差するメッシュを分割、海面より下に存在するメッシュを消去して計算を実施。

計算モデル（例）

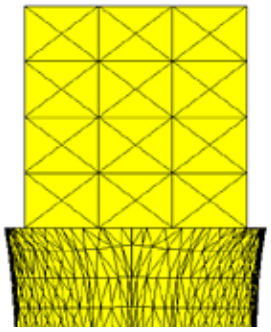




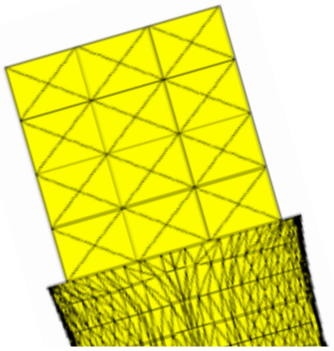


喫水線より下の部分を消去して計算

動揺無し



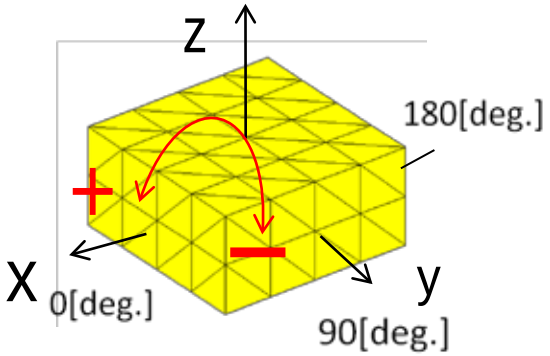
動揺有り



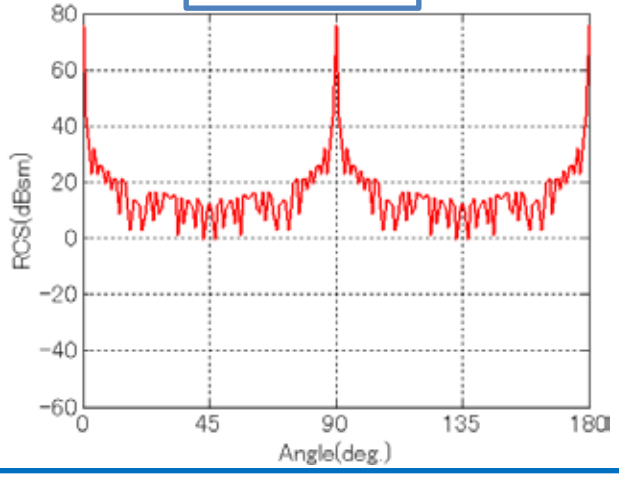
4　角柱モデル

角柱モデル
（側面傾斜無し）

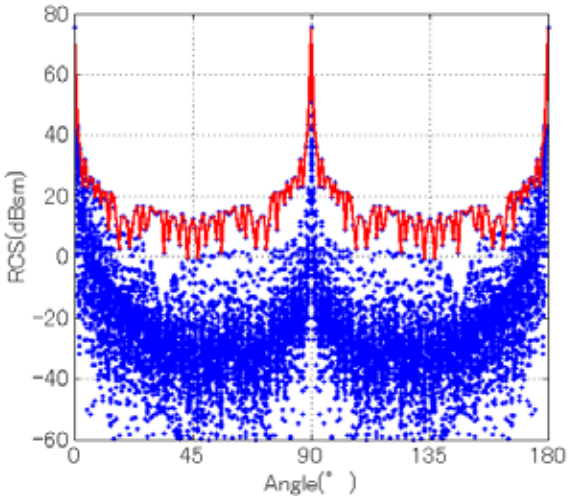
周波数10GHz
水平偏波

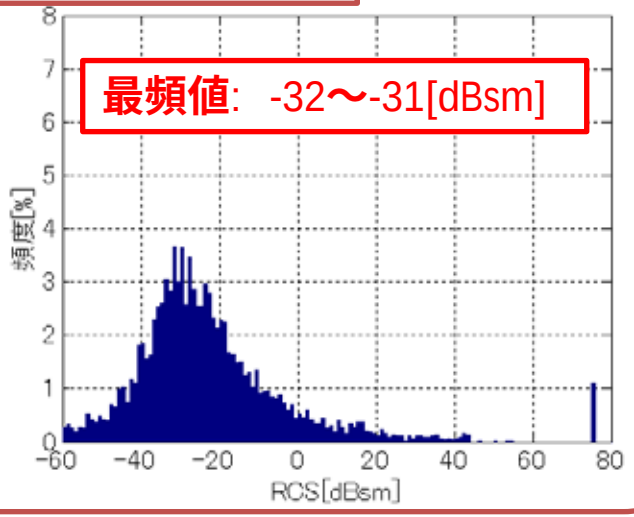


静的状態



動的状態（最大動揺角10[deg.]の場合）

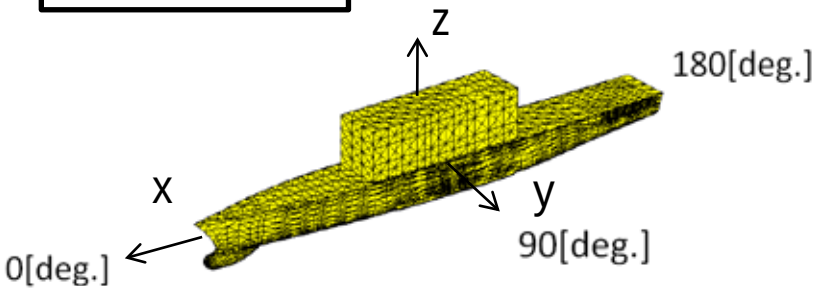




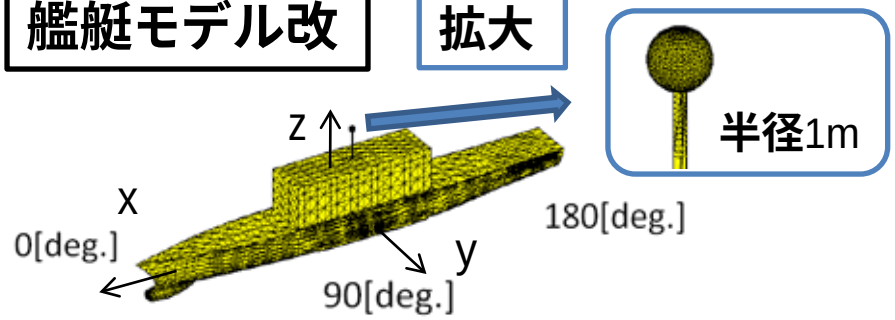
動的状態においては、静的状態のＲＣＳ特性から大きく変動

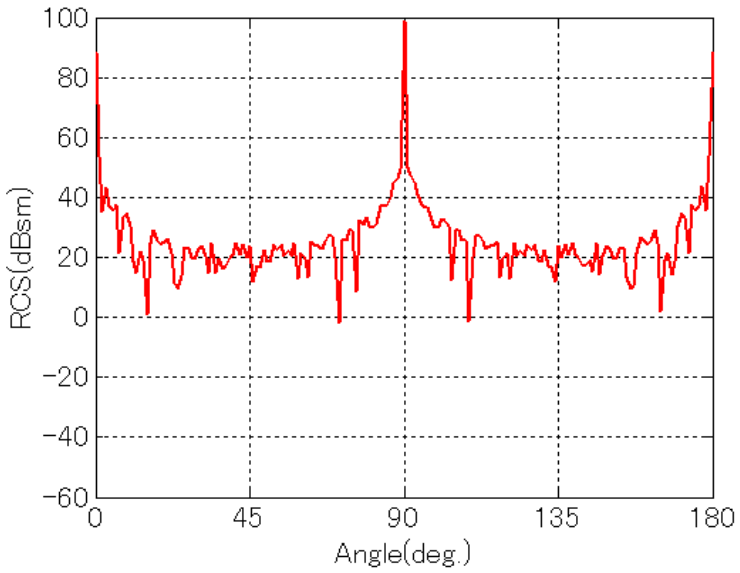
５－１　艦艇モデルーアンテナ等の影響（静的状態）

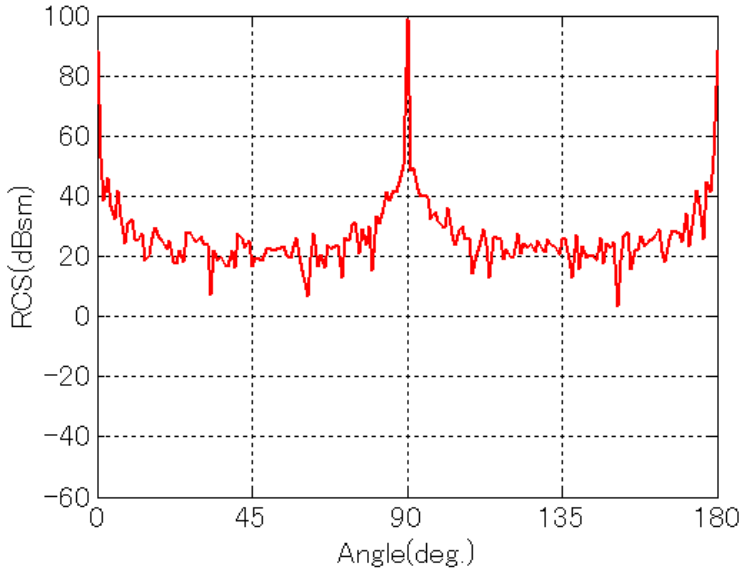
艦艇モデル



艦艇モデル改　拡大





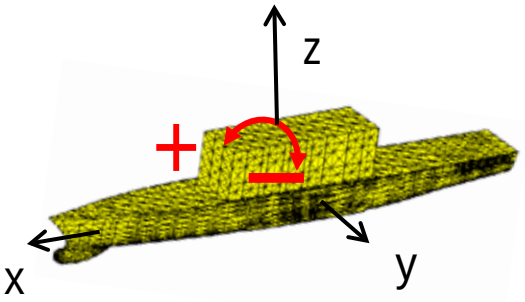


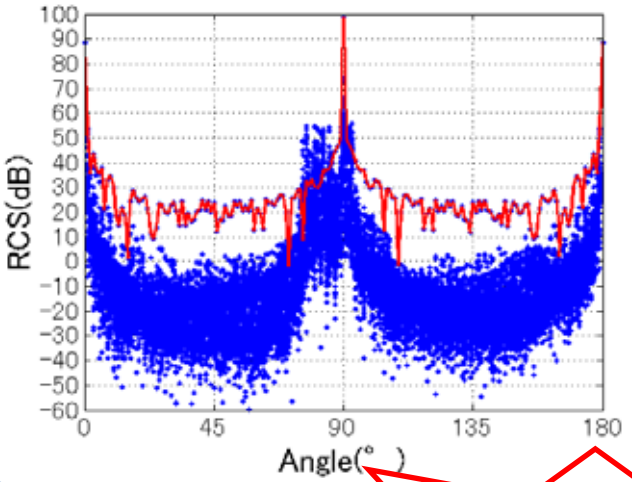
静的状態においては、艦艇モデルのRCSが付加物モデルのRCSに比べ相対的に大きく、付加物モデルによるRCS特性への影響はほぼ無かった。

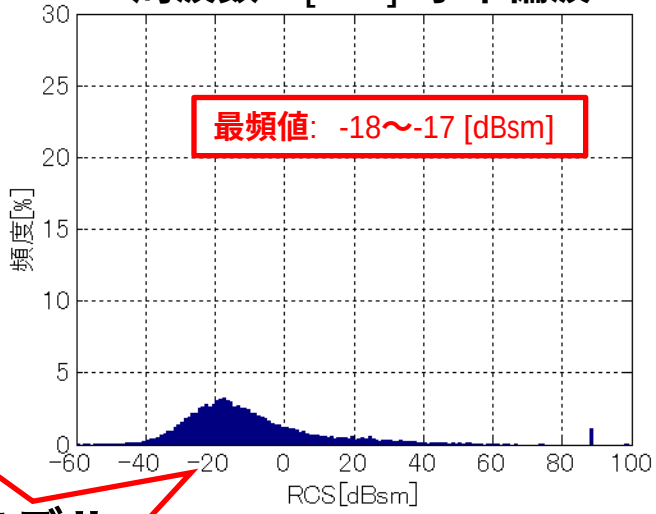
5－2　艦艇モデルーアンテナ等の影響（動的状態：最大動揺角10[deg.]の場合）

※周波数10[GHz]：水平偏波

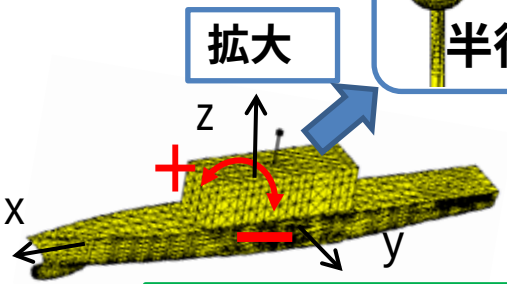
艦艇モデル



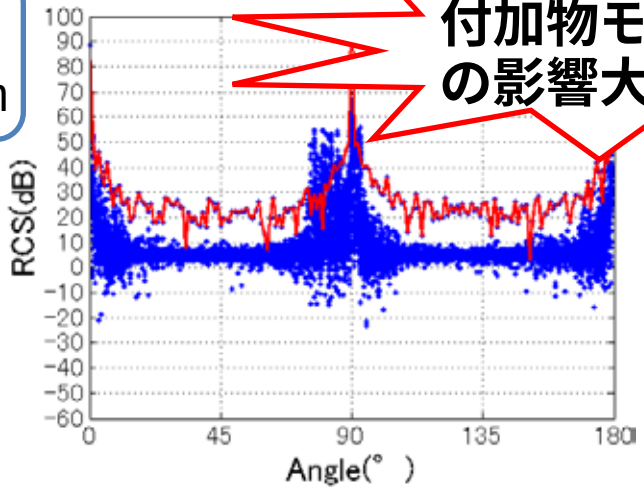




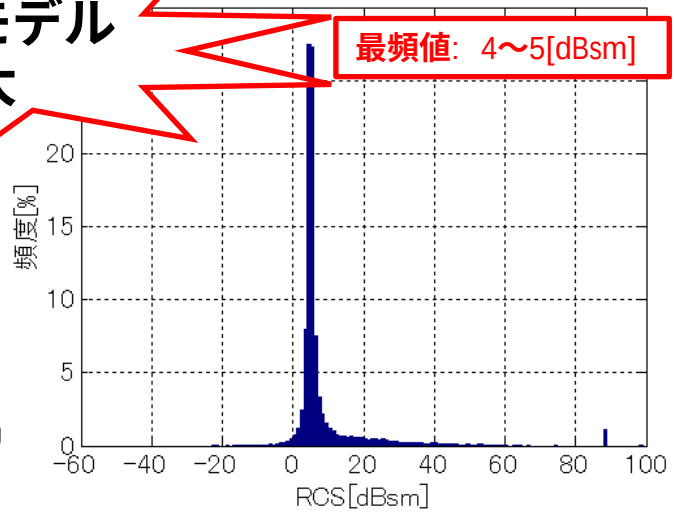
艦艇モデル改



参考
半径1[m]の球
RCS ：4.97[dBsm]



付加物モデルの影響大



静的な状態において影響が少ないと推定した部位についても、動的な状態のRCS特性に大きく影響する可能性がある。

6　結論

動的目標のRCS特性の基礎的な検討のため、姿勢角を変化させた目標に対してRCSシミュレーションを行い、そのRCSのパターンや値の確率分布を求めることで動揺がある目標のRCS特性について、下記の知見を得た。

目標に動揺がある場合、静止している状態と比べ目標のRCS特性は大きく変動し、静的な状態では無視することが可能な微小構造物についても、動的な状態のRCS特性に大きく影響する可能性がある。

今後の目標

・シンプル形状の目標について、実測と比較検討することによるシミュレーション精度の確認
・平面形状の海面に存在する目標のRCS特性の検討
・モデル形状の海面に存在する目標のRCS特性の検討
・実在の海面に存在する目標のRCS特性の検討