

自由設計レンズで 電磁波ビームの品質を改善

QST ITERプロジェクト部 RF加熱開発グループ
主任研究員 矢嶋 悟

2026年2月3日

研究紹介: 100GHz機器開発の経緯

磁場閉じ込め核融合の研究



強い磁場を用意し、プラズマの"保温効果"を改善
→核融合炉の採算性向上につながる



磁場に比例し、プラズマ加熱に必要な電磁波の周波数も増加
(JT-60SA計画: 82~138GHz, ITER計画: 170 GHz,
原型炉 ≥ 200 GHz)



より高い周波数に対応した要素機器開発
(1MW単位で、作る→送る→放射する)

研究紹介: 100GHz機器開発の経緯

低損失&高パワー伝送を求める過程で、
シングルモード伝送を諦め、マルチモード導波管採用に至った
(口径 ϕ 50 mm \gg 波長 λ =1.8 mm)、数千のモードを許容



もともと電力伝送に特化し、情報通信は考慮していないが、
低次のモードがより低損失であるため、モード純度の管理が重要

モード純度の管理 → **情報の混線を最小化、情報伝達の精度向上**

100GHz機器開発における今後の期待

プラズマ加熱分野

170 GHzの長距離高効率伝送が可能

高効率伝送のために
モード制御・管理の需要

情報処理分野

2.4GHz/5GHzにおいて緻密な信号処理が可能

Beyond 5G (≥ 100 GHz)へ向けて
周波数向上の需要

技術的合流点

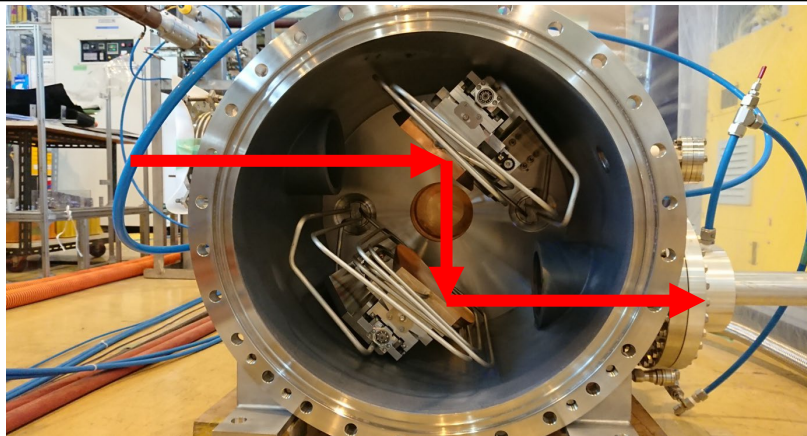
100 GHz帯における長距離高効率なモード(信号)制御

分野を跨いだ知見の共有により、
研究開発の相互促進を期待しています

従来技術(プラズマ加熱)とその問題点

- 大電力用途($\sim 1\text{MW}$)でビームの強度と位相を制御する目的で、準光学整合器(ミラー対)が利用されていたが、コストが高いことが問題(~ 1 年, > 1000 万円)

準光学整合器(自由形状ミラー)

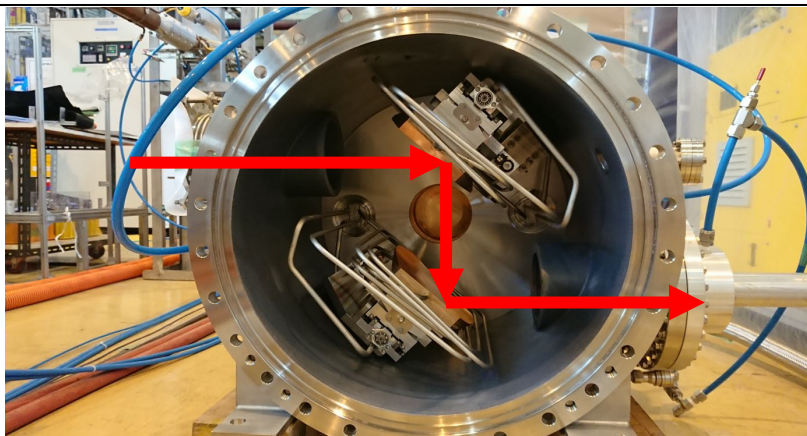


2枚のミラーは強度分布と位相(波数)分布の独立制御に必要

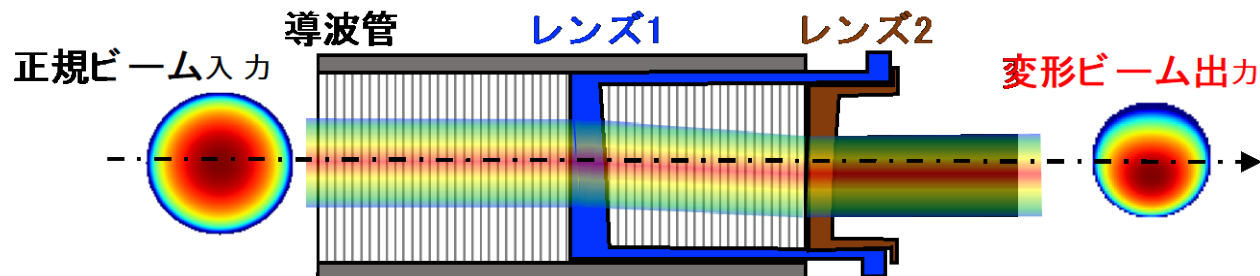
従来技術(プラズマ加熱)とその問題点

- 大電力用途($\sim 1\text{MW}$)でビームの強度と位相を制御する目的で、準光学整合器(ミラー対)が利用されていたが、コストが高いことが問題(~ 1 年, > 1000 万円)
- 低電力試験用途($\leq 1\text{kW}$)であれば、誘電体レンズの利用により同様の機能を低コストで実現できる。

準光学整合器(自由形状ミラー)



2枚のミラー \ni 2枚のレンズ



従来技術(情報通信)とその問題点

- 既に実用化されている通信インフラは周波数が低く、障害物があっても、隙間を通過して広がる電磁波の性質を利用して通信の安定性を担保できた。
- **周波数が上昇すると電磁波は直進性をもつ**
指向性に起因する通信領域の“影”が発生
通信要素機器コストの大幅増
等の問題により、広く利用されるまでには至っていない。

従来技術(情報通信)とその問題点

- 既に実用化されている通信インフラは周波数が低く、障害物があっても、隙間を通過して広がる電磁波の性質を利用して通信の安定性を担保できた。
- **周波数が上昇すると電磁波は直進性をもつ**
指向性に起因する通信領域の"影"が発生
通信要素機器コストの大幅増

等の問題により、広く利用されるまでには至っていない。

複数のレンズ(もしくはミラー)を用いることで、
"影"の削減、設置誤差の補正の簡便化が期待できる。

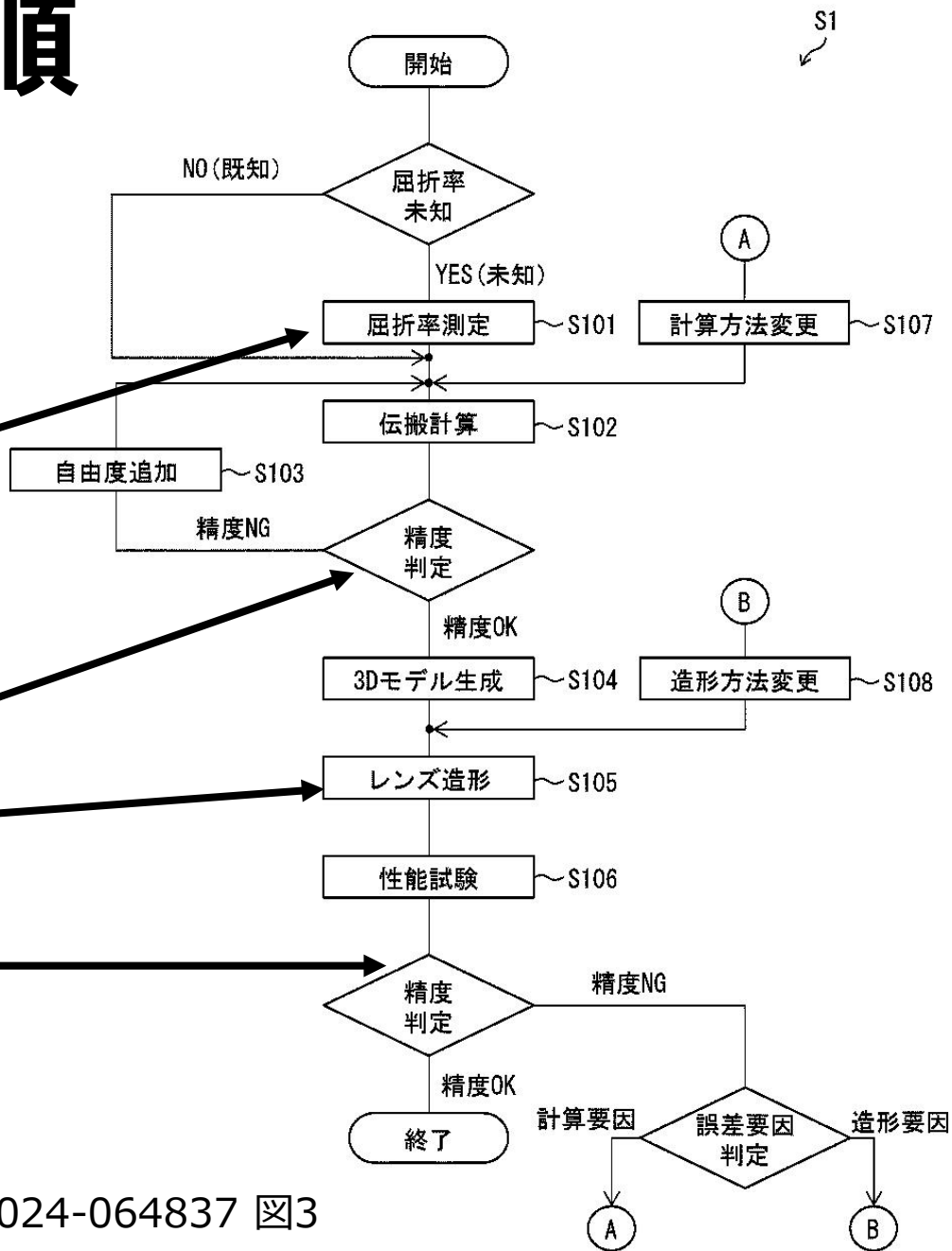
新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、空間中の伝送ビーム品質を安価なレンズで制御することに成功した。
- 従来は製作コストが高く、利用ケースが限られていたが、容易かつ大量に製作・検証することが可能となる。
- 本技術の適用により、送受信機器及び伝送機器の交換や要素開発の一部を回避でき、インフラ・システム実装のコストが大幅に削減できると期待される。

実施手順

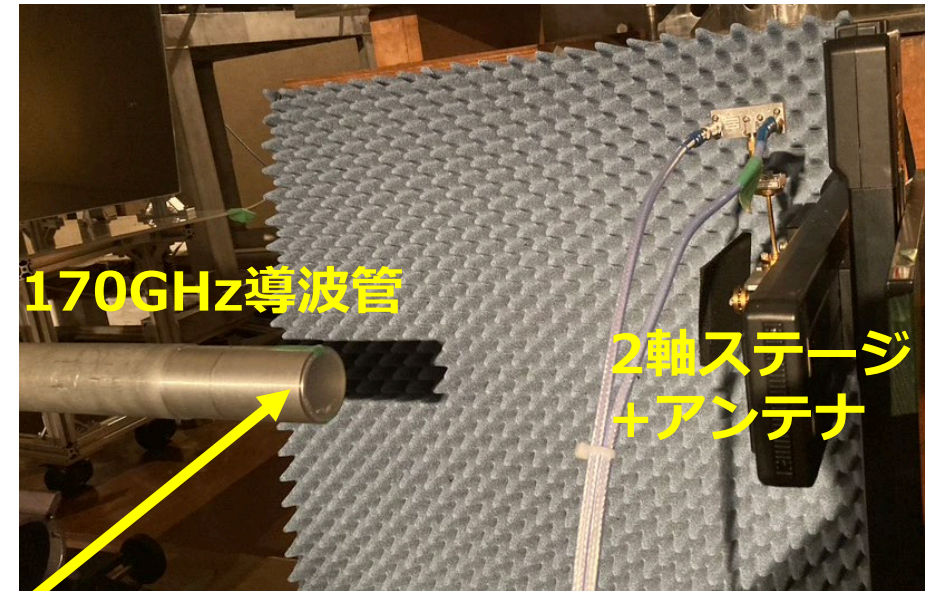
材料選定から試験完了まで、
下記のプロセスで管理・実施可能

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施

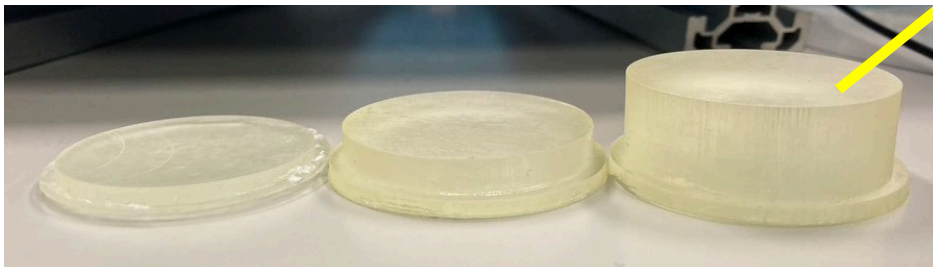


実施手順

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施

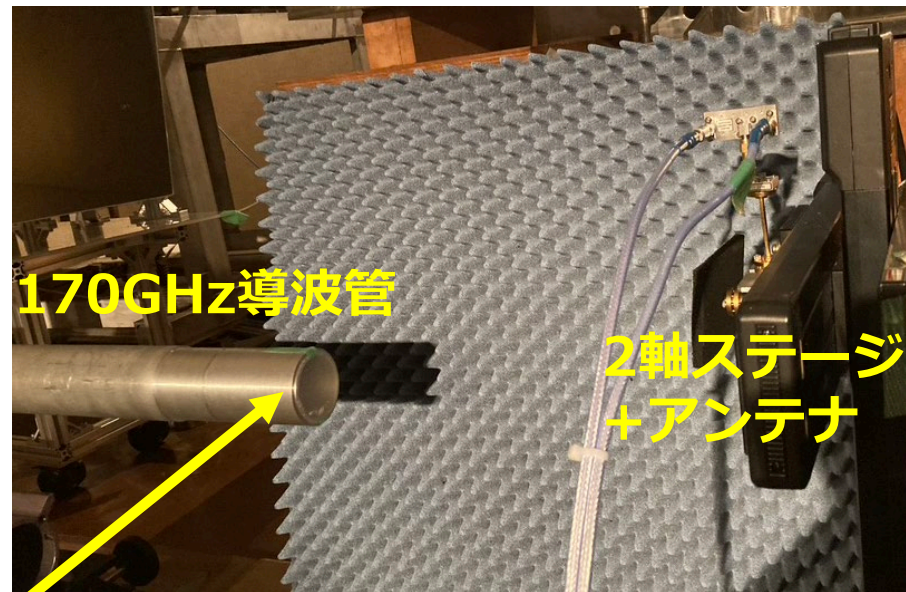


4 mm 10 mm 20 mm



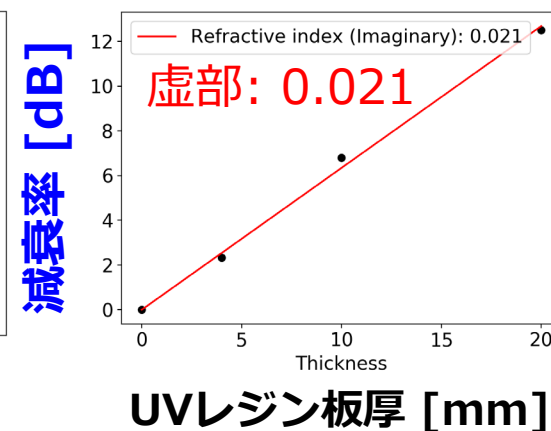
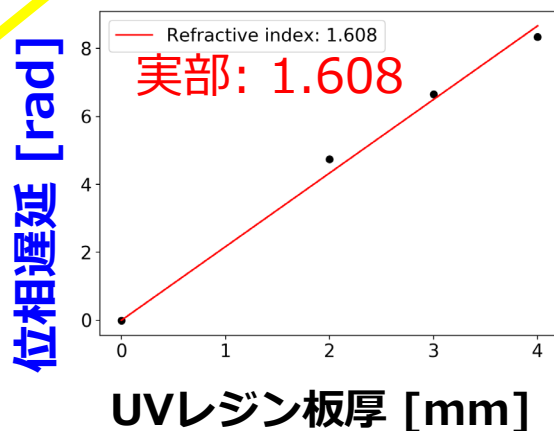
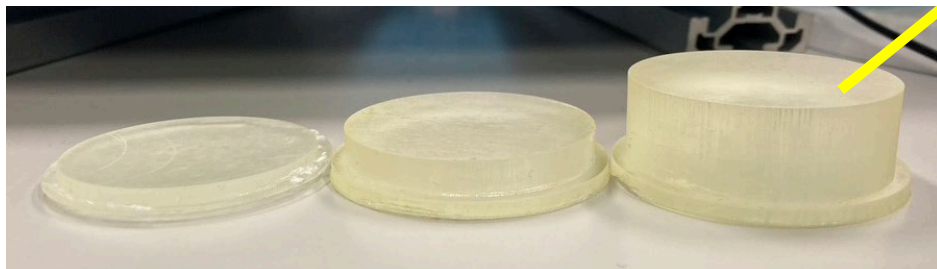
実施手順

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施



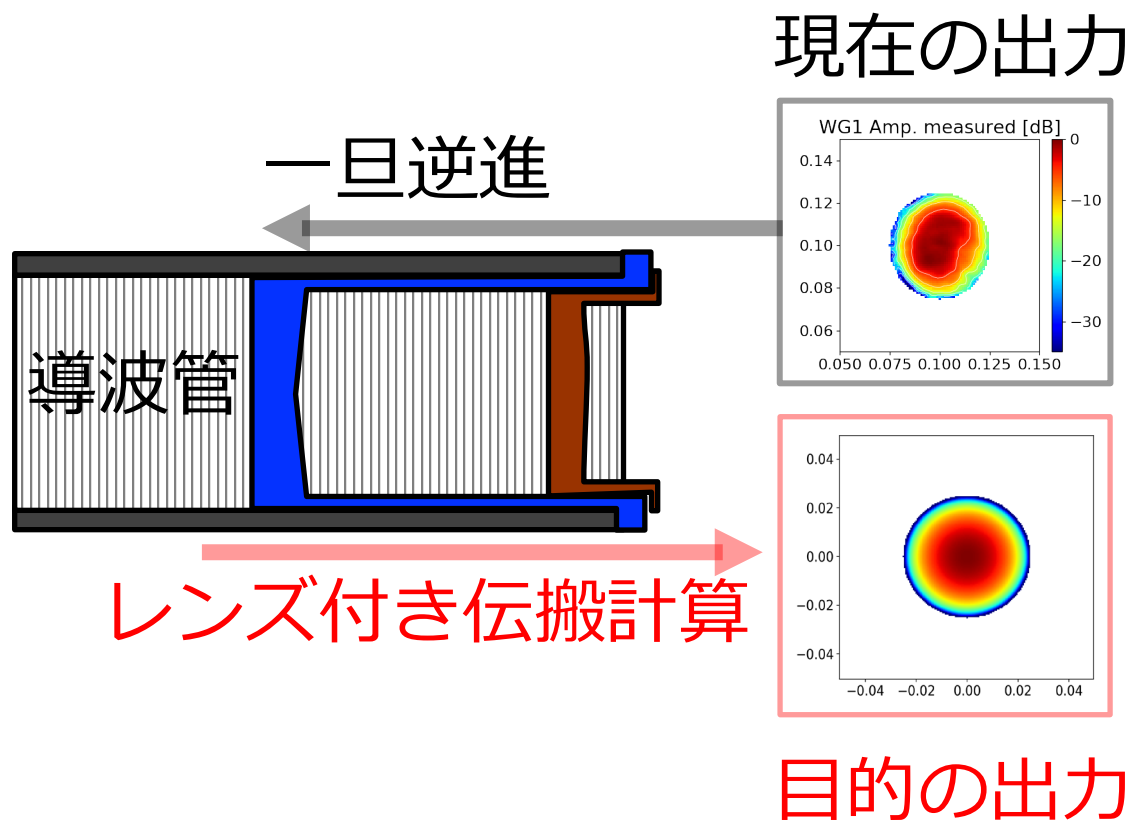
比例定数から複素屈折率を算出

4 mm 10 mm 20 mm



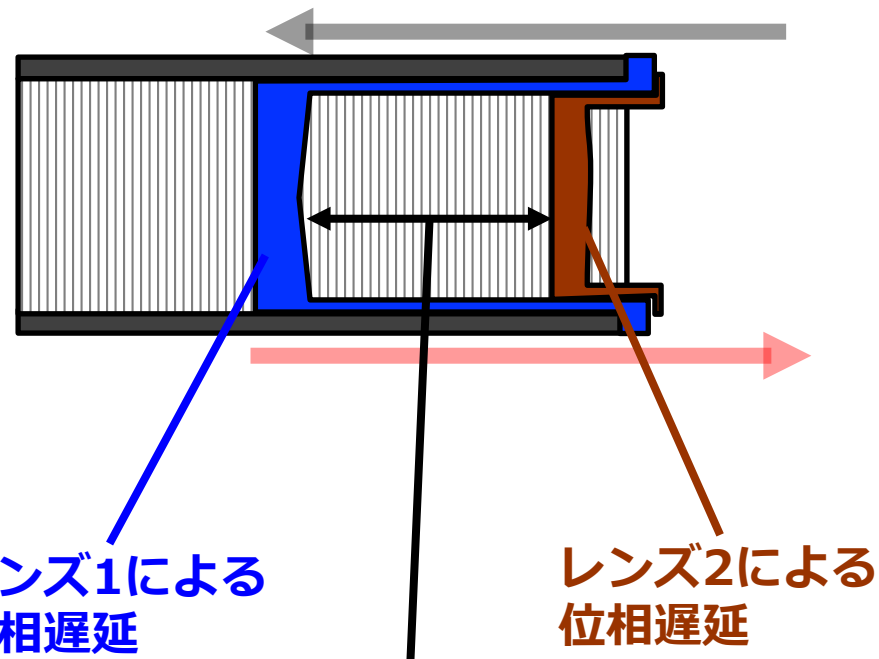
実施手順

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施



実施手順

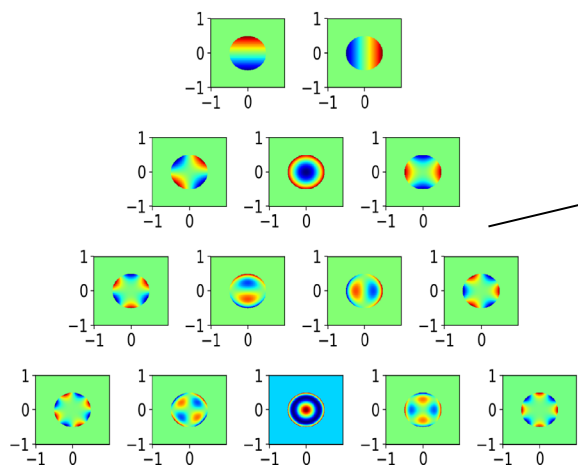
1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施



レンズ1による
位相遅延

レンズ2による
位相遅延

レンズ間のモード
ごとの位相変化



Zernike分布の
足し合わせでレンズを表現

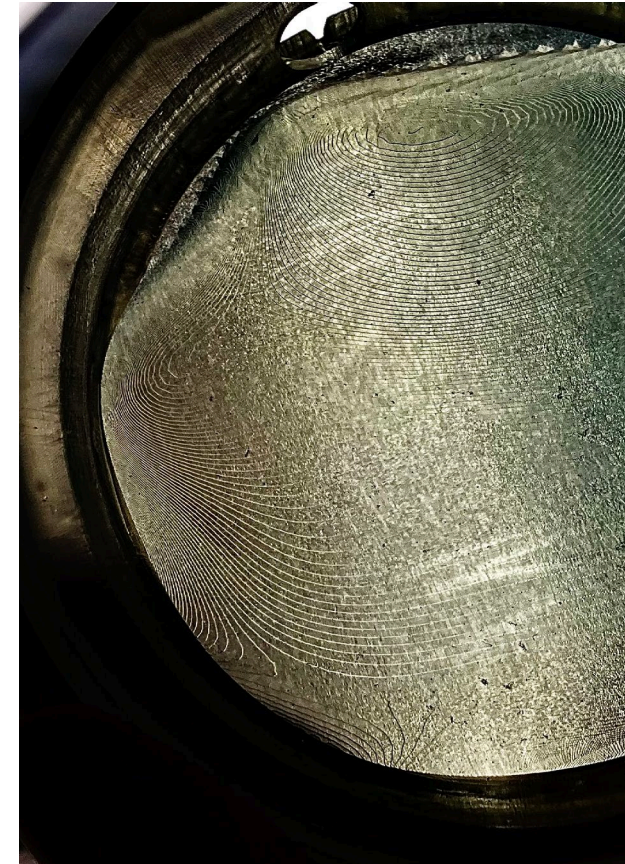
どのような重みで足し合わせるか？ →最適化を実施

実施手順

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施

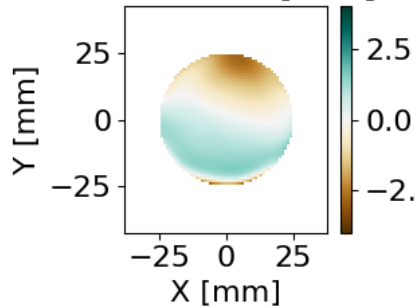


0.05mmステップの積層造形

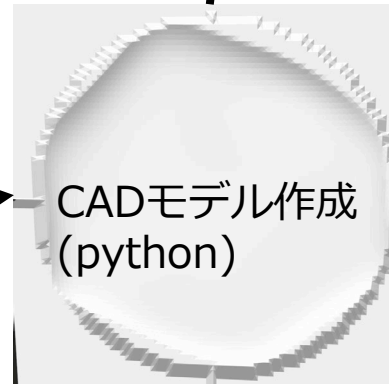
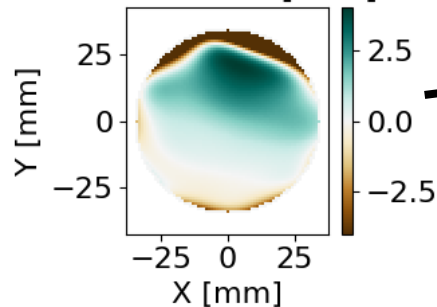


レンズ最適化結果

レンズ1形状



レンズ2形状



造形

実施手順

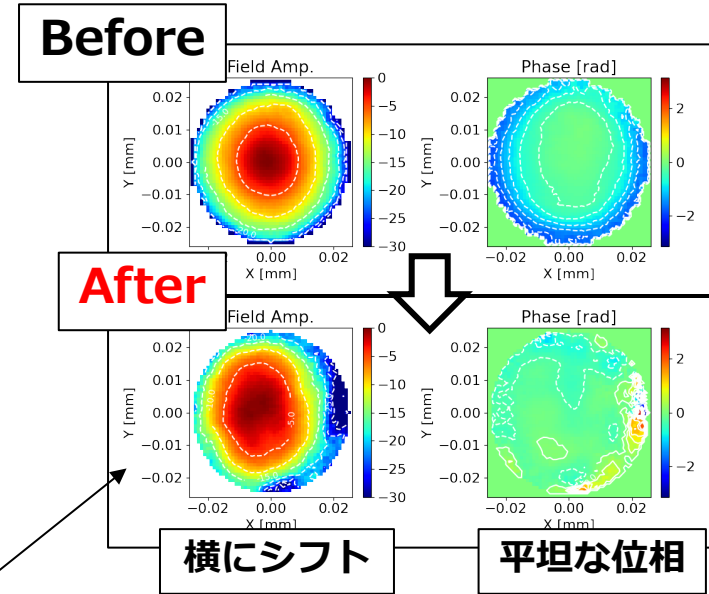
1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施

※ここではモード純度を90%に調整する実験をしています

実施手順

1. 材料特性を計測
 - 複素屈折率を計測
2. 特性を考慮して設計
3. レンズ造形
4. 試験・解析を実施

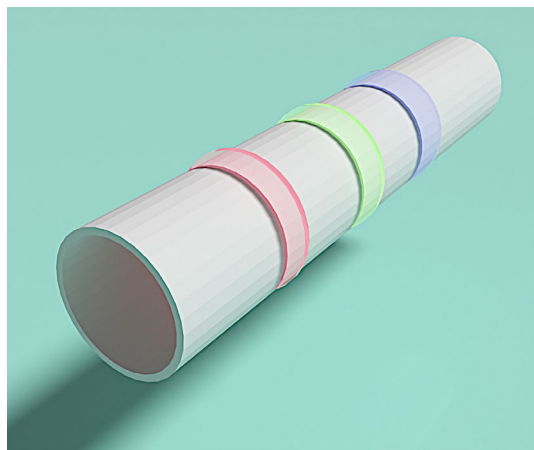
- ✓ 強度・位相分布の独立な調整効果を確認
- ✓ 複数の発振器および偏心方向に対して専用のレンズを作成し(7ケース)、基本モード LP_{01} と1次モード LP_{11} の比について、概ね90%:10%への調整を確認



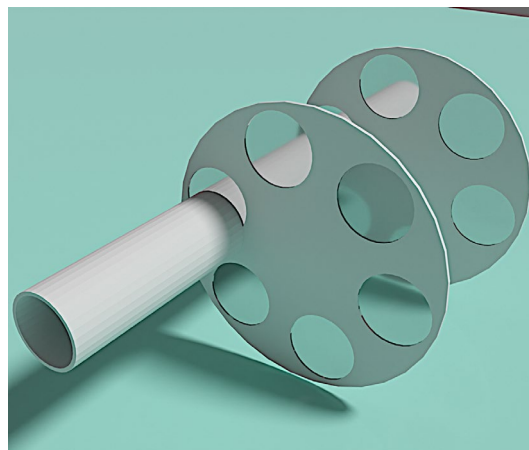
Case No.	LP01	LP11	LP02
#0	90.3	7.3	0.2
#1	87.8	8.7	0.7
#2	88.4	7.4	1
#3	86.6	10.2	0.9
#4	85	9.4	2.1
#5	84.7	10.4	0.7
#6	85.9	8.5	0.9

想定される用途

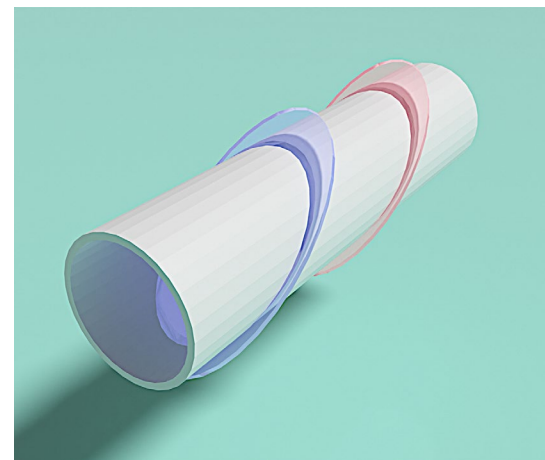
- 本技術は、100GHz帯導波路の途中及び送受信部に適用することで送受信の問題や効率の改善が見込める。
- 上記以外に、自由空間や光ファイバー等の誘電体導波路への適用も原理的に適用可能。
- またモード純度の定量的な制御に着目すると、モードの合成や混線の改善に応用することも可能と思われる。



スロット方式



リボルバー方式



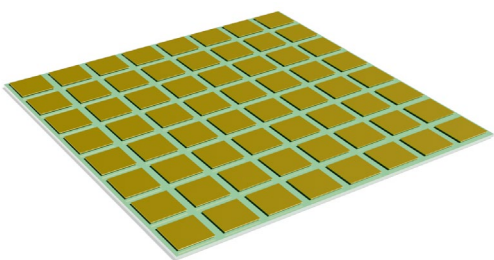
ブリュースター窓

想定される用途

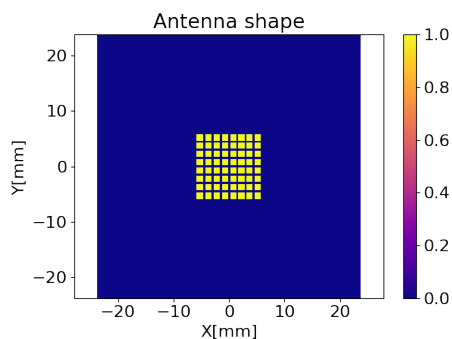
- フェーズドアレイアンテナの放射特性の補正

設計例: 拡がり角10度以内のパワーをできるだけ多くするレンズ

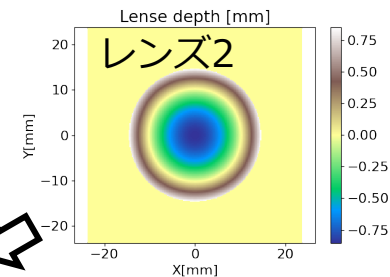
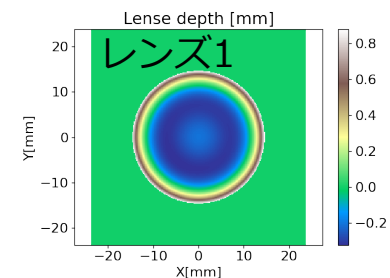
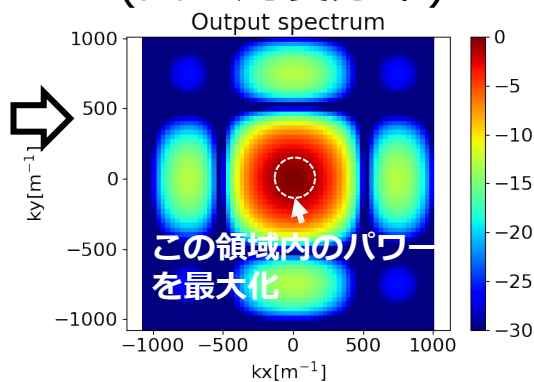
アンテナ形状例



出力例(垂直出力時)



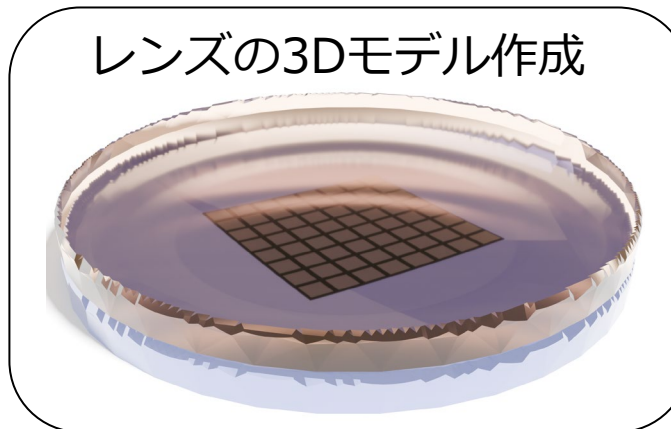
波数スペクトル[dB] レンズ設計結果(屈折率1.5)
(出力角度分布)



計算上の性能比較

自由度	拡がり角10度(0.15ラジアン)以内のパワー割合
レンズなし	59.99%
14 (Zernike1~4次)	70.35%

レンズの3Dモデル作成



曲率+僅かに四角い
レンズ形状が自動的に
選ばれた

実用化に向けた課題

- 現在、材料の誘電率計測及び設計・試験まで検証済。しかし、実際の通信インフラを考慮した問題設定の具体化が必須。
- 今後、通信インフラにおけるレンズの適用可能性について情報収集し、インターフェース設計のための問題設定を具体化したい。
- 実用化に向けて、多様な状況に適した設計方法の考案及び、幅広い誘電体の製作法を確立することも重要。

企業への期待

- 誘電体の製造手法については企業の意見・事例を吸収したい。
- 準光学系設計・製造もしくは無線通信の技術を持つ企業との共同研究を希望する。
- また、100GHz帯通信インフラを開発中の企業、電力伝送分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献

- 本技術は自由度の高いレンズ設計が可能であるが、問題設定を明確化することでより企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等
 - 計算手法の導入
 - 試験・解析方法の指導

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：レンズ装置、およびレンズ装置の製造方法
- 出願番号：特願2022-173743
- 出願人：QST
- 発明者：矢嶋 悟、梶原 健

お問い合わせ

量子科学技術研究開発機構（QST）

イノベーション戦略部 知的財産活用課

T E L 043-206-3027

e-mail chizai@qst.go.jp

紹介した技術につきまして、気になること
ご質問などございましたらお気軽にご相談ください