

2020/03/25 高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用

東大ジャイロトロンについて

○谷口知平¹⁾, 小紫公也¹⁾, 假家強²⁾, 今井剛²⁾,
南龍太郎²⁾, 小田靖久³⁾, 福成雅史⁴⁾, 坂本慶司⁵⁾

1) 東京大学大学院 工学系研究科

2) 筑波大学 プラズマ研究センター

3) 摂南大学 理工学部

4) 福井大学 遠赤外領域開発研究センター

5) 量子科学技術研究開発機構





1 背景

- マイクロ波ロケットによる打ち上げコストの削減
- 開発における課題とその解決策

2 東大におけるミリ波光源“ジャイロトロン”の開発

- ジャイロトロンのミリ波発振原理
- 東大ジャイロトロンの特徴

3 発振確認試験の準備

- パワー測定
- プロファイル測定

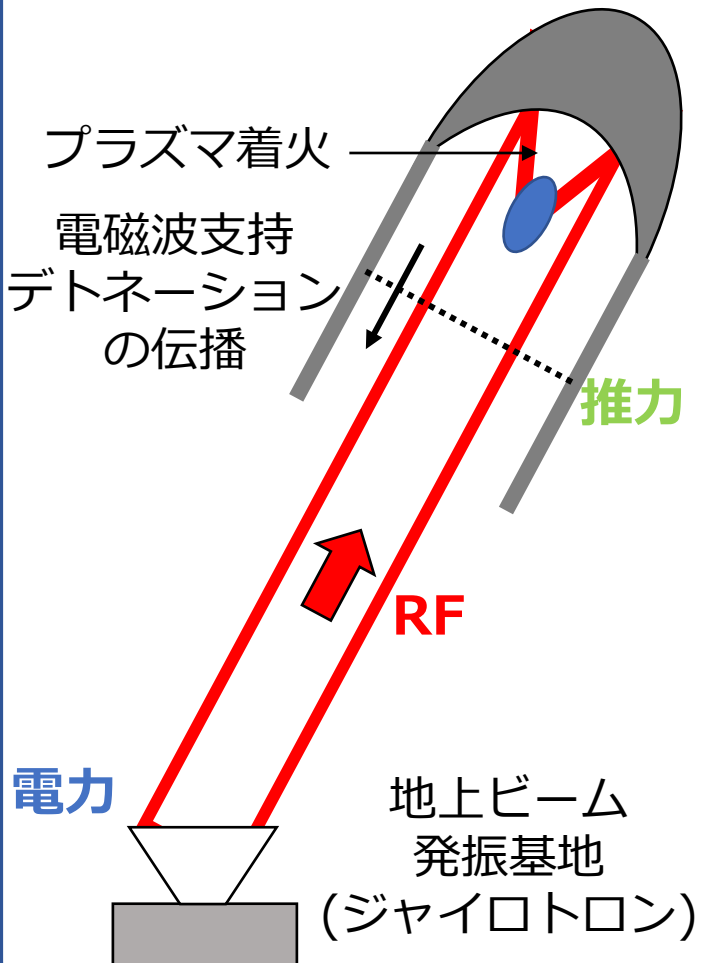
4 まとめ

マイクロ波ロケットによる打ち上げコスト削減

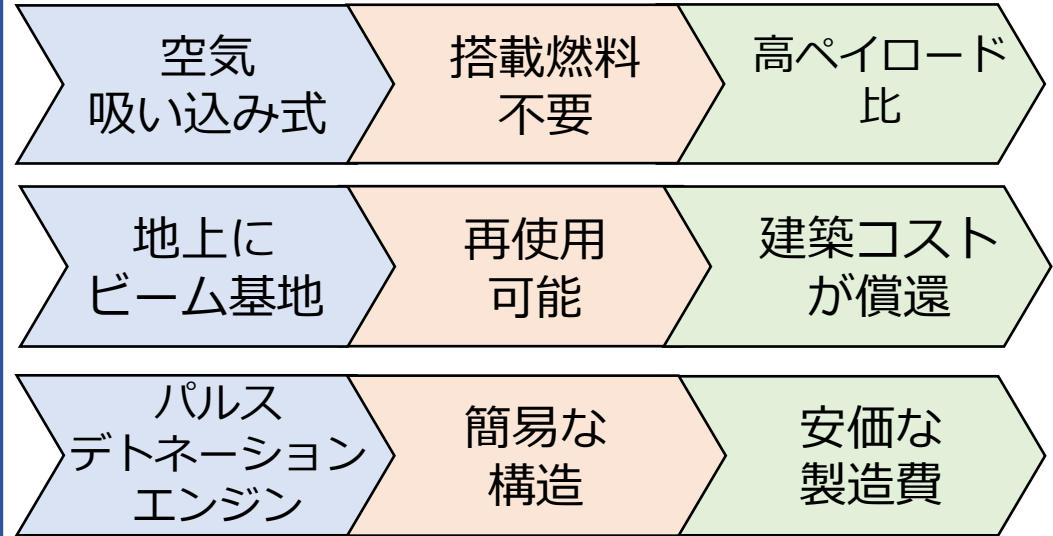


エネルギー変換方式

電力 → RF → 推力



マイクロ波ロケットの利点



打ち上げコストが現在の1/100に

問題点

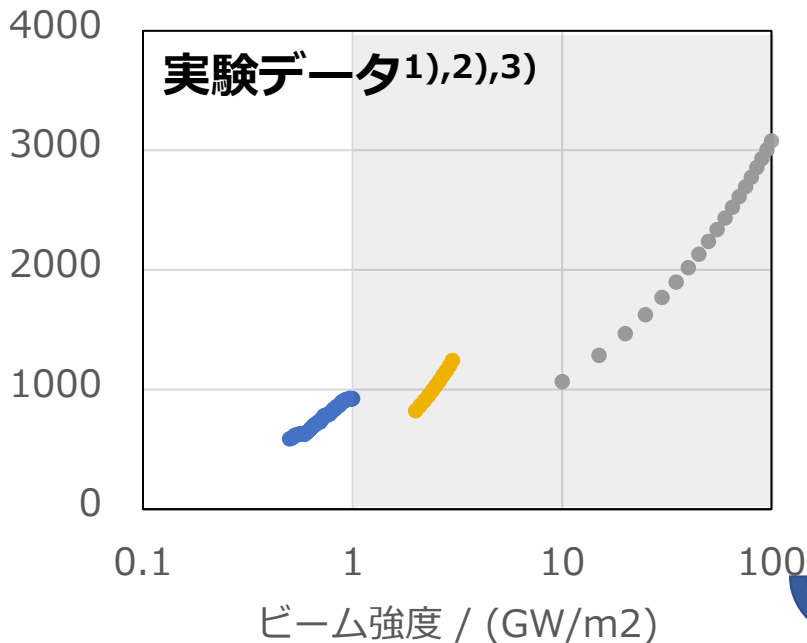
- GW級のビーム発振基地が必要
- ジャイロトロンの初期コストが莫大
- ➡ コンピュータシミュレーションによる打ち上げ試験が必要
- ➡ **推進性能を数値モデルにより再現したい**

推進性能はデトネーション伝播速度に依存

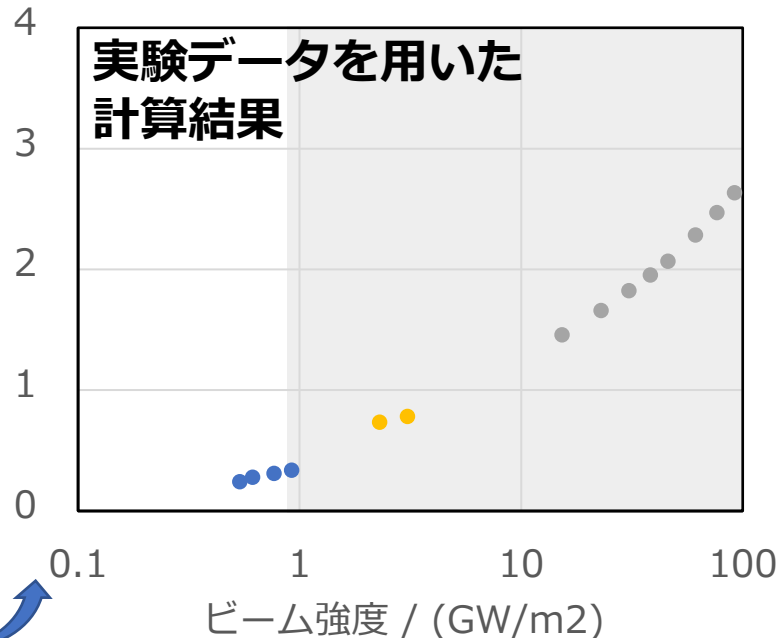


デトネーション伝播速度 / (m/s)

● 28GHz ● 170GHz ● 28THz



圧力上昇 / atm



推進性能を正確に再現するモデルを作るには、
デトネーション伝播速度を正確に再現するモデルが必要

デトネーションが起こるビーム強度条件(1 GW/m² より大)における
プラズマの実験データが必要

東大でのジャイロトロン開発

1) 田畑邦佳, その他4名, 第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米.
2) 小田靖久, その他4名, *J. Plasma Fusion Res.*, **83**, 3 (2007), pp. 296-299.
3) K. Matsui, et al., *Vacuum*, **136** (2016), pp. 171-176.

東大ジャイロトロンの設計変数の決定

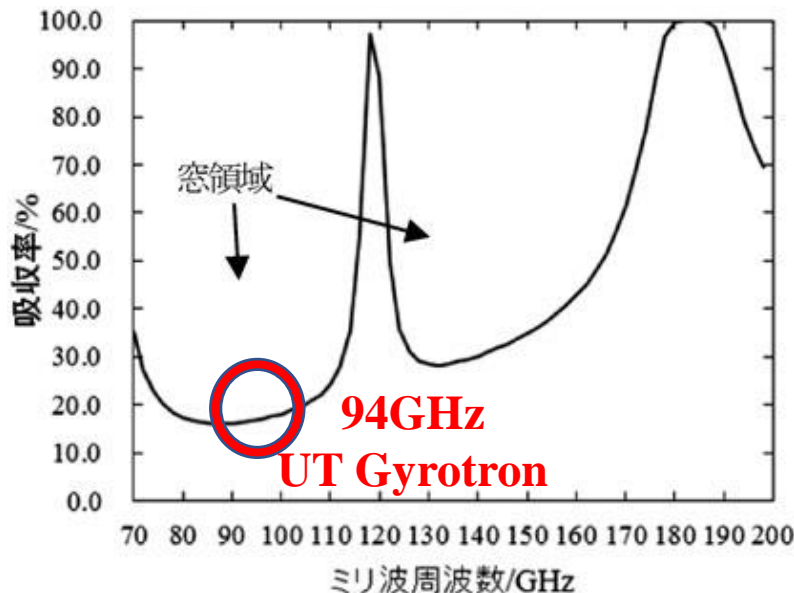


実験条件の比較

研究機関	MIT	QST	東京大学 (開発中)
周波数	110 GHz	170 GHz	94 GHz
ジャイロトロン出力	1.5 MW	600 kW	600 kW
パルス時間	3 μ s	1000 μ s	100 μ s
観測範囲	2~3波長程度	100 波長程度	10 波長程度を期待

なぜ設計変数をこのように選んだのか？

周波数の決定



94 GHzを選んだ理由

- 大気による減衰が少ない (左図)
- 直径10 mの送電アンテナで40 km伝送可能



ビーム推進に適する周波数の一つ

ビームパワーとパルス幅の決定



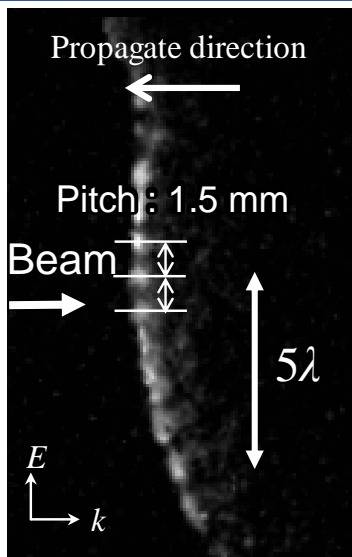
ビームパワーの決定

- 伝搬方向と垂直な方向に構造を観察するために10 波長程度が必要(30 mmの円形断面)
- デトネーション駆動するためにビーム中心で1 GW/m² のビーム強度が必要

↓
350 kW程度のビームパワーが必要

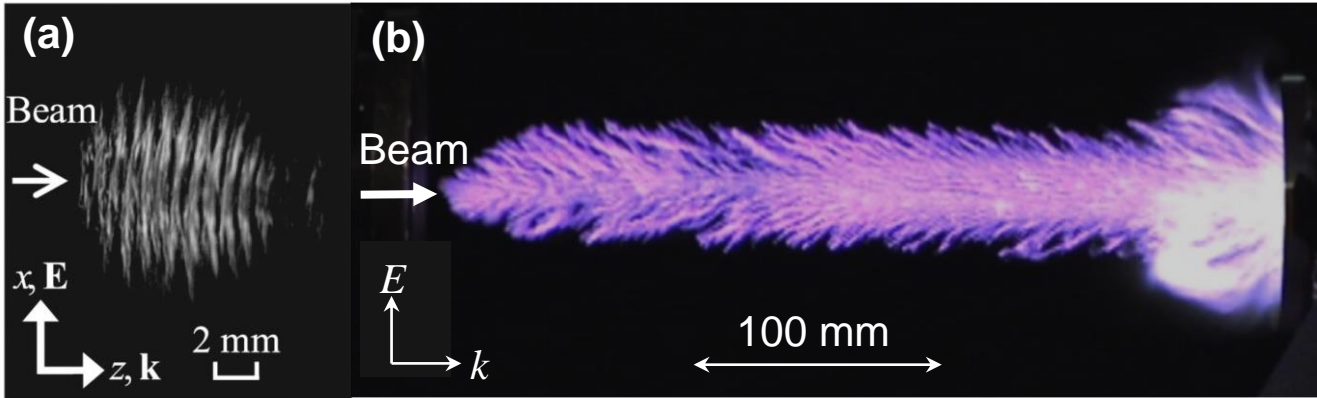
ミリ波放電の実験写真¹⁾

1) Yusuke Nakamura, et al., *Journal of Applied Physics* **124**, 033303 (2018)



パルス幅の決定

- 伝搬方向にも10波長程度(30 mm)測定したい
- ↓
- プラズマ伝搬速度を300 m/sとすると
パルス幅として100 μsが必要



ミリ波放電プラズマの構造

MITでの実験¹⁾ (a)とQSTでの実験²⁾ (b)

1) Y. Hidaka, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 035003 (2008).

2) Y. Oda, *Journal of Applied Physics*, **100**, 113307 (2006).

問題点のまとめと解決策



問題点

GW級のビーム発振基地が必要であり、
ジャイロトロン建設の初期コストが莫大なものになる。



コンピュータシミュレーションによる打ち上げ試験が必要



推進性能を正確に再現するモデルが必要
→デトネーション伝搬速度を正確に再現するモデルが必要



ミリ波プラズマの実験データを多く集める必要

解決策

東大で以下の諸元の新規ジャイロトロン開発

周波数	94 GHz
出力パワー	600 kW
パルス幅	100 μ s



1 背景

- マイクロ波ロケットによる打ち上げコストの削減
- 開発における課題とその解決策

2 東大におけるミリ波光源“ジャイロトロン”の開発

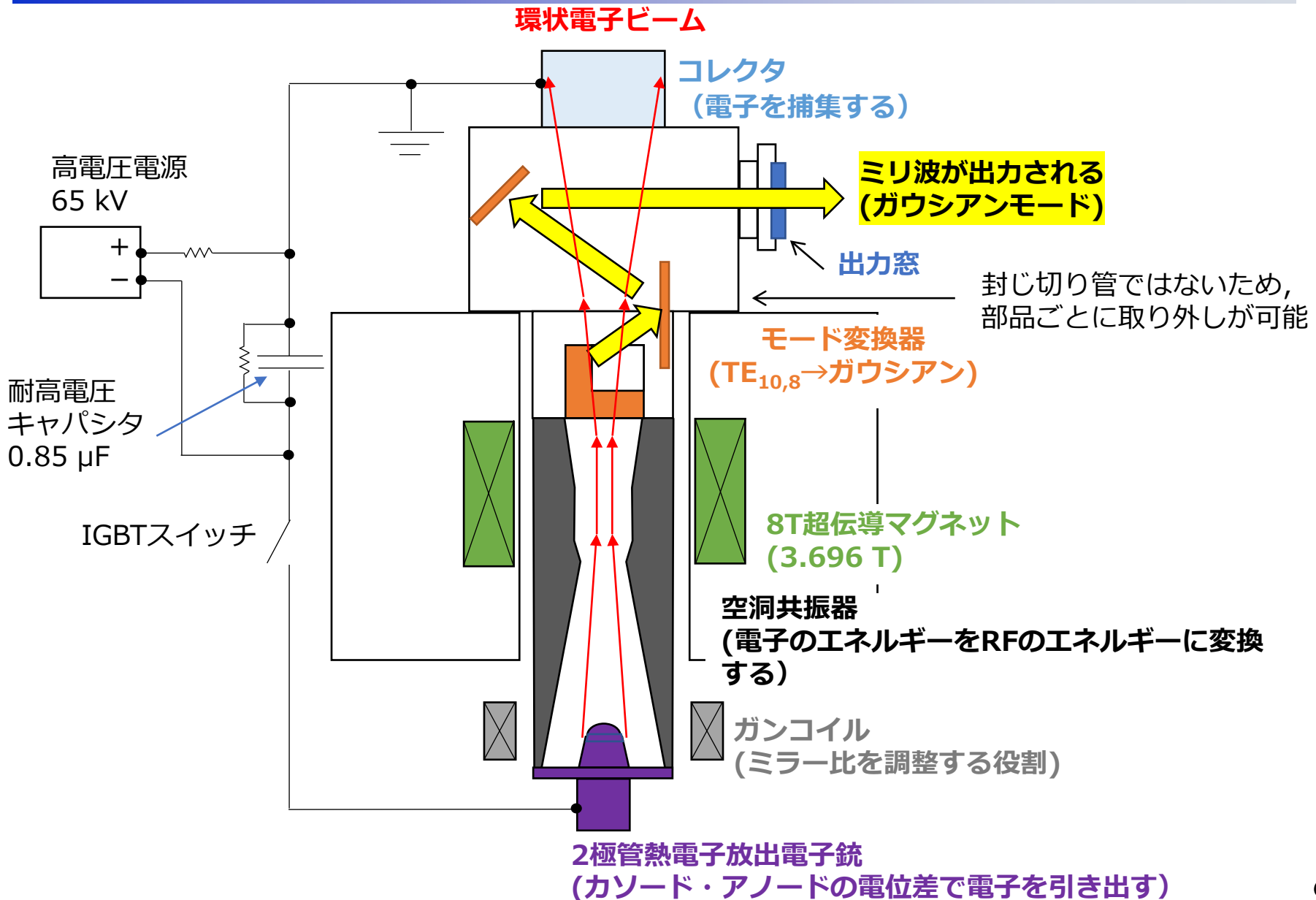
- ジャイロトロンのミリ波発振原理
- 東大ジャイロトロンの特徴

3 発振確認試験の準備

- パワー測定
- プロファイル測定

4 まとめ

東大ジャイロトロン内部構造



東大ジャイロトロン概要



東大ジャイロトロンの諸元

周波数	94 GHz
出力パワー	600 kW
パルス幅	100 μ s
変換効率	37 %
ビーム電流	25 A
共振器発振モード	TE _{10,8}
出力モード	ガウシアン
ビーム電圧	65 kV
キャパシタ容量	0.85 μ F
出力窓直径	60 mm
モード変換器	内蔵

目標とした設計値

出力として期待される値

こちらで設定する入力値



特徴① 低コスト・コンパクトな超伝導磁石



必要な磁束密度 B_0 は、用いる発振周波数 f_c を決めれば定まる; $f_c = \frac{eB_0}{2\pi\gamma m_e}$



磁束密度を変化させることで、200 GHz台まで出力可能
(空洞共振器などを設計し直せば)

8 Tの超伝導磁石	
磁束密度	周波数
3.358 T	94 GHz
8 T	223.9 GHz



ボア径が小さいほどコストを抑えられるため、ボア径の小さい超伝導磁石を購入

	QST	東大
ボア径	230 mm	100 mm



しかし、ボア径を小さくすると、デメリットも生じる

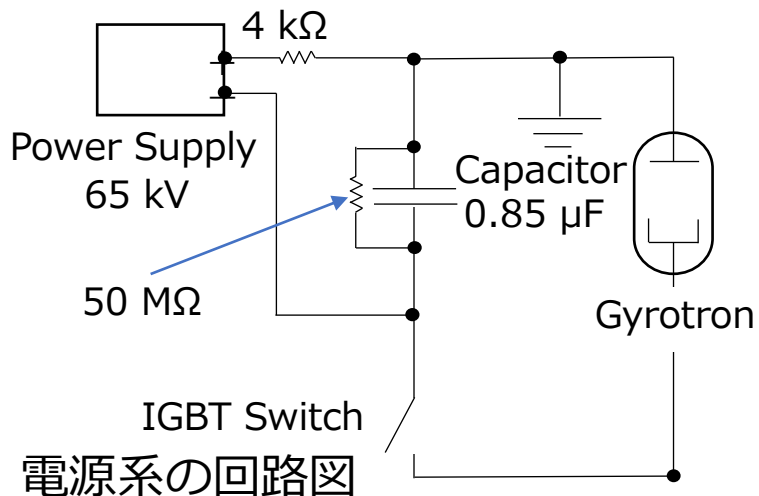
- ▶ ビーム電流を大きくすることが難しいため、ジャイロトロンの設計が難しい (詳細はAppendix1)

ジャイロトロン設計上の難しさ

	空洞共振器	モード変換器	電子ビーム径
サイズ	内径を大きくしたい	ミラー径を大きくしたい	大きい程、設計が容易
理由	電子ビームと干渉しないため	全エネルギーを伝送させるため	電子ビームの軌道が当たらないよう設計するため

特徴② 立ち上がりが速くビーム電圧降下が小さいパルス

電圧降下が小さい



コンデンサで充電されるエネルギー

$$\frac{1}{2} CV^2 = 1.8 \text{ kJ}$$

単パルスに必要なエネルギー

$$VI\Delta t = 162.5 \text{ J}$$

単パルス前電圧

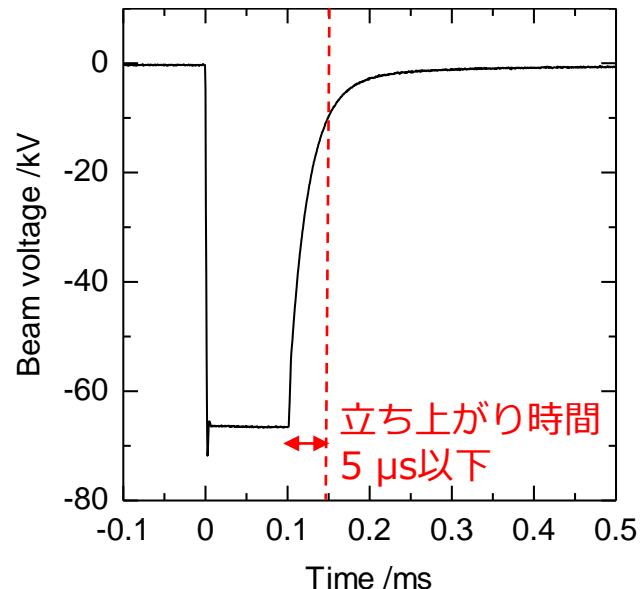
65 kV

単パルス後電圧

61.99 kV

- 0.85 μFのコンデンサを使うことで、**ビーム電圧降下4.6 %を実現**

立ち上がり時間が短い



ダミー抵抗を用いて測定した
単パルスビーム電圧の時間変化

- 電源系に高速スイッチング性能に優れるIGBTスイッチを用いている
- 65 kVもの高電圧に耐えるために直列に50個接続



立ち上がり時間：5 μs以下を実現



1 背景

- マイクロ波ロケットによる打ち上げコストの削減
- 開発における課題とその解決策

2 東大におけるミリ波光源“ジャイロトロン”の開発

- ジャイロトロンのミリ波発振原理
- 東大ジャイロトロンの特徴

3 発振確認試験の準備

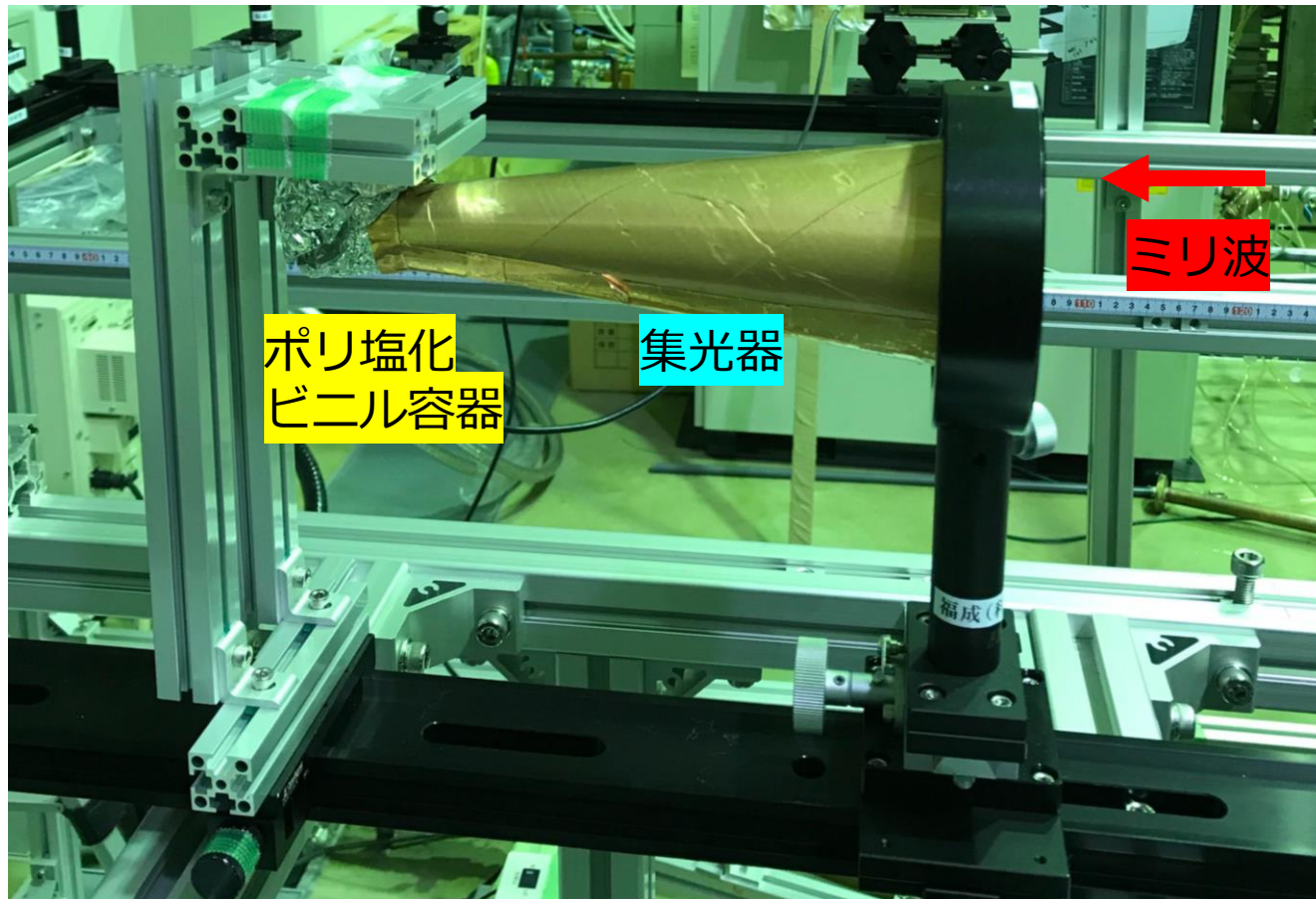
- パワー測定
- プロファイル測定

4 まとめ

パワー測定① 水負荷系



福井大学での実験の様子



- ポリ塩化ビニルの周りをアルミホイルで覆う
→ミリ波は容器内の水に完全に吸収される
- ミリ波照射の後，素早く容器内をかき混ぜ，温度上昇値を測定する
- 詳細な内容はAppendix2

パワー測定①

水負荷系 実験結果及び考察



ジャイロトローンの発振条件

条件	パルス数	パワー	パルス幅	投入エネルギー
Case.1	5	1.2 kW	10 ms	60 J
Case.2	1	1.2 kW	10 ms	12 J

温度上昇の実験結果

条件	水質量	ミリ波入射前	入射後	ΔT	測定 Power	実際の Power
Case.1	10 g	21.1 °C	22.5 °C	1.6 °C	1.35± 0.15 kW	1.2 kW
Case.2	5 g	22.4 °C	23.0 °C	0.6 °C	1.27± 0.36 kW	1.2 kW

誤差の評価

$$mC_p\Delta T = 10\sim 60 J$$

m :水の質量→水の測定誤差(0.5 g程度)

C_p :比熱

ΔT :温度上昇値→温度計の温度分解能(0.1 K)



水の質量が小さいほど、
誤差は大きくなる

パワー測定② Pyro検出器 + 増幅回路



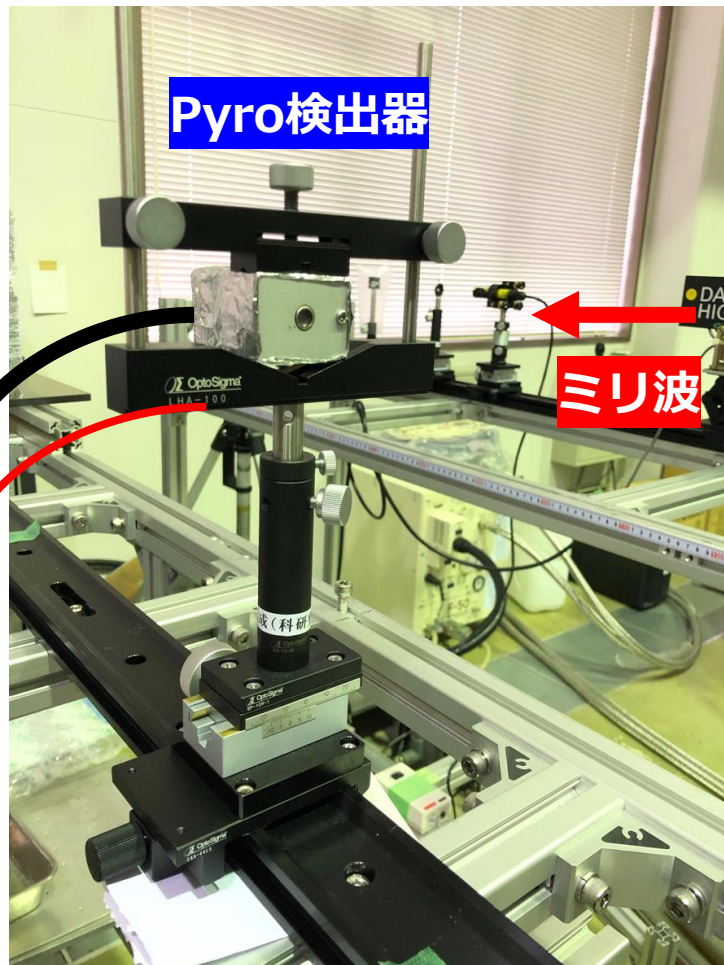
オシロスコープ
検出可能電圧: $-3 \sim 8 \text{ V}$

BNC

増幅回路
増幅率: $2 \sim 100,001$ 倍
詳細はAppendix3

BNC

電流
nA オーダー

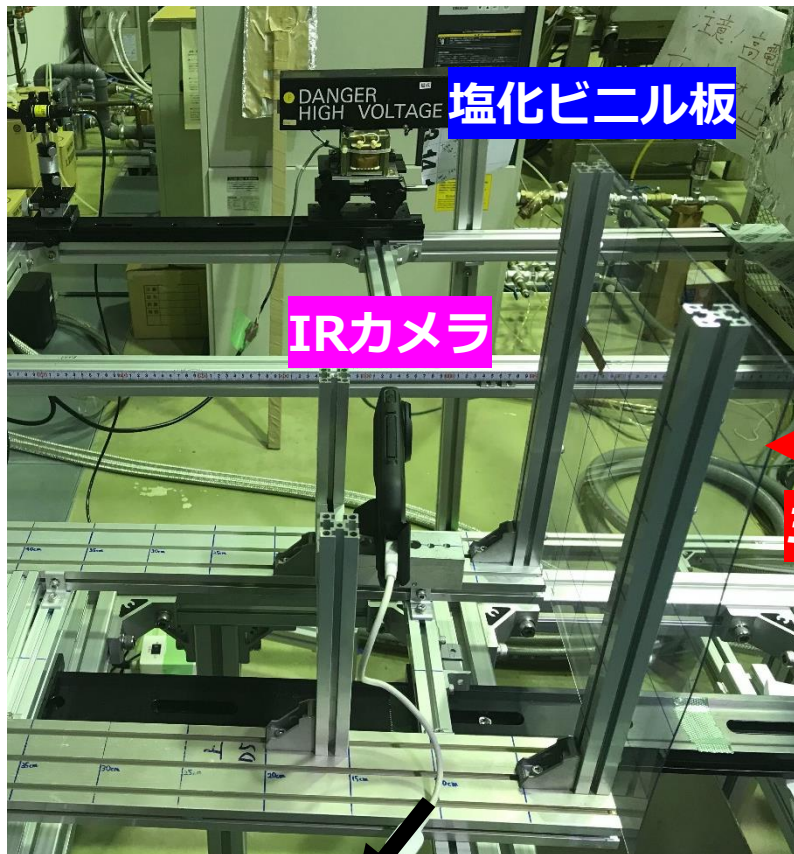


例)

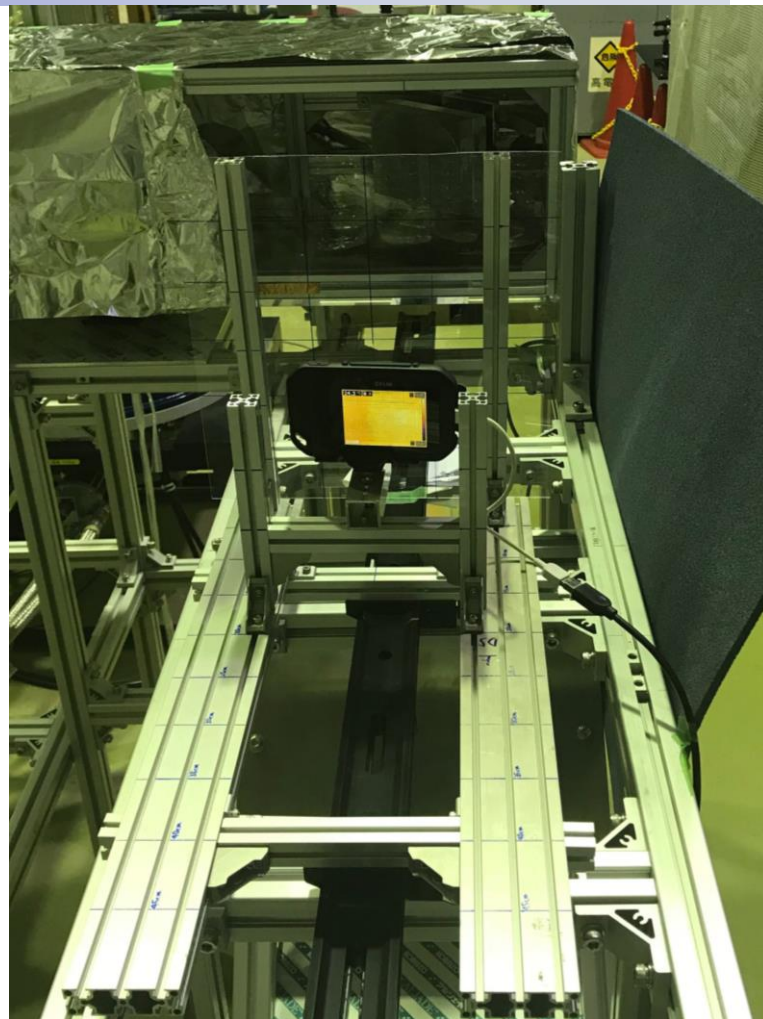
条件	投入エネルギー 60 J	投入エネルギー 10 J
水負荷試験	$60 \pm 6 \text{ J}$	$10 \pm 3 \text{ J}$
Pyro検出器	6 V	1 V

Pyro検出器の結果を基に、
10 Jの時の水負荷の結果
は $10 \pm 1 \text{ J}$ と考えることが
出来る

ビームプロファイル測定



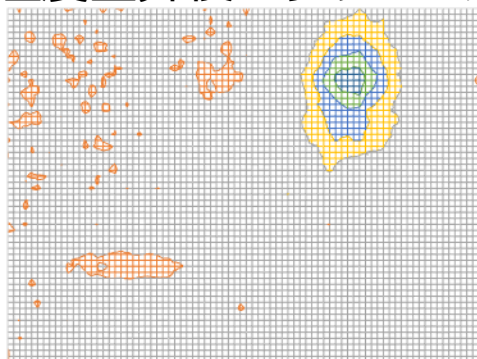
PC



- 塩ビ板の温度上昇をIRカメラにより取得することでビームプロファイルを測定
- ビームプロファイルからビーム中心・ビーム径を導出
- ビーム径はビーム強度を求めるために必要
- 詳細はAppendix4

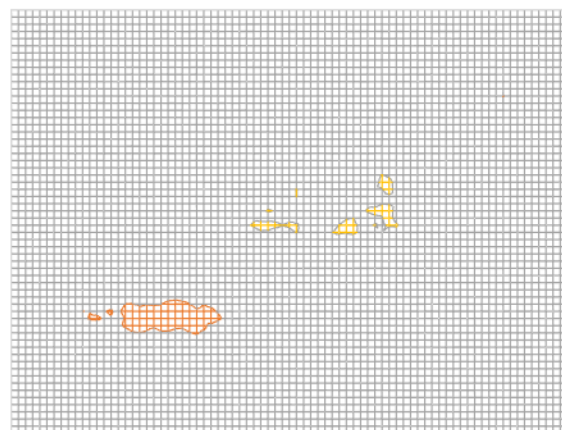


①温度上昇後のフレームデータ



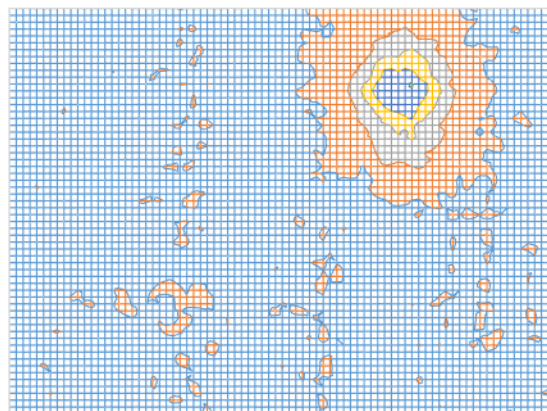
□ 21-22 □ 22-23 □ 23-24 □ 24-25
□ 25-26 □ 26-27 □ 27-28 (温度 K)

②温度上昇前のフレームデータ



□ 21-22 □ 22-23 □ 23-24 □ 24-25

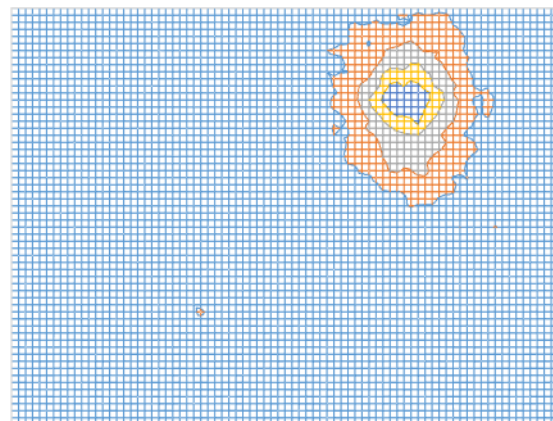
①ー②のデータ



ノイズの処理



完成データ



□ -1-0 □ 0-1 □ 1-2 □ 2-3 □ 3-4 □ 4-5

□ -1-0 □ 0-1 □ 1-2 □ 2-3 □ 3-4



1 背景

- マイクロ波ロケットによる打ち上げコストの削減
- 開発における課題とその解決策

2 東大におけるミリ波光源“ジャイロトロン”の開発

- ジャイロトロンのミリ波発振原理
- 東大ジャイロトロンの特徴

3 発振確認試験の準備

- パワー測定
- プロファイル測定

4 まとめ



1 将来のコンピュータシュミレーションによる打ち上げ実験が必要

→ ミリ波プラズマの実験データが必要

→ 東大においてジャイロトロンを開発した

2 開発した東大ジャイロトロンの特徴

1. 低コスト・コンパクトである
2. 立ち上がり時間が短い矩形パルスを繰り返し出力できる

東大ジャイロトロンの主要諸元

周波数	94 GHz
出力パワー	600 kW
パルス幅	100 μ s

Appendix



Appendix1

超伝導磁石のコスト/空間電荷制限則



8 Tの超伝導磁石を安く購入するには

中心磁場を大きくするには

- コイルの巻き数密度を大きくする・・・コストが上がる
- コイルに流れる電流を大きくする・・・コストが上がる
- ボア径を小さくする・・・ジャイロトロン設計が難しくなる
(今回採用した方式)

→ボア径が小さいほどコストを抑えられる

(コストがかかる超伝導磁石の材料が少なくて済むから)

ボア径が小さいと流せるビーム電流も制限がかかる

空間電荷制限電流は以下の式で表される

Child-Langmuirの式

$$j = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_0^{\frac{3}{2}}}{l^2}$$

j : 空間電荷制限電流密度 $\left[\frac{A}{m^2} \right]$

V_0 : カソード・アノード間電圧 [V]

l : カソード・アノード間距離 [m]

ジャイロトロン内径= D として

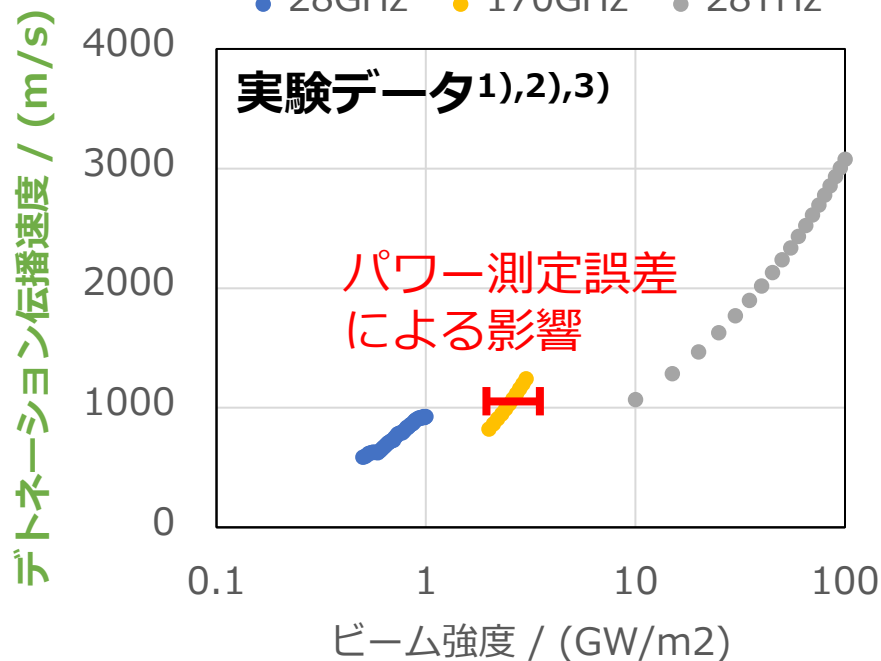
$$j \times \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = J [A]$$

で最大ビーム電流 J が決まるが、ボア径が小さいとジャイロトロン内径 D も小さくなるため、最大ビーム電流も小さくなる

Appendix2 水負荷における誤差評価



- どれくらいまで誤差を許容できるか？
 - パワーの正確な評価は，ビーム強度の正確な評価につながるため重要
 - ビーム強度とデトネーション伝搬速度の関係性を正確に求めるためにも，誤差は5 %以下が望ましい



$$mC_p\Delta T = 10\sim 60 J$$

m :水の測定誤差(0.5 g程度)

大気で絶縁破壊しないという条件により集光にも限界がある
水は5 gが下限値

C_p :比熱

ΔT :温度計の温度分解能(0.01 K)

条件	水質量	ΔT	投入エネルギー
Case.2	5 g	0.6 °C	12 J
誤差	10 %	1.6 %	18 %

誤差5 %以下を達成するには
水を0.1 g精度で測る必要がある

1) 田畑邦佳, その他4名, 第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米.

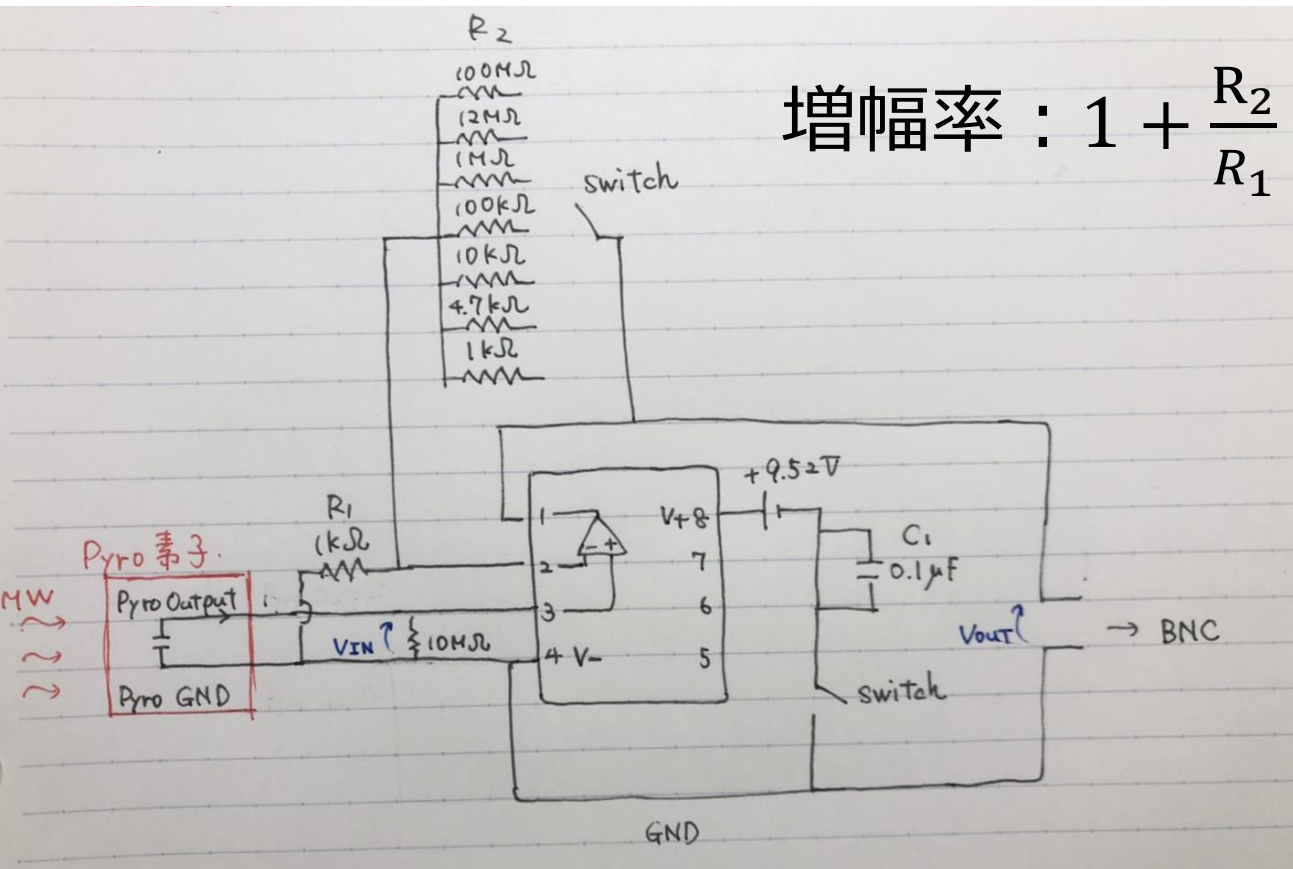
2) 小田靖久, その他4名, *J. Plasma Fusion Res.*, **83**, 3 (2007), pp. 296-299.

3) K. Matsui, et al., *Vacuum*, **136** (2016), pp. 171-176.

Appendix3 パワー測定② 非反転増幅回路の作成



$$\text{増幅率} : 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



用いる抵抗	増幅率
1 kΩ	2倍
4.7 kΩ	5.7倍
10 kΩ	11倍
100 kΩ	101倍
1 MΩ	1001倍
12 MΩ	12001倍
100 MΩ	100001倍

- 2~100001倍までの増幅率を取ることができるため、幅広い入力パワーに対応できる。
- C_1 はバイパスコンデンサと呼ばれる。バイパスコンデンサは電源電圧(9.52V)を安定に保つために用いている。なお、電源には、乾電池を用いている。
- V_{out} の電圧を、BNCケーブルを通してオシロスコープで読み取ることで、電圧を測定する。

Appendix4 ビームプロファイル測定結果



② ノイズ処理方法

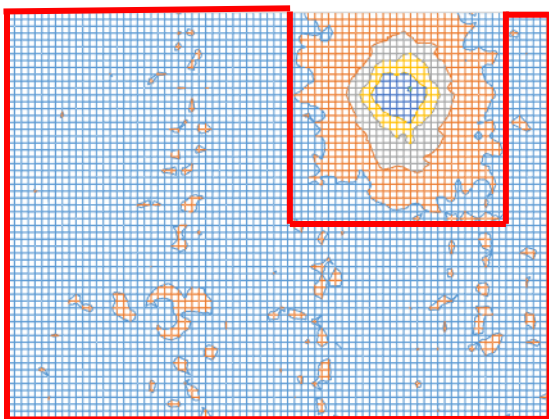
- ノイズが入ったままビーム中心・ビーム径を導出すると、値がずれる
→ビームプロファイル以外のノイズは除きたい

ノイズ処理の難しさ

- どこまでをノイズとみなすか
ビームプロファイルの境界を厳密に見分けられず、恣意的な境界設定になる

現状の処理方法

ノイズの中で最大であるノイズ成分を全体のデータから引くことでノイズを除去



恣意的にビームプロファイルとみなせる境界を設定して、それ以外の領域で最大となるノイズを求める

問題点

ビーム中心に関しては問題なく評価できているが、ビーム径を過小評価している可能性がある

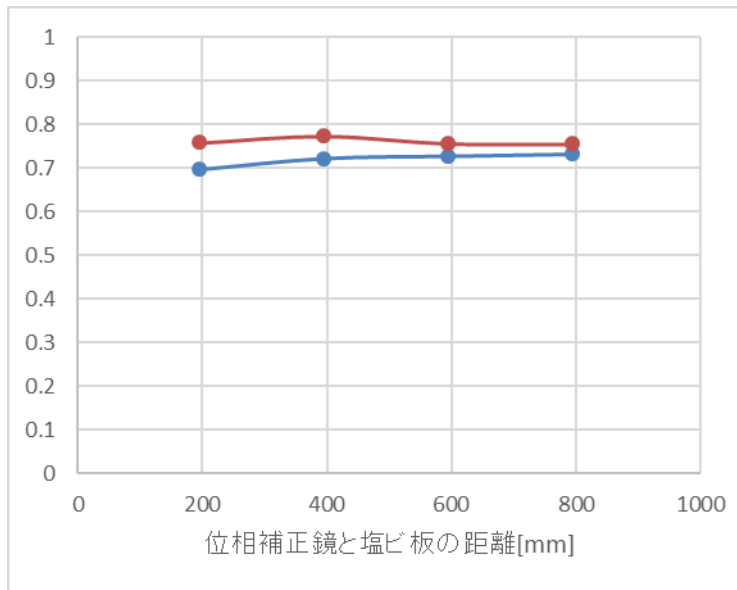
□ -1-0 □ 0-1 □ 1-2 □ 2-3 □ 3-4 □ 4-5

Appendix4 ビームプロファイル測定結果

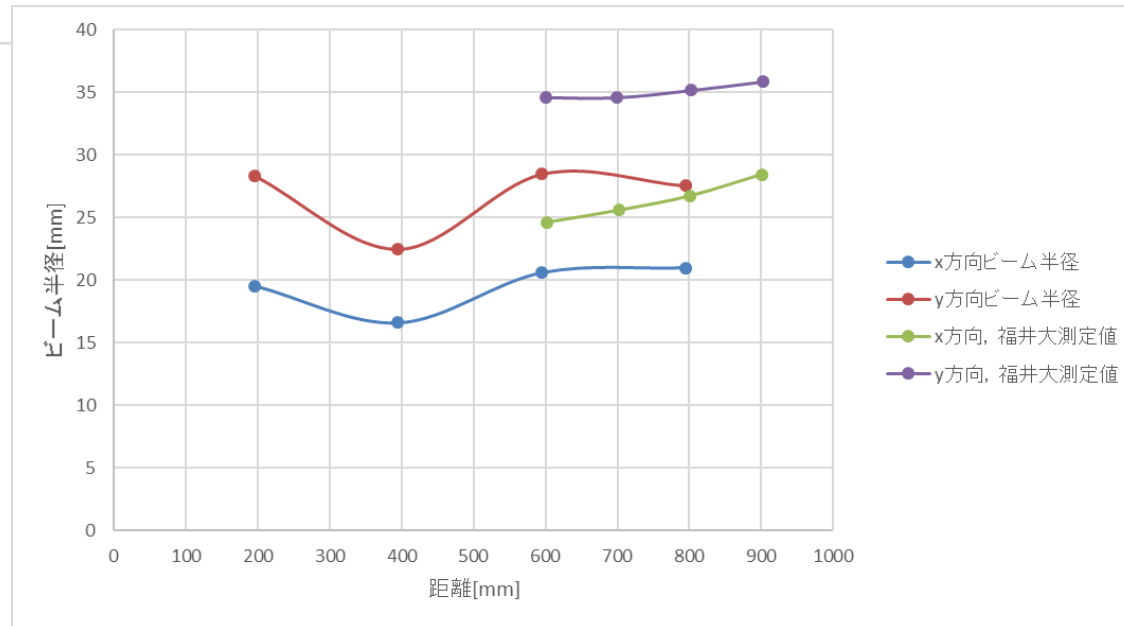
③ビーム中心とビーム径の導出



- ビーム伝送距離を変化させてビームプロファイルを取得した
- プロファイルデータを基にビーム中心とビーム径を導出
(詳細な導出過程はAppendix 3)



ビーム中心



ビーム径 (福井大の測定系で測ったものと比較)

- ビーム中心に関しては、伝送距離によらずあまり変わらない
- ビーム径に関しては、福井大学の測定系での結果と東大の測定系での結果を比較したところ、東大のほうがビーム径が小さい結果となった

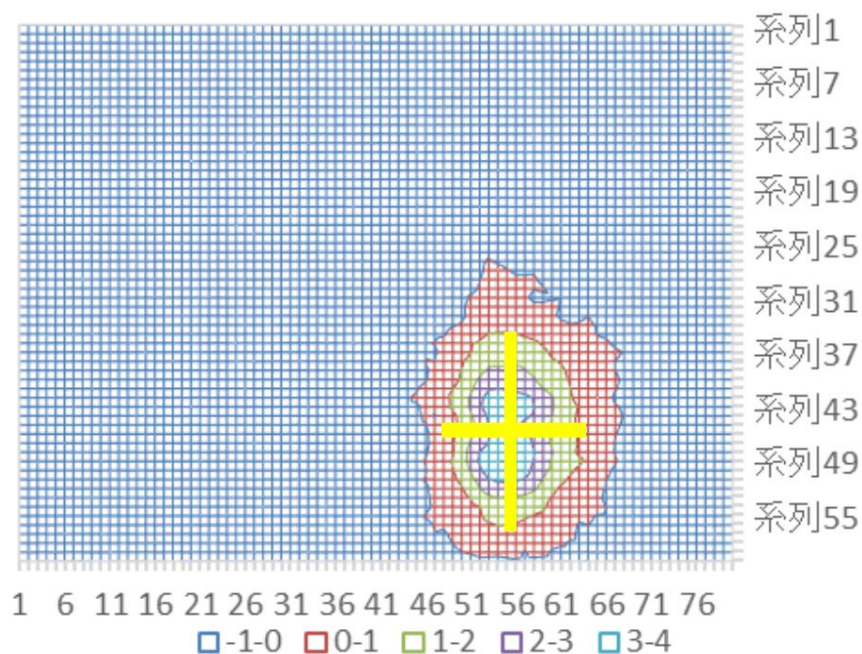
Appendix4 ビームプロファイル測定結果



④ 考察

- あるデータにおけるビーム中心・ビーム径の結果をプロファイルデータに記入したものを以下に示す

Data1_195 mm



- ビーム中心・ビーム径の傾向は捉えられている
→ ノイズ処理後のビーム中心・ビーム径の導出計算は合っていると考えられる
- 相違の原因として、ノイズ処理の際にビーム径を小さく評価してしまったことが考えられる

Pictures

