

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05131

研究課題名（和文）次世代リング型光源に向けた革新的な常伝導高調波空洞の開発

研究課題名（英文）Development of normal conducting harmonic cavity for diffraction-limited light source

研究代表者

山本 尚人（Yamamoto, Naoto）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：60377918

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：有限要素法を用いた電磁界シミュレーション及び熱構造解析計算により、常伝導寄生モード減衰型1.5GHz-TM020高調波空洞を設計した。本設計の高調波空洞はKEK-LSのような電子エネルギー3 GeVクラスの極低エミッタリングで十分に利用可能な性能を備えていることを粒子トラッキングによる数値計算にて確認した。

また、設計に基づきアルミニウム合金を用いて低電力モデル空洞を製作し、機械構造的にも本空洞が製作可能なこと、電磁界シミュレーションで予測された高周波性能を備えていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果により、運用性及びメンテナンス性に優れた常伝導方式の高調波空洞の実現可能性が大いに高まった。常伝導方式でも超伝導方式に迫る性能を有する高調波空洞の実現は放射光源加速器分野の高調波空洞に関する常識を覆すことになり学術的意義が大きい。さらに、研究を進め実際の放射光リングにて安定なバンチ伸張運転をデモンストレーションできれば、世界中の既存施設においても高調波空洞の導入が一気に進むと思われる。

研究成果の概要（英文）：Based on the results of 3D electro-magnetic simulation and structural/thermal analysis, a parasitic-mode damped cavity having a TM020-mode resonance frequency around 1.5 GHz was successfully designed. This cavity can be applied for the diffraction limited light source with the beam energy of 3 GeV.

In addition, a low-power cavity model dedicated for electro-magnetic measurements was also manufactured, and it was confirmed that the cavity performances expected from 3D electro-magnetic simulation could be reproduced.

研究分野：蓄積リング型加速器

キーワード：高周波空洞 放射光源加速器 ビーム物理

1. 研究開始当初の背景

次世代放射光リングでは電子バンチの水平・垂直サイズを極端に小さくすることで回折限界に迫る光の生成を目指す。このため、コストパフォーマンスに優れた3GeVクラスのリングではバンチ内電子散乱によるエミッタンス増大やタウシェック散乱によるビーム寿命低下を克服することが大きな課題となっている。これら課題を本質的に解決しラティス設計で決まる極低エミッタンスを実現するために必要不可欠な手段が、高調波空洞の導入によるバンチ伸張の実現である。

高調波空洞に関する先行研究では、イオントラッピングを避けるため電子ビームの蓄積パターンに電子バンチの無いスペース(バンチギャップ)を設けた際、空洞内のビーム負荷が変動し結果的にバンチの並び順に応じてバンチ伸張率や進行方向のバンチ形状が変化することが指摘されている[引用文献]。この問題を低減するための対策がQ値の高い超伝導高調波空洞の採用であり、現在の主流となっている。一方で超伝導空洞は極低温での運転が必須となるため、設備及び運転にかかるコストが非常に大きいという問題がある。

このような背景の中、申請者らは国内外の加速器で最も普及している500MHz帯の光源加速器で応用可能なTM020モード1.5GHz常伝導高調波空洞を用いてバンチ伸張システムを実現することを提案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、実際の加速器への適用を前提とした熱・機械構造を有する1.5GHz-TM020常伝導高調波空洞を設計すること、さらにこの高調波空洞が次世代放射光リングに用いるのに十分な性能を有していることを実証することであった。

3. 研究の方法

本研究は以下の3段階にて実施した。

- (1) 電磁界シミュレーションによる1.5GHz常伝導高次モード減衰型高調波空洞の最適化
- (2) 実際の使用環境を考慮した発熱・大気圧による変形を考慮した機械構造設計の実現
- (3) 低電力モデル空洞を設計・製作し、その性能が(1)で求めた値を満足することの確認

(1) 有限要素法の電磁界シミュレーション(CST MW studio)を用いて高調波空洞の最適化を行う。最適化においては電子ビームとの相互作用に用いるTM020モードのシャントインピーダンス及びQ値を調整する。本空洞の応用先となる高調波空洞ではQ値は高ければ高いほど望ましいが、シャントインピーダンスは一般的な荷電粒子加速目的の空洞と異なりあまり高すぎない方が望ましい。シャントインピーダンスの最適値は設計された空洞の許容最大熱負荷と必要な高調波電圧によってバランスする。また、TM020以外の共鳴モード(TM010, TM110, TM012など、以下寄生モードと呼ぶ)は周回ビームの運動を不安定にするため、減衰する必要がある。

(2) 高調波空洞運転時、必要な加速電界を得るための高周波エネルギーの一部は空洞壁面の電気抵抗により、熱エネルギーに変換される。この発熱は空洞に設けられる冷却機構に

より適切に除かれる必要がある。また、空洞は外部から大気圧を受けるため、この圧力による変形も考慮した構造設計が必要となる。

- (3) 低電力モデルは高周波計測機器を値いた電磁気的な性能を評価するために用いる実物大の空洞モデルである。このため、(2)で考案する冷却機構や真空封止構造は実装せず、空洞の材質も比較的安価で加工の容易なアルミニウム合金等で製作する。この低電力モデルを用いることで、(1)で最適化した電磁気的な性能が実際に再現することを確認する。

4. 研究成果

- (1) 次世代放射光リングの例として KEK-LS (KEK Light source) [引用文献]での利用を想定して求めた TM020 高調波空洞のパラメータ[引用文献]を元に高調波空洞の電磁気的な設計を進めた。この過程において寄生モードの減衰手法についてアンテナ方式とスロット方式を比較検討した[引用文献]。その結果、アンテナ方式ではメンテナンス性に優れるものの KEK-LS で求められる寄生モード減衰性能を得るのは困難なこと、スロット方式では減衰性能及び空洞の省スペース化に優れることがわかった。この結果をもとに、KEK-LS 用 TM020 高調波空洞としてはスロット方式を採用することを決定した。

スロット方式を利用した寄生モード減衰型 TM020 高調波空洞を進めるにあたり、減衰機構が TM020 モードに悪影響を及ぼす恐れがあることがわかった[引用文献]。詳細な調査の結果、空洞に高周波入力用カプラや周波数調整用チューナを取り付けた場合に、TM020 モードの空間対称性が破れ寄生モード減衰用スロットに電磁波が吸収されることが原因だと判明した。この問題は、空洞の空間対称性への影響を最小限にするようなカプラ形状及びチューナ駆動方式を採用することで解決できることが判明した。そこで、新たな発想に基づく高周波入力用カプラを設計し、周波数調整用チューナも複数台を備えることで運転時も空間対称性を破らないような空洞設計を行った。

以上の検討の結果、KEK-LS を想定した運転で応用可能な 1.5GHz-TM020 高調波空洞について電磁気的性能の観点から目処が立った。TM020 モードの主な性能はシャントインピーダンス 2.3 M Ω 、無負荷 Q 値 34,100 である。寄生モードについてはビーム進行軸に直交する方向にビーム振動を引き起こす可能性のある成分が 2 つ残ったが、振動の成長率はそれ程高くなくバンチバイバンチフィードバック等を用いることで十分に対応できると考えた。

上記と並行して TM020 高調波空洞の光源加速器リングでの性能評価をシミュレーションにて行った[引用文献]。本検討については多粒子トラッキングコード MBTRACK を用いた[引用文献]。これらの結果、バンチギャップ 60 ns 程度の通常のマルチバンチ運転の条件において、TM020 高調波空洞とバンド幅の広いシングルキッカー空洞を併用することで超伝導高調波空洞を用いた場合と同等のバンチ伸張性能を実現可能であることが示唆された。ただし、バンチギャップの大きい(160 ns 程度)運転条件においては、TM020 高調波空洞を用いても十分な性能を得ることが困難であることが示唆された。これは今後の課題である。

- (2) 電磁界シミュレーションで得られた空洞表面の発熱分布予想をもとに、一定の冷却水路を仮定した空洞モデルにて熱構造解析を行った。計算は ANSYS を用いて行い、その結果、適切な冷却水路を配置することで空洞内面の温度上昇は 30 度程度に抑えられることがわかった。また、同様に大気圧による圧力分布も計算した結果、適切な肉厚を持つ空洞を製作することで最大の圧力は 7.3 MPa 程度と許容範囲内に抑えられることがわかった。さらに、これら構

造解析で予測される変形も考慮し、十分な空洞共鳴周波数調整範囲を実現できる周波数調整用チューナを再設計した。

これらの検討の結果、機械構造的にも 1.5GHz-TM020 高調波空洞を実現できる目処がついた。

- (3) 項目(1),(2)で得られた知見を実際に確認するためモデル空洞の製作を行った。モデル空洞の図面製作・組立は KEK 機械工学センター技術副主幹の高富氏の協力を得た。モデル空洞の材料は高周波を励振する部分はアルミニウム合金を、空洞部品を支持する一部部品にはステンレス鋼材を用いた。高調波空洞の組立工程も空洞性能を実現するために重要な課題であったが、実際の空洞組立において問題点などの洗出しが完了し、実空洞の製作に向け貴重なノウハウを得た。

現在、モデル空洞を用いた高周波特性の確認作業を行っている(図1)。これまでに TM020 モードの共鳴周波数及び無負荷 Q 値は電磁界シミュレーションの結果をほぼ再現することが確認されている。また、上述したように空間対称性を乱さない新たな設計の高周波入力用カプラを採用したが、このカプラの空洞との結合定数についてもシミュレーションを良く再現することが確かめられた。

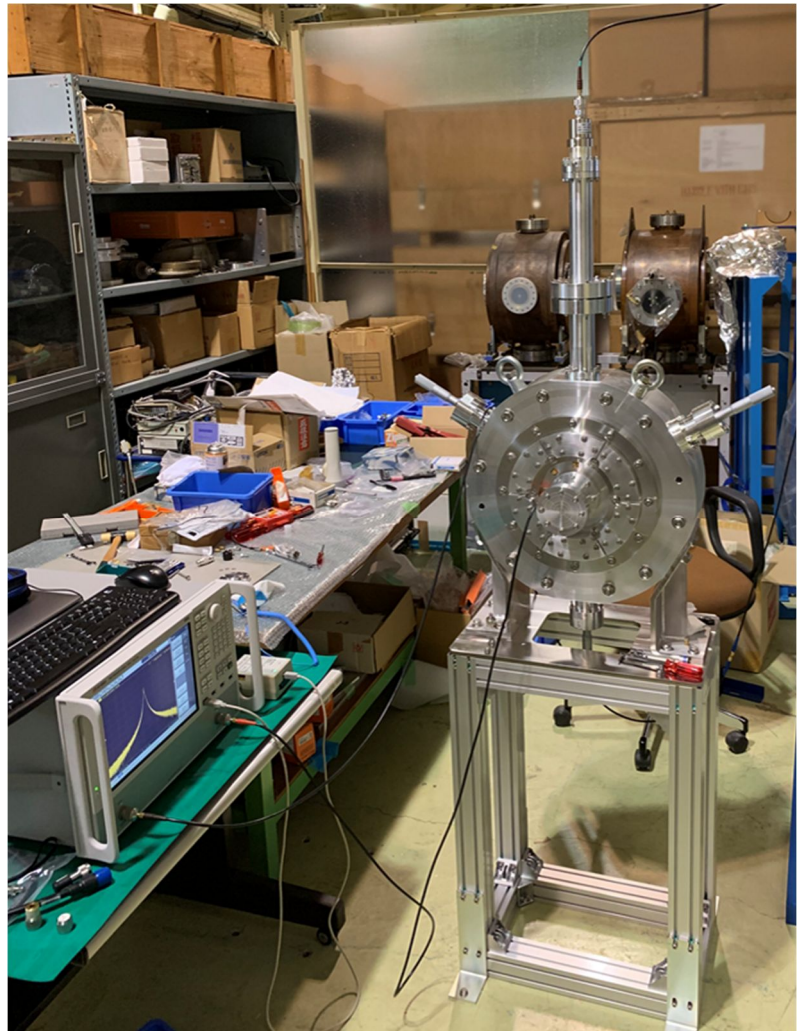


図1. TM020 高調波空洞の低電力モデルと性能評価の様子

<引用文献>

J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, and V. Serriere, Phys. Rev. STAB 5, 092001 (2002).

KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.1 (2017).
https://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf

N. Yamamoto, T. Takahashi, and S. Sakanaka, Phys. Rev. STAB 21, 012001 (2018).
N. Yamamoto, S. Sakanaka, and T. Takahashi, in the Proc. of the IPAC'18, Vancouver, BC, Canada 2018, p.2822, WEPML055.

T. Yamaguchi, S. Sakanaka, N. Yamamoto, D. Naito, T. Takahashi, in the Proc. of the PASJ2020, 2020, WEPP31.

山口 孝明, “次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の設計研究”, 総合研究大学院大学 加速器科学専攻 認定研究レポート (2019)

N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, in the Proc. of the IPAC'17, Copenhagen, Denmark 2017, THPIK037.

N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, in the Proc. of the ICFA-MCBI, 2020, p.96, DOI: 10.23732/CYRCP-2020-009.96

N. Yamamoto, A. Gamelin and R. Nagaoka, in the Proc. of the IPAC'19, Melbourne, Australia 2019, MOPGW039.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 N. Yamamoto T. Takahashi S. Sakanaka	4. 巻 0
2. 論文標題 Beam loading compensation for optimal bunch lengthening with harmonic cavities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ICFA mini-Workshop on Mitigation of Coherent Beam Instabilities in Particle Accelerators	6. 最初と最後の頁 96-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23732/CYRCP-2020-009.96	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 N. Yamamoto, A. Gamelin and R. Nagaoka	4. 巻 1
2. 論文標題 INVESTIGATION OF LONGITUDINAL BEAM DYNAMICS WITH HARMONIC CAVITIES BY USING THE CODE MBTRACK	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC '19	6. 最初と最後の頁 178-180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPGW039	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Simulation study of parasitic-mode damping methods for a 1.5-GHz TM020-mode harmonic cavity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC '18	6. 最初と最後の頁 2822-2825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto, Naoto and Takahashi, Takeshi and Sakanaka, Shogo	4. 巻 21
2. 論文標題 Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Accel. Beams	6. 最初と最後の頁 12001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Simulation study of normal-conducting double rf system for the 3-GeV KEK light source project	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC ' 18	6. 最初と最後の頁 4176-4179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 山本 尚人, 田中 織雅, 高井 良太
2. 発表標題 PF2.5GeVリングのハイブリッド運転モードへの高調波空洞導入の可能性
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 山口 孝明, 坂中 章悟, 山本 尚人, 内藤 大地, 高橋 毅
2. 発表標題 TM020型高調波空洞において寄生モード減衰機構が加速モードに与える影響
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 内藤 大地, 坂中 章悟, 山本 尚人, 高橋 毅, 山口 孝明
2. 発表標題 次世代光源において過渡的ビーム負荷補償を行うためのキッカー空洞の検討
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 山本尚人、山口孝明、坂中章悟、内藤大地、高橋毅
2. 発表標題 蓄積リング粒子トラッキングコード MBTRACK による Static Robinson instability の再現
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 N. Yamamoto, A. Gamelin and R. Nagaoka
2. 発表標題 INVESTIGATION OF LONGITUDINAL BEAM DYNAMICS WITH HARMONIC CAVITIES BY USING THE CODE MBTRACK
3. 学会等名 IPAC19-9th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yamamoto
2. 発表標題 Beam loading compensation for optimal bunch lengthening with harmonic cavities
3. 学会等名 ICFA mini-Workshop on "Mitigation of Coherent Beam Instabilities in particle accelerators" MCBI 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本尚人
2. 発表標題 高調波空洞を用いた蓄積リングにおけるビームダイナミクスの研究
3. 学会等名 ビーム物理研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本尚人
2. 発表標題 多粒子トラッキングコード mbtrack を用いたフォトンファクトリーハイブリッド運転時のバンチ長に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka
2. 発表標題 Simulation study of parasitic-mode damping methods for a 1.5-GHz TM020-mode harmonic cavity
3. 学会等名 IPAC18-8th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Yamamoto
2. 発表標題 Compensation of transient beam loading using a kicker cavity
3. 学会等名 European Synchrotron Light Sources RF Meeting, ESLS-RF 2018 SHARE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka
2. 発表標題 Simulation Study of Normal-Conducting Double RF System for the 3-GeV KEK Light Source Project
3. 学会等名 IPAC 17 - 8th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本尚人、高橋毅、坂中章悟
2. 発表標題 1.5GHzTM020型空洞を用いたダブルRFシステムの検討
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka
2. 発表標題 Compensation of transient rf voltage in a double RF system using a kicker cavity
3. 学会等名 Future Light source workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本尚人、高橋毅、坂中章悟
2. 発表標題 マクロ粒子法と準解析的手法を用いた電子バンチ群とダブルRFシステムの相互作用の数値解析
3. 学会等名 ビーム物理研究会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本 尚人, 高橋 毅, 坂中 章悟
2. 発表標題 TM020モードを利用した高次モード減衰型1.5GHz高調波空洞の検討状況
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	坂中 章悟 (Sakanaka Shogo) (20178560)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授 (82118)	
研究協力者	高橋 毅 (Takahashi Takeshi) (90391747)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・専門技師 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Synchrotron SOLEIL	European Synchrotron Radiation Facility		
スイス	Paul Scherrer Institut			
ドイツ	Helmholtz-Zentrum Berlin			
フランス	Synchrotron SOLEIL	European Synchrotron Radiation Facility		
スイス	Paul Scherrer Institut			
ドイツ	Helmholtz-Zentrum Berlin			
フランス	Synchrotron SOLEIL			