

2024年度 修士論文

SuperKEKB/Belle II実験の
コリメーター部における
ビームロスの音響センサーによる
観測

奈良女子大学 大学院

人間文化総合科学研究科
博士前期課程 数物科学専攻
高エネルギー物理学研究室

学籍番号: 23810030

岡田 伊織

指導教員 宮林 謙吉

2025年2月28日

概要

電子・陽電子衝突型加速器 SuperKEKB 加速器を用いた Belle II 実験は、新物理の探索を主な目的として 2018 年から稼働している。新物理のわずかな兆候を捉えるために、この実験は前身実験の 50 倍の統計量を蓄積することを目指している。そのため、SuperKEKB 加速器では $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超える高いルミノシティでの運転が必須であるが、これまでに達成したのは $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で、さらに一桁の向上を実現する必要がある。ここで障害になる事柄として、蓄積ビームが突発的に大きく損失する現象 (Sudden Beam Loss, SBL) が挙げられる。この現象は未だに解明されておらず、高電流運転を阻む大きな要因となっている。SBL を説明する有力な候補に大真空放電におけるビーム不安定性があり、その検証が急務であった。

本研究では、音響センサーを用いて大真空放電による熱衝撃を検知するシステムを開発し、SuperKEKB 加速器で放電の有無を検証した。有力な候補をもとに放電が発生しやすいと予想されるコリメータ付近に音響センサーを合計 29 個設置した。設置した音響センサーは、低周波数成分のノイズを除去し超音波領域の信号を観測するために感度をもつレンジの中心が約 200 kHz の共振型のセンサーである。従来、音響センサーを用いた放電観測は SuperKEKB 加速器の加速管内で行われていたが、本研究内では初めてメインリングで音響センサーの信号を観測することができた。2024 年 1 月から 7 月までに発生した SBL 事象から約 500 件のデータを取得でき、その音波を解析して、メインリング内で放電が観測されないことを示した。

目次

第1章 序論	3
第2章 Belle II 実験	4
2.1 SuperKEKB 加速器について	4
2.1.1 コリメータ	7
2.1.2 ビームロスとアボートシステム	9
第3章 音響センサーを用いた放電観測の動機	10
3.1 Sudden Beam Loss	10
3.2 ファイヤーボール仮説	11
3.3 放電発生を検知方法	13
3.4 音響センサー	13
第4章 音響センサーの基本特性	15
4.1 音響センサーで観測される音波の基本特性	16
4.1.1 コリメータを用いた音響センサーの応答試験	16
4.1.2 単一周波数の信号に対する音波	18
4.1.3 振動源位置による最大振幅の変化	21
4.2 静電気を用いた音響観測	22
4.2.1 静電気発生装置を用いた音響センサーの応答試験	22
4.2.2 静電気による音響センサーの信号	24
第5章 加速器への音響センサーの設置	26
5.1 加速器で観測され得る音波に	26
5.2 音響センサー設置場所	30
5.3 音波収集システム	34
5.3.1 信号取得方法	36
5.3.2 オシロスコープとチャンネルの対応関係	36
5.4 音響システムの検証	36

第 6 章	シングルバンチ運転による試験と解析手法の確立	39
6.1	シングルバンチ運転による試験データの収集	39
6.2	音波伝播時間の算出方法	42
6.2.1	コリメータヘッドにバンチが当たる時間の推定	42
6.2.2	音波発生時間の算出	43
6.2.3	音波伝播時間算出の再現性	48
6.2.4	コリメータ位置を変えたときの音波伝播時間	51
第 7 章	SBL 事象で発生した音波の解析	55
7.1	SBL 発生時の音響センサーの信号	55
7.2	音波の有無の判別方法	57
7.3	SBL 事象における音波の立ち上がり時間の算出	59
7.4	放電事象候補	60
第 8 章	音響センサー用アンプの導入	62
8.1	音響センサー用アンプ	62
8.2	アンプを用いた音響観測試験	63
8.2.1	セットアップ	64
8.2.2	増幅率	66
8.2.3	音波発生時間の算出	66
第 9 章	まとめと今後の課題	68

第1章 序論

Belle II 実験では標準理論を超えた物理現象の探索のために電子・陽電子衝突型加速器を用いて大量の B 中間子や D 中間子、タウ粒子等を生成し、その崩壊過程を測定器で調べている。新物理探索を高精度で行うためには、大量のデータが必要不可欠である。大統計データを取得するために、本実験ではルミノシティという加速器の性能を高める必要がある。目標のルミノシティは $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で、2024 年 12 月までのルミノシティの記録は $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。さらにルミノシティを向上させるためには、ビーム電流を増やすことが必要である。しかし、SuperKEKB 加速器では、リング加速器に蓄積したビームが突発的にその大部分をわずか数周のうちに失ってしまう前例のない現象が頻発しており、ビーム電流の増強を阻んでいる。このビームロス Sudden Beam Loss と呼ぶ。この現象を説明する有力な候補に、コリメータ付近で大放電が発生し蓄積ビームを大きく蹴るというものが挙げられる。本研究の目的は、放電がビームロス事象を引き起こしているか検証するために、音響センサーを用いたビームロス事象モニターシステムを開発することである。そこで、SuperKEKB 加速器のコリメータに音響センサーを設置し観測を試みた。2024 年 1 月から 7 月の SuperKEKB 加速器運転で測定を行い、多くの音波を観測できた。また、これらの音波を解析し、放電由来かどうかを定量的に評価した。

2 章では Belle II 実験について説明する。3 章では、Sudden Beam Loss について説明し、音響センサーを用いて放電事象を観測する目的と方法を説明する。4 章では、テストベンチを用いた音響センサーの応答試験について説明する。5 章では、音響センサーを加速器に設置した詳細について述べる。6 章では、放電事象の同定方法について説明する。7 章では、2024 年 1 月から 7 月までの SuperKEKB 加速器運転における Sudden Beam Loss 事象で取得した音波の解析結果について述べ、放電事象候補を探した。8 章では今後の音響センサーテストの改善について説明した。9 章では、結果のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 Belle II実験

Belle II 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構で行われている国際共同実験である。SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器から構成されている B ファクトリー実験は、粒子・反粒子の対称性の破れ等を通じて新たな物理法則の探求を行っている。前身の Belle 実験の 50 倍に相当する 50 ab^{-1} のデータ蓄積を目指し、2018 年から本格的な運転を開始している。

2.1 SuperKEKB 加速器について

SuperKEKB の前身である非対称エネルギー電子陽電子衝突型加速器 KEKB 加速器を用いた Belle 実験は、世界最高ルミノシティで運転を行うことで生じた膨大なデータから小林・益川理論の実験的実証を始めとする様々な素粒子物理学の成果を生み出した。標準理論を超える物理現象の探索のためには、より膨大なデータが必要である。そのため、加速器の高輝度化が求められ、KEKB 加速器を大改造したのが SuperKEKB 加速器である。

SuperKEKB 加速器は従来よりも大幅な衝突性能を誇り、多くの物理事象数を生成できる。観測される物理事象の数を N とすると、

$$N = \sigma \int_0^T L dt \quad (2.1)$$

と表される。 T は実験期間、 L は瞬間ルミノシティ、 σ は対象となる物理事象の生成反応断面積である。瞬間ルミノシティとは加速器が 1 秒あたりに発生させる衝突の頻度を示す指標である。生成反応断面積は自然の法則で決められた値なので、多くの物理事象数を得るため瞬間ルミノシティを大きくする必要がある。陽電子と電子の衝突点ビームサイズが等しいと仮定すると、瞬間ルミノシティは以下の式で表現される。

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{\xi_{y\pm} I_{\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \left(\frac{R_L}{R_{\xi_y}}\right) \quad (2.2)$$

$+$ は陽電子、 $-$ は電子、 x, y は進行方向に垂直な平面内における水平、垂直方向を表す。 e は電気素量、 r_e は古典電子半径、 γ はローレンツ因子、 β^* は衝突点ベータ関数、 σ^* は衝突点におけるビームサイズ、 ξ はビームビームパラメータ、 R_L, R_{ξ_y} は

幾何学的な要因による補正係数である。SuperKEKB 加速器の目標の瞬間ルミノシ
ティは、 $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で、KEKB が達成した記録 ($2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) の約 30
倍を目指している。積分ルミノシティは 50 ab^{-1} が目標である。2022 年 6 月時点で
瞬間ルミノシティ $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録しており、2023 年 12 月まで加速器と
測定器の改良を行うためのロングシャットダウンを経て、2024 年 1 月から 12 月まで
の運転で $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に到達し、世界最高ルミノシティの記録を更新した。

図 2.1 は SuperKEKB 加速器の概略図である。周長は約 3 km で、電子・陽電子入
射器から電子と陽電子を高いエネルギーまで加速させて、それぞれ反対方向に電子
リング (High Energy Ring, HER) は 7 GeV と陽電子リング (Low Energy Ring, LER)
は 4 GeV で入射し、ナノビーム方式で衝突させる。

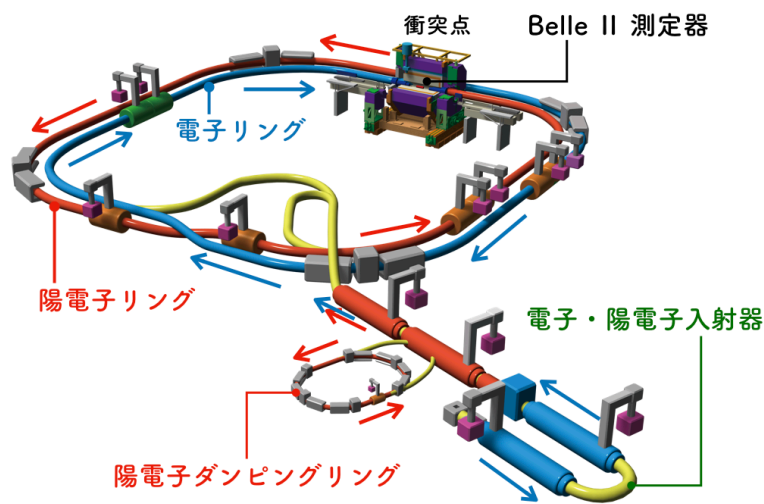


図 2.1: SuperKEKB 加速器の概略図 [1]

ナノビーム方式とは、バンチ同士が衝突する部分を小さくする方法で、ルミノシ
ティを大幅に向上させる。ここで、バンチとは荷電粒子の集まりのことである。Su
perKEKB 加速器の電子リング (HER) および陽電子リング (LER) の加速電場周波数
は約 508 MHz であり、RF バケットと呼ばれるバンチを加速可能な位相はリング全
周で約 5000 個である。これまでの実績では最大で約 2500 個のバンチの蓄積を行っ
ている。このとき衝突点でのバンチ交差の間隔は約 4 ns である。図 2.2 に示すよう
に、バンチの幅が狭いビームは大きな交差角を持って衝突する。

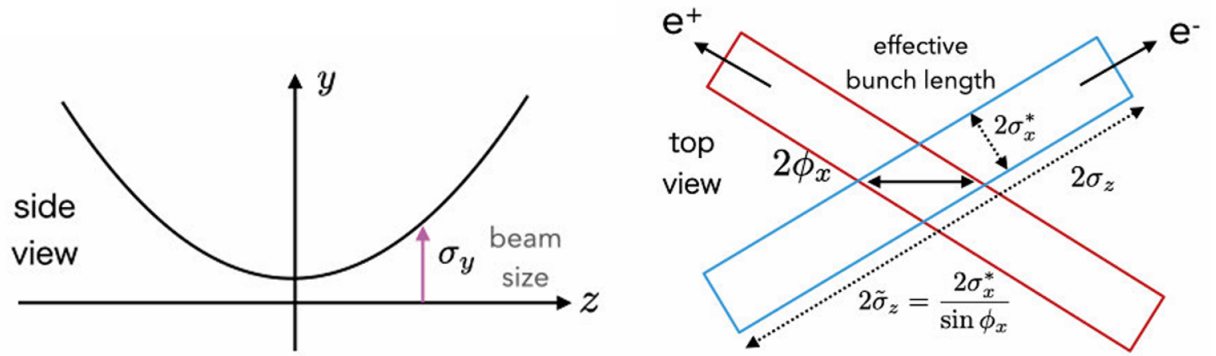


図 2.2: ナノビーム方式の概要図。左図は真横から見た図 (z - y 平面)、右図は真上から見た図 (z - x 平面) [2]

垂直ビームサイズ (σ_y) は、衝突点である真ん中 ($z = 0$) が一番小さくなる。ナノビーム方式の場合、2つの衝突するバンチの重なりある部分で衝突するので、常に垂直ビームサイズが小さいところで衝突する。バンチが重なる長さを表すバンチ長 ($\tilde{\sigma}_z$) は、衝突点における水平ビームサイズ (σ_x^*) と交差角の半分 (ϕ_x) を使って、

$$\tilde{\sigma}_z = \frac{\sigma_x^*}{\sin \phi_x} \quad (2.3)$$

と書くことができる。バンチが重なる部分のバンチ長はリアルなバンチ長 (σ_z) に依存しない。リアルなバンチ長を極端に短くすることには限度があり、垂直ビームサイズがあり、そこまでしかビームを絞れない。ナノビーム方式ではこの効果が無視することができて、バンチ長を気にせずビームを絞ることができる。KEKB の交差角は 22 mrad であったが、SuperKEKB では約 4 倍の 83 mrad である [3]。

ビーム衝突点用超伝導電磁石、QCS と呼ばれる 55 台の超伝導電磁石により、ビーム衝突点は小さく絞ることができる。図 2.3 に QCS の構成を示す。QCSL と QCSR クライオスタットには、それぞれ 25 台、30 台の超伝導電磁石が組み込まれている。クライオスタットとは超伝導電磁石を -269°C に保つために外気からの熱を防ぐ金属製の精巧な箱である。55 台の超伝導電磁石はビームサイズを絞る、ビーム軸の水平方向または垂直方向に集束するの目的に応じて設置されている。

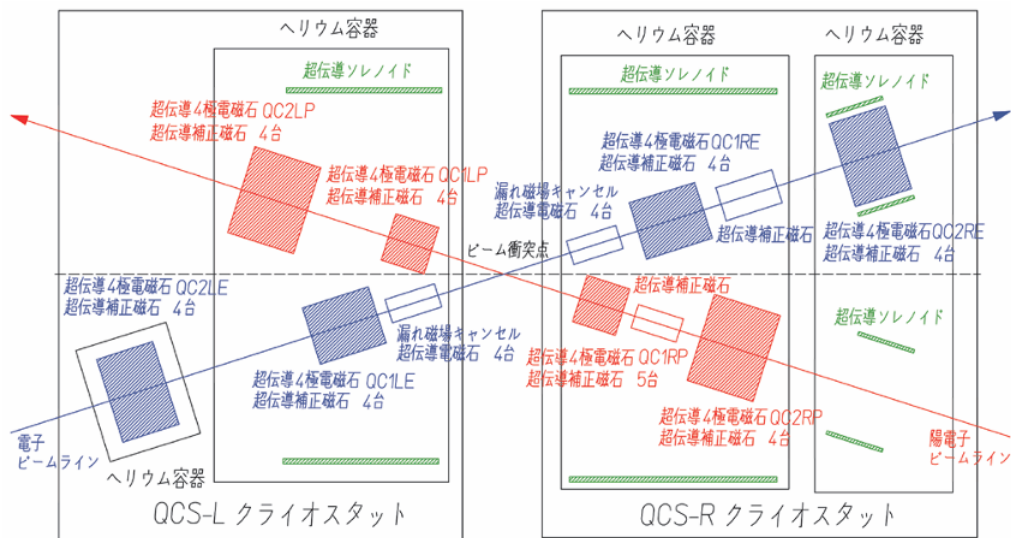


図 2.3: ビーム最終集束用超伝導電磁石の構成 [3]

2.1.1 コリメータ

コリメータはビーム軌道周辺に広がる電荷の粒子群を削る装置で、測定器へのバックグラウンドを減らすことができる。また、加速器機器を周回するビームから守る目的でも使用される。図 2.4はコリメータ全体の立体断面図である。

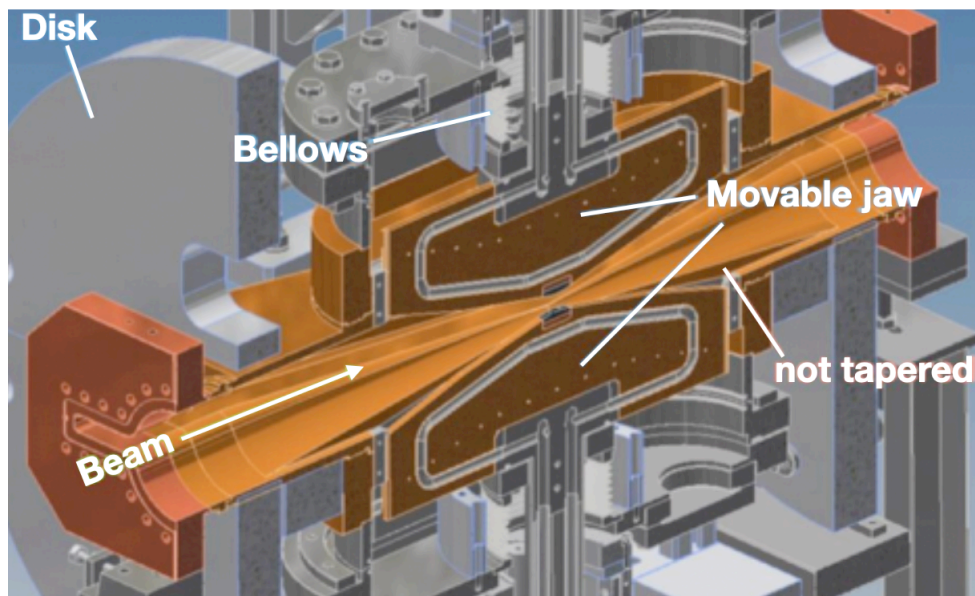


図 2.4: SuperKEKB タイプの垂直コリメータの立体断面図 [4]

コリメータは地面に垂直方向と水平方向と 2 種類あり、図 2.4では垂直方向に Mov-

able jaw が上下に 1 枚ずつあり、銅で作られている。ビーム軸垂直方向の上側の Movable jaw を TOP、下側を BTM と呼ぶ。コリメータには KEKB タイプと SuperKEKB タイプの 2 種類ある [4]。ビーム軸に対して KEKB タイプは Movable jaw が片側固定、または片側自由に稼働し、SuperKEKB タイプは両側自由に稼働する。立体断面図のコリメータは SuperKEKB タイプである。ビーム近くのコリメータ先端はコリメータヘッドといい。コリメータヘッドは、ビーム運転中に高温状態になっても溶けない素材を使用している。例えば、 2.0×10^{-7} Pa のような真空状態でタングステンとタンタルの昇華点はそれぞれ 2018°C と 1847°C である。コリメータヘッドの素材はこのような金属物質を用途に合わせて使用されている。Movable jaw を冷やす目的で Movable jaw 内部に冷水パイプが通されている。Bellows とは Movable jaw を上下に動かすための支えである。Movable jaw は真空内にあり、Bellows 以降は大気中に置かれている。

図 2.5 は SuperKEKB 加速器のコリメータの位置を示す。

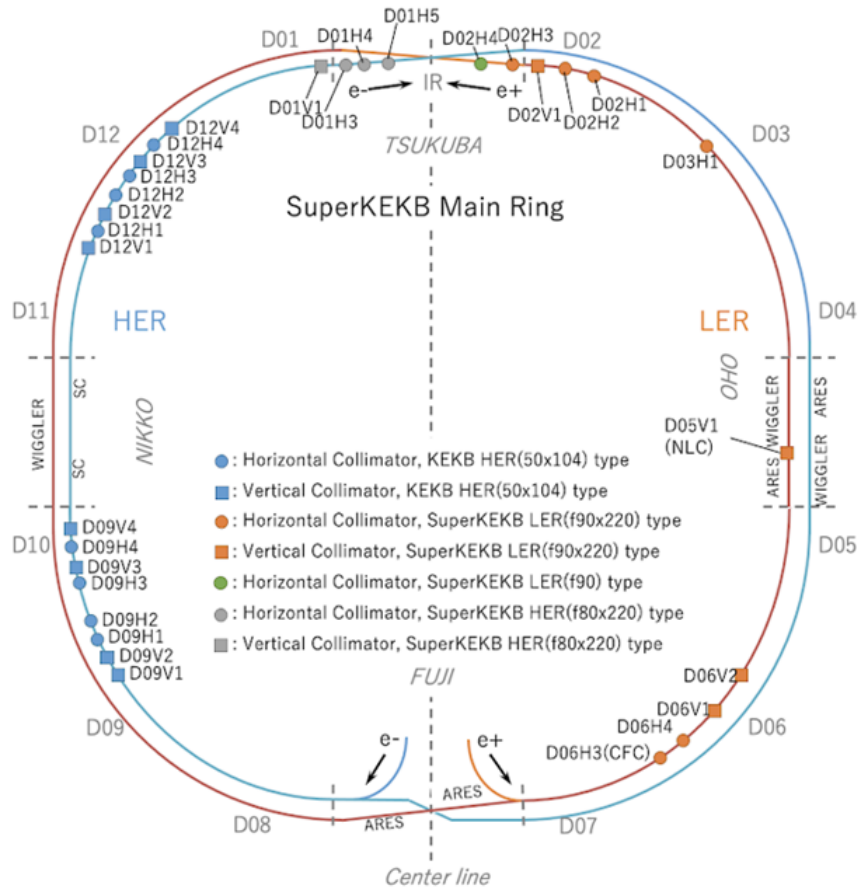


図 2.5: SuperKEKB 加速器のコリメータ位置 [5]

SuperKEKB 加速器の位置を表す名前に TSUKUBA、OHO、FUJI、NIKKO が使

用され、TSUKUBA は衝突点で Belle II 測定器がある。FUJI で電子ビームと陽電子ビームが入射される。コリメータは主にビームが入射してすぐの所、衝突する手前の所に設置されている。

2.1.2 ビームロスとアボートシステム

SuperKEKB 加速器では、ビームが安定軌道から不安定な状態になるとコリメータ等に衝突し、電磁シャワーを起こしてビーム電流量が減る (ビームロス) ことがある。ビームロスが大きくなると大量の放射線が発生するので、Belle II 測定器や加速器コンポーネントを損傷させる危険性がある。そのため、ビームロスが起きやすい箇所に PIN PD、イオンチェンバー [7]、光ファイバー、ダイヤモンド [8] などを用いてリング全周でロスを検知し、どこでロスを検知してもビームをアボートできるように対策した。ビームロスが起きやすい場所とはリング内で口径が小さい場所であり、例えばコリメータ付近である。ビームロスが起きたとき、そのまま成り行きにまかせると予期しないところがロスしたビームに照射されて損傷するため、極力それを防止する目的で、異常を検知したときリングから取り出したビームを受け止める対策を施したビームダンプへビームを蹴り出すビームアボートシステムが設置されている [6]。

ビームアボートシステム

ビームロス対策として、ビームロスを検知して信号を出すロスモニターがリング内に多く設置されている。ビームアボートシステムとは、ビーム異常が生じたとき、または加速器機器に異常が発生しビーム運転の継続が困難と判断されたとき、速やかに安全にビームを捨てるシステムのことを指す。リング各所に設置されたアボートを発報するセンサーからのアボートリクエスト信号を光通信により中央制御棟に集約し、それを受けてアボートキッカー電磁石へとトリガー信号を転送する。キッカー電磁石はメインリング内に 2 箇所あり、そこでビームがダンプへと捨てられる。ビームが光速でリング 1 周すると約 $10\ \mu\text{s}$ かかり、ビームアボートシステムは異常を検知してからビームをビームダンプに蹴り出すまで数十 μs を必要とする。そのため、次章で述べる Sudden Beam Loss によるトラブルを防ぐことはできず、したがって Sudden Beam Loss を根絶することを最終的な目標として、原因を探り当てる試みが重要な局面にある。

第3章 音響センサーを用いた放電観測の動機

3.1 Sudden Beam Loss

SuperKEKB 加速器運転では、突発的に大きくビーム損失する現象 (Sudden Beam Loss, SBL) が頻発しており、瞬間ルミノシティの向上が妨げられている。図 3.1 は 2024 年 12 月 4 日に発生した SBL によるバンチ毎の電荷損失を表している。バンチ毎の電荷損失がアボートの 1-2 ターン前から大きく発生していることがわかる。SBL ではビームがアボートされるまでに生じる放射線量が多いため、加速器コンポーネントや Belle II 測定器を損傷させる可能性が非常に高い。

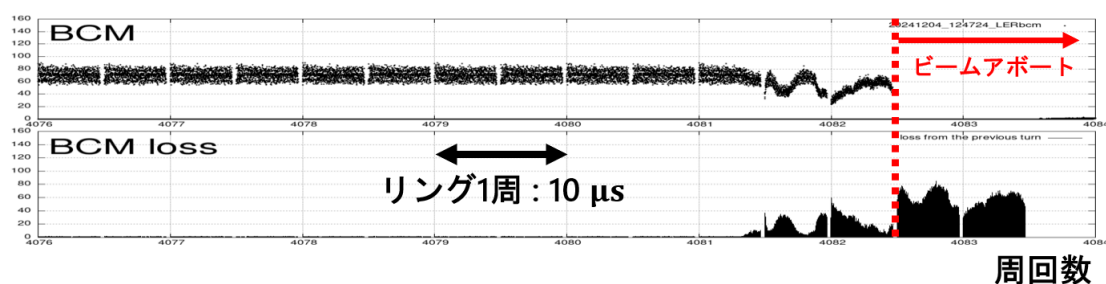


図 3.1: 2024 年 12 月 4 日に発生した陽電子リングにおける SBL [9]。横軸は SuperKEKB リングの周回数に対応しており、リング 1 周するのにかかる時間は約 10 μ s である。1 段目と 2 段目の縦軸はそれぞれバンチ毎のビームの電荷、前のターンとの電荷損失量の差を表している。

SBL の頻度はビーム電流増加につれて高くなる傾向にあるため、大電流運転を行う上で大きな障害となっている。そのため、更なるルミノシティ向上に向けて、原因究明は喫緊の課題である。

SBL は陽電子リング側で頻発しており、すでにコリメータや Belle II 測定器が損傷する事象が発生している。図 3.2 は、2022 年の SuperKEKB 加速器運転で発生した SBL により破損したコリメータである。コリメータヘッドの傷はビームを不安定にさせる可能性があり、それを避けるためにコリメータの開度を大きくする必要がある。これはバックグラウンド低減ができなくなることを意味しており、深刻な問題である。さらに、コリメータの交換は数日かかる可能性もあり、加速器運転に大

きな支障をもたらす。

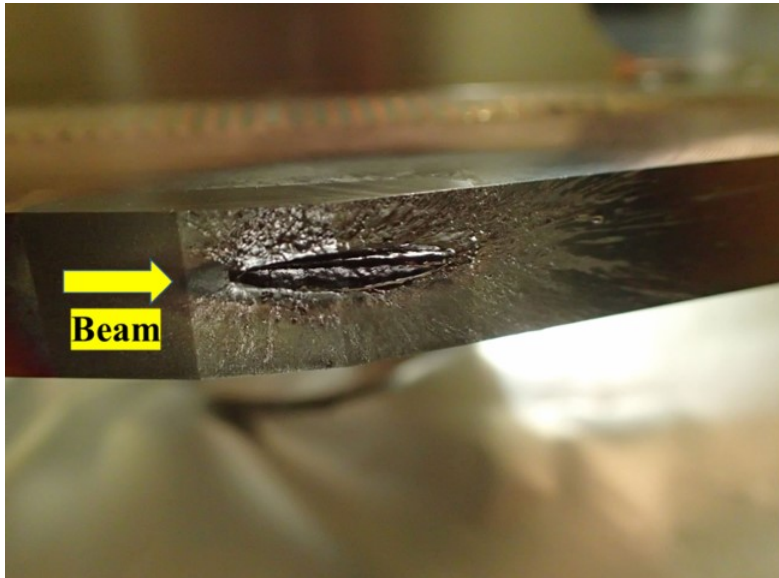


図 3.2: 傷のあるコリメータの写真 [5]。異常ビームの通過によりコリメーターヘッドの表面に傷ができた。

電子雲不安定性を始めとした多くのビーム不安定性では数十 μs で大きなビーム損失はしないため、SBL は全く新しい現象である。SBL を説明する有力な仮説としてコリメータ付近で放電が発生しビームを大きく蹴るというものがある。次節で述べるファイヤーボール仮説は、SBL の起源を説明する有力な仮説と目されていたため、それを検証するとともに、当てはまっていた場合は対策の立案に移行することが急務であった。

3.2 ファイヤーボール仮説

ファイヤーボールとは、ビームが通過する真空チェンバー内に漂うダストのうち、高融点の金属でできた微粒子が、ビームにより加熱されたものである。ファイヤーボール仮説とは、真空チェンバー内壁の素材の融点よりも高温になったものが内壁表面に接触すると、その場所で融けた内壁の素材が電離してプラズマを発生させ、これが加速電場のマイクロ波のエネルギーを吸収した結果、大きな真空中の放電を引き起こしてビームを蹴るというものである。この仮説は、SuperKEKB 加速器の高周波加速空洞で観測された真空破壊のメカニズムに対する考察に基づいて提唱された [10]。図 3.3 にファイヤーボールの生成から大真空放電に至るこの仮説で想定される過程を示す。

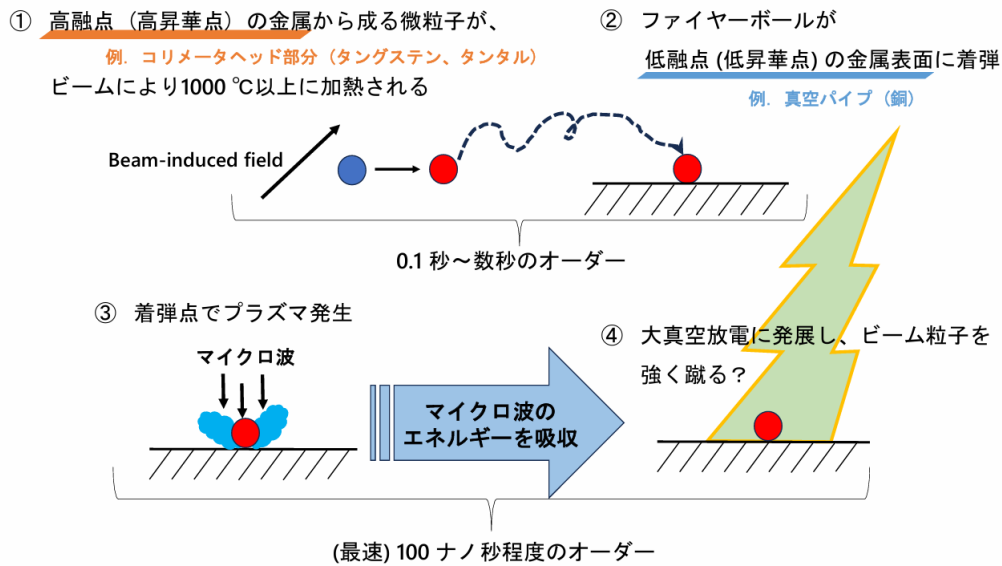


図 3.3: ビームを蹴る描像（ファイヤーボール仮説の説明）

1. 融点の高い微粒子がビームの誘起電磁場によって加熱され、ファイヤーボールになる
2. ファイヤーボールが融点の低い金属表面に着地する
3. 着弾点でプラズマが発生し、マイクロ波のエネルギーを吸収する素材
4. 大真空放電に発展し、ビーム粒子を強く蹴る

SuperKEKB 加速器のコリメータヘッドは高融点金属であるタングステンやタンタル、周りのビームパイプとコリメータジョーは低融点金属である銅を使用している。つまり、高融点金属と低融点金属が近接して配置された状態になっており、これはファイヤーボール仮説を検討対象とする動機を与えた。事実として、2022 年の運転中に異常が発生してアボートされるまでにコリメータヘッドをビームが削る事象が発生した。これにより、コリメータ付近の真空チェンバー内に高融点材料でできた粒子が散乱したと認識されていた。したがって、この高融点微粒子がファイヤーボールの元となる可能性があると考えられた。

SBLを防ぐための対策として、2022 年 7 月から約 1 年半のシャットダウン中にファイヤーボールの発生源であるコリメータヘッドを銅コーティングしてファイヤーボールが起きないようにした。さらにビームパイプ内の掃除も実施されたが、全部のビームパイプ内に対する掃除ではないため、高融点金属の微粒子がビームパイプ内に残っている可能性がある。これらの疑念を晴らすためにも 2022 年 6 月から 2023 年 12 月

のロングシャットダウン中に放電がコリメータ付近で発生するか検証するシステムを整える必要がある。

3.3 放電発生を検知方法

放電が発生すると、しばしばスパークやアークなど発光を伴うため、ここから生じる X 線または可視光の検出による観測が考えられる。しかし、電子加速器の内部にはビームに伴って大量の放射光が発生し、これがバックグラウンドになるため、ここから放電に起因する発光を分離して検出することは困難であると考えられる。そこで、放電により発生した音波を観測するシステム (音響観測) の開発を本研究では行った。音響観測とは、音響センサーを物体に接着し、物体上で振動が発生すると、それによる音波を音響センサーで観測することである。音響観測は、SuperKEKB 加速器の加速器管内の放電による熱衝撃から発生する音波を捉えたという経験がある。従来までは加速器管数本のうちの加速管で放電が生じているか分からなかったが、音響センサーを数本の加速管それぞれに設置し、放電が起きた加速管を特定して手当する運用が実施されている。このように、音響観測は有用な方法である [11]。

3.4 音響センサー

本研究で使用する音響センサーは、図 3.4 に示すように圧電素子を共振器を形成する容器 (ハウジング) に収めた、共振型のものである。

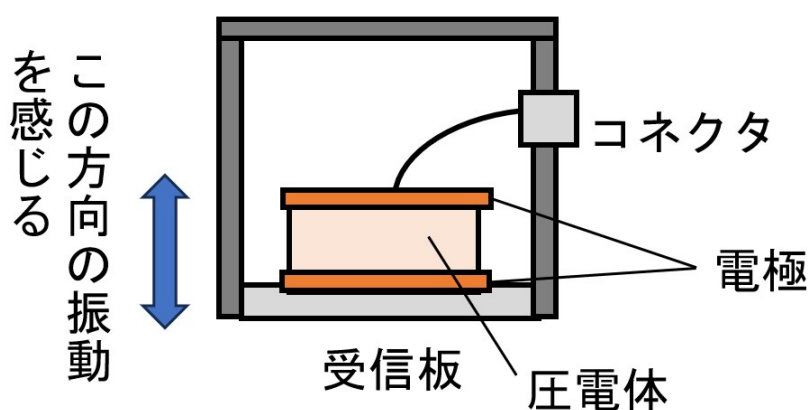


図 3.4: 音響センサーの構造

コリメータを冷却する冷水パイプに伝わる振動など、施設や装置に伝わりバックグラウンドとなる音波や振動はほとんど可聴領域のものである。したがって数十 kHz 以上の超音波の領域で観測するとバックグラウンドが低く、ビームが当たったり放

電が発生したときの熱衝撃に起因する信号を効果的に検出することができる。そこで、次章で述べるように、本研究では超音波の音域に感度が高い音響センサーを採用した。

第4章 音響センサーの基本特性

コリメータ上の放電事象を捉えるために音響センサーを設置する場所を選定する際に考慮すべき条件は、2点ある。

1. 真空中ではなく大気に触れる側であること
2. コリメーターヘッド部分と機械的に接合されていること

第1の条件は音響センサーは大気中で使用する前提で製作されたものであり、真空中で使用するすると音響センサー内に残留した空気と真空状態の圧力差で音響センサーが形状を保てず破裂する可能性があることが理由である。第2の条件はビームロス事象に対して十分な感度を確保するため必要である。ビームが当たったり放電が発生してコリメータヘッドで生じた音波が伝播してくる場所に音響センサーを設置した。コリメータ上での熱衝撃で発生する振動を検知するため、コリメータの冷水パイプ上はどちらの条件も満たす。

本研究では冷水パイプに音響センサーを設置することに決めた。本章では、冷水パイプ上に設置した音響センサーの応答をテストベンチにて測定した結果について述べる。以下は、音響センサー設置までに調べたいことをまとめたものである。

- 音響センサーの信号の特徴を理解する
- 熱衝撃による振動で見られる信号を確かめる
- 放電発生位置を変えたときの信号の違いを確かめる

使用する音響センサー AE124AT はマテックス社製で、図 4.1 と 4.2 に示すように直径 1 cm の円柱形のハウジングに収められた共振型のセンサーである。検知可能帯域は数十から 2000 kHz である。

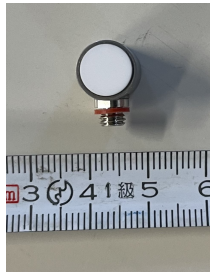


図 4.1: 音響センサー受信板側

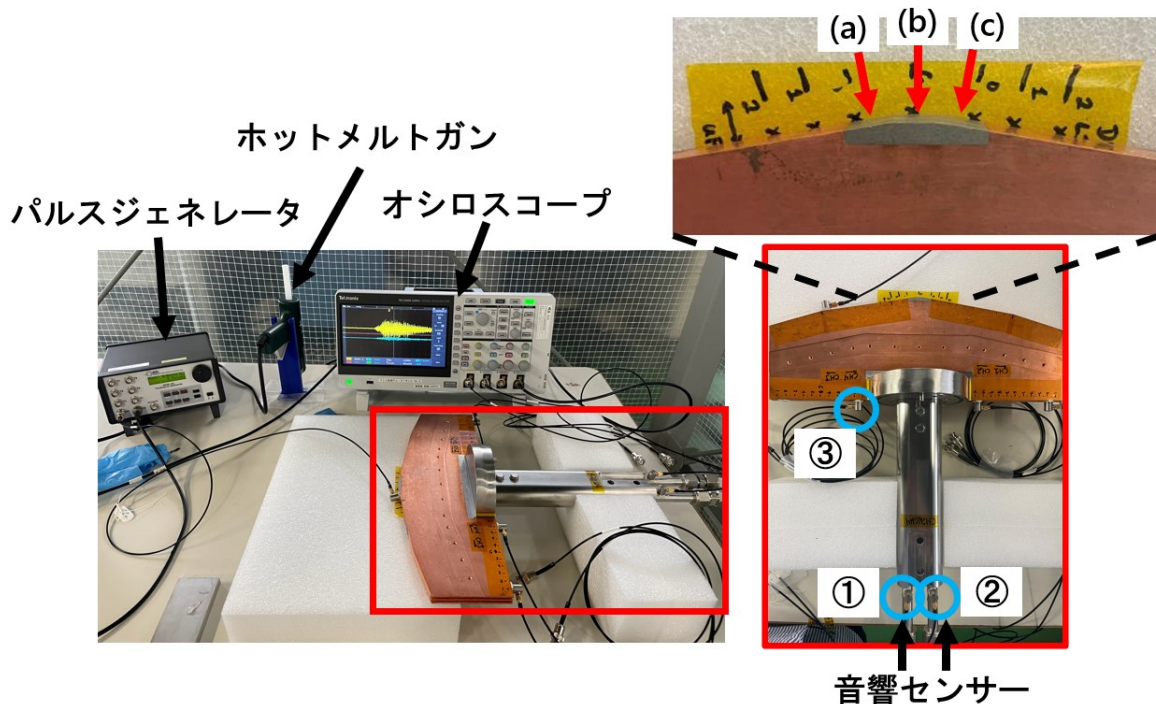


図 4.2: 音響センサー側面

4.1 音響センサーで観測される音波の基本特性

4.1.1 コリメータを用いた音響センサーの応答試験

図 4.3はコリメータを用いた音響センサーの応答試験のセットアップを示している。コリメータは、SuperKEKB 加速器と同型のものを使用しており、そのヘッド部分に振動を与える試験を行なった。赤枠内がコリメータであり、コリメータのビームが直接当たる領域に熱衝撃を与え、冷水パイプ上の音響センサーに伝わる信号を確かめる。熱衝撃を与えるための入力信号としてパルスジェネレータを用いた。音響センサーの信号を観測するために Tektronix のオシロスコープ TBS2000B を使用し、音響センサーの接着にはホットメルトを用いた。



音響センサーは音波や振動を電気信号として出力する機能を持つが、圧電素子の性質として電気信号を入力することにより振動を発生させることもできる。パルスジェネレーターを用いて振動を発生させる役割の音響センサーを図 4.3 に示されているコリメータヘッドの 3 つの場所 (a), (b), (c) のうち (a) に接着した。振動源の音響センサーに送る信号は図 4.4 のようなバーストパルス 5 発を使用した。

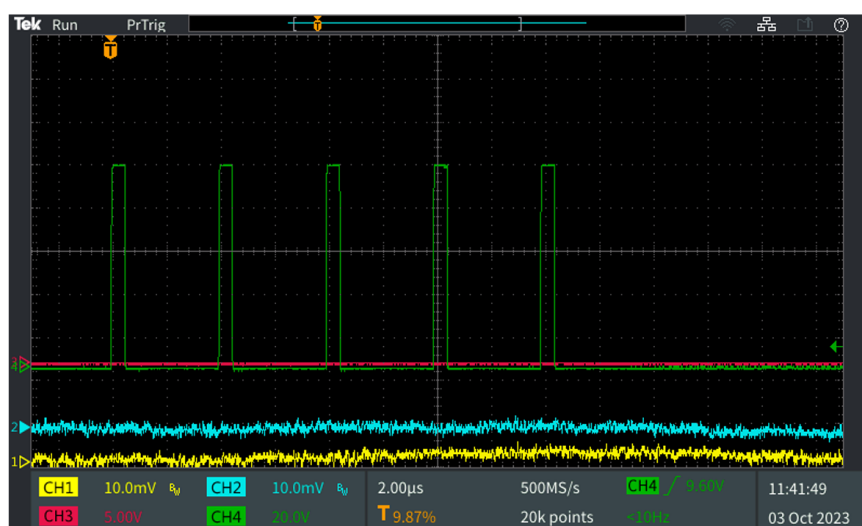


図 4.4: 振動源となる音響センサーに送る信号の一例。矩形波が立ち上がっている時間幅は $0.5\ \mu\text{s}$ で固定した。矩形波同士の間隔の逆数は周波数に対応していることから、矩形波間の間隔を変化させることで波形の周波数を変更できる。この図では周波数 $248\ \text{kHz}$ の矩形波を示している。プローブファクター 10 がかかっている。

放電により生じる音波がどのような周波数をもつか分からないので、共振型の音響センサーがどの周波数帯まで感度をもつか知ることは重要である。周波数ごとの音響センサーの信号応答を確認するため、励振用の音響センサーに入力する信号は単一周波数を用いた。定めた時間間隔を持つ複数の矩形波がなすバーストパルスをフーリエ変換したときの基本周波数は、矩形波どうしの時間間隔で決まる。そこで本試験では 5 発のバーストパルスで音源となる音響センサーを駆動することとし、周波数、すなわち矩形波の間の時間間隔を変化させながら、その振動を検出した音響センサーの出力信号を観測した。

信号観測に用いたオシロスコープの横軸は 1 division あたり $2\ \mu\text{s}$ で 15 division ある。縦軸は 1 division あたり $2\ \text{V}$ で 10 division である。データ点数は 20000 点で、この場合はデータ間隔は $1\ \text{ns}$ である。信号のトリガーは 4 チャンネルで、バーストパルスの信号が立ち上がるタイミングを用いた。

振動により生じた音波を受け取る音響センサーは図 4.3 で示す①と②と③の位置

に音響センサーを設置する。パルスジェネレータを用いた音響観測では①と②の位置だけを用いて音響センサーを設置した。位置①と②はコリメータヘッドに対して対称な位置である。

4.1.2 単一周波数の信号に対する音波

図 4.5は、周波数 248 kHz の振動に対する音響センサーの応答信号である。音波全体の大きさは 0 から 10 mV 程度であることが分かる。位置②のセンサーに着目すると、バーストパルスが打ち込まれてから約 80 μs で音波が立ち上がることが分かる。一方、銅の縦波の音速が約 5 mm/ μs 、コリメータの大きさが約 40 cm であることから、コリメータヘッドで生じた振動が音響センサーに到達するまでの時間は約 80 μs である。つまり、観測された音波の立ち上がり時間は、おおよそ期待通りである。

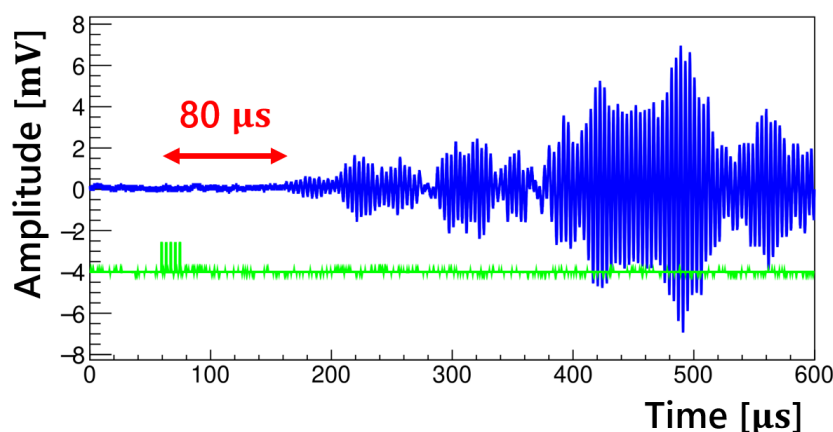


図 4.5: コリメータヘッドから単一周波数のパルスを打ち込んだときの応答信号。青線は音響センサーの信号で位置②の信号である。緑線は振動源のセンサーに打ったバーストパルスを 1/100 倍にした信号である。

この音波を高速フーリエ変換 (FFT) したものが図 4.6 である。音響センサーの信号は周期的で、打ち込んだ単一周波数以外の様々な周波数を持つことが分かった。矩形波は高速フーリエ変換すると周波数の低いところから高いところまで分布するという事実からも一致する。他に様々な周波数を含む理由として、金属内部では音波が境界や異なる材質との接合部分で反射し、干渉をすることで様々な周波数が聞こえるためである。また、金属の形や大きさによって複数の固有振動数を持つ。金属に単一周波数の振動を与えたとしても、その振動が金属の固有振動数に近いと、共鳴し様々な周波数を含む。このように様々な周波数が含まれているが、入力信号で打ち込んだ単一周波数付近である 250 kHz の成分に寄与がある。

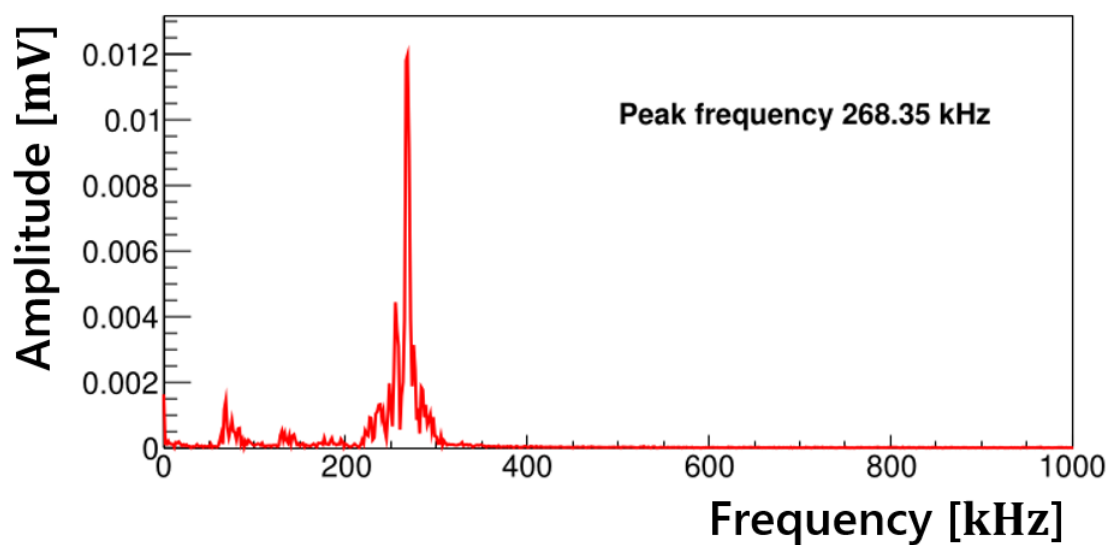


図 4.6: 248 kHz 単一周波数パルスにおける応答信号の FFT

様々な周波数において最大振幅を計算した。二つ音響センサーで信号を取得することができて、例として①に設置したセンサーにおける周波数と最大振幅の関係を図 4.7に示す。

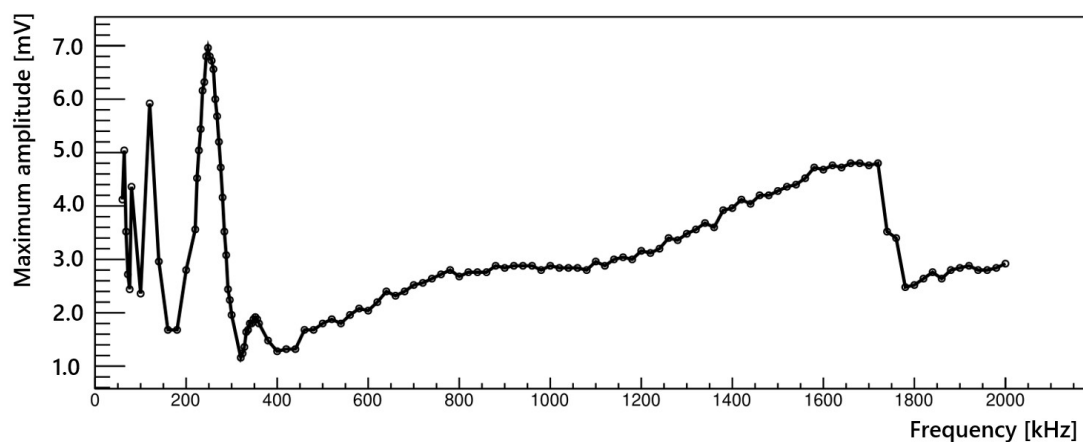


図 4.7: 振動源位置 (a) で①に設置したセンサーの周波数分布。

音響センサーが持つ固有の共振周波数は 250 kHz 付近であることが分かった。図 4.8はメーカーが示す感度曲線である。この結果からメーカーが示す共振周波数は約 120 kHz であることがわかる。

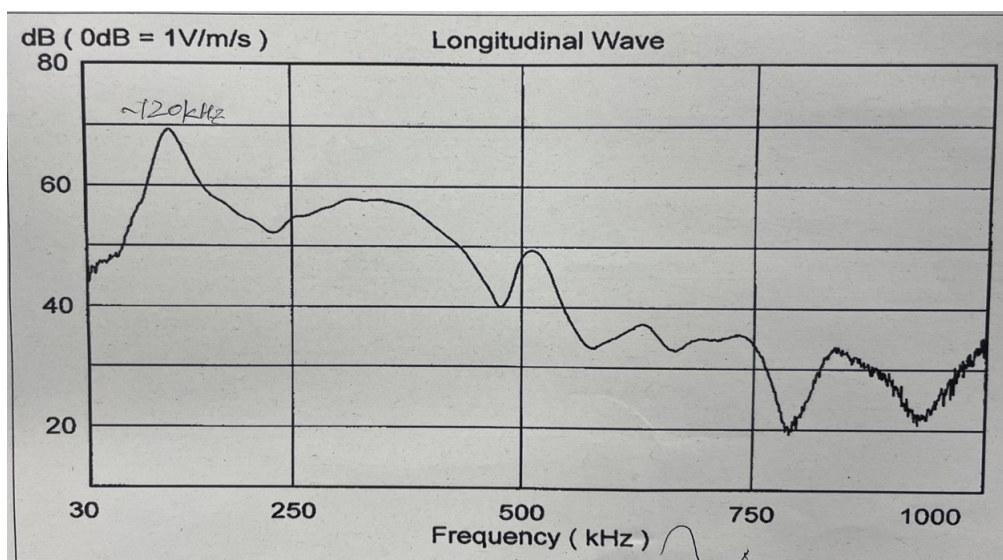


図 4.8: メーカーが示す音響センサーの感度曲線

250 kHz とは約 2 倍の違いがある。図 4.9 のように、2 倍の違いが出る理由としては、入力信号の与え方が異なるためである。このことから、メーカーの示す共振周波数と一致することを確認した。

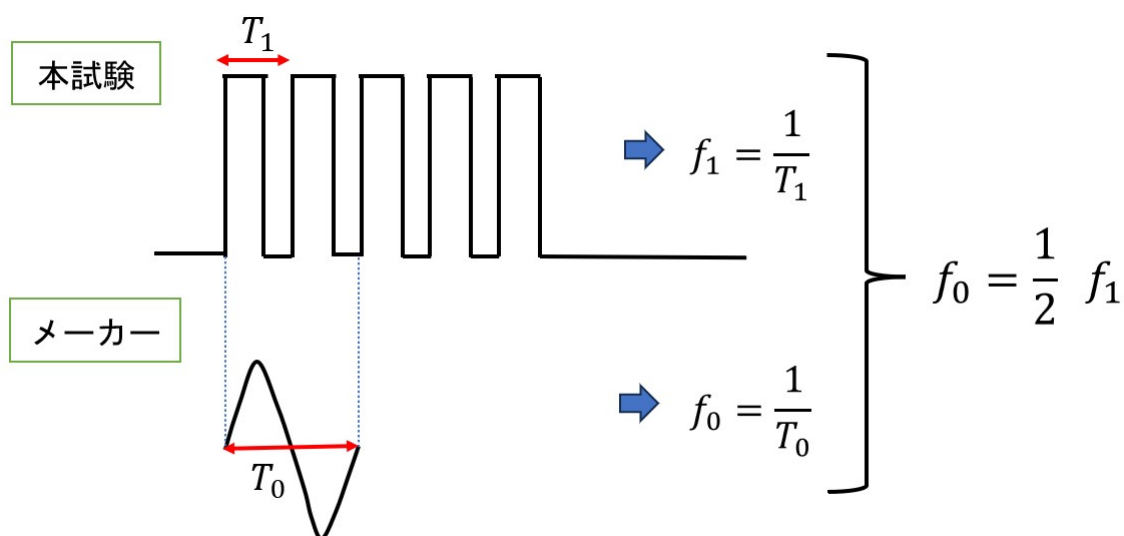


図 4.9: メーカーと本試験の入力信号の違い

全てのセンサーでも同様の周波数分布が得られるか確かめた。図 4.10 は冷水パイプ上に設置する予定の音響センサー 8 つについての周波数分布である。

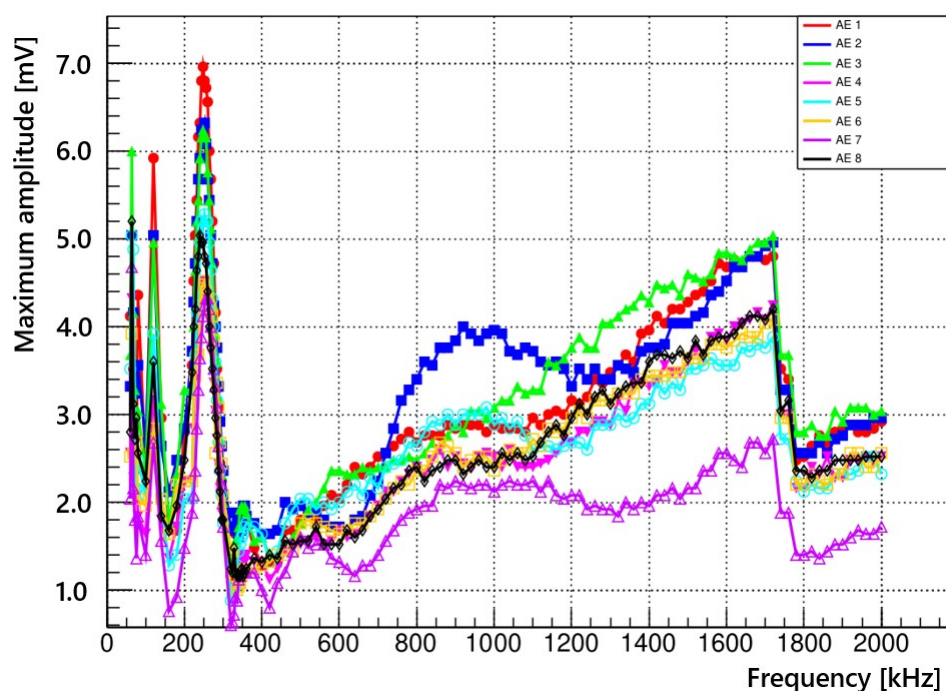


図 4.10: センサー 8 つの周波数分布の比較。AE 1 から AE 8 はセンサーを区別する名前である。

試験した 8 つのセンサーの共振周波数は全て 240 kHz から 250 kHz の範囲に入っている一方、振幅の大きさは 4 mV から 7 mV の違いがあった。センサーを交換する際に設置位置は同じにしていること、同一個体のセンサーを脱着して測定したところ振幅の大きさが変化することが認められたことから、センサーと冷水パイプの機械的結合の強さが接着剤の量に左右されることが振幅の大きさのばらつきの原因と考えた。そこで、出来る限り接着剤量の付け方に依存しないように、センサー接着時はホットメルトの引き金を同程度だけ引くことで、同じ接着剤量を出すことにした。また、接着時に接着部分にごみが入らないように音響センサーの受信板と接着部分にアルコールで拭くことにした。8 つのセンサー全てで幅広く感度があり、特に 150 kHz から 300 kHz までの周波数に対する感度が非常に高い。8 つの周波数分布の結果から、全てのセンサーで個体差がないことを確認できた。

4.1.3 振動源位置による最大振幅の変化

振動源位置 (a)、(b)、(c) の場合の位置①、②のセンサーの最大振幅を単一周波数ごとに調べたものを図 4.11 に示す。設置しているセンサーは固定している。振動源位置 3 箇所すべてで音源が発生しても共振周波数 250 kHz 付近で音波を捉えられることが分かった。

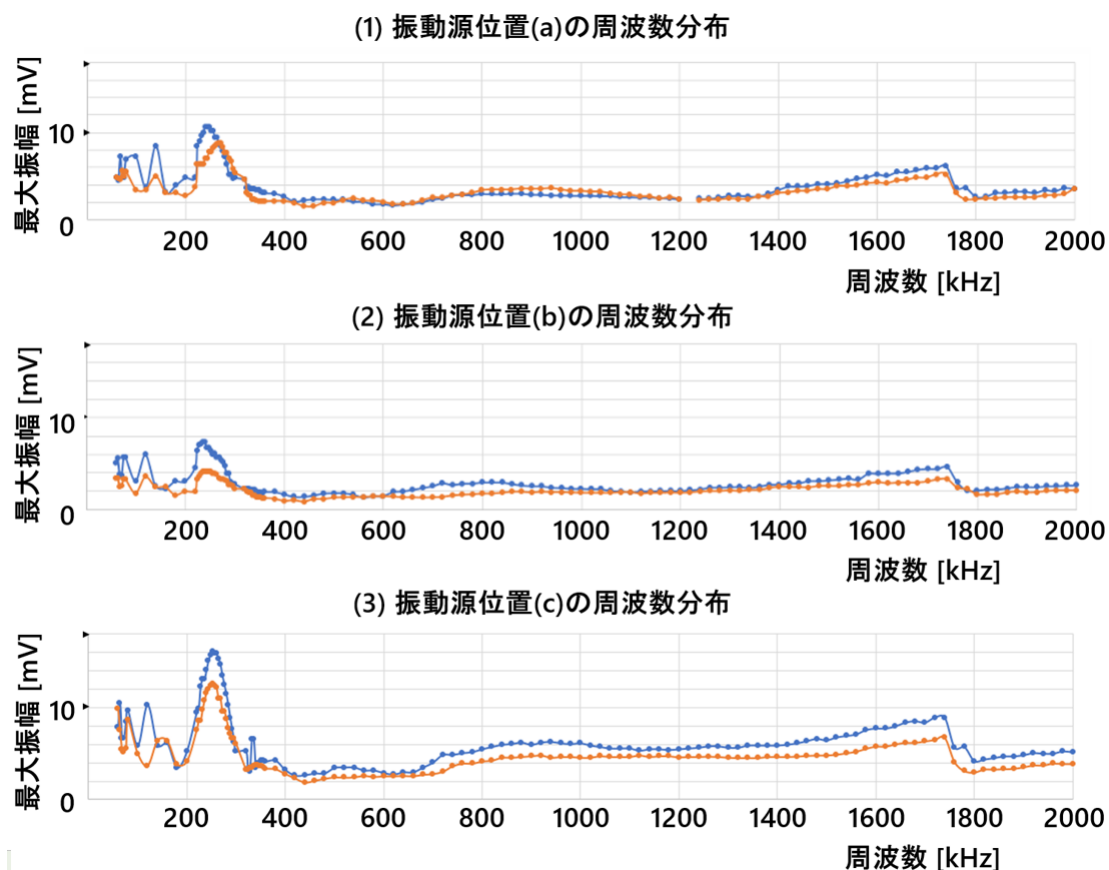


図 4.11: 振動源位置を変化させたときの周波数分布

4.2 静電気を用いた音響観測

4.2.1 静電気発生装置を用いた音響センサーの応答試験

放電が発生したとき、それに起因する超音波が発生し、かつそれを検出できるか調べる目的で、ヴァンデグラフ静電気発生装置を用いて静電気の放電を起こして音響センサーを試験した。放電とそれによる熱衝撃を与えるために用いたヴァンデグラフ静電気発生装置を図 4.12 に示す。

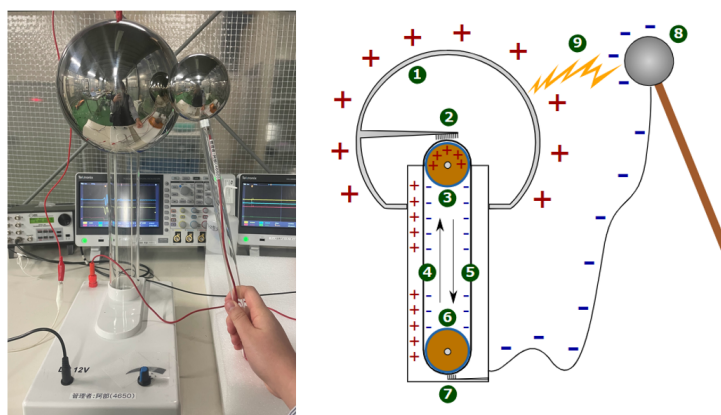


図 4.12: ヴァンデグラフ静電気発生装置の実際の写真と構造。

装置内のベルトを回転させることで、大きい球体側を正電荷、小さい球体側を負電荷に帯電させる。小さい球体を冷水パイプに近づけて、静電気を落とし熱衝撃を与えた。放電を落とした位置と音響センサー設置位置は図 4.13 に示す。センサー設置位置は①と②と③全て使用した。分かりやすくするためにセンサーの色を変えた。位置③は大気空間であるが、設置することが不可能な場所である。位置③に設置する理由は、静電気の落とす位置と離れた箇所にセンサーを設置したときに信号が他のセンサーより遅れて聞こえるかを確かめるためである。①と②はパルスジェネレータを用いた試験と同様の位置に設置した。

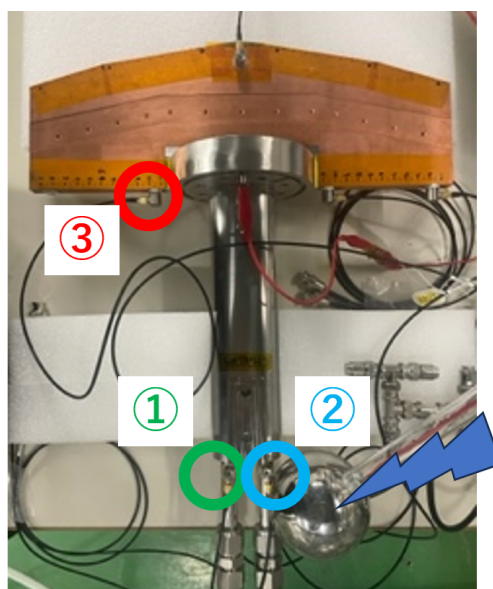


図 4.13: 静電気の落とす位置とセンサー位置。①、②、③の3箇所にセンサーを設置した。右側の冷水パイプ上に静電気を落とした。

静電気発生装置による放電の電流量は未知であり、大電流でオシロスコープが損傷することがないように、図 4.14 の回路図で示すように $50\ \Omega$ の抵抗を 5 個並列、つまり合成抵抗が $10\ \Omega$ になるようにして、放電による電流がこれを通る際の電圧降下を入力抵抗を $1\ \text{M}\Omega$ にしたオシロスコープで観測した。オシロスコープのトリガーは静電気を放電させたときの発生するインパルス状の成分を用いた。

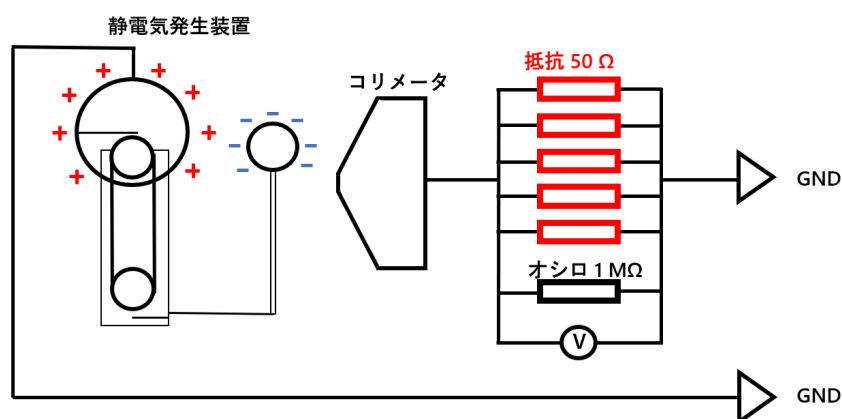


図 4.14: 静電気をコリメータヘッドへ落とすときのブロック図。

4.2.2 静電気による音響センサーの信号

位置②のセンサーの結果は図 4.15 のような音波である。

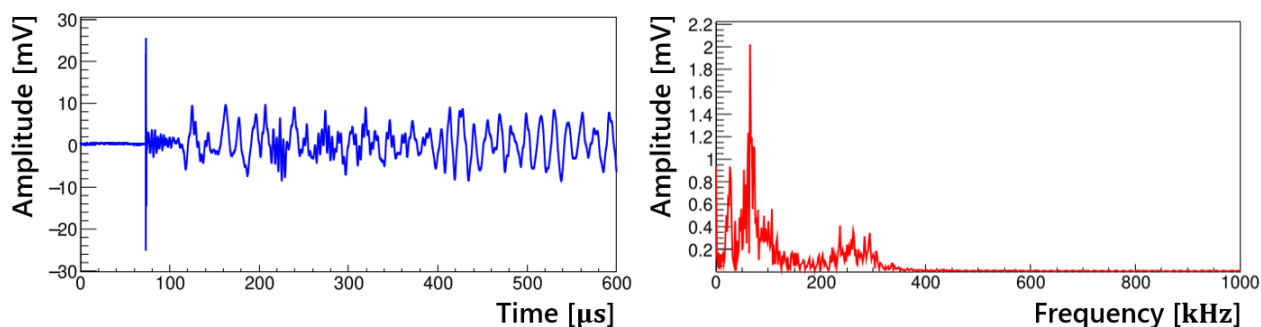


図 4.15: ②で観測された信号全体と FFT。一番初めのデータ点を $t=0$ とする。

図 4.15 (左) に示すセンサーの信号波形で、 $80\ \mu\text{s}$ 付近で鋭く立ち上がる振幅が $\pm 20\ \text{mV}$ を超すインパルス状のものは静電気の放電によるもので、その後に超音波の信号が数百 μs にわたって持続している。図 4.15 (右) は高速フーリエ変換により周波数の関数として強度の分布を表すものであり、主な寄与は $100\ \text{kHz}$ 付近と $250\ \text{kHz}$ 付近の成分である。

3 つのセンサーを比較したものを図 4.16 に示す。

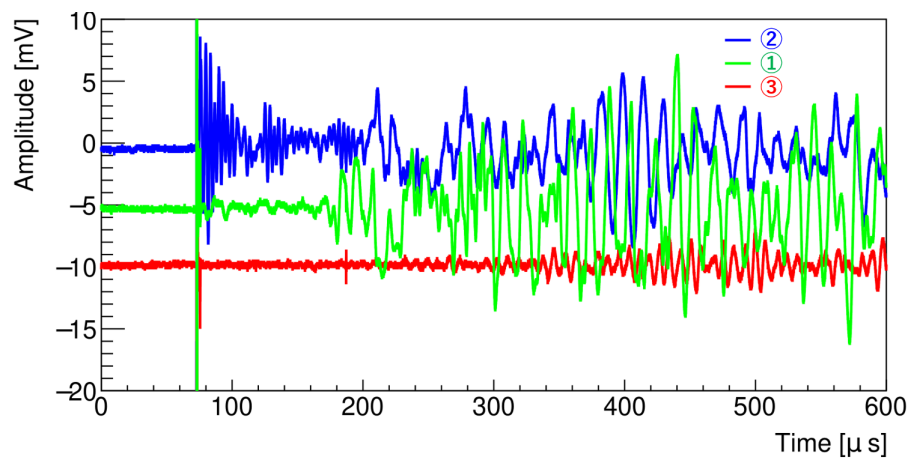


図 4.16: センサー位置が異なる場合の信号の比較。

3つのセンサーで、静電気が放電した際のインパルス状の成分が80 μs 付近にきゅおつうに見られる。その後に伝播してくる超音波の信号は放電場所からの距離が長いところが遅くなり、②、①、③の順番となっていることが確かめられた。つまり、センサーの位置に依存して信号の発生タイミングは異なる。

コリメータ付近に多くの音響センサーを配置し、それぞれの音波の発生時間を調べることで、音波がどこから発生したかを同定できる可能性がある。

第5章 加速器への音響センサーの設置

機器破損に至る深刻な SBL は陽電子リング上で発生頻度が高かったため、音響センサーの設置場所は陽電子リング上で入射が行われる位置から Belle II 測定器の直前までの区間に置かれたコリメータの中から選択した。本章では音響センサーの設置と予想される信号について述べる。

5.1 加速器で観測され得る音波に

冷水パイプ上の音響センサーで観測できる音波は、以下の 2 つによるものと考えられる。

- コリメータヘッド付近の放電
- ビームがコリメータに直接当たることで発生する熱衝撃

この二つの場合を区別するために、コリメータ付近のビームパイプ外側に純 CsI 結晶シンチレーターを光電子増倍管 (PMT) または電子増倍管 (EMT) で読み出すビームロスモニターを設置した。ビームロスモニターは数十 ns 程度の時間分解能を持つので、音響センサーの信号との時間的な前後関係に着目して弁別を試みることにした。それについて以下に詳しく述べる。

- コリメータヘッド付近の放電

図 5.1 はコリメータヘッドで放電が発生する事象の具体的な描写を示している。

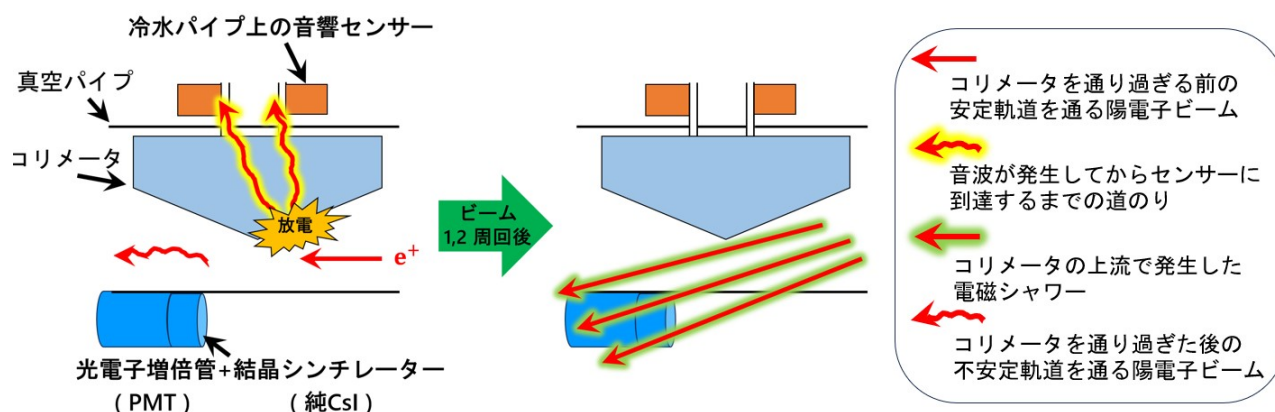


図 5.1: 放電発生時における音響観測の例

コリメータヘッドで放電が発生した場合、その熱衝撃によって音波が発生する。陽電子ビームが放電により相互作用を受けて安定な状態から不安定になる。

不安定になった陽電子ビームは SuperKEKB リングを周回するが、不安定になった陽電子ビームはリング内のあらゆる所でビームロスする。特に、アパーチャーの狭いコリメータ付近でロスをする。その後、コリメータ上流で発生した電磁シャワーがコリメータ下流に設置しているロスモニターに到達し、信号を検知する。放電が起きてビームが蹴られるとばらまかれたビーム粒子がロスモニターに届くのは1-2周遅れるという特徴をもつ。

- 放電によらないビームがコリメータに当たったことによる熱衝撃で発生した音波

図 5.2に放電以外の事由でビームがコリメータヘッドに当たって損失する事象で期待される現象を模式的に示す。

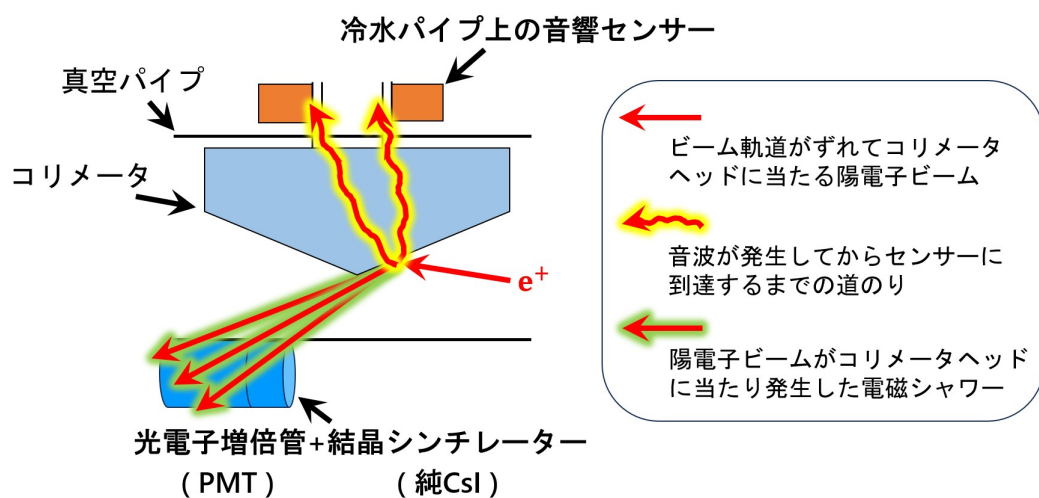


図 5.2: 電磁シャワーの具体的な描写

陽電子ビームがコリメータヘッドに当たることで熱衝撃が発生し、音波が発生する。また、電磁シャワーも同時に発生するため、ただちにコリメータ付近に設置したロスモニターがこれを検知すると考えられる。このような事象では、音波の発生時間とロスモニターの信号検知する時間は同じという特徴をもつ。

この2つの事象を区別するには音波の発生時間を算出する必要がある。リング 1-2 周の違いを識別できれば良いため、 $10\ \mu\text{s}$ 以下の時間分解能で算出することが求められる。本研究では、音波を共振器モデルに基づく関数でフィットすることで立ち上がりを要求された精度で算出可能にした。これについての詳細は 6 章で述べる。

ビームロス放電起因のものとそれ以外の事由によるものに弁別する機能を補強することを試みる意図で、コリメータヘッドの冷水パイプ以外にも音響センサーを設置した。具体的に、真空パイプ上と真空パイプ、コリメータとは機械的に離れた金属上に音響センサーを設置した。センサーをこのような箇所に設置し、放電事象を識別する方法を述べる。

- 放電による音波

放電を識別するためには、音響センサーをできるだけ沢山設置する必要がある。図 5.3 はコリメータ上で放電が発生した場合の音波の伝わり方の概念図である。

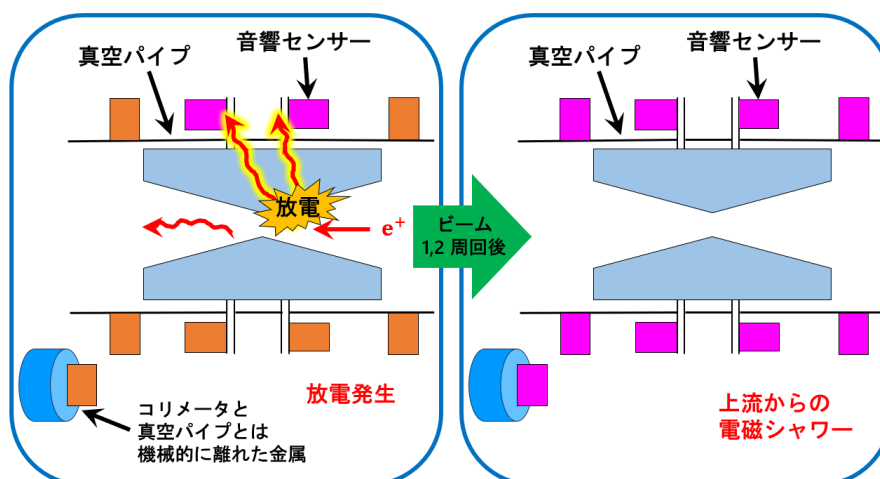


図 5.3: コリメータで放電が発生した場合の音の伝わり方。オレンジ色のセンサーは信号を検知していないもので、ピンク色のセンサーは信号を検知したものである。

コリメータ上で放電が発生すると、冷水パイプ上の音響センサーが一番初めに信号を検知する。不安定なビームがリング1,2周し、コリメータの上流側でビームロスし、電磁シャワーが遅れて到達する。全ての音響センサーが電磁シャワーの熱衝撃により遅れて信号を検知する。コリメータと真空パイプとは機械的に離れた金属に音響センサーを設置することで、放電磁シャワー起因の音波だけを検知することができる。

放電がコリメータだけでなく、真空パイプで発生した場合も区別できる。図 5.4は放電が真空パイプ内で発生する場合の信号の伝わり方の概念図である。放電が発生した場所に近い音響センサーが一番初めに信号を検知する。

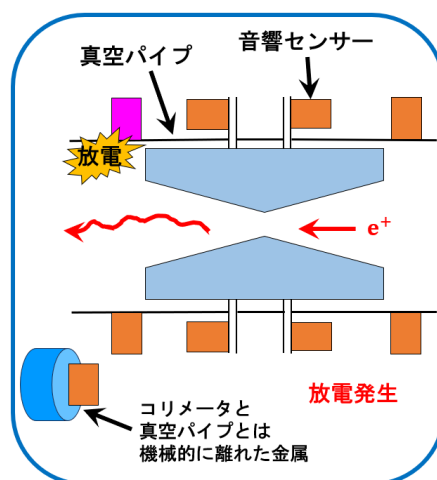


図 5.4: 真空パイプで放電が発生した場合の音の鳴り方

- 放電によらないビームがコリメータに当たったことによる熱衝撃で発生した音波

図 5.5はビームがコリメータに当たる場合の信号の伝わり方の概念図である。

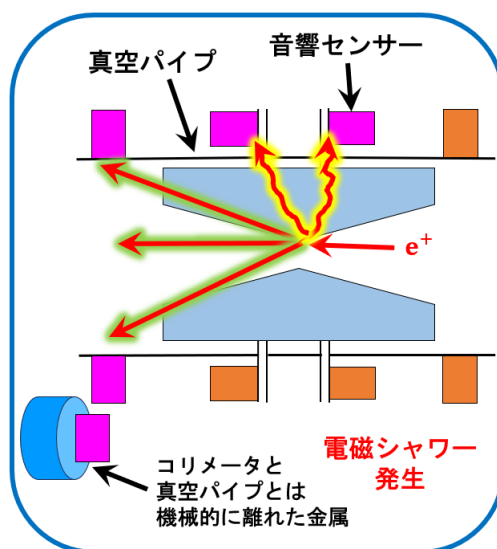


図 5.5: ビームがコリメータに当たるときの音の伝わり方

コリメータに当たる時の熱衝撃と発生する電磁シャワーによる熱衝撃でピンク色のセンサーで信号が検知される。

このように、真空パイプなどにも音響センサーを設置することで、信号の有無から放電とそれ以外の区別ができる。

5.2 音響センサー設置場所

図 5.6の赤丸を付けた箇所のコリメータ付近に音響センサーを設置した。本研究では、衝突点付近の垂直コリメータ (D2V1)、2022 年-2024 年に新しく導入した非線形垂直コリメータ (D5V1)、ビーム入射点付近の垂直コリメータ (D6V1, D6V2) の計 4 箇所に設置した。D2V1 コリメータと D5V1 コリメータは 2023 年 12 月に、D6V1 コリメータと D6V2 コリメータは 2024 年 5 月に音響センサーを設置した。

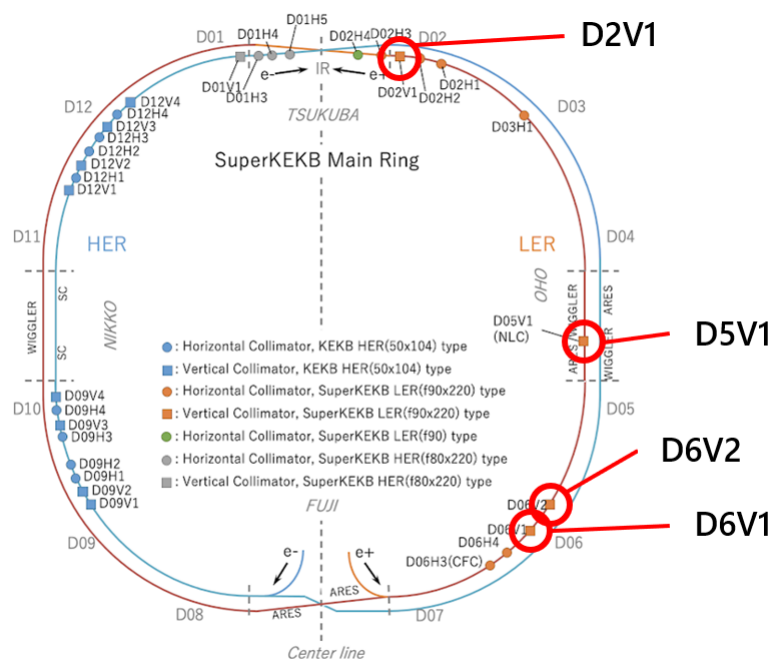


図 5.6: 音響センサーを設置したコリメータ位置

図 5.7は D5V1 コリメータ付近に設置した音響センサーの全体図を示す。赤四角で囲った部分に計 13 個の音響センサーをホットメルトで設置した。

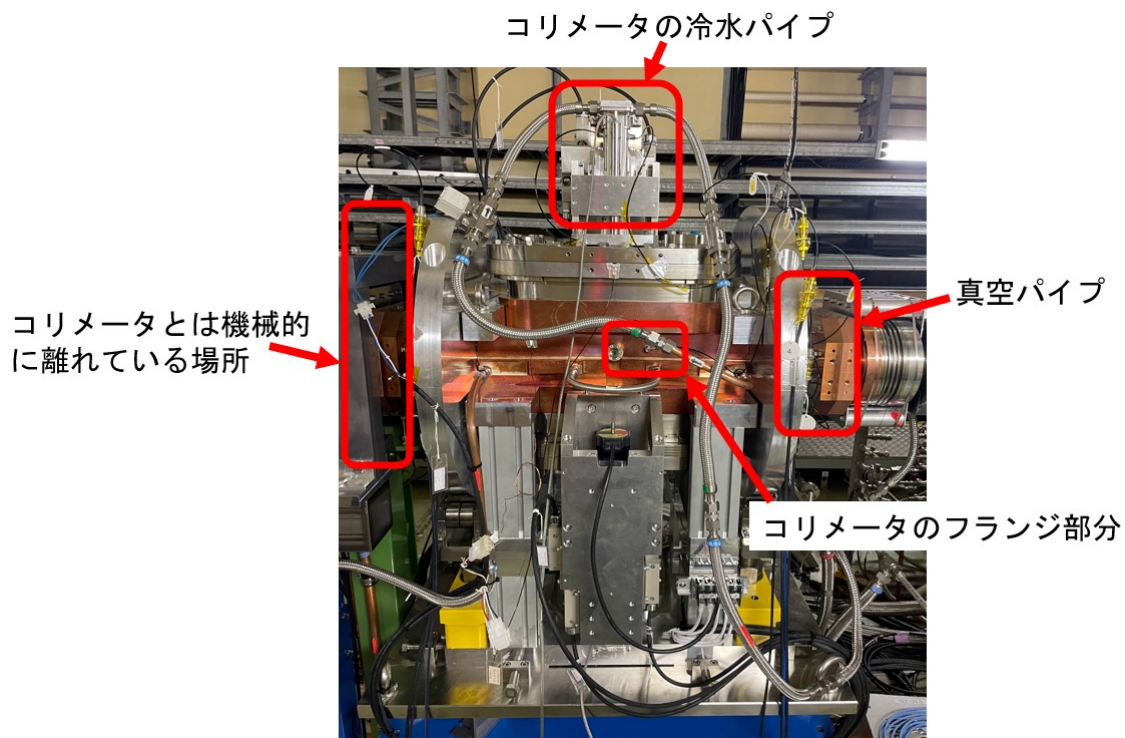


図 5.7: D5V1 コリメータ全体の様子

D5V1 コリメータの音響センサー設置位置は具体的に以下の通りである。

- 上側コリメータの冷水パイプ 2 個
- 下側コリメータの冷水パイプ 2 個
- 上流側の真空パイプ 2 個
- 下流側の真空パイプ 2 個
- コリメータと真空パイプとは機械的に離れた場所 2 個
- コリメータのフランジ部分 2 個

コリメータのフランジ部分は図で示す面の裏側も含めて 2 箇所ある。D5V1 コリメータと機械的に離れている箇所はビーム軸に対して下流側だけに設置されたビームロスによる放射線を防ぐ鉛シールドである。以降ここに設置した音響センサーを音響ロスモニターと呼ぶ。赤四角で囲った箇所の具体的な D5V1 コリメータの音響センサーの設置位置は図 5.8 に示す。

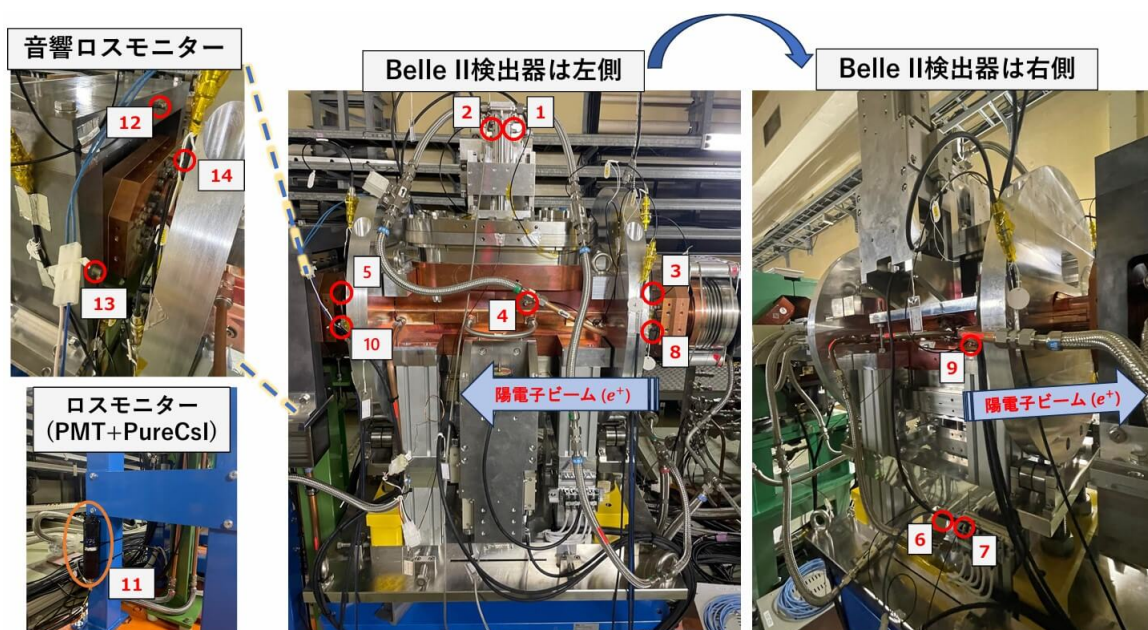


図 5.8: D5V1 の音響センサーの設置位置。陽電子ビームの矢印の方向に衝突点である Belle II 測定器がある。番号はケーブル番号であり、番号 1 から 10 と 12 から 14 の 13 個が音響センサーに充てた。番号 11 はロスモニターである。

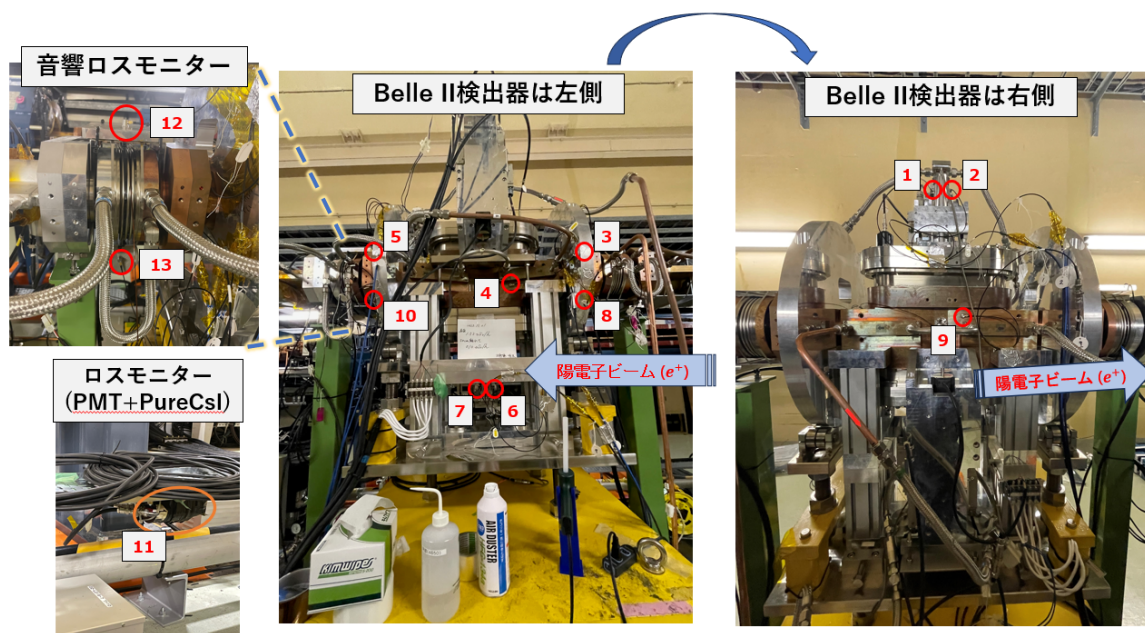


図 5.9: D2V1 コリメータの音響センサーの設置位置。

D2V1 コリメータの音響センサー設置位置は図 5.9に示す。D5V1 コリメータと D2V1 コリメータとの違いは音響ロスモニターの個数である。D5V1 コリメータの下流には鉛シールドが設置されており、その部分に音響ロスモニターを設置できた。D2V1 コリメータは下流にコリメータと真空パイプと機械的に離れた金属が無いので、13 番センサー側にアルミブロック、14 番センサー側に鉄ブロックを結束バンドで固定した。そのため、D2V1 コリメータの音響ロスモニターでは音響ロスモニターを 2 個にした。

D6V1 コリメータと D6V2 コリメータの全体をそれぞれ図 5.10と図 5.11に示す。必要機材に限りはがあったため、D6V1, D6V2 コリメータは計 2 個のセンサーを上下の冷水パイプに 1 個ずつ設置した。冷水パイプ上に音響センサーは設置できたため、コリメータヘッド上の放電を捉えることは可能である。

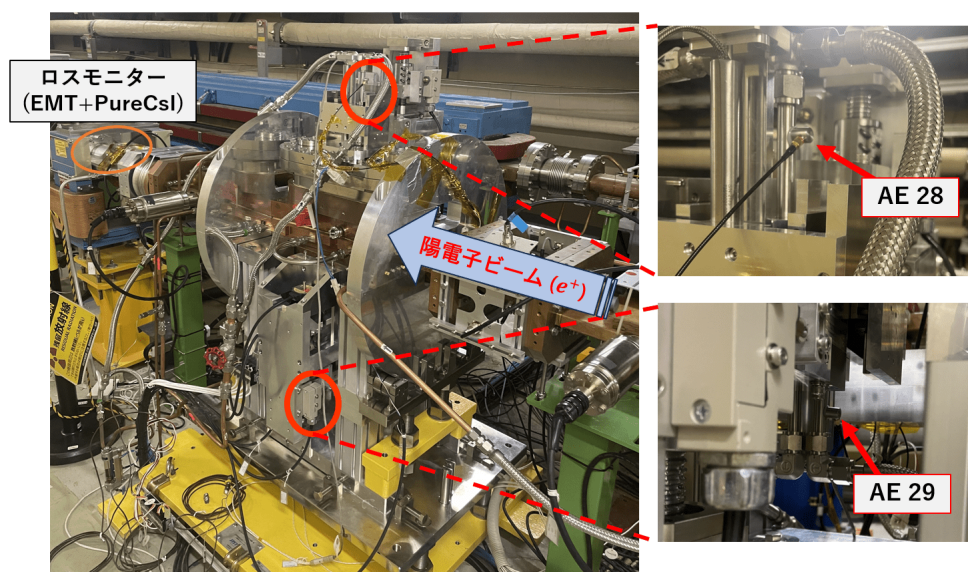


図 5.10: D6V1 コリメータ全体の様子

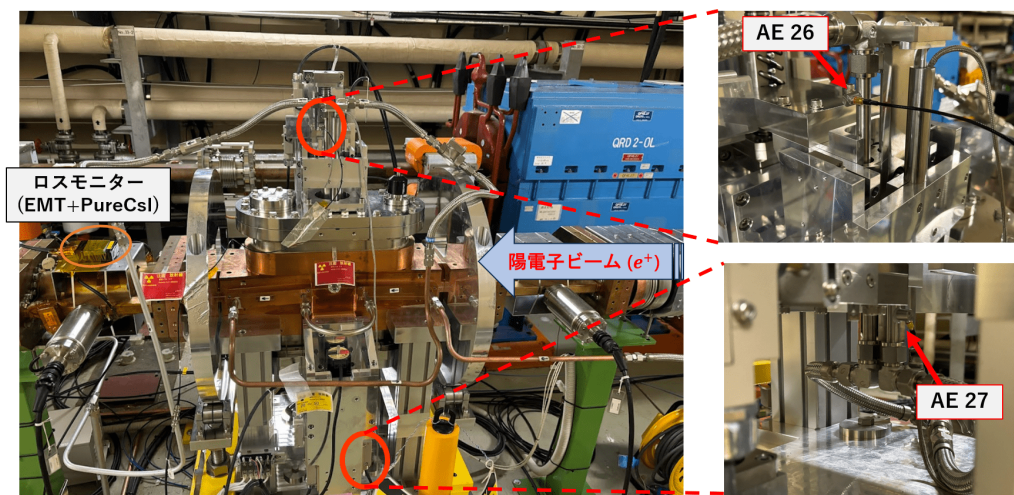


図 5.11: D6V2 コリメータ全体の様子

5.3 音波収集システム

4章で述べたように音響センサーの信号は数 mV と微弱であるため、音響センサーとオシロスコプのケーブル長はなるべく短くしたい。これは信号の立ち上がり時間を高精度で捉えるためにも重要である。そこで、図 5.12 のようにオシロスコプはトンネル内に設置した。D2V1, D5V1 コリメータの近くには副通路と呼ばれるメインリングに対してコンクリートで遮蔽された通路がある。放射線によるオシロス

コープの通信不良を防ぐために、この副通路にオシロスコープを設置した。さらに、鉛シールドでオシロスコープを覆う対策も施した。D2V1 のオシロスコープも D5V1 と同様に副通路に 5 台のオシロスコープがあり、鉛シールドを被せた。

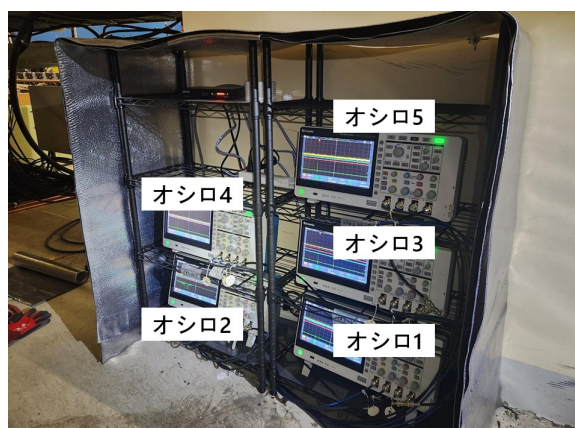


図 5.12: トンネルの副通路内に設置した D5V1 のオシロスコープ設置の様子

一方、D6V1、D6V2 コリメータの近くには副通路はない。そのため、図 5.13、図 5.14のようにオシロスコープ 1 台を鉛ブロックと鉛シールドで囲うことで、放射線による被害の低減を行った。

加速器の運転状況にもよるが、D6V1、D6V2 コリメータ用のオシロスコープに与えるダメージは副通路に設置していないことから大きく、1-2 週間でオシロスコープとの通信が途切れる事態が頻発していた。しかし、2 週間に 1 回加速器内へ入れる機会を利用して、オシロスコープをリブートできた。そのため、運転中おおよそ問題なくデータ取得できた。



図 5.13: D6V2 のオシロスコープを鉛ブロックで囲う様子

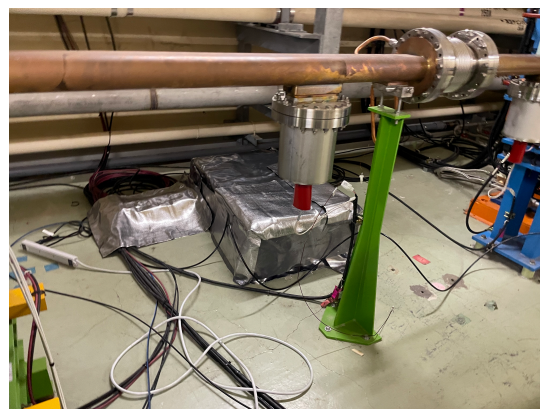


図 5.14: D6V2 のオシロスコープをトンネル内に設置した様子

5.3.1 信号取得方法

オシロスコープのトリガー信号は陽電子ビーム側のビームアボート信号 (LER アボート) を用いた。この信号を採用した理由を以下で述べる。

放電により SBL 事象が発生した場合、放電発生後、遅くとも 10-20 μ s 後にはビーム損失すると考えている。発生したビームロスロスモニターで検知され、ビームアボート信号が発報される。

放電を捉えるためには音響センサーの信号発生時間が重要であり、そのため設置した全ての音響センサーの時刻の同期をとる必要がある。ビームアボート信号を発報する中央制御棟とコリメータとのケーブル長の違いがあるが、ビームアボート信号は共通の信号として全てのオシロスコープに配ることができて、音響センサー全ての時刻の同期がとれる。よって、LER アボート信号をトリガー信号として採用した。

D5V1 と D2V1 コリメータのオシロスコープ 5 台はトリガー信号を並列でつなぐことで共通のトリガー信号を用いた。D6V1 と D6V2 コリメータのトリガー信号も同様である。

したがって、ビームアボート信号はトリガー信号としてだけでなく、それぞれのオシロスコープとの同期が容易になるという良い点がある。

5.3.2 オシロスコープとチャンネルの対応関係

D5V1, D2V1, D6V1 と D6V2 全てのオシロスコープのチャンネルと対応しているものをそれぞれ表 5.1-5.3 に示す。ロスモニターとは PMT 信号のことを指す。

表 5.1: D5V1 に設置したオシロスコープのチャンネルの対応表。表の () 内の数字は図 5.8 の数字と対応している。「AE 数字」は AE センサーを区別するための名前である。

	オシロ 1	オシロ 2	オシロ 3	オシロ 4	オシロ 5
チャンネル 1	AE 3 (3)	AE 1 (1)	AE 5 (5)	AE 10 (10)	AE 12 (13)
チャンネル 2	AE 4 (4)	AE 2 (2)	AE 8 (8)	ロスモニター (11)	
チャンネル 3	AE 7 (7)	AE 6 (6)	AE 9 (9)	AE 11 (11)	AE 13 (14)
チャンネル 4	LER アボート信号	LER アボート信号	LER アボート信号	LER アボート信号	LER アボート信号

5.4 音響システムの検証

音響システムの検証のために、音響センサー設置後に以下の試験を行った。

表 5.2: D2V1 に設置したオシロスコープのチャンネルの対応表

	オシロ 1	オシロ 2	オシロ 3	オシロ 4	オシロ 5
チャンネル 1	AE 16 (3)	AE 14 (1)	AE 18 (5)	AE 23 (10)	AE 25 (13)
チャンネル 2	AE 17 (4)	AE 15 (2)	AE 21 (8)	ロスモニター (11)	
チャンネル 3	AE 20 (7)	AE 19 (6)	AE 22 (9)	AE 24 (11)	
チャンネル 4	LER アポート信号	LER アポート信号	LER アポート信号	LER アポート信号	LER アポート信号

表 5.3: D6V1 と D6V2 に設置したオシロスコープのチャンネルの対応表

	D6V1	D6V2
チャンネル 1	AE 28	AE 26
チャンネル 2	ロスモニター	ロスモニター
チャンネル 3	AE 29	AE 27
チャンネル 4	LER アポート信号	LER アポート信号

- セルフトリガーで信号応答の確認

音響センサーを接着し、センサーの脱着とケーブルに問題がないかセルフトリガーで確かめた。それぞれの音響センサーの設置位置付近を叩くことで音波を発生させ、音波が取得できるか検証した。全ての音響センサーに対して行い、接着とケーブルに異常がないことを確認した。

- トリガー信号の受信について

1.5 V の乾電池を用いてトンネル内にあるオシロスコープと地上の陽電子ビームアポート信号が送られる間のケーブル上で問題なく信号が送信できるかを確認した。

アポート信号は中央制御棟から各制御室へ分配される。各制御室から地下のそれぞれの区間の中継端子板まで信号は運ばれている。この端子板とオシロスコープが接続されている。図 5.15 に示すように、各制御室から地下の端子板へ伸びるケーブルに乾電池をつないだ。



図 5.15: 疑似アボート信号を入力している様子

各制御室からオシロスコープまで信号を届けるケーブルと乾電池をつなぎ、オシロスコープが乾電池から送られる 1.5 V の信号でトリガーされるか確かめた。結果として図 5.16 のように疑似アボート信号は問題なく観測できた。全てのオシロスコープでトリガー信号が届いていることを確認できた。

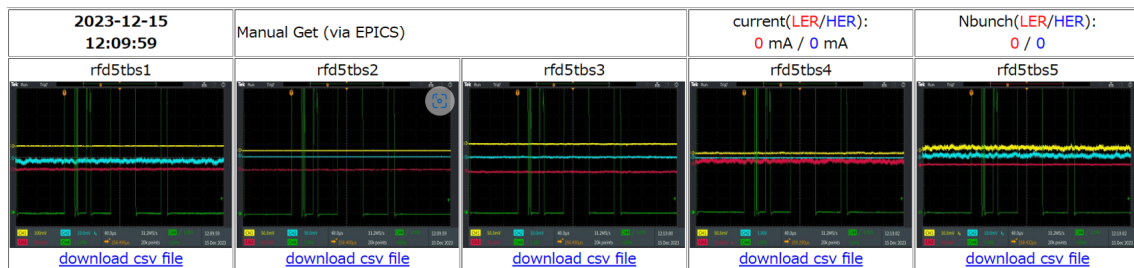


図 5.16: 乾電池を用いた疑似アボート信号の入力結果

以上の内容から、LER アボート信号に同期して全音響センサーの信号を取得することがわかった。これにより複数の音波の発生タイミングの違いを同定することが容易であり、放電か否かを区別できる。定量的な評価を行うためには、冷水パイプ上の音響センサーで発生した音波の立ち上がり時間を算出する必要がある。次章で音波発生時間の算出方法について述べる

第6章 シングルバンチ運転による試験と解析 手法の確立

本章では、放電事象と区別するために、コリメータに陽電子ビームを当て音波を発生させた試験を行い、音波伝播時間を算出方法について詳細に述べる。音波伝播時間とはコリメータヘッドで音波が発生してから冷水パイプ上の音響センサーへ到達するまでの時間である。

6.1 シングルバンチ運転による試験データの収集

コリメータに陽電子のシングルバンチを当てる試験を行った。シングルバンチとは1個のバンチという意味である。運転中は複数個のバンチをリング内に蓄積しているが、どのバンチがコリメータに当たったかを明確にしたいので、シングルバンチを採用した。図6.1に示すように、指定のコリメータ、例えばD5V1にバンチを当てることができる。

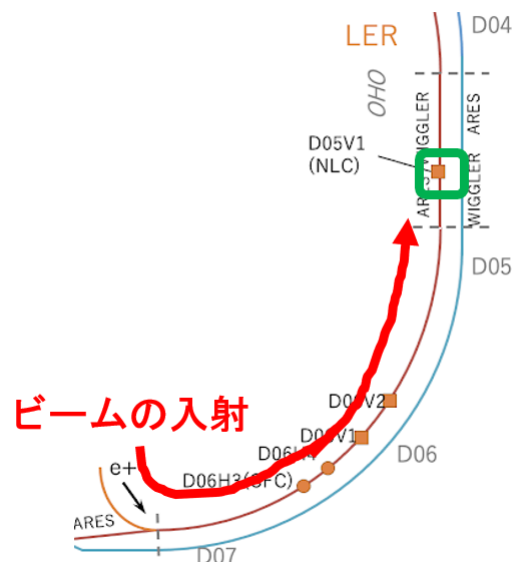


図 6.1: シングルバンチを指定のコリメータに当てる様子

バンチの電荷量は 0.5 nC で、シングルバンチは安定な状態で SuperKEKB リング

に入射される。シングルバンチの軌道はコリメータの上流と下流部分にある電磁石を用いて変えることができる。具体的には、シングルバンチの軌道をコリメータ付近でビームをコリメータ側へ寄せ、コリメータ通過後は元のビーム軌道位置へ戻るように設定する。例として2月に行われたD5V1コリメータ付近で、電磁石とコリメータの設置位置と軌道をコリメータに当たるように変化させた様子を図6.2に示す。

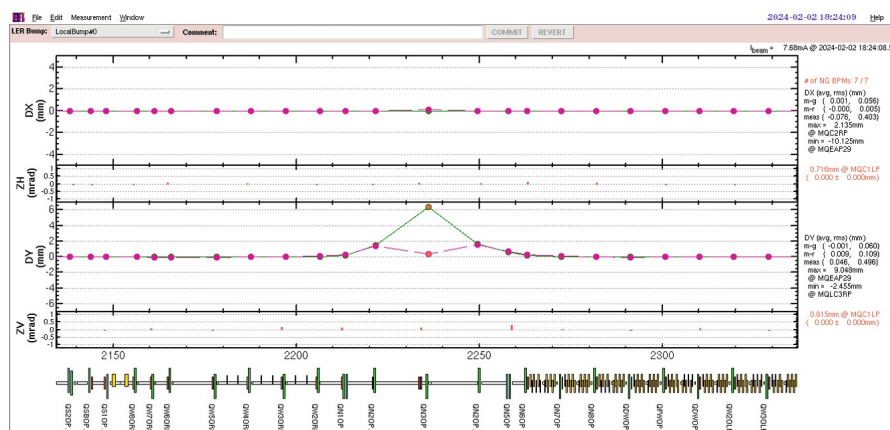


図 6.2: 電磁石とコリメータの位置と陽電子ビーム軌道の様子。縦軸 DX,DY は真空パイプを輪切りににしたとき、ビームの水平方向を DX 軸、垂直方向を DY 軸とした際のビームの位置を表す。一番下の緑印の位置に電磁石が設置されている。

図 6.3はコリメータにシングルバンチを当てるときの概要図である。

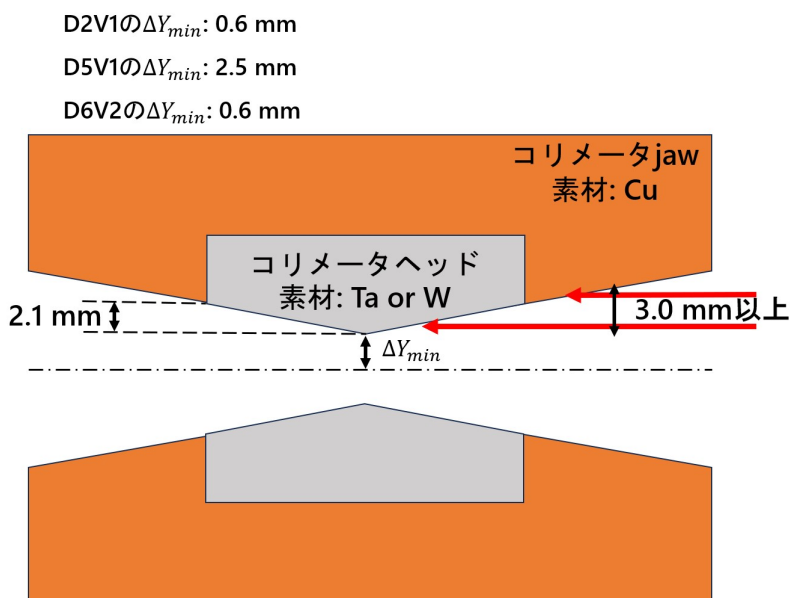


図 6.3: シングルバンチをコリメータヘッドに当てる概要図

$\Delta Y_{\min}$ とは、コリメータを一番閉めた時のコリメータヘッドとビーム軸の間隔である。コリメータヘッドからビーム軸の垂直方向に 2.1 mm 以内とそれ以上で軌道を変えると、異なる素材にシングルバンチを当てることができる。異なる素材にシングルバンチを当てて信号の変化も確認したいので、コリメータヘッドから 3.0 mm 以上、軌道を変えた。

図 6.2 で示すようにビームに垂直な方向へ軌道を変えることをバンプを立てるという。D5V1 の場合、バンプの高さは 6.08 mm である。 $\Delta Y_{\min}$ の幅によってバンプの高さを変え、シングルバンチが確実に当たるようにした。D2V1、D5V1、D6V2 コリメータでのシングルバンチの電荷量、 $\Delta Y_{\min}$ 、バンプの高さを表 6.1 にまとめた。

表 6.1: シングルバンチの電荷量と $\Delta Y_{\min}$ とバンプの高さ

	電荷量 [nC]	$\Delta Y_{\min}$ [mm]	バンプの高さ [mm]
D2V1	0.5	0.6	4.06
D5V1	0.5	2.5	6.08
D6V2	3.0	0.6	4.70

シングルバンチの電荷量と軌道は固定した。コリメータはビーム軸に対して垂直方向へ $\Delta Y_{\min}$ の幅になるまで閉めた。この状態からコリメータを 1 mm ずつ引き抜く。

同じシングルバンチを当てる場合は同じ音波発生時間が算出できるかを調べるために、コリメータを動かす毎にシングルバンチを 5 回コリメータに当てた。トリガーはコリメータ下流にあるロスモニター信号の立ち上がり時間を用いて音波を観測した。ロスモニター信号が検知されなくなるまでコリメータを引き抜き続けた。垂直コリメータ上側の movable jaw (TOP) に戻して行った後、垂直コリメータ下側の movable jaw (BTM) でもバンプの高さを逆方向に変えて同様の試験を行った。コリメータごとにロスモニター信号が観測される続けるコリメータの動く範囲をまとめたものが表 6.2 である。

表 6.2: ビームが当たるコリメータの動く範囲

	D2V1 [mm]	D5V1 [mm]	D6V2 [mm]
TOP	[3.5, 6.5]	[3.5, 7.5]	[0.6, 4.6]
BTM	[-6.5, -3.5]	[-10.5, -3.5]	[-4.6, -0.6]

2024 年 2 月に D2V1、D5V1 コリメータ、2024 年 5 月に D6V2 コリメータで行った。SuperKEKB 運転の都合上、D6V1 コリメータを用いた試験は行えなかった。D6V1

コリメータと D6V2 コリメータは同じ材質を用いているので、D6V1 コリメータの音波伝播時間は D6V2 コリメータの結果を用いることにした。

6.2 音波伝播時間の算出方法

D5V1 コリメータ TOP が 2.5 mm 位置のときの冷水パイプ上の音響センサーと PMT 信号のオシロスコープのスクリーンショットを図 6.4 に示す。

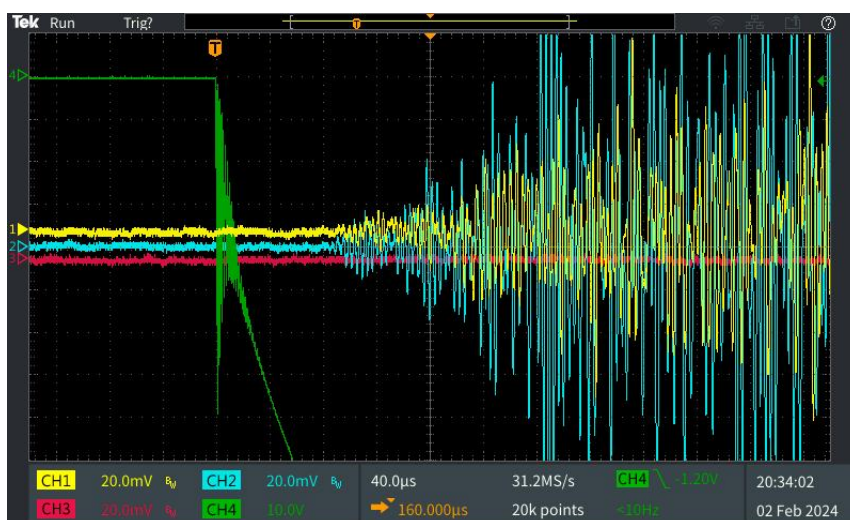


図 6.4: D5V1 TOP にシングルバンチを当てたときの信号。チャンネル 1、チャンネル 2、チャンネル 4 はそれぞれ AE 1、AE 2、ロスモニター信号である。プローブファクター 10 がかかっている。

ロスモニター信号が長い時定数をもってしまっている理由は、オシロスコープの終端抵抗を間違えていたためである。本試験ではロスモニター信号の立ち上がりのみを用いるので、音波伝播時間の算出に影響はない¹。チャンネル 1,2 はそれぞれ 5.8 節の番号 1,2 の冷水パイプ上に設置した音響センサーの信号である。次に、ロスモニター信号を時刻の基準として、音響センサーの信号が立ち上がる時間、すなわち信号伝播時間を波形データから算出する方法について述べる。

6.2.1 コリメータヘッドにバンチが当たる時間の推定

図 6.4 のロスモニターの信号を見るとわかるように、信号は約 10 ns でピークに到達している。音波の時間スケール (数十 μ s) に比べて十分短いため、ノイズレベルより十分大きい閾値を課して信号の有無を判別すれば十分である。本試験では、1.2 V の

¹本試験が終わった後に修正した。

閾値を設定し、この閾値を超えた時間をロスモニターで信号が観測された時間と定義した。次にコリメータヘッドにバンチが当たり電磁シャワーが発生し、ロスモニターに到達するまでの時間を PHITS シミュレーション [13] から推定した。図 6.5 と図 6.6 は、コリメータヘッドとロスモニターの距離を示す。

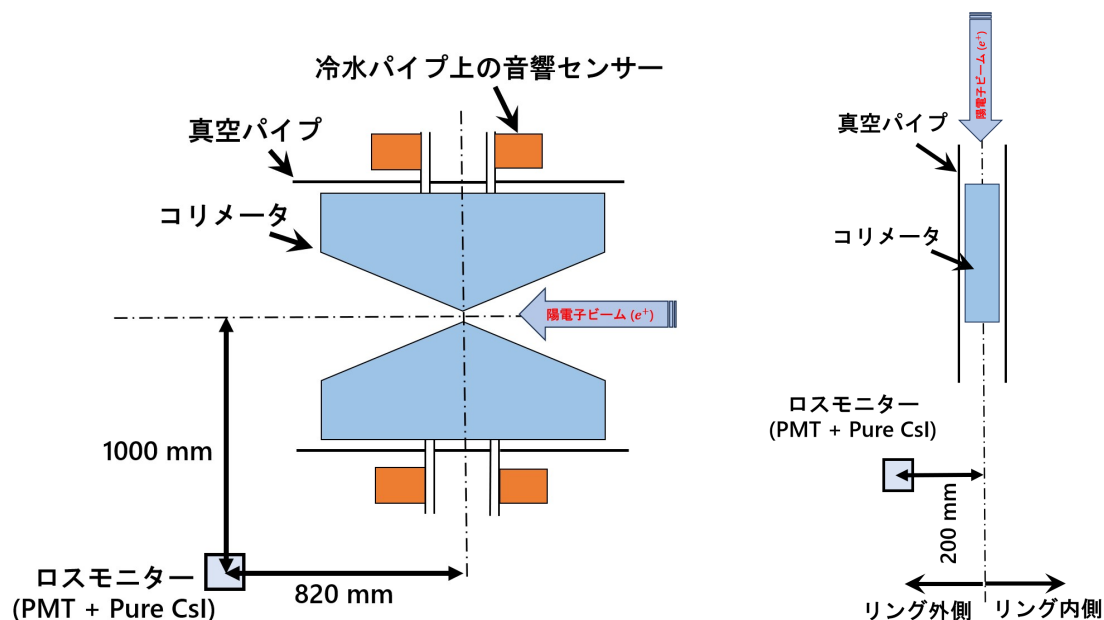


図 6.5: D5V1 をリング内側からみたロスモニター位置

図 6.6: D5V1 を上からみたロスモニター位置

光速で電磁シャワーがコリメータヘッドからロスモニターに到達するまでは 4.4 ns であることが分かった。加えて、ロスモニター内で信号が増幅される時間は 16 ns、ロスモニター信号がオシロスコープに到達するまで時間はケーブル長から考慮すると 114 ns である。よって、ロスモニター信号の時間の 134 ns 前にコリメータで電磁シャワーが発生したと見積もれる。電磁シャワーの発生と音波発生タイミングは同じなので、ロスモニター信号から音波伝播時間を算出した。

6.2.2 音波発生時間の算出

D5V1 コリメータ TOP が 3.5 mm 位置のときの AE02 センサーの信号を図 6.7 に示す。

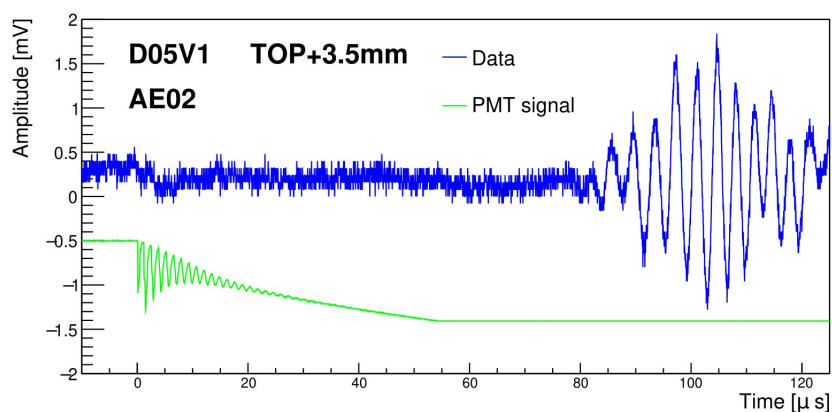


図 6.7: D5V1 コリメータ TOP の開度が+3.5 mm である時の音波

横軸の $t=0$ はコリメータヘッドで熱衝撃が発生した時間を基準にした。次に音響センサーの信号全体を高速フーリエ変換 (FFT) したものがそれぞれ図 6.8 である。

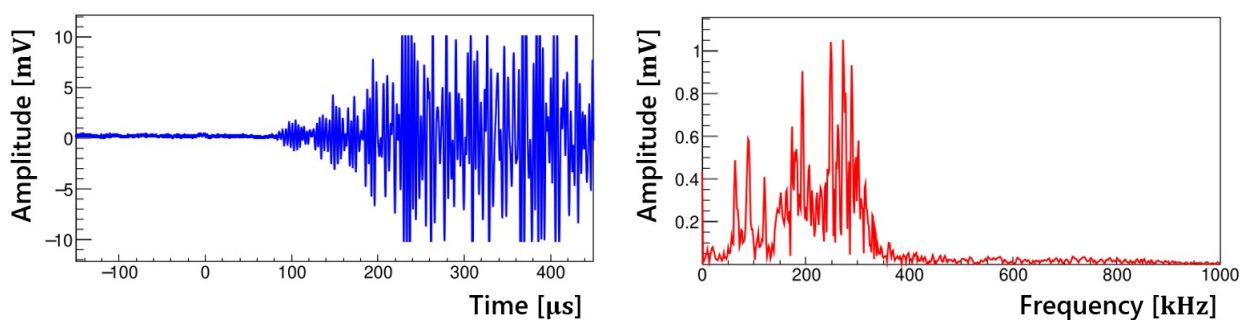


図 6.8: D5V1 コリメータ TOP の開度が+3.5 mm である時の音波と FFT

左のグラフが音波、右のグラフは上のグラフで示す範囲で高速フーリエ変換したものである。テストベンチと同様、信号全体の高速フーリエ変換では様々な周波数成分が含まれていることが分かった。次に立ち上がり部分にだけ着目して高速フーリエ変換した。

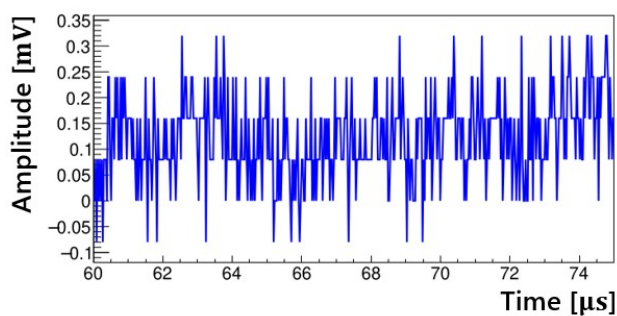


図 6.9: D5V1 コリメータ TOP
の開度が+3.5 mm である時の 60-
75 μ s の範囲の音波と FFT

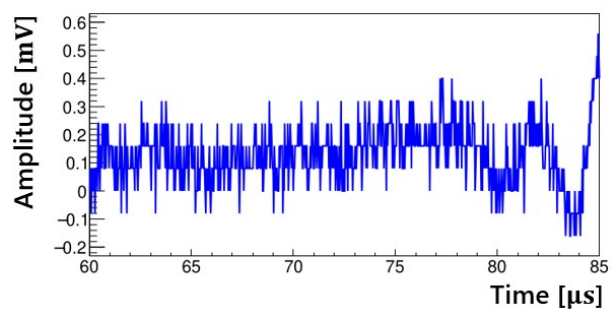


図 6.10: D5V1 コリメータ TOP
の開度が+3.5 mm である時の 60-
85 μ s の範囲の音波と FFT

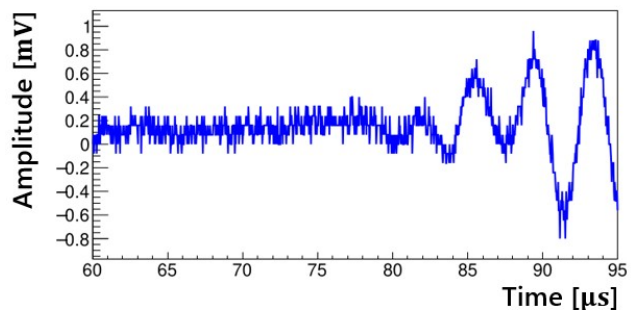


図 6.11: D5V1 コリメータ TOP
の開度が+3.5 mm である時の 60-
95 μ s の範囲の音波と FFT

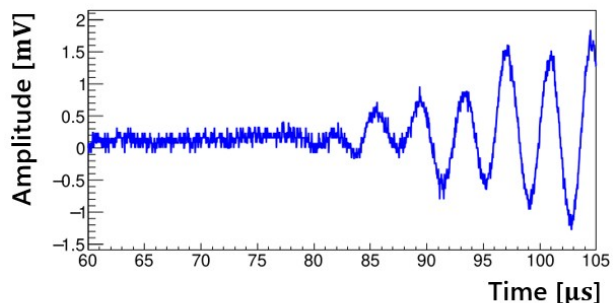


図 6.12: D5V1 コリメータ TOP
の開度が+3.5 mm である時の 60-
105 μ s の範囲の音波と FFT

信号の 60 μ s から 75 μ s、60 μ s から 85 μ s、60 μ s から 95 μ s、60 μ s から 105 μ s の 4 つの範囲で FFT における周波数分布を図 6.9-図 6.12に示す。図 6.9の範囲の音波は信号がない部分で、高速フーリエ変換すると 0 kHz 付近に寄与があり、雑音による周波数成分が見える。図 6.10のように信号が一部入る範囲で高速フーリエ変換すると、0 kHz 付近と 200-400 kHz に分布が見られた。図 6.11のグラフは高速フーリエ変換の範囲をさらに広げた音波の信号で、200-400 kHz に分布する成分の寄与がさらに大きくなっていることが分かった。図 6.12のグラフは左側のグラフよりも 10 μ s までの範囲の信号を高速フーリエ変換したもので、0 kHz 付近の分布、0-200 kHz の分布、200-400 kHz の分布にピークが見られた。このように信号がない部分から信号の立ち上がり部分の範囲で高速フーリエ変換すると 0 kHz 付近の周波数成分は雑音で、0-200 kHz と 200-400 kHz の周波数成分が音響センサーの信号であることが分かった。

音響センサーの信号の立ち上がり部分に着目すると主に 2 つの周波数成分の寄与があるため、共振器モデルに基づく 2 つの周波数を含む関数で立ち上がり部分をフィットした。フィット関数は式 6.1である。

$$f(t) = A_1 \left(1 - e^{\frac{\omega_1}{2Q_L}(t-t_1)}\right) \sin(\omega_1(t-t_1))U(t-t_1) + A_2 \left(1 - e^{\frac{\omega_2}{2Q_L}(t-t_2)}\right) \sin(\omega_2(t-t_2))U(t-t_2) + \text{offset} \quad (6.1)$$

この式は周波数に対応する 2 つの角振動数 ω_1, ω_2 の成分に対応する共振器モデルを足し合わせた関数である。 $A_1, A_2 (> 0)$ は漸近振幅、 $t_1, t_2 (> 0)$ は音波の立ち上がり時間、offset はベースライン、 $U(t)$ は階段関数である。 Q_L 値とは、空洞共振気の性能を評価する指標で、どれだけ効率的にエネルギーを保持できるかを示す。 Q_L は共振器の形で決まるので、共振器固有の値を持つ。 Q_L の定義は

$$Q_L = \frac{\omega}{\Gamma} \quad (6.2)$$

である。 ω は最大信号強度のときの角周波数、 Γ は半値全幅といい、オシロの観測電圧を dB パワー表記へ変換した際の最大信号強度から 3 dB 落ちる周波数の範囲である。まず ω と Γ を求める。 Q_L を求めるために、図 4.3で示した冷水パイプ上に設置したセンサー全ての周波数分布を用いる。縦軸の振幅からパワー表記へ変換した周波数分布を作成する。振幅を V_{OSC} [V]、パワーを L [dB] とすると、

$$L = 10 \log_{10} \frac{(V_{\text{OSC}})^2}{1 M\Omega} \quad (6.3)$$

のように変換できる。先ほどの振幅における周波数分布の縦軸をパワー表記に変換したものが図 6.13になる。

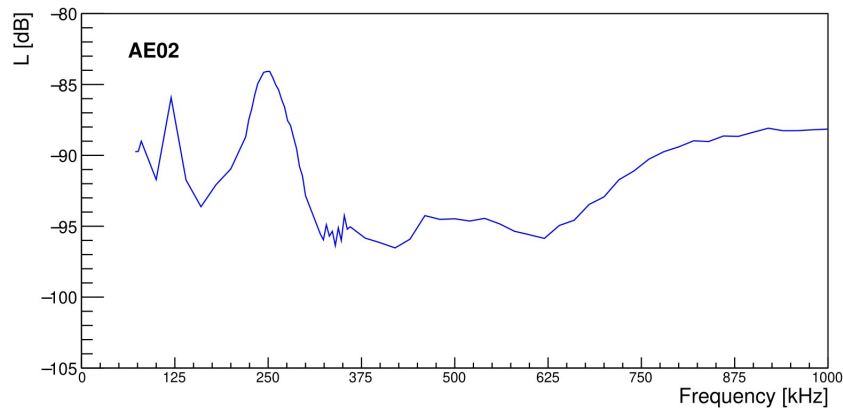


図 6.13: AE02 の振幅をパワー表記へ変換したときの周波数分布

この分布の最大信号強度から 3 dB 落ちたところの周波数の範囲を求めることで Γ を算出できる。よって、AE02 センサーの Q_L は 33.0 である。このように冷水パイプ上に設置する音響センサー全て、同様に Q_L を求めて平均値をとると 32.4 であった。この値はメーカーが示す 29.4 の値から大きく異ならないと判断し、今後の音響センサーの立ち上がり時間算出時に固定パラメータとして扱った。

フィット範囲は 0-200 kHz と 200-400 kHz の 2 つの周波数成分の寄与がある、60 μ s から 110 μ s に固定しフィットした。D5V1 の TOP コリメータの位置が +3.5 mm のときの AE02 のセンサーで観測された信号をフィットした結果が図 6.14 である。

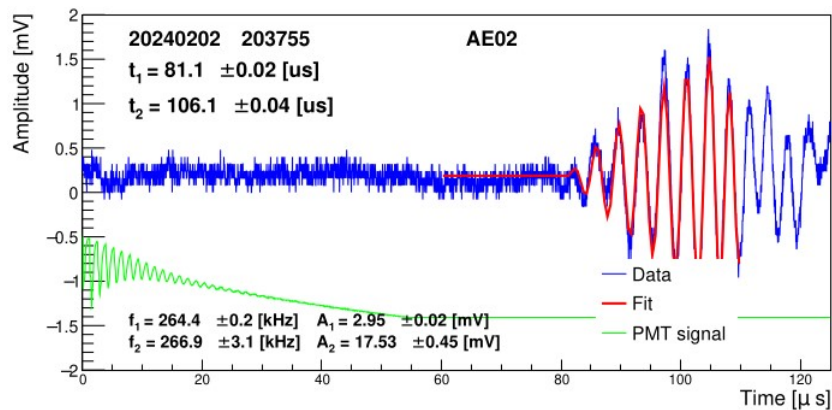


図 6.14: D5V1 TOP+3.5 mm の AE02 の立ち上がり部分の信号のフィット結果

グラフ内に表示しているパラメータはフィットにより得られた結果である。t は音波の立ち上がり時間を表しており、f は角振動数から求められる周波数、A は漸近振幅、 χ^2/ndf は 2 つの t_1 と t_2 の組み合わせのフィットで最小の χ^2/ndf を表してい

る。フィット関数の式 6.1 をデータ (t_i, y_i) に対してフィットしたとき、 χ^2 は

$$\chi^2 = \sum \frac{(y_i - f(t_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (6.4)$$

のように計算される。 σ_i は各データ点の誤差である。そして、ndf は自由度といい、データ点 N からフィットに用いたパラメータ数 p を引いたものである。

$$\text{ndf} = N - p \quad (6.5)$$

パラメータ数は、 t_1 、 t_2 、 A_1 、 A_2 、 f_1 、 f_2 の 6 つであり、データ点は 20000 点が $600 \mu\text{s}$ に対応することからフィット範囲 $50 \mu\text{s}$ は 1666 点である。以上のような方法で χ^2/ndf を求める。例として、図 6.12 は周波数 $264.4 \pm 0.2 \text{ kHz}$ と $266.9 \pm 3.1 \text{ kHz}$ の音波の重ね合わせであり、それぞれの立ち上がり時間は $81.1 \pm 0.02 \mu\text{s}$ 、 $106.1 \pm 0.04 \mu\text{s}$ である。信号の大きさは添え字 1 の成分の漸近振幅の値と一致することも分かった。この事象の音波伝播時間 t_{result} を

$$t_{\text{result}} = \min(t_1, t_2) \quad (6.6)$$

と定義すると、 t_{result} は $81.1 \pm 0.02 \mu\text{s}$ である。

以上をまとめると、D5V1 コリメータ TOP の位置が $+3.5 \text{ mm}$ におけるシングルバッチの試験から、音響センサー AE02 の音波伝播時間は $81.1 \pm 0.02 \mu\text{s}$ であった。このような測定を全ての音響センサーに対して行った。

6.2.3 音波伝播時間算出の再現性

測定による誤差がないことを確認するために、それぞれのコリメータ位置で 5 回測定を行った。その 5 回の信号に関して同じフィット関数と初期値でフィットを行った。図 6.15 は、D5V1 コリメータ TOP $+3.5 \text{ mm}$ における 5 回測定の結果を示している。

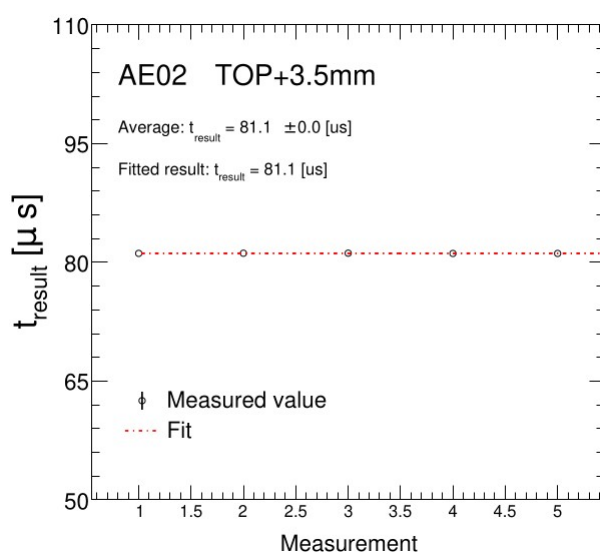


図 6.15: D5V1 TOP+3.5 mm のときの 5 回測定の声波伝播時間のまとめ。横軸は試験回数で縦軸は音波伝播時間。赤点線は定数のフィットを表す。

5 回測定の平均値とフィット結果を図の左上に記載している。TOP+3.5 mm の AE02 での音波伝播時間は 1-2 μs の範囲で一致しており、リング 1-2 周の遅れを捉えたい本研究において十分な精度である。D5V1 TOP は 3.5 mm から 7.5 mm までの範囲で 1 mm ずつ動かすとロスモニター信号が検知できた。図 6.16-6.19 は D5V1 TOP は 4.5 mm から 7.5 mm のときの 5 回測定の音波伝播時間のまとめを示す。

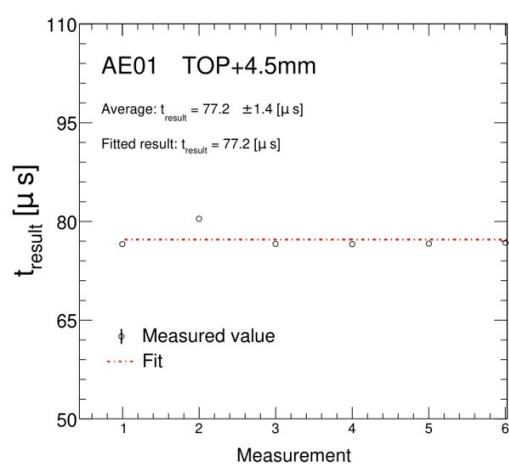


図 6.16: D5V1 TOP+4.5 mm のときの 5 回測定の声波伝播時間のまとめ

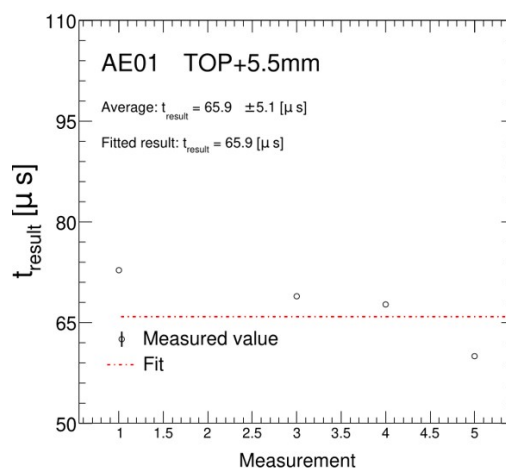


図 6.17: D5V1 TOP+5.5 mm のときの 5 回測定の声波伝播時間のまとめ

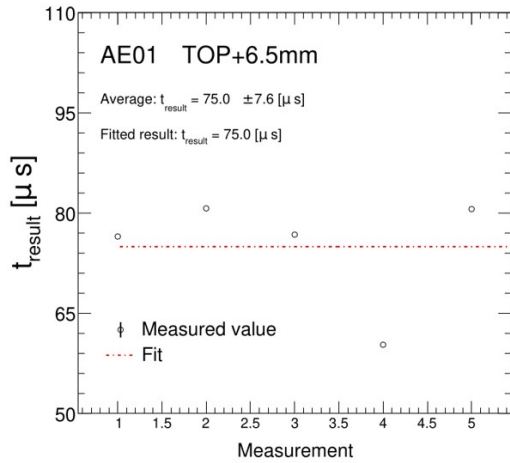


図 6.18: D5V1 TOP+6.5 mm のときの 5 回測定の音波伝播時間のまとめ

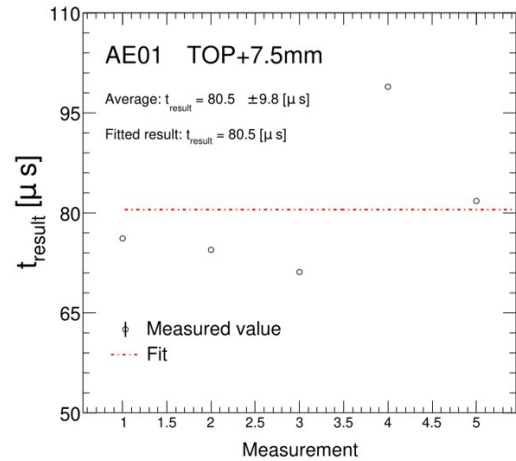


図 6.19: D5V1 TOP+7.5 mm のときの 5 回測定の音波伝播時間のまとめ

図 6.16から分かるように 5 回測定のばらつきはない。図 6.17-6.19では 5 回測定のばらつきが 10 μs の範囲以上にある。

D2V1 TOP+0.6 mm の 5 回測定の音波伝播時間を表すグラフを図 6.20に示す。

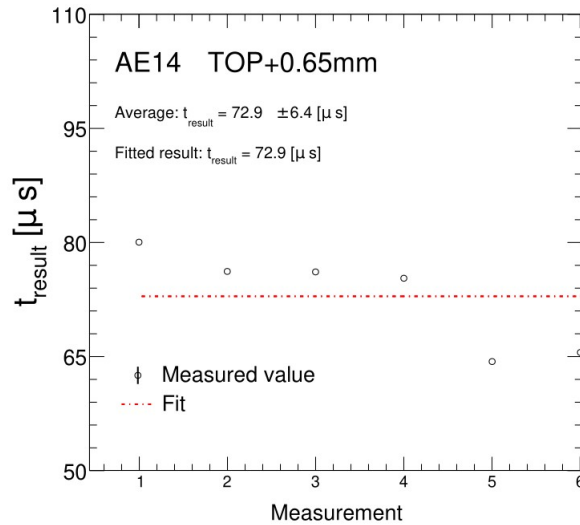


図 6.20: D2V1 TOP+0.65 mm のときの 5 回測定の音波伝播時間のまとめ

1, 2, 3, 4 回目の測定のときの音波が図 6.21で、5 回目の測定のときの音波が図 6.22である。1, 2, 3, 4 回目の測定の音波伝播時間 $t_{\text{result}} = 76.1 \pm 0.04 \mu\text{s}$ 、5 回目の測定は $t_{\text{result}} = 64.3 \pm 0.27 \mu\text{s}$ である。5 回目の測定が 1, 2, 3, 4 回目よりも早く聞こえる理由は、雑音部分を信号としてフィットしているためである。先述したようにフィット範囲内の音波の大きさが小さいため、フィット結果にばらつきが生じた。AE02 と

AE14 の信号を比較すると、音波が十分に大きい場合はフィット結果にばらつきは生じないことが分かった。

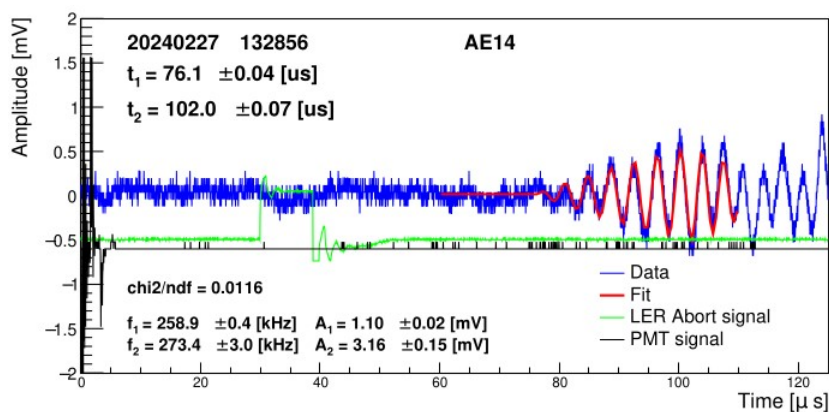


図 6.21: D2V1 TOP+0.65 mm のときの 1, 2, 3, 4 目回測定 of 音波の例

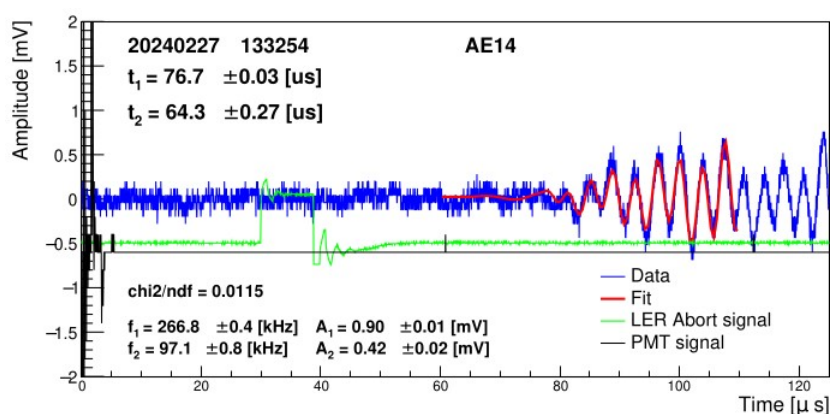


図 6.22: D2V1 TOP+0.65 mm のときの 5 回目測定 of 音波の例

次に、異なるコリメータの位置で 5 回測定を行っているため、音波伝播時間の算出に再現性があるかを調べた。

6.2.4 コリメータ位置を変えたときの音波伝播時間

コリメータの位置を変えた時の音波伝播時間について調べた。D5V1 の TOP コリメータの位置を変えたときの音波伝播時間は図 6.23 に示す。3.5 mm、4.5 mm は、ばらつきを表す棒が 10 μ s より小さい。しかし、6.5 mm、7.5 mm とコリメータ位置がビーム軸から離れる方向へ動くと、5 回測定のばらつきが大きくなった。ばらつきが大きくなった理由としては、シングルバンチがコリメータをかするように通過したためと考える。コリメータ位置とシングルバンチ位置の関係を図 6.24 に示す。バン

チがコリメータをかすりはじめると音波も小さくなり、十分大きな音波でない場合、フィット結果にばらつきが生じた。

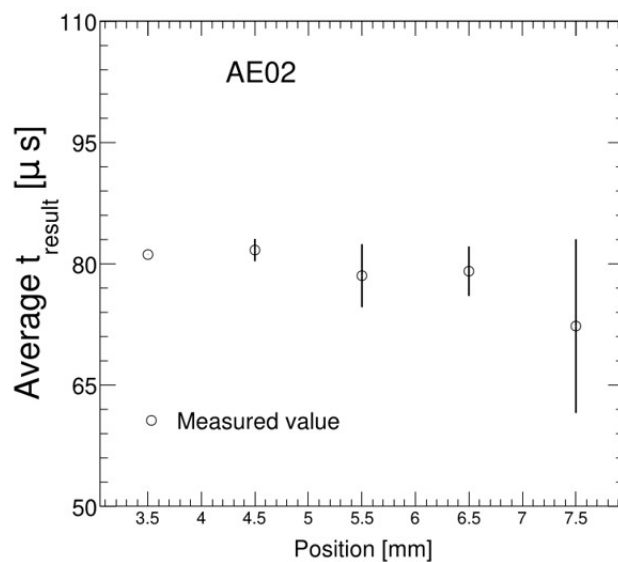


図 6.23: D5V1 TOP コリメータの位置による平均の音波伝播時間。測定した点のバーは5回測定の音波伝播時間の標準偏差を示す。

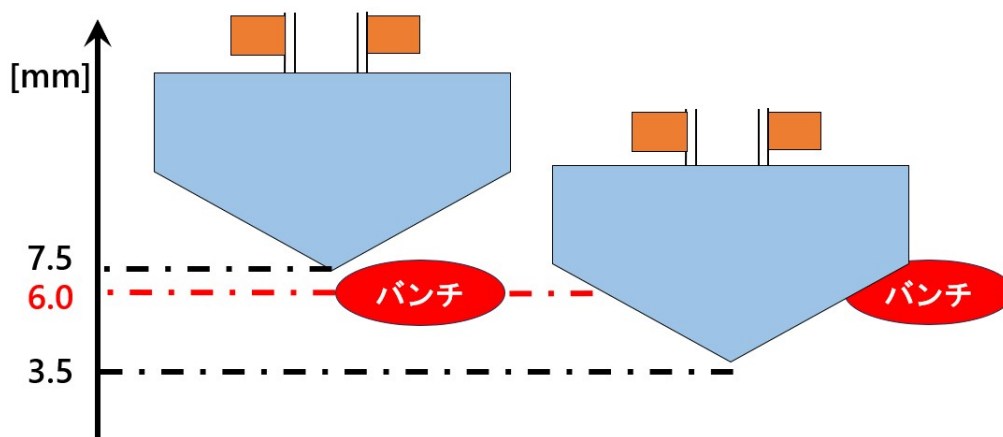


図 6.24: D5V1 TOP コリメータの位置とシングルパンチ位置の関係。D5V1 TOP コリメータのパンチの位置は 6.08 mm。

今後観測する SBL により発生する音波は本試験よりも大きな音波を発生させると考えている。例として、図 6.25, 6.26 があげられる。図 6.25 は D5V1 TOP + 3.5 mm の音波である。フィット範囲内の信号の大きさは 2 mm 以上である。

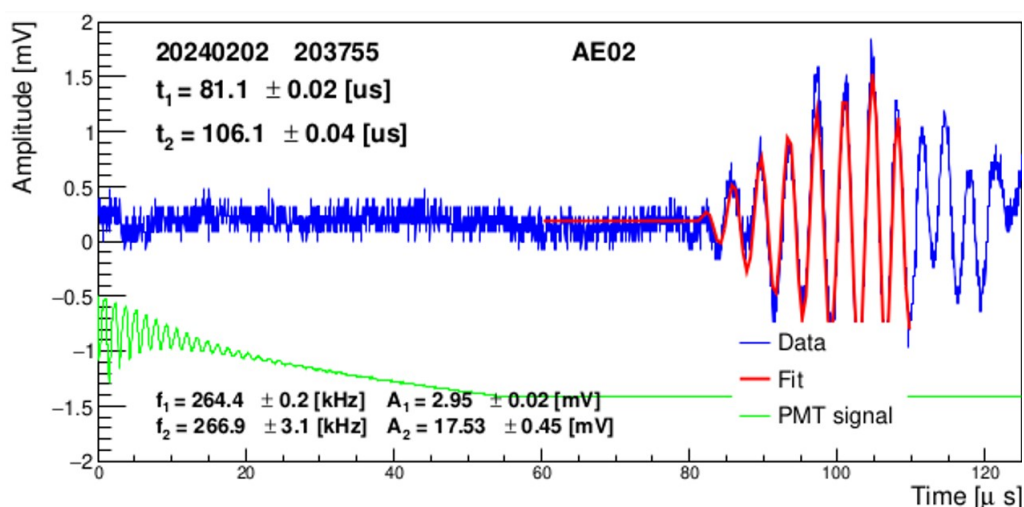


図 6.25: D5V1 TOP+3.5 mm の音波

次に、D5V1 TOP+7.5 mm の音波は小さな音波であり、図6.26に示す。フィット範囲の信号の大きさは1 mm 以下である。また、音波伝播時間が $t_{\text{result}} = 65.4 \pm 0.4 \mu\text{s}$ であり、TOP+3.5 mm の信号より早く聞こえる。このように早くなる理由は、信号部分が小さいため、雑音部分と信号部分の切り分けが出来ないからである。

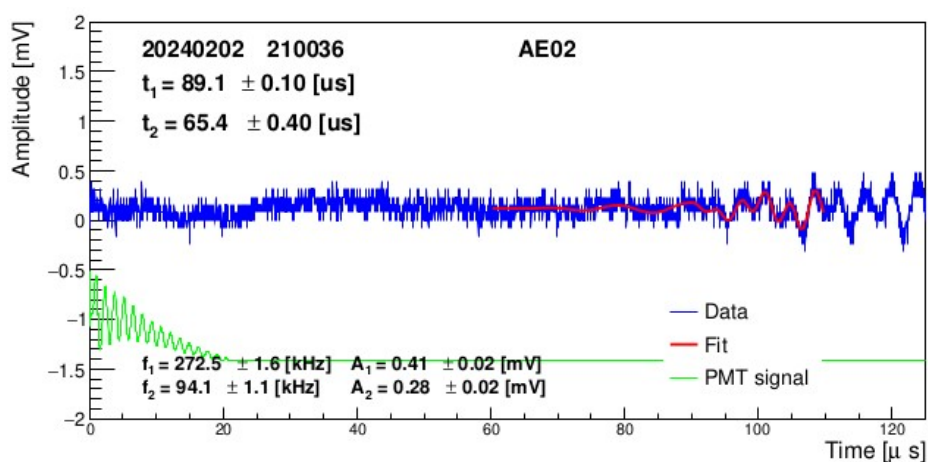


図 6.26: D5V1 TOP+7.5 mm の音波

大きい音波に対するフィットの精度は十分であることが分かった。また、3.5 mm から 7.5 mm の音波発生時間は $10 \mu\text{s}$ の範囲内で一致している。

以上の結果からコリメータで音波が発生してから音響センサーに到達するまでの時間、音波伝播時間を算出できた。シングルバンチを当てたときの音波伝播時間を重み付き平均値と重み付き標準偏差で計算した。冷水パイプ上の音響センサーごとに異なる音波伝播時間であり、まとめたものが表 6.3 である。

表 6.3: 冷水パイプ上にある音響センサーの音波伝播時間のまとめ。単位は $[\mu\text{s}]$

D5V1				D2V1				D6V2	
TOP		BTM		TOP		BTM		TOP	BTM
AE14	AE15	AE19	AE20	AE01	AE02	AE06	AE07	AE26	AE27
75.8 ± 2.2	81.14 ± 0.02	77.5 ± 6.4	72.2 ± 6.0	72.9 ± 1.4	71.4 ± 4.9	76.4 ± 2.4	80.7 ± 1.0	81.0 ± 1.0	73.6 ± 1.0

シングルバンチがコリメータに当たって失われた事象を検知し、その音波が十分に大きい場合、バンチがリングを周回する周期である $10\mu\text{s}$ よりも良い時間分解能で音波伝播時間を同定できることがわかった。SBL は最大で約 2500 個のバンチが失われる現象であるから、失われたビームが当たったコリメータにおける音響センサーの信号はこのシングルバンチでの試験よりも大きいことが予想されるので、ビームロスモニターする手法として有効と考えられる。次章では、SBL 事象で発生した音波から、音波の立ち上がり時間を算出して、放電がないか調べる。

第7章 SBL 事象で発生した音波の解析

本章では、2024 年 1 月から 7 月までの SuperKEKB 加速器運転で発生した SBL による音波の解析結果について述べる。この期間に陽電子リング上の SBL は約 150 件発生し、その全てのデータを取得できた。

7.1 SBL 発生時の音響センサーの信号

図 7.1 は 2024 年 5 月 20 日 23 時頃の SBL のビーム損失量を表している。この SBL 発生時に観測された冷水パイプ上の音響センサーを図 7.1 に記す。

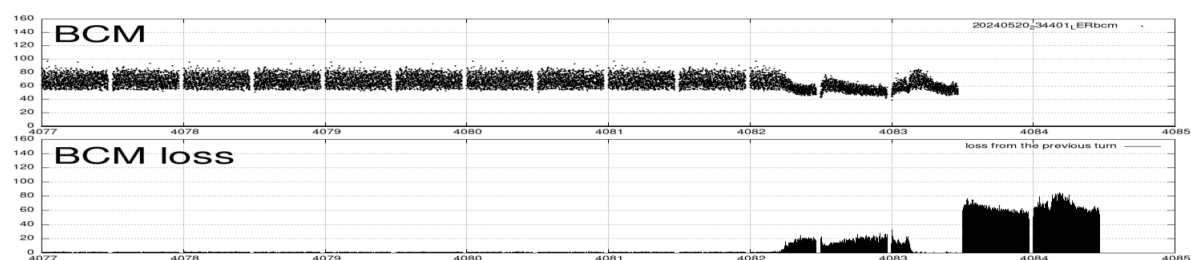


図 7.1: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL によるビーム損失量

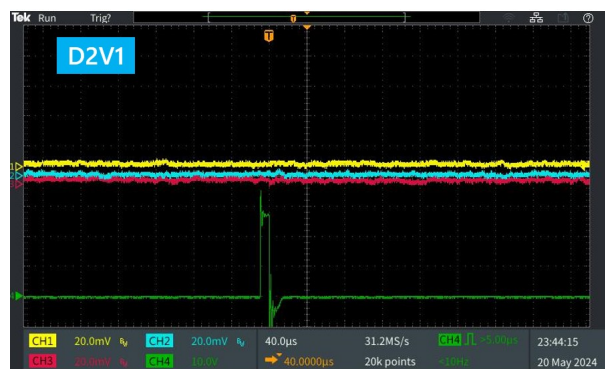


図 7.2: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL における D2V1 コリメータの音響センサー信号 1。チャンネル 3 は図 5.9 の 7 番のセンサーである。

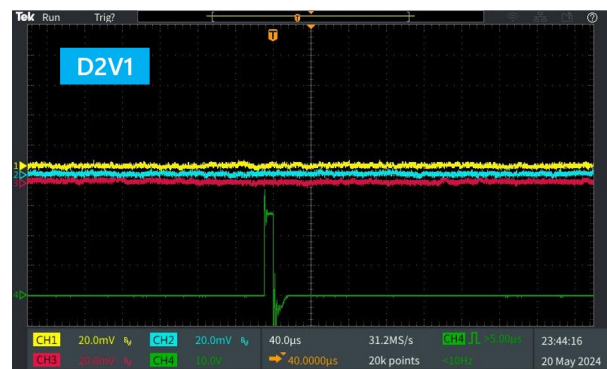


図 7.3: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL に伴う D2V1 コリメータの音響センサー信号 2。チャンネル 1,2,3 はそれぞれ図 5.9 の 1,2,6 番のセンサーである。

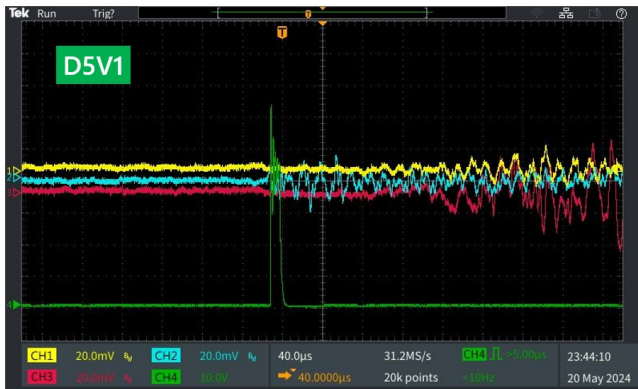


図 7.4: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL に伴う D5V1 コリメータの音響センサー信号 1。チャンネル 3 は図 5.8 の 7 番のセンサーである。

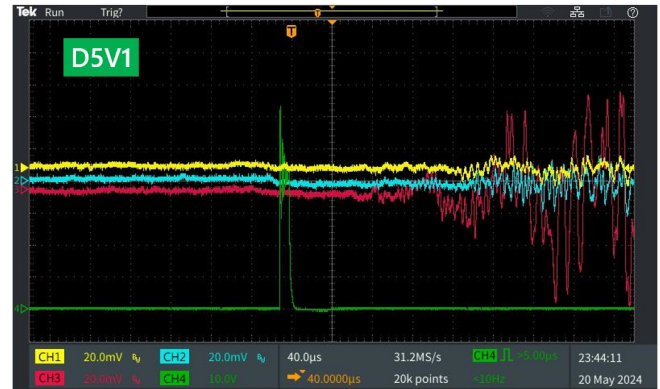


図 7.5: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL に伴う DV1 コリメータの音響センサー信号 2。チャンネル 1,2,3 はそれぞれ図 5.8 の 1,2,6 番のセンサーである。



図 7.6: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL に伴う D6V2 コリメータの音響センサー信号。チャンネル 1,3 は図 5.11 の AE26, AE27 のセンサーである。

この SBL によって発生した音波は、D5V1 コリメータ BTM と D6V2 コリメータ TOP, BTM である。D5V1 コリメータ BTM 上のセンサーの音波の立ち上がり時間は $74.5 \pm 0.29 \mu\text{s}$ であり、D6V2 コリメータ TOP は $75.2 \pm 0.2 \mu\text{s}$ 、D6V2 コリメータ BTM は $71.1 \pm 0.07 \mu\text{s}$ である。6.2 節で算出した音波伝播時間と $10 \mu\text{s}$ 以内で一致している。つまり、これらの音波は放電事象でなくビームが直接当たったことによる音波といえる。一方、D2V1 コリメータ TOP, BTM では音波は観測できなかった。これは陽電子ビームがこれらのコリメータにほとんど当たらなかったことを示

唆している。また、D5V1 コリメータ TOP で音波は観測されたが、立ち上がり時間が D5V1 コリメータ BTM と比べて遅いことが分かる。これは初めにビームロスしてから数周後に D5V1 コリメータ TOP にビームが当たったと示唆される。このように、音響センサーはどのコリメータにビームが当たったのかも検証可能であり、新しいタイプのロスモニターとして応用できる可能性を秘めている。

音波の有無を定量的に判別する必要があるので、その判別方法を考案した。全てのコリメータに対して音波伝播時間を算出する試験と同様の方法で音波の立ち上がり時間を算出する。

7.2 音波の有無の判別方法

音響センサーで音波が観測されているかを定量的に評価するために、以下の判定方法を考案した。

1. ベースラインの分布から 5σ 以上の信号の有無
2. 信号の最大値と最小値の差が 2 mV 以上である

第1にベースラインの分布から 5σ 以上の信号の有無を確かめる。図 7.7 は 2024 年 5 月 20 日 23 時ごろの SBL による音響センサーの信号を表している。

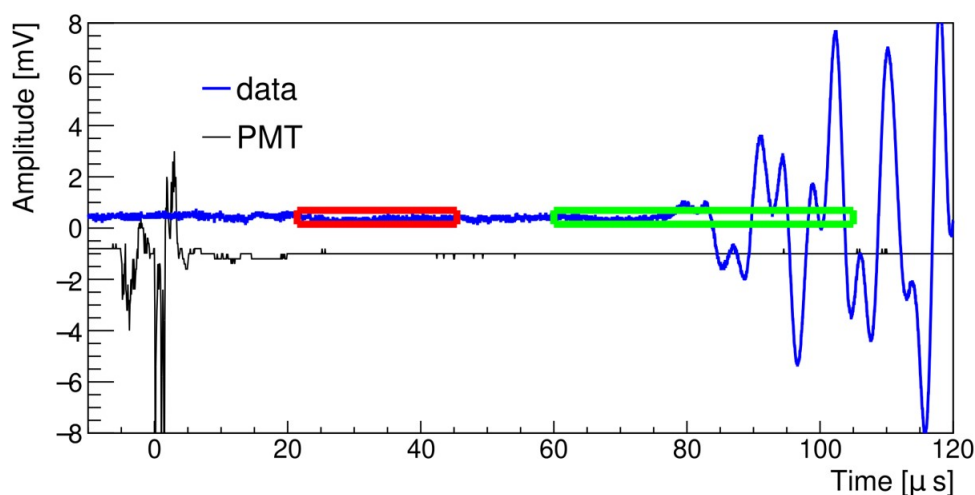


図 7.7: 2024 年 5 月 20 日 23 時頃に発生した SBL に伴う音波

音波が発生すると予想される十分前のデータを用いて、この信号のベースラインを算出した。図 7.8 で示されるように、今回はロスモニター信号が最後に立ち上がる時間のあと 20 μ s 後から 800 点分の信号でベースラインを計算した。

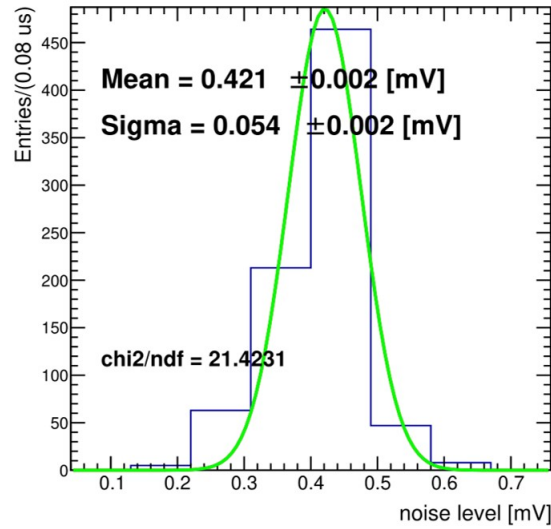


図 7.8: ベースラインの信号分布

ベースラインの信号の分布はガウス分布のような広がりを持つ。フィットに用いたカウス関数 $f(x)$ は式 (7.1) である。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7.1)$$

フィット結果により得られた平均値 μ はベースラインの位置で、標準偏差 σ はベースラインの位置を基準にした信号のばらつきを示す。ロスモニターの信号が発生してから 60-110 μs の範囲において、5 シグマ以上の信号点が 1 個ある場合は音波を観測できるとした。

第 2 に信号の最大値と最小値の差についてのヒストグラムを図 7.9 に示す。

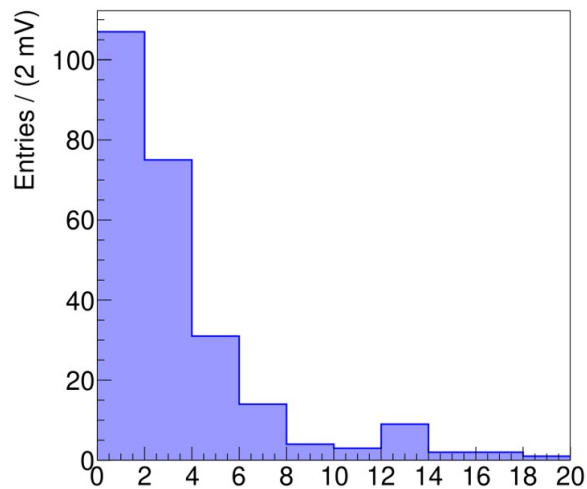


図 7.9: 信号の大きさヒストグラム

2 mV 毎のビンに分けると、0-2 mV のビンに対して小さい音波と定義し、2 mV 以上は十分に大きい信号であるとした。

以上のように、本研究ではフィット範囲の 5σ 以上の信号をもつこと、最大値最小値の差が 2 mV 以上というの両方を課した。

7.3 SBL 事象における音波の立ち上がり時間の算出

音波の立ち上がり時間を 60-110 μs の範囲で式 (6.1) でフィットした。ここで、SBL 事象に対する音波の立ち上がり時間を t_{SBL} と定義する。例として、図 7.10 は D6V2 コリメータ BTM 上に設置したセンサーが SBL に伴い発生した音波の立ち上がり時間のフィット結果である。

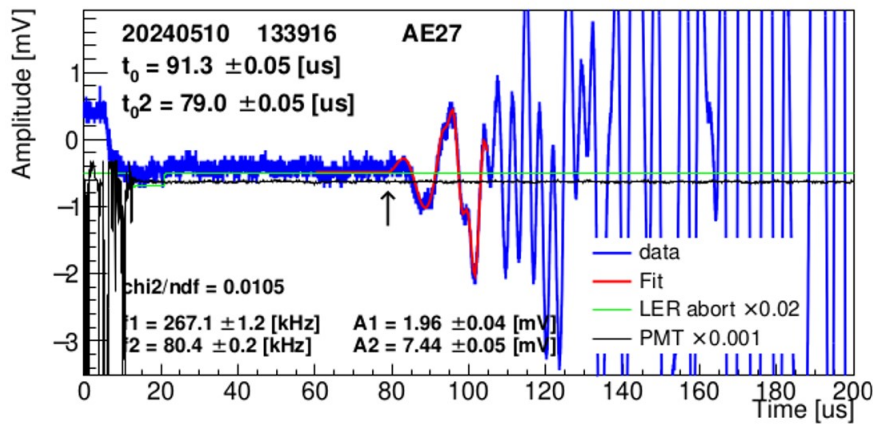


図 7.10: 2024 年 5 月 10 日 13 時頃の SBL に伴う音波のフィット結果

この事象の音波の立ち上がり時間 t_{SBL} は $79.0 \pm 0.05 \mu\text{s}$ である。一方、図 7.11 のような非常に小さい音波もいくつか観測された。

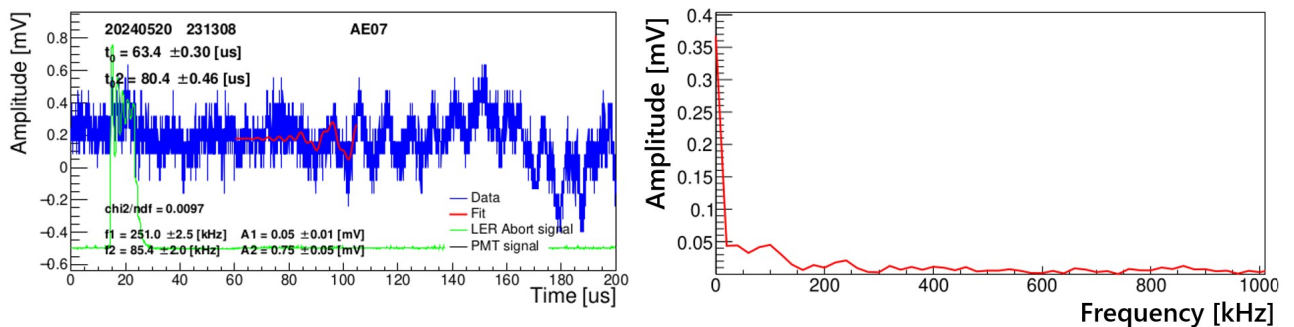


図 7.11: SBL に伴い生じる音波が小さい一例。左図は音響センサーの信号、右図は FFT における周波数分布。

フィット範囲でのFFTの結果をみると、50 kHz以下の寄与がほとんどである。つまり、音響センサーによる音波をほとんど検知できていない。そのため、ノイズ成分をフィットしてしまう可能性が高くなる。このように信号全体の大きさが小さい音波は、雑音部分と信号部分の区別が出来ず、音波の立ち上がり時間がはやく聞こえているのではないかと考える。

7.4 放電事象候補

2 mV以上の信号に対してフィットして t_{SBL} を算出した。放電事象の場合はビームがコリメータに直接当たる事象の音波伝播時間より $10\text{ }\mu\text{s}$ 以上はやく音波が立ち上がる。図7.12は放電事象候補を探すため、 $\Delta t = t_{\text{SBL}} - t_{\text{result}}$ のヒストグラムである。

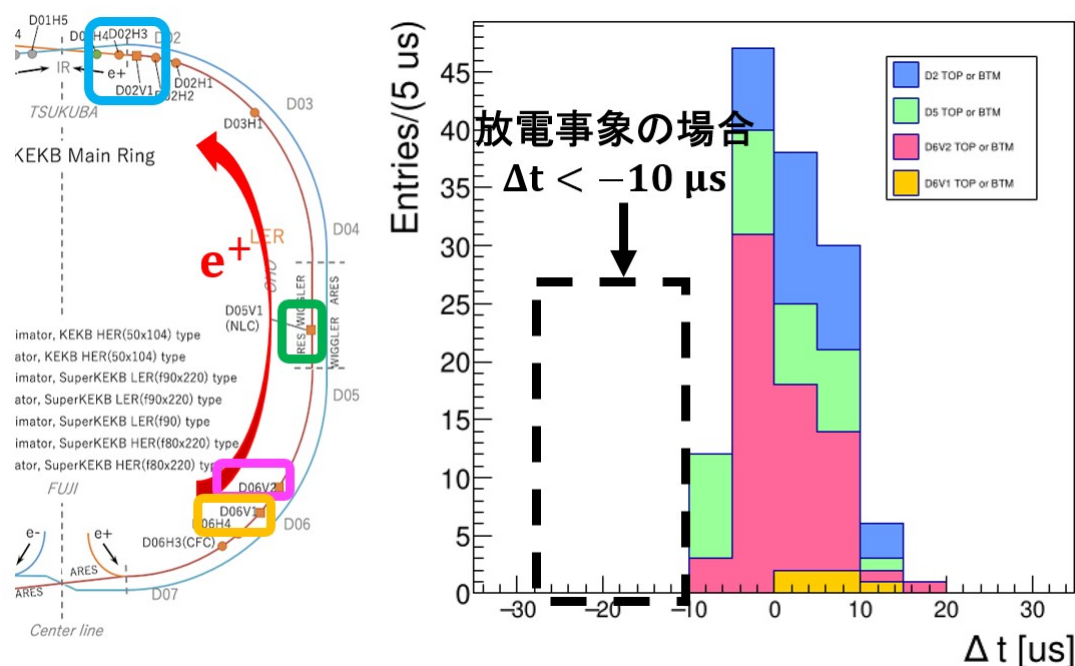


図 7.12: Δt ヒストグラム

ヒストグラムの色とコリメータ位置は対応しており、計 134 個の音波の立ち上がり時間がビンに入っている。このビンの数とフィットされた音波の数は異なる。ビンに値を入れる方法について以下で述べる。D2V1とD5V1はコリメータTOPの冷水パイプ上に音響センサーが1個ずつ計2個設置されている。コリメータ上で生じた熱衝撃をどちらのセンサーでも検出できる。放電事象は音波の立ち上がり時間が早くなると期待しているので、同じコリメータ上にある音響センサー2つどちらでも早くなる。ビンには、2つの音響センサーの遅い方の音波の立ち上がり時間を入れ

た。次に、コリメータ位置によりフィットされた数が異なる。D6V1の信号が少ない理由はコリメータの音響センサー設置時期が遅れたためである。D6V1とD6V2はコリメーション上の音響センサーは1個であるため、D2V1とD5V1よりもビンに入る数が多く見える。 Δt が0 μs 付近では、ビームが直接コリメータに当たった事象が分布していることが分かる。 $\Delta t < -10\mu\text{s}$ に分布する事象がないので、本解析で放電事象候補がないことが分かった。 $\Delta t > 10\mu\text{s}$ に分布する事象の特徴を示す一例として図7.13にD5V1の3月28日の事象について示す。

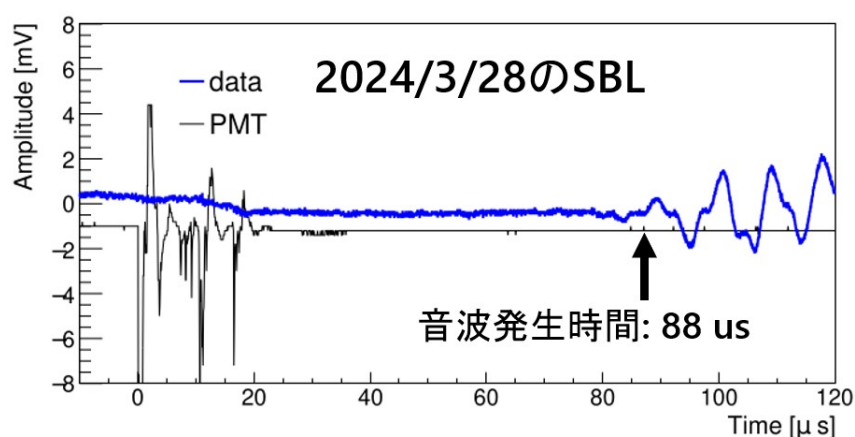


図 7.13: $\Delta t > 10\mu\text{s}$ の音波の一例

この音波の立ち上がり時間 t_{SBL} は88 μs である。音波の立ち上がり時間が遅くなる理由としては、ロスモニター信号が複数あるためだと考える。音響センサーの信号を取得するトリガー信号は陽電子ビームのアボート信号であるため、ロスモニター信号の最初の信号が検知されたときに必ずしもオシロスコープがトリガーされるとは限らない。本解析内ではロスモニター信号が最初に検知されたときにオシロスコープにアボート信号が届きトリガーされると仮定し、グラフの横軸を決定している。このようにロスモニター信号とオシロスコープのトリガータイミングのズレで音波の立ち上がり時間が遅く聞こえることがある。本研究では放電が発生する場合、音波の立ち上がり時間は早く聞こえると期待しているので、音波の立ち上がり時間が遅くなることについては問題ないと考えている。

第8章 音響センサー用アンプの導入

音響センサー信号は2から3 mV と微弱であるが、立ち上がり部分の解析が重要である。2024 年7月までの運転期間では、ケーブルの長さを制限してノイズの影響を抑えるため、オシロスコープはコリメータ付近の副通路でコンクリート壁の裏になる位置に設置した。周囲に鉛ブロックを積んで遮蔽し、ビームに起因する放射線を可能な限り防ぐ措置は行ったが、ビーム運転中は放射線の影響によりオシロスコープの通信が切れたり、動作しなくなる事例が頻発した。そのたびにオシロスコープをトンネル内でリブートする必要があった。そこで、安定に動作させる措置として、波形取り込みを行うデジタルオシロスコープの設置位置を変更し、それに伴い音響センサーとデジタルオシロスコープの間の距離が長くなって伝送線での減衰が問題になるため、それを補うためにアンプを導入する。本章ではアンプ導入における音波の影響について評価し、それが問題なく使えることを示した。

8.1 音響センサー用アンプ

音響センサー用アンプの写真を図 8.1 と図 8.2 に示す。



図 8.1: 音響センサー用アンプの入力面



図 8.2: 音響センサー用アンプの出力面

入力面、出力面ともに6チャンネルある。アンプ設計時のゲインは50 dBである。アンプの大きさは横 37.0 cm、奥行き 33.0 cm、高さ 15.4 cm で、放射線の影響をうけないように最低限の樹脂製品を用いており、電子回路もディスクリート構造である。図 8.3はアンプの回路図である。

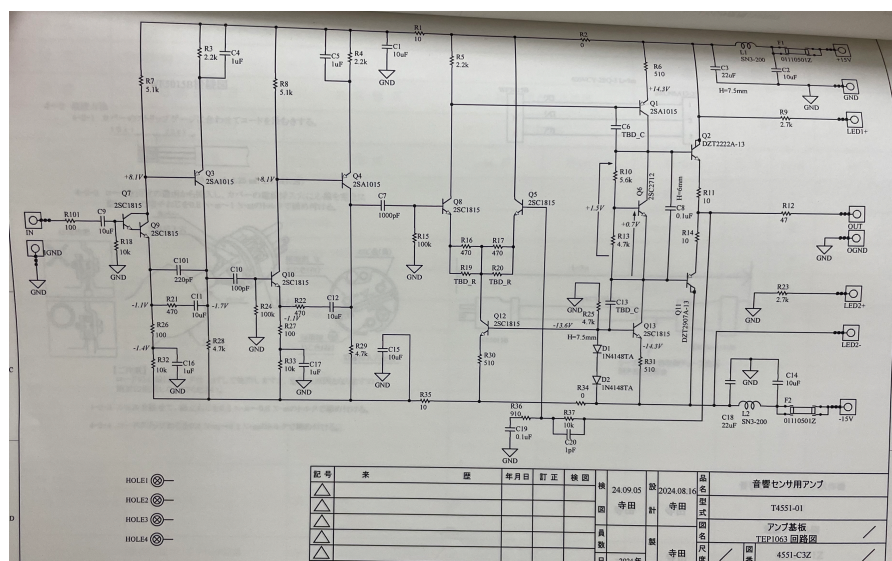


図 8.3: 音響センサー用アンプの回路図

8.2 アンプを用いた音響観測試験

音響センサーの信号に対する音響センサー用アンプの増幅率を測定するとともに、増幅後の波形データをフィットして音波の立ち上がり時間を算出できるかを確かめた。

8.2.1 セットアップ

図 8.4 に示すように、コリメータのテストベンチとオシロスコープと音響センサー用アンプとパルスジェネレータを用いた。

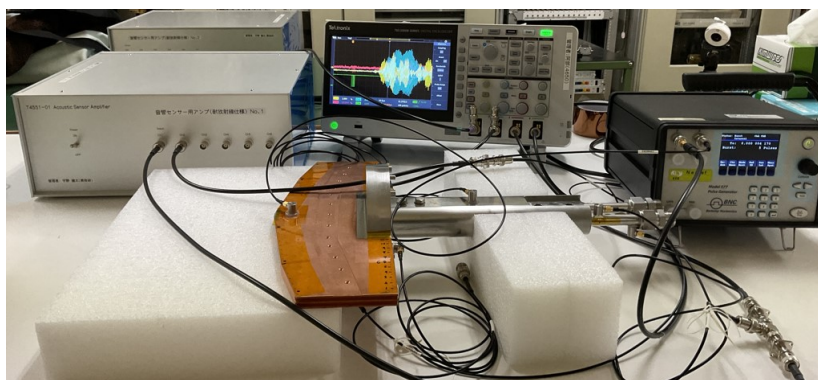


図 8.4: 音響センサー用アンプ試験の様子

ブロックダイアグラムを図 8.5 として示す。

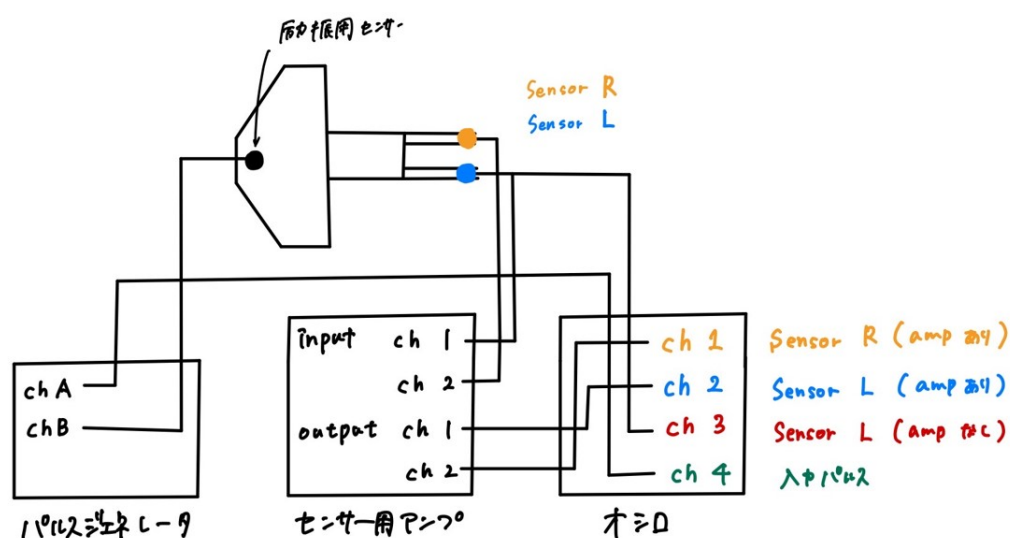


図 8.5: 音響センサー用アンプ試験のブロックダイアグラム

励振用、冷却水の往路と復路となる冷水パイプ上にそれぞれ 1 個ずつの合計 3 個の音響センサーを使用した。冷水パイプ上の 2 つの音響センサーのうち、一つはアンプを通して増幅した信号をオシロスコープに入力した。もう一つは信号を二股に分配し、その片方は直接、もう片方をアンプで増幅してオシロスコープに接続して、両者の比較により増幅率を測定することとした。オシロスコープのチャンネル 1 からチャンネル 3 で音響センサー信号、チャンネル 4 で励振用音響センサーに入力す

るパルスジェネレータの信号を観測した。入力信号は図 8.6に示す。

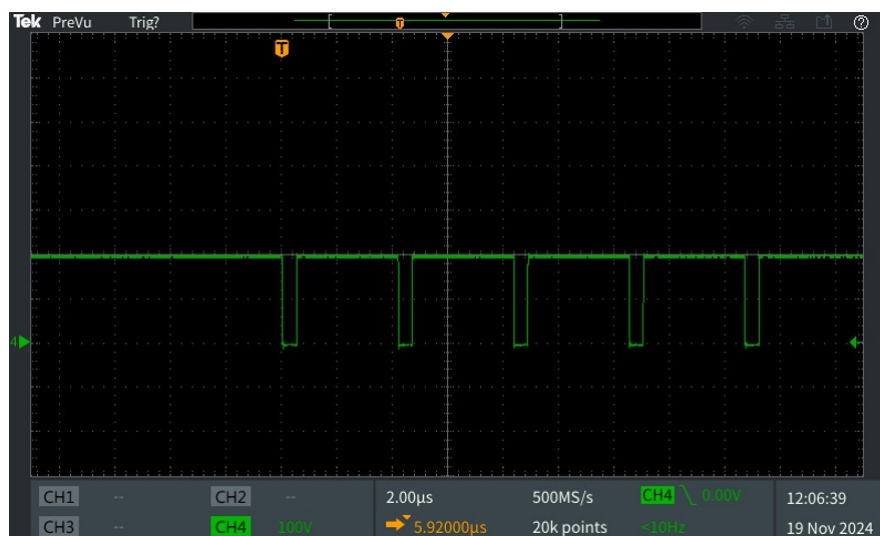


図 8.6: アンプ試験で用いた励振用の入力信号

0.5 μ s 幅の負極性矩形波パルスが間隔 4.2 μ s で 5 つが連続するバーストパルスを励振用音響センサーに入力し、そこで発生して伝播した超音波を冷水パイプ上の音響センサーがピックアップした信号を図 8.7に示す。

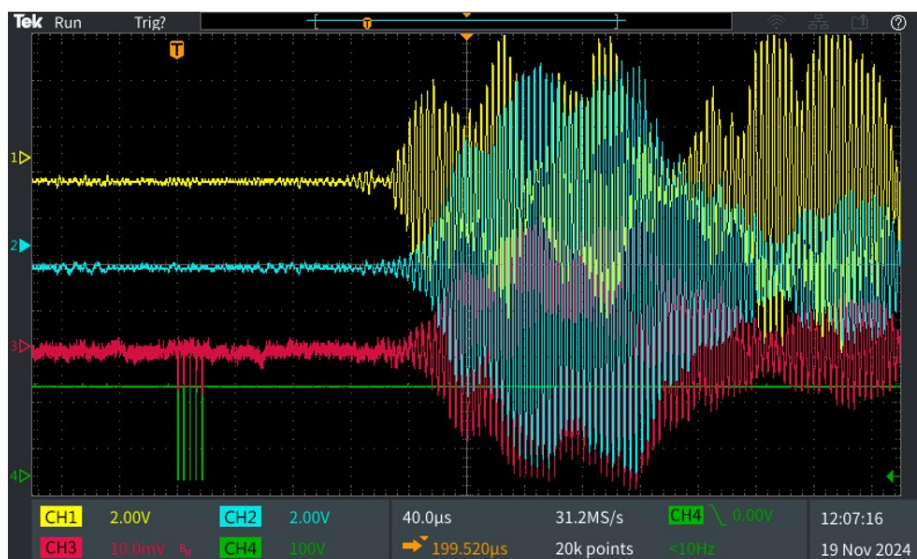


図 8.7: アンプ試験で観測された音響センサーの信号

音響センサーの信号はアンプを介したときと、アンプなしのときの信号を観測し、信号増幅の比較ができるようにした。トリガーは入力信号が立ち下がるタイミングである。

8.2.2 増幅率

アンプの増幅率を確かめるため、アンプなし信号の振幅を 250 倍して比較したものが図 8.6 である。

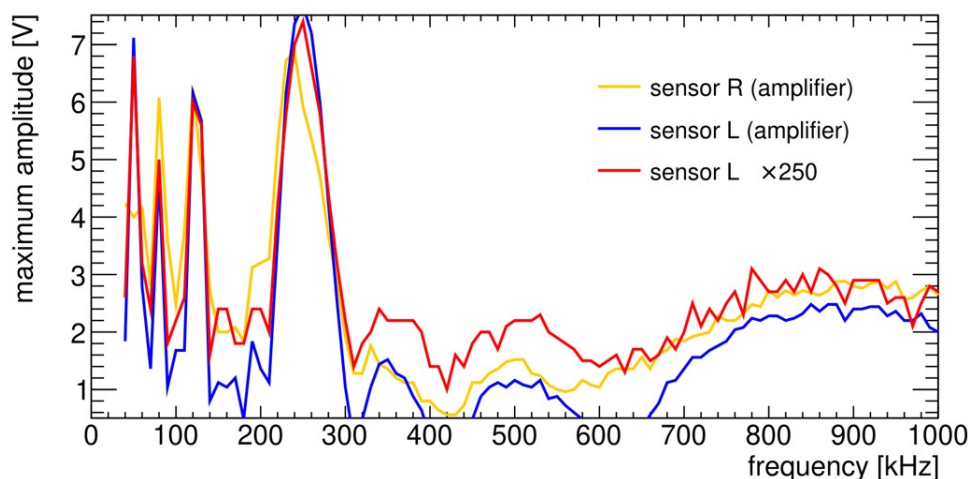


図 8.8: アンプ試験での周波数分布

sensor L のアンプ通した後と通す前の 250 倍の周波数分布を確認した。音響センサーの感度が最も高くなる 200-300 kHz の範囲で比較すると、250 倍したアンプなし信号とアンプあり信号が概ね一致しており、設計した通り約 250 倍の増幅率になっていることが確認できた。

8.2.3 音波発生時間の算出

SBL 事象の音波に対する音波の立ち上がり時間の算出で使用した関数でフィットした。その結果を図 8.6 に示す。

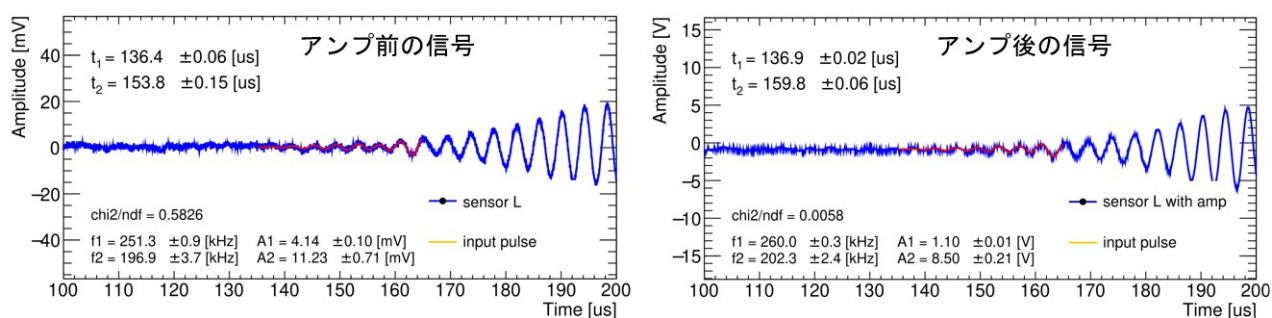


図 8.9: アンプを介する前後の音響センサーの信号をフィットしたときの違い

左図がアンプ前の信号、右図がアンプ後の信号である。 $t = 0$ はオシロスコープ

で信号が出力されはじめたタイミングである。アンプ前とアンプ後の信号の音波発生時間はそれぞれ $136.4 \pm 0.06 \mu\text{s}$ 、 $136.9 \pm 0.02 \mu\text{s}$ である。1 μs の範囲内で一致した。アンプ前後で音波の立ち上がり時間の算出ができることが分かった。アンプを導入し、2025 年の運転から使う予定である。

第9章 まとめと今後の課題

Belle II 実験では標準理論を超えた物理現象のために、ルミノシティを大幅に向上させる必要がある。しかし、SuperKEKB 加速器ではリング加速器に蓄積したビームが突発的に大きく損失する現象 (SBL) が頻発しており、その原因究明が喫緊の課題であった。この現象を説明する有力な候補として、コリメータ付近で大放電が発生し蓄積ビームを大きく蹴るというものが挙げられており、その検証が急務である。

本研究では、放電がビームロス事象を引き起こす現象の有無を検証するために、音響センサーを用いたビームロス事象モニターシステムを開発した。SuperKEKB 加速器のコリメータに音響センサーを設置し観測を試みた。特に、コリメータの冷水パイプ上に設置した音響センサーはコリメータと機械的につながっているため、コリメータで生じた熱衝撃による振動を音波として検知できた。その音波の立ち上がり部分に関して、共振器モデルに基づく関数でフィットして音波発生時間を算出できた。その音波発生時間を用いて放電とそれ以外の事象を区別した。放電以外の事象とはビームがコリメータに直接当たる事象のことを指し、この事象をシングルバンチ運転で再現し、そのときの音波発生時間を算出できた。この時間を基準に放電と区別しつつことを考えた。2024 年 1 月から 7 月までに発生した SBL で取得できた音響センサーデータから、放電とそれ以外の事象と区別すると、放電は無かったという結論を示すことができた。

放電が SBL を引き起こす仮説を支持する事象は見出せなかったが、音響センサーを取りつけることにより、コリメータやビームパイプなど、真空中を走るビームに直接露出している部位を、そこに入射したビームロスに反応する検知器として機能させることができることを立証できた。そこで、安定に動作させる措置として、波形取り込みを行うデジタルオシロスコープの設置位置を変更し、それに伴い音響センサーとデジタルオシロスコープの間の距離が長くなって伝送線での減衰が問題になるため、それを補うためにアンプを導入した。アンプの増幅率の計算とアンプありで音波発生時間の算出ができることを確認した。今後は、SBL が発生したとき、アンプありの状態で音響センサーを用いたロスモニターとして機能させる予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である宮林謙吉教授には、日頃より多くの助言を頂き、心より感謝申し上げます。特に、スライドやポスターの作成に際し、何度も丁寧に添削していただきました。また、高エネルギー加速器研究機構内での実験では、知り合いの少ない環境下でしたが、ご立ち会いただいたことで大変心強く感じました。また、蜂谷崇准教授および下村真弥准教授には、毎週の研究室ミーティングにおいて貴重なご助言を頂きました。助言を通じて、自分に不足している点を認識することができ、研究の理解を深めることができました。お二方のご指導に心より感謝申し上げます。

本研究に携わった SuperKEKB/Belle II 実験のロスモニターグループの皆様には、多くのご指導を賜りました。まず、SuperKEKB 加速器グループの阿部哲郎教授には、本研究における実験および解析手法について多大なご指導を賜り、心より感謝申し上げます。お忙しい中、定期的に進捗状況を確認してくださり、おかげさまで大きく方向を誤ることなく研究を進めることができました。厚く御礼申し上げます。また、技術職員の小笠原舜斗様には、本研究の音響観測によるデータ収集を行っていただき、深く感謝申し上げます。非常に使いやすいシステムを構築してくださったおかげで、データの解析が円滑に進み、大変助かりました。誠にありがとうございました。さらに、加速器グループの皆様にも、ミーティング等での貴重なご助言をいただき、心より感謝申し上げます。

次に、Belle グループの宇野健太助教には、本研究のあらゆる面で多くのご指導を賜りました。特に、スライド作成の流れや解析手法に関するご助言を通じて、論理的に実験を進める視点を養うことができました。深く感謝申し上げます。また、Belle グループの中山弘幸准教授、古賀太一郎助教、中沢遊助教には、ミーティングでの貴重なご助言をいただき、誠にありがとうございました。高エネルギー加速器研究機構でお会いした際には、お声がけいただき、大変嬉しく思いました。この場を借りて、改めて感謝申し上げます。

奈良女子大学の物理学系事務担当の熊谷有加様には、出張手続きをはじめとする多くの事務手続きを行っていただき、深く感謝申し上げます。研究室の同期である加納さん、佐々木さん、辻端さん、藤原さんとは、何気ない会話を交わすだけでも楽しく、ともに多くの苦楽を乗り越えることができました。また、先輩・後輩の皆様にも支えられ、充実した研究生活を送ることができました。

最後に、家族をはじめ、多くの方々の支えのおかげで、無事に修士課程を修了することができました。心より感謝申し上げます。

関連図書

- [1] 赤井和憲、小磯晴代, ”SuperKEKB 加速器”, 加速器 15 巻 213 ページ (2018 年)
<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F15%2Fp213-220.pdf>
- [2] SuperKEKB 加速器世界最高ルミノシティまでの道のり
https://jahep.org/hepnews/2020/Vol39_No3_05_lumi.pdf
- [3] もっと知りたい！ SuperKEKB 加速器
<https://www-superkekb.kek.jp/glossary>
- [4] T. Ishibashi, S. Terui, Y. Suetsugu, K. Watanabe, M. Shirai, Movable collimator system for SuperKEKB, Phys. Rev. Accel. Beams 23 (12) (2020) 053501.
doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.053501
- [5] Shinji Terui, Yoshihiro Funakoshi, Takuya Ishibashi, Haruyo Koise, Mika Masuzawa, Yu Morikawa, Akio Morita, Shu Nakamura, Hiroyuki Nakayama et al., Collimator challenges at SuperKEKB and their countermeasures using nonlinear collimator, Phys. Rev. Accel. Beams 27, 081001.doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.27.081001
- [6] 吉原圭亮、梶裕志, SuperKEKB でのビームロスとの戦い,
<https://jahep.org/hepnews/2023/42-1-3-kekb.pdf>
- [7] Hitomi Ikeda et al., BEAM LOSS MONITOR AT SUPERKEKB,
<https://accelconf.web.cern.ch/ibic2014/papers/tupd22.pdf>
- [8] S.Bacher et al., Performance of the diamond based beam-loss monitor system of Belle II, doi:10.16/j.nima.2021.165157
- [9] Abort Summary
http://kekb-co-web.kek.jp/doc/Image/BELLE/abort_summary/web/json/index.php
- [10] FIREBALL HYPOTHESIS FOR THE TRIGGER OF SUDDEN BEAM LOSSES AT SuperKEKB
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TUP0/TUP01.pdf

- [11] 音響センサーデータ収集システムの開発
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TH0A/TH0A10.pdf
- [12] SuperKEKB 陽電子リングの電子雲不安定性
<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F16%2Fp175-184.pdf>
- [13] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, et al., “Features of particle and heavy ion transport code system (phits) version 3.02” , Journal of Nuclear Science and Technology 55, 684^{e2}80[^]93690 (2018)