

2025年度 卒業論文

電子・イオン衝突型加速器 ePIC 実験の
飛行時間検出器で使用するストリップ型
AC-LGAD センサーにワイヤーボンディングが
及ぼす影響

2026年2月9日

指導教員 志垣 賢太 教授

主査 八野 哲 助教

副査 伊藤 清一 助教

広島大学

クォーク物理学研究室

学籍番号 B226846

氏名 齊藤 達輝

概要

電子・イオン衝突型加速器 (Electron-Ion Collider, EIC) は、ブルックヘブン国立研究所に建設が予定されている、世界初の偏極電子・偏極イオン衝突型加速器である。EIC の ePIC 実験における飛行時間検出器では、粒子識別、飛跡再構成のために、通過粒子の到達時間および位置を高精度に測定することが求められる。この要求を満たす検出器として、優れた時間分解能および位置分解能を両立する AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD) の使用が予定されている。

ストリップ型フルサイズ AC-LGAD センサーに対するワイヤーボンディング工程において、センサーが破壊される事例が報告された。この問題は実機量産において深刻な課題となるため、破壊の原因を特定することが喫緊の課題となっていた。

本研究では、意図的にセンサーを破壊する条件を再現することで、センサー破壊の原因究明を行った。具体的には、ワイヤーボンディング時の各種パラメーターを変化させながらボンディングを行い、どのパラメーターの変更がセンサー破壊を引き起こすかを系統的に調査した。その結果、調査したパラメーターの中で、超音波強度の変更がセンサー破壊に直結することが明らかとなった。さらに、実際にテストビーム実験で使用するセンサーに対して最適条件でボンディングを行ったところ、すべてのセンサーにおいて正常なボンディングに成功した。

目次

図目次	2
第1章 序論	6
1.1 素粒子物理学	6
1.1.1 標準模型	6
1.1.2 強い相互作用	6
1.1.3 量子色力学	7
1.2 EIC	7
1.3 ePIC コラボレーションと ePIC 実験	9
1.4 TOF	9
1.5 研究目的	10
第2章 AC-LGAD	11
2.1 半導体検出器	11
2.2 LGAD	12
2.2.1 DC-LGAD	12
2.3 AC-LGAD	13
2.3.1 AC-LGAD の電気的特性	13
2.3.2 信号読み出し基板	14
2.3.3 報告された問題	15
第3章 ワイヤーボンディングによる調査	16
3.1 調査内容	16
3.2 ワイヤーボンディング	16
3.3 使用機器、使用部品	17
3.4 ボンディングパラメーター設定	19
3.5 調査手順	19
3.5.1 破壊条件の再現	20
3.5.2 最適条件でのボンディング	21
第4章 調査結果	22
4.1 パラメーター変更によるセンサー破壊	22
4.1.1 基準値	22
4.1.2 ボンディング位置	23
4.1.3 Force	25
4.1.4 Force 及び Power	26
4.1.5 Power	26
4.1.6 Power の値による I-V 曲線の傾向	28

4.2	最適条件でのボンディング	28
4.3	パラメーター変更以外によるセンサー破壊	31
第 5 章	考察及び結論	32
5.1	考察	32
5.2	結論及び展望	32
	謝辞	33
	参考文献	34

目 次

1.1	素粒子と相互作用	6
1.2	EIC の構成施設 [1]	8
1.3	ePIC 検出器 Central Detector のデザイン [1]	9
1.4	Barrel TOF の設計デザイン ([2] より一部改変)	10
2.1	半導体検出器の仕組み	11
2.2	LGAD の構造 ([3] を元に作成)	12
2.3	DC-LGAD の構造 ([3] を元に作成)	12
2.4	AC-LGAD の構造 ([3] を元に作成)	13
2.5	ストリップ型 AC-LGAD センサーの全体と電極付近のアップ	13
2.6	AC-LGAD の I-V 曲線 (縦軸対数)	14
2.7	信号読み出し基板	15
2.8	破壊されたセンサーの I-V 曲線	15
3.1	ウェッジボンディングの作業手順	16
3.2	ワイヤーボンダー	17
3.3	プローブステーション	17
3.4	破壊条件の再現用の読み出し基板の特徴	18
3.5	最適条件でのボンディング用の読み出し基板の特徴	18
3.6	変更したパラメーター	19
3.7	ワイヤーボンダーのパラメーター決定画面	19
3.8	ボンディング位置	20
3.9	破壊条件の再現においてボンディングする箇所	21
3.10	最適条件でのボンディングにおいてボンディングする箇所	21
4.1	センサーのグラウンドパッドにボンディングした様子	22
4.2	センサーの信号パッドにボンディングした様子	22
4.3	ボンディングした後の I-V 曲線	23
4.4	パッド中心から 25% 程度ずらしてボンディングした様子	24
4.5	パッドの端にボンディングした様子	24
4.6	パッドの外にボンディングした様子	24
4.7	パッド中心から 25% 程度ずらしてボンディングした後の I-V 曲線	25
4.8	パッドの端にボンディングした後の I-V 曲線	25
4.9	パッドの外にボンディングした後の I-V 曲線	25
4.10	Force を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子	26
4.11	Force 及び Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子	26
4.12	Force 及び Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線	26

4.13 Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子	27
4.14 Power を基準値の 2 倍にしてボンディングした様子	27
4.15 Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線	27
4.16 Power を基準値の 2 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線	27
4.17 破壊されたセンサーの I-V 曲線	28
4.18 最適条件でボンディングした様子	29
4.19 最適条件でのボンディング (1 枚目)	29
4.20 最適条件でのボンディング (2 枚目)	29
4.21 最適条件でのボンディング (3 枚目)	29
4.22 最適条件でのボンディング (4 枚目)	29
4.23 最適条件でのボンディング (5 枚目)	30
4.24 ボンディング前の 5 枚目のセンサー	30
4.25 ワイヤーなしでボンディングした後の I-V 曲線	31

第1章 序論

1.1 素粒子物理学

素粒子物理学は、物質の最小構成要素である素粒子の性質と、素粒子間に働く相互作用の謎を解明するために、加速器実験及び宇宙観測などによる実験的探究と、場の量子論などによる理論的探究を組み合わせる研究する学問分野である。

1.1.1 標準模型

現在において、素粒子物理学の理論体系は標準模型によって確立している。この理論には17種類の素粒子とその粒子間に働く電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用の3種類の相互作用がある。素粒子の内12種類は物質粒子（クォーク、レプトン）、4種類は相互作用を伝えるゲージ粒子（光子、グルーオン、Wボソン、Zボソン）、1種類は物質粒子とWボソン、Zボソンに質量を与えるヒッグス粒子である。[4]

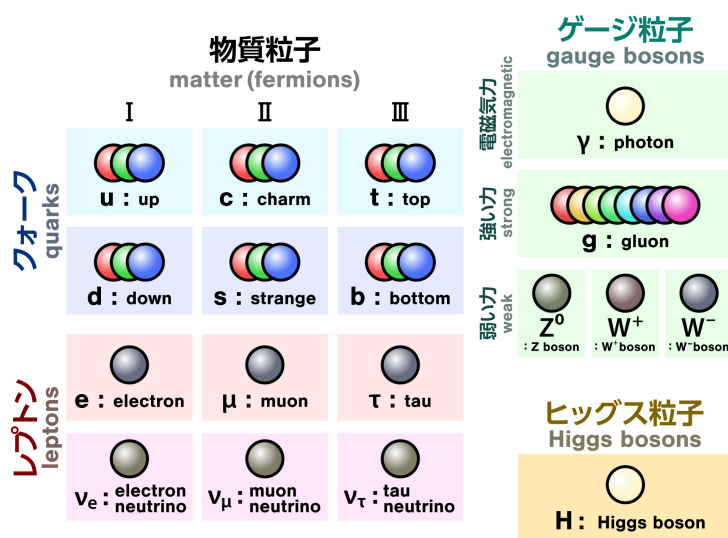


図 1.1: 素粒子と相互作用

1.1.2 強い相互作用

強い相互作用は、自然界で現在理解されている4つの相互作用の内、最も強く作用する力である。この力はグルーオンを媒介としてクォークとグルーオンにのみ作用し、バリオンとメソンという2種類のハドロンを形成する。

強い相互作用は、歴史的にはまずクォーク模型によって理解された。クォーク模型では、例えば (u , d , s) という 3 つのクォークをフレーバー自由度に対する $SU(3)$ の 3 基本表現とした場合に、反クォークをその複素共役表現 $\bar{3}$ で表す。そして 3 と $\bar{3}$ の直積表現を既約分解することにより ($3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$)、メソン八重項 (π^- や K^+ など) や一重項 (η_0 など) を表現することができる。3 つの 3 の直積表現の既約分解の一部から ($3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$)、バリオン八重項 (陽子や Λ など) や十重項 (Δ^+ や Ω^- など) を表現することができる。しかし、 $\Delta^{++}(= uuu)$ や $\Omega^-(= sss)$ などのバリオンは、構成する 3 つのクォークのフレーバーとスピンのすべてが同じ状態になり、パウリの排他律に反してしまう。そこで導入されたのがカラー自由度という新しい自由度であり、量子色力学という強い相互作用を記述する理論体系の始まりとなった。

1.1.3 量子色力学

量子色力学 (quantum chromodynamics, QCD) は、ゲージ理論で記述された理論である。ゲージ理論において、空間の各点で場に対して施す局所変換 (ゲージ変換) に対してラグランジアンが変化しない (ゲージ対称性)。ゲージ理論ではゲージ対称性を破らないような自由度が存在し、QCD においてはカラー自由度が対応している。[4]

クォークはそれぞれ (赤、緑、青) という 3 つのカラーを持っており反クォークもそれぞれ (反赤、反緑、反青) というカラーを持っている。そしてフレーバーと同様に、クォークと反クォークの直積表現の既約分解による一重項として白色のメソンが、3 つのクォークの直積表現の既約分解による一重項として白色のバリオンが表現される。QCD において、グルーオンは 8 種類のカラーを持っており、このカラーをやり取りした結果が強い相互作用として現れる。この相互作用は他の 3 つの相互作用と異なり、働く距離が長くなればなるほど大きくなり、結果クォークやグルーオンは単体で取り出すことができず、ハドロンに閉じ込められる。

QCD の発展に伴って強い相互作用の理解は深まったが、未だに多くの謎が残されている。例として、強い相互作用によるエネルギーの核子質量への寄与の割合や、クォークのスピンの寄与が総核子スピンの寄与に足りないことなどが挙げられる。これらの謎を解明することは、現代物理学の発展、ひいては未来に期待されるハドロンレベルの科学技術の発展にもつながる。

1.2 EIC

電子・イオン衝突型加速器 (Electron Ion Collider, EIC) は、核子質量の起源、核子スピンの起源、グルーオン飽和、クォークの閉じ込めなどの QCD に関する謎を解明するため、ブルックヘブン国立研究所に建設予定の世界初の偏極電子、偏極イオンの衝突型加速器である。EIC は 2 つの交差する加速器で構成されている。ひとつは EIC の前身である相対論的重イオン衝突型加速器で使用されていたイオン源及び加速器を再利用したものであり、もうひとつは新設された電子源及び加速器で構成されている。

EIC の輝度は $1 \times 10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にのぼり、70% 以上の高偏極電子、高偏極イオンを用いるため、衝突前のスピン状態を自在に決定することができる。衝突エネルギーは 20 ~ 140 GeV に及び、重水素からウラン、鉛までのイオン種を使用できる。EIC ではこれらの技術を用いて加速された様々な高エネルギーの電子とイオンによる衝突させる。それにより生成された粒子を高精度で測定し、ハドロン内部の 3D スナップショットを生成することで、QCD の謎に迫る。[5]

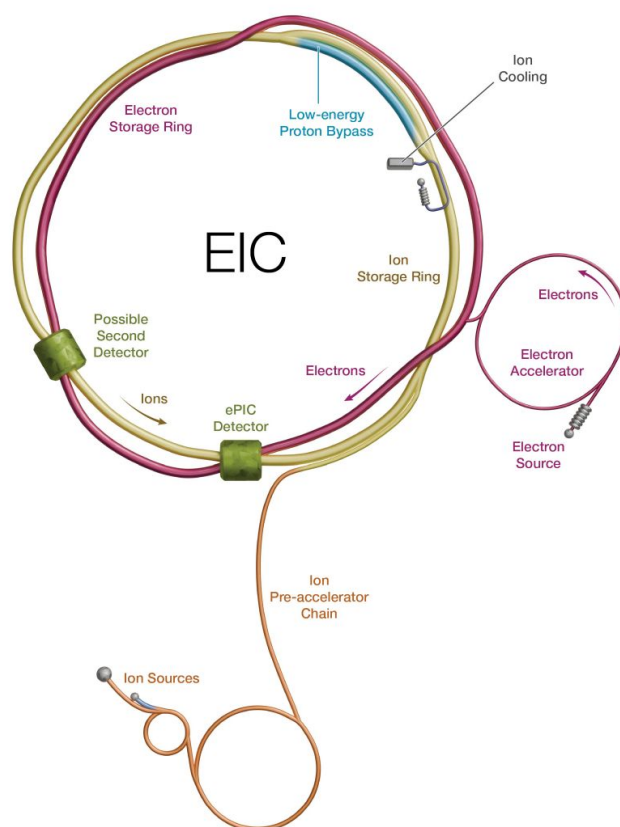


図 1.2: EIC の構成施設 [1]

1.3 ePIC コラボレーションと ePIC 実験

electron-Proton/Ion Collider (ePIC) コラボレーションは、2026 年 1 月時点で 25 の国、173 の研究機関が参加する研究グループであり、広島大学も 2022 年より参加している。ePIC 実験は、EIC の粒子衝突点で行われる、EIC で唯一承認された実験である。ePIC 実験では、全長約 9.5 m、半径約 2.67 m の円筒型バレル検出器 (Central Detector) を中心に、EIC のビームラインに沿って両方向に 45 m まで広がる Far Detectors を ePIC 検出器として設置する。

中央領域をカバーする Central Detector は、1.7 T の磁場を生成する超伝導ソレノイド磁石、最先端のシリコン検出器やガス検出器からなる、荷電粒子の運動量を求めるためのトラッキングシステム、高速タイミング型検出器やチェレンコフ型検出器からなる粒子識別検出器群、電子や光子のエネルギーを計測する電磁カロリメーター、陽子、 π 中間子、 K 中間子などのエネルギーを計測するハドロンカロリメーターから構成されている。[6]

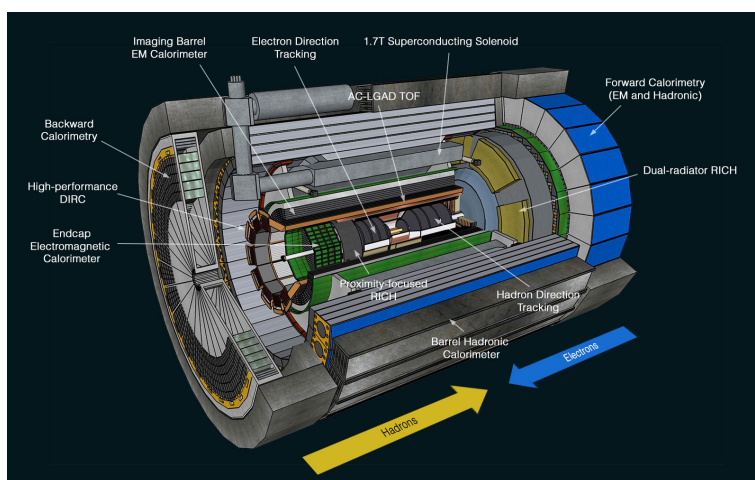


図 1.3: ePIC 検出器 Central Detector のデザイン [1]

1.4 TOF

EIC ePIC 実験における飛行時間検出器 (Time of Flight, TOF) は、衝突点で生成された荷電粒子が検出器に到達するまでの時間を測定することで、中央領域における粒子識別、トラッキング、背景除去のために使用される。そのため、TOF に採用される検出器には優れた時間分解能が求められるうえ、飛跡再構成のために優れた位置分解能も同時に要求される。Barrel TOF (BTOF) においては、35 ps の時間分解能、30 μm の位置分解能が要求されている。この要求性能を満たす検出器として使用を予定されているのが、AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD) である。AC-LGAD は薄い電子雪崩層により優れた時間分解能を、電荷共有により優れた位置分解能を有する。

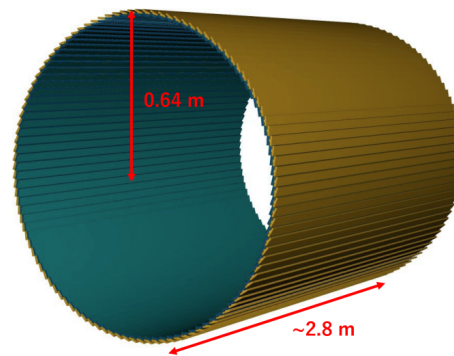


図 1.4: Barrel TOF の設計デザイン ([2] より一部改変)

1.5 研究目的

EIC ePIC 実験における中央領域での粒子識別において TOF は大きな役割を担っている。しかし TOF で使用を予定されているフルサイズストリップ型 AC-LGAD センサーのワイヤーボンディングが行われた際に、センサーが破壊されたという問題が報告された。本研究では、今後実機量産を行っていくために、センサーへの最適なボンディング条件を確立することを目的とした。具体的には、ボンディングパラメーターを変化させながらボンディングを行うことで、どのパラメーターがセンサーの破壊に直結しているかを系統的に調査した。また実際にテストビームで使用するセンサーに対して最適条件でボンディングを行い、最適条件の検証を行った。

第2章 AC-LGAD

AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD) は、EIC ePIC 実験の TOF における要求性能を満たす検出器として使用を予定されている。本章では、AC-LGAD の基本特性を示すとともに、AC-LGAD の研究において発生した問題についても述べる。

2.1 半導体検出器

半導体とは、価電子帯と伝導帯の間にバンドギャップが存在するものの、絶縁体と比べて比較的低い励起エネルギーで伝導帯に電子が遷移できる物質である。元素単体としては Si や Ge などの4価の元素が代表的であり、5価の元素を不純物としてドーピングすることでn型半導体、3価の元素を不純物としてドーピングすることでp型半導体となる。n型半導体では電子がキャリアとなり、p型半導体では正孔がキャリアとなる。この2つのタイプの半導体を接合し (pn 結合)、n型半導体と正極を、p型半導体と負極を接続して逆バイアス電圧をかけることで、各半導体のキャリアが逆方向に移動し、半導体検出器に不可欠な空乏層を生成する。

半導体検出器では、荷電粒子が空乏層に入射した際に電子、正孔対が生成し、それぞれが電場によって電極に集められることで、その電気信号として出力できる。

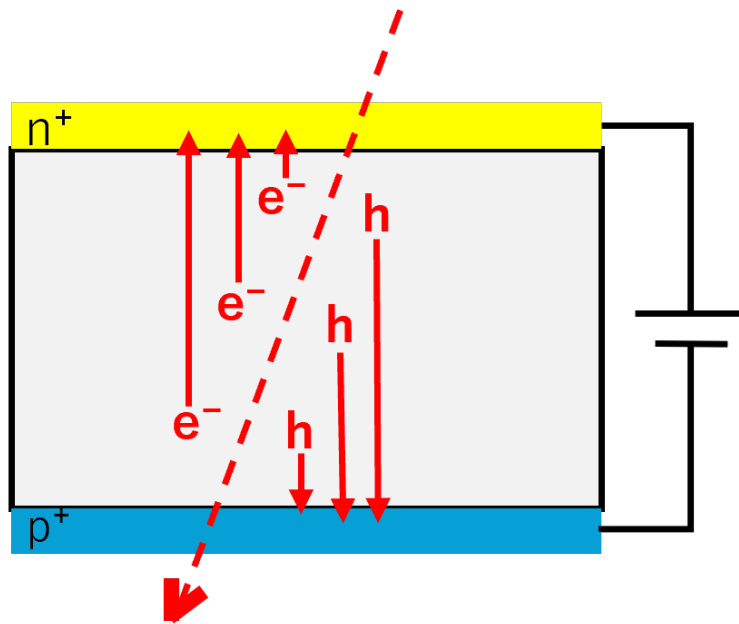


図 2.1: 半導体検出器の仕組み

2.2 LGAD

LGAD は、p 型半導体の中に強くドーピングされた n 型半導体 (n^+) を打ち付けた n^+ -in-p 型のシリコン型半導体ダイオードを基本としながら、 n^+ 層の直下に非常に強くドーピングされた p 型半導体である p^{++} 層をゲイン層として追加することにより、この 2 層間で高電場が発生し電子雪崩を発生させる。この電子雪崩が浅い領域で起こるので、大きくかつ立ち上がりの速い信号を検出することができ、 $O(10)$ ps もの優れた時間分解能を発揮することができる。[3]

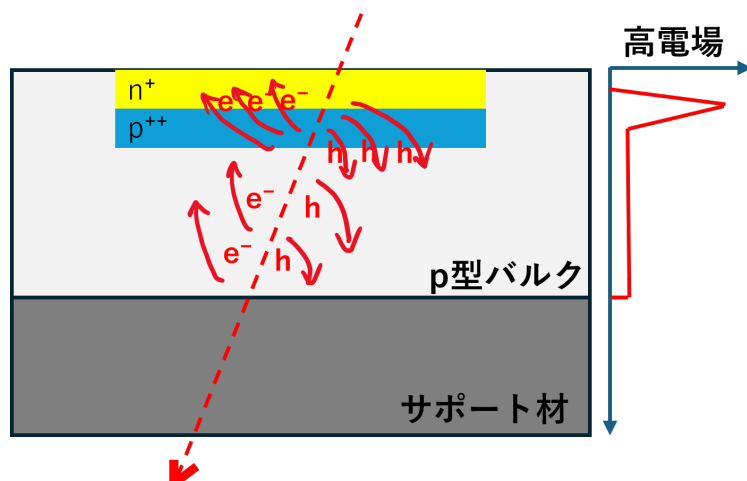


図 2.2: LGAD の構造 ([3] を元に作成)

2.2.1 DC-LGAD

DC-LGAD は、LGAD を並べることによって検出器としたものである。しかし、DC-LGAD ではゲインした電荷を直接信号として検出するため、各電極ごとにゲイン層を分けて隣接する電極に入る信号が流れ込まないようにしなければならない。その結果電極直下でのみ電子雪崩が起きるので、荷電粒子が入射した位置によって全く反応しない不感領域が存在するという問題があった。[3]

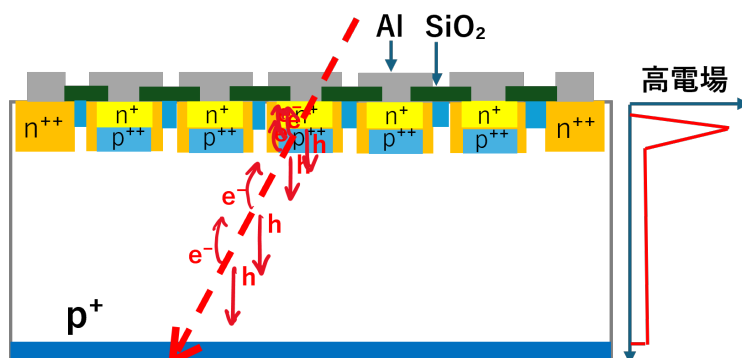


図 2.3: DC-LGAD の構造 ([3] を元に作成)

2.3 AC-LGAD

AC-LGAD では、 n^+ 層と p^{++} 層をセンサーの有感領域全体に一様に分布させ、 n^+ 層と信号読み出し専用の Al 電極を SiO_2 層によって AC 結合している。これにより、ゲイン層のない不感領域を無くしつつ、隣接する AC 電極にも信号が現れる（電荷共有）ので、信号の大きさに対して重み付けを行うことで、優れた位置分解能も両立できる。[3]

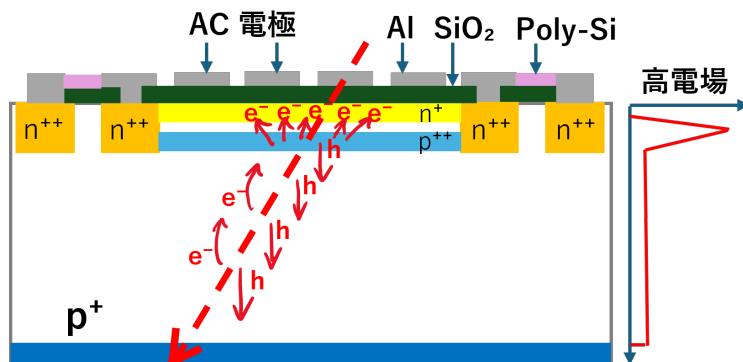


図 2.4: AC-LGAD の構造 ([3] を元に作成)

AC-LGAD にはパッド型、ストリップ型、ピクセル型の 3 種類が存在するが、BTOF ではストリップ型が採用されている。ストリップ型 AC-LGAD は図 2.5 のように、表面全体に太さ $50\ \mu\text{m}$ のストリップが並んでおり、センサーの端に信号を読み出す AC 電極パッドとグラウンドに繋ぐ DC 電極パッドがある。またセンサーの裏面全体は HV 電極になっている。

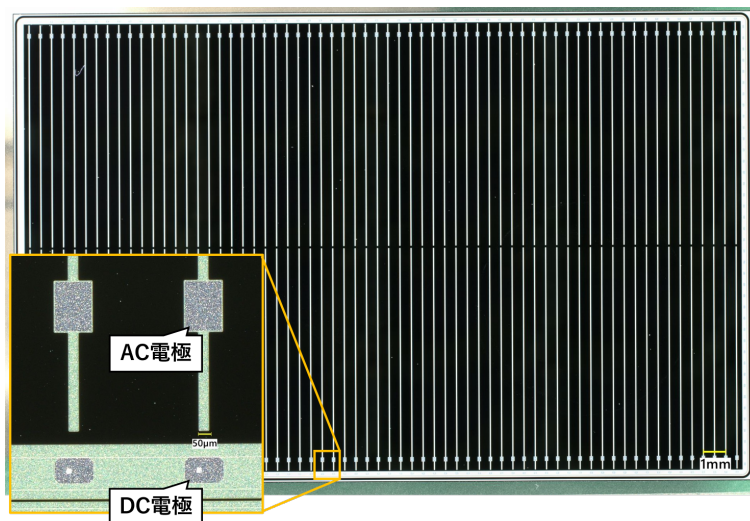


図 2.5: ストリップ型 AC-LGAD センサーの全体と電極付近のアップ

2.3.1 AC-LGAD の電気的特性

AC-LGAD の HV 電極と DC 電極間に電圧を印加した際に流れる暗電流をプロットした I-V 曲線は図 2.6 のようになっている。AC-LGAD では、印加電圧を上げていくことにより徐々にゲイ

ン層が空乏化し、その後バルクの空乏化が始まる。バルクが空乏化している間は nA 領域で安定した暗電流が流れるが、ブレイクダウンすると暗電流が一気に大きくなる。よって AC-LGAD がその時間分解能を遺憾なく発揮できる領域は、ゲイン層がすべて空乏化してからブレイクダウンまでの領域であり、この領域の大きさが AC-LGAD の性能に直結している。

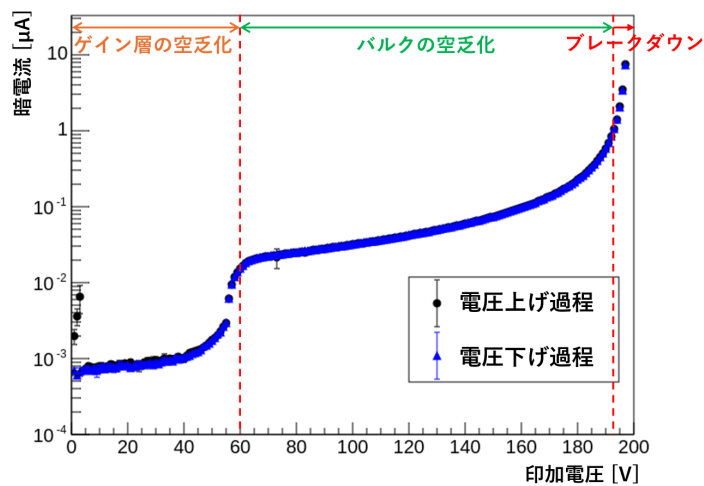


図 2.6: AC-LGAD の I-V 曲線 (縦軸対数)

2.3.2 信号読み出し基板

AC-LGAD の信号読み出しには、図 2.7 の基板を使用している。この基板の HV 電極と AC-LGAD の HV 電極を接着し、センサーの DC 電極パッドと基板のグラウンドをワイヤーで接合 (ワイヤーボンディング) することにより、センサーに電圧を印加することが可能である。同様にセンサーの AC 電極パッドと基板の信号パッドを接合することで信号を読み出し、信号増幅も行っている。

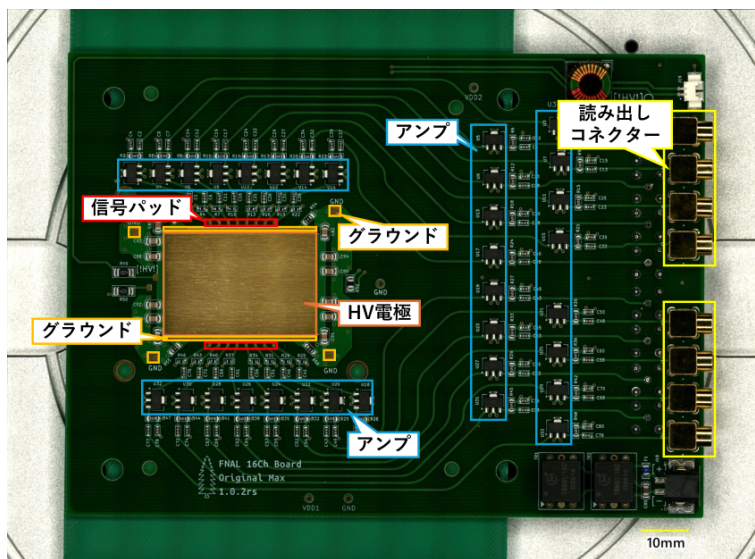


図 2.7: 信号読み出し基板

2.3.3 報告された問題

ストリップ型フルサイズ AC-LGAD センサーの研究過程におけるワイヤーボンディングにおいて、センサー構造が破壊されるという事例が報告された。具体的には、図 2.8 で示したように数十 V の時点で暗電流が $1\ \mu\text{A}$ を超えて流れている。暗電流が大きくなるとショットノイズもその平方根に比例して大きくなり、信号の立ち上がり時間のゆらぎを大きくしてしまう。結果としてセンサーの時間分解能を悪くしてしまうので、BTOF において実機生産するために、破壊原因を究明することは喫緊の課題であった。

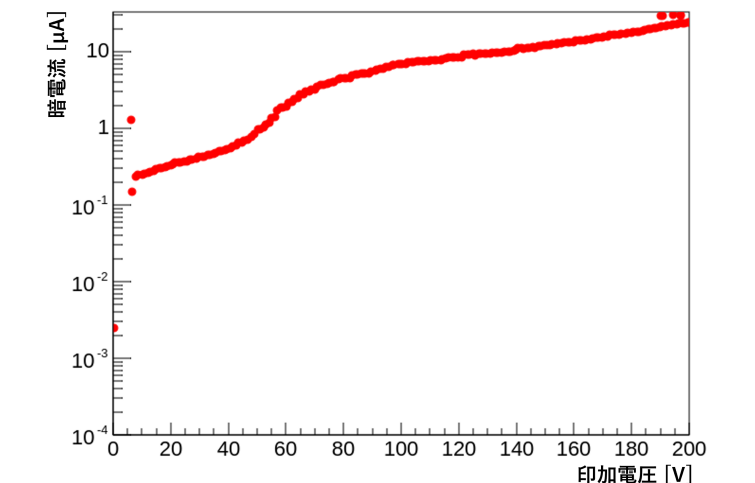


図 2.8: 破壊されたセンサーの I-V 曲線

第3章 ワイヤーボンディングによる調査

3.1 調査内容

本研究では、パラメーターを変更しながらワイヤーボンディングを行うことで、図 2.5 のストリップセンサーが破壊される原因を系統的に調査した。センサーの破壊は、図 2.6 から図 2.8 のようにボンディング前後の I-V 曲線が変化しているか、特に暗電流が $1\mu\text{A}$ を超える電圧を比較することによって判断した。また、実際にテストビーム実験で使用予定のセンサーに対して最適条件でのボンディングを行った。

3.2 ワイヤーボンディング

ワイヤーボンディングとは、半導体チップ上の電極とパッケージ端子を金属製ワイヤーで接合する技術である。ワイヤーボンディングは、ワイヤーを熱して接合するボールボンディングと超音波を印加して接合するウェッジボンディングに分けられ、様々な金属線が用いられるが、AC-LGAD のワイヤーボンディングでは、Al ワイヤーを用いたウェッジボンディングが行われている。ウェッジボンディングでは、

1. ワイヤーを一つ目のパッドに押し付ける
2. 超音波を印加する
3. ワイヤーを持ち上げ、ループを形成する
4. ワイヤーを二つ目のパッドに押し付ける
5. 超音波を印加する
6. 余ったワイヤーを切断する

という工程によってボンディングが行われる。(図 3.1)

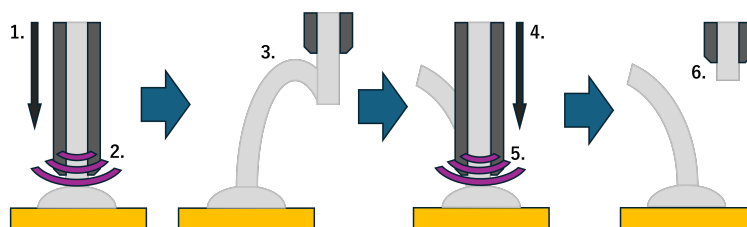


図 3.1: ウェッジボンディングの作業手順

3.3 使用機器、使用部品

本研究では、九州大学が所有するワイヤーボンダー及び I-V 測定用のプローブステーションを使用した (図 3.2、図 3.3)。



図 3.2: ワイヤーボンダー



図 3.3: プローブステーション

破壊条件の再現には、以前から使用していた、HV 電極に穴が空き、疑似的なグラウンドとなるように後から薄い Al 板が接着された読み出し基板を使用した (図 3.4)。疑似グラウンドは、センサーのパッドに近い位置に配置しておくことで、基板グラウンドとのボンディングで基板に付いている部品の金属部分に接触してしまう場合に代替のグラウンドとなる役目を果たしている。最適条件でのボンディングには、新たに作成した初めから HV 電極の近くにグラウンドが埋め込まれた読み出し基板を使用した (図 3.5)。

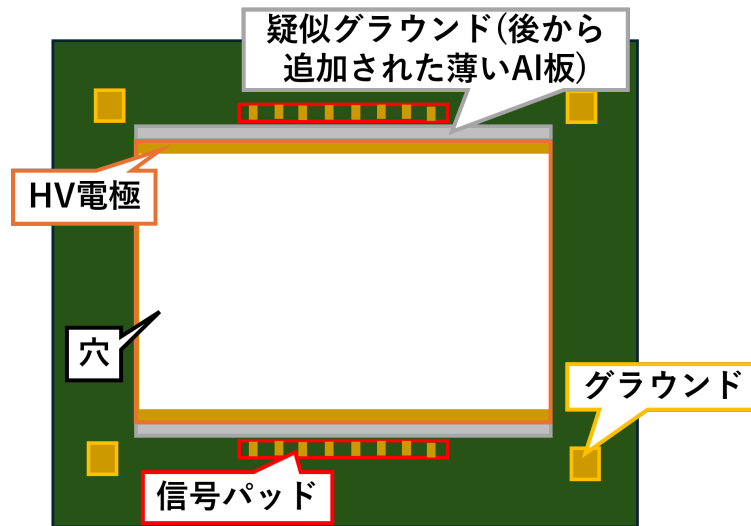


図 3.4: 破壊条件の再現用の読み出し基板の特徴

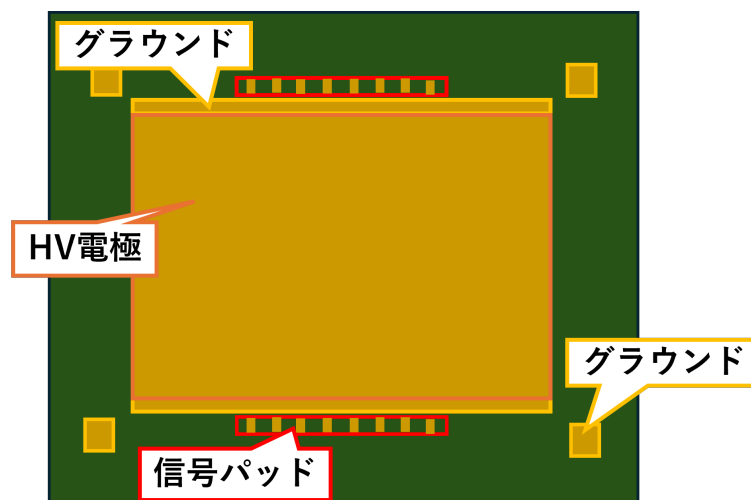


図 3.5: 最適条件でのボンディング用の読み出し基板の特徴

3.4 ボンディングパラメーター設定

本研究では、太さが $25\ \mu\text{m}$ のワイヤーを使用した。ボンディングにおいて変更したパラメーターは、電極パッド中心からのボンディング位置のずれ、ボンディングの際にワイヤーをパッドに押し付ける強さ (Force、単位 g)、圧着に使用する超音波強度 (Power、任意単位) である。(図 3.6) Power のうち Start Power はボンディング初期に一旦上げられる Power で、Bond Power はボンディングが行われる最終的な Power である。Force のうち Start Force はワイヤーの設置から Start Power に到達するまでに維持される Force で、Bond Force はボンディング終了まで維持される Force である。Force 及び Power はボンダーのパラメーター設定画面から決定し (図 3.7)、ボンディング位置は実際にボンディングする際に調整して決定した。

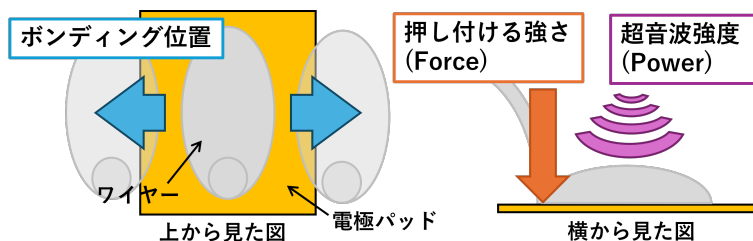


図 3.6: 変更したパラメーター

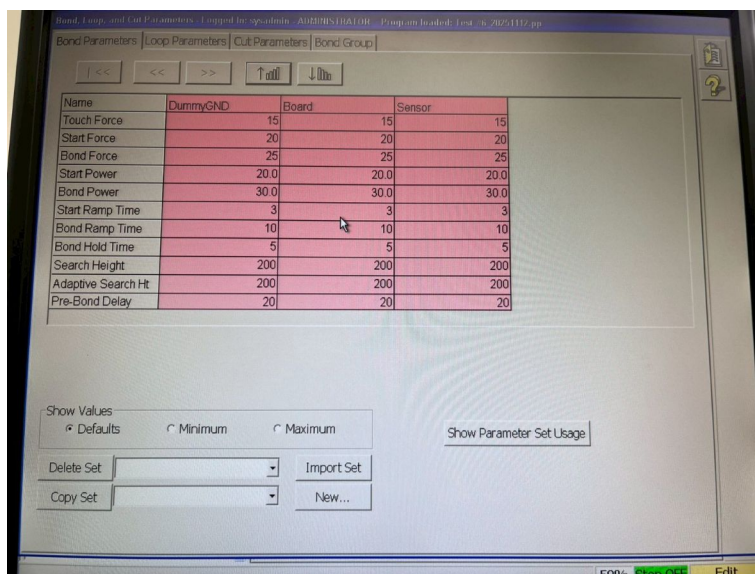


図 3.7: ワイヤーボンダーのパラメーター決定画面

3.5 調査手順

本研究では、全体を通して以下の手順を繰り返すことで調査を行った。

1. ボンディング前の AC-LGAD センサーの I-V 曲線を計測する。
2. 該当箇所のワイヤーボンディングを実施する。
3. ボンディング後の I-V 曲線を計測する。

3.5.1 破壊条件の再現

破壊条件の再現におけるワイヤーボンディングは、以下の設定で行った。

1. ワイヤーボンダーで元々使用されていた基準値設定（表 3.1）

表 3.1: ワイヤーボンダーの基準値設定

Start Force	20
Bond Force	25
Start Power	20.0
Bond Power	30.0

2. ボンディング位置の変更

- (a) パッド中心からパッド全体の 25% 程度
- (b) パッドの端
- (c) パッドの外

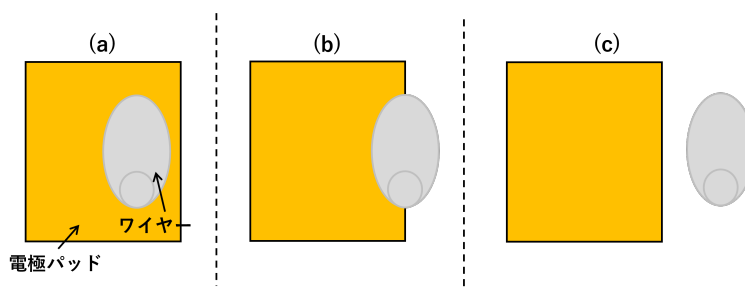


図 3.8: ボンディング位置

3. Force パラメーターの変更

- (a) 基準値の 5 倍（ Start Force= 100 、 Bond Force= 125 ）

4. Force パラメーター及び Power パラメーターの変更

- (a) どちらも基準値の 5 倍（ Start Force= 100 、 Bond Force= 125 、 Start Power= 100 、 Bond Power= 150 ）

5. Power パラメーターの変更

- (a) 基準値の 5 倍（ Start Power= 100 、 Bond Power= 150 ）
- (b) 基準値の 2 倍（ Start Power= 40 、 Bond Power= 60 ）

ボンディングを行った箇所は、以下の 2 か所である。

1. センサーのグラウンドパッドと基板のグラウンドパッド（5 本）（図 3.9 の赤色の線）
2. センサーの信号パッドと基板の疑似グラウンド（5 本）（図 3.9 の緑色の線）

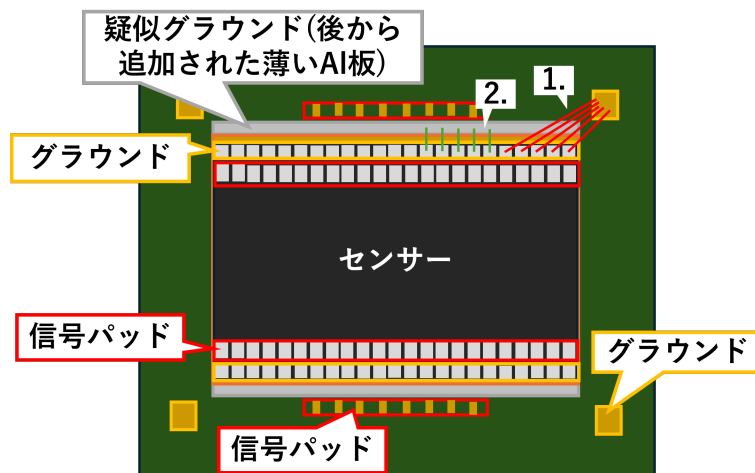


図 3.9: 破壊条件の再現においてボンディングする箇所

3.5.2 最適条件でのボンディング

最適条件でのボンディングは、作成した5枚すべてのセンサーにおいてワイヤーボンダーの基準値（図3.7の値）で行った。

ボンディングを行った箇所は、以下の3か所である。

1. センサーのグラウンドパッドと基板のグラウンドパッド（センサーの四隅に各3本ずつ）（図3.10の赤色の線）
2. センサーの信号パッドと基板の信号パッド（8本×2列）（図3.10の青色の線）
3. センサーの信号パッドと基板のグラウンドパッド（2の外側に各3本ずつ）（図3.10の緑色の線）

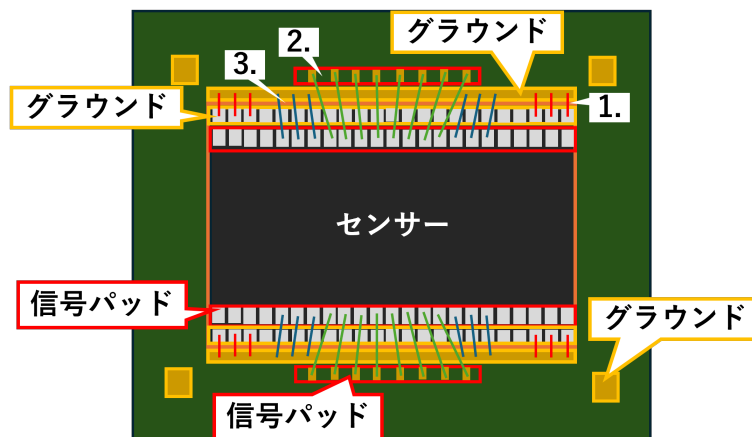


図 3.10: 最適条件でのボンディングにおいてボンディングする箇所

第4章 調査結果

4.1 パラメーター変更によるセンサー破壊

4.1.1 基準値

ワイヤーボンダーの基準値で行ったボンディングの様子は図 4.1、図 4.2 のようになり、またボンディング後の I-V 曲線は図 4.3 のようになった。結果としてセンサーの破壊は見られなかった。なお、ゲイン層が完全に空乏化するまでの領域において、暗電流が落ち着くまでに時間がかかり値が大きくなっている。本研究では、この影響はセンサーの破壊に直結しないと判断し、無視している。

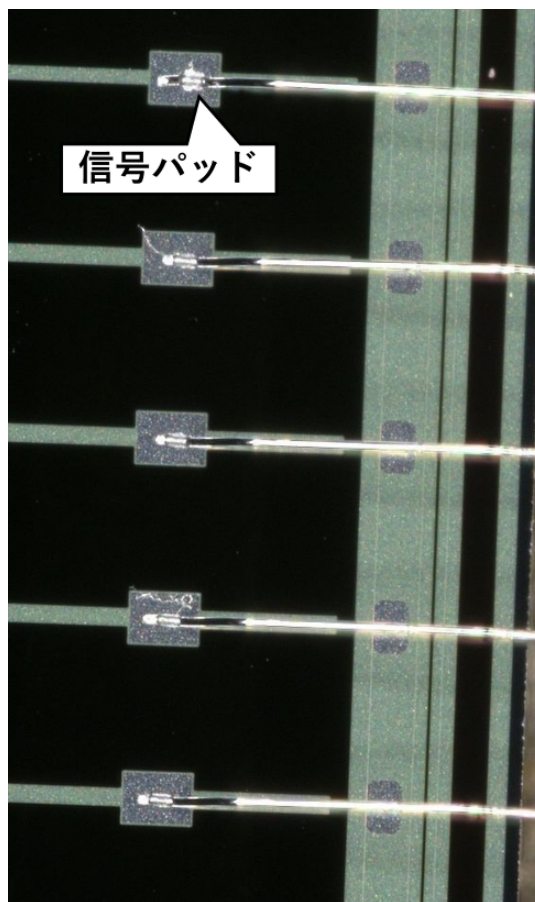
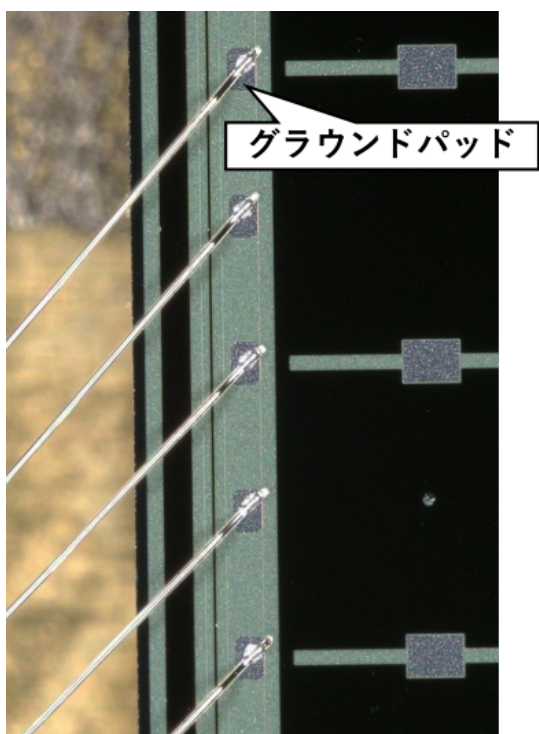


図 4.1: センサーのグラウンドパッドにボンディングした様子

図 4.2: センサーの信号パッドにボンディングした様子

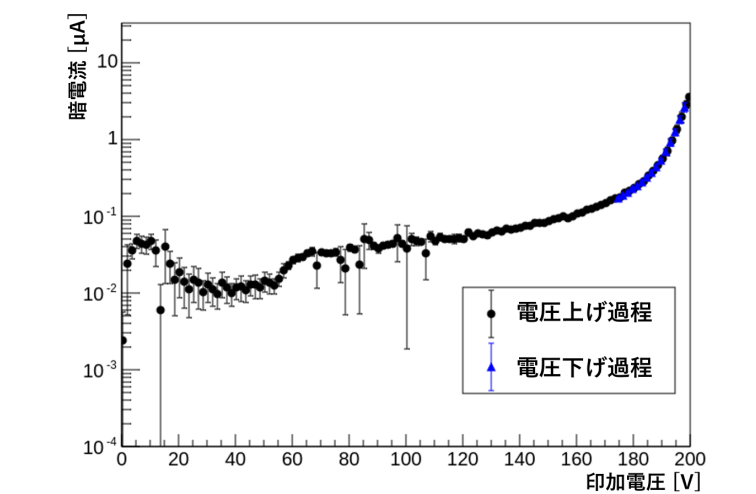


図 4.3: ボンディングした後の I-V 曲線

4.1.2 ボンディング位置

ボンディング位置を変更して行ったボンディングの様子は図 4.4、図 4.5、図 4.6 のようになり、またボンディング後の I-V 曲線は図 4.7、図 4.8、図 4.9 のようになった。結果としてボンディング位置の変更によるセンサーの破壊は見られなかった。

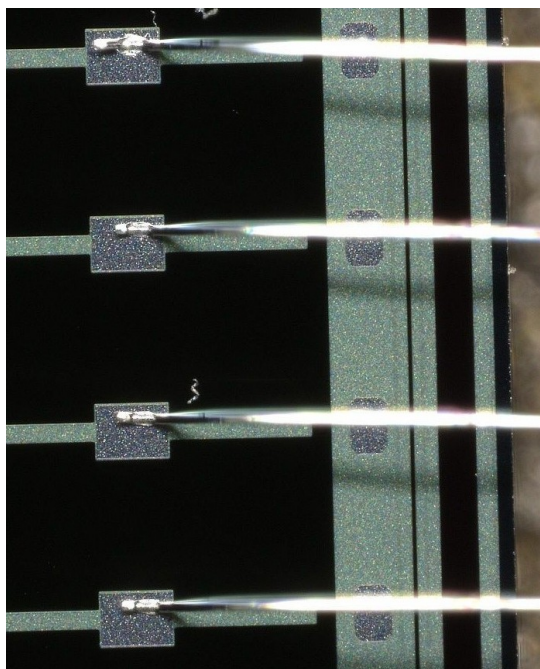


図 4.4: パッド中心から 25% 程度ずらしてボンディングした様子

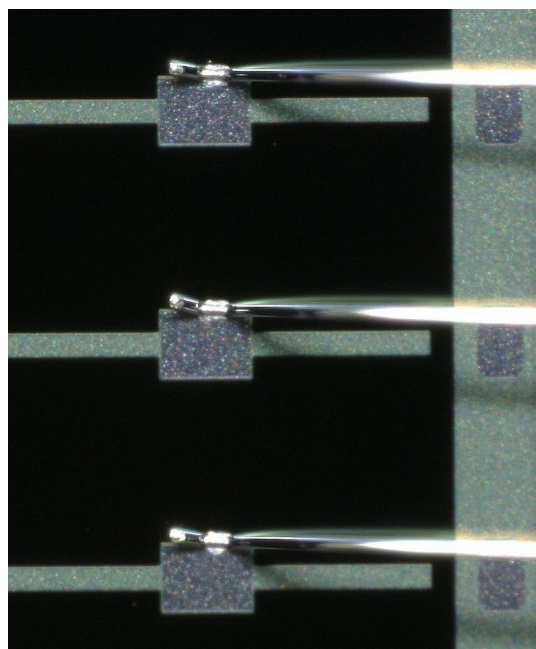


図 4.5: パッドの端にボンディングした様子

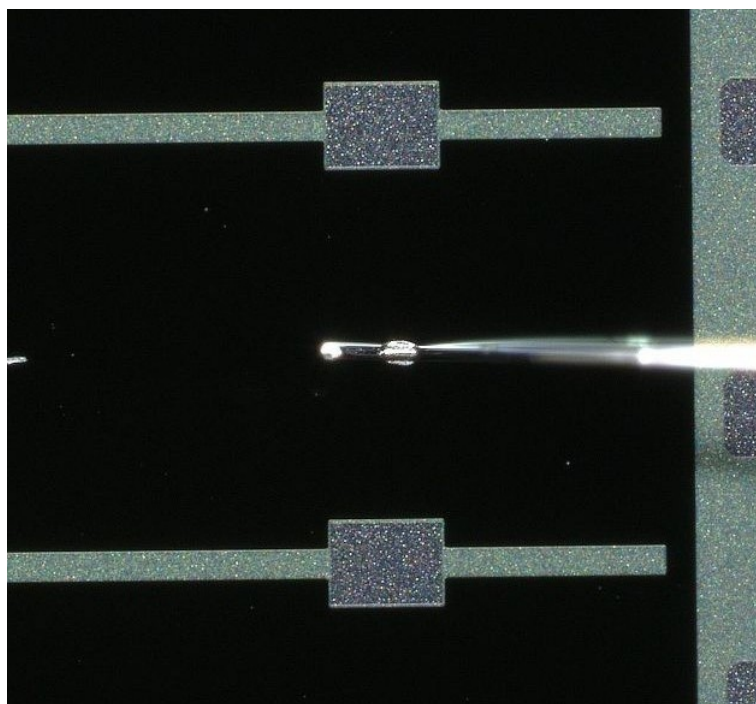


図 4.6: パッドの外にボンディングした様子

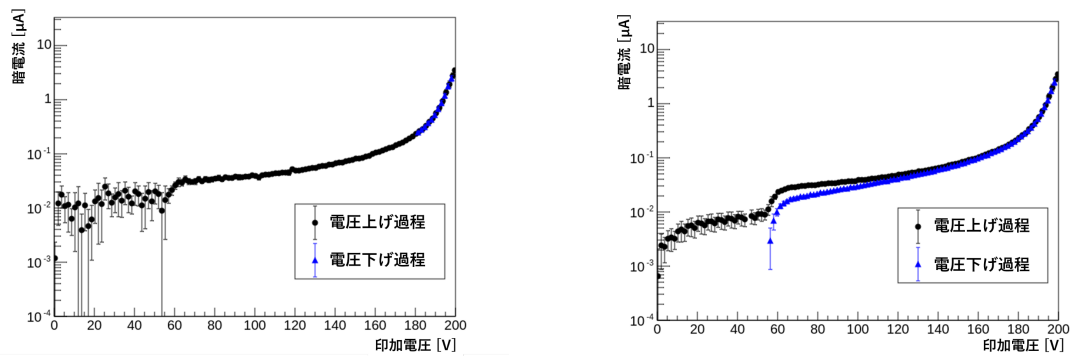


図 4.7: パッド中心から 25% 程度ずらしてボンディングした後の I-V 曲線
 図 4.8: パッドの端にボンディングした後の I-V 曲線

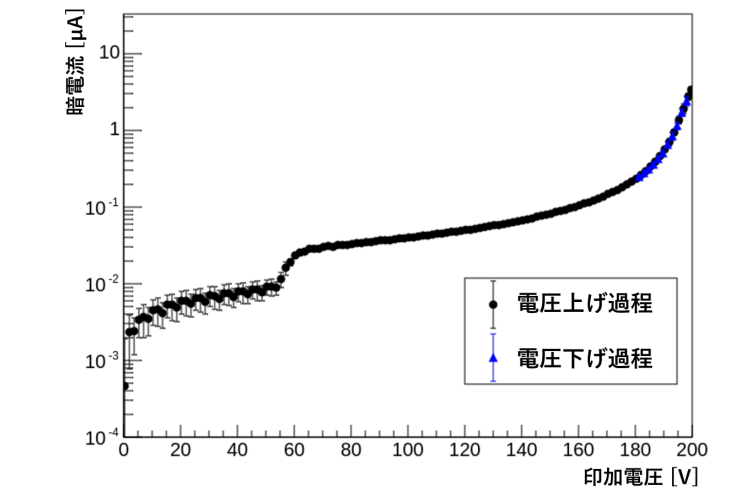


図 4.9: パッドの外にボンディングした後の I-V 曲線

4.1.3 Force

Force を 5 倍の値に変更して行ったボンディングの様子は図 4.10 のようになり、また I-V 曲線のデータは紛失して存在しないが、Force によるセンサーの破壊も見られなかった。

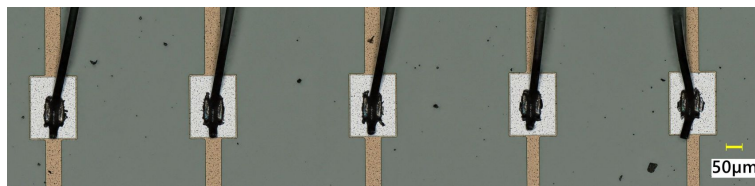


図 4.10: Force を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子

4.1.4 Force 及び Power

Force 及び Power を両方とも 5 倍の値に変更して行ったボンディングの様子は図 4.11 のようになり、またボンディング後の I-V 曲線は図 4.12 のようになった。結果としてセンサーが破壊された。

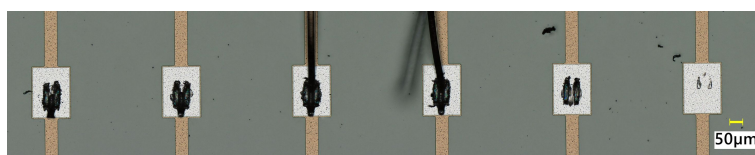


図 4.11: Force 及び Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子

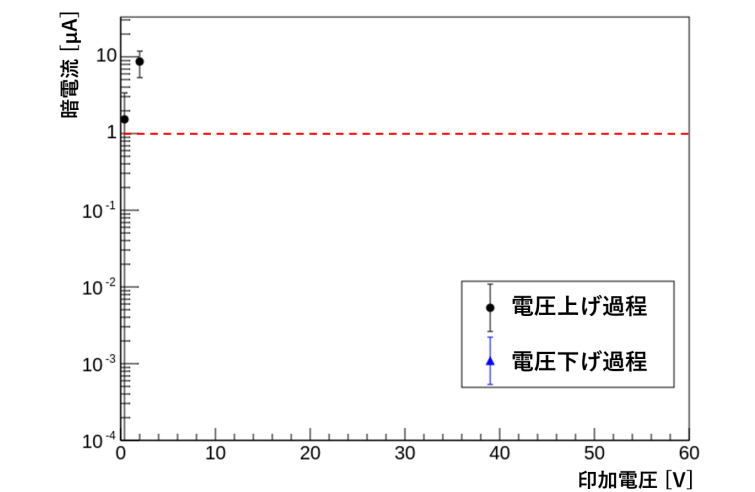


図 4.12: Force 及び Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線

4.1.5 Power

Power を 5 倍の値に変更して行ったボンディングの様子は図 4.13、図 4.14 のようになり、ボンディング後の I-V 曲線は図 4.15、図 4.16 のようになった。結果としてセンサーが破壊された。

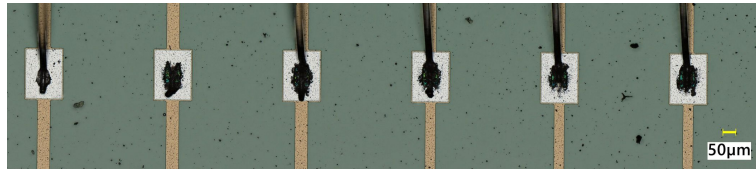


図 4.13: Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした様子

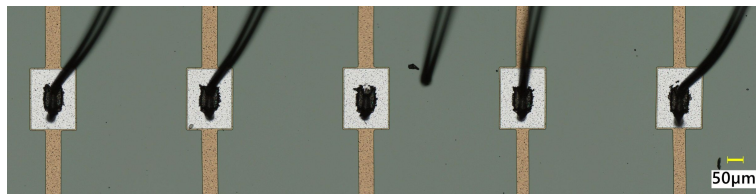


図 4.14: Power を基準値の 2 倍にしてボンディングした様子

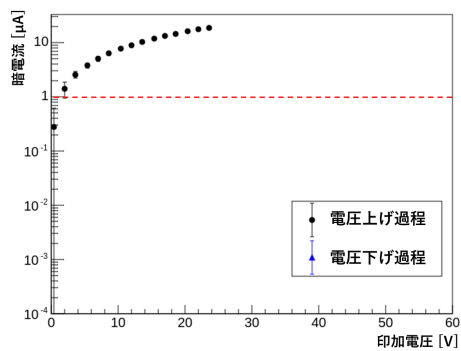


図 4.15: Power を基準値の 5 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線

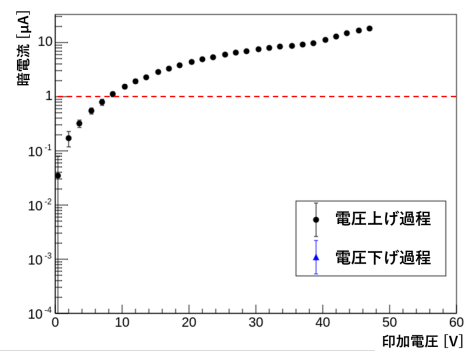


図 4.16: Power を基準値の 2 倍にしてボンディングした後の I-V 曲線

4.1.6 Power の値による I-V 曲線の傾向

破壊されたセンサーの I-V 曲線を図 4.17 にまとめた。この図から、Power の値を大きくすればするほど、暗電流が大きく流れる傾向があることがわかる。

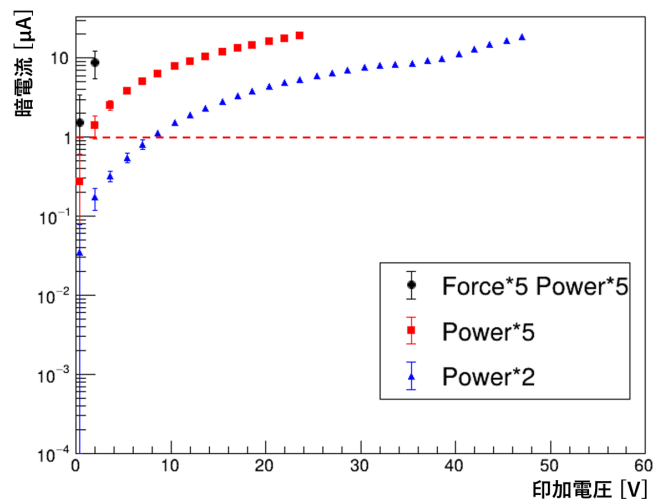


図 4.17: 破壊されたセンサーの I-V 曲線

4.2 最適条件でのボンディング

最適条件でのボンディングにおいて作成したセンサーの様子は図 4.18 のようになり、また作成した 5 枚のセンサーすべてにおいて破壊は見られなかった (図 4.19-図 4.23)。なお、図 4.23 のセンサーではあえてブレークダウン電圧の低いセンサーを使用している (図 4.24)。

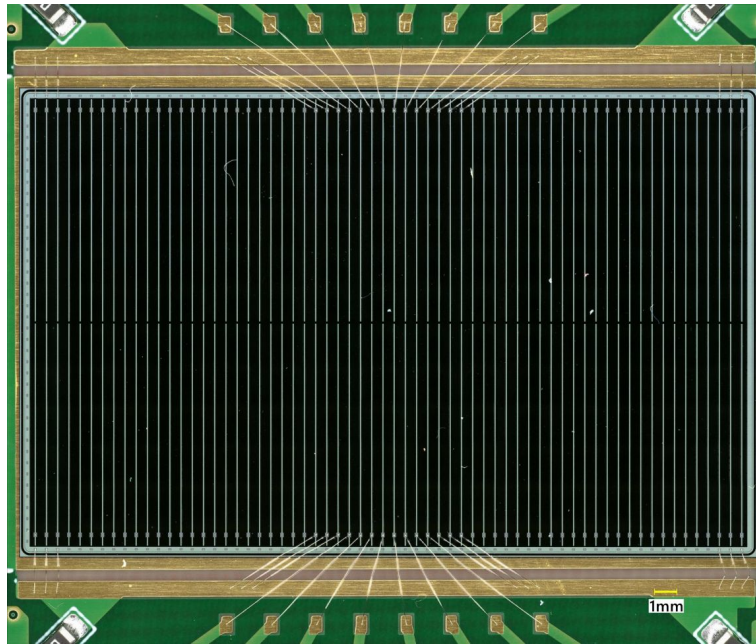


図 4.18: 最適条件でボンディングした様子

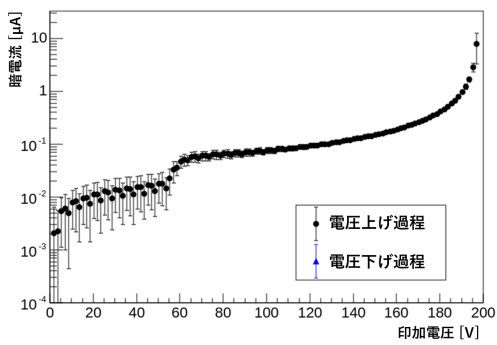


図 4.19: 最適条件でのボンディング (1 枚目)

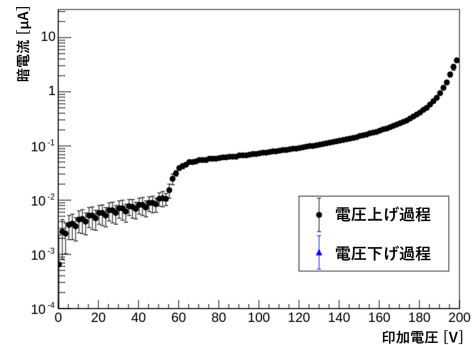


図 4.20: 最適条件でのボンディング (2 枚目)

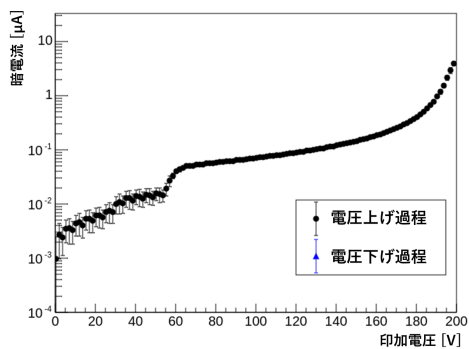


図 4.21: 最適条件でのボンディング (3 枚目)

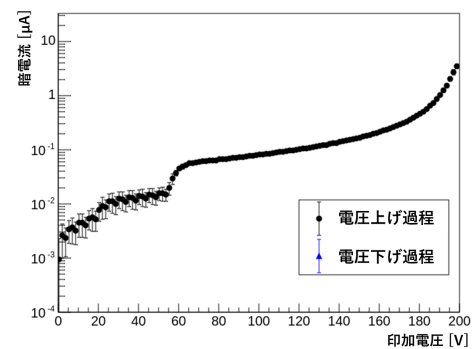


図 4.22: 最適条件でのボンディング (4 枚目)

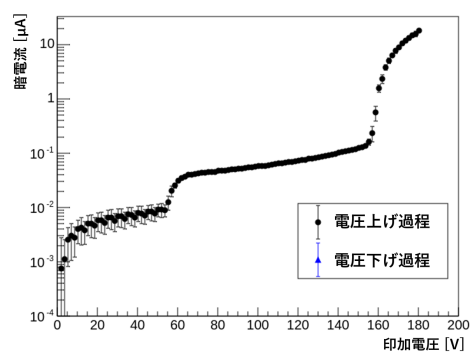


図 4.23: 最適条件でのボンディング (5枚目)

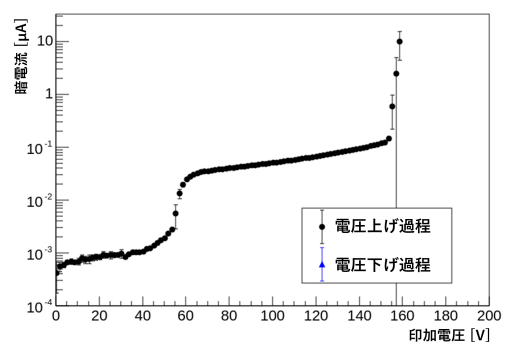


図 4.24: ボンディング前の5枚目のセンサー

4.3 パラメーター変更以外によるセンサー破壊

ワイヤーがワイヤーボンダーに通っていない状態でボンディングを行った結果、最適なパラメーターにもかかわらず、センサーが破壊された（図 4.25）。

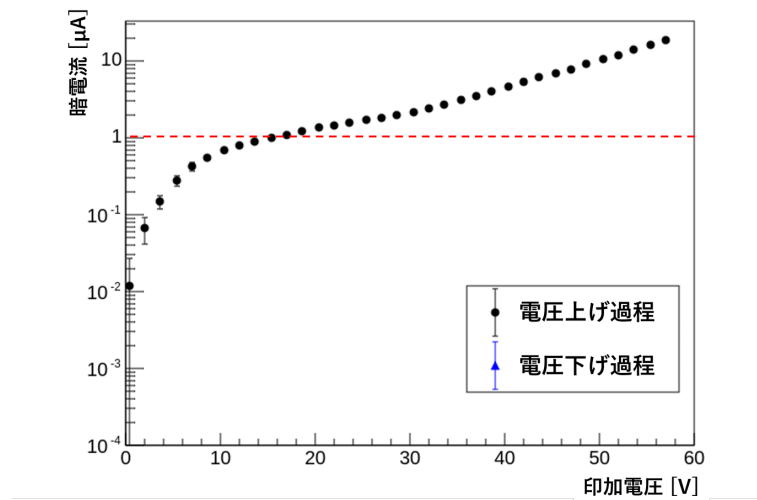


図 4.25: ワイヤーなしでボンディングした後の I-V 曲線

第5章 考察及び結論

5.1 考察

本研究の結果から、AC-LGAD は超音波強度が大きくなるとすぐに破壊されてしまうことがわかった。またワイヤーが無い状態で超音波を印加した場合にも破壊された。一方電極パッドの外にボンディングしても、ワイヤーを押し付ける強さを5倍にしても破壊されなかった。ここから、ワイヤーボンディングにおいて重要であるのはワイヤー越しに適切な超音波を印加することであると考えられる。

5.2 結論及び展望

本研究では、ストリップ型フルサイズ AC-LGAD センサーに対する最適なワイヤーボンディング条件を確立することに成功した。具体的には、AC-LGAD は超音波強度に対して敏感であるが、太さ $25\ \mu\text{m}$ のワイヤーにおける基準値であれば、問題なくボンディングできることが明らかになった。一方で、センサーへのボンディング位置を電極パッドの外にしても、ワイヤーを押し付ける強さを5倍にしてもセンサーを破壊しないことも明らかになった。本研究では超音波強度を基準値の5倍及び2倍しか調査していないため、1.5倍などにしてさらに細かなスキニングを行い、正常な I-V 曲線からどのように変化するかを探求することは今後の課題である。また超音波の印加時間による影響の変化を探求することも、今後の課題としたい。

謝辞

本研究に当たり、まずは直接指導していただいた八野哲助教に感謝を申し上げます。研究内容の知識だけでなく、真摯に研究に取り組む姿勢など、私に足りない要素をたくさん指摘していただきました。未だに未熟な私ですが、間違いなく半年前の自分より成長していると感じることができたのはひとえに八野助教のおかげです。大変ありがとうございました。

また、志垣賢太教授にも感謝を申し上げます。研究のことでお話しする機会はそう多くありませんでしたが、研究以外の様々なことで相談に乗っていただきました。ありがとうございました。

クォーク物理学研究室の山口頼人准教授、本間謙輔准教授、三好隆博助教には、日々のミーティングにおいて私の発表の不十分な点を指摘していただきました。ありがとうございました。

九州大学の東城順治教授、山中隆志助教には、ワイヤーボンダー及びクリーンルーム内の施設を快く貸し出していただいたことを感謝申し上げます。また山中隆志助教には、お忙しい中研究中に何度もお力を貸していただきました。本研究の成功は、お二人の力なくしてありえません。大変ありがとうございました。

修士課程2年の松谷奏さんには、AC-LGADに関わる研究を行っている先輩として、様々な知識を授けてもらい、また論文構成などでも手助け頂きました。ありがとうございました。

奈良女子大学修士1年の岩月小雪さんには、本研究において共に作業した同士として沢山助けいただきました。自分の足りない部分をたくさん補っていただいたおかげで、本研究を成功させることができました。ありがとうございました。

同期の皆さんにも、くだらない話から真面目な話まで、毎日いろんなことを共有できたことに感謝します。似た境遇の仲間が沢山いたことは、大変心の支えになりました。ありがとうございました。

最後に、この4年間経済的にも精神的にも支えてもらった家族に感謝します。有意義かつ楽しい大学生活を送れたのは、間違いなく家族のおかげです。大変ありがとうございました。

以上、私の卒業論文といたします。

参考文献

- [1] Brookhaven National Laboratory. Electron-ion collider.
- [2] Simone M. Mazza. Tof qa plans. Indico BNL event slides, 2026. University of California Santa Cruz.
- [3] Koji Nakamura, Sayuka Kita, Tatsuki Ueda, Kazuhiko Hara, and Hisanori Suzuki. First prototype of finely segmented hpk ac-lgad detectors. In JPS Conference Proceedings, volume 34, page 010016, 2021.
- [4] Yasuyuki Akiba. クォークグルーオンプラズマの物理 実験室で再現する宇宙の始まり. 共立出版, 2014.
- [5] R. Abdul Khalek, A. Accardi, J. Adam, D. Adamiak, W. Akers, M. Albaladejo, A. Albataineh, M. G. Alexeev, F. Ameli, P. Antonioli, N. Armesto, W. R. Armstrong, M. Arratia, J. Arrington, ..., and P. Zurita. Science requirements and detector concepts for the electron-ion collider: Eic yellow report. Nuclear Physics A, 1026:122447, 2022.
- [6] ePIC Collaboration. epic collaboration.