

Scintillating Fiber Trackerのための プラスチックファイバー溶着シートの開発

東北大理, 京大理^A

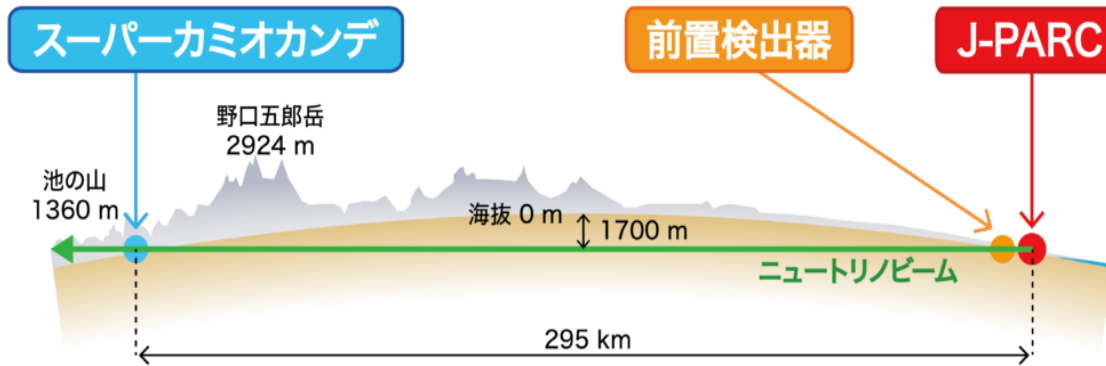
若林大貴, 市川温子, Lukas Berns, 木河達也^A

日本物理学会 2023年第78回年次大会

2023年9月19日

長基線ニュートリノ振動実験

T2K実験

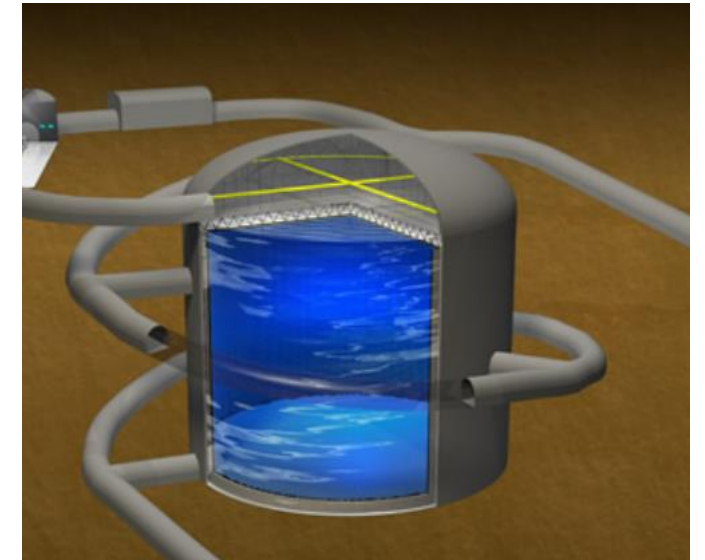


- J-PARCからのニュートリノビームを前置検出器と、295km離れたSK(スーパーカミオカンデ)で観測
- ニュートリノと反ニュートリノにおける振動の違いを測定し、レプトンのCP対称性の破れを調査
- 前置検出器ND280では振動前のニュートリノビームを測定し、フラックスや反応断面積を制限

HK(ハイパーカミオカンデ)実験

- T2K実験を継承し、2027年観測開始予定である長基線ニュートリノ実験
- 後置検出器としてSKの**約8倍**の有効体積を持つハイパーカミオカンデを使用
- **前置検出器ND280**のアップグレードも構想中である
- 通称ND280++

ハイパーカミオカンデの完成イメージ



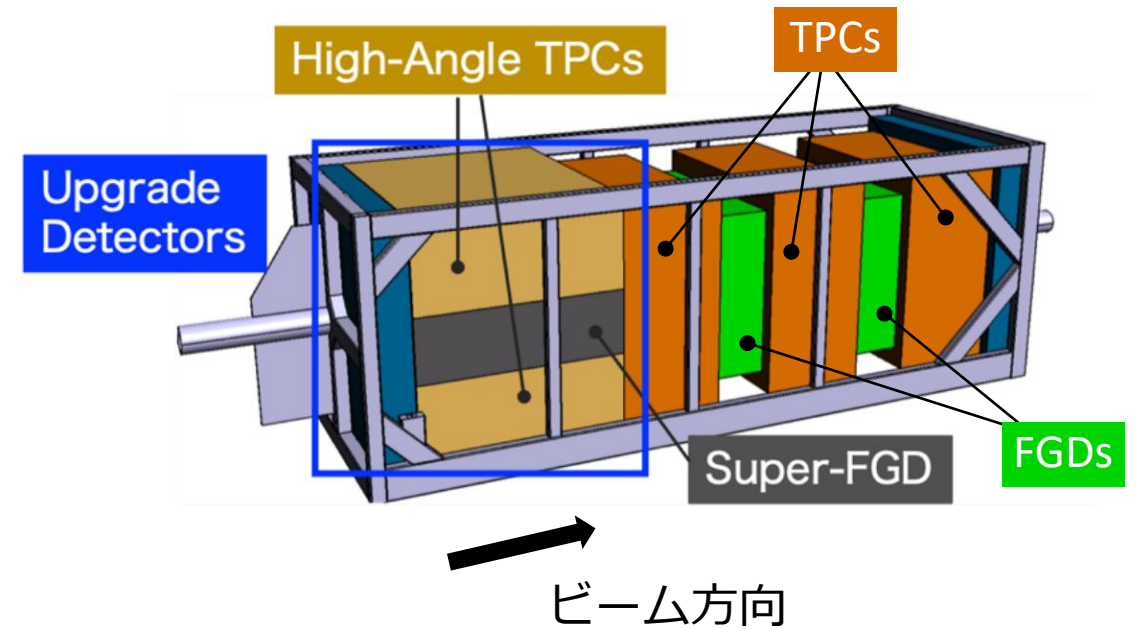
ND280++へのアップグレード

- 前置検出器ND280の課題

- 現在は主に炭素標的 (プラスチックシンチレータ)の検出器を使用している
- 水標的のSKと炭素標的のNDの違いが系統誤差となる
- 統計量の増加に伴って、この系統誤差の影響が大きくなる

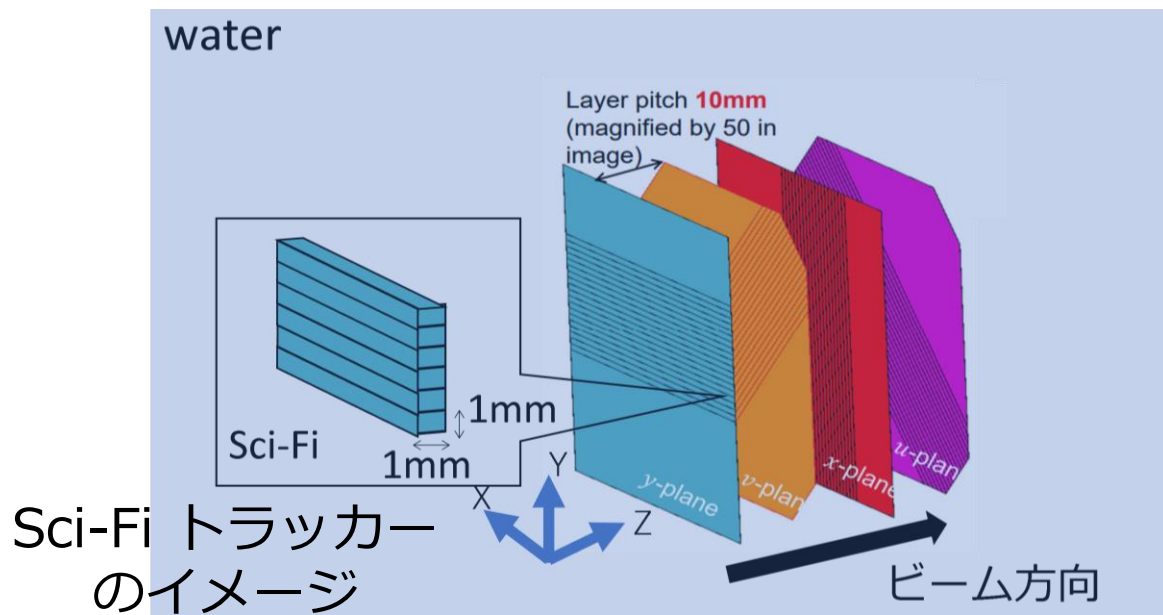
- 解決策

- ND280++ではHKと同じ水標的検出器の導入が提案されている
- 候補：SciFiトラッカー+水
- 課題：水の比率を高く保ちつつ、飛跡の検出効率、粒子識別能がプラスチックシンチレータ検出器と同程度の性能を得たい



*SciFi = **Scintillation Fiber**, コアにシンチレーション物質を混ぜたファイバー

SciFiトラッカーの概要



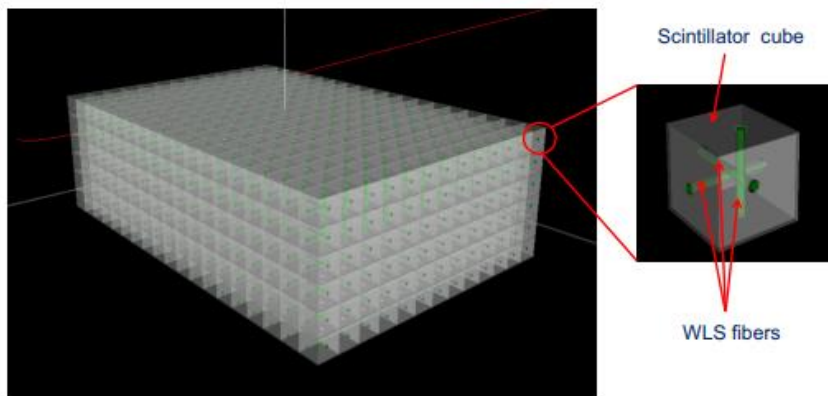
構成

- 1mm*1mm角状SciFiを並べたシート
- SciFiシート $\pi/4$ ずつ位相を変えながら10mmピッチでビーム方向に並べて水タンクに沈める
- ファイバー方向：1mmの位置分解能
- 高multiplicity事象でも飛跡を分離可能

SFGDとSciFiの比較

検出器	SFGD	SciFi
体積[m ³]	1.92*1.82*0.56	2*2*0.5
H2Oの比率[%]	0	90
光量 [p.e.]	35/cube ^[1]	29/fiber ^[2]
channel数 [ch]	60k	100k

次回のrunから運用予定のSFGD.
1cm角のシンチレータキューブからの光を3方向に挿入した波長変換ファイバーで読み出す

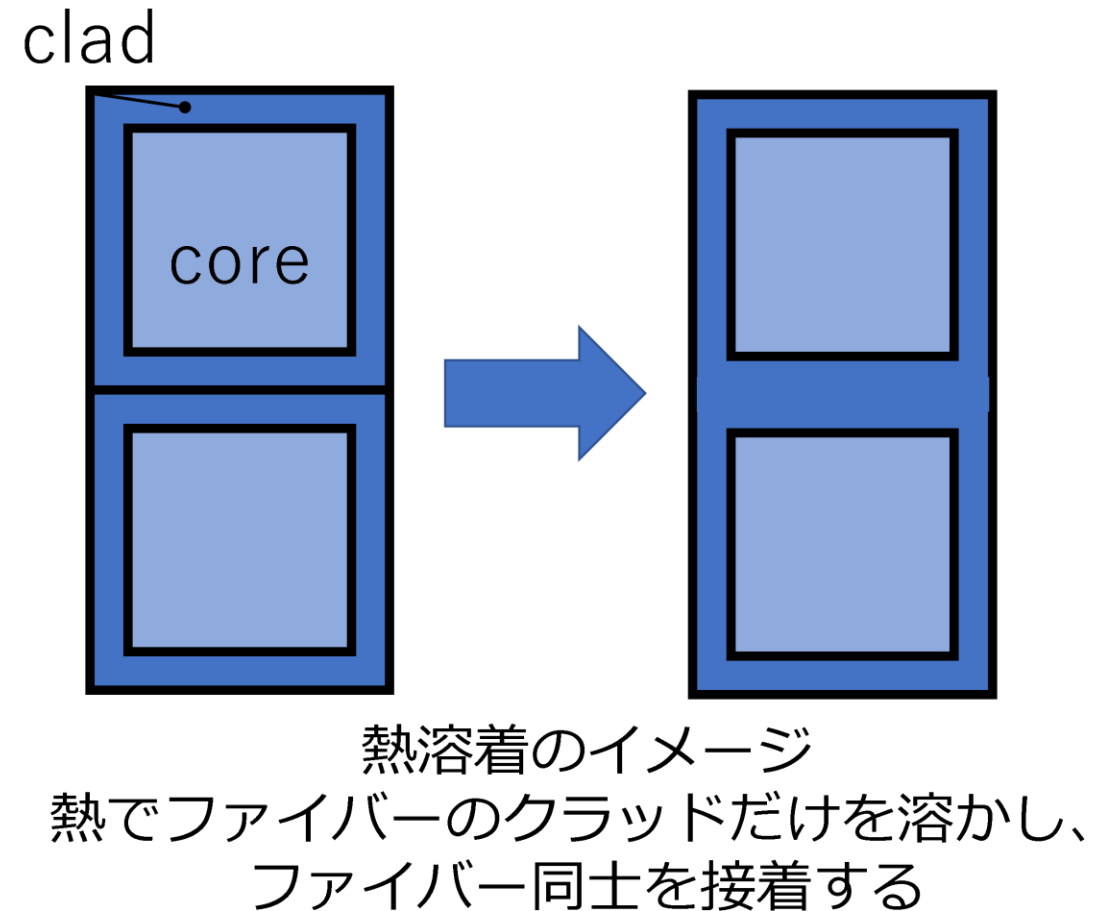


[1]A. Blondel, "A fully-active fine-grained detector with three readout views" arXiv:1707.01785 (2018).

[2]平本 綾美, "ニュートリノ反応測定実験に用いる高位置分解能 Scintillating Fiber Trackerの開発" 京都大学修士論文 (2017).

ファイバー固定方法の開発

- ファイバー固定の一般的な方法
 - 接着剤や金属フレームでファイバーを固定
 - 水以外の物質が増加
 - ファイバー間のデッドスペースが増加
→ 系統誤差の原因
- 本研究で開発中のファイバー固定法
 - ファイバーのクラッド同士を**熱溶着**しファイバー間に余分な物質を入れない

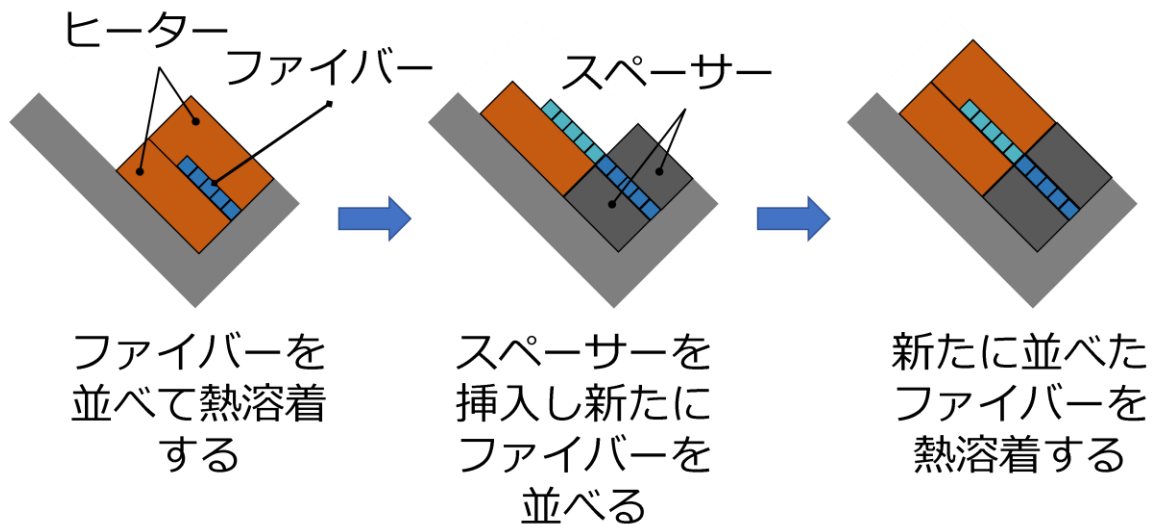


ファイバー固定方法の開発：溶着治具

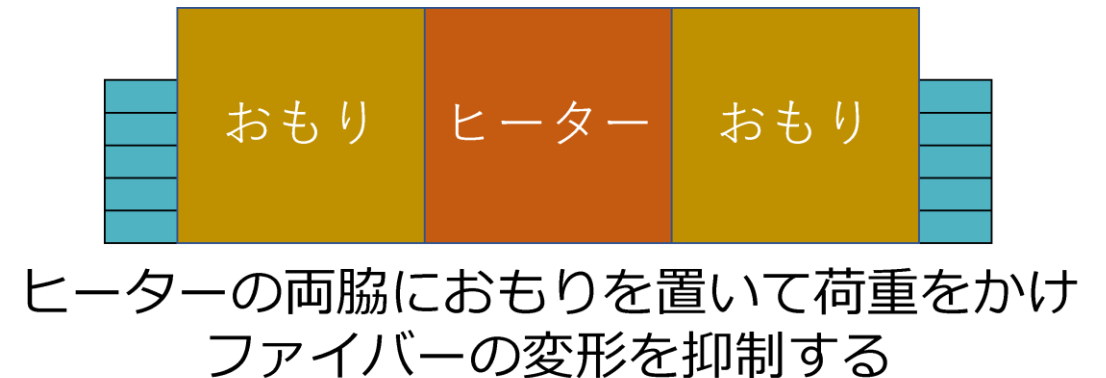
- 熱溶着のための治具を作成
 - 局所的な加熱：上下の治具にヒーターを内蔵する
 - スペーサーを傾斜に積み重ねることで大型化に対応
 - 熱膨張による変形を防ぐため、重力でファイバーの各側面に荷重をかける
 - 念のため加熱部両脇に荷重をかけて変形を防ぐ



荷重をかけずに恒温槽で加熱して膨張したファイバーの様子



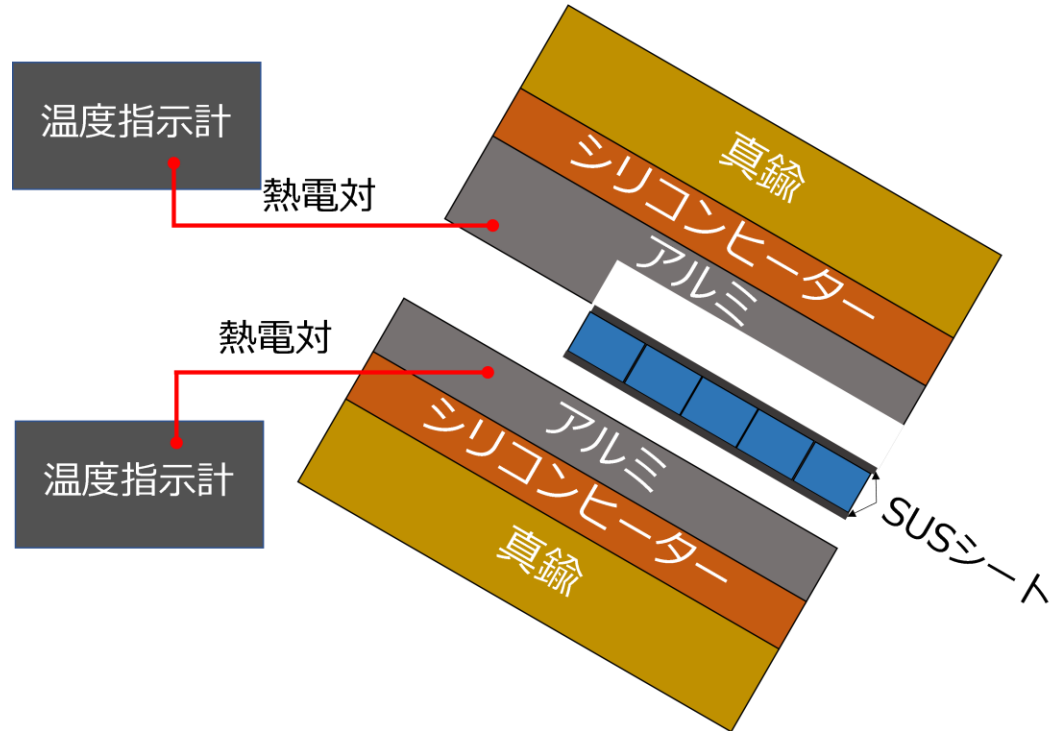
ファイバーシートの作り方手順/横から見た図



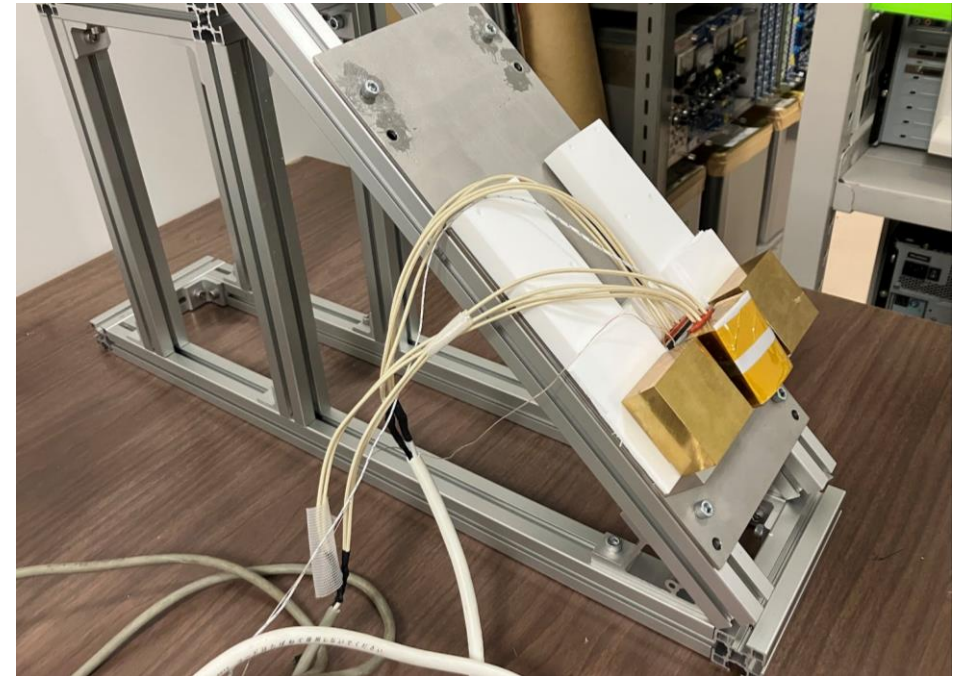
正面から見た図

熱溶着試験：セットアップ

- 約210cmのクリアファイバーを10本用意し、**125°Cで120分間**加熱した。
- 上側ヒーター治具で、アルミ表面の温度を基準として温度制御を行った。



ヒーター治具と熱電対の配線図



ヒーター治具実物

白い直方体は下側ヒーター治具のガイド。
両脇の荷重を載せる台の役割も果たす。⁷

熱溶着試験：セットアップ

- 直接ヒーター治具をファイバーに当てると、接触している箇所のみが溶けてファイバーに治具の跡が付いてしまうので、長さ方向の温度勾配を緩やかにするために、ファイバーと治具の間にSUSシートを差し込んだ。



SUSを挟まない場合^[3]
(PTEシートは挟んでいた)

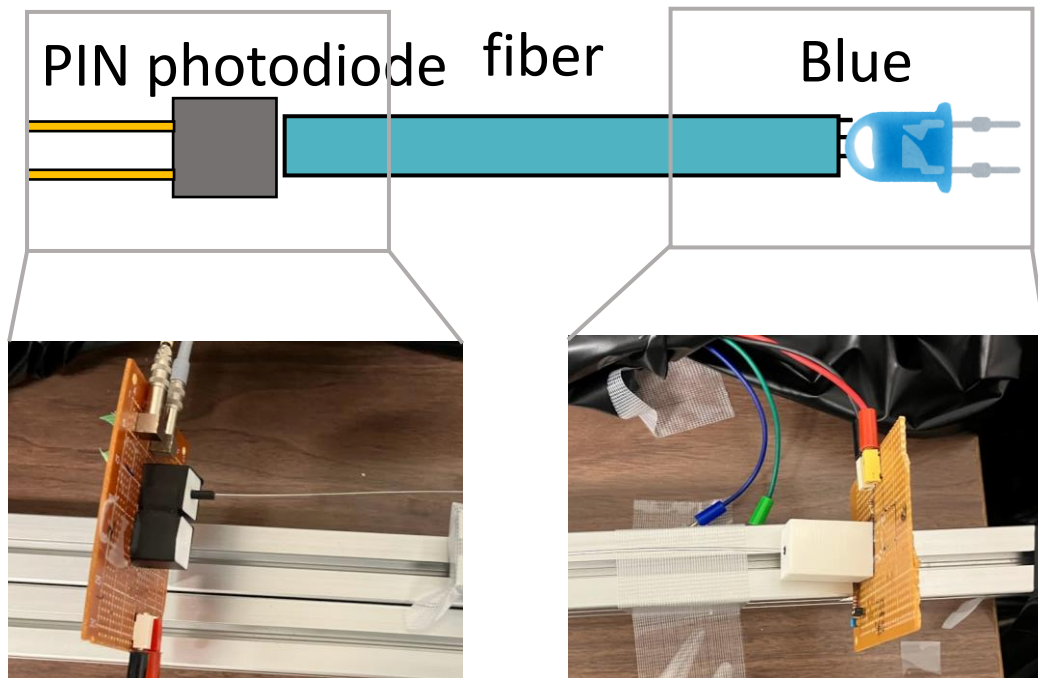


SUSを挟んだ場合
治具の跡がなくなった。

[3] 若林大貴, "Scintillating Fiber Trackerの開発に向けたプラスチックファイバーの溶着試験", 24pT2, 2023年日本物理学会春季大会

ファイバー品質検査システム

- ファイバー端の片方から直流青色LED光を入射し、伝達光を他端のPINフォトダイオードで読み出して出力電圧を測定した。
- コネクタカップリングの再現性チェック
 - ファイバーとコネクタのカップリングの再現性を確認するためにファイバーの着脱を繰り返したところ、LED側とセンサ側ともに、信号の相対誤差は1%未満だった。



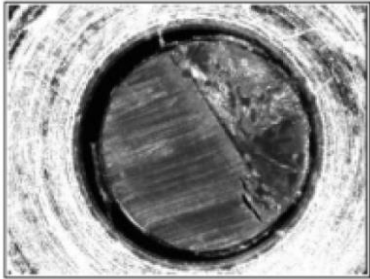
- ファイバー端面での散乱
 - ニッパーでファイバーをカットした際に切断面のばらつきによって6%の相対誤差が生じた。
 - ファイバー端面での伝達光の散乱を抑制するため、端面処理の方法としてホットプレート法を採用した。

端面処理:ホットプレート法

- 端面での反射を抑えるためにホットプレート法を用いた。

■フリーカット (カッターナイフでの切りっ放し)

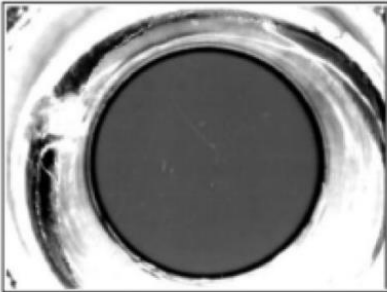
写真の左側から刃が入り、途中でファイバーが折れてしまっています。このように切断時にクラックが入ることもあり、その際には後処理が必要となります。



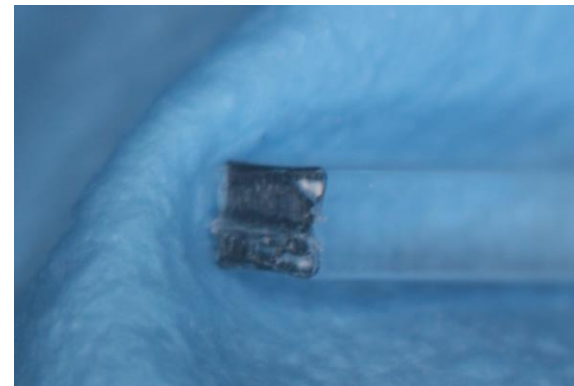
■ホットプレート処理

ヒーターで加熱した鉄板にファイバーを押し当て、熱転写により端面に平滑面を作ります。

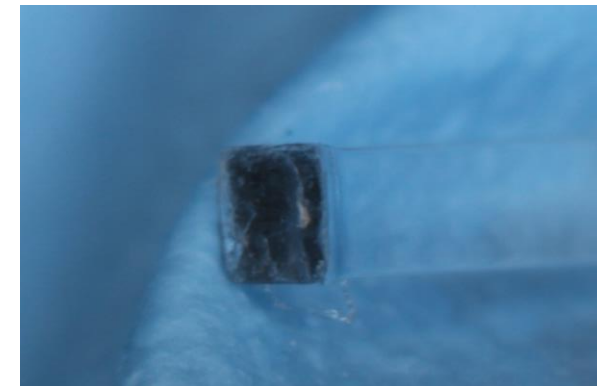
※ ホットプレート機は、市販はされておられません。自製にて対応をお願いします。



- ホットプレートの代わりにハンダごてを使用。
- ファイバー端面を切ってホットプレート法を行う操作を10回繰り返したところ相対誤差は1.40%だった。



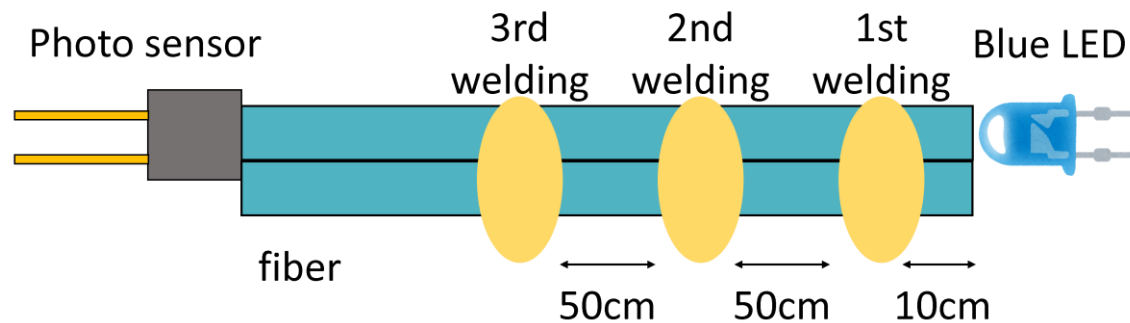
before



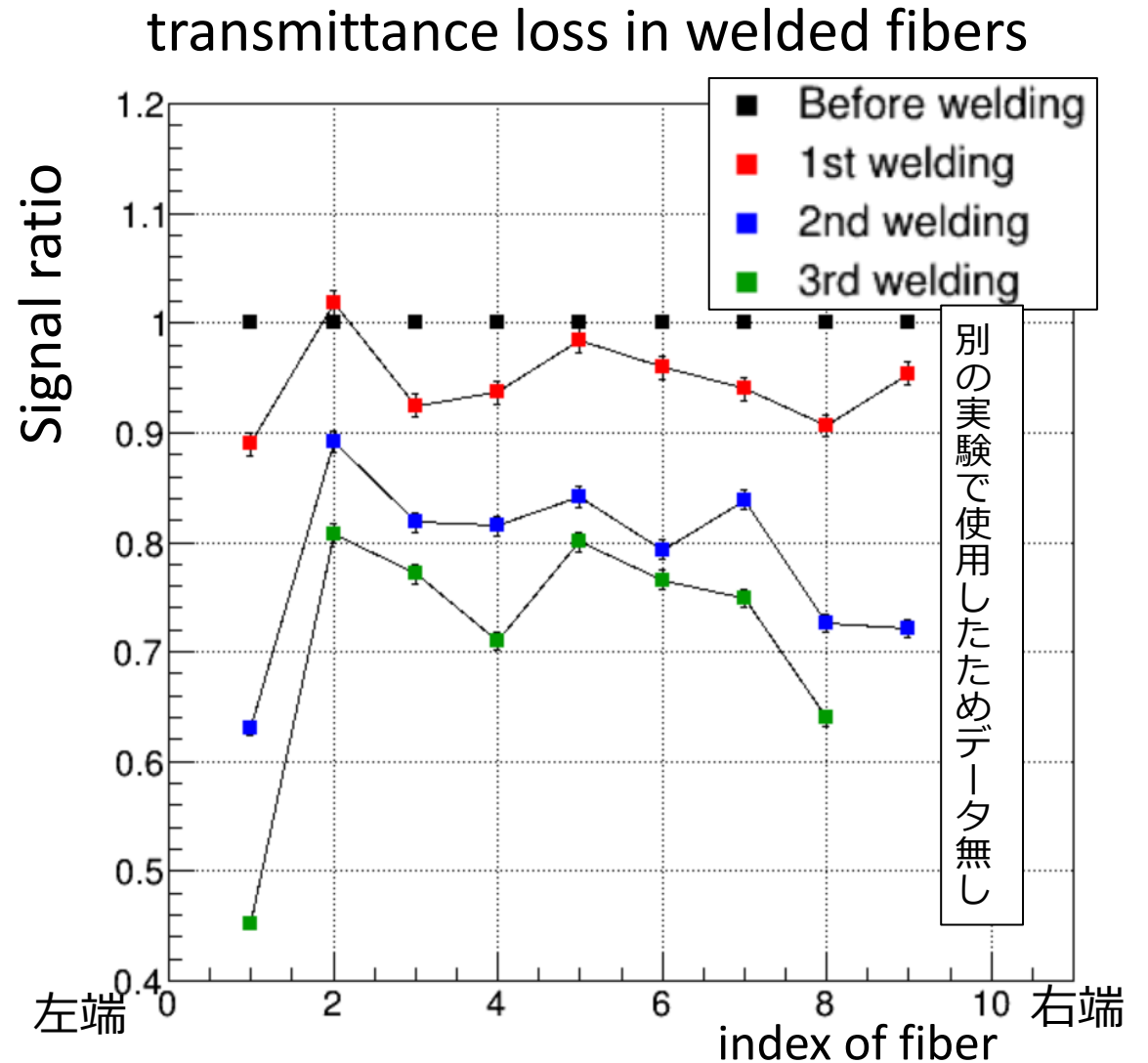
after

溶着箇所を増やした時のロス

- 210cmのファイバーを10本用意し、溶着箇所を増やしていったときのファイバーに伝わる光量の変化を1~9番目のファイバーで調べた。(9番目のファイバーは3回目溶着のデータ取り忘れ)
- $(n\text{回目の溶着後の信号}) / (\text{溶着前の信号})$ の比をとってプロットした。
- 3回の溶着による減少率は19%~55%で、特に両端付近のファイバーで損失が大きかった。

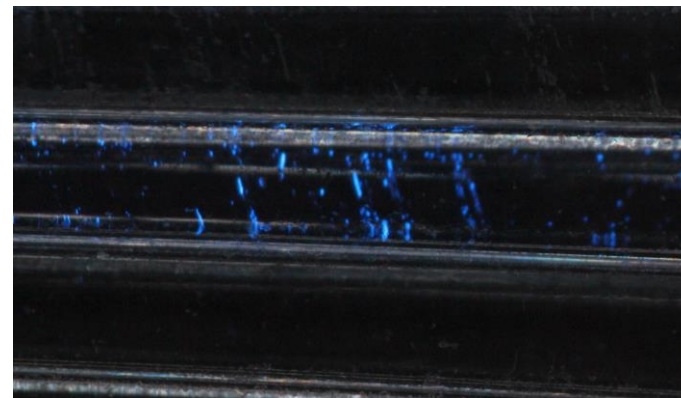
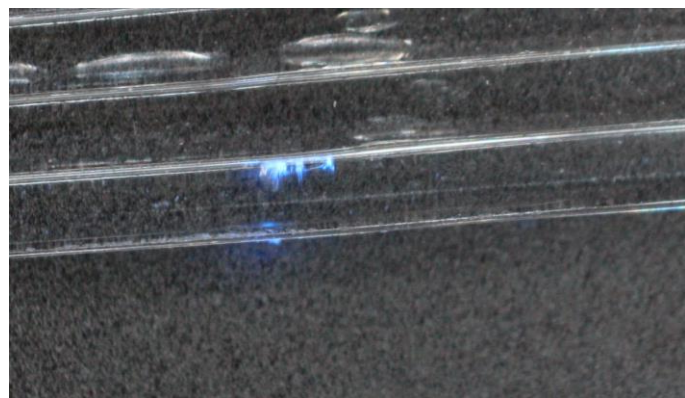
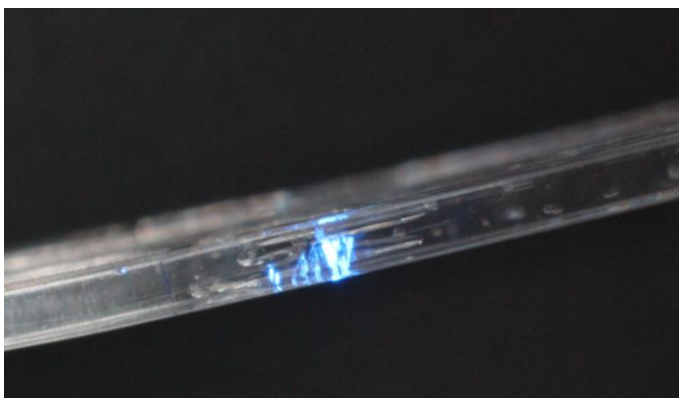


溶着回数と溶着位置の関係



ファイバーからの光漏れの様子

- 端のファイバー(1番目)と中央のファイバー(5番目)にそれぞれ青色LED光を入射し、光漏れの様子を顕微鏡で観察した。
- 1番目のファイバーでは溶着部分と非溶着部分の境界で、ファイバーシートの側面から光が漏れている様子を確認した。
- 5番目のファイバーではシート垂直方向に僅かな光漏れを確認した。
- 両端にダミーの角棒を置くことでロスを減らせるのではないか。



1番目のファイバーからの光漏れの様子
左：ファイバーアレイの側面の写真
右：ファイバーアレイの正面の写真

5番目のファイバーからの
光漏れの様子

時間・温度マトリクス

- 溶着するためのより適当な温度と時間の組み合わせを探索している。

time[min]/ temperature[°C]	1min	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
120°C		× くっついたが剥 がれやすい。				
125°C				× ほとんどくっつ かなかった	△ くっつくが、外 れやすいファイ バーもある	○ くっつく。 1回目の溶着で の平均の損失率 6.1%
130°C			× くっつくが、 簡単に剥がせる	○ よくくっつく。 表面の状態はそ れほど良くない。		
140°C	○ くっついている。 表面の状態もそ こそこ良い。	○ よく接着される が、少し凸凹し ている。	× くっつきすぎて ファイバー同士 が潰れている。			

まとめ

- 概要

- ハイパーカミオカンデ実験に向けて、新たな水標的の前置検出器の設置を検討中であり、水標的のSci-Fiトラッカーがその候補である。
- 125℃で120分間の溶着を3回行い伝達光量の損失を測定したところ、平均して19%~55%の損失を確認した。
- 特に両端付近以外でのファイバーで伝達光量の損失が大きく、側面からの光漏れが確認された。

- 今後の展望

- より適切な温度と時間の組み合わせを探索するとともに、溶着治具のジオメトリについても改善を行う。