

1 2023 年度 修士論文

2 SuperKEKB 加速器における
3 ビームアポート高速化に向けた基礎研究

4 指導教員 角野 秀一 教授

東京都立大学大学院 理学研究科 物理学専攻

博士前期課程 2 年 高エネルギー物理実験研究室

22844407 北村和樹

5 2024 年 1 月 9 日

概要

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 Belle II 実験は、SuperKEKB 加速器による 7 GeV の電子ビームと 4 GeV の陽電子ビームの衝突により生成した B 中間子及びタウ中間子の崩壊をの精密測定を通し、その大統計データから標準模型を超えた新しい物理を探索する。

SuperKEKB のルミノシティは前身の KEKB 加速器の $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ から $60 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に向上させる予定である。しかし Sudden Beam Loss (SBL) と呼ばれる未解決のアクシデント事象が SuperKEKB 運転を阻害しており、ルミノシティ向上に向けて最重要課題となっている。この SBL で生じる放射線による加速器や Belle II 検出器の損傷を懸念して設計ビーム電流より低い状態での運転を余儀なくされている。また、SuperKEKB のビームアポートシステムは SBL の突発性に十分に対応できておらず、それも被害を拡大させている一因と言える。

本研究はビームアポート技術の改良によるアポート応答の高速化を図った。それにより SBL のビームロス増幅前のビームアポートを実現し機器の損傷被害の軽減を実現する。アポート応答高速化の研究は汎用性が高く、SuperKEKB の世界最高ルミノシティ更新のみならず、HL-LHC や ILC 等のヒッグスファクトリーといった将来の加速器計画においても加速器の安定且つ安全な長期運転にも貢献が期待できる。

本研究は「ビーム異常の検知位置改善によるビームアポート応答の早期化」「アポート要求信号の転送速度向上」の研究からなる。前者は、SBL 事象の発生時に最初にビームロスを検知したビームロスモニターから新たなアポート要求信号を送信する試験を 2022 年 6 月の SuperKEKB 運転中に行った。この試験では、実際の SBL 事象発生時に、アポート要求信号を実際の運用信号よりも最大で 10us 早くアポートキックアトリガー回路へ送信するができ、異常ビームを 1 周早く廃棄できることを実証した。

後者は、アポート要求信号を大気中に可視光レーザーで送信する技術の開発を行った。大気中レーザーを 90 % 以上光ファイバーへ集光する光学系を開発した。またレーザーの指向性を維持しながら 400m 輸送する光学系の開発も行った。

長距離伝送としては 910 μW のレーザーを 400m 先で最大 642 $\mu\text{W} \pm 72 \mu\text{W}$ 集光できた。これはアポートトリガーモジュールから要求される光量、30 μW の 21 倍以上であり、システムを運用するには十分な光量である。これら光学系を用いて、SuperKEKB トンネル内の実際のレーザーアポート信号設置予定環境において、信号転送試験を行った。光源で強度 910 μW レーザーを 600 μW 以上の送信を実現した。これはアポートトリガーモジュールが要求する信号光量 30 μW と 20 倍以上の強度であり、レーザーアポートシステムを運用するのに十分な信号強度を実証することができた。ミラーの後ろに設置したセンサーからフィードバック信号を出力、これを上流に設置したピエゾミラーに入力して作動させることでレーザー軌道の変化を補正するシステムを検討している。今後はこの案を始めとした自動制御システムの構築について研究が行われる予定である。

本研究の成果を踏まえ、SuperKEKB 加速器に新たに 2 か所アポート検出器が設置されることが決定された。設置場所の 1 つは本研究でビーム異常の検知位置改善試験を行った場所である。またレーザーアポートシステムによるビームアポート応答のさらなる高速化に向け、レーザー軌道の長期安定化試験を SuperKEKB トンネル内の実運用環境にて続けられることとなった。

目次

41

42	第 1 章	序論	12
43	1.1	素粒子標準模型	12
44	1.2	CP 対称性の破れ	16
45		1.2.1 CP 対称性	16
46		1.2.2 CKM 行列と B 中間子	18
47	1.3	衝突型加速器	23
48	1.4	SuperKEKB のルミノシティの増強計画	24
49	1.5	研究背景	25
50		1.5.1 Sudden Beam Loss : SBL	25
51		1.5.2 SBL 被害低減の指針と本研究の概要	26
52	第 2 章	SuperKEKB 加速器と Belle II 実験	27
53	2.1	SuperKEKB	27
54		2.1.1 概要	27
55		2.1.2 特徴	30
56		2.1.3 ナノビーム方式	30
57		2.1.4 最終集束用超伝導電磁石システム	33
58	2.2	Belle II 実験	33
59	2.3	コリメータ	35
60	2.4	ビームアポートシステム	36
61	2.5	ビームロスモニター	42
62	第 3 章	アポート検出器位置の改善によるアポート高速化の検証	44
63	3.1	SBL 発生箇所に関する先行研究	44
64	3.2	予想されるアポートリクエスト信号伝送の短縮時間	45
65	3.3	アポート応答向上値の調査	47
66	第 4 章	大気中レーザーアポート信号の開発	55
67	4.1	レーザーアポートシステムの概要	55
68	4.2	レーザーアポートシステム開発要素	57
69	4.3	レーザーの光ファイバー集光効率	57
70		4.3.1 集光効率に寄与するパラメータ	57
71		4.3.2 実験方法	58

72	4.3.3	結果及びその考察	61
73	4.4	レーザー長距離輸送光学系の開発	62
74	4.4.1	レンズ 2 つを用いたレーザー送信方法の検証	62
75	4.4.2	球面ミラーによる長距離伝送	67
76	4.4.3	加速器トンネル曲線部を想定した複数の中継光学系による長距離伝送	70
77	4.5	加速器トンネル実装予定場所での 244 m レーザー伝送	73
78	4.5.1	実験方法	73
79	4.5.2	結果	74
80	4.5.3	考察	75
81	第 5 章	結論	106
82		参考文献	110
83	付録 A	ビームアポートに関する各情報の取得方法	115
84	A.1	White Rabbit により記録された信号の到着時刻	115
85	A.2	アポートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー	116
86	A.3	MR ビームの周回においてビームロスを最も上流で検知したセンサー位置	117
87	付録 B	レーザー伝送試験に用いたパーツ	120

目次

89	1.1.1	17 種類の素粒子が登場する標準模型. [1, 2] を参考に作成. 黒い四角形で囲んだ 3 つの数は	
90		上から順に各粒子の質量、素電荷 e で表した電荷、スピンを示している. 質量は測定値の小数	
91		点第 1 位までを表示している. またニュートリノ振動の測定からニュートリノが有限の質量	
92		を持つことが既に判明しているが、標準理論ではその事実が要請されないためゼロと記して	
93		いる.	13
94	1.1.2	Z^0 ボソンや W^\pm ボソンにより媒介されるレプトン及びクォーク間の相互作用の例 [5].	15
95	1.2.1	CKM 行列のユニタリー条件：式 (1.14) の $\rho - \eta$ 複素平面における表示.	19
96	1.2.2	$B^0 - \bar{B}^0$ 混合を表したファインマンダイアグラム.	20
97	1.2.3	e^+e^- 衝突を用いた $\Upsilon(4S)$ の崩壊.	21
98	1.2.4	KEK にあった KEKB 加速器の Belle 実験で測定された、 $\Upsilon(4S)$ での $B^0\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ の	
99		崩壊分布 (上) と非対称率 (下)[13].	22
100	1.2.5	CKM fitter によって行われた、2021 年春時点での実験結果におけるユニタリティ三角形の	
101		各値のフィット結果 [8].	23
102	1.4.1	SuperKEKB に関するルミノシティ向上の変移と今後のスケジュール [9]. 赤線は瞬間ルミ	
103		ノシティの値、青線は積分ルミノシティの値を示す.	25
104	1.5.1	LER にて SBL 発生時、アポート前の数ターンにおける各周回のバンチ電流 (上段) と前ター	
105		ンからのバンチ電流の変化量、つまりビームロス量 (下段) の変移. アポートする 2、3	
106		ターン前からビームロスが発生していることが確認できる. その後バンチ電流がゼロになっ	
107		ているのはビームがアポートされたことによるもので、下段の変化量はそのビーム量を表す.	
108		また半周回 ($5\mu\text{s}$) 毎にある隙間は 2.4 節で述べた 200 ns 間隔のアポートギャップである.	26
109	2.1.1	KEK つくばキャンパスと SuperKEKB の配置 (2023 年 5 月撮影)[14].	28
110	2.1.2	SuperKEKB 加速器全体の模式図 (Credit : KEK)[25].	29
111	2.1.3	従来の衝突方式 (左) とナノビーム衝突方式 (右) の模式図.	32
112	2.1.4	KEKB と SuperKEKB との衝突ビームの相違 [18].	32
113	2.1.5	2 台のクライオスタット内にあるビーム最終集束用超伝導電磁石の配置を表す模式図 [23].	33
114	2.2.1	Belle II 測定器の全体図 (Credit : Rey.Hori / KEK)[26].	34
115	2.3.1	水平コリメータ (a) 垂直コリメータ (b) の構造を表した模式図 [30].	35
116	2.3.2	HER (青) 及び LER (赤) とリングの各所に設置されたコリメータの配置図 [31]. 中央下寄り	
117		のコリメータのラベルについて、KEKB となっているものは先代の KEKB 加速器からの再	
118		利用のもの、SuperKEKB となっているものは SuperKEKB から新たに設置されたものを	
119		表す.	36

120	2.4.1	LS1 前におけるビームアポートシステムの模式図. ハードウェアのインターロックによるトリガー信号や LM の観測信号が最寄りの各電源棟に一時集約されアポートリクエスト信号が発報される. CCB で受信した信号をアポートギャップと同期してアポートトリガー信号を生成し、キッカーに送信、ビームアポートが実行される.	37
121			
122			
123			
124	2.4.2	リングに設置されたロスモニター等からの信号を一時集約する各電源棟 (D はデンゲン棟の意) とそれらからのアポートリクエスト信号が集約される中央制御棟 (Central Control Building、CCB) の位置関係.	38
125			
126			
127	2.4.3	SuperKEKB のアポートキッカーの構成 [34]. 図は HER のもので、水平キッカー電磁石 4 つ、垂直キッカー電磁石 1 つ、ランバートソン DC セプタム電磁石 1 つ、6 極電磁石 2 つから成り立っているのが確認できる.	39
128			
129			
130	2.4.4	水平キッカー電磁石 (左) とビームダンブ (右)[34].	39
131	2.4.5	アポートトリガーモジュールの仕様 (左) と AVAGO 製、アポートトリガーモジュールの光レシーバとして用いている HFBR-24xxZ シリーズのスペクトル応答曲線 [39] (右). 応答曲線は 820 nm の波長に正規化してプロットされている [39].	40
132			
133			
134	2.4.6	異常発生からアポートが完了するまでの各諸事項とその所要時間. [36] を基に作成.	41
135	2.5.1	「CsI(Pure) + PMT」 (左) と「EMT」 (中央)、EMT+ 読み出し回路 (右).	42
136	2.5.2	CsI(Pure) + PMT による信号検知の模式図. [57] を参考に作成.	42
137	3.1.1	2022 年末時点で Main Ring 上に 7 ヶ所に新たに設置されたロスモニター (LM) の位置.	45
138	3.1.2	各 LM と WR による信号収集システムの模式図. TB 4 (Tsukuba B4) は衝突点付近にある筑波実験棟の地下 4 階のことで D01V1、D02V1 の LM 信号はここへ集約されている. 各 LM から各電源棟まで繋がれたケーブルの長さは D01V1、D02V1、D06V1、D06V2、D06H3 の順に 157 m、158 m、151 m、114 m、250 m である [43].	46
139			
140			
141			
142	3.1.3	先行研究 [43] による、SBL 事象を最初に検知したロスモニターの位置で分類したヒストグラム. 2022 年の 2 月 21 日から 6 月 22 日の間に発生した SBL 事象を扱っている [43]. 橙色の部分は QCS クエンチの発生を伴っていたことを表している.	47
143			
144			
145	3.2.1	SuperKEKB における各建屋間の光ケーブルによる信号伝達時間. 矢印の向きはアポートリクエスト信号の送信方向を表す. また LS1 期間にマスターモジュールがキッカー電源回路と同じ D07 に新設されており、赤い破線矢印はそのモジュールへ D05、D06 より直接発報した際の伝送時間. これら 2 つも実測値. 黒の 1 点破線は矢印方向に走る陽電子のリング内移動時間.	48
146			
147			
148			
149			
150	3.3.1	Main Ring 上、D06 LM の観測信号を基に擬似アポートリクエスト信号を発報するための回路図. 1 ms の幅に広げた LER 入射信号で D06 LM の信号に VETO をかけて LER 入射ビームに非同期的な信号を CCB へ送信出来るようにしている. また CCB のスレーブモジュールでは D02 電源棟から送信される正規のアポートリクエスト信号の到着時刻も記録されている. 従ってある SBL 事象について D06、D02 両者から CCB に送信された信号の到着時刻を比較することでどれ程アポートを高速化出来るかの見積もりが可能となる.	49
151			
152			
153			
154			
155			
156	3.3.2	回路図 3.3.1 に対応する実際のセットアップの様子.	50

157	3.3.3	D06 からアボート発報した場合の分類① (アボートリクエスト信号を CCB へ最初に届けた	
158		センサー) 別に見た、アボート応答の短縮可能な時間 (Δt). データは 2022 年の 5 月 24 日	
159		から 6 月 22 日の間に実際に発生した 23 回の SBL 事象.	53
160	4.1.1	レーザーアボートシステム概念図.	55
161	4.1.2	SuperKEKB 加速器トンネル内、LS1 期間中に D05 区域へインストールされた NLC (Non	
162		Liner Collimator) 部から D07 区域のアボートキッカー電源直下間の現場の様子. 赤い点線	
163		で囲んでいる部分はケーブルラック.	56
164	4.2.1	レーザーアボートシステム構築に向けて開発すべき要素の模式図.	57
165	4.3.1	レーザーを光ファイバーへ集光する部分の模式図.	58
166	4.3.2	光ファイバーへの集光効率測定のためのセットアップに対応する模式図. P_{In} 及び P_{Out} はそ	
167		れぞれ集光レンズの手前、光ファイバーの端面から出力される測定光量を表す.	59
168	4.3.3	光ファイバーへの集光効率測定におけるセットアップと各光学パーツの配置の様子. 緑色の	
169		点線矢印はレーザーから出力された光の軌道を示している.	60
170	4.3.4	コア径や開口数の異なる 8 種類の光ファイバーに 532 nm 波長のレーザーを入力した時の	
171		ファイバー集光効率. r : 集光レンズに入射するレーザービームサイズの半径、 f : 集光レ	
172		ンズの焦点距離、 θ : r と f より定まる角度. 集光レンズの直径について、マルチモードは	
173		11.05 mm、シングルモードは 7.2 mm. (ファイバーの NA) $\geq \sin \theta$ の条件が成り立つ、つま	
174		り赤色の一点破線より下のファイバーは集光効率が 90 % を高い確率で超えることが確認で	
175		きる. 一番右の欄で 90 % 以下であるのは入射するレーザービームサイズのサイズが集光レ	
176		ンズの直径よりも大きく光がレンズから漏れたため.	62
177	4.4.1	レーザー 400 m 直線離伝送実験セットアップの模式図.	63
178	4.4.2	レーザー 400 m 伝送実験における光源部及び集光部光学系セットアップの様子.	77
179	4.4.3	SuperKEKB リングに対する入射器棟の位置関係及びレーザー伝送した 400 m の取り方. . .	78
180	4.4.4	レーザー光源側から見た 400 m の様子. 赤矢印の先にファイバーなどの集光部光学系を設置	
181		している.	79
182	4.4.5	長距離伝送レーザーの方眼紙に照射される様子のスマートフォンによる撮影方法 (左) とカメ	
183		ラのアンクル (右). 右図は 400 m 伝送時に撮影した動画の内、1 枚の静止画.	79
184	4.4.6	光源より 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、400 m の地点において、1	
185		マス約 2 cm 角の方眼紙に照射した時のレーザービームサイズ拡大の様子.	80
186	4.4.7	フレーム画像に写った 4 つの内、1 つの赤丸のピクセル位置 (重心位置) の求め方を表した	
187		模式図. 180、190 など格子内の各数字は各ピクセルの輝度 L_{ij} . この L_{ij} を重みの値として	
188		扱い、ピクセル座標で加重平均 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{24} 、 I_{34} 、は消失点と G を結ぶ線分と赤丸を 4 頂	
189		点とする四角形の各辺との各交点.	81
190	4.4.8	方眼ボードにおける、赤丸 4 つ R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 とそれらに対応する 2 つの消失点 T_1 、 T_2	
191		の模式的な関係図. G はレーザーの重心位置. I_{12} 、 I_{13} 、 I_{24} 、 I_{34} 、は消失点と G を結ぶ線分	
192		と赤丸を 4 頂点とする四角形の各辺との各交点.	82
193	4.4.9	輝度の加重平均より求めた重心位置 (G_x , G_y) の平均位置 (\bar{X} , \bar{Y}) に対する相対変位 (Δx , Δy)	
194		の取り方.	82

195	4.4.10	各伝送距離における重心位置の水平方向の相対変位 (Δx) を詰めたヒストグラム. 但し縦軸は	
196		全イベント数で規格化している. 赤線はガウスフィッティング. フィッティング結果の平均値	
197		(Mean) と標準偏差 (SD) の単位はミリメートル.	83
198	4.4.11	各伝送距離における重心位置の垂直方向の相対変位 (Δy) を詰めたヒストグラム. 縦軸は全イ	
199		イベント数で規格化. 赤線はガウスフィッティング. フィッティング結果の平均値 (Mean) と	
200		標準偏差 (SD) の単位はミリメートル.	84
201	4.4.12	図 4.4.10 及び 4.4.11 のフィットから得られた σ を伝送距離に対してプロットしたグラフ.	
202		伝送距離に対する軌道ふらつきの単調増加が確認できる.	85
203	4.4.13	方眼ボードの赤い丸の位置を基準にしてフレーム画像を重ね合わせる手順. [0, 255] の輝度範	
204		囲で撮影したので、最後に重ね合わせたフレーム画像の枚数で割って規格化している.	85
205	4.4.14	各伝送距離 8 地点に対し、各フレームを方眼ボードの 4 つの赤い丸を基準に重ね合わせた輝	
206		度の図. 縦横の辺は共に 200 px で、これが実際の長さでは赤丸間距離の $19\frac{2}{3} \times 5 = 98\frac{1}{3}$ mm	
207		なので $(98\frac{1}{3})/200$ mm/px ≈ 0.492 mm/px をかけて mm に換算出来る.	86
208	4.4.15	4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時のファイバー集光	
209		量を 6 秒間毎に平均値と標準偏差を計算してプロットしたグラフ. 黒丸で囲んだ箇所は人	
210		の通行によりレーザーが遮断されたことで光量低下が起きた. 赤破線はアボートトリガーモ	
211		ジュールの要求光量、30 μ W のラインを表す.	87
212	4.4.16	4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時のファイバー集光量	
213		を 1 次元ヒストグラムに詰めた結果. ヒストグラムの横軸は光量 [μ W]、縦軸は対数表示の頻	
214		度.	87
215	4.4.17	定盤に固定した球面ミラーの様子. 図は $R = 50$ m の球面ミラー.	88
216	4.4.18	2 枚の球面ミラーでレーザーを 400 m 伝送するセットアップ. 球面ミラーの焦点距離の組み	
217		合わせが $f = R/2 = 25$ m、 $f = R/2 = 50$ m なのでレーザービームサイズを 2 倍拡大	
218		で伝送している.	88
219	4.4.19	図 4.4.18 のセットアップにおける光源光学系 (上) と中継光学系 (下) の様子. 光源光学系	
220		(上) にてレンズを固定するためのケーシングが有るがこの時はレンズは取り	
221		外している.	89
222	4.4.20	4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時の軌道ふらつきの解	
223		析結果. 縦軸は全イベント数で規格化. ガウスフィットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD)	
224		の単位は共にミリメートル. 球面ミラーによる伝送でも水平、垂直方向における違いは見られ	
225		ない.	90
226	4.4.21	4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時の、各フレームを	
227		方眼ボードの 4 つの赤い丸を基準に重ね合わせた輝度の図. 縦横の辺は共にピクセル数で、	
228		$98\frac{1}{3}/200$ mm/px ≈ 0.492 mm/px をかけて mm に換算出来る.	90
229	4.4.22	4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時のファイバー集光量	
230		をプロットしたグラフ. パワーメータの測定は 0.3 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6	
231		秒ごとに平均した値をプロット. エラーバーはそのときの標準偏差. 黒丸で囲んだ箇所は人の	
232		通行によりレーザーが遮断されたことで 6 秒の時間内でのばらつきが大きくなっている. 赤	
233		破線はアボートトリガーモジュールの要求光量、30 μ W のラインを表す.	91

234	4.4.23	図 4.4.18 のセットアップで 0.3 s 毎にパワーメーターで測定したファイバー集光量データを	
235		1 次元ヒストグラムで表した結果. 横軸に光量 [μW]、縦軸に頻度を対数で取った. 通行によ	
236		り遮断された際のデータは除いている.	91
237	4.4.24	球面ミラーを用いた光源光学系と 1 段目中継光学系の配置に中継光学系③と④の 2 つを追	
238		加して 250 m 伝送するセットアップ.	92
239	4.4.25	図 4.4.24 が表すセットアップの各光学系の様子. 中継部については 3 つあるうちの②を示す.	92
240	4.4.26	図 4.4.24 のセットアップで 250 m 伝送した時のファイバー集光量を 6 秒間毎に平均値と標	
241		準偏差を計算してプロットしたグラフ.	93
242	4.4.27	図 4.4.24 のセットアップで 250 m 伝送した時のファイバー集光量の値を詰めた 1 次元ヒス	
243		トグラム. 横軸は光量、縦軸は対数表示の頻度.	93
244	4.5.1	真上のキッカー電源に繋がる堅穴の加速器トンネルにおける位置 (左) と堅穴の様子 (右). . .	94
245	4.5.2	加速器トンネル内に設置したセットアップの模式図 (上) とその各光学系の配置箇所 (下). . .	95
246	4.5.3	ラックへ設置した各光学系の様子. L 字プレートの上に定盤を置き、4 つ角をネジで固定す	
247		る. 今回は、そのセットを L 字プレートの短い側を 2 ヶ所 C クランプでケーブルラックと	
248		一緒に挟んで仮止めした. ⑤において平面ミラー $\times 2$ の中継光学系の直後に設置してあるの	
249		は集光光学系 (図中右下の赤枠で囲んだ写真).	96
250	4.5.4	本実験で用いた L 字プレート (左) と C クランプ (右) . 4 つ角をネジで固定する仕様となっ	
251		ている. L 字プレートの短い側を 2 ヶ所 C クランプでケーブルラックと一緒に挟んで固定す	
252		る.	97
253	4.5.5	PM16-120 - USB パワーメータ (標準型フォトダイオードセンサ付き、Si、400~1100 nm、	
254		50 mW Max) を USB コネクタで、専用のソフトウェア (NI VISA) [64] をインストールし	
255		たパソコンに繋いだ様子. データは .CSV 形式で保存される.	97
256	4.5.6	ファイバー集光量測定の様子. ファイバーと PM-16-120 はこれまでと同様ファイバーアダプ	
257		ターキャップ (S120-FC) で接続している. 双極磁石の上にあるパソコンでファイバー集光量	
258		を表示させている. この写真の右側の黄色い柵が D6/D7 の境界であるイエローフェンス. . .	98
259	4.5.7	D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m 伝送したレーザーの撮影動画から作成した重ね合わせ	
260		の輝度の図. ピクセルからの換算も今までと同様に $98\frac{1}{3}/200 \text{ mm/px} \simeq 0.492 \text{ mm/px}$ をかけ	
261		て出来る. 2023 年 11 月 27 日の午後に撮影.	99
262	4.5.8	2023 年 11 月 27 日の午後に撮影したレーザーの軌道ふらつきの解析結果. 縦軸は全イベン	
263		ト数で規格化. ガウスフィットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位は共にミリメー	
264		トル.	99
265	4.5.9	D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m 伝送したレーザーの撮影動画から作成した重ね合わせ	
266		の輝度の図. 換算も今までと同様に $98\frac{1}{3}/200 \text{ mm/px} \simeq 0.492 \text{ mm/px}$ をかけて出来る. 2023	
267		年 11 月 28 日の午前に撮影.	100
268	4.5.10	2023 年 11 月 28 日の午前に撮影したレーザーの軌道ふらつきの解析結果. 縦軸は全イベン	
269		ト数で規格化. ガウスフィットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位は共にミリメー	
270		トル.	100

271	4.5.11	910 μ W レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244m 伝送した時のファイバー集光量を	
272		プロットしたグラフ. パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒	
273		ごとに平均した値をプロット. エラーバーはそのときの標準偏差. 2023 年 11 月 27 日の午後	
274		に 1 時間測定.	101
275	4.5.12	図 4.5.11 と同じデータ、0.1s 毎に 1 時間測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒスト	
276		グラムで表した結果. 横軸は光量 [μ W]、縦軸は対数表示の頻度.	101
277	4.5.13	910 μ W レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244m 伝送した時のファイバー集光量を	
278		プロットしたグラフ. パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒	
279		ごとに平均した値をプロット. エラーバーはそのときの標準偏差. 2023 年 11 月 28 日の午前	
280		に 1 時間測定. 黒点線で囲んだ場所は人の通行があり、ヒヤリハット防止のためレーザーを	
281		OFF にした期間.	102
282	4.5.14	図 4.5.13 と同じデータ、0.1s 毎に 1 時間測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒスト	
283		グラムで表した結果. 横軸は光量 [μ W]、縦軸は対数表示の頻度. レーザーを OFF にした際	
284		のデータは除いている.	102
285	4.5.15	910 μ W レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244m 伝送した時のファイバー集光量を	
286		プロットしたグラフ. パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒	
287		ごとに平均した値をプロット. エラーバーはそのときの標準偏差. 2023 年 11 月 28 日の午後	
288		に 130 分測定. 1500s 経過してから光量が一定して下がるが 4500s あたりでレーザーを固定	
289		するキネマティックマウントのつまみでレーザー軌道を微調整すると再び光量を回復させら	
290		れた. また 6300s あたりでファイバーとセンサーの接続部分に接触したことで光量が低下した.	103
291	4.5.16	図 4.5.15 のデータの一部、0.1s 毎に 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整前	
292		の 0s から 3600s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果. 横軸は光量 [μ W]、縦	
293		軸は対数表示の頻度.	103
294	4.5.17	図 4.5.15 のデータの一部、0.1s 毎に 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整後	
295		の 5000s から測定終了の 7800s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果. 横軸は	
296		光量 [μ W]、縦軸は対数表示の頻度.	104
297	4.5.18	センサーとピエゾミラーによるレーザー軌道の自動制御システムの模式図 (上)、ハーフミ	
298		ラーからの光量を感知するセンサーの様子 (左下)、位置アライナーとピエゾコントローラー	
299		(下中央) 及びピエゾミラー (右下). センサーの中心に常時光が来るようにセットし、レー	
300		ザー軌道がずれてセンサーの中心から外れた場合はそのフィードバック信号を基にピエゾコ	
301		ントローラーでピエゾミラーに適切な電圧をかけて角度補正する. センサーと PC の wifi 接	
302		続でセットアップの更なる長距離化も可能である.	105
303	A.1.1	Get text data from Archiver Appliance by ROOT にアクセスした時の表示画面	115
304	A.1.2	アポートサマリーページにアクセスした時の表示画面. 左から 2 列目の「Ring」、16 列目の	
305		「BT orbit」がそれぞれ「アポートが実行されたリングの名称」、「入射に同期していたか否	
306		か」を表す.	116
307	A.2.1	各センサーからのアポートリクエスト信号の CCB 到着時刻とその順序. この図は 2022 年	
308		6 月 2 日 22 時 55 分 2 秒に発生した SBL 事象の例. 上側に記載されているものほど早く	
309		CCB に到着していることを表す.	117

310	A.3.1	SBL 発生時における各センサーのビームロス検知タイミング. この図は 2022 年 6 月 2 日 22	
311		時 55 分 2 秒に発生した SBL 事象における例. 横軸は衝突点から各コリメータまでの距離、	
312		縦軸は検知タイミングの相対的な時間を表す. 斜めに走る線は同じパンチであることを示す. . .	118
313	B.0.1	光学定盤. アルミニウム製ブレッドボード (MB2530/M)、250 mm×300 mm×12.7 mm、	
314		(左) と地面に固定されたステンレス製の台 (右). 定盤上のネジ穴は共に M6 タップ穴 (ミリ	
315		規格).	120
316	B.0.2	532 nm、910 μW のコリメート DPSS レーザーダイオードモジュール. 筐体の直径は 11 mm.	121
317	B.0.3	CPS532-C2 が出力する光の強度分布. 右側の図から釣鐘状の分布になっていることが確認で	
318		きる.	121
319	B.0.4	LDS5 - 5 V 直流出力交流アダプタ. 2.5 mm フォノプラグでレーザーダイオードに電力供給	
320		する.	122
321	B.0.5	レーザー光源用 5V 電圧供給バッテリー. 近くから電源を取って来れない時に使用する.	
322		USB コネクタなので USB-フォノケーブルでフォノ端子のレーザー光源に接続する.	122
323	B.0.6	キネマティックマウント. KM200 は 2 インチ (=50.8 mm) 直径の、KM100 は 1 インチ	
324		(=25.4 mm) 直径のミラーの固定に用いる.	123
325	B.0.7	ネジアダプタ. 4 mm 直径のネジを、6 mm 直径のネジ穴に固定出来るようにする.	124
326	B.0.8	ピラーポスト. 高さが 1.5 インチ (=38 mm の RS1.5P\ M (左) と、2 インチ (=50 mm の	
327		RS2P\ M (右). 前者は 2 インチミラー、後者は 1 インチミラーの台として用いる.	124
328	B.0.9	ポストスペーサ. キネマティックマウントとポストの間に咬ませて任意の高さに変える.	
329		RS5M (左) は 5 mm、RS4M (右) は 4 mm の厚みがある. 前者は RS1.5P\ M 及び と、後	
330		者は RS2P\ M と用いてミラーの中心の高さが 80 mm となるようにしている.	125
331	B.0.10	TR40/M-JP -Φ12 mm ポスト、長さ 40 mm、日本向け (ミリ規格) (左) と PH40E/M - 台座	
332		付き Φ12 mm ~ Φ12.7 mm ポストホルダ、バネ付き六角固定つまみネジ付き、長さ 44.7 mm	
333		(ミリ規格) (右).	125
334	B.0.11	クランプフォーク.	126
335	B.0.12	M4 ネジ. ポストにキネマティックマウントを固定するために用いる.	127
336	B.0.13	AD11NT (左) と AD15NT (右). 右の図において真ん中にセットされているのはマルチモー	
337		ドレンズ (F950FC-A).	127
338	B.0.14	φ N-BK7 平凸球面レンズ、直径が 1 インチ (左) のものと 1 インチ (右) のもの. 写真は左	
339		から順に焦点距離が 50 mm、200 mm のレンズ.	128
340	B.0.15	光学素子用 XY 移動レンズマウントを TR40/M-JP PH40E/M に取り付けた様子.	129
341	B.0.16	φ6 mm ケージアセンブリーロッド (ER12, ER8-P4) を 60 mm ケージプレート の 4 つ角の	
342		穴に通した様子. 赤矢印 4 本が指す金属棒がケージアセンブリーロッド.	130
343	B.0.17	60 mm ケージプレートに 2 インチレンズを取り付けた様子 (左) と上から見た様子 (右). . .	130
344	B.0.18	ケージシステム変換アダプタ、30 mm-60 mm、厚さ 6.0 mm (左) と 60 mm 幅で組んだケ	
345		ージに変換アダプタを固定し 1 インチレンズを取り付けた様子 (右).	131
346	B.0.19	マルチモードレンズ (F950FC-A) を AD15NT を用いて KM100 に取り付けた様子 (左、中	
347		央) とシングルモードレンズ (F220FC-532) (右)[59]. 写真 (中央) に示すように光ファイ	
348		バーの FC コネクタを直接接続できる. シングルモードレンズも同様の接続が可能である. . .	131

349	B.0.20	マルチモード光ファイバー (左)、ファイバーコネクタ部分 (中央) 及びコネクタをファイバー	
350		アダプターキャップでパワーメーターに接続した様子 (右). 写真のファイバーは M124L01	
351		($\phi = 400 \mu\text{m}$, $NA = 0.50$).	132
352	B.0.21	曲率半径 $R = 100 \text{ m}$ の 1 インチ球面ミラー (左)、入射角 20° 用 2 インチ平面ミラー (中	
353		央) 及び入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー (右).	132
354	B.0.22	1 インチミラーを張り付けた 2 インチ平面ミラーを KM100 に取り付けて TR40/M-JP と	
355		PH40E/M で固定した様子.	133
356	B.0.23	S120C - 標準フォトダイオードパワーセンサ、Si、 $400 \sim 1100 \text{ nm}$ 、 $50 \text{ nW} \sim 50 \text{ mW}$ (左) と	
357		S120-FC - FC/PC ファイバーアダプターキャップ、SM1 内ネジ付き、ワイドキー (2.2 mm	
358) (右). ポストにキネマティックマウントを固定するために用いる.	133
359	B.0.24	小型パワー&エネルギーメーターコンソール.	134
360	B.0.25	赤外光アライメント用レーザー.	135
361	B.0.26	緑防振シート B タイプ. 寸法は $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 、厚さ 10 mm	136
362	B.0.27	方眼ボード. 6 マスで 118 mm なので 1 目盛 $19\frac{2}{3} \text{ mm}$	137

表目次

363

364	2.1	SuperKEKB 用入射ビームの仕様.	29
365	2.2	SuperKEKB 用入射ビームの仕様.	30
366	2.3	SuperKEKB 及び KEKB の主な設計パラメータ [18, 19, 20].	31
367	3.1	各ビームロス事象における正規のアポートリクエスト信号及び D06 からの信号の CCB 到着時刻とそれらの差、 $\Delta t = t_{CCB-D02} - t_{CCB-D06}$ [μs]. 1 列目から 3 列目の数字表記は 月/日 時間:分:秒の意. また分類①は「アポートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー」による分類で、CLAWS@IP は衝突点の CLAWS センサー、flm@D6 は D06 の光ファイバーロスモニター、as@D5 は D05 のアーク放電センサー、PD@D6-viaD7 は D07 経由で CCB へ信号を送信する D06 の PIN フォトダイオードを表す. 分類②は「ビームロスを最上流で検知したセンサー位置」による分類で、上流から BCM (D07-D08 間直線部に位置)、D06V1、D06V2、D02V1 の順で MR 内に設置されている.	52
375	4.1	2 つのレンズの焦点距離とテレスコープ後のレーザー直径の 3 要素.	61

376 第 1 章

377 序論

378 物質の最小の構成要素である素粒子は一般に内部構造を持たない点状粒子だと考えられるが、点状の粒子を
379 とりまく構造は複雑であり、調べられる構造の大きさはエネルギーに依存する。従ってより高エネルギーでの
380 実験が可能になると、その都度それまで素粒子とされていたものが複合粒子であったと判明することが繰り返
381 されてきた。この章では 2023 年現在においてほとんどの素粒子実験の結果を矛盾なく説明できる理論的枠組
382 みである素粒子標準模型、宇宙の物質-反物質の非対称性を説明する上で重要な CP 対称性の破れ、および素
383 粒子標準模型の枠組みの中で CP 対称性の破れを説明する小林・益川理論の実証に関与する B 中間子の物理
384 について記述する。

385 1.1 素粒子標準模型

386 2023 年時点において基本粒子と考えられているものがまとめられた標準模型を図 1.1.1 に示す。標準模型
387 について、これらの粒子が素粒子として考えられるようになった経緯を交えながら以下に述べる。

**フェルミオン
(物質を構成)**

**ボソン
(相互作用を媒介)**

	第1世代	第2世代	第3世代	ゲージボソン	スカラーボソン	質量[MeV] 電荷 スピン	
クォーク	u アップ $\begin{matrix} 2.2 \\ 2e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$	c チャーム $\begin{matrix} 1.3 \times 10^3 \\ 2e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$	t トップ $\begin{matrix} 173.1 \times 10^3 \\ 2e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$	g グルーオン γ 光子 Z Zボソン W Wボソン	H ヒッグス (質量を与える) $\begin{matrix} 125.3 \times 10^3 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$		
	d ダウン $\begin{matrix} 4.7 \\ -e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$	s ストレンジ $\begin{matrix} 93.4 \\ -e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$	b ボトム $\begin{matrix} 4.2 \times 10^3 \\ -e/3 \\ 1/2 \end{matrix}$				
	レプトン	e 電子 $\begin{matrix} 0.5 \\ -e \\ 1/2 \end{matrix}$	μ ミューオン $\begin{matrix} 105.7 \\ -e \\ 1/2 \end{matrix}$			τ タウ $\begin{matrix} 1776.9 \\ -e \\ 1/2 \end{matrix}$	
		ν_e 電子ニュートリノ $\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1/2 \end{matrix}$	ν_μ ミューニュートリノ $\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1/2 \end{matrix}$			ν_τ タウニュートリノ $\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1/2 \end{matrix}$	

図 1.1.1 17 種類の素粒子が登場する標準模型. [1, 2] を参考に作成. 黒い四角形で囲んだ 3 つの数は上から順に各粒子の質量、素電荷 e で表した電荷、スピンを示している. 質量は測定値の小数点第 1 位までを表示している. またニュートリノ振動の測定からニュートリノが有限の質量を持つことが既に判明しているが、標準理論ではその事実が要請されないためゼロと記している.

388 1913 年にラザフォードにより陽子が、1932 年にチャドウィックにより中性子が発見された。素粒子は、当
 389 時これら核子である陽子・中性子、JJ トムソンによって 1897 年に実施された陰極線の実験から判明した電
 390 子であると考えられた。ところが 1932 年に宇宙線の観測から電子の反粒子である陽電子が発見された。ま
 391 た、1950 年代前半には加速器により一連のストレンジ粒子群が生成されるなど、核子と同様に考えられるハ
 392 ドロンが幾つも発見されていった。反粒子とは質量は対応する粒子と同じだが、それ以外の、電荷といった量
 393 子数の符号が異なる粒子のことである。これだけ多くの粒子が存在すると、もはやこれらは「素粒子」とは呼
 394 べなくなり、スピンが異なる似た複数の粒子の存在は素粒子同士のスピン組み合わせによるものではない
 395 か等、より少ない種類の素粒子による枠組みが考えられるようになる。1964 年、ゲルマンとツヴァイクは 3
 396 種類のクォーク、後の u 、 d 、 s がそれまでに発見されていた全てのハドロンを構成しているとするモデ
 397 ル、クォーク模型をそれぞれ独立に示した。ハドロンはバリオン(核子)とメソン(中間子)の 2 種類が在るが
 398 クォーク模型においてはバリオンをクォーク 3 つの束縛状態、メソンをクォークとその反粒子である反クォ
 399 ークの束縛状態として取り扱う。ただ、クォークを直接観測することは不可能であり、また本節にて後述する図
 400 1.1.1 にも示しているように、電荷が $\pm \frac{2e}{3}$ といった分数になっている点など、このモデルには奇妙に思える性
 401 質があったことからクォークは仮想的なものと思われていた。

402 しかしクォークモデルの検証実験からはクォークの実在を示す結果が得られる。1960 年代から 1970 年代

403 にアメリカ西海岸のスタンフォード大学線形加速器センター (SLAC) で核子を固定ターゲットとして電子
404 ビームを衝突させ、反跳された電子のエネルギーと角度を調べる実験が行われた。このことから核子の内部に
405 は点状の構造があり、その点状のものは u 、 d クォークで、図 1.1.1 に示すように数 MeV と、陽子や中性
406 子の約 $\frac{1}{100}$ の質量を持つことが分かった。そして 1974 年、チャームクォーク (c) が発見される。いわゆる
407 1974 年革命である。質量が 3.1 GeV と陽子の 3 倍以上で幅の狭い共鳴状態が、ブルックヘブン研究所にて
408 ティンが率いるグループと SLAC にてリヒター率いるグループにより、同時に独立に発見された。前者のグ
409 ループでは J と、後者では ψ と命名したため、双方を合わせて J/ψ と名付けられた。すでに明らかとなっ
410 いた 3 種類のクォーク、 u 、 d 、 s は共鳴状態のピークの幅が広く分布する。通常、大きい質量の中間子は
411 小さい質量の状態へ崩壊し得る状態数が多く、短寿命となる。しかし、この電荷 0 の J/ψ 中間子は重いにも
412 関わらず長寿命であり、新しいクォークの存在を示すものであった。その後、 J/ψ の近傍に多くの共鳴状態が
413 発見され、 e^+e^- 束縛状態のポジトロニウムのエネルギー状態と酷似していることからチャーモニウムと名付
414 けられた。これらの実験結果は中間子がクォークと反クォークの束縛状態であり仮想的な存在だったクォーク
415 が物理的実態であることの確かな証拠となった。続く 1977 年にはフェルミ研究所でレーダーマン率いるグ
416 ループが 500 GeV 陽子シンクロトロンを用いた固定標的実験を行いボトムクォーク (b) が、1995 年には同
417 じくフェルミ研究所で陽子反陽子衝突型加速器の TEVATRON を用いた CDF 実験、D0 実験から共にトッ
418 プクォーク (t) の発見が発表され第 3 世代のクォークまでが出揃う。

419 クォークは図 1.1.1 に示すように上 3 つの u 、 c 、 t は $\frac{2}{3}e$ 、下 3 つの d 、 s 、 b は $-\frac{1}{3}e$ の電荷を持つ。
420 また第 1 世代から第 3 世代までの全 6 種類あり、その種類のことをフレーバーという。そのうち 3 種類の u
421、 d 、 s は比較的質量が軽いので、これらをフレーバー対称性と呼ばれる $SU(3)$ の 3 次元表現とみなせる。
422 一方で c 、 b 、 t は u 、 d 、 s からなるハドロンの典型的質量、約 300 MeV よりも 1 桁から 2 桁重いた
423 め、これらのフレーバー対称性は存在しない。またスピン $\frac{1}{2}$ は $SU(2)$ の 2 次元表現とみなせるのでメソン
424 やバリオンに対応させて 2 つや 3 つの直積を計算するとスピンの 0 と 1、 $\frac{1}{2}$ と $\frac{3}{2}$ が作られる。前者の 2 つ
425 の直積を表す $SU(2)$ 対称性は u と d が質量がほとんど同じであることに起因しており、このスピンのこと
426 をアイソスピンと呼ぶ。

427 レプトンについては上述したトムソンの実験で電子が、1937 年にカール・アンダーソンらによって霧箱を
428 使った宇宙線観測からミューオンが [3]、1955 年にライネスとコーワンによる原子炉からのニュートリノ観
429 測で反電子ニュートリノが、1962 年にレーダーマン、シュワルツ、スタインバーガーによりミューニュート
430 リノが、1976 年にパールによりタウ粒子が、そして 2000 年にランドバークと丹羽公雄によりタウニュート
431 リノが発見された。

432 レプトンもスピン $\frac{1}{2}$ 、3 世代まである 6 種類のフェルミオンで、 $-e$ の電荷を持つ電子、ミューオン、タウ
433 3 つの荷電レプトンとそれぞれに対となる電荷を持たない 3 つのニュートリノ、電子ニュートリノとミュー
434 ニュートリノ、タウニュートリノがある。だが、レプトンの反応は「弱い相互作用」と呼ばれるものが支配的
435 であり、これに対応する $SU(2)$ 対称性は弱アイソスピンと言い、電磁相互作用が無い場合に限ってその対称
436 性を持つ。さらに力を媒介する粒子、ゲージボソンについても 1979 年に DESY (ドイツ) の PETRA 実験に
437 よりグルーオン [4]、続く 1983 年にはカルロ・ルビア率いるチームとピエール・ダリウラ率いるチームが独立
438 に CERN (スイス、ジュネーブ) の Sp \bar{p} S 実験で Z^0 ボソン、 W^\pm ボソンを発見し、電磁相互作用、強い相互
439 作用、弱い相互作用 3 種類全てのゲージ粒子の探索が完結した。

440 電磁相互作用は重力の次に古くから知られているが電磁場を光量子の集まりとしても扱うようになったのは
441 アインシュタインがこの考え方により光電効果を説明してからである。電磁相互作用を媒介する粒子は光子で
442 あり、質量、電荷共に 0 である。光子は電荷を運ばないため、光子同士が相互作用することはない。電磁場

443 を扱う運動において、ゲージ変換に対する局所対称性を考えるとその運動の解は 1 変数のアーベリアンとな
 444 り、電磁相互作用は $U(1)$ の対称性を持つことが知られている。グルーオンは強い力を媒介する粒子で、電荷
 445 が 0 の代わりにこれから述べる「色電荷」という量子数を持っており、この色電荷を運ぶことからクォークの
 446 色を変えたり光子とは異なってグルーオン同士でも相互作用する。先程ハドロンはクォークの複合粒子である
 447 ことを紹介したが、その中でも 3 つ全て揃っているスピン $\frac{3}{2}$ のバリオン 10 重項内にある $\Delta^{++} = uuu$ にお
 448 いて、10 次元表現が 3 階対称テンソルの項を含むことによる完全対称性とフェルミ統計から要請される完全
 449 反対称性という相反する結論となり、矛盾が生じる。そこでこの問題を解決するために導入された $SU(3)$ の
 450 対称性、即ちカラー (赤、緑、青) の自由度であったが、カラーの内部対称性のゲージ化により、そのゲージ
 451 場はグルーオンと呼ばれる、強い力を媒介する粒子であることが分かる。グルーオンの表現は基本表現 $\mathbf{3}$ (赤、
 452 緑、青の色電荷) とその複素共役 $\mathbf{3}^*$ (反赤、反緑、反青の反色) の組合わせで、メソンにおけるクォークと反
 453 クォークの合成と同じ数学的構造である。よって色電荷に作用しないグルーオンが 1 つあるので 8 種の色電
 454 荷に作用するグルーオンがある。 Δ^{++} の他にも $\Delta^- = ddd$ 、 $\Omega^- = sss$ といったスピンの揃っているハドロン
 455 が存在しているが、これら 3 つは「色」という量子数が確かに実在する証拠である。
 456 弱い相互作用を媒介する粒子は Z^0 ボソン、 W^\pm ボソンであり、 W^\pm ボソンがボソンの中で唯一 $\pm e$ の
 457 電荷を有する。これら 3 種類のゲージボソンが弱い相互作用を媒介する反応の例を図 1.1.2 に示す。

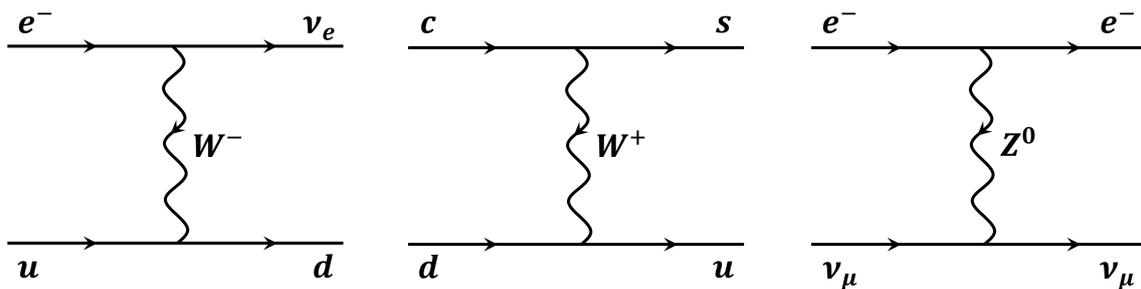


図 1.1.2 Z^0 ボソンや W^\pm ボソンにより媒介されるレプトン及びクォーク間の相互作用の例 [5].

458 図 1.1.2 において一番左の例は β 崩壊、 $n(udd) \rightarrow p(uud) + e^- + \bar{\nu}_e$ として知られているもので、低エネルギー
 459 側ではフェルミ相互作用として近似できる。弱い相互作用は電磁相互作用や強い相互作用とは異なり、媒介
 460 となる粒子に質量がある点や、クォークやレプトンが右巻きと左巻きの混合により質量を持つ際に世代間をま
 461 たいで混合してしまう。このようなことが起こるのは低エネルギー領域で $SU(2)$ 対称性が破れていることに
 462 起因する。これはヒッグス機構により電磁気力と弱い力に分かれたため、弱アイソスピンの 2 重項でヒッ
 463 グス場を定義して自発的に対称性が破れた後のラグランジアンを考えることでその事実が得られることが知ら
 464 れている。高エネルギー側ではこれら 2 つの相互作用は電弱相互作用として統一でき、 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ の
 465 対称性を持ち、保存量を弱アイソスピンとハイパー電荷で表す。そして $SU(3)_C$ 対称性をもつ強い相互作用
 466 も統一することで標準模型には $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ のゲージ対称性があるとされている。ヒッグス粒子
 467 はその質量が重いため最後まで未発見のまま残っていた。質量を持つフェルミオンが局所的ゲージ不変性を
 468 満足する為にはヒッグス場との相互作用が必要だが、ヒッグス粒子は電荷とスピンの共に 0 の、ヒッグス場に
 469 伴う粒子で標準模型の根幹をなすヒッグス機構において重要なものであった。そして 2012 年 7 月、CERN
 470 の LHC 実験でそのヒッグス粒子が発見されたことで 17 種類全ての粒子が出揃い、遂に標準模型が完成した。
 471 標準模型は 2023 年時点までに得られた実験結果の大部分を正しく説明してきた。だがその一方で自然界に

472 存在する 4 つの相互作用の内、重力が統一できていない点やニュートリノに質量が在ることを示すニュート
 473 リノ振動現象、ダークマターについて、この枠組みでは説明不可能である。従って標準理論を低エネルギー領
 474 域における近似表現とするより高エネルギーな領域に存在するような新物理の枠組みの候補が提唱されてい
 475 と共にその探索が精力的に進められている。

476 1.2 CP 対称性の破れ

477 1.1 で説明した素粒子には粒子と反粒子が存在し、電荷やバリオン数、レプトン数、ストレンジネスといっ
 478 た内部量子数は互いにその正負が反対で絶対値が等しく、質量や寿命は両者共に等しい。第 2 章で説明する
 479 が、茨城県つくば市にあるレプトン衝突型加速器の SuperKEKB 加速器で衝突させている素粒子は電子と陽
 480 電子だが、この陽電子が電子の反粒子である。我々の宇宙は約 138 億年前にビッグバンが起こったことで誕
 481 生したと考えられており、その誕生以来、膨張を続けている。初期宇宙では粒子と反物質が同数存在したと考
 482 えられているが、現在の宇宙には反粒子はほとんど存在しておらず、物質優勢となっている。この物質と反物
 483 質の非対称性を生み出すための必要条件の一つが CP 対称性の破れである。

484 1.2.1 CP 対称性

485 CP 対称性は対象とする系において荷電共役変換 (C) と空間反転 (P) を同時に行った時、そのハミルトニ
 486 アンが不変であることを指し、従ってハミルトニアンをフェルミの第二黄金率に用いて得られる確率 P もま
 487 た不変であることを言う。パリティとも言われる空間反転 (P 変換) とは空間座標を反転する変換のことで、
 488 右手座標系は左手座標系に変換され、逆もまた然りである。例えば 3 次元の空間ベクトル $\mathbf{x} = (x, y, z)$ は
 489 $(-x, -y, -z) = -\mathbf{x}$ となる。また荷電共役変換 (C 変換) とは全ての内部量子数を反転させる操作であり、粒
 490 子と反粒子を関係づけている。C、P のどちらも 2 度繰り返すと元の状態に戻るため、これらの変換を行う
 491 演算子の固有値はともに ± 1 のみが許される。そして両者の変換とも、弱い相互作用においてはそれぞれ独立
 492 に対称性を破っていることが β 崩壊に関する実験などから判明している。対称性についてはもう 1 つ、時間
 493 反転 (T) があり、例えば電子に時間反転を施すとそれとは時間軸を逆向きに進行する陽電子となる。この T
 494 と C、P の 3 つの積 CPT の変換に対してローレンツ不変な理論は対象であるという CPT 定理が成り立
 495 つ。この不変性より、

- 496 ● 粒子が整数スピンを持つときはボソン、半整数スピンを持つときはフェルミオンとなる、
- 497 ● 粒子には反粒子が存在する、
- 498 ● 粒子と反粒子の質量と寿命は等しい、

といった結論が導かれることが知られている。また CPT 不変性は T 変換と CP 変換がともに粒子と反粒子
 を入れ替える変換、つまり T、C、P の演算子 T, C, P に対して $T = (CP)^{-1}$ であることを主張してい
 る。標準理論に登場する場はディラック場、ゲージ場、ヒッグス場の 3 つであり、また標準模型の世代数は 3
 である。このとき例えば湯川相互作用について考えると、その結合定数は一般に異なる世代間にも存在する。

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -G_{AB}^{(e)} \bar{L}^A \phi R^B - G_{AB}^{(u)} \bar{Q}_L^A \tilde{\phi}^\dagger U_R^B - G_{AB}^{(d)} \bar{Q}_L^A \phi^\dagger D_R^B + \text{h.c.} \quad (1.1)$$

ここで、 $A, B = 1, 2, 3$ は世代の添え字、 $G_{AB}^{(e)}, G_{AB}^{(u)}, G_{AB}^{(d)}$ は順に荷電レプトンセクター (ν_e, ν_μ, ν_τ 及
 び e^-, μ^-, τ^-)、アップクォークセクター (u, c, t)、ダウンクォークセクター (d, s, b) の湯川結合定数

を表す。各場の中身は、

$$L^A \equiv \begin{pmatrix} \nu_L^A \\ l_L^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_L \\ \begin{pmatrix} e^- \\ \mu^- \\ \tau^- \end{pmatrix}_L \end{pmatrix}, Q_L^A \equiv \begin{pmatrix} U_L^A \\ D_L^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_L \\ \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$R^B \equiv \begin{pmatrix} e^- \\ \mu^- \\ \tau^- \end{pmatrix}_R, U_R^A \equiv \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_R, D_R^A \equiv \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_R \quad (1.3)$$

である。自発的対称性の破れによってヒッグス場が真空期待値、

$$\langle \phi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \langle \tilde{\phi} \rangle = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

を持つと、式 (1.1) には 3×3 の質量行列、 $M_{AB}^{(e,u,d)} \equiv v G_{AB}^{(e,u,d)}$ で表される質量項が生じることが知られている。またクォークとレプトンの運動項は、

$$\mathcal{L}_{kin} = \overline{L^A} i \gamma^\mu D_\mu L^A + \overline{R^B} i \gamma^\mu D_\mu R^B + \overline{Q_L^A} i \gamma^\mu D_\mu Q_L^A + \overline{U_R^A} i \gamma^\mu D_\mu U_R^A + \overline{D_R^A} i \gamma^\mu D_\mu D_R^A \quad (1.5)$$

と表される。荷電レプトンとクォークは質量固有状態なので質量行列 $M_{AB}^{(e,u,d)}$ は適切なユニタリー行列、 S 、 T の 2 つを用いれば、

$$\begin{aligned} M^{(e)} &= S^{(e)} M_d^{(e)} (T^{(e)})^\dagger \\ M^{(u)} &= S^{(u)} M_d^{(u)} (T^{(u)})^\dagger \\ M^{(d)} &= S^{(d)} M_d^{(d)} (T^{(d)})^\dagger \end{aligned} \quad (1.6)$$

のように対角化できる。但し $M_d = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$, $m_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ であり、各セクターの場を、

$$\begin{aligned} \overline{l}_L S^{(e)} M_d^{(e)} (T^{(e)})^\dagger l_R &\equiv l'_L M_d^{(e)} l'_R \\ \overline{U}_L S^{(u)} M_d^{(u)} (T^{(u)})^\dagger U_R &\equiv U'_L M_d^{(u)} U'_R \\ \overline{D}_L S^{(d)} M_d^{(d)} (T^{(d)})^\dagger D_R &\equiv D'_L M_d^{(d)} D'_R \end{aligned} \quad (1.7)$$

とユニタリー変換によって再定義している。各セクターの質量行列この再定義において式 (1.5) の \mathcal{L}_{kin} の荷電カレント相互作用の項 $-\mathcal{L}_C = g W_\mu (\overline{U}_L \gamma^\mu D_L + \overline{D}_L \gamma^\mu U_L)$ だけ、

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_C &= g W_\mu (\overline{U}'_L \gamma^\mu D'_L + \overline{D}'_L \gamma^\mu U'_L) \\ &= g W_\mu (\overline{U}_L S^{(u)} \gamma^\mu S^{(d)\dagger} D_L + \overline{D}_L S^{(d)} \gamma^\mu S^{(u)\dagger} U_L) \\ &\equiv g W_\mu (\overline{U}_L \gamma^\mu V D_L + \overline{D}_L \gamma^\mu V^\dagger U_L) \\ &= g \sum_{j,k} [\overline{u}_{jL} \gamma^\mu V_{jk} d_{kL} W_\mu^+ + \overline{d}_{kL} \gamma^\mu V_{jk}^* u_{jL} W_\mu^-] \end{aligned} \quad (1.8)$$

なる変更を受け、ここに相互作用が各二重項の中で閉じずに世代間の混合が起きる。ここで、

$$V = S^{(u)} S^{(d)\dagger} \quad (1.9)$$

を Cabbibo-小林-益川行列と呼ぶ (1.2.2 節で後述)。 $-\mathcal{L}_C$ に CP 変換を施すと、

$$-\mathcal{L}_C \xrightarrow{\text{CP}} g \sum_{j,k} [\overline{d}_{kL} \gamma^\mu V_{jk} u_{jL} W_\mu^- + \overline{u}_{jL} \gamma^\mu V_{jk}^* d_{kL} W_\mu^+] \quad (1.10)$$

499 となる。よって V が実行列であるとき、CP 対称性が保存される。この対称性は 1950 年代初頭まで全ての相
500 相互作用で保存すると考えられていた。しかし、1964 年にブルックヘブン研究所にてクリステンソン、クロー
501 ニン、フィッチ、ツアレイらが AGS 実験で、中性 K 中間子の $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ 崩壊を観測し、CP 対称性が破れて
502 いることの証拠となった。

503 1.2.2 CKM 行列と B 中間子

式 (1.8) において、を質量固有状態、をフレーバー固有状態という。式 (1.8) は W^\pm の放出不いしは吸収過
程で世代の混合が起きていることを前節で述べた。1950 年代に見つかったクォークは u、d、s の 3 つ
で、当時の実験結果から N. カビボの仮説とその後の S. グラシヨー、J. イリオポウロス、L. マイアニの 3 人
による GIM 機構が提唱された。これらの説によればフレーバー固有状態 (d' , s') と質量固有状態 (d, s) の間
にはユニタリー行列を用いて以下のような関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

504 ここで θ_C はカビボ角と呼ばれるパラメータでボソンが中間子に崩壊する反応の相対的な強さを表す。こ
505 こで n 世代のユニタリー行列における CP の位相数について考える。一般に $n \times n$ ユニタリー行列の
506 独立な実変数は n^2 個だけ存在するが、このうち非物理的位相の数： $n + (n - 1) = 2n - 1$ 個はクォ
507 ーク場の再定義で、 n 次元の実空間回転の数： $\binom{n}{2} = n(n - 1)/2$ 個は適当な回転角で書き表せる。つまり、
508 $n^2 - (2n - 1) - n(n - 1)/2 = (n - 1)(n - 2)/2$ 個が CP の位相数として残る。従って式 (1.11) のように
509 $n \leq 2$ ではユニタリー行列の要素を全て実数で書き直してしまうので CP 非保存の現象を記述できない。CP
510 非保存の現象を説明するには $n \geq 3$ を要請する必要がある、少なくとも $n = 3$ であれば 3 つの回転角に加え
511 て 1 つの複素位相が現れる。小林誠と益川敏英はこの 1 つの複素位相を導入することでクローニンらによ
512 て 1964 年に発見された中性 K 中間子の CP 非保存現象を標準理論に組み込めることを指摘した [6]。

その後 b、t クォークが発見され、これらを式 (1.11) に含めた d' 、 s' 、 b' 3 つの状態と d、s、b の固有状態
の関係は 3×3 ユニタリー行列を用いて以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

この 3×3 行列が前節で紹介した Cabbibo-小林-益川 (CKM) 行列 V_{CKM} と呼ばれるものであり、各行列要
素は W ボソンと結合可能な全クォーク対との結合の大きさを表す。回転角 $\theta_i (i = 1, 2, 3)$ と複素位相 δ を用
いと V_{CKM} は、

$$\begin{aligned} V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_1 c_2 & s_1 c_2 & s_2 e^{-i\delta} \\ -s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 e^{-i\delta} & c_1 c_3 - s_1 s_2 s_3 e^{i\delta} & c_2 s_3 \\ s_1 s_3 - c_1 s_2 c_3 e^{i\delta} & -c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 e^{i\delta} & c_2 c_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.13)$$

のように表される。ここで $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$ であり、クォーク場の適当な再定義で $0 \leq \theta_i \leq \pi/2$,
 $0 \leq \delta \leq 2\pi$ とできる。 V_{CKM} はユニタリー行列なので $V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = \mathbf{1}$ が成り立つ。例えば $(V_{CKM}^\dagger V_{CKM})_{13}$
は非対角要素なので、

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.14)$$

となる。これは複素平面上で式 (1.14) の左辺の 3 項が閉じた三角形を成すことを主張しており、この三角形をユニタリティー三角形と呼ぶ。 V_{CKM} はまた各要素の観測値を踏まえた近似形でも表せる。 $s_1 = \lambda(\lambda \ll 1)$ 、 $s_3 = A\lambda^2$ 、 $s_2 e^{-i\delta} = A\lambda^3(\rho - i\eta)$ とおいて、

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (1.15)$$

と表された、ヴォルフエンシュタイン表式がよく用いられる。実験値から 2023 年現在、

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.22500 \pm 0.00067 \\ A &= 0.826^{+0.018}_{-0.015} \end{aligned} \quad (1.16)$$

513 と求まっている [7]。

式 (1.15) の各パラメータを式 (1.14) に代入し、 $V_{ud} = 1 - \lambda^2/2 \doteq 1$ の近似をとると式 (1.14) のユニタリー条件は

$$A\lambda^3\{(\rho + i\eta) - 1 + (1 - \rho - i\eta)\} = 0 \quad (1.17)$$

514 と書き表せるので、 $\rho - \eta$ 複素平面において $(0, 0)$ 、 (ρ, η) 、 $(1, 0)$ を頂点とする三角形が描かれる。そのユニ
515 タリティー三角形の様子を図 1.2.1 に示す。

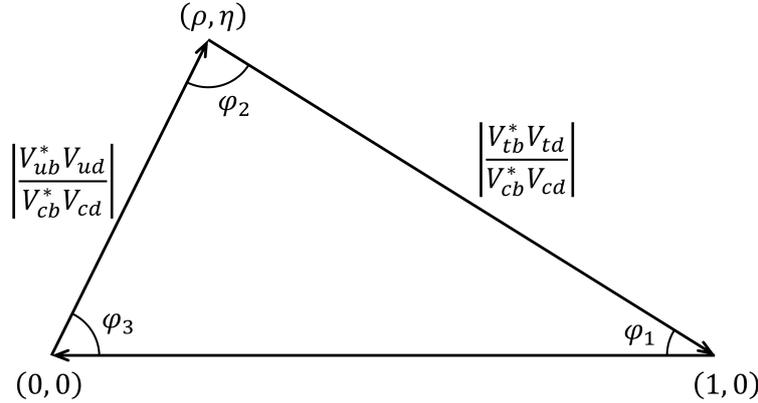


図 1.2.1 CKM 行列のユニタリー条件：式 (1.14) の $\rho - \eta$ 複素平面における表示。

516 各辺は $|V_{cb}^* V_{cd}| = A\lambda^3$ で規格化された長さで表されている。この三角形について (ρ, η) は K 中間子の、
517 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 は 3 世代目の B 中間子の CP 非保存に関する情報から決まる。特に B 中間子とは重い b クォーク
518 と軽いアップ u または d クォークで構成され、質量は 5.279 GeV にもなる。この B 中間子の CP 非保
519 存現象の 1 つは $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ の崩壊過程で崩壊率の時間依存性が両者の間で非対称性であることに現
520 れる。 B^0 も同様だが、 \bar{B}^0 で考えると ψK_S^0 の終状態へは 2 つの経路がある。1 つは $b \rightarrow c\bar{c}s(\sim b \rightarrow c$ 遷移
521 の過程を通して直接崩壊できる。もう 1 つは $\bar{b} \rightarrow \bar{c}c\bar{s}(\sim B_0 - \bar{B}^0$ 混合の後、 $\bar{b} \rightarrow \bar{c}$ 過程を通して崩壊する。
522 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合振幅は次の図 1.2.2 の過程によって支配的となる。

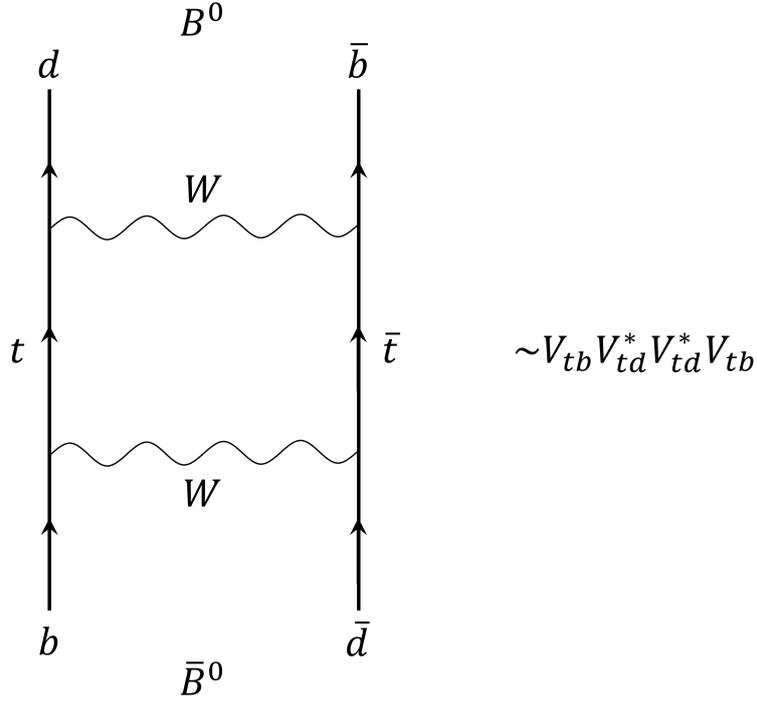


図 1.2.2 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を表したファインマンダイアグラム.

2つの経路は $-(V_{cb}^* V_{cs} V_{tb} V_{td}^* V_{cb}^* V_{cd})^2$ に比例する相対因子のみが異なり、この中で V_{td} のみが位相を持つことが知られている。その V_{td} は $V_{td} = A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) = Ce^{-i\phi_1}$ と表せるので2つの経路の相対位相は $-e^{2i\phi_1}$ となる。従って2つの固有状態の質量差を δm 、固有時を τ 、崩壊率を Γ とすると、崩壊率の時間依存に対する非対称性は $B^0 - \bar{B}^0$ 質量行列の計算から以下の式となる。

$$\frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) - \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) + \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)} = \sin(\delta m \tau) \sin(2\phi_1) \quad (1.18)$$

523 これより非対称性には δm で支配される時間依存性があり、振幅は $\sin(2\phi_1)$ に従うことが予言される。この
 524 非対称性を測定する際は e^+e^- 衝突により現出した質量 10.58 GeV の $\Upsilon(4S)$ なる共鳴状態が崩壊して得られ
 525 る、 $B^0\bar{B}^0$ 生成を用いる。このとき \bar{B}^0 は B^0 より時間 Δt だけ長く B^0 と混合しながら伝播し、その後、終
 526 状態へと崩壊する (図 1.2.3)。

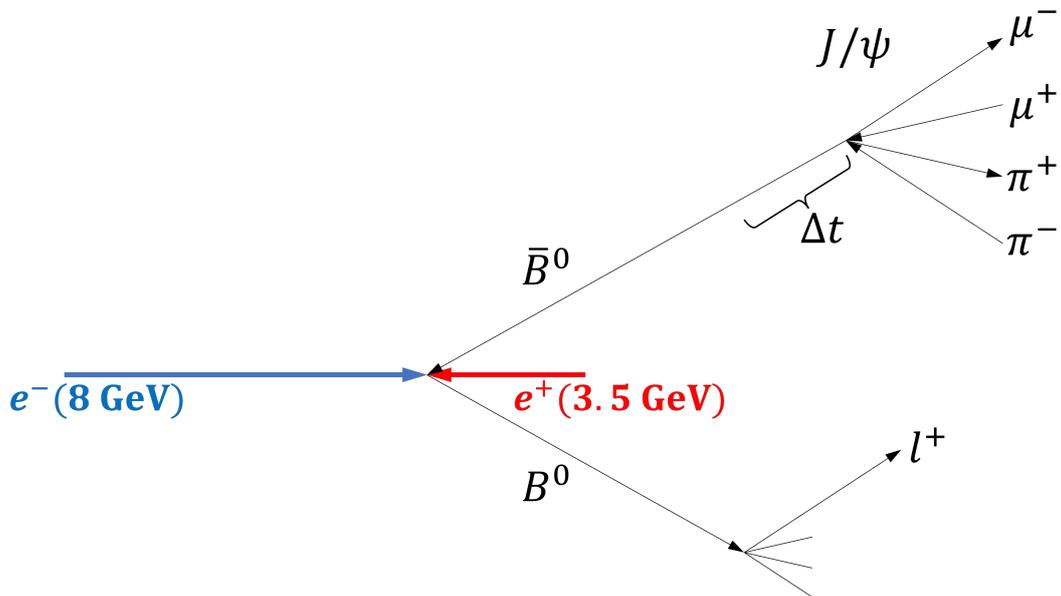


図 1.2.3 e^+e^- 衝突を用いた $\Upsilon(4S)$ の崩壊.

527 相対時間 Δt もしくは $\tau = \Delta t/\gamma$ は図 1.2.3 にて示される時間である。B 中間子の寿命は 1.52 ps とピコ秒
 528 オーダーであることに加えて $\Upsilon(4S)$ はほぼ静止した $B^0\bar{B}^0$ へ崩壊するので崩壊時間の直接測定は困難であ
 529 る。従って衝突させる e^- 、 e^+ のエネルギーを非対称にして e^-e^+ 重心系を移動させることでこの問題を解決
 530 できる。KEK の KEKB、SLAC の PEP-II はこれを踏まえて建設された加速器である。両者とも重心系速
 531 度が光速のおよそ半分となるようにビームエネルギーが設定されており、相対時間 Δt は $B^0\bar{B}^0$ の崩壊点位置
 532 の測定に置き換えられる。2 つの B 中間子崩壊点の平均的な隔たりは $\beta = v/c \approx 0.5$ において約 0.27 mm と
 533 なり、高精度な半導体飛跡検出器で識別が可能である。

534 このようにして KEK の Belle、SLAC の BaBar 実験で $B^0(\bar{b}d)$ 、 $\bar{B}^0(b\bar{d})$ 崩壊の非対称性が観測され (図
 535 1.2.4)、3 世代のクォークで CP 非保存が説明できると提唱した小林-益川理論の正しさが証明された。

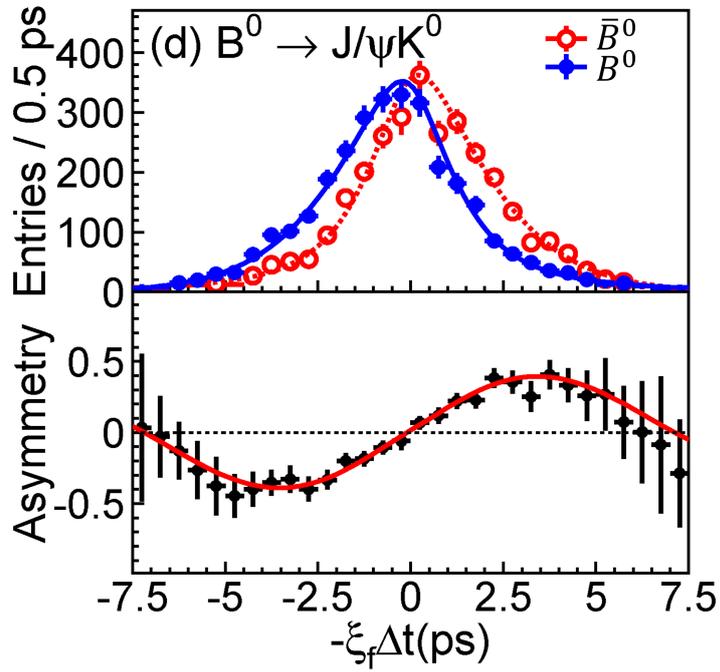


図 1.2.4 KEK にあった KEKB 加速器の Belle 実験で測定された、 $\Upsilon(4S)$ での $B^0 \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ の崩壊分布 (上) と非対称率 (下)[13].

536 また CKM 行列の各要素や ρ 、 η の推定値を種々のデータの総合的なフィットから得る研究が様々なグルー
 537 プによって実施されている。図 1.2.5 に CKM fitter によるフィット結果を示す。各フィット結果が幅を持つ
 538 のは理論値の不定性と実験誤差に由来する。誤差の範囲でユニタリティー三角形が閉じている、つまり CP 非
 539 保存が成立している。理論の改善や CP 非対称性に関するより多くの実験結果を得ることでこの精度は向上
 540 する。

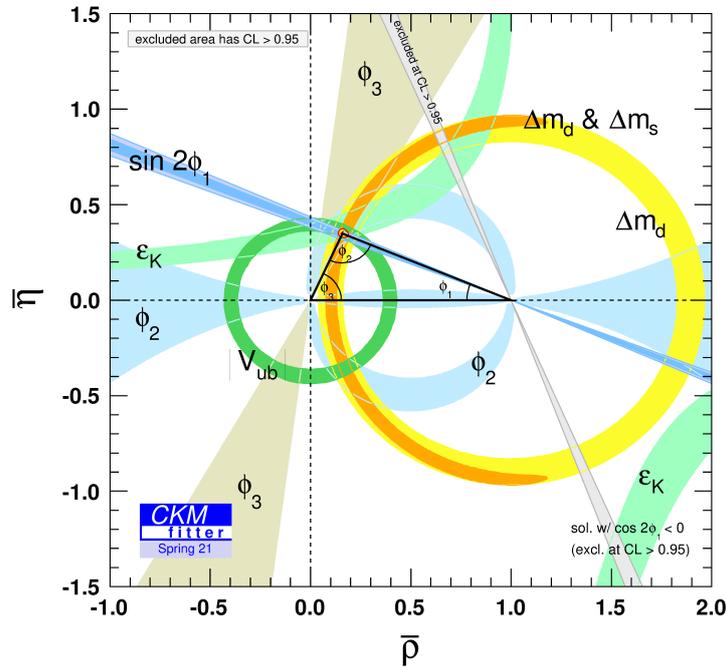


図 1.2.5 CKM fitter によって行われた、2021 年春時点での実験結果におけるユニタリティ三角形の各値のフィット結果 [8].

541 B 中間子の希崩壊

542 CP 非保存を説明する小林-益川理論の正しさを証明した Belle 実験だったが、それ以降も Belle II 実験と
543 してデータを蓄積、他の崩壊過程での CP 非保存について、その詳細な調査がなされている。

544 ペンギンダイアグラムと呼ばれる 1 ループダイアグラムによって起こると考えられている崩壊には色々な
545 過程があり、新しい物理の兆候と考えられうる結果が出ている。ただこれらは小さな分岐比の稀崩壊であるの
546 で、こういった状況を明瞭にするには、より多くの統計データが必要となる。そのために SuperKEKB はそ
547 のデータをさらに蓄積できるよう、ルミノシティを向上させることが課題となっている。

548 1.3 衝突型加速器

549 衝突型加速器とは互いに反対の向きに加速させた粒子ビーム同士を衝突させ、高い重心系エネルギーでの衝
550 突を実現するための装置である。衝突型加速器の性能は主に「重心系エネルギー」「ルミノシティ」の 2 つの
551 パラメータで議論される。

552 ビームが正面衝突で電子・陽電子の質量 m_{e^-} 、 m_{e^+} がビームのエネルギー ϵ_{e^-} 、 ϵ_{e^+} よりも十分小さいと
553 すれば、重心系エネルギー E^* は以下に示す式 (1.19) で表される。ただし運動量は \mathbf{p} で表している。

$$\begin{aligned}
E^* &= \sqrt{(\epsilon_{e^-} + \epsilon_{e^+})^2 - (\mathbf{p}_{e^-} + \mathbf{p}_{e^+})^2} \\
&= \sqrt{2\epsilon_{e^-}\epsilon_{e^+} + (m_{e^-}^2 + m_{e^+}^2) + 2\sqrt{(\epsilon_{e^-}^2 - m_{e^-}^2)(\epsilon_{e^+}^2 - m_{e^+}^2)}} \\
&\simeq 2\sqrt{\epsilon_{e^-}\epsilon_{e^+}}
\end{aligned} \tag{1.19}$$

一方、ルミノシティは衝突点におけるビーム粒子の衝突輝度を表す量であり、このルミノシティが高いほど観測対象の物理現象を生成可能な高性能衝突型加速器であるとの評価が成せる。ルミノシティ L は以下の式 1.20 のように表せる。

$$L = \frac{N_{e^+}N_{e^-}n_b f_0}{4\pi\sigma_x^*\sigma_y^*} \tag{1.20}$$

554 ここで、

555 N_{e^+} 、 N_{e^-} ：それぞれバンチ 1 つあたりに含まれる陽電子数及び電子数、

556 n_b ：1 周当たりのバンチ数、

557 f_0 ：1 秒当たりの周回周波数、

558 σ_x^* 、 σ_y^* ：それぞれ衝突点における x 方向、 y 方向のビームのサイズ

559 である。この式から分かるように、ルミノシティを大きくする手段としてバンチ数を多くして衝突輝度を高める、各バンチの粒子数を増やす、衝突点でビームを細く絞ることが考えられる。

561 次に衝突型加速器のタイプについて説明する。一般的に衝突型加速器には大きく分けてエネルギーフロンティア、ルミノシティフロンティアの 2 つのタイプが存在する。前者のエネルギーフロンティアと呼ばれるタイプについてだが、これは今まで測定したことのない重心系エネルギーで衝突実験を行い重たい未知の素粒子を観測することを目的として加速器の重心エネルギーをなるべく高くし、そのビーム衝突から直接生成された新粒子を観測する、といった実験方法である。加速器の重心エネルギーが大きい程、その加速器はより重い質量の粒子を生成することが可能である。新物理の有力候補である SUSY を始め、標準模型を超える新物理は TeV スケールに存在すると理論的に予想されており、たとえば粒子を直接生成することを通して新物理の探索を行う方法がある。代表例にスイスはジュネーブの CERN に建設されている LHC (Large Hadron Collider) が挙げられる。LHC は 6.5 TeV の陽子ビーム同士を衝突させ重心エネルギー 13TeV での衝突実験をしている。これは衝突実験における重心系エネルギーの 2023 年時点での世界最高値である。

571 一方のルミノシティフロンティアは高頻度の粒子衝突で大統計の素粒子反応データを観測し、その精密測定を行ったり、生成頻度が希少な現象を観測することを目的としている。標準模型を超える新物理のエネルギースケール、およそ TeV のオーダーよりも小さいが、新物理に感度のある事象を大量に生成することで、間接的に高エネルギースケールに存在する新物理現象を観測することが可能である。不確定性原理により、低エネルギーの事象であっても高エネルギー物理の寄与がある事象が存在するため、統計量が多ければ多いほどファインマンダイアグラムの高次効果への感度は増すこととなる。そのためにこのタイプの加速器はルミノシティ向上を特に重要な課題としている。代表例は SuperKEKB である。

578 1.4 SuperKEKB のルミノシティの増強計画

579 図 1.4.1 に SuperKEKB に関するルミノシティ向上の変移と今後のスケジュールを示す。

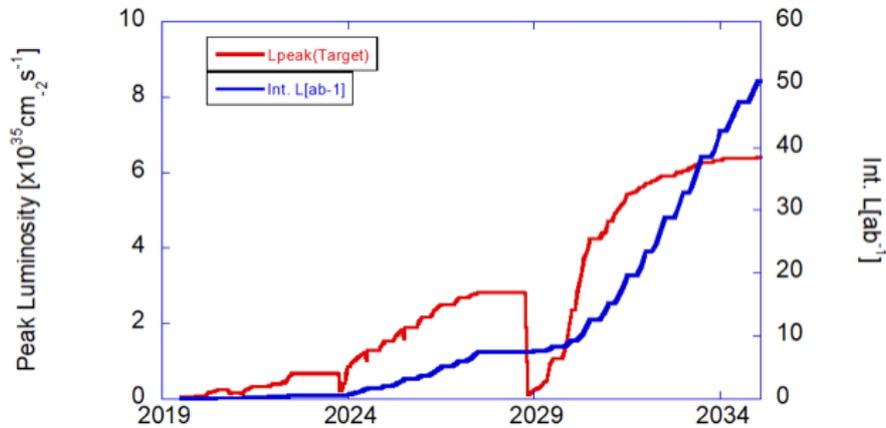


図 1.4.1 SuperKEKB に関するルミノシティ向上の変移と今後のスケジュール [9] . 赤線は瞬間ルミノシティの値、青線は積分ルミノシティの値を示す。

580 2023 年現在の最高ルミノシティは Belle II 測定器がデータ取得中の記録は $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を 2022
 581 年 6 月 8 日に、 Belle II 測定器のデータ取得が停止されている場合の記録は $4.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を 2022
 582 年 6 月 22 日に達成した。これらの記録は前身の KEKB 加速器で 2009 年 6 月 17 日に到達した最高ルミノ
 583 シティ、 $2.1083 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [12] の 2 倍以上である [10]。また Phase 3 の最初期にあたる 2019 年 3
 584 月 11 日より 2022 年 6 月 22 日の間に Belle II 測定器が収集出来た総積分ルミノシティは 424 /fb に達した
 585 [11]。然し 2023 年 11 月時点において SuperKEKB の目標値は瞬間ルミノシティについては KEKB 加速器
 586 達成値の約 30 倍の $60 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、積分ルミノシティについては 50 倍の 50 /ab と Phase 3 の最初
 587 期で収集したデータ量のおよそ 100 倍である。この目標に向けて、 2022 年 6 月 23 日より 2023 年 12 月末
 588 までの期間に実施された長期運転停止期間 (Long Shutdown 1, LS1) で Belle II 測定器や SuperKEKB の改
 589 良が行われ、 2023 年現在における LS1 後の計画としてはおよそ 2024 年夏までには瞬間ルミノシティにし
 590 て $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を、 2026 年までには総積分ルミノシティにして 3 /ab= 3×10^3 /fb を達成することを掲
 591 げている。

592 1.5 研究背景

593 1.5.1 Sudden Beam Loss : SBL

594 LS1 以前において SuperKEKB は「 Sudden Beam Loss (以下 SBL)」と名付けられたアクシデント事象
 595 による運転の阻害に見舞われた。SBL とは蓄積ビーム電流の数割が 1、2 周といった短時間に失われる
 596 ビームロス事象である。ビームロスに伴い発生する放射線は測定器や加速器機器を損傷する。この被害の事例
 597 には最終集束用超伝導電磁石 (QCS) にビームが当たることで温められ超伝導でなくなってしまう QCS クエ
 598 ンチも含まれている。この他、放射線量がビーム電流に比例することやコリメータの損傷により、ビーム不安
 599 定性が生成したり、損傷したコリメータが使えなくなることで衝突点でのビームバックグラウンドの上昇が起
 600 こることから、運転電流の増加を困難にし、ルミノシティ向上を図る上で大きな問題となっている。

601 図 1.5.1 は LER で 2022 年 6 月 9 日 4 時 20 分に発生した SBL 事象である。この時の陽電子ビームの蓄
 602 積電流は 1.4 A であり、 SBL 事象による放射線量は衝突点で 12 mGy/s を超えていた。これにより、QCS
 603 クエンチが発生した。また、コリメータヘッド部や Belle II 検出器の一部であるピクセル検出器の損傷が確

604 認されるなど、多大な被害を被った。

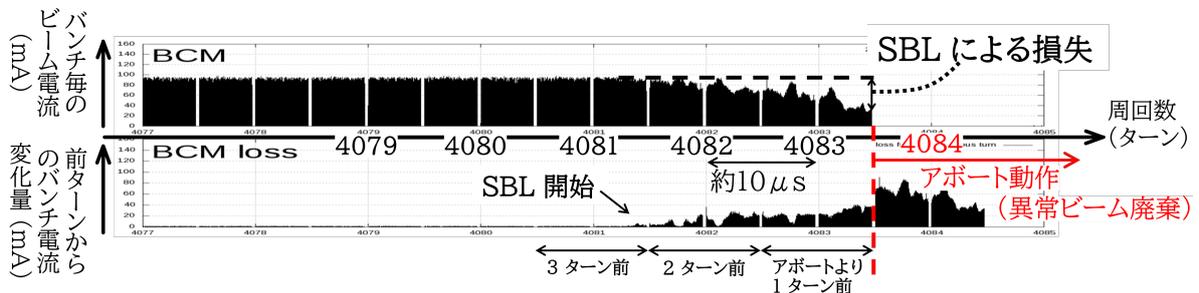


図 1.5.1 LER にて SBL 発生時、アポット前の数ターンにおける各周回のバンチ電流 (上段) と前ターンからのバンチ電流の変化量、つまりビームロスの量 (下段) の変移. アポットする 2、3 ターン前からビームロスが発生していることが確認できる. その後バンチ電流がゼロになっているのはビームがアポットされたことによるもので、下段の変化量はそのビーム量を表す. また半周回 (5 μ s) 毎にある隙間は 2.4 節で述べた 200 ns 間隔のアポットギャップである.

605 SBL 事象の原因究明と対策は「ルミノシティ増強」「今後 10 年の安全な加速器運転」のどちらにとっても
606 不可避な課題である。

607 1.5.2 SBL 被害低減の指針と本研究の概要

608 SuperKEKB はビーム異常 (ビームロスなど) の検知から蓄積ビームの破棄までに 17 μ s から 30 μ s 程度を
609 要している。SBL 事象はその間にも放射線を発生し続けるため、加速器機器の損傷被害は甚大なものとなっ
610 てしまう。本研究は SuperKEKB のビーム破棄の高速化手法を開発する。それにより SBL 発生時に被害増大
611 前のビーム破棄を実現し、加速器機器の保護を目指す。

612 その指針としては、

- 613 1. ビーム廃棄要求 (アポットリクエスト) 信号を早く発報する、
- 614 2. アポットリクエスト信号の伝送速度を速くする、

615 の 2 点が挙げられる。

616 前者は加速器ビームライン上の SBL 発生箇所後のなるべく近くで、ビーム異常の検知とアポットリクエ
617 ストの発報を実現し、ビーム破棄応答の高速化を図る。第 3 章では、アポットリクエスト信号の発報位置を改善
618 することでどれだけアポットを高速化出来るか検証した内容を記す。

619 後者としてアポットリクエスト信号として大気中にレーザーを送信する「レーザーアポットシステム」の開
620 発を行った。SuperKEKB で運用しているアポットリクエスト信号は光ファイバーを用いて送信しており光
621 信号は屈折率が約 1.5 の石英ガラス中を伝搬している。従って光を屈折率が 1 に近い大気中を伝搬させれば
622 信号速度の高速化につながる。

623 このように本研究は SuperKEKB 加速器運転中にビームのトラブルが発生した際、迅速かつ安全に対処す
624 るシステムに深く関係している。そこで第 2 章では、先ず SuperKEKB 加速器について略述する。第 3 章で
625 は、アポットリクエスト信号の発報位置を改善することでどれだけアポットを高速化出来るか検証した内容を
626 記す。第 4 章では、レーザーアポットシステム構築に必要な開発要素に関して実施した研究内容を記す。

第 2 章

SuperKEKB 加速器と Belle II 実験

2.1 SuperKEKB

この節では SuperKEKB の全容を略説する。また本研究と関連の深い機器については後述の 2.3 - 2.5 節で詳しく説明する。

2.1.1 概要

SuperKEKB 加速器は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のつくばキャンパスに図 2.1.1 のように位置しており、電子リング (High Energy Ring, HER) における $\epsilon_{e^-} = 7$ GeV の電子ビームと陽電子リング (Low Energy Ring, LER) における $\epsilon_{e^+} = 4$ GeV の陽電子ビームを衝突させる非対称エネルギー電子陽電子衝突型円形加速器である。この加速器は先代器、KEKB 加速器を改良したもので標準模型を超える新しい物理の現象を B 中間子およびタウ粒子崩壊を通して探索することを目的とした Belle II 実験のために設計、建設された。1.19 式で重心系エネルギーを計算すると KEKB、SuperKEKB とともに 10.58 GeV となるように設計されている。これは B^0 若しくは \bar{B}^0 への崩壊を起こす $\Upsilon(4S)$ の質量に合わせて電子、陽電子の衝突で生成するためである。また衝突させるビームエネルギーは電子が 7 GeV、陽電子が 4 GeV と非対称であるが、これは 1.2.2 節で触れたように、 B^0 、 \bar{B}^0 の寿命の差を崩壊点位置の隔たりとして測定することに起因する。

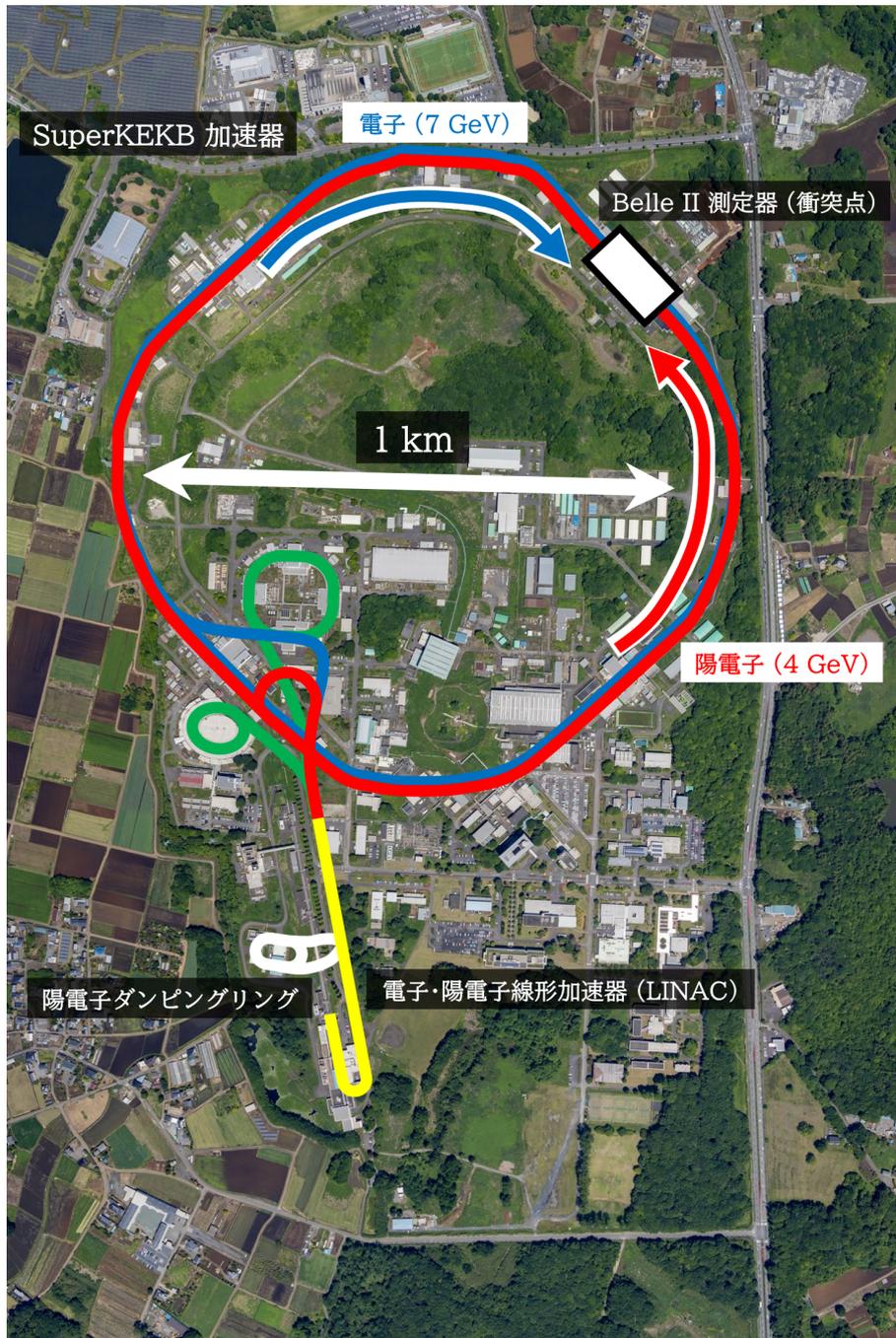


図 2.1.1 KEK つくばキャンパスと SuperKEKB の配置 (2023 年 5 月撮影)[14].

643 2.1.1 で詳述するように地下 11 m のトンネル内に設置されている。また重心系エネルギーは 10.58 GeV
 644 である。この重心系エネルギーは $\Upsilon(4S)$ 共鳴状態のピークと合わせてあり、 $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ より大量の B
 645 中間子を生成することができる。また SuperKEKB は主に以下のような構成要素から成り立っている。図
 646 2.1.2 に SuperKEKB 全体の様子の模式図を示す。以下では SuperKEKB の主要構成要素を紹介する [15]。

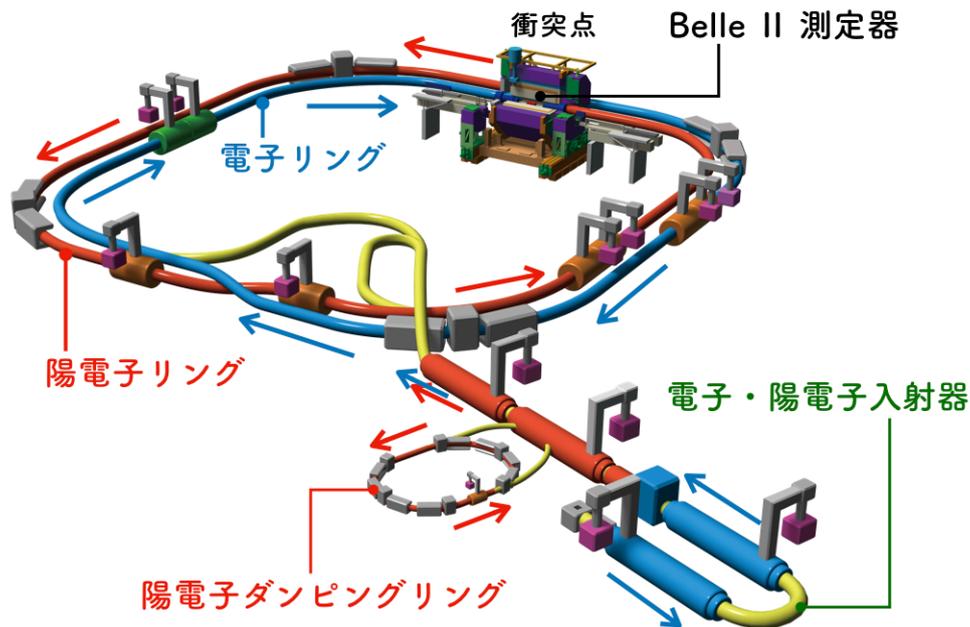


図 2.1.2 SuperKEKB 加速器全体の模式図 (Credit : KEK)[25].

647 電子・陽電子入射器 (Liner Accelerator : LINAC)

648 後述するメインリングに電子と陽電子を提供する。全長約 700 m あり、60 の加速ユニットとビームスイ
 649 チャードから成る。SuperKEKB では 2 つの電子源が導入されている。1 つは電子リング用の光陰極 RF 電
 650 子銃 (フォトカソード) で、ここから取り出された電子は入射器で 7 GeV まで加速管で加速される。もう 1
 651 つは陽電子リング用の熱電子銃で、大電荷電子ビームを生成する目的で使用されている。電子銃から取り出
 652 し、3 GeV まで加速した電子を陽電子ターゲットに当てて陽電子を生成し、1.1 GeV まで加速させる。そ
 653 して一旦ダンピングリングに入射しエミッタンスを小さくする。その後再度入射器に戻し 4 GeV まで加速さ
 せる。表は SuperKEKB 用入射ビームとして要求される仕様である。

	陽電子	電子
エネルギー [GeV]	4.0	7.0
規格化エミッタンス [μm]	100/15	40/20
エネルギー広がり [%]	0.16	0.07
バンチ電荷 [nC]	4	4
1 パルス当たりのバンチ数	2	2
最大ビーム反復周波数 [Hz]	50	50

表 2.1 SuperKEKB 用入射ビームの仕様.

655 **陽電子ダンピングリング (Positron Damping Ring : DR)**

656 上述した LINAC 中流あたりに位置するリングのことで、放射光の放出とビーム軸方向への加速により、陽
657 電子ビームのエミッタンスを小さくする。周囲は約 135.5 m と後述するメインリングよりも小さい。DR と
658 LINAC は入射路及び出射路と呼ばれるビームトランスポートラインで結ばれている。DR で低エミッタンス
659 化されたビームは出射キッカーで出射路へ蹴りだされる。出射ビームは LINAC へ戻され、4 GeV まで加速
660 される。DR に入射されるビームのエミッタンスはおよそ 1400 nm だが、これを 40 ms 以内に 50 nm まで
減衰させる。表に DR の主要設計パラメータを示す。

エネルギー [GeV]	1.1
バンチ数	4
周長 [m]	135.5
最大蓄積電流 [A]	0.07
水平/垂直方向のエミッタンス [nm]	42.6/2/13
エネルギー広がり [%]	0.055
バンチ長 [mm]	6.56
RF 周波数 [MHz]	508.876

表 2.2 SuperKEKB 用入射ビームの仕様.

661

662 **メインリング (Main Ring : MR)**

663 周長が 3016.315 m のメインリングは、約 200 m の直線部と約 550 m の曲線状のアーチ部が 4 つずつ交
664 互に組み合わせられて構成されている。地下約 11 m に在る加速器トンネル内に 7 GeV 電子リング (HER)
665 と 4 GeV 陽電子リング (LER) の 2 つが並んで設置されており、これら 2 つのリングは Belle II 検出器
666 が設置された筑波実験室の衝突点で交差している。又リングの真空パイプ内を進むビームは高周波加速空洞
667 (RF cavity) によって作られたバンチと呼ばれる、電子又は陽電子の塊を形成しており、この大きさを衝突
668 点で幅 20 μm 、高さ 100 nm 程にまで絞り込むというナノビーム技術という最先端技術が導入されている。
669 SuperKEKB の性能について、前身の KEKB との比較を通じて述べる。表 2.1.1 [18, 19, 20] は主要な加速
670 器パラメータにおける SuperKEKB と KEKB の比較である。但し、SuperKEKB については設計値である
671 ことに注意されたい。

672 **2.1.2 特徴**

673 **2.1.3 ナノビーム方式**

674 前身の KEKB 加速器ではこのルミノシティ L が $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで到達した。そして KEKB 加速
675 器をアップグレードしたことで SuperKEKB では KEKB 到達値の 30 倍が最終目標とされている。ここでナ
676 ノビーム方式とはビーム同士を有限の角度で交差するようにして衝突させることで衝突面積を小さくする技術
677 であり、P. ライモンディ (Pantaleo Raimondi) によってイタリアで建設が計画されていたスーパー B-ファク
678 トリーのために初めて提唱された。

		KEKB		SuperKEKB	
		LER	HER	LER	HER
ビームエネルギー	$E[\text{GeV}]$	3.5	8.0	4.0	7.0
周長	$l[\text{m}]$	3016.262		3016.315	
ビーム電流	$I[\text{A}]$	1.64	1.19	3.6	2.6
水平/垂直 方向のエミッタンス	$\varepsilon_x[\text{nm}] / \varepsilon_y[\text{pm}]$	18/150	24/150	3.2/8.64	4.6/12.9
衝突点での水平/垂直 方向の β 関数	$\beta_x^*[\text{mm}] / \beta_y^*[\text{mm}]$	1200/5.9	1200/5.9	32/0.27	25/0.30
水平/垂直 方向のビームサイズ	$\sigma_x^*[\mu\text{m}] / \sigma_y^*[\text{nm}]$	147/940	170/940	10.1/48	10.7/62
RF 周波数	$f_{RF}[\text{MHz}]$	508.9		508.9	
交差角	$2\theta_x[\text{mrad}]$	22		83	
リング 1 周あたりのバンチ数		1584		2500	
1 バンチ当たり陽電子/電子数	$n_b[\times 10^{10}]$	6.47	4.72	9.04	6.53
バンチ長	$\sigma_z^*[\text{mm}]$	~7	~7	6.0	5.0
瞬間ルミノシティ	$L[\times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$	2.108		60	
積分ルミノシティ	$\int L[\text{ab}]$	1.041		50	

表 2.3 SuperKEKB 及び KEBB の主な設計パラメータ [18, 19, 20].

ルミノシティの表式 (1.20) に対して、ナノビーム方式では以下のように記述される。

$$\begin{aligned}
L &= \frac{N_{e^+} N_{e^-} n_b f_0}{4\pi \sigma_{x,eff}^* \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}} \\
&\simeq \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(\frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

679 ここで、

680 N_{e^+} 、 N_{e^-} ：それぞれバンチ 1 つあたりに含まれる陽電子数及び電子数、

681 n_b ：1 周当たりのバンチ数 ($\frac{\text{ビームの速度 (概ね光速 } c)}{\text{リング周長}} \sim c/3016.315 \sim 99.4 \text{ kHz}$)、

682 f_0 ：1 秒当たりの周回周波数、

683 γ ：ローレンツ因子、

684 r_e ：古典電子半径、

685 $\beta_{y\pm}^*$ ：衝突点における垂直方向のベータ関数、

686 I ：ビーム電流、

687 ξ_y ：垂直方向のビーム・ビームパラメータ

688 であり、添え字の \pm はそれぞれ陽電子、電子ビームのパラメータであることを表す。

689 ルミノシティを大きくする手段の 1 つとして衝突点でビームを細く絞る、つまり式 (2.1) にて $\beta_{y\pm}^*$ を小さくすることが挙げられる。しかし β^* をバンチ長よりも小さく絞ると、ビームサイズの中心を小さく出来るが
690
691 2 つの衝突しているバンチの両端は膨らんでしまう (図 2.1.4 左)。

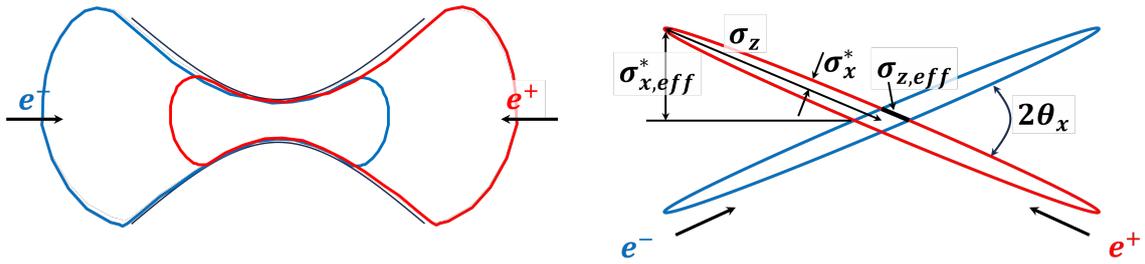


図 2.1.3 従来の衝突方式 (左) とナノビーム衝突方式 (右) の模式図.

692 この効果はバンチの中心は細く、両端が膨らんだ形状が砂時計を横にしたような状態に似ていることから
 693 「砂時計効果 (hourglass effect)」と呼ばれている。従来の正面衝突させる方式では、この効果により生じる衝
 694 突バンチ間の不要な相互作用はルミノシティの低下を招く原因となる。

そこでこの砂時計効果を避けるため、SuperKEKB では大きな交差角と極小ビームサイズが採用された。図
 2.1.4 右に示すようにバンチの幅が狭いビームが大きな交差角を持って衝突する。従ってナノビーム方式の場
 合、常に垂直ビームサイズが小さいところ (集束されたところ) で衝突する。このバンチが重なり合う領域
 の進行方向の長さを有効的バンチ長と呼ぶ。有効的バンチ長 ($\sigma_{z,eff}$) 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 (θ_x) を用いて

$$\sigma_{z,eff} = \frac{\sigma_x^*}{\theta_x} \quad (2.2)$$

695 と表すことが出来、実際のバンチ長 (σ_z) に依存しない。それゆえナノビーム方式では、実際のバンチ長
 696 に配慮することなくビームを絞ることが可能である。以上の機構により、ビーム軸進行方向の重なり領域が
 697 従来の正面衝突方式よりも短くなる。これが、ナノビーム方式の斬新かつ画期的な特徴である。図 2.1.4 に
 698 KEKB と SuperKEKB との衝突ビームの相違を示す。

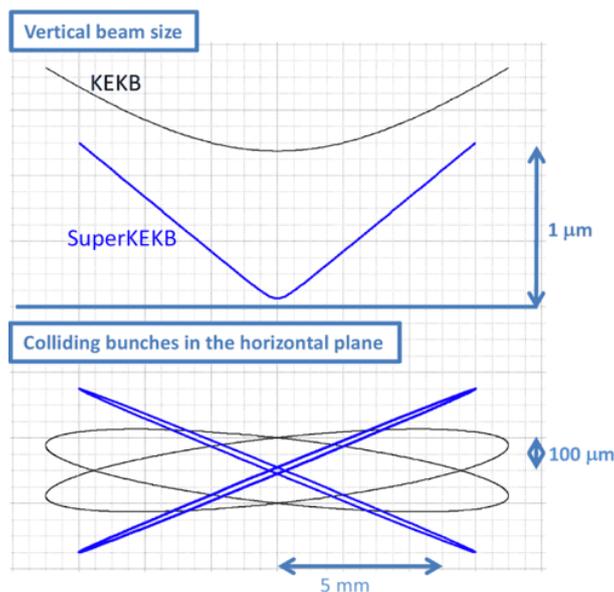


図 2.1.4 KEKB と SuperKEKB との衝突ビームの相違 [18].

699 上の図は垂直方向のビームサイズを表している。表 2.1.1 にも示したように、KEKB では 6 mm 程度だっ

700 た β_y^* を SuperKEKB では約 0.3 mm にまで絞り込んだことで衝突点ビームサイズは非常に小さくなって
 701 いる。また下の図は水平面におけるバンチの衝突している様子を表している。このバンチの交差角 $2\theta_x$ は
 702 KEKB では 0.22 mrad だったが SuperKEKB では 0.83 mrad へと大きくしている。これにより、 β_y^* を小
 703 さくすることが可能になっている。衝突点における垂直方向ビームサイズは約 50 nm から 60 nm 程度である
 704 が、これを実現しているのが次節で紹介する最終集束用超伝導電磁石システムである。

705 2.1.4 最終集束用超伝導電磁石システム

706 最終集束用超伝導電磁石システム (Quadrupole magnet for Collision in Superconductivity, QCS) [23, 24]
 707 とは高ルミノシティ実現のために衝突点でビームを絞ることを目的として、衝突領域 (IR) に設置された 8 台
 708 のビーム最終集束用超伝導 4 重極電磁石、4 台の Belle II ソレノイド磁場キャンセル用超伝導ソレノイド電
 709 磁石、及び 43 台のビーム運転調整用超伝導電磁石、合計 55 台の電磁石から構成されるシステムである。図
 710 2.1.5 は 2 台のクライオスタット (低温恒温装置) 内に収納されている電磁石の構成を示している。

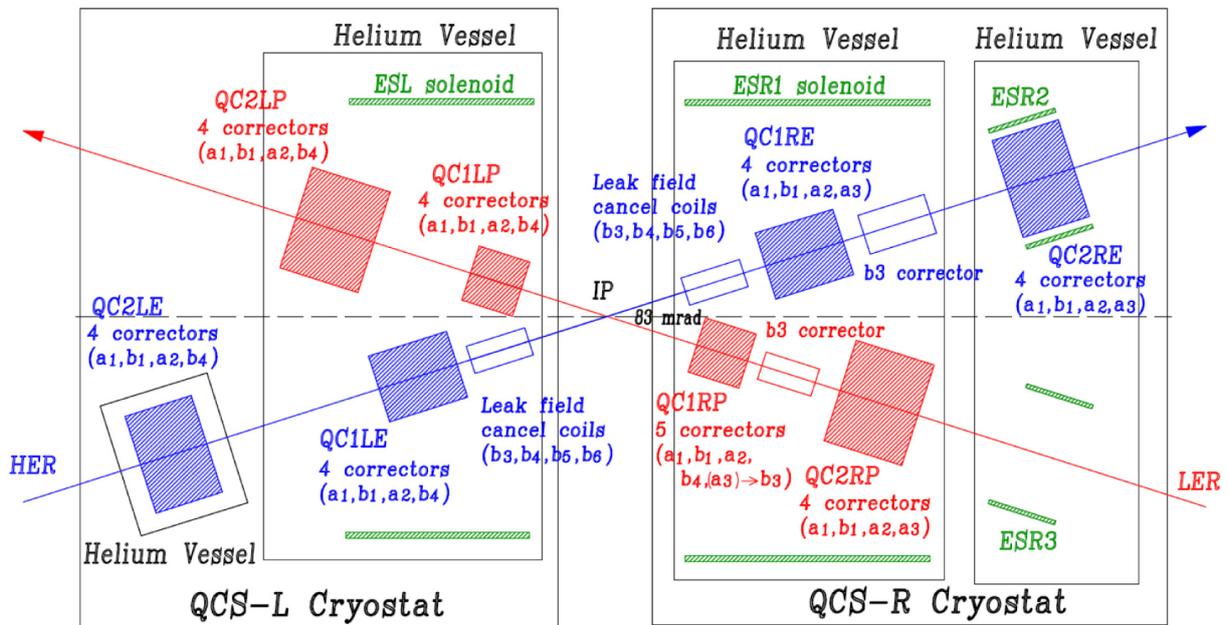


図 2.1.5 2 台のクライオスタット内にあるビーム最終集束用超伝導電磁石の配置を表す模式図 [23].

711 2.2 Belle II 実験

712 Belle II (ベル ツー) 実験は 1.3 節で述べたルミノシティフロンティアに属するもので、SuperKEKB 加速
 713 器のビーム衝突で生成される B 中間子の崩壊過程の Belle II 測定器による精密測定を行っている。

714 Belle II 実験の前身であり 1999 年から 2010 年までの期間に行われた Belle 実験は同時期にアメリカで行
 715 われていた SLAC の BABAR 実験と共に CP 対称性の大きな破れを発見し、小林・益川理論の予言を確か
 716 めた。そして 2008 年、実験による実証を得て小林誠と益川敏英の両博士はノーベル物理学賞を受賞した。

717 然し宇宙から消えずに残った物質の量を説明するには小林・益川理論の CP 対称性の破れでは余りにも小

718 さすぎることも分かってきている。また、電弱ペンギン過程と呼ばれる $B \rightarrow K \nu \nu$ 崩壊と類似のプロセス
 719 である $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊は LHCb 実験において標準模型とのずれが報告されているように Belle 実験の一部
 720 の結果からも標準理論が完全ではないことを示すような兆候が得られている。これらのことをさらに詳細に調
 721 べるには、Belle 実験を大幅に上回る大量のデータが必要となっており、その要求に応えるために 2010 年に
 722 終了した Belle 実験を Belle II 実験へアップグレードして 2018 年よりその実験が開始された。同年 4 月 26
 723 日にはアップグレードの一環として 2010 年夏から建設に取り掛かれていた SuperKEKB 加速器による電
 724 子陽電子ビームの衝突事象を Belle II 測定器で初観測した。2019 年 3 月 11 日には運転を再開し、全ての検
 725 出器による本格的な物理実験、Phase 3 の運転が開始された。

726 Belle II 実験で探索しようとしているのは、宇宙誕生直後の超高エネルギー状態で働いていたと考えられる
 727 標準理論を超えた CP 対称性の破れを伴う未知の物理法則である。この未知の法則では新しい物理現象が予
 728 言されており、アップグレードにより可能となる筈である Belle 実験の 50 倍のデータを使用した非常に精密
 729 な測定を Belle II 実験で試みることでペンギン崩壊を始めとした新物理を示す現象を探索する。

730 そのような現象を探索するのに用いられているのが Belle II 測定器である。図 2.2.1 は Belle II 測定器の
 731 概略図である。

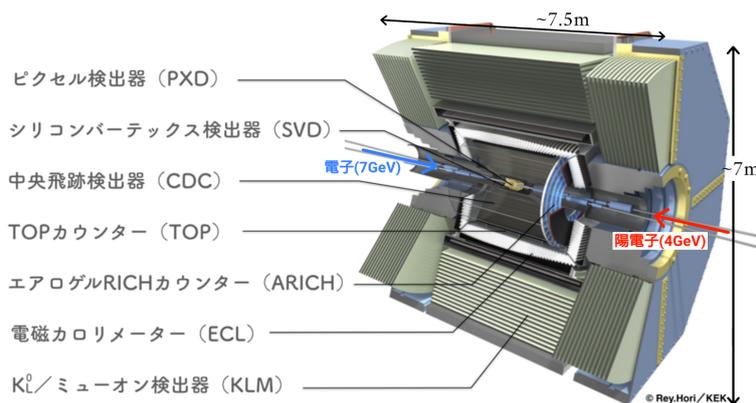


図 2.2.1 Belle II 測定器の全体図 (Credit : Rey.Hori / KEK)[26].

732 Belle II 測定器とはビーム衝突点による素粒子反応を測定する機械のことで、SuperKEKB の衝突点には
 733 Belle II 測定器 (Belle II detector) が設置されている。電子と陽電子を衝突させて生成される B 中間子対 (B
 734 中間子・反 B 中間子) は直ちにより軽い粒子へと崩壊していく。

735 その崩壊パターンは非常に多く、かつ崩壊する方向も様々である。ただし Belle II 実験の SuperKEKB で
 736 は静止系において電子ビームが 7 GeV、陽電子ビームが 4 GeV とエネルギーが等しくないため、衝突後の粒
 737 子群はエネルギーの高い電子の進行方向へ打ち出される。Belle II 測定器はあらゆる方向へ崩壊しても取り
 738 逃すことがないように、ほぼ全方位を覆うように設計されている。また B 中間子が崩壊した位置の観測や、崩
 739 壊後の粒子が通った飛跡と運動量の測定など、それぞれ異なった役割によって最適な動作原理の装置を組み合
 740 わせており、それらの装置は合計 7 種類である。Belle II 測定器が最終的に収集する総積分ルミノシティは
 741 50 /ab で、この値を達成する際には、例えば 7 種の測定器のうちの 1 つ、ARICH では 1000 Gy のガンマ
 742 線、に 1 MeV 換算で 10^{12}cm^{-2} の中性子を浴びると予想されている [27, 28]。Belle II では APD の構造の
 743 改良などにより要求される耐放射線性を備えた ARICH 用光検出器、HAPD が開発されている [28]。またダ
 744 イヤモンドを使用した半導体検出器や CLAWS といったプラスチックシンチレータを SiPM で読み出すセン

745 サーが Belle II 検出器の放射線センサーとして QCS 付近に設置されている [29]。

746 Belle II 実験は 2018 年 11 月の時点で、世界 26 の国と地域の 113 の大学・研究機関に所属する約 900 人
747 の研究者が参加する国際共同実験であり、そのうち実験ホスト国である日本からは 150 人ほどの研究者が参
748 加している。こうした世界各国の研究者達が多種多様な会議を開き、議論を重ねながら建設やデータ収集、物
749 理解析を国際共同で実施することで Belle II 実験での物理研究を日々、進めている。

750 2.3 コリメータ

751 コリメータとは正常ではない軌道のビームや検出器にとってバックグラウンドとなる粒子を削る役割を担う
752 装置である [17]。全体は主に銅で、ヘッドの部分はタングステンで出来ている [30]。加速器運転中に蓄積ビ
753 ムのビームロスにより生じた放射線やその 2 次粒子は Belle II 検出器でバックグラウンド事象として観測さ
754 れ、物理データの質を下げる要因となる。そこでコリメータでビームの設計軌道から逸脱したビーム粒子や
755 ビームロスに伴うバックグラウンド粒子を Belle II 検出器よりも上流側で削り落とし、それらが検出器へ到
756 達することを防いでいる。こういった目的からコリメータはその開口幅がビームライン中の他の機器よりも小
757 さく設定されている。そのため主なビームロス点はコリメータである。図 2.3.1 にコリメータの構造を示す。
図 2.3.1 にコリメータの模式図、図 2.3.2 にメインリングにおけるコリメータの配置図を示す。

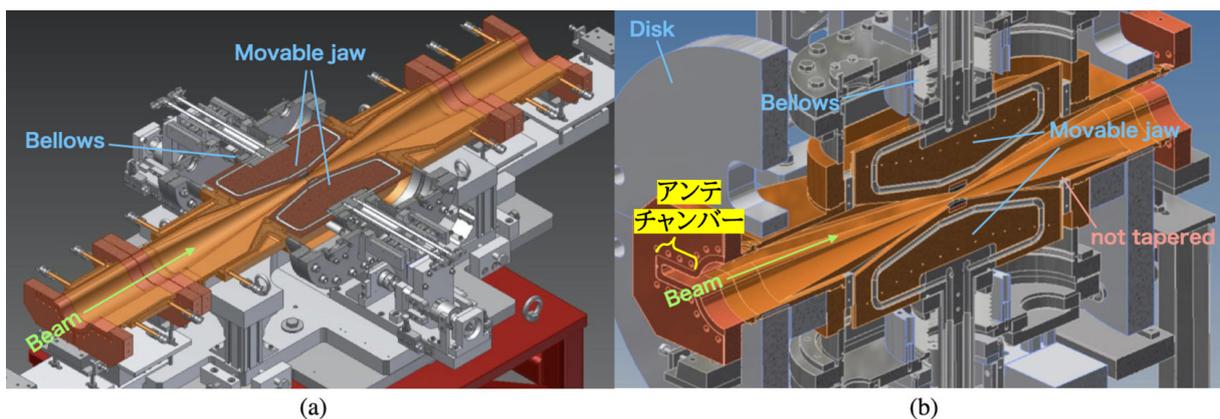


図 2.3.1 水平コリメータ (a) 垂直コリメータ (b) の構造を表した模式図 [30]。

758 コリメータの名称 [30] は「D 数字 H 又は V 数字」という付け方だが、まず「D 数字」は図 2.4.2 で示
759 した電源棟の在る区域を表す。また「H 又は V 数字」は図 2.3.1 (a) の水平コリメータなら Horizontal の
760 H、図 2.3.1 (b) の垂直コリメータなら Vertical の V が付けられ、その後の「数字」は電子や陽電子ビ
761 ムを入射する地点をビームパイプの最上流として、上流側から順に付けられた番号である。また MR に設置さ
762 れているコリメータには KEKB タイプと SuperKEKB タイプの 2 種類がある。前者は 1998 年に製造され、
763 先代の KEKB 加速器から再利用されているもので片側にだけ可動ジョーのコリメータヘッドがある。図中
764 KEKB タイプのラベルにおいて括弧書きの数字、「(50 × 104)」は高さ 50 mm、全幅 104 mm の意である。
765 後者は SuperKEKB で新設されたものであり両側にコリメータヘッドを有し、それぞれの可動ジョーが独
766 立に操作できる。コリメータの端の断面は、f90×220、f80×220、f90 の 3 種類がある。f は単位を mm に
767 取ったビームパイプの直径を表す。後ろの数字、「220」について、図 2.3.1 (b) に示したアンテナチャンバーと
768 呼ばれる扁平状の空房の内側側壁からビームパイプ中心までが 110 mm で、端から端までの距離が 220 mm
769

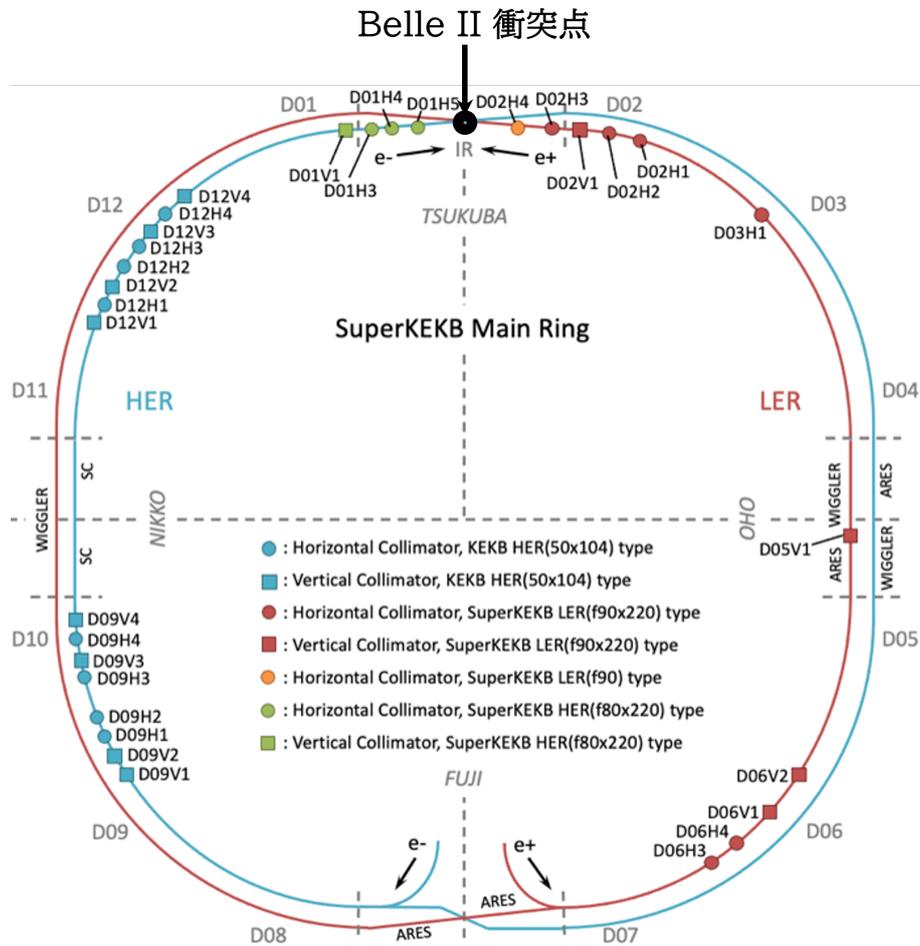


図 2.3.2 HER (青) 及び LER (赤) とリングの各所に設置されたコリメータの配置図 [31]. 中央下寄りのコリメータのラベルについて、KEKB となっているものは先代の KEKB 加速器からの再利用のもの、SuperKEKB となっているものは SuperKEKB から新たに設置されたものを表す。

770 の意味である。また可動コリメータを KEKB ではアーク部外側にのみだった所を SuperKEKB では外側に
 771 も水平コリメータを設置して軌道から外れた粒子を出来る限り落とすようになっている [21]。

772 2.4 ビームアポートシステム

773 ビーム異常やハードウェアトラブルが生じ、これ以上のビーム運転が困難と判断された際に MR の蓄積
 774 ビームを破棄する仕組みが「ビームアポートシステム」である。このシステムの模式図を 2.4.1 に示す。信
 775 号の流れについて簡単に述べると先ず MR 各所にある機器から出た異常の検知信号図 2.4.2 に示された電源
 776 棟 (D01-D12) へいったん集約される。その後、全信号は中央制御応 (Central Control Building, CCB) へ集
 777 約、その信号を基にしてアポートキッカーを作動、ビームをダンプする。以下にアポートシステムを構成する
 778 各要素について概説する。

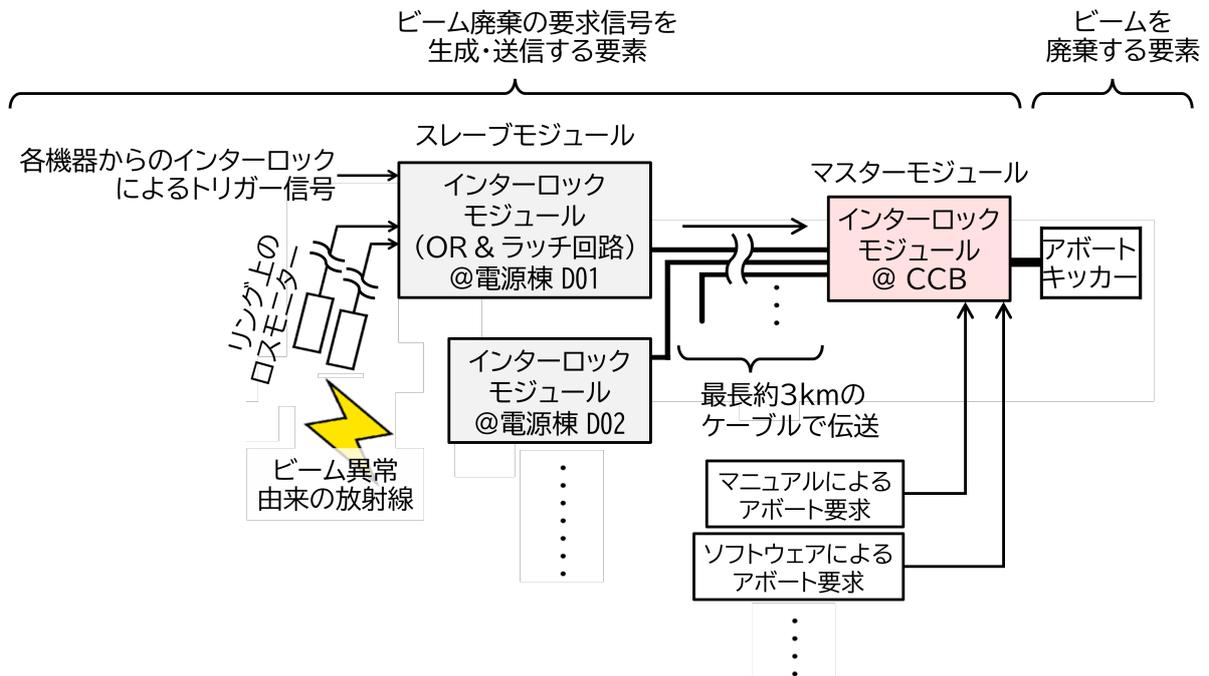


図 2.4.1 LS1 前におけるビームアボートシステムの模式図. ハードウェアのインターロックによるトリガー信号や LM の観測信号が最寄りの各電源棟に一時集約されアボートリクエスト信号が発報される. CCB で受信した信号をアボートギャップと同期してアボートトリガー信号を生成し、キッカーに送信、ビームアボートが実行される.

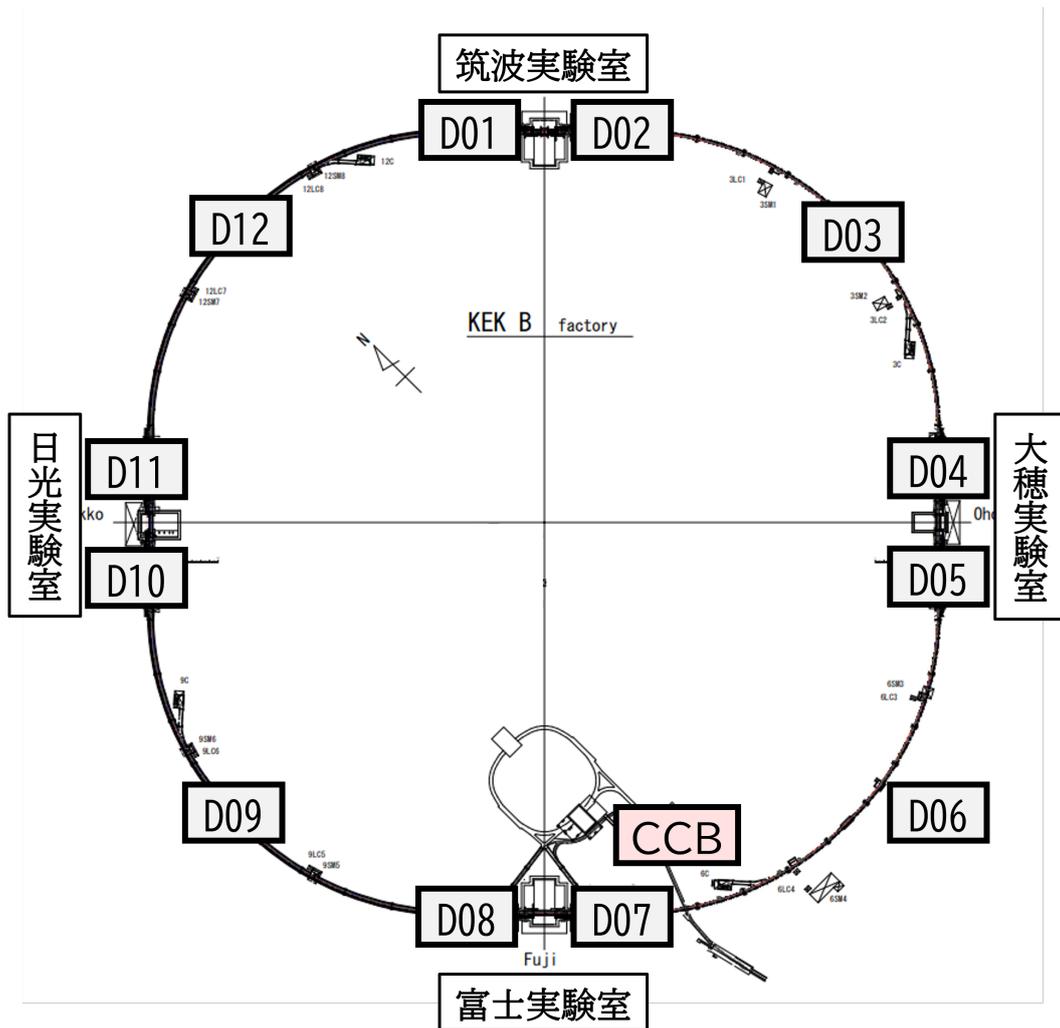


図 2.4.2 リングに設置されたロスモニター等からの信号を一時集約する各電源棟 (D はデンゲン棟の意) とそれらからのアポートリクエスト信号が集約される中央制御棟 (Central Control Building、CCB) の位置関係。

779 先ずビームをアポートする要素についてだが、これはアポートキッカー電磁石 [32, 33, 34] とビームダンプ
 780 から成り、図 2.4.3 のように複数の磁石で構成されている。図 2.4.3 はアポートビームラインの構成図、図
 781 2.4.4 はそのうち水平キッカー電磁石とビームダンプの写真である。導入場所は LER の場合は図 2.4.2 の配
 782 置図において下側の D07 電源棟辺り、HER は D08 電源棟辺りの直線部である。

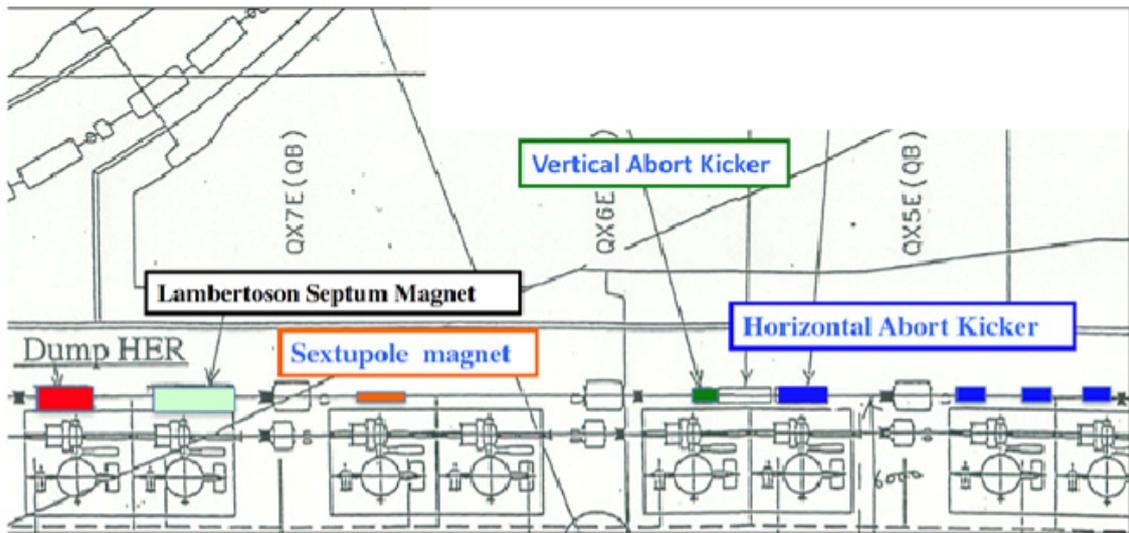


図 2.4.3 SuperKEKB のアポートキッカーの構成 [34]. 図は HER のもので、水平キッカー電磁石 4 つ、垂直キッカー電磁石 1 つ、ランバートソン DC セプタム電磁石 1 つ、6 極電磁石 2 つから成り立っているのが確認できる。

783 アポートリクエストが発報されると蓄積ビームは水平キッカー電磁石により、ビームダンプへと続くアポー
 784 トビームラインへ蹴り出される。取り出されたビームはランバートソン DC セプタム電磁石でさらに約 100
 785 mrad 偏向される。偏向されたビームはリングを 1 周する時間に相当する $10\ \mu\text{s}$ の間に全てビームダンプ (図
 786 2.4.4 右) へ送られる。ビームダンプは鉄、鉛、コンクリートから成る [35]。また周回ビームは水平方向に太
 787 く、鉛直方向に細いため、バンチトレインの前方と後方でビームダンプおける照射点をずらすことで、熱上昇
 788 を抑える [35]。



図 2.4.4 水平キッカー電磁石 (左) とビームダンプ (右)[34].

789 垂直キッカー電磁石は偏向したビームサイズを広げて、局所的な温度上昇と熱膨張からビームの取りだし窓
 790 を保護する目的で導入されている。また表 2.1.1 に示すように、SuperKEKB のビームサイズは KEKB の
 791 それよりも小さいため水平方向にもビームのサイズを広げる必要がある。この目的から LER ではパルス 4 極
 792 電磁石が、HER では 6 極電磁石が設置されている。

793 アポートキッカー磁場の立ち上げ中にビームを通過させると、ビームの蹴り角が設計値より小さくなり、正

794 しくビームダンプへ輸送できずビームロスとなってしまう。そのため SuperKEKB のバンチ配列には 200ms
795 分のバンチのない区間（アポートギャップ）が2つ設けられており、アポートキッカー磁場の立ち上げは、そ
796 のアポートギャップのタイミングで行われる。

797 次に後者のアポートリクエスト信号の集約・送信要素 [36] について述べる。アポートリクエストの光信号を
798 集約するのが「アポートトリガーモジュール [38]」である。

799 このアポートトリガーモジュールを数珠つなぎにすることで、アポートリクエスト信号を集約するアポート
800 トリガーモジュールは光ファン-インモジュールであり、8チャンネルの光レシーバと1チャンネルの光トラ
801 ンスミッタが装備されている [39]。各種アポートリクエスト信号は、光信号に変換してから入力される。図
802 2.4.5（左）はアポートトリガーモジュールの外観と仕様である。光レシーバは AVAGO 製 HFBR-24E2Z
803 が用いられている。図 2.4.5（右）はその波長感度曲線であり、ピークである 820 nm 波長における受信感度
804 は $2\mu\text{W}$ である。

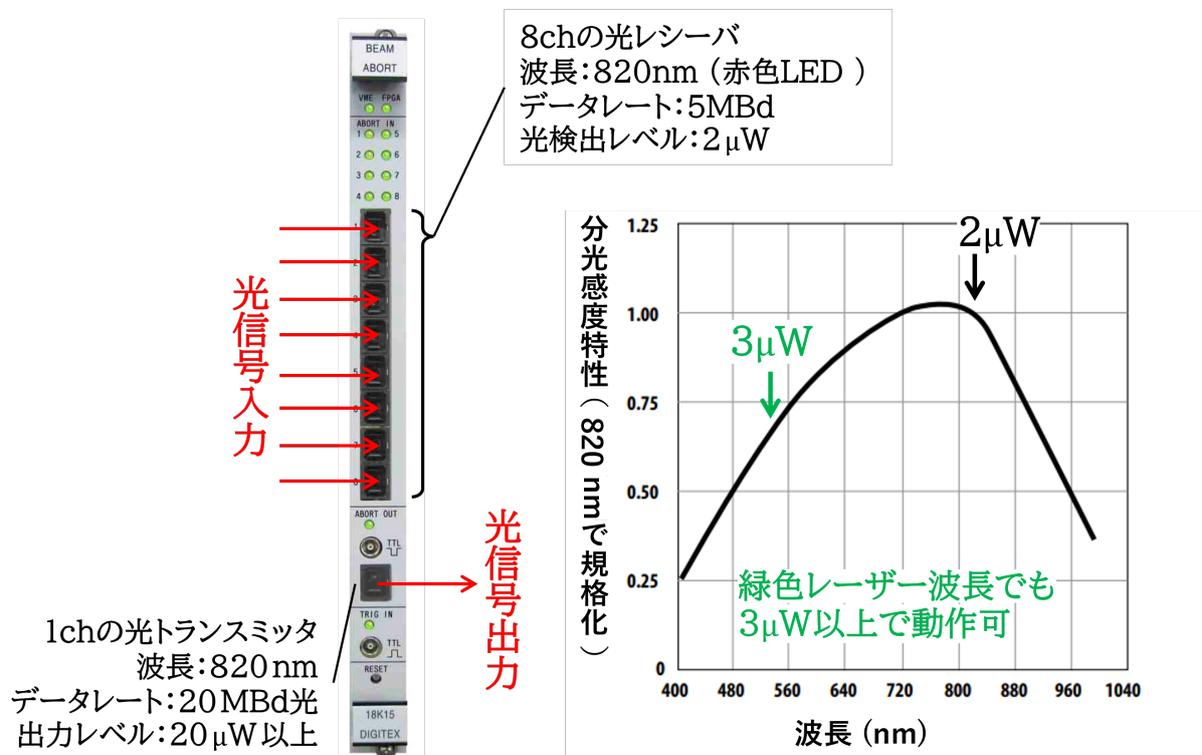


図 2.4.5 アポートトリガーモジュールの仕様 (左) と AVAGO 製、アポートトリガーモジュールの光レシーバとして用いている HFBR-24xxZ シリーズのスペクトル応答曲線 [39] (右)。応答曲線は 820 nm の波長に正規化してプロットされている [39]。

805 光トランスミッタには同じく HFBR-14E4Z (AVAGO 製) が用いられており、波長が 820 nm で光量が
806 $20\mu\text{W}$ と受信感度の 10 倍で赤外光を送信するように設定されている。トランスミッタ、レシーバ共に SC コ
807 ネクタで接続できる。

808 そしてアポートギャップと同期したトリガー信号が生成され、LER の場合は D07 のアポートキッカー電
809 源、HER の場合は D08 に送られ、アポートが実行される。実際に異常が起こってから全ビームがアポート
810 されるまでの経過時刻を図 2.4.6 にまとめる。

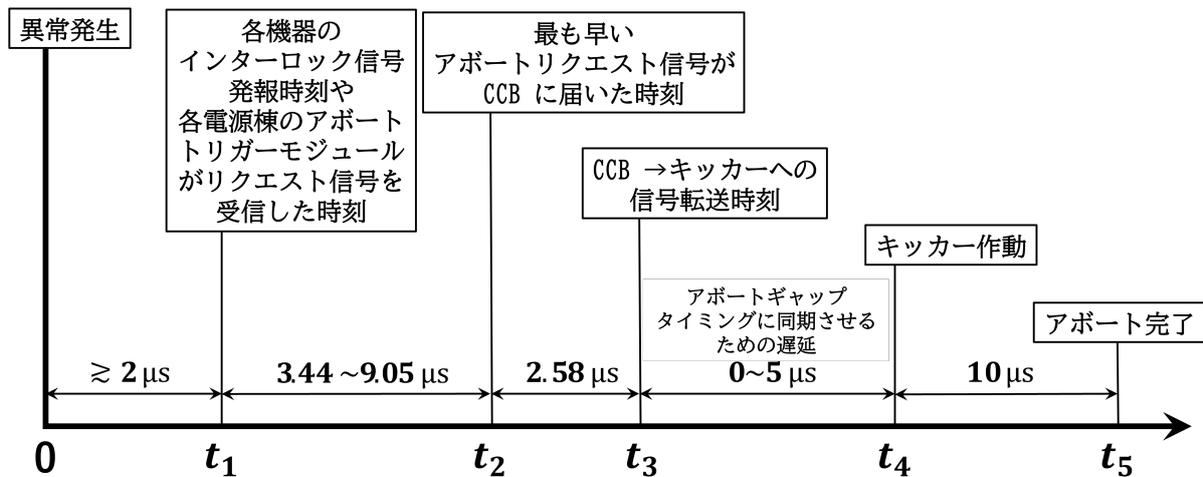


図 2.4.6 異常発生からアボートが完了するまでの各諸事項とその所要時間. [36] を基に作成.

811 t_1 から t_4 の各時刻は異常が起こった時刻をゼロとして、以下のとおりである。

- 812 ● t_1 : 各センサーが反応してインターロック信号を出した時刻、各電源棟のアボートトリガーモジュール
- 813 がリクエスト信号を受信した時刻
- 814 ● t_2 : CCB で信号を受けとった時刻
- 815 ● t_3 : CCB からキッカーへの信号転送時刻
- 816 ● t_4 : アボートキッカーが作動 (ファイヤ) した時刻
- 817 ● t_5 : ビームが全て捨てられた時刻

818 t_1 は各機器の反応速度、機器から電源棟までの距離、機器からの信号を解析してトリガー信号を作る回路内で
819 の時間等に依存する。

820 $t_2 - t_1$ は主に電源棟から CCB までの光ケーブルの長さに依存する。例えば CCB から遠い BelleII 検出
821 器付近の D02 からは $9.05 \mu\text{s}$ 、CCB に近い D06 からは $3.44 \mu\text{s}$ と実測されている。

822 t_2 から t_4 の間で CCB に到着したアボートリクエスト信号とビームの周回信号を同期させ、アボートギャッ
823 プの位置でアボートキッカーを立ち上がらせる信号を作る。 $t_4 - t_3$ の所要時間は $0 \mu\text{s}$ から $5 \mu\text{s}$ である。内
824 訳は以下である。

- 825 ● アボートギャップが 1 周 ($=10 \mu\text{s}$) に 2 ヶ所設けられているので、アボートリクエスト信号と同期を
826 取るのに最長で $5 \mu\text{s}$
- 827 ● CCB からキッカーまでの伝送時間が実測で $1.38 \mu\text{s}$
- 828 ● キッカーに届いてからサイラトロン (キッカー電源のスイッチング素子 [17]) が ON になるまで $1 \mu\text{s}$
- 829 ● キッカー立ち上がり時間が 200 ns

830 $t_4 - t_3$ は 1 周分全てのビームを捨てるのに要する時間で $10 \mu\text{s}$ である。

831 以上より、異常発生からアボート完了までの全所要時間は t_1 を仮に $2 \mu\text{s}$ とした場合、およそ $18 \mu\text{s}$ から
832 $29 \mu\text{s}$ になる。ビームは $10 \mu\text{s}$ でリングを 1 周するため、異常状態のビームは、検知後 2、3 周の間、リング
833 にとどまっていることになる。

2.5 ビームロスモニター

2021 年から 2022 年にかけて、以下に述べるビームロスモニター (Loss Monitor, LM) [40] がリング全周のコリメータ付近に設置された。これは SBL 事象の発生点の同定を目的としており、既存のビームロスモニターより時間分解能が高いモニターが採用されている。

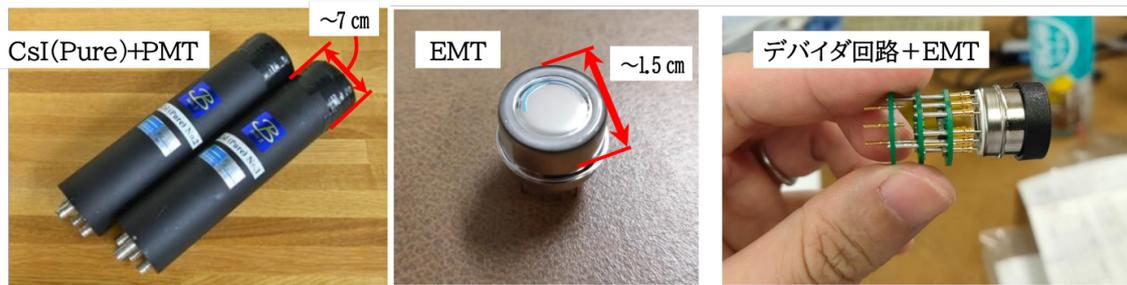


図 2.5.1 「CsI(Pure) + PMT」 (左) と「EMT」 (中央)、EMT+ 読み出し回路 (右)。

● CsI (pure) + PMT シンチレーションカウンター

図 2.5.1 左が CsI (pure) 結晶を PMT の入射窓に張り付けてセットしたものである。シンチレーションカウンターの一般的な動作原理について、図 2.5.2 を用いて説明する [57]。

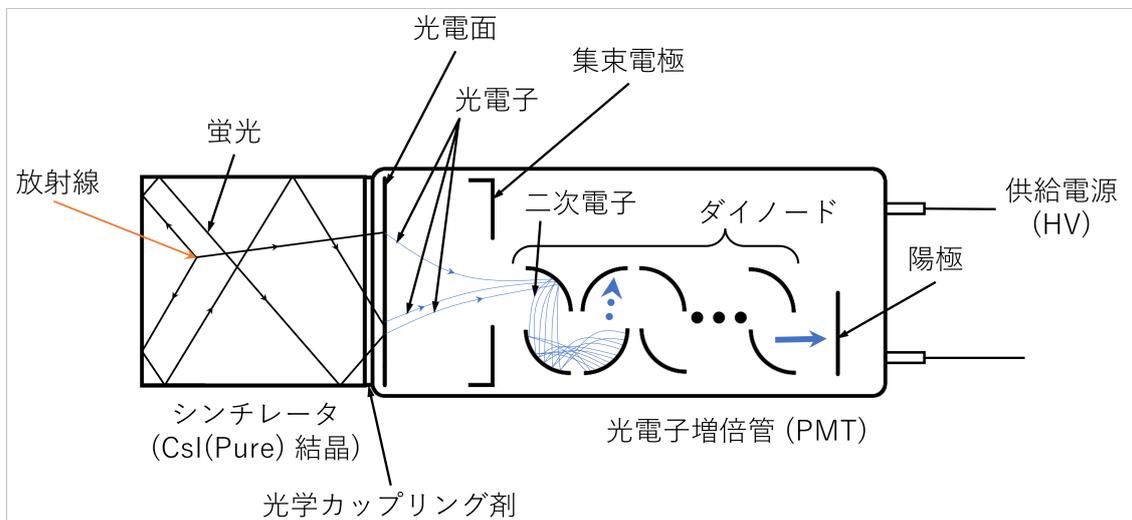


図 2.5.2 CsI(Pure) + PMT による信号検知の模式図. [57] を参考に作成.

まずビームロス由来の放射線が CsI(Pure) 結晶へ入射すると結晶中の電子が励起された後基底状態に落ちることで光子が放出される。この光子が PMT の光電面に当たると面内の電子を励起し光電効果により光電子が放出される。集束電場で加速・集束された光電子は高電圧電源 (High Voltage, HV) といった供給電源により印加された、電子増倍部として後段に設置されている複数のダイノードに当たっていく毎に二次電子の放出を繰り返す。CsI(Pure) 結晶の発光減衰時間は早い成分が 10 ns から 16 ns

846 [45] である。ビームロスが最も起こるコリメータの間隔は短くとも 10 m のオーダーのため、およそ
847 30 ns の精度が高速ロスモニターとしての要求となる [29] が、CsI(Pure) 結晶はこれを満たす。図
848 2.5.1 (左) の CsI(Pure) + PMT はバックグラウンドとなる可視光が CsI 結晶に入らぬよう、結晶を
849 PMT に黒いビニールで巻きつけて固定している。

850 ● EMT

851 電子増倍管 (Electron Multiplier Tube, EMT) [46] は小型のメタルパッケージの PMT (R9980U-110)
852 の光電面にアルミを蒸着させ光電子の発生を防いでいるもので、入射電子数を直接増幅する EMT とし
853 て使用されている。荷電粒子通過後の電子の増幅構造は一般的な PMT と同様である。こうした構造
854 から高い放射線耐性を具有し、約 200 kGy / 100 日に相当する放射線量下で信号減少が 3 % 以下であ
855 ることが確認されている [47]。この EMT は元々 T2K 実験のミュオンビームモニターとして開発さ
856 れ [46]、その信号パルス幅は約 10 ns [48] と、こちらも高速ロスモニターとしての要求を満たす。

857 これら以外にも高速センサーが導入されている。例えば衝突点には CLAWS という、プラスチックシンチ
858 レータの蛍光を SiPM (MPPC) で読み出すセンサーや、紫外線から測定可能で高放射線耐性のダイアモン
859 ドセンサー [44] が設置されている。いずれも Belle II 検出器のインターロックシステムとして機能する。
860 CLAWS とダイアモンドセンサーはアポートリクエスト信号を発報できるセンサーとして設置されている。

第3章

アボート検出器位置の改善によるアボート 高速化の検証

2022年までのビーム運転において大きなビームロスが LER で頻発していたため [43]、本研究では LER におけるビームアボート事象を対象にする。

3.1 SBL 発生箇所に関する先行研究

SBL 発生箇所を同定するために、2021年に図 3.1.1 のように D01V1 コリメータ付近の 1ヶ所と D09V3 コリメータ付近、D09H2 コリメータ付近の 2ヶ所は HER に、D02V1 コリメータ付近の 1ヶ所と D06V1 コリメータ付近、D06V2 コリメータ付近、D06H3 コリメータ付近の 3ヶ所は LER にロスモニターを設置した。

図 2.4.2 のように周長約 3km のリングに沿って離れて位置する区間ごとに設置されたロスモニターの読み出し TDC 同士の時刻同期にはホワイトラビット (White Rabbit, WR) というシステムが使用されている。WR [49, 50] とは CERN (欧州原子核研究機構) が中心となって開発した時刻同期および分散制御用のネットワークシステムで、共通のタイムスタンプを持つモジュールから構成される。イーサネットを用いた VLAN でモジュールを相互接続し、PTP によってそれらを同期させる仕組みとなっている。PTP とはネットワーク内のモジュール間で時刻同期を行うためのプロトコルである。最大 10km の光ケーブルにより接続された 1000 個以上のモジュールを 3ps から 10ps 精度で時刻同期できる。

図 3.1.2 に先行研究で構築された、LM と WR によるシステムの模式図を示す。WR のモジュールはマスターとスレーブの 2種類があり、まずマスターモジュールに GPS を用いて 10 MHz で時刻情報を入力する。この 10 MHz は GPS と同期したルビジウムクロックによるもので、その 10 MHz クロックとマスターモジュールの FPGA 125 MHz クロックを同期させている。マスターモジュール、スレーブモジュールは共に Simple PCIe FMC Carrier (SPEC) [51] と FMC-DIO [52] で構成されており、その内部時刻を光ケーブルで接続されたマスターモジュールの時刻と、ケーブルによる信号の遅延を考慮して同期させる。我々のロスモニターのシステムでは、クロック信号が 125 MHz [29] の FPGA をモジュールに用いている。従って各スレーブモジュールは 8 ns の時間決定精度の TDC (Time to Digital Converter) として機能する。

以上の実験システムから得られた当先行研究の結果を図 3.1.3 に示す。これらのロスモニターが出力した、ビームロスの検知信号の解析から、多くの SBL 事象において、加速器の上流側、具体的には図 3.1.1 中の青色の破線で囲んだ場所、D06 セクションの D06V1 コリメータや D06V2 コリメータに設置されたロスモニ

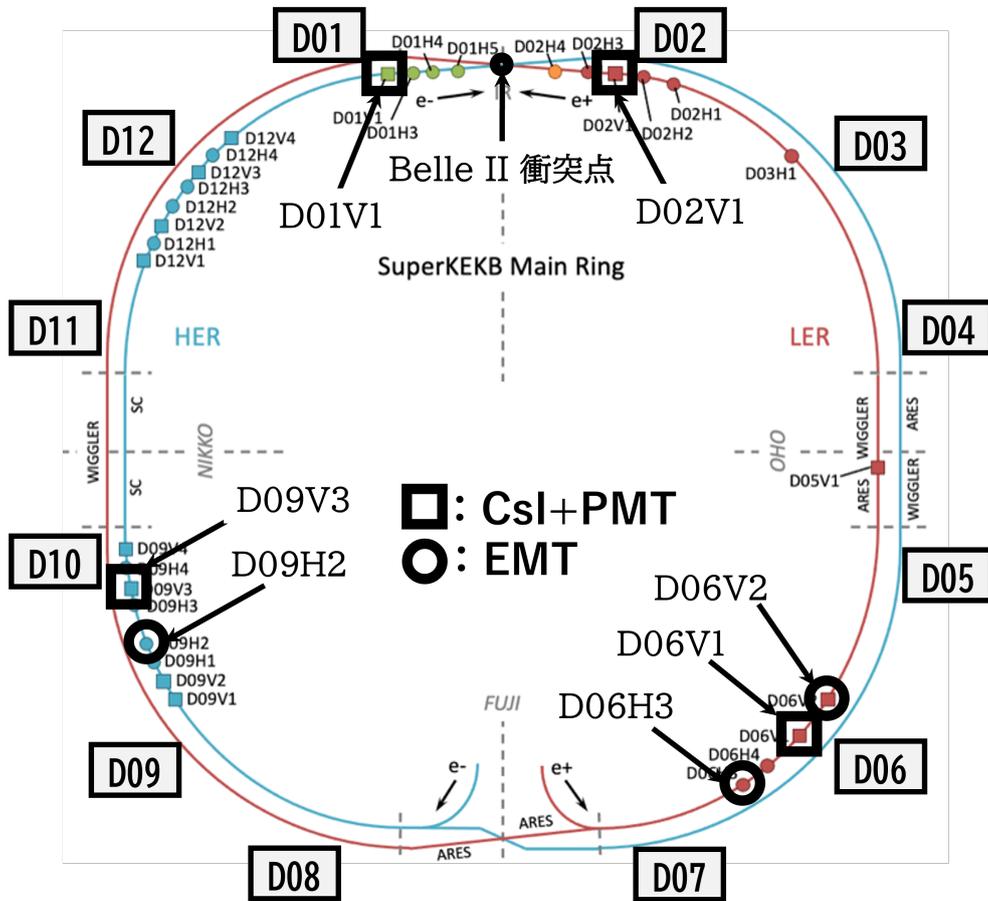


図 3.1.1 2022 年末時点で Main Ring 上に 7 ヶ所に新たに設置されたロスモニター (LM) の位置。

889 ターが最も早い時刻に検知信号を出力していることが発見された [43]。この先行研究により、多くの場合は最
 890 初のビームロスが D06V1 や D06V2 付近で発生し、Belle II 検出器に近い D02V1 コリメータのモニターで
 891 最初のビームロスが観測された場合は QCS クエンチを伴いやすいことが判明した。

892 3.2 予想されるアポートリクエスト信号伝送の短縮時間

893 SBL 事象の多くは上流側の D06 領域で最初に観測されているにも関わらず、2023 年現在のアポートシス
 894 テムでは、

895 衝突点 CLAWS がビームロスを検知→ D02 電源棟→ CCB → D07 (キッカー電源)

896 もっとも早く CCB に到達したアポートリクエスト信号は衝突点 CLAWS が発報したものだ。その
 897 信号は衝突点に設置された CLAWS センサーから出力されている。CLWAS センサーはプラスチックシンチ
 898 レータの蛍光を SiPM (MPPC) で読み出す高速センサー [29] で、その出力信号は D02 へ集約される。

899 D06 区域にもイオンチェンバー型ロスモニターが設置されているが、イオンチェンバーの応答速度が遅く、
 900 結果として遠いところにある CLAWS の信号の方が CCB に早く届いていた。

901 そこで我々は仮に D06 電源棟よりアポートリクエスト信号を発報した場合、現在よりもどれ程早くアポー

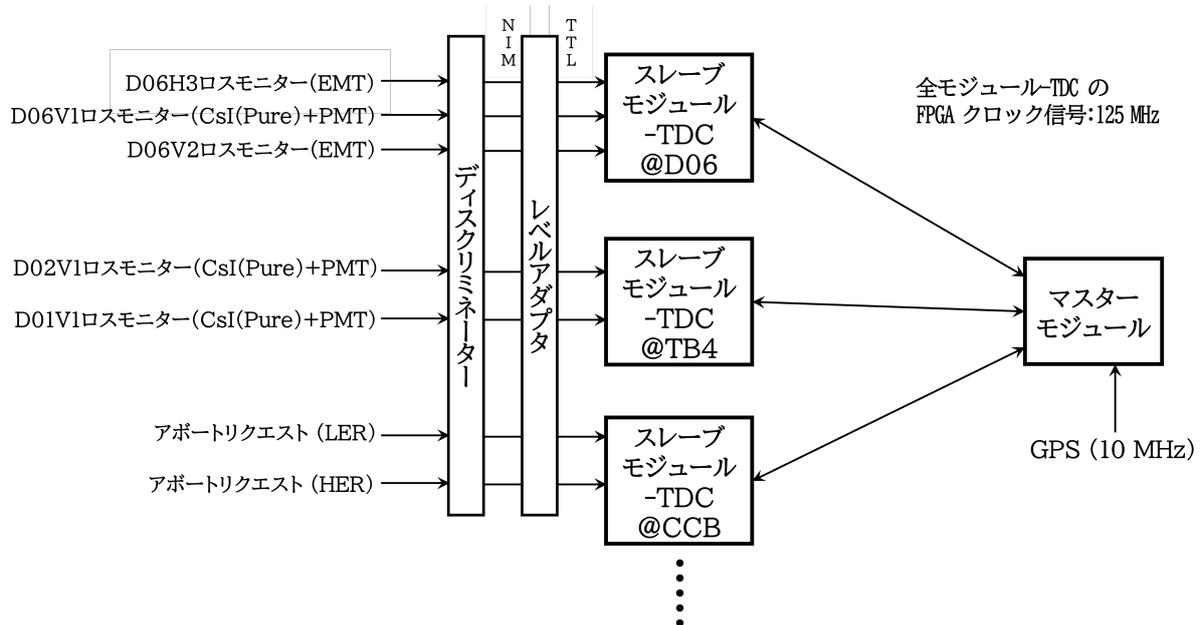


図 3.1.2 各 LM と WR による信号収集システムの模式図. TB 4 (Tsukuba B4) は衝突点付近にある筑波実験棟の地下 4 階のことで D01V1、D02V1 の LM 信号はここへ集約されている. 各 LM から各電源棟まで繋がれたケーブルの長さは D01V1、D02V1、D06V1、D06V2、D06H3 の順に 157 m、158 m、151 m、114 m、250 m である [43].

902 トリクエスト信号が CCB に到着し、アボート応答が向上するのかを検証した。
 903 D06 でアボートリクエスト信号を発報した際に実現されるアボート応答の短縮時間は、実際に信号送信に使
 904 う光ケーブルの伝搬時間を実測し、以下のように見積もった。
 905 $t_{CCB-D02}$: D02 から発報された正規のアボートリクエスト信号の CCB 到着時刻,
 906 $t_{CCB-D06}$: D06 から発報された擬似アボートリクエスト信号の CCB 到着時刻
 907 である。次に主な経路の伝送時間を図 3.2.1 に示す。記載時間は全て実測値であり、2023 年 12 月時点で
 908 敷設済みの光ケーブルによる信号伝達時間である。赤い破線矢印は D07 へ D05、D06 より光ケーブルで信
 909 号送信した際の所要時間である。また黒の 1 点破線はリングのビームパイプ内を光速に近い速度の陽電子が
 910 矢印の向きに各電源棟から衝突点まで移動するのに要する時間である。
 911 ここから信号の発報位置の違いによるアボート応答の短縮時間が概算できる。勿論、この短縮時間はビーム
 912 ロスの発生箇所により変化する。例えば D06 区域でビームロスが生じた場合にアボート応答の向上値は最も
 913 大きくなる。ここで、
 914 $t_{CCB-D02}$: D02 から発報された正規のアボートリクエスト信号の CCB 到着時刻,
 915 $t_{CCB-D06}$: D06 から発報された擬似アボートリクエスト信号の CCB 到着時刻
 916 とすると、この時の 2 つの信号の CCB 到着時刻の差、 $t_{CCB-D02} - t_{CCB-D06} \equiv \Delta t$ は、D02 電源棟から
 917 CCB への伝送時間 9.05 μs と D06 電源棟から CCB への伝送時間 3.44 μs との差に陽電子の移動時間 3.5 μs
 918 を加えて、凡そ 9.1 μs と求まる。然し、実際の測定における向上値には衝突点に在る CLAWS センサーやロ
 919 スモニターの反応ないしは立ち上がり時間、衝突点から D02 電源棟や D06V1 ロスモニター等から D06 電源
 920 棟までの伝送時間等も含まれる為、概算値から多少前後することが考えられる。

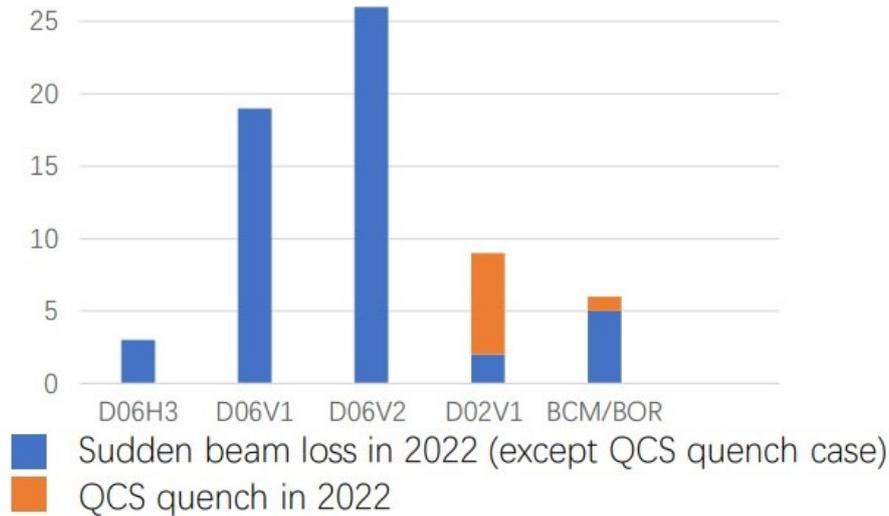


図 3.1.3 先行研究 [43] による、SBL 事象を最初に検知したロスモニターの位置で分類したヒストグラム。2022 年の 2 月 21 日から 6 月 22 日の間に発生した SBL 事象を扱っている [43]。橙色の部分は QCS クエンチの発生を伴っていたことを表している。

3.3 アボート応答向上値の調査

D06 区域における早いアボートリクエスト発報によるアボート応答速度の向上を実証するため、図 3.3.1 に示す回路により疑似アボート信号を発報した。

D06 ロスモニターの観測信号は先ず D06 電源棟に送られ、ディスクリミネータで設定閾値を超えた信号が矩形波として CCB へ送信される。LM の観測信号にはビームロスに加えて、MR ビームのメインリングへの入射振動に起因する入射バックグラウンドも含まれる。従って幅を広げた LER 入射信号で LM 信号に VETO をかけることで理想的には 2 段目のゲートジェネレーターからは LER 入射ビームに非同期な信号のみが出力される。LER 入射信号の幅だが、今回は 1 ms に設定した。そして 3 章で述べた WR-TDC はその入力が TTL 信号なのでレベルアダプタで NIM 信号を光信号に変えて CCB へ伝送し、CCB で光→NIM→TTL 変換をしたうえで WR-TDC に入力している。

図 3.3.2 はそのセットアップの様子であり、2022 年 5 月 24 日に設置した。SuperKEKB には他にもモニターなどからのデータがあり、実際に実施されたアボートの時刻も含めて纏められた「Beam Abort Database」というページがある。このデータと疑似アボート信号の時刻と照らし合わせて実際のアボート事象を選び出した。その時刻の取得及び選択方法の詳細は付録 A に後述しているのでそちらを参考されたい。

以上の方法で選出した、実際の SBL で発報されたアボート事例 23 イベントが表 3.3 である。観測期間は D06 においてセットアップした 2022 年 5 月 24 日から SuperKEKB 運転が終了した 2022 年 6 月 22 日である。

3.2 節で述べたように、アボート応答の向上値 Δt はビームロスの発生箇所により大きく異なる。従ってアボート事象を、

1. どのセンサーからのアボートリクエストが最初に CCB に届けられたか (：分類①)

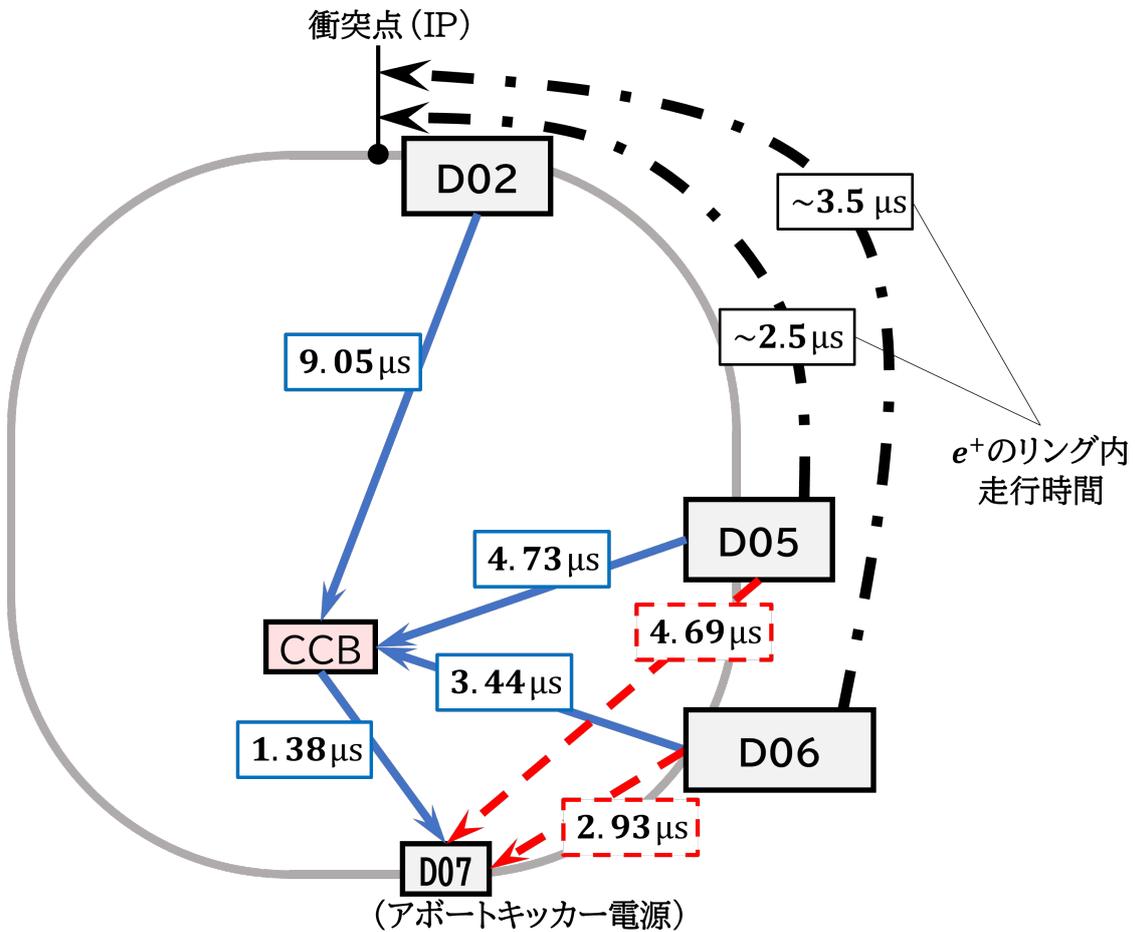


図 3.2.1 SuperKEKB における各建屋間の光ケーブルによる信号伝達時間. 矢印の向きはアポートリクエスト信号の送信方向を表す. また LS1 期間にマスターモジュールがキッカー電源回路と同じ D07 に新設されており, 赤い破線矢印はそのモジュールへ D05、D06 より直接発報した際の伝送時間. これら 2 つも実測値. 黒の 1 点破線は矢印方向に走る陽電子のリング内移動時間.

- 941 2. MR ビームの周回においてビームロスをもっと上流で検知したセンサー位置 (: 分類②)
- 942 の 2 点で分類する. ①は「ビームロスが発生したことをどのセンサーが CCB のアポートマスターモジュールに知らせたのか」に, ②は「MR のどこで最初のビームロスが起こったのか」に対応している.
- 943
- 944 分類①については
- 945 1. 衝突点 (Interaction Point, IP) に設置されている CLAWS センサー ("CLAWS@IP")
- 946 2. D06 光ファイバーロスモニター ("flm@D6")
- 947 3. D05 区域に設置されている高周波 (Radio Frequency, RF) システムのアーク放電センサー ("as@D5")
- 948 4. D06 PIN フォトダイオード (D07 経由) ("PD@D6-viaD7")
- 949 の 4 つにより分類した. いずれもアポートシステムに組み込まれ, 正規のアポートリクエスト信号を発報で
- 950 きる. 括弧内で付けた名称は以下の表に整理する際に使用するものである.

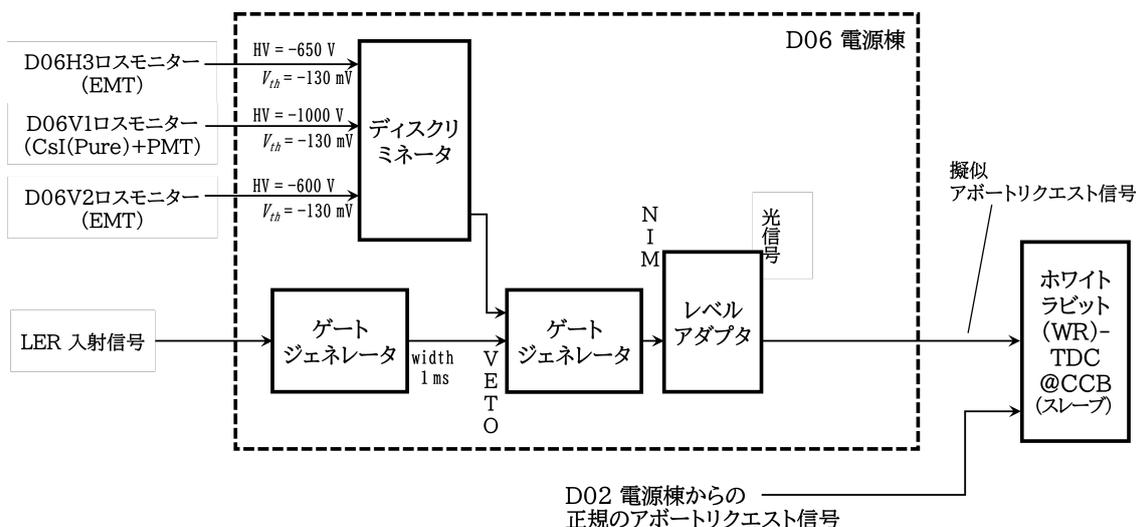


図 3.3.1 Main Ring 上、D06 LM の観測信号を基に擬似アボートリクエスト信号を発報するための回路図。1 ms の幅に広げた LER 入射信号で D06 LM の信号に VETO をかけて LER 入射ビームに非同期的な信号を CCB へ送信出来るようにしている。また CCB のスレープモジュールでは D02 電源棟から送信される正規のアボートリクエスト信号の到着時刻も記録されている。従ってある SBL 事象について D06、D02 両者から CCB に送信された信号の到着時刻を比較することでどれ程アボートを高速化出来るかの見積もりが可能となる。

951 CLAWS がビームロスを検知した場合、その信号の集約先は D02 である。

952 2 つ目の光ファイバロスモニターは 2022 年 6 月に導入され、LS1 に入る直前の約 2 週間 D06V2 を中
 953 心に 5 本実装された LM である [53]。この LM はビームロス由来の荷電粒子が光ファイバー内を通過して生
 954 じたチェレンコフ光子を検出する原理に基づく [54]。光ファイバーのコア径は $62.5 \mu\text{m}$ で、ファイバー端か
 955 ら出たチェレンコフ光は D06 電源棟の PMT (浜松ホトニクス社製 H6780 信号立ち上がり時間は 0.78 ns) で
 956 観測され、FPGA による高速信号処理がなされる [53]。

957 3 つ目のアーク放電センサーは RF 加速空洞 [15] で、異常放電を検知するセンサーである。SuperKEKB
 958 では MR 直線部に D04、D05、D07、D08、D10、D11 の計 6 つの RF セクションが設置されている。アーク
 959 センサーには、Si PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス社製 S1722-02 [55]) が KEKB 時代から再利用
 960 されている他、新たに光ファイバロスモニター方式のアークセンサーが導入されている [53, 55]。LER の
 961 RF セクションの D05 に設けられた 6 台のアークセンサーには光ファイバロスモニター + PMT が用いら
 962 れている [53]。元来は放電を検知すると高周波供給を停止し、大電力の高周波機器を保護する目的でこのセン
 963 サーは設置された。だがビームロス由来のチェレンコフ光を PMT が放電光と誤検知し、アボートリクエスト
 964 を発報する例が確認されていた [53]。D05 という比較的上流側に位置していたことなどから、何度か CCB
 965 に最初に信号を届けることがあったので本来 LM ではないアークセンサーだが LM として使用できることが
 966 分かったため、この分類に含めている。このセンサーの信号の集約先は D05 でそこから CCB へ伝送されて
 967 いる。

968 4 つ目の D06 PIN フォトダイオード (PD) [40] は D06 コリメータのインターロック信号を発報する装
 969 置として導入され、ビームロス由来の荷電粒子が半導体を通過するとその検知信号が発報される。コリメー
 970 タは加速ビームに近接するため急激なビーム軌道の変化により損傷しうる。約 1 ms といった通常のロスモニ

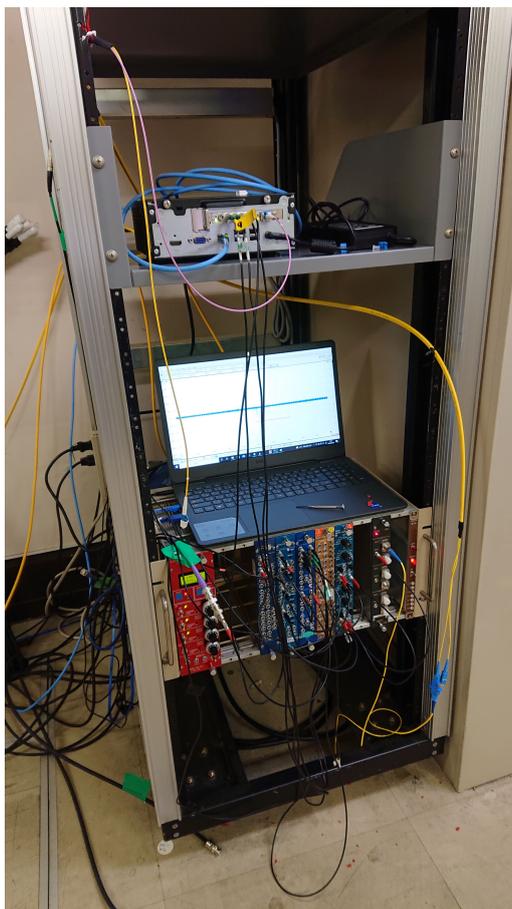


図 3.3.2 回路図 3.3.1 に対応する実際のセットアップの様子

971 ターとして用いられるイオンチェンバーの遅い反応時間ではこのような事態に対応できないため、それよりは
972 高速で、また高い放射線に対する感度を持つ BPW34 型 [41] の PD が採用されている。

973 D07 経由となっているのはこの LM の信号の集約先が D06 ではなく、D07 でそこから CCB に送られて
974 いることを表す。

975 次に分類②だが、こちらは用いたデータにて、実際に最上流での検知事例があった

- 976 ● BCM (衝突点から 1500 m)
- 977 ● D06V1 (衝突点から 1150 m)
- 978 ● D06V2 (衝突点から 1025 m)
- 979 ● D02V1 (衝突点から 80 m)

980 、計 4 箇所により試みた。これらは上から順にメインリングにおいて上流側から下流側へ向かって位置して
981 いる。BCM (Bunch Current Monitor) [56] とはメインリングに蓄積された加速ビームのバンチ電流量を監
982 視するモニターで、衝突点から約 1500 m 上流、つまり富士実験棟領域のメインリング直線部に設置されてい
983 る。ビームアポートしていないにも関わらずバンチ電流の減少がこのモニターで確認された場合、どこかで
984 ビームロスが生じていることが分かる。

985 3.3 節にて述べた回路から発報された D06 の疑似アポートリクエスト信号 (スタディ対象の信号) や D02

986 からの正規アボートトリガー信号 (現行の信号) が CCB に届いた時刻が WR システムで記録されている。こ
987 れらのデータから求まる Δt についてまとめたものを表 3.3 に示す。

988

ビームロス発生時刻	正規のアポートリクエスト信号の CCB 到着時刻 ($t_{CCB-D02}$)	D06V1 ロスモニターで生成した疑似アポートリクエスト信号の CCB 到着時刻 ($t_{CCB-D06}$)	Δt [μ s]	分類①	分類②
5/28 05:11:58	5/28 05:11:59.734359240	5/28 05:11:59.734358072	1.168	CLAWS@IP	D02V1
5/28 10:13:58	5/28 10:13:59.369740384	5/28 10:13:59.369740384	7.560	CLAWS@IP	D02V1
6/1 04:47:10	6/1 04:47:10.817916376	6/1 04:47:10.817908888	7.488	PD@D6-viaD7	D06V1
6/1 22:05:40	6/1 22:05:40.639301120	6/1 22:05:40.639294848	6.272	as@D5	BCM
6/2 22:55:02	6/2 22:55:02.656080848	6/2 22:55:02.656074256	6.592	as@D5	D06V1
6/3 14:48:08	6/3 14:48:08.944914000	6/3 14:48:08.944913272	0.728	CLAWS@IP	D02V1
6/4 16:35:32	6/4 16:35:32.575678480	6/4 16:35:32.575681904	-3.424	as@D5	D06V2
6/5 01:59:49	6/5 01:59:49.241125624	6/5 01:59:49.241119528	6.096	PD@D6-viaD7	D02V1
6/5 05:31:41	6/5 05:31:41.594786800	6/5 05:31:41.594789344	-2.544	as@D5	D06V2
6/8 17:31:13	6/8 17:31:13.375548304	6/8 17:31:13.375542080	6.224	as@D5	D06V1
6/8 23:49:34	6/8 23:49:34.380909352	6/8 23:49:34.380912480	-3.128	as@D5	D06V2
6/9 00:37:38	6/9 00:37:38.479736520	6/9 00:37:38.479736472	0.048	CLAWS@IP	D02V1
6/9 04:26:20	6/9 04:26:20.602986632	6/9 04:26:20.602985592	1.040	CLAWS@IP	D02V1
6/10 21:48:18	6/10 21:44:18.62099520	6/10 21:44:18.62098304	1.216	CLAWS@IP	D06V2
6/13 08:47:07	6/13 08:47:07.481660416	6/13 08:47:07.481651992	8.424	CLAWS@IP	D06V1
6/14 12:44:11	6/14 12:44:11.665682848	6/14 12:44:11.665680024	2.824	CLAWS@IP	D06V2
6/14 14:34:06	6/14 14:34:06.185933264	6/14 14:34:06.185933408	-0.144	CLAWS@IP	D02V1
6/16 22:18:41	6/16 22:18:41.498769608	6/16 22:18:41.498764016	5.776	flm@D6	BCM
6/18 10:08:32	6/18 10:08:32.400738376	6/18 10:08:32.400733024	5.352	CLAWS@IP	D06V1
6/18 16:45:19	6/18 16:45:19.839642840	6/18 16:45:19.839632464	10.376	CLAWS@IP	D06V1
6/18 20:32:37	6/18 20:32:37.322293968	6/18 20:32:37.322289800	4.168	flm@D6	D06V1
6/20 11:28:19	6/20 11:28:19.853530448	6/20 11:28:19.853526184	4.264	flm@D6	D06V1
6/21 02:03:45	6/21 02:03:45.542196136	6/21 02:03:45.542191784	4.352	flm@D6	D06V1

表 3.1 各ビームロス事象における正規のアポートリクエスト信号及び D06 からの信号の CCB 到着時刻とそれらの差、 $\Delta t = t_{CCB-D02} - t_{CCB-D06}$ [μ s]. 1 列目から 3 列目の数字表記は 月/日 時間:分:秒の意。また分類①は「アポートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー」による分類で、CLAWS@IP は衝突点の CLAWS センサー、flm@D6 は D06 の光ファイバロスモニター、as@D5 は D05 のアーク放電センサー、PD@D6-viaD7 は D07 経由で CCB へ信号を送信する D06 の PIN フォトダイオードを表す。分類②は「ビームロスを最上流で検知したセンサー位置」による分類で、上流から BCM (D07-D08 間直線部に位置)、D06V1、D06V2、D02V1 の順で MR 内に設置されている。

989 図 3.3.3 に最初のビームロスの発生箇所とアボートの応答時間をどれ程短縮できるかの関係を示す。横軸
 990 は加速器ビームの同じ周回数にて最も上流側でビームロスを検知したロスモニターの設置場所、縦軸は D06
 991 からの信号発報で短縮可能と考えられるアボート応答の時間、 Δt [μs] を取っている。また各図の上のタイト
 992 ルはアボートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー、分類①の各項目名を表し、それに該当する
 993 SBL 事象のデータをそれぞれプロットしている。2022 年の 5 月 24 日から 6 月 22 日の間に実際に発生し
 994 た 23 回の SBL 事象のうち、

- 995 CLAWS センサー (@ 衝突点) : 11 イベント
- 996 光ファイバロスモニター (@ D06) : 4 イベント
- 997 PIN フォトダイオード (@ D06) : 2 イベント
- 998 RF システム アーク放電センサー (@ D05) : 6 イベント

という内訳になっている。図 3.3.3 左上は、CLAWS のアボートリクエストが最初に CCB に到達したア

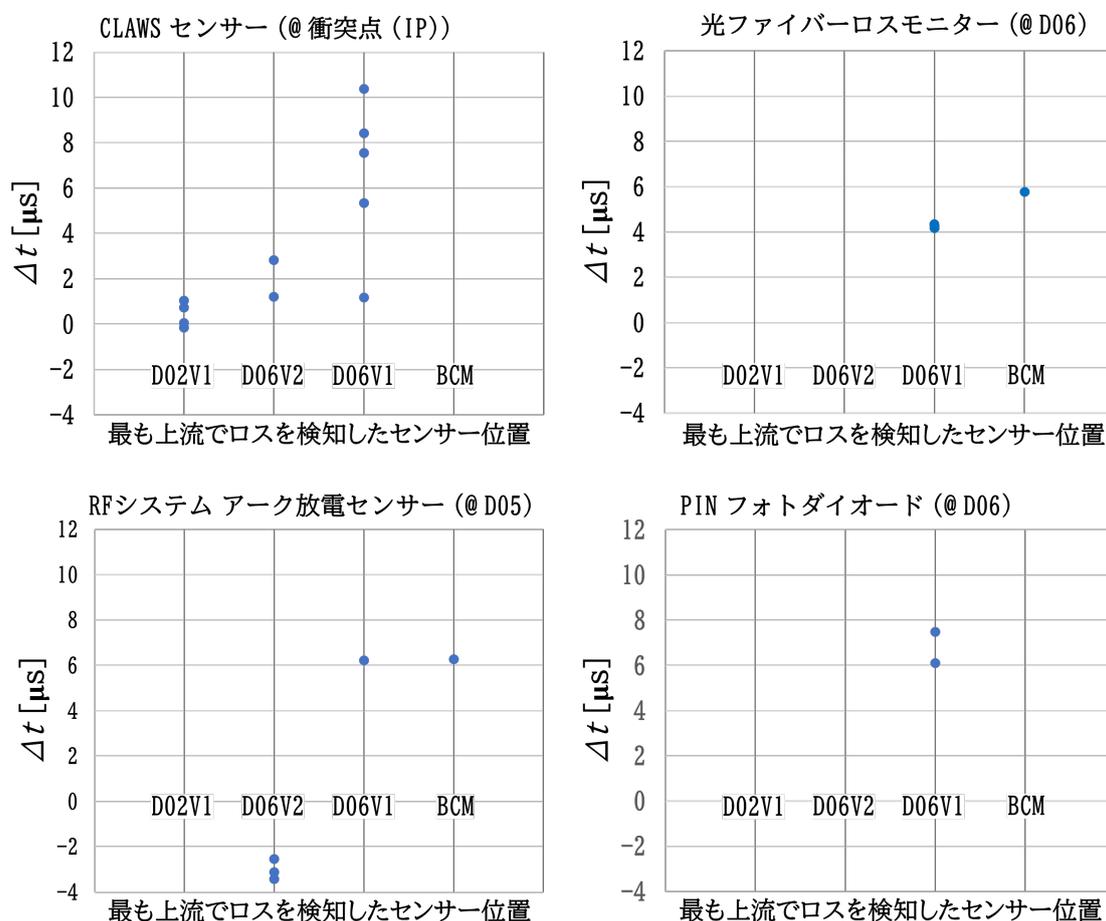


図 3.3.3 D06 からアボート発報した場合の分類① (アボートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー) 別に見た、アボート応答の短縮可能な時間 (Δt)。データは 2022 年の 5 月 24 日から 6 月 22 日の間に実際に発生した 23 回の SBL 事象。

999

1000 ボート事象で、D06V1 が最初にビームロスを検知していた場合には疑似信号の疑似信号と実際のアボート信
 1001 号の CCB 到達時間差が最も大きく、最大で約 10 μs に及ぶ。D06V2 が最初にビームロスを検知した場合に

1002 はそれほど早くない。これは D06V2 で先ずビームロスを検知後、1/3 周後 D02V1 が検知し、さらに 2/3 周
1003 後によろやく D06V1 でもロスを検知して信号を CCB へ送信しているためである。図 3.2.1 に示したように
1004 ビームが 2/3 周して D06V1 でロスを検知、信号が CCB へ到着するのに約 $10 - 3.5 + 3.44 = 9.94 \approx 10\mu\text{s}$
1005 と、D02 から CCB へのケーブルパスの時間、9.05 μs と概ね同じになる。従ってこの場合において、 Δt の値
1006 が小さくなっていると考えられる。

1007 左下の図で D06V2 が最初にビームロスを検知した場合に Δt の値が大きくないのも同様に考えられる。た
1008 だし D05 は D02V1 や衝突点より上流にあり、地勢的に CCB に近いため、D05 信号は D02 経由の信号よ
1009 り早く CCB に到達し、D06 疑似信号より早く CCB に到達した。D06V1 ロスモニターが検知するより長
1010 くなる。従って左上の図のときよりも左下の図の方が、D06V2 が最初にビームロスを検知した場合は疑似ア
1011 ポートの方が遅くなったと考えられる。

1012 また左上の図では D05 のアークセンサーが発報できなかったのに対し、左下の図では D05 のアークセン
1013 サーが発報できたのは左下の図の場合の方がビームロスが大きかったためと考えられる。10 μs という時間は
1014 加速ビームが MR を 1 周する時間に相当するので D06V1 でアポートリクエストの早期発報が実現すればそ
1015 れだけ SBL による被害から加速器機器を保護できうることを示している。

1016 本検証で示された上流ロスモニターからのアポート発報の優位性を踏まえて 2024 年以降の運転では上流、
1017 具体的には D06 や D05、さらに HER の D09 のコリメータ付近にも CLAWS 検出器を設置することが決
1018 定された。また LS1 以前ではキッカーヘアポートギャップを同期させたトリガー信号を発報するアポートマ
1019 スターモジュールが CCB にのみ配置されていた。しかし、今回までの一連の試験から上流ロスモニターから
1020 のアポート発報の優位性が確認され、加えて D06 や D05 などの電源棟とキッカーが近距離にあるという配
1021 置的要因から、このマスターモジュールのキッカー電源回路の在る D07 への増設案が採用され LS1 期間中に
1022 その設置が施行された。D05、D06 区域でビームロス検知した場合、CCB を経由せずとも D07 への直接ア
1023 ポート発報が可能となる。図 3.2.1 における赤矢印は、D05、D06 より D07 へ直接発報した場合の所要時間
1024 である。図中に示した赤点線で囲んでいる値はともに実測値である。この直接経路の、予想される短縮時間の
1025 最大値は D06 発報の場合で約 11.0 μs 、D05 発報の場合で 8.24 μs と見積もられる。

1026 SuperKEKB 運転計画について、当初よりも 3 ヶ月遅れて 2024 年 1 月から運転再開の予定である。実際
1027 の SBL 事象においてアポートトリガー信号の伝送時間を測定し如何程短縮できたかについての結果は、衝突
1028 事象を伴うランの再開が待たれる。

第 4 章

大気中レーザーアポート信号の開発

4.1 レーザーアポートシステムの概要

本研究で開発するレーザーアポートシステムの概念図を図 4.1.1 に示す。アポートリクエスト信号をレーザーにすることで、屈折率が約 1 の大気中に信号を送信することが可能になる。従来の光ファイバーのコアは屈折率が約 1.5 の石英ガラスなので信号速度を約 1.5 倍にすることが可能である。輸送後のレーザーを集光レンズを用いて光ファイバーに挿入することで、現行アポートトリガーモジュールとの接続を実現する。トンネル内はレーザーで信号輸送し、トンネルから地上部に設置されたアポートトリガーモジュールまでは光ファイバーを用いる。

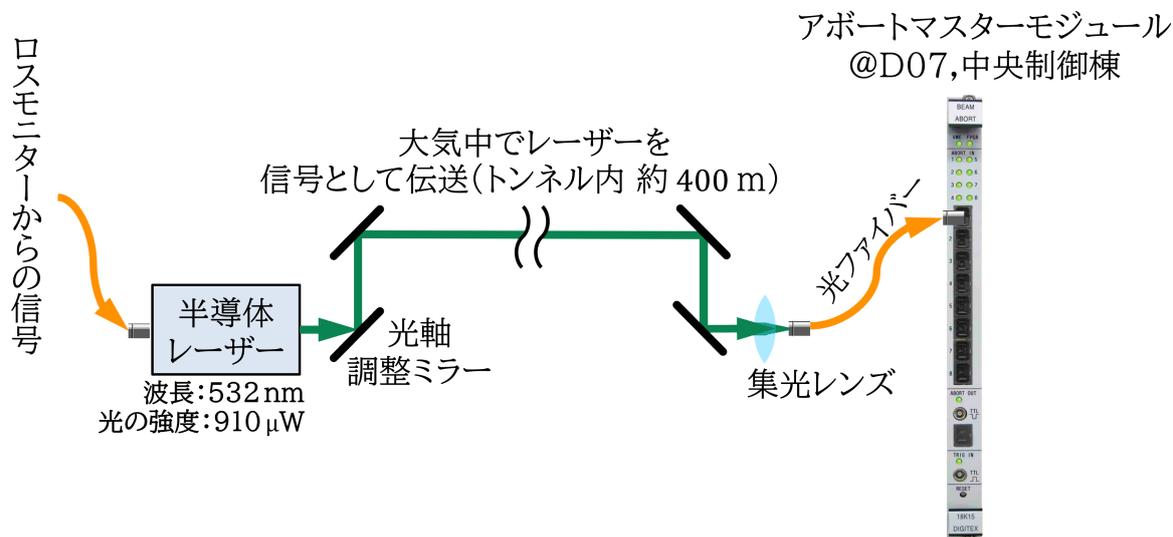


図 4.1.1 レーザーアポートシステムの概念図.

レーザーアポートシステムは加速器トンネルの曲線部 (アーク部) も伝送できるようにミラーで反射させながら目視確認によりレーザー軌道の調整する方法で構築する。そのとき目視による光軸調整を可能にするため可視光波長 (532 nm) の緑色レーザーダイオードを選んだ。また光量は 1 mW 以上では法律で使用規制がかかる [59] ため、クラス II 強度である 910 μ W のものにして運用における制約を軽減する。さらにアポートリ

1042 クエスト信号のロジックは、通常状態のとき光が ON、アポート状態のとき OFF というロジックであるため、
1043 大気中を伝送したレーザーの受信強度が安定的に論理信号の閾値を上回ることが確認できれば、アポート
1044 リクエストの誤発報を起こさないため、このレーザーアポートシステムは現行のアポートシステムへの組み込み
1045 が可能である。

1046 この新システムの導入を検討している最初の場所は D06V1 からアポートキッカー電磁石パルス電源直下の
1047 間、加速器トンネル内で、その伝送距離は約 400 m の距離である。図 4.1.2 は SuperKEKB 加速器トンネル
1048 内の現場写真である。写真の左側が MR の中心側、写真の右側が外側である。リング外側には右側の赤色点
1049 線で囲んだようなケーブルラックが布設されており、ここにレーザーやミラー、レンズといった各光学部品を
1050 固定した光学定盤を取り付けることでレーザーアポートシステムをトンネル内に構築する予定である。また曲
線箇所もミラーを設置してレーザーを反射させることで伝送する方法を検討している。

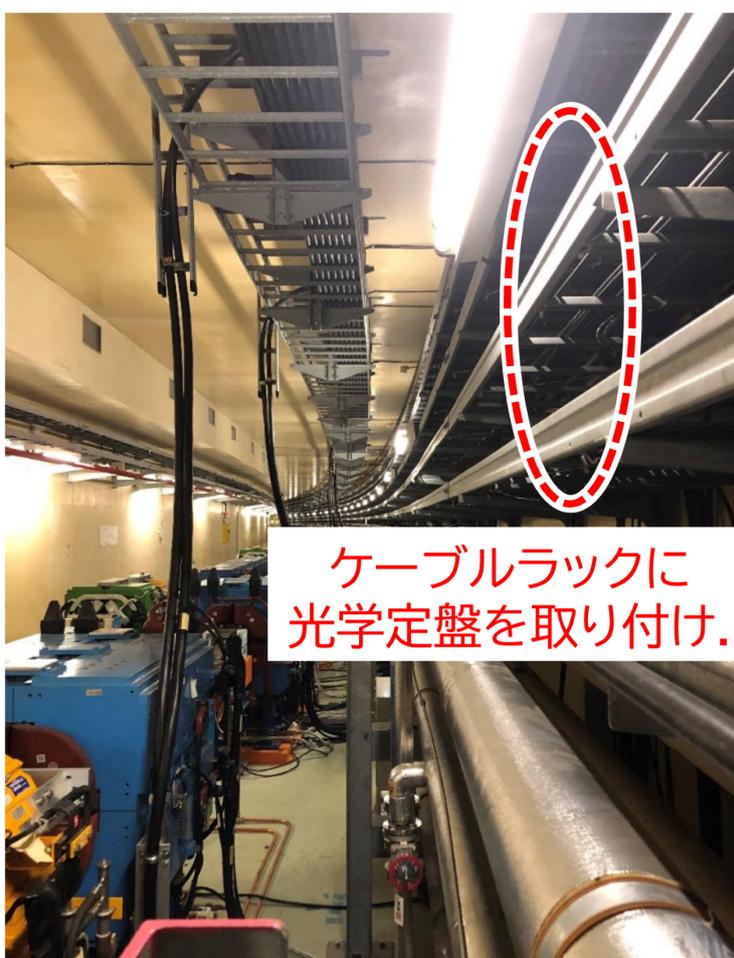


図 4.1.2 SuperKEKB 加速器トンネル内、LS1 期間中に D05 区域へインストールされた NLC (Non Liner Collimator) 部から D07 区域のアポートキッカー電源直下間の現場の様子。赤い点線で囲んでいる部分はケーブルラック。

1051

1052 4.2 レーザーアポートシステム開発要素

1053 現在運用中のアポートモジュールの光送信素子 HFBR-14E2Z は、強度 $20\mu\text{W}$ の 820nm 波長光を送信し、
1054 それを受ける光受信素子 HFBR-24E2Z の感度閾値は同波長で $2\mu\text{W}$ である。つまり受信感度の 10 倍の光量
1055 を送信する仕様で運用されている。過去 5 年以上の運転で、このシステムでミスオペレーションが起こって
1056 ないので、開発するシステムにも同じ条件を課すことにした。光レーザの HFBR-24E2Z は、我々が採用し
1057 た緑色レーザー (532nm) に対する HFBR-24E2Z の感度は $3\mu\text{W}$ になる (図 2.4.5 参照)。そのためその 10
1058 倍の $30\mu\text{W}$ を開発するレーザーアポート信号の、伝送後における要求光量である。

1059 レーザーアポートシステムの開発要素以下 2 つである。

- 1060 1. 長距離伝送後レーザーの光ファイバーへの集光 (図 4.2.1 中、要素 1)
- 1061 2. レーザーを $910\mu\text{W} \rightarrow 30\mu\text{W}$ 以上の効率で長距離伝送 (図 4.2.1 中、要素 2)

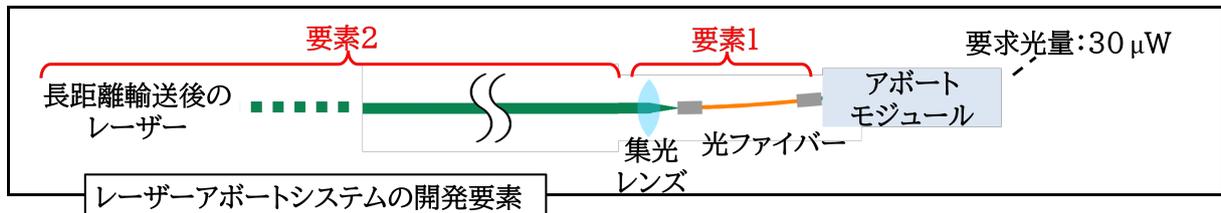


図 4.2.1 レーザーアポートシステム構築に向けて開発すべき要素の模式図。

1062 以降、これら 2 つの開発要素に関する調査内容を記す。

1063 4.3 レーザーの光ファイバー集光効率

1064 4.3.1 集光効率に寄与するパラメータ

1065 光ファイバーへの集光には幾何学的な面では入射するレーザービームサイズのサイズや集光レンズの焦点距
1066 離、光ファイバーの「開口数 (Numerical Aperture, NA)」及びコア径が主に関係する。図 4.3.1 に集光レン
1067 ズを用いてレーザーを光ファイバーへ入力する部分の模式図を示す。

1068 図 4.3.1 で設けた文字については、

- 1069 ● $2r$: レーザービームサイズの直径
- 1070 ● f : 集光レンズの焦点距離
- 1071 ● $\sin \theta = \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + f^2}} \right)$: レーザービームサイズの直径と集光レンズの焦点距離より幾何学的に求まる
1072 「開口数」
- 1073 ● θ_{\max} : 光ファイバーの「開口数」を表す角度
- 1074 ● ϕ : 光ファイバーのコア径

である。レーザーの伝送距離が数 m 程度であれば十分に平行であると仮定して、ここではレーザービームサイズの直径を入射ひとみの直径として扱う。光ファイバーの開口数 (Numerical Aperture, NA) とは光ファ

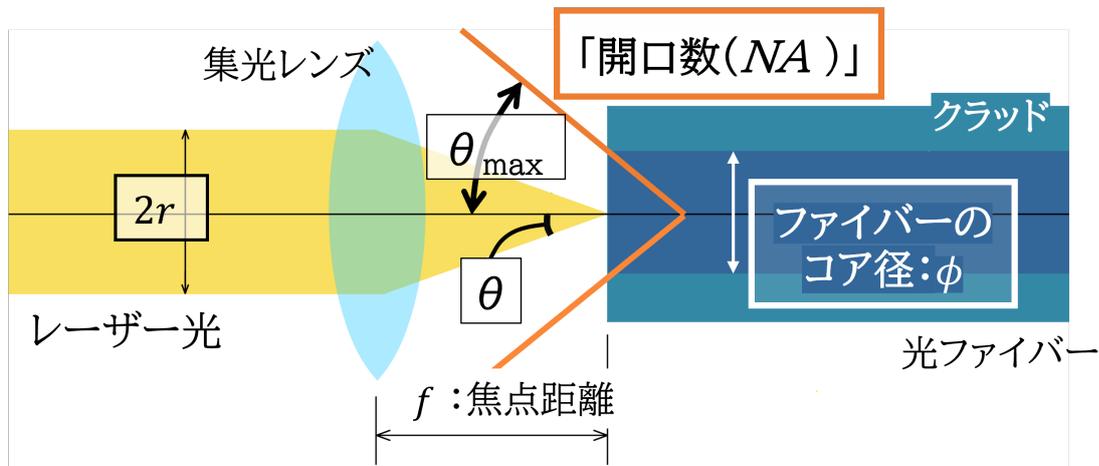


図 4.3.1 レーザーを光ファイバーへ集光する部分の模式図.

ファイバー端面に光などが入射可能な最大の角度を表す指標で、光ファイバー外の媒質の屈折率 n と θ_{\max} の正弦の積、

$$NA = n \sin(\theta_{\max}) \quad (4.1)$$

1075 で表される。本実験では光ファイバー外の媒質が大気なので $n = 1$ として考える。この時図 4.3.1 から明らか
 1076 かなように、レーザーを集光レンズで光ファイバーの開口数よりも鋭角に絞れば幾何学的な光量ロスは起こら
 1077 ない。

1078 4.3.2 実験方法

1079 図に光ファイバーへの集光効率を測定したセットアップの模式図を示す。光ファイバー集光効率の測定実験
 1080 セットアップの模式図を図 4.3.2 に実際のセットアップ写真を図 4.3.3 に載せる。このとき使用している光
 1081 学パーツは以下の通りである。各パーツの詳細については付録 B を参照されたい。

- 1082 ● 光学定盤 (ステンレス製)
- 1083 ● レーザー光源
 - 1084 - バッテリー (CPS1) 1 個
 - 1085 - レーザーダイオードモジュール (CPS532-C2) 1 個
 - 1086 - $\phi 25.4$ mm ネジ無しアダプタ 円筒形部品用 (AD11NT) 1 個
 - 1087 - ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12$ mm ~ $\phi 12.7$ mm ポストホルダ (PH40E/M) 1 個ずつ
 - 1088 - キネマティックマウント (KM100) 1 個
 - 1089 - クランプフォーク 1 個
- 1090 ● テレスコープ部分
 - 1091 - ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12$ mm ~ $\phi 12.7$ mm ポストホルダ (PH40E/M) 2 個ずつ
 - 1092 - $\phi 25$ mm ~ $\phi 25.4$ mm 光学素子用 XY 移動レンズマウント (ミリ規格, LM1XY/M) 2 個
 - 1093 - クランプフォーク 2 個

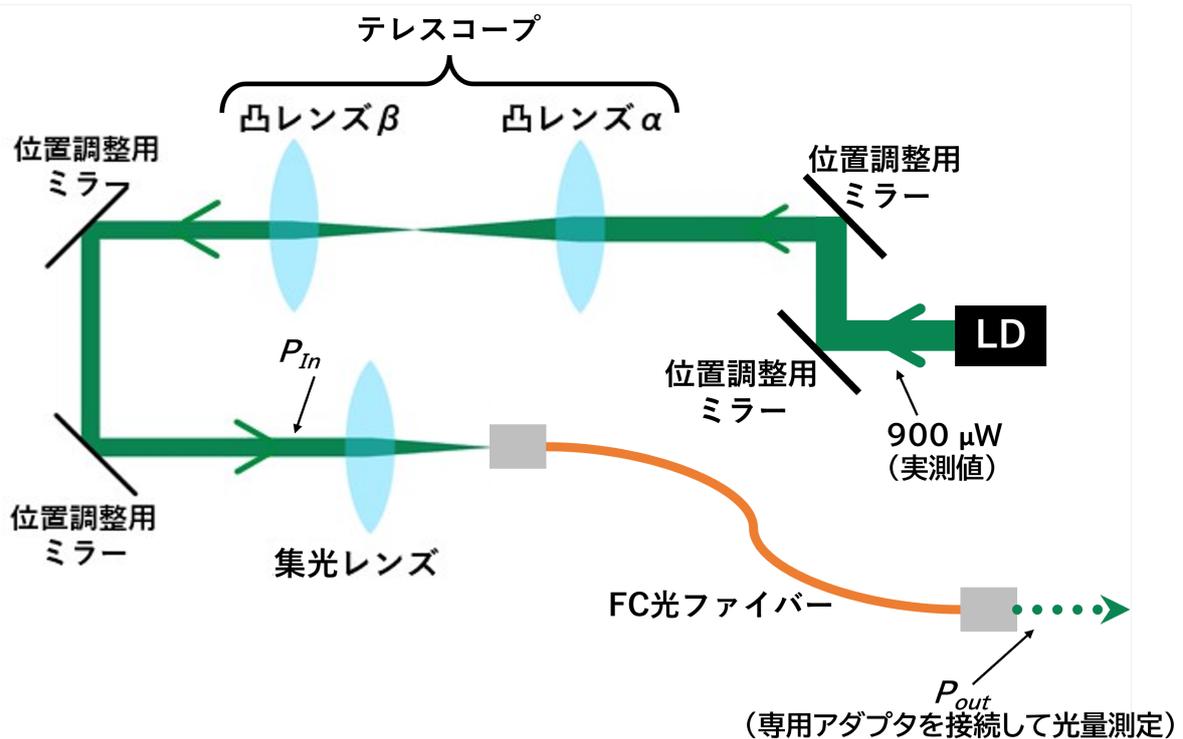


図 4.3.2 光ファイバーへの集光効率測定のためのセットアップに対応する模式図。 P_{In} 及び P_{Out} はそれぞれ集光レンズの手前、光ファイバーの端面から出力される測定光量を表す。

- 1094 ● 集光部分
- 1095 – マルチモードレンズ及び AD15NT 1 個ずつ
- 1096 – シングルモードレンズ及び AD11NT 1 個ずつ
- 1097 – キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1098 – M4 ネジ 1 本
- 1099 – マルチモード光ファイバー各種
- 1100 – フォトダイオードパワーセンサとファイバーアダプターキャップ 1 個ずつ
- 1101 – 小型パワー&エネルギーメーターコンソール (PM100D) 1 個
- 1102 – ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12\text{mm} \sim \phi 12.7\text{mm}$ ポストホルダ (PH40E/M) 1 個ずつ
- 1103 – クランプフォーク 2 個
- 1104 ● 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)
- 1105 – 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1106 – 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1107 – 5mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1108 – キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1109 – M4 ネジ 2 本
- 1110 – クランプフォーク 2 個
- 1111 ● 1 インチミラーを張り付けた 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1

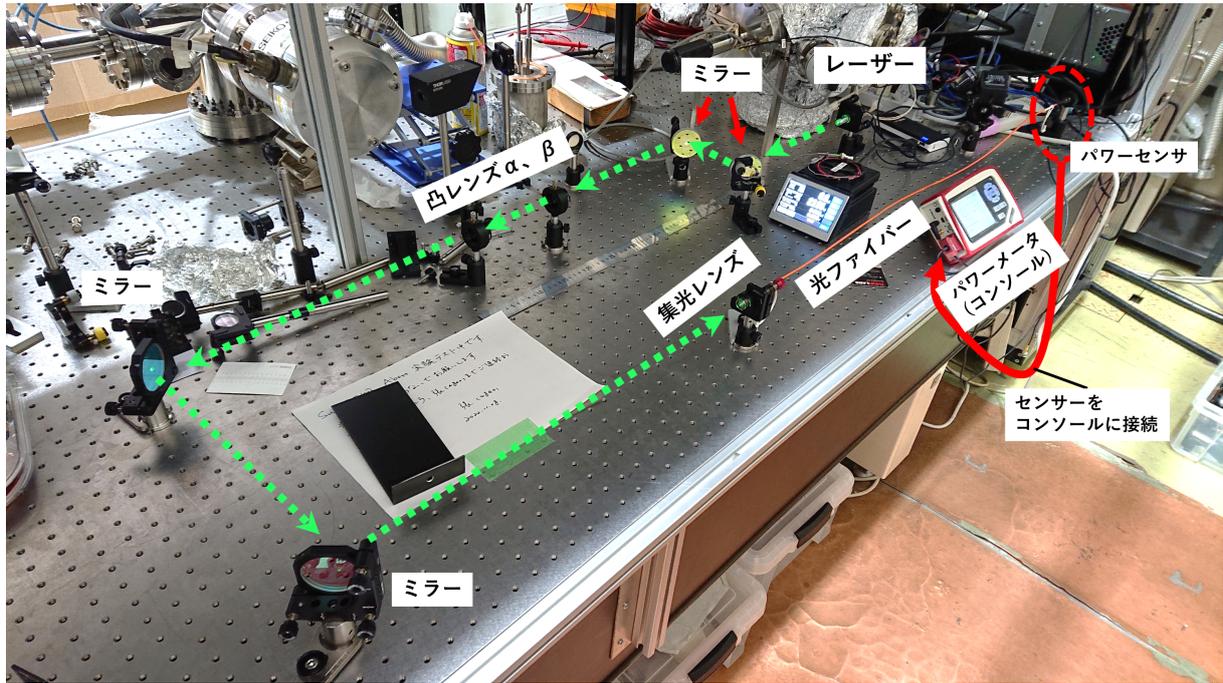


図 4.3.3 光ファイバーへの集光効率測定におけるセットアップと各光学パーツの配置の様子。緑色の点線矢印はレーザーから出力された光の軌道を示している。

- 1112 セットを作る)
- 1113 - 1 インチミラーを張り付けた入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1114 - φ12mm ポスト 2 本
- 1115 - φ12mm ~ φ12.7mm ポストホルダ 2 個
- 1116 - キネマティックマウント (KM100) 2 個
- 1117 - M4 ネジ 2 本
- 1118 - クランプフォーク 1 個

1119 レーザー軌道の高さは調整のしやすさの観点から光学定盤から 80mm に取った。そして 2 つのレンズ α、β

1120 でテレスコープを作り、レーザーのビームサイズを変える。これらレンズには平凸レンズを採用したので凸側

1121 を互いに向かい合うようにセットしてレーザーがまた出入射する側には平面側が来るようにしている。異なる

1122 焦点距離のレンズの組み合わせでレーザーを様々なプロファイルサイズに調節できるが、このときテレスコー

1123 プ後の光を可能な限り距離を取って見た時、テレスコープ直後とサイズが同じになるように平凸レンズ間距離

1124 を調節して平行光を実現する。レーザーダイオードモジュールからの光は目視で測定して約 4.5mm φ から

1125 5mm φ である。レンズの焦点距離の組み合わせ (α レンズの焦点距離 [mm], β レンズの焦点距離 [mm]) とテ

1126 レスコープ後のレーザー直径の関係を表 4.3.2 にまとめる。

1127 (

1128 図 4.3.2 において、位置調整用として反射ミラーを 2 枚 1 セットで設置しているのは、レーザーの進行方向

1129 に対して 2 つの垂直方向の変位に対応するためである。例えばレーザー光源と凸レンズ α の所で考える。各

1130 光学部品の中心の高さは目視で 80mm に合わせているので両者には必ず高さのずれがある。さらにレンズに

α レンズの焦点距離 [mm]	β レンズの焦点距離 [mm]	テレスコープ後のレーザー直径 [mm]
100	50	2.5
50	35	3.5
35	50	7.2
50	100	9

表 4.1 2つのレンズの焦点距離とテレスコープ後のレーザー直径の3要素.

1131 はその面に対してレーザーを垂直且つ中心へ入射する必要があるが、これも同様の理由からレーザーに対して
 1132 垂直に設置するのは難しくレーザー進行方向に垂直向きにもずれが生じる。従って位置と角度の両方を調整す
 1133 るためにはミラーが2つ必要である。本研究における調整では基本的に1枚目のミラーをレーザー進行方向
 1134 に垂直向きの変位を大まかに補正する役割としている。

1135 次にアライメントレーザーとして、集光レンズにおいて光ファイバーを接続する側から赤外光ファイバー
 1136 レーザーを入射して、緑色レーザーと集光レンズのアライメントを取る。

1137 両者のレーザービームの軌道にずれが有る場合は特にテレスコープ後段のミラー2枚に見える2本のレー
 1138 ザーの照射点が共にミラーの中心に来るように調整する。

1139 調整が終了したら調査対象の光ファイバーを集光レンズに設置する。反対側のコネクタはコンソール、パ
 1140 ワーメーターに接続しておく。集光レンズの光ファイバー接続部分は入射光がファイバーのコア、クラッド境
 1141 界面における全反射角度の条件を満たすようにレーザー軌道に対して斜めに作られている [59]。テレスコープ
 1142 後段のミラー2枚を用いて高さ方向と左右方向の2方向で離調 (detuning) と同調 (tuning) を繰り返してパ
 1143 ワーメータの読み値が最大になる軌道に調整する。テレスコープ側のミラーの摘みを回してパワーメーターで
 1144 測っているファイバー集光量が「一時的な」最大値を迎えたら、ミラーの摘みをそのまま同じ方向に回し続け
 1145 て「一時的な」最大値の半分程度にまで光量を落とす、つまり離調する。今度は集光レンズ側のミラーの摘み
 1146 を回して最大値を探す。そしてまたテレスコープ側のミラーの摘みを先程と同じ向きに回して離調し、同様に
 1147 集光レンズ側のミラーで同調する。この作業を、今調整している方向における最大値に達するまで繰り返す。
 1148 この作業を行っている際に最大値を通過してしまったら、先程離調していたミラーを同調、同調していたミ
 1149 ラーを離調にして、離調の落とし幅を小さくしながら最大値まで戻る。但し一番最初の離調する際の落とし幅
 1150 から慎重になって小さく取って行くとレーザーの照射光における構造が影響して最大値ではない極値に合わせ
 1151 てしまう可能性が有るので最初の離調の落とし幅は半分程度に取ることが望ましい。

1152 水平方向の離調・同調による調整が終わったら、垂直方向の方向についても同様に調整をかけて真の最大値
 1153 に合わせる。

1154 4.3.3 結果及びその考察

1155 図 4.3.3 で示したセットアップにおいて、集光レンズに入れるレーザーのビーム径を変えながら、マルチ
 1156 モード用、シングルモード用の2種類の集光レンズ別々に8種類の光ファイバーへの集光実験を実施した際
 1157 のファイバー集光効率の結果を図 4.3.4 に示す。測定に使用したファイバーの長さは全て1mで、曲げ損失
 1158 が起こらないように、出来る限りファイバーを真っ直ぐな状態に保って測定を実施した。また集光レンズに入
 1159 射するレーザーのビーム径は使用したダイオードレーザーより発出されるビームプロファイルを目視で確認し
 1160 た直径の値5mmとテレスコープに用いた2枚の凸レンズの焦点距離から求まる倍率から計算した値である。

この試験結果から (ファイバーの $NA) \geq \sin \theta$ の条件を満たすファイバーと集光レンズのペアでは、ほとんど

r [mm]	2.5	3.5	7.2	9.0	2.5	3.5	7.2	9.0
$r/\sqrt{r^2+f^2} = \sin \theta$	0.13	0.17	0.34	0.41	0.11	0.16	0.31	0.38
集光レンズのモード	マルチ	マルチ	マルチ	マルチ	シングル	シングル	シングル	シングル
M94L01 ($\phi 105 \mu\text{m}$, NA 0.100)	57.5%	未測定	16.3%	18.4%	45.5%	75.1%	44.7%	21.8%
M42L01 ($\phi 50 \mu\text{m}$, NA 0.22)	94.2%	0.6%	80.8%	61.3%	95.4%	97.3%	96.9%	73.3%
M43L01 ($\phi 105 \mu\text{m}$, NA 0.22)	92.5%	81.0%	61.4%	64.2%	93.6%	97.0%	92.0%	73.6%
M122L01 ($\phi 200 \mu\text{m}$, NA 0.22)	93.1%	未測定	61.9%	50.3%	93.4%	96.6%	79.5%	61.7%
M72L01 ($\phi 200 \mu\text{m}$, NA 0.39)	94.9%	未測定	94.9%	91.4%	95.4%	96.6%	96.3%	83.3%
M74L01 ($\phi 400 \mu\text{m}$, NA 0.39)	96.6%	未測定	96.7%	93.5%	94.3%	98.2%	97.4%	85.9%
M123L01 ($\phi 200 \mu\text{m}$, NA 0.50)	94.7%	95.3%	95.5%	95.6%	94.9%	95.0%	96.5%	84.5%
M124L01 ($\phi 400 \mu\text{m}$, NA 0.50)	96.5%	98.0%	97.2%	96.6%	97.1%	98.9%	99.1%	85.9%

図 4.3.4 コア径や開口数の異なる 8 種類の光ファイバーに 532 nm 波長のレーザーを入力した時のファイバー集光効率. r : 集光レンズに入射するレーザービームサイズの半径, f : 集光レンズの焦点距離, θ : r と f より定まる角度. 集光レンズの直径について、マルチモードは 11.05 mm、シングルモードは 7.2 mm. (ファイバーの $NA) \geq \sin \theta$ の条件が成り立つ、つまり赤色の一点破線より下のファイバーは集光効率が 90 % を高い確率で超えることが確認できる. 一番右の欄で 90 % 以下であるのは入射するレーザービームサイズのサイズが集光レンズの直径よりも大きく光がレンズから漏れたため.

1161

1162 の場合で 90 % を超える集光効率を実現した. 直径 9 mm のレーザーをシングルモードレーザーに挿入した
1163 場合、で集光効率が 90 % 以下であるのは入射するレーザービームサイズのサイズが集光レンズに用いたシ
1164 グルモードレンズの直径、7.2 mm よりも大きく、光がレンズから漏れたためである. 一方マルチモードレン
1165 ズの直径は 11.05 mm の設計なので光が漏れることは発生しなかった. ただレンズから漏れなければレン
1166 ズのモードがシングル、マルチによって集光効率に数十 % といった大きな差が生じることは無かった.

1167 以上より高い集光効率の実現には (ファイバーの $NA) \geq \sin \theta$ の条件を満たすことが重要であることが分
1168 かった. そしてこの結果を踏まえ、試験を実施した中で最も高い集光効率を安定して達成した光ファイバーは
1169 NA 、コア径が共に最大の M124L01 ($NA = 0.50$, $\phi 400 \mu\text{m}$) であったのでこれをレーザーアポートシステム
1170 に用いるファイバーとして選定した. また長距離伝送後のレーザービームサイズの拡大や軌道ふらつきを考慮
1171 して少しでもレンズからの漏れ光を抑えるためにレンズ直径の大きいマルチモードレンズを採用した [61].

1172 4.4 レーザー長距離輸送光学系の開発

1173 4.4.1 レンズ 2 つを用いたレーザー送信方法の検証

1174 長距離伝送に伴うレーザービームサイズの拡散やレーザー軌道のふらつきだが、一つ目の案としてレンズ 2
1175 つを用いてレーザーの平行性を高める方法を試みた.

1176 実験方法

1177 「方眼ボードへの照射でプロファイルや軌道のふらつきを測定」「4.3 節で開発した集光光学系でファイバー
1178 に集光して実際に光量を測定」の 2 種類を行った. 図 4.4.1 にレーザーを 400 m 直線伝送の実験を行うセッ
1179 トアップの模式図、図 4.4.2 に光源部 (上) 及び集光部光学系セットアップ (下) の様子を示す.

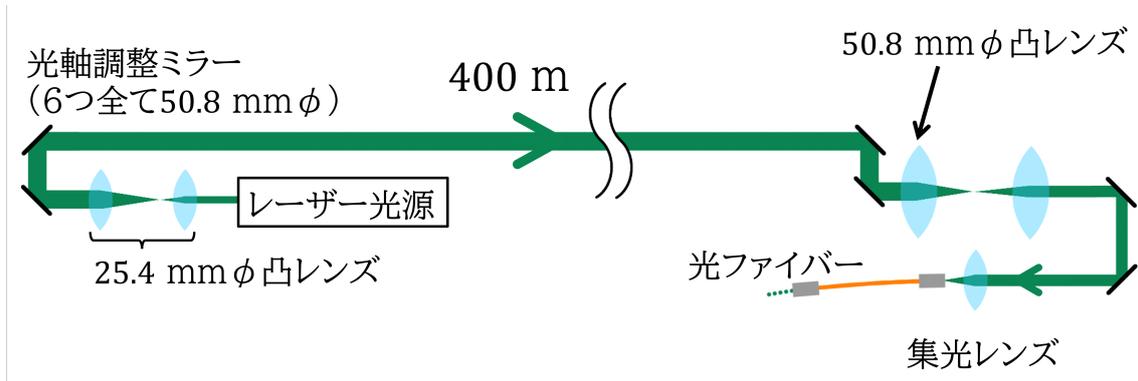


図 4.4.1 レーザー 400 m 直線離伝送実験セットアップの模式図。

1180 光源部の望遠鏡における 2 枚のレンズは焦点距離の組み合わせを 50 mm、150 mm にした。これは
 1181 2 枚目のレンズ以降のレーザーサイズを目視で確認しやすい、3 倍程度の 15 mm φ に拡大するためである。

1182 集光側望遠鏡を構成する 2 枚のレンズは伝送により発散したレーザーを絞り、集光レンズの
 1183 直径内に収める役割を担っている。焦点距離の組み合わせは 200 mm、35 mm で入射した光のサイズを
 1184 $\frac{35}{200} = 0.175 \approx 0.18$ 倍に絞る。望遠鏡の前のミラーの直径が 2 インチ = 50.8 mm、集光レンズに採用
 1185 したマルチモードレンズ (F950FC-A) の直径は 11.05 mm なので集光レンズから光を漏らすことなく入射さ
 1186 せるためには $\frac{11.05}{50.8} = 0.2175 \approx 0.21$ 倍以下に絞る必要がある。従ってレンズの焦点距離の組み合わせを上
 1187 のようにした。またミラーは光軸調整のためのもので、基本的には 4.3.2 で先述した理由により 2 枚設置し
 1188 ているが光源部のミラーのみで数百メートル先に在るファイバーへの集光量を調整することは非常に困難で
 1189 ある。従って先ず光源部の 2 枚のミラーで大まかな光軸の調整を行う。集光の光学定盤上には望遠鏡
 1190 前と後に 2 枚ずつミラーがあるが、望遠鏡前の 2 枚のミラーで望遠鏡の中心を垂直に貫くよう
 1191 に調整し、望遠鏡前の 2 枚のミラーで集光レンズの面の中心を垂直に貫くように調整するよう
 1192 している。

1193 またセットアップに使用している光学部品を以下に列挙する。各パーツの詳細は付録 B に記す。

1194 ● レーザー送信側光学系

1195 - レーザー光源及び望遠鏡部分

- 1196 * バッテリー (CPS1) 1 個
- 1197 * レーザーダイオードモジュール (CPS532-C2) 1 個
- 1198 * φ25.4 mm ネジ無しアダプタ 円筒形部品用 (AD11NT) 1 個
- 1199 * ポスト TR40/M-JP 及び φ12 mm ~ φ12.7 mm ポストホルダ 2 個ずつ
- 1200 * SM1 ネジ付き 30 mm ケージプレート (CP33/M) 3 個
- 1201 * レンズ用 z 軸移動ステージ (CT1A/M, $f = 50$ mm のレンズをこちらに取り付ける) 1 個
- 1202 * φ6 mm ケージアセンブリーロッド、長さ 304.8 mm (ER12) 4 本
- 1203 * 1 インチ N-BK7 平凸レンズ、 $f = 50$ mm、AR コーティング:350~700 nm (LA1131-A-ML)
- 1204 1 個
- 1205 * 1 インチ N-BK7 平凸レンズ、 $f = 150$ mm、AR コーティング:350~700 nm (LA1433-A-ML)
- 1206 1 個

- 1207 * クランプフォーク 2 個
- 1208 * M4 ネジ 2 個
- 1209 - 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)
- 1210 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1211 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1212 * 5mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1213 * ポスト TR40/M-JP 及び $\phi 12\text{mm} \sim \phi 12.7\text{mm}$ ポストホルダ 1 個ずつ (テレスコープに近い
- 1214 側のミラーの台に使用)
- 1215 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1216 * M4 ネジ 2 本
- 1217 * クランプフォーク 2 個
- 1218 - 光学定盤 (MB3060/M) 1 枚
- 1219 - 緑防振シート B タイプ 1 枚
- 1220 ● レーザー集光部光学系
- 1221 - 1 インチミラーを張り付けた 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミ
- 1222 ラー 1 セットを作る)
- 1223 * 1 インチミラーを張り付けた入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1224 * $\phi 12\text{mm}$ ポスト 2 本
- 1225 * $\phi 12\text{mm} \sim \phi 12.7\text{mm}$ ポストホルダ 2 個
- 1226 * キネマティックマウント (KM100) 2 個
- 1227 * M4 ネジ 2 本
- 1228 * クランプフォーク 2 個
- 1229 - テレスコープ部分
- 1230 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1231 * 5mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1232 * $\phi 6\text{mm}$ ケージアセンブリーロッド、長さ 304.8mm (ER12) 4 本
- 1233 * $\phi 6\text{mm}$ ケージアセンブリーロッド、長さ 203.2mm (ER8) 4 本 (ER12, ER8 1 本ずつ用いて
- 1234 508mm 長のケージアセンブリーロッドを 4 本作成して使用.)
- 1235 * 60mm ケージプレート (LCP34/M) 2 個
- 1236 * ケージシステム変換アダプタ 1 個
- 1237 * 2 インチレンズ 焦点距離 $f = 200\text{mm}$ (LA1979-A-ML) 1 個
- 1238 * 1 インチレンズ 焦点距離 $f = 35\text{mm}$ (LA1027-A-ML) 1 個
- 1239 * クランプフォーク 2 個
- 1240 - 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)
- 1241 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1242 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1243 * 5mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1244 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1245 * M4 ネジ 2 本
- 1246 * クランプフォーク 2 個

- 1247 – 最終集光部分 (集光レンズ以降の箇所)
- 1248 * マルチモードレンズ及び AD15NT 1 個ずつ
- 1249 * キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1250 * M4 ネジ 1 本
- 1251 * マルチモード光ファイバー (M124L01)
- 1252 * フォトダイオードパワーセンサ (S120C) とファイバーアダプターキャップ (S120-FC) 1 個
- 1253 * ずつ
- 1254 * 小型パワー&エネルギーメーターコンソール (PM100D) 1 個
- 1255 * ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12\text{ mm} \sim \phi 12.7\text{ mm}$ ポストホルダ (PH40E/M) 1 個ずつ
- 1256 * クランプフォーク 1 個
- 1257 – 光学定盤 (MB3060/M)) 1 枚

1258 以上のセットアップでレーザー 400 m 伝送実験を実施した。実験日は 2023 年 7 月 28 日、場所は図 4.4.3
1259 に示した電子陽電子入射器棟クライストロンギャラリー部で実施した。この試験では、

- 1260 • 伝送距離を 50 m ずつ 400 m まで伸ばした時の、レーザーの拡大と軌道ふらつきの変化
- 1261 • 910 μW レーザーを 400 m 伝送した際の光ファイバーへの集光量

1262 の 2 点を測定した。実験場所は傍に加速空洞に供給される大電力のマイクロ波を生成するクライストロンが
1263 複数台設置されているが運転は停止している状態で、これによる地面振動は無かった。図 4.4.4 に光源側から
1264 見た実験環境の様子を示す。

1265 伝送距離に対するレーザーの拡大と軌道ふらつきの変化

1266 先ずどのよう拡大して軌道がふらついたレーザーが 400 m 先のファイバーに届くのかを調べた。

1267 ■調査方法 レーザー光源より 50 m から 400 m まで、50 m 置きに計 8 ヶ所で図 B.0.27 のような方眼ボー
1268 ドにレーザーを照射させる。その様子を各ピクセル 8-bit、1920×1080 ピクセル、240 fps のフレームレー
1269 ト、.MOV ファイル形式で図 4.4.5 に示すように、スタンドに固定したカメラにより撮影する。図 4.4.6 は光
1270 源より 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、400 m の地点において、1 マス約 2 cm 角の
1271 方眼紙に照射した時の方眼紙に照射したレーザー光の様子を撮影した動画の内、静止画の 1 枚である。

1272 このようにして撮影したその動画の解析から、レーザー軌道ふらつきの大きさと伝送距離の関係を調べ、さ
1273 らにレーザービームサイズと伝送距離の関係についても確認する。

1274 ■校正方法 調査方法で列挙した 3 項目を調べるに当たり、レーザービームサイズの位置や長さについては
1275 レーザーを照射した方眼紙の目盛から画像のピクセルを変換した。方眼紙は 1 目盛 $19\frac{2}{3}\text{ mm}$ 、位置補正のため
1276 5 マスを 1 辺とする正方形の 4 頂点に赤い丸が打ってある。各フレーム画像を Python ライブラリである
1277 PIL の Image モジュール内、open メソッドを使って赤色の輝度ファイルに変換する。画像のピクセル座標
1278 とその座標の輝度の値による加重平均から 4 つの赤い丸の画像内における位置をピクセル単位でフレーム画
1279 像毎に求める (図 4.4.7)。これらのピクセル位置から赤丸間距離が何ピクセルなのかを計算する。

1280 そして方眼ボードの 1 目盛は $19\frac{2}{3}\text{ mm}$ 、5 マスで $19\frac{2}{3} \times 5 = 98\frac{1}{3}\text{ mm}$ である。この値と先程求めたピク
1281 セル単位での赤丸間距離の対応から、ピクセルの校正を行った。

1282 ■軌道ふらつきの解析 方眼ボードに照射された緑色レーザーの明るさの中心位置 (≡ 重心位置) も同様の方
1283 法で求める。こちらは各フレーム画像を緑色の輝度ファイルに変換して計算する。

1284 求めたレーザーの重心位置の校正は 2 次元座標における直線の交点を求める要領で行った。

1285 赤丸 4 つ R_1, R_2, R_3, R_4 とレーザー重心位置 G のピクセル座標が既知なので、これらから先ず 2 つの消
1286 失点 T_1, T_2 の座標を求める。次に消失点と G を結ぶ線分と赤丸を 4 頂点とする四角形の各辺との各交点 I_{ij}
1287 を求める。そして今回は校正後の G の位置は、 R_2 を原点として考えることとした。従って 1 目盛 $19\frac{2}{3}$ mm
1288 であることを用いて $\overline{T_{12}G} \times \frac{19\frac{2}{3} \times 5}{I_{12}I_{34}} [\text{mm}]$ 、 $\overline{T_{24}G} \times \frac{19\frac{2}{3} \times 5}{I_{13}I_{24}} [\text{mm}]$ がそれぞれ G の x 座標 G_x [mm]、 y 座標 G_y
1289 [mm] になる。この計算作業を各フレーム画像ごとに行う。

1290 続いてレーザーの軌道ふらつきを求める。図 4.4.9 はレーザーを方眼ボードに照射した様子の動画の内、1
1291 枚のフレーム画像である。

全フレーム画像に対して求めた R_2 に対するレーザーの重心 G の座標 (G_x, G_y) [mm] について、 x, y 方向
別に平均を計算し、 \bar{X}, \bar{Y} と置く。つまり、

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{\sum_k^N (G_x)_k}{N} \\ \bar{Y} &= \frac{\sum_k^N (G_y)_k}{N}\end{aligned}\tag{4.2}$$

1292 である。ここで、 N は撮影した動画に含まれるフレーム画像の枚数、 $(G_x)_k$ と $(G_y)_k$ はそれぞれ k 枚目の重
1293 心位置の x 及び y 座標である。

1294 そしてこの平均 (\bar{X}, \bar{Y}) [mm] からの重心 $G(G_x, G_y)$ [mm] の相対変位、 $(\Delta x, \Delta y) = (G_x - \bar{X}, G_y - \bar{Y})$
1295 [mm] を本研究にてレーザーの軌道ふらつきと定めた。

1296 最後に $\Delta x, \Delta y$ を別々に 1 次元ヒストグラムに詰める。ヒストグラムの横軸は重心位置の相対変位の値
1297 [mm]、縦軸はイベント数を取る。これをガウスフィッティングした時の σ で伝送距離に対するふらつきの大き
1298 さを評価した。図 4.4.10 及び 4.4.11 は以上の方法で作成したヒストグラムの結果である。

1299 ■レーザーの軌道ふらつきの解析結果 図 4.4.10 及び 4.4.11 に軌道ふらつきについて解析したヒストグラム
1300 を示す。

1301 図 4.4.12 の左に軌道ふらつきに関する図 4.4.10 及び 4.4.11 のフィットから得られた σ を伝送距離に対し
1302 てプロットした結果を示す。

1303 この結果から軌道ふらつきは伝送距離に対して単調増加することが分かる。またどちらも水平垂直方向に関
1304 して違いは見られなかった。そして伝送距離が変わると傾きが変化している箇所が確認できる。

1305 ■軌道ふらつきとプロファイル拡大による照射範囲の拡がりの確認 次にプロファイルの拡大についてだが、
1306 このレーザービームサイズ自体も形状が変化するため、そのどれ程拡大したか評価することが難しい。そこで
1307 図 4.4.13 のように、先ず 4.4.1 で求めた各フレーム画像の方眼ボードの赤丸位置を基準にして全てのフレーム
1308 画像を重ね合わせる。そうすると各ピクセルのエントリーは、その位置における輝度の和になっている。この
1309 値を重ねたフレーム画像の枚数で割ると、各フレームのピクセル輝度が 8-bit で表現されているので [0, 255]
1310 の範囲に規格化できる。

1311 このようにして作ったプロットから軌道ふらつきとプロファイル拡大を合わせた 2 つの効果でレーザーの
1312 照射範囲がどれ程拡がったのかを確認した。図に各伝送距離 8 地点に対して作成した重ね合わせのプロット
1313 を示す。縦横の辺は共に 200 px で、これが実際の長さでは赤丸間距離の $19\frac{2}{3} \times 5 = 98\frac{1}{3}$ mm なので $98\frac{1}{3}/200$

1314 mm/px \simeq 0.492 mm/px をかけて mm に換算出来る。

1315 図 4.4.14 から、本来円形プロファイルのレーザーだったのが伝送距離とともに歪みながら大きくなっているのが確認できる。

1317 凸レンズを用いて構築した光源光学系による 910 μ W レーザー 400 m 伝送時のファイバー集光量測定結果

1318 パワーセンサーとパワーメータコンソールで 10 分間測定した結果を図 4.4.15 に示す。パワーメータの測定
1319 は 0.3 s 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒ごとに平均した値をプロットしている。エラーバーはその
1320 ときの標準偏差を示している。

1321 図中、黒い丸で囲んでいる急激にファイバー出力光量が下がっている箇所は人や自転車の通行によるレー
1322 ザーの遮断によるものである。

1323 また図 4.4.16 に 0.3 s 毎にパワーメーターで測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒストグラムに詰
1324 めた結果を示す。通行により遮断された際のデータは除いており、またヒストグラムは横軸に光量 [μ W]、縦
1325 軸に頻度を対数で取った。

1326 図 4.4.16 から軌道ふらつきやプロファイル拡大によるレーザーの不安定性による理由で要求光量の 30 μ W
1327 を下回ることが無かったことが確認できる。また 10 分間における平均値と標準偏差は (581 \pm 42) μ W と、要
1328 求光量の 19 倍以上の集光量を達成できた [62]。この平均値と標準偏差は通行による遮断を除いた値である。
1329 しかしながら図 4.4.6、4.4.14 で輸送後のプロファイルが円でないのは、2 つのレンズの中心のアライメント
1330 が完璧ではないことに起因すると考えられる。このように光学系の調整不足は明らかで改善の余地がある。長
1331 距離輸送するとミスアライメントの影響が無視できなくなる。またリングトンネル内で実験する時、反射ミ
1332 ラーが必要なので、球面ミラーは集光と反射二つの機能があり、凸レンズを用いる場合より必要な部品数を減
1333 らせる。そこで我々はレーザーのビームサイズ変換に凸レンズではなく焦点距離の長い球面ミラーの使用を検
1334 討した。

1335 4.4.2 球面ミラーによる長距離伝送

1336 前節の試験結果を踏まえて、レンズはやめて球面ミラーペアとし、焦点距離の長いペアによる平行光の実現
1337 を行った。

1338 実験方法

1339 球面ミラーは鏡面が球面上に凹んでおり、その焦点距離 f は球面の曲率半径を R とすると結像の式 [63] か
1340 ら $f = R/2$ で表せる。本研究では本実験の伝送距離と計算したビームサイズ (約 15 mm ϕ) 及び球面ミラーへ
1341 の入射角度 (20 $^\circ$) の観点から、 $f = R/2 = 25$ m、50 m と、焦点距離の長いミラー 2 種類を採用した。図
1342 4.4.17 は実際に使用した球面ミラーで、定盤にクランプで固定した様子である。図 4.4.18 に球面ミラーを用
1343 いて 400 m 伝送するセットアップの模式図を、図 4.4.19 にこのセットアップの光源光学系 (上) と中継光学
1344 系 (下) の様子を示す。集光部光学系セットアップは図 4.4.2 の下と同じである。

1345 図 4.4.18 や図 4.4.19 に示すように、2 枚の球面ミラーでプロファイルサイズを変えている。つまりこれら
1346 2 枚の球面ミラーの組み合わせが望遠鏡部分に当たる。ミラーの結像の式から考えると理想的には 1 段
1347 目の $f = 25$ m の球面ミラーから 25 m の所に 5 mm ϕ だったレーザービームサイズが最小となる箇所、
1348 ビームウエストがある。そしてそこから 2 倍の 50 m の所でレーザービームサイズも 2 倍の 10 mm
1349 ϕ となり、 $f = 50$ m の 2 段目球面ミラー (図 4.4.19 の中継光学系) を設置すれば「平行光」が出るはずであ

1350 る。しかしレーザーダイオードからの光は厳密には平行光ではない [63] ので実際のビームウエスト位置やプ
1351 ロファイルサイズが 2 倍になる箇所を探す必要がある。この実験で使用したレーザーでは 1 段目球面ミラー
1352 からビームウエストの間が 9.06 m、ビームウエストから 2 段目球面ミラーまでが 40 m だった。このビーム
1353 ウエストやプロファイルサイズが 2 倍になる箇所は定規など目盛のついたものにレーザーを当てながら端か
1354 ら目視で確認し、光学系の位置を調整しながら偶数枚目の球面ミラーからのレーザービームサイズが最も発散
1355 が緩やかに所を探した。

1356 ミラーの調整方法だが、レーザーからの光軸を 2 つの入射角 45° 用 2 インチ平面ミラーで調整して入射角
1357 20° 用 2 インチ平面ミラーの中心に入射させる。これら平面ミラーは設計された入射角の $\pm 5^\circ$ の範囲で 99
1358 % の反射率を達成するように作られている。以降も同様にして 1 つ手前のミラー調整で次のミラーの中心に
1359 光が来るように入射させる。最後の集光部光学系のミラーへも $f = 50$ m の球面ミラーの調整で光が入射する
1360 ようにする。またセットアップに使用している光学部品を以下に列挙する。集光部光学系は 節の図 4.4.1 や
1361 図 4.4.2 のセットアップと同じなのでそちらを参照されたい。各パーツの詳細は付録 B に記す。

1362 ● 光源光学系

1363 – レーザー光源部分

- 1364 * バッテリー (CPS1) 1 個
- 1365 * レーザーダイオードモジュール (CPS532-C2) 1 個
- 1366 * $\phi 25.4$ mm ネジ無しアダプタ 円筒形部品用 (AD11NT) 1 個
- 1367 * ポスト TR40/M-JP 及び $\phi 12$ mm ~ $\phi 12.7$ mm ポストホルダ 2 個ずつ
- 1368 * SM1 ネジ付き 30 mm ケージプレート (CP33/M) 3 個
- 1369 * レンズ用 z 軸移動ステージ (CT1A/M, $f = 50$ mm のレンズをこちらに取り付ける) 1 個
- 1370 * $\phi 6$ mm ケージアセンブリーロッド、長さ 304.8 mm (ER12) 4 本
- 1371 * クランプフォーク 2 個
- 1372 * M4 ネジ 2 個

1373 – 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)

- 1374 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1375 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1376 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1377 * ポスト TR40/M-JP 及び $\phi 12$ mm ~ $\phi 12.7$ mm ポストホルダ 1 個ずつ (テレスコープに近い
1378 側のミラーの台に使用)
- 1379 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1380 * M4 ネジ 2 本
- 1381 * クランプフォーク 2 個

1382 – 1 段目球面ミラー部分

- 1383 * 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 1 枚
- 1384 * $R = 50$ m 1 インチ直径球面ミラー 1 枚
- 1385 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1386 * 2 インチ高ピラーポスト (RS2P/M) 1 本
- 1387 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1388 * 4 mm 厚ポストスペーサ (RS4M) 1 枚

- 1389 * キネマティックマウント (KM200) 1 個
- 1390 * キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1391 * M4 ネジ 2 本
- 1392 * クランプフォーク 2 個
- 1393 - 光学定盤 (MB3060/M) 1 枚
- 1394 - 緑防振シート B タイプ 2 枚
- 1395 ● 中継光学系
- 1396 - 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 1 枚
- 1397 - $R=100\text{ m}$ 1 インチ直径球面ミラー 1 枚
- 1398 - 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1399 - 2 インチ高ピラーポスト (RS2P/M) 1 本
- 1400 - 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1401 - 4 mm 厚ポストスペーサ (RS4M) 1 枚
- 1402 - キネマティックマウント (KM200) 1 個
- 1403 - キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1404 - M4 ネジ 2 本
- 1405 - クランプフォーク 2 個
- 1406 - 光学定盤 (MB2530/M) 1 枚
- 1407 - 緑防振シート B タイプ 1 枚

1408 以上のセットアップでレーザー 400 m 伝送実験を実施した。実験日は 2023 年 10 月 23 日、場所は図 4.4.3
1409 に示した電子陽電子入射器棟クライストロンギャラリー部で実施し、この試験では、

- 1410 ● 400 m 伝送時の、レーザーの拡大と軌道ふらつきの様子
- 1411 ● 910 μW レーザーを 400 m 伝送した際の光ファイバーへの集光量

1412 の 2 点を測定した。実験場所は天井のエアコンによる風があり、このときはクライストロンが運転している
1413 状態で、これによる地面振動がある環境だった。

1414 球面ミラーによる 910 μW レーザー 400 m 伝送時のプロファイルとファイバー集光量測定結果

1415 このセットアップで 400 m 伝送した時のレーザービームサイズの様子をこれまでと同様に 1920×1080 ピ
1416 クセル、240 fps のフレームレート、.MOV ファイル形式で撮影した。その動画を 4.4.1 節で述べた方法で軌
1417 道ふらつきを解析したヒストグラムとそのガウスフィッティングの結果を図 4.4.20 に、4.4.1 節の方法で作成
1418 したレーザービームサイズの重ね合わせのプロットを図 4.4.21 に示す。考察はファイバー集光量結果とまと
1419 めて述べる。

1420 また図 4.4.22 に 4.4.2 節で述べたセットアップ (図 4.4.18 及び 4.4.19) で 910 μW レーザーを 400 m 伝
1421 送して光ファイバーへの集光量をパワーセンサとパワーメータコンソールで 0.3 秒毎に計 5 分間測定した結
1422 果を示す。

1423 通行による遮断を除く 5 分間における平均値と標準偏差は $(642\pm 72)\mu\text{W}$ と、凸レンズを用いた光源光学系
1424 によるレーザー伝送時の $581\mu\text{W}\pm 42\mu\text{W}$ より高い値で集光できた。これは要求光量の 21 倍以上の光量であ
1425 る。球面ミラーによる伝送と凸レンズによる伝送でのプロファイルの重ね合わせの図、図 4.4.21 と図 4.4.14

1426 の 400 m 地点の結果を比較すると球面ミラーによる伝送の方がプロファイルはより小さく対称的な形に集束
1427 していることが確認できる。焦点距離を長いミラーに変えたことでプロファイルサイズを変えたレーザーを伝
1428 送している距離が凸レンズの時より短くなったため、プロファイルがコンパクトになり集光量も向上したと考
1429 えられる。

1430 また図 4.4.23 は 0.3 s 毎にパワーメーターで測定したファイバー集光量データ 1 次元ヒストグラムにした
1431 結果である。ただし通行による遮断のデータを除いて、ヒストグラムの横軸は光量 [μW]、縦軸は頻度を対数
1432 で取った。図 4.4.23 からレーザーの不安定性によって要求光量の $30 \mu\text{W}$ を下回ることが無かったことが確認
1433 できる。しかしファイバー集光量の標準偏差は $72 \mu\text{W}$ と凸レンズによる光源光学系でレーザー伝送した時の
1434 $42 \mu\text{W}$ より大きくなっている。また動画解析による軌道ふらつきについて、図 4.4.20 と図 4.4.10 及び 4.4.11
1435 の 400 m 地点の結果を比べると球面ミラーの方ではフィットした標準偏差が水平方向は 5.2 mm、垂直方向は
1436 5.5 mm なのに対し、凸レンズの方では水平、垂直方向共に 4 mm 以内に収まっている。これは凸レンズによ
1437 る光源光学系でレーザー伝送した時はクライストロンが停止して地面振動が無かったのに対して今回の球
1438 面ミラーを用いた実験ではクライストロンが作動していたことによる地面振動があったためと考えられる。ま
1439 た凸レンズの場合は光学系の設置が 2 ヶ所だったが球面ミラーの場合はそれよりも 1 ヶ所多い 3 ヶ所に設置
1440 していた。よって 3 ヶ所のうちどれか 1 ヶ所でも傍で振動があるとレーザー軌道のふらつきに影響を及ぼす
1441 と考えられる。そのため後者の方がより地面振動を拾いやすかったと考えられる。

1442 だが、焦点距離の和に対する球面ミラーの中心ずれのミスアライメント値が大幅に改善され、400 m 輸送後
1443 のプロファイルも円に近くなり、さらに集光効率も確かに上昇した。またレーザーアポートシステムの実装先
1444 は加速器トンネル内の曲線部分であり、ミラーでレーザー軌道を曲げなければならない。レンズはケージアッ
1445 センブリロッドのような金属棒で作った直線状のケージ内に配置する方式なので軌道を曲げるにはレンズ通過
1446 後にさらにミラーを適当な角度をつけて置く必要がある。一方で球面ミラーは反射させつつレーザービームサ
1447 イズを変えることが出来る。ミラーの反射率やレンズの透過率も 100 % ではないのでレーザーシステム構築
1448 に必要なパーツ数は少ない方が良い。従ってこの点を考慮すると球面ミラーでレーザーシステムを構築した方
1449 が必要なパーツ数を減らせるので球面ミラーの伝送方法がより良いと言える。

1450 4.4.3 加速器トンネル曲線部を想定した複数の中継光学系による長距離伝送

1451 以上の球面ミラーによる伝送は球面ミラー 2 つだけ用いていたが、実装先の加速器トンネル内が曲線であ
1452 ることを踏まえると中継光学系を複数設置して加速器トンネルの曲線部を輸送するためには、中継ミラーによ
1453 り反射させながら輸送しなければならない。そこで中継光学系を 2 つ増やした、加速器トンネルのアーク部
1454 輸送に必須な中継ミラーありのセットアップでも 250 m レーザー伝送する実験を行った。この距離は本番と
1455 同じ距離である。

1456 実験方法

1457 球面ミラーを用いた光源光学系と 1 段階中継光学系の配置に中継光学系 2 つを追加して 250 m 伝送する
1458 セットアップを図 4.4.24 に、各光学系の様子を図 4.4.25 に示す。中継ミラーも球面ミラーにすることで輸送
1459 で広がったレーザーを細くした。

1460 ビームウエスト位置が上記の球面ミラー伝送の時と異なるのは加速器トンネル設置用にレーザーダイオード
1461 含めてパーツを新規購入したため、ビームウエストや各中継光学系の最適な位置を探し直したことによる。各
1462 光学系間の適切な距離は 4.4.2 節で扱った実験時と同様に目視で探した。

1463 図 4.4.24 において、①と②部分は基本的に図のセットアップの光源部、中継と同様である。それら後段の
1464 ③・④で球面ミラーの焦点距離の組み合わせを順に $f = 50\text{ m}$ 、 25 m にしてレーザービームサイズを半分にする
1465 ようにしている。以下にセットアップ構築に用いた光学パーツを列挙する。各パーツの詳細は B に記す。

1466 ● 光源光学系①

1467 - レーザー光源部分

- 1468 * 5 VDC 出力 AC アダプタ、2.5 mm フォノプラグ付き (LDS5) 1 個
- 1469 * レーザーダイオードモジュール (CPS532-C2) 1 個
- 1470 * $\phi 25.4\text{ mm}$ ネジ無しアダプタ 円筒形部品用 (AD11NT) 1 個
- 1471 * ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12\text{ mm} \sim \phi 12.7\text{ mm}$ ポストホルダ (PH40E/M) 1 個ずつ
- 1472 * キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1473 * クランプフォーク 1 個
- 1474 * M4 ネジ 1 個

1475 - 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)

- 1476 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1477 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1478 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1479 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1480 * M4 ネジ 2 本
- 1481 * クランプフォーク 2 個

1482 - 1 段目球面ミラー部分

- 1483 * 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 1 枚
- 1484 * $R = 50\text{ m}$ 1 インチ直径球面ミラー 1 枚
- 1485 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1486 * 2 インチ高ピラーポスト (RS2P/M) 1 本
- 1487 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1488 * 4 mm 厚ポストスペーサ (RS4M) 1 枚
- 1489 * キネマティックマウント (KM200) 1 個
- 1490 * キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1491 * M4 ネジ 2 本
- 1492 * クランプフォーク 2 個

1493 - 光学定盤 (MB2530/M) 1 枚

1494 - 緑防振シート B タイプ 1 枚

1495 ● 中継光学系②、③

- 1496 - 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 1 枚
- 1497 - $R = 100\text{ m}$ 1 インチ直径球面ミラー 1 枚
- 1498 - 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1499 - 2 インチ高ピラーポスト (RS2P/M) 1 本
- 1500 - 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1501 - 4 mm 厚ポストスペーサ (RS4M) 1 枚

- 1502 – キネマティックマウント (KM200) 1 個
- 1503 – キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1504 – M4 ネジ 2 本
- 1505 – クランプフォーク 2 個
- 1506 – 光学定盤 (MB2530/M) 1 枚
- 1507 – 緑防振シート B タイプ 1 枚
- 1508 ● 中継光学系④
- 1509 – 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 1 枚
- 1510 – $R = 50\text{ m}$ 1 インチ直径球面ミラー 1 枚
- 1511 – 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 1 本
- 1512 – 2 インチ高ピラーポスト (RS2P/M) 1 本
- 1513 – 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 1 枚
- 1514 – 4 mm 厚ポストスペーサ (RS4M) 1 枚
- 1515 – キネマティックマウント (KM200) 1 個
- 1516 – キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1517 – M4 ネジ 2 本
- 1518 – クランプフォーク 2 個
- 1519 – 光学定盤 (MB2530/M) 1 枚
- 1520 – 緑防振シート B タイプ 1 枚
- 1521 ● レーザー集光部光学系
- 1522 – 1 インチミラーを張り付けた 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミ
- 1523 ラー 1 セットを作る)
- 1524 – 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)
- 1525 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1526 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1527 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1528 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1529 * M4 ネジ 2 本
- 1530 * クランプフォーク 2 個
- 1531 – テレスコープ部分
- 1532 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1533 * 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1534 * $\phi 6\text{ mm}$ ケージアセンブリーロッド、長さ 304.8 mm (ER12) 4 本
- 1535 * $\phi 6\text{ mm}$ ケージアセンブリーロッド、長さ 203.2 mm (ER8) 4 本 (ER12, ER8 1 本ずつ用いて
- 1536 508 mm 長のケージアセンブリーロッドを 4 本作成して使用.)
- 1537 * 60 mm ケージプレート (LCP34/M) 2 個
- 1538 * ケージシステム変換アダプタ 1 個
- 1539 * 2 インチレンズ 焦点距離 $f = 200\text{ mm}$ (LA1979-A-ML) 1 個
- 1540 * 1 インチレンズ 焦点距離 $f = 35\text{ mm}$ (LA1027-A-ML) 1 個
- 1541 * クランプフォーク 2 個

- 1542 – 2 インチ軌道調整用ミラー 2 セット (以下全て 1 つずつ用いてミラー 1 セットを作る)
- 1543 * 入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー 2 枚
- 1544 * 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1545 * 5mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1546 * キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1547 * M4 ネジ 2 本
- 1548 * クランプフォーク 2 個
- 1549 – 最終集光部分 (集光レンズ以降の箇所)
- 1550 * マルチモードレンズ及び AD15NT 1 個ずつ
- 1551 * キネマティックマウント (KM100) 1 個
- 1552 * M4 ネジ 1 本
- 1553 * マルチモード光ファイバー (M124L01)
- 1554 * フォトダイオードパワーセンサ (S120C) とファイバーアダプターキャップ (S120-FC) 1 個
- 1555 ずつ
- 1556 * 小型パワー&エネルギーメーターコンソール (PM100D) 1 個
- 1557 * ポスト (TR40/M-JP) 及び $\phi 12\text{ mm} \sim \phi 12.7\text{ mm}$ ポストホルダ (PH40E/M) 1 個ずつ
- 1558 * クランプフォーク 1 個
- 1559 – 光学定盤 (MB3060/M) 1 枚

1560 以上のセットアップで実験を実施した。実験日は 2023 年 11 月 22 日、場所は図 4.4.3 に示した電子陽電子
 1561 入射器棟クライストロンギャラリー部で実施し、910 μW レーザーを 250 m 伝送した際の光ファイバーへの
 1562 集光量を測定した。実験場所は天井のエアコンによる風があり、このときはクライストロンが運転している状
 1563 態で、これによる地面振動がある環境だった。

1564 図 4.4.26 に図 4.4.24 のセットアップで 250 m 伝送した時のファイバー集光量を 6 秒間毎に平均値と標準
 1565 偏差を計算してプロットしたグラフを示す。測定時間は 5 分とした。

1566 この 5 分間測定における平均値と標準偏差は $(694 \pm 27)\mu\text{W}$ であった。輸送距離が短いこともあるが、中継
 1567 ミラーによるロスがあるにもかかわらず、4.4.2 節の結果よりも集光量を多くすることができた。レーザーの
 1568 広がりや球面ミラーの効果で小さくしたためと考えられる。

1569 図 4.4.27 より、この測定でも要求光量 30 μW を下回ることは無かったことが確認できる。

1570 4.5 加速器トンネル実装予定場所での 244 m レーザー伝送

1571 4.5.1 実験方法

1572 図 4.4.24 の各光学系間の距離をもとに、D06V1 から D6/D7 境界のイエローフェンスまでの約 244 m
 1573 の間に、図 4.1.2 のようなケーブルラックに各光学系を取り付けてレーザー伝送実験を実施した。ここでレー
 1574 ザー伝送予定距離が 400 m から 244 m に変更されている理由だが、2023 年 11 月に実装予定場所の D06V1
 1575 辺りから D07 の現場検証を行ったところ、図 4.5.1 の左、青い丸で示した位置に図 4.5.1 の右に示すような堅
 1576 穴が確認された。D06V1 から 250 m の距離に位置するこの堅穴の真上にはキッカー電源があり、そこまで堅
 1577 穴が繋がっている。従って D06V1 から 400 m 先の D07 電源棟にまで伝送せずともこの堅穴口までレーザー
 1578 伝送すれば後は光ケーブルで送信することでアポートシステムに組み込むことが出来る。D06V1 からの LM

1579 信号を光ケーブルで送信する場合もこの堅穴を利用する予定である。レーザー伝送の場合と同じ経路となる
1580 のでレーザー伝送によるゲインはこの 250 m 間を信号送信する媒質の屈折率の違いによる速度の差のみとな
1581 る。ケーブル送信に対するゲインは、ケーブルの屈折率 1.45、光速 c を用いて $(250/((1/1.45)c)) - 250/c \approx$
1582 $0.4 \mu\text{s}$ となる。この時間にほぼ光速で走る陽電子ビームは約 120 m 移動するのでその分だけ SBL による被
1583 害も軽減できると考えられる。またルミノシティ向上の為に今後ビーム電流を増やして運転する状況となる。
1584 SBL による放射線量はビーム電流に比例するので SBL 被害軽減の観点から見て、この $0.4 \mu\text{s}$ 速いアボートの
1585 意味は大きい。さらに将来的には D05 からのアボートリクエスト信号もレーザー伝送を検討しており、D05
1586 ~ 堅穴間は 600 m となるため信号伝達時間ゲインの増大が予想される。図 4.5.2 に設置したセットアップの
1587 模式図 (上) とその各光学系の配置箇所 (下) を示す。各光学系に付けた①から⑤の番号が図の上下で対応し
1588 ている。D06V1 に置かれた光源から出力されたレーザーは②から⑤の中継を通過して D6/D7 の境界の集
1589 光光学系に入力される。加速器トンネル内の構造物を避けながら、4.4.3 項で述べたセットアップの各光学系
1590 の間の距離と概ね同じ値で配置した。

1591 また 4.5.3 にラックへ設置した各光学系の様子を示す。各光学系は L 字プレート (図 4.5.4 左) の上に置
1592 き、定盤の 4 つ角をネジで固定する。今回は、そのセットを L 字プレートの短い側を 2 ヶ所 C クランプ (図
1593 4.5.4 右) でケーブルラックと一緒に挟んで仮止めした。

1594 最下流の平面ミラー 2 つから成る中継⑤は入射器棟ギャラリーでの実験ではないものだが、これは集光光
1595 学系にレーザーを入射させるための役割を担っている。

1596 光源光学系と中継光学系①から③は 4.4.3 節で説明した光学系と同じなのでそちらを参照されたい。以下
1597 に中継光学系⑤に用いた光学パーツを列挙する。各パーツ詳細は B にある。

- 1598 ● 入射角 20° 用 2 インチ直径平面ミラー 2 枚
- 1599 ● 1.5 インチ高ピラーポスト (RS1.5P/M) 2 本
- 1600 ● 5 mm 厚ポストスペーサ (RS5M) 2 枚
- 1601 ● キネマティックマウント (KM200) 2 個
- 1602 ● M4 ネジ 2 本
- 1603 ● クランプフォーク 2 個
- 1604 ● 光学定盤 (MB2530/M) 1 枚

1605 本実験ではより長時間測定できるよう、USB パワーメータ (PM16-120, 標準型フォトダイオードセンサ付
1606 き) と専用のソフトウェア (NI VISA) [64] をインストールしたパソコンを使用した (図 4.5.5)。これらを図
1607 4.5.6 のように置いて 0.1 s 毎にファイバー集光量を測定した。

1608 以上のセットアップで 2023 年 11 月 27 日、28 日に $910 \mu\text{W}$ レーザーを 244 m 伝送した際の光ファイバー
1609 への集光測定を実施した。27 日の午後、28 日の午前と午後の 3 回行い、測定時間は順に 1 時間、1 時間、
1610 2 時間実施した。D06V1 ~ イエローフェンス間 250 m の実験環境として、リング内側の壁の上側にエアコ
1611 ンが幾つもあり、断続的に風が出る。また光学系①と②の中間地点にはリング内側の壁に高さ、幅ともに数
1612 メートルの送風機が 1 台あり、1 時間 ~ 2 時間の時間スケールで送風と停止を繰り返していた。

1613 4.5.2 結果

1614 11 月 27 日、28 日に 244 m 伝送した時のレーザーを撮影し、今までと同様に重ね合わせの図と軌道ふ
1615 らつきのヒストグラムを作成した。動画撮影は両者ともに 1920×1080 ピクセル、 240 fps のフレームレー

1616 ト、.MOV ファイル形式で行った。撮影時間は 27 日、28 日の順に 16 秒、15 秒である。

1617 図 4.5.7 は 2023 年 11 月 27 日の午後に D06V1 から イエローフェンスまで 244 m 伝送したレーザーの撮
1618 影動画から作成した重ね合わせの輝度の図である。4.4.3 項の測定では動画の測定を怠ったため、4.4.3 項の結
1619 果を再現出来たのか比較することは不可能である。だが 4.4.2 項の結果と同様にレーザーのプロファイルが円
1620 形であることが確認できる。ここから加速器トンネル内でも LINAC での試験同様に、球面ミラーを用いた伝
1621 送システムの構築を行えたと評価できる。

1622 図 4.5.8 は図 4.5.7 と同じデータでレーザーの軌道ふらつきの解析結果である。

1623 図 4.5.9 は 2023 年 11 月 28 日の午前に D06V1 から イエローフェンスまで 244 m 伝送したレーザーの撮
1624 影動画から作成した重ね合わせの輝度の図である。

1625 図 4.5.10 は図 4.5.9 と同じデータでレーザーの軌道ふらつきの解析結果である。

1626 また計 3 回実施した光ファイバー集光の試験結果を図 4.5.11 から 4.5.16 に示す。図 4.5.11 は 27 日の午
1627 後に 910 μ W レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m で 1 時間伝送した時のファイバー集光量を
1628 プロットしたグラフである。

1629 図 4.5.12 は図 4.5.11 と同じ光ファイバー集光量のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果である。

1630 図 4.5.13 は 28 日の午前に前日と同じ条件でレーザーを伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグ
1631 ラフである。

1632 図 4.5.14 は 28 日の午前に前日と同じ条件で 1 時間測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒストグラ
1633 ムで表した結果である。

1634 図 4.5.15 は 28 日の午後に前日と同じ条件で伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグラフである。

1635 図 4.5.16 は 28 日の午後に前日と同じ条件で 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整前の 0 s
1636 から 3600 s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果である。

1637 図 4.5.17 は 28 日の午後に前日と同じ条件で 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整後の 5000 s
1638 から測定終了の 7800 s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果である。

1639 4.5.3 考察

1640 図 4.5.7、4.5.9 のプロファイルの測定結果から 27 日、28 日共に 244 m 伝送に対して、プロファイルに歪
1641 みなどの変化が少ないことがわかった。レーザーの広がりや球面ミラーの効果で小さくできたためと考えら
1642 れる。

1643 図 4.5.8、4.5.10 から 27 日、28 日共に軌道ふらつきは水平、垂直方向に違いは見られないことが分かった。

1644 図 4.5.12、4.5.14、4.5.16、4.5.17 からいずれの場合もアポトリガーモジュールからの要求光量 30 μ W
1645 を下回らなかったことが分かる。

1646 次にファイバー集光量を測定時間に対してプロットした図 4.5.11、4.5.13、4.5.15 について述べる。図
1647 4.5.11 では、光量が低下するとばらつきも大きくなっており、ビーム中心がずれると、ビームのふらつきが強
1648 度に大きく影響すると理解できるが、図 4.5.15 では、光量が下がった所で光量のばらつきが小さい。このと
1649 きは、空調が止まっていたなどの、ふらつきが小さくなる要因があったと考えられる [65]。

1650 また全てにおいて数十分に及ぶゆっくりした光量変化が確認できる。これはレーザー軌道が最初に設定した
1651 ところからずれたため生じる現象だがその原因には以下の点が考えられる。

- 1652 ● トンネル内のエアコンのサーモスタットにおいて、一定に保とうとする温度に幅があったり、その他導

1653 入されている加速器機器の作動による放熱などでトンネル内の温度分布に変化がある。その変化でレー
1654 ザー軌道が揺らいだ。

1655 ● 上記に付随することだが、今回は各光学系をケーブルラックに止めていたが、そのケーブルラックは金
1656 属製であった。そのためトンネル空間の温度変化に伴ってラックに伸び縮みなどの変形が生じ、ミラー
1657 からレーザーがゆっくりとはみ出た。

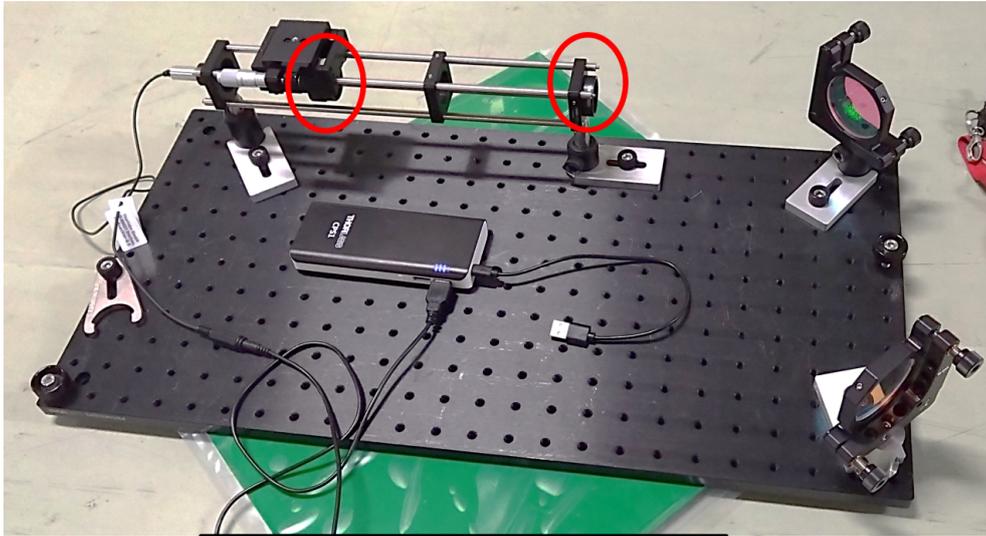
1658 ● ラックに固定している C クランプが緩んで、どこかの光学定盤全体が傾いたことで最後の集光量低下
1659 を引き起こした。

1660 2 つ目のラックの変形による集光量変動への寄与はラック固定から光学系を設置する檜を地面に設置すること
1661 で回避できる可能性があるが、トンネル内機器の配置の都合上、そのスペース確保が難しい。

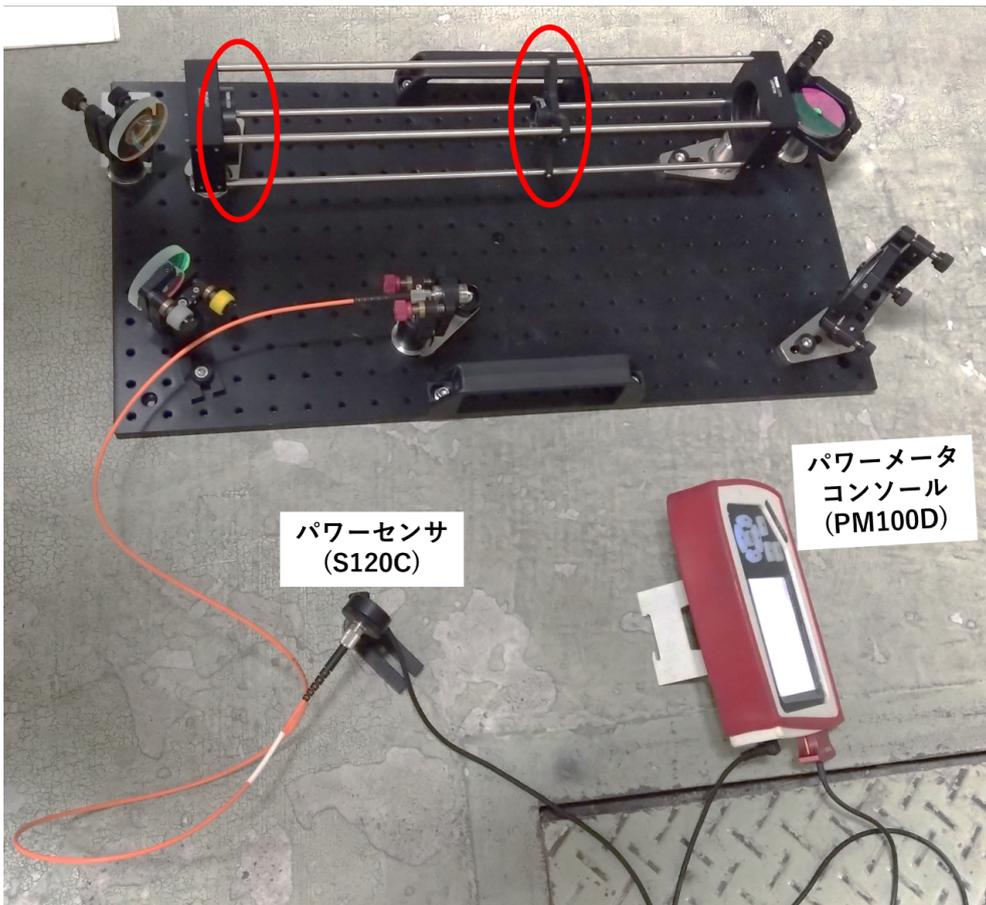
1662 しかし今回の結果から短い周期の光量変動は確認されなかった。また図 4.5.15 において、集光量が低下し
1663 た後光源光学系のレーザーをミラー角度を手動で調整すると再度集光量を回復させることが可能であった。こ
1664 れはミラーの角度調整だけでレーザー軌道の制御が可能であることに他ならない。

1665 よって例えば図 4.5.18 に示すように位置センサーを設置し、その測定値によるフィードバック信号でピエ
1666 ゴミラーを制御することで本実験結果で確認された集光量変動を抑制できると考えられる。

1667 ピエゾミラーによる軌道制御により数カ月間に及び軌道を安定させられると期待できる。



レーザー送信側光学系



レーザー集光側光学系

図 4.4.2 レーザー 400 m 伝送実験における光源部及び集光部光学系セットアップの様子。

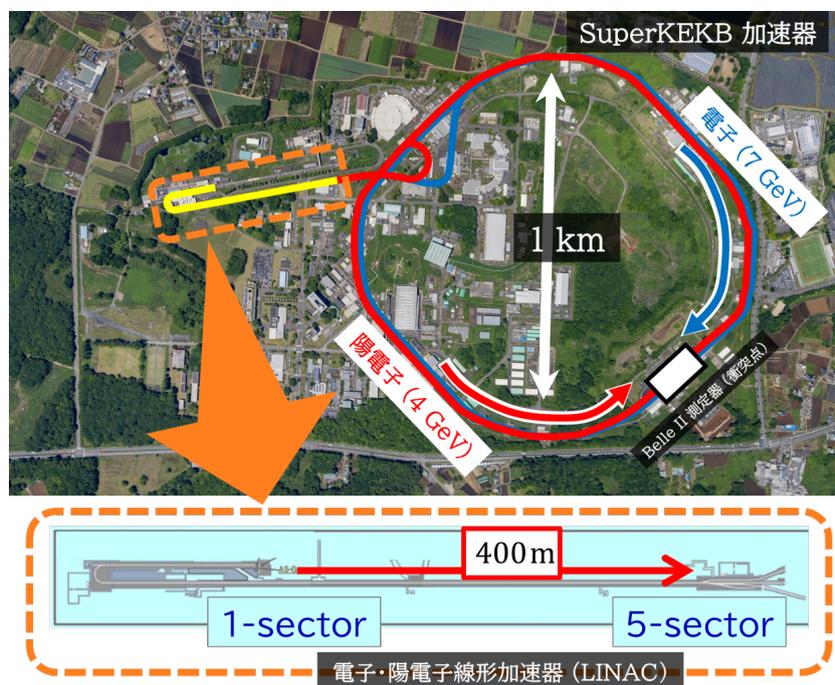


図 4.4.3 SuperKEKB リングに対する入射器棟の位置関係及びレーザー伝送した 400 m の取り方.

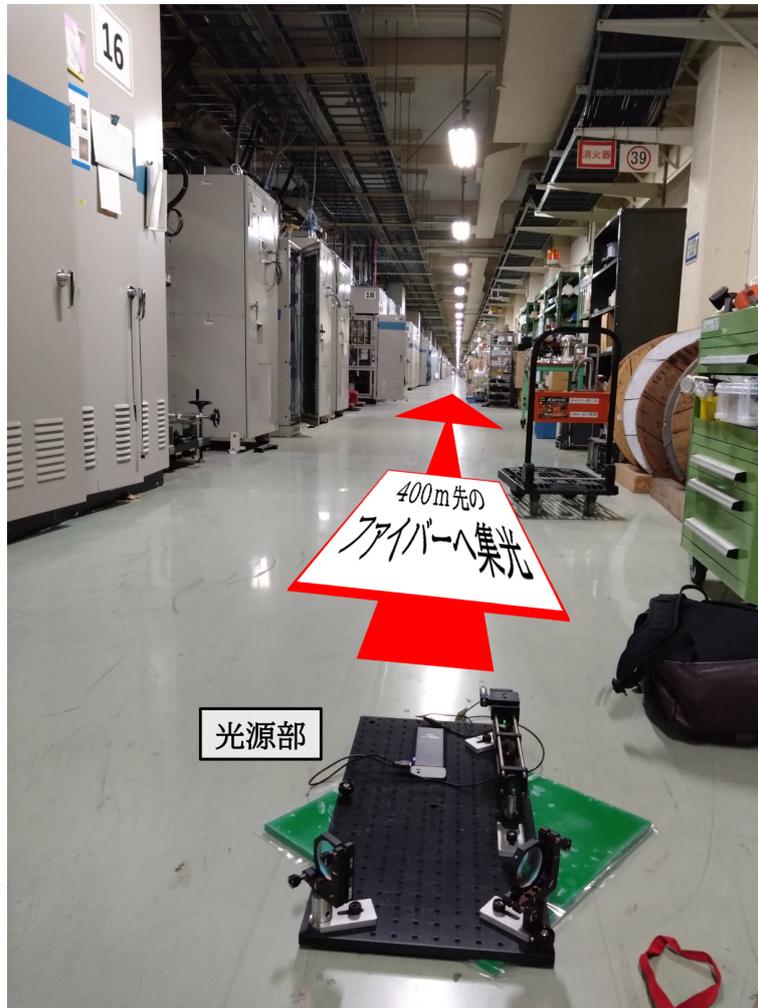


図 4.4.4 レーザー光源側から見た 400 m の様子. 赤矢印の先にファイバーなどの集光部光学系を設置している.

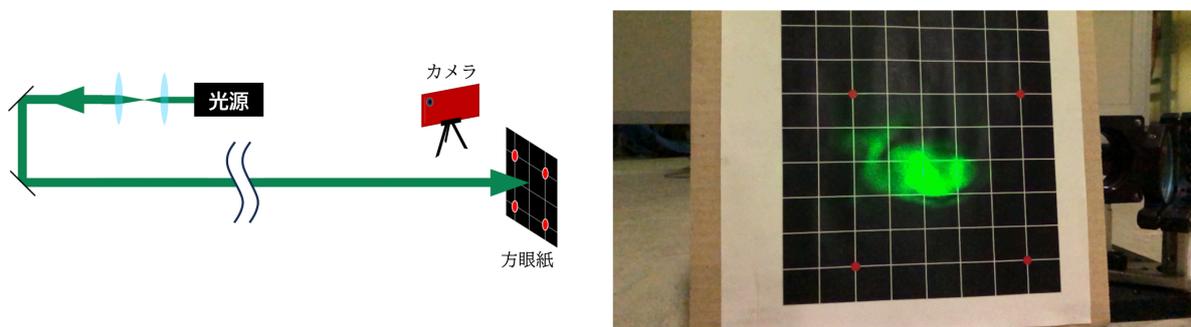


図 4.4.5 長距離伝送レーザーの方眼紙に照射される様子のスマートフォンによる撮影方法 (左) とカメラの角度 (右). 右図は 400 m 伝送時に撮影した動画の内、1 枚の静止画.

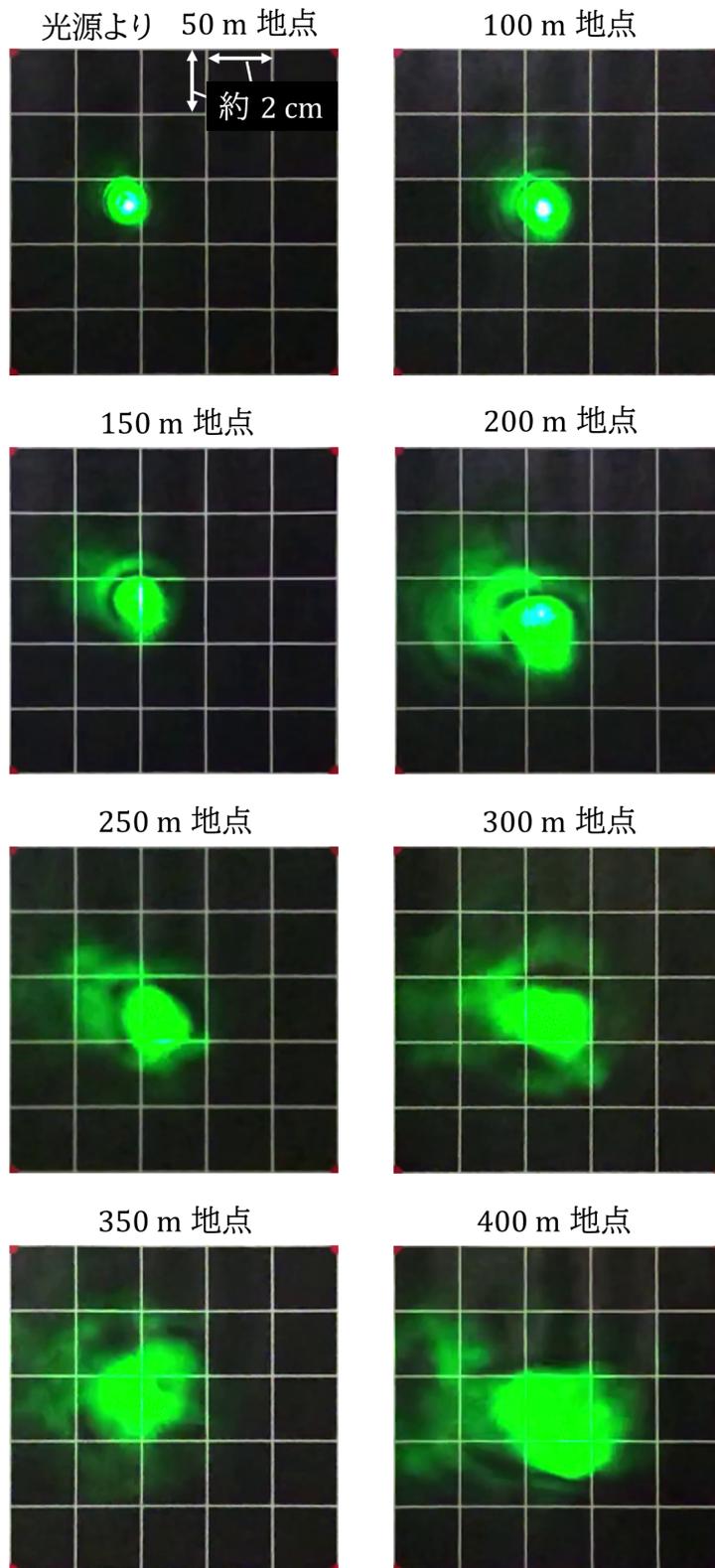
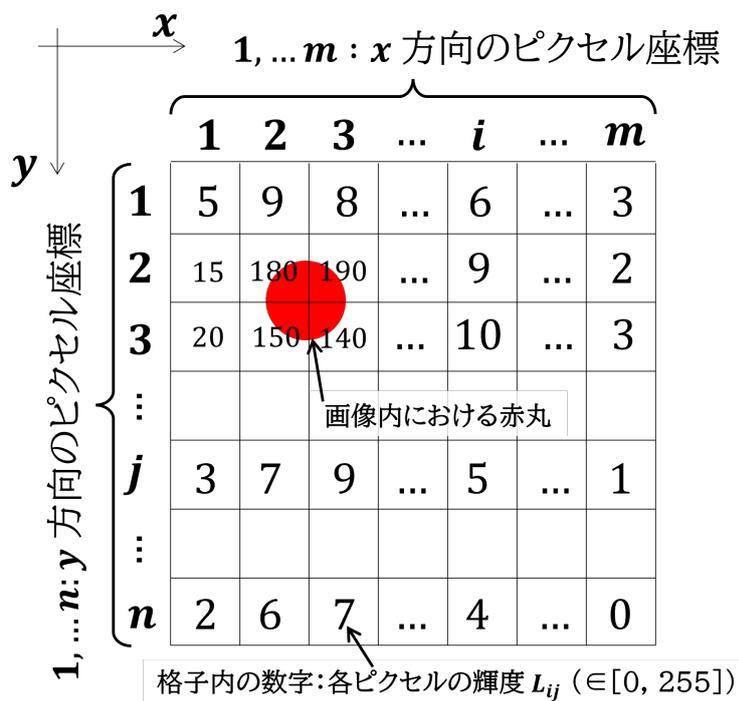


図 4.4.6 光源より 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、400 m の地点において、1 マス約 2 cm 角の方眼紙に照射した時のレーザービームサイズ拡大の様子。



赤丸の x 方向のピクセル位置 (重心位置) = $(\sum_i^m (i \sum_j^n L_{ij})) / (\sum_i^m \sum_j^n L_{ij})$
 赤丸の y 方向のピクセル位置 (重心位置) = $(\sum_j^n (j \sum_i^m L_{ij})) / (\sum_i^m \sum_j^n L_{ij})$

図 4.4.7 フレーム画像に写った 4 つの内、1 つの赤丸のピクセル位置 (重心位置) の求め方を表した模式図. 180、190 など格子内の各数字は各ピクセルの輝度 L_{ij} . この L_{ij} を重みの値として扱い、ピクセル座標で加重平均 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{24} 、 I_{34} は消失点と G を結ぶ線分と赤丸を 4 頂点とする四角形の各辺との各交点.

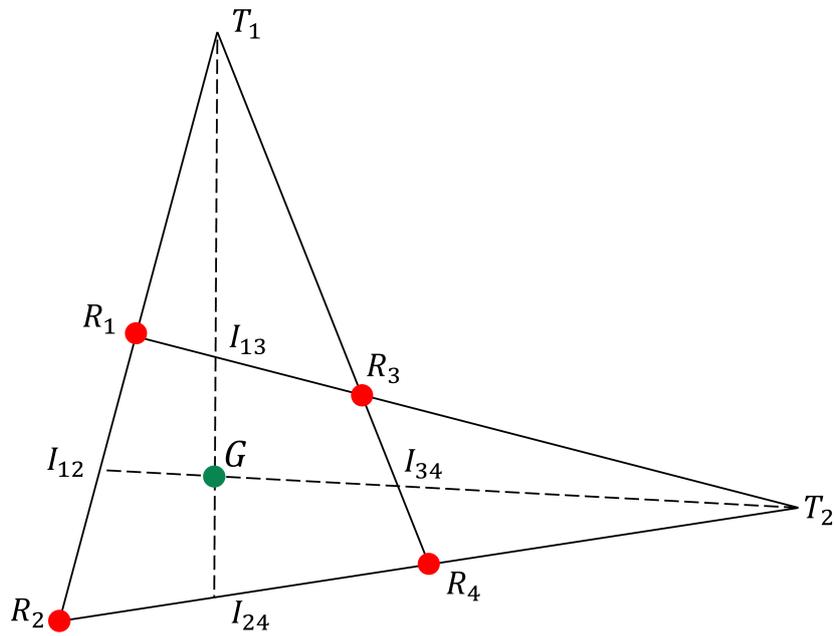


図 4.4.8 方眼ボードにおける、赤丸 4 つ R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 とそれらに対応する 2 つの消失点 T_1 、 T_2 の模式的な関係図. G はレーザーの重心位置. I_{12} 、 I_{13} 、 I_{24} 、 I_{34} は消失点と G を結ぶ線分と赤丸を 4 頂点とする四角形の各辺との各交点.

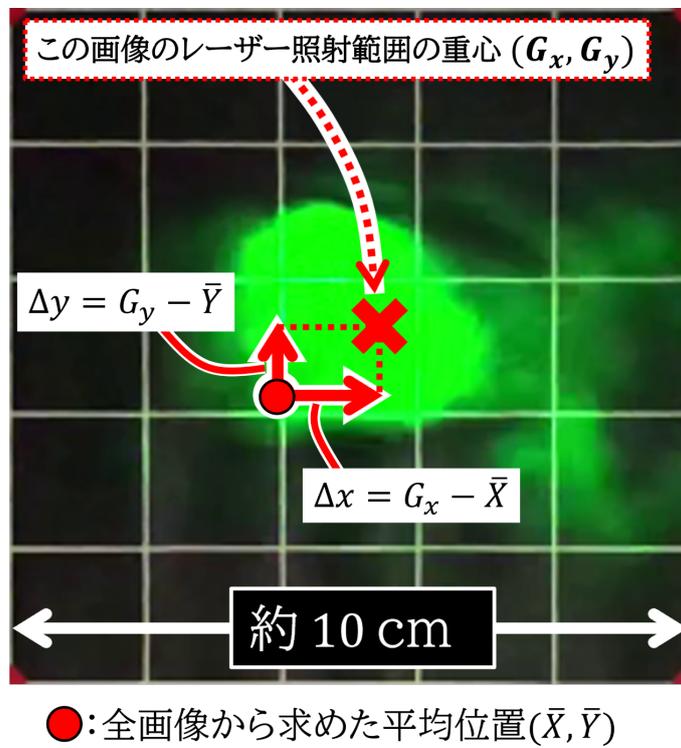


図 4.4.9 輝度の加重平均より求めた重心位置 (G_x, G_y) の平均位置 (\bar{X}, \bar{Y}) に対する相対変位 ($\Delta x, \Delta y$) の取り方.

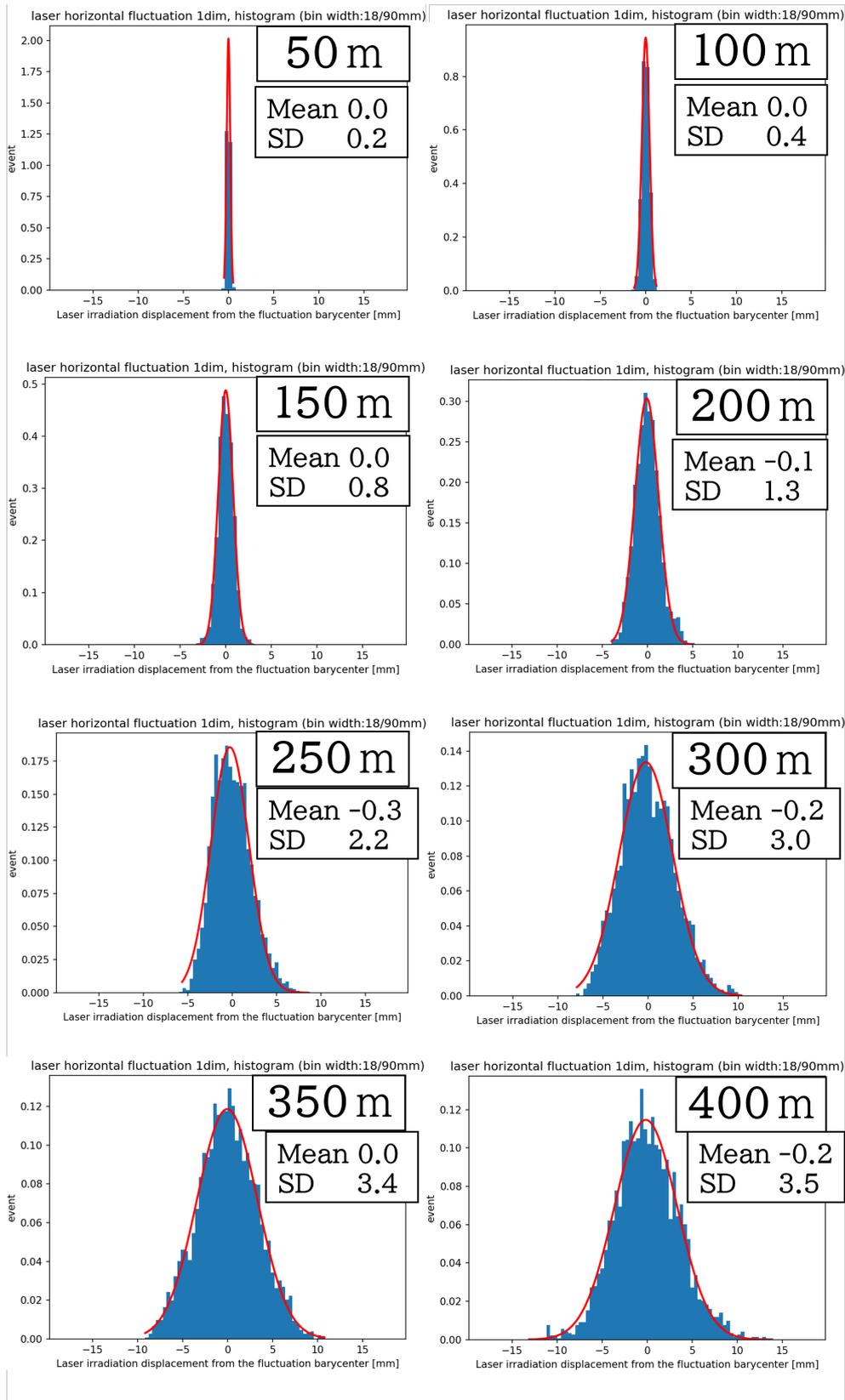


図 4.4.10 各伝送距離における重心位置の水平方向の相対変位 (Δx) を詰めたヒストグラム. 但し縦軸は全イベント数で規格化している. 赤線はガウスフィッティング. フィッティング結果の平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位はミリメートル.

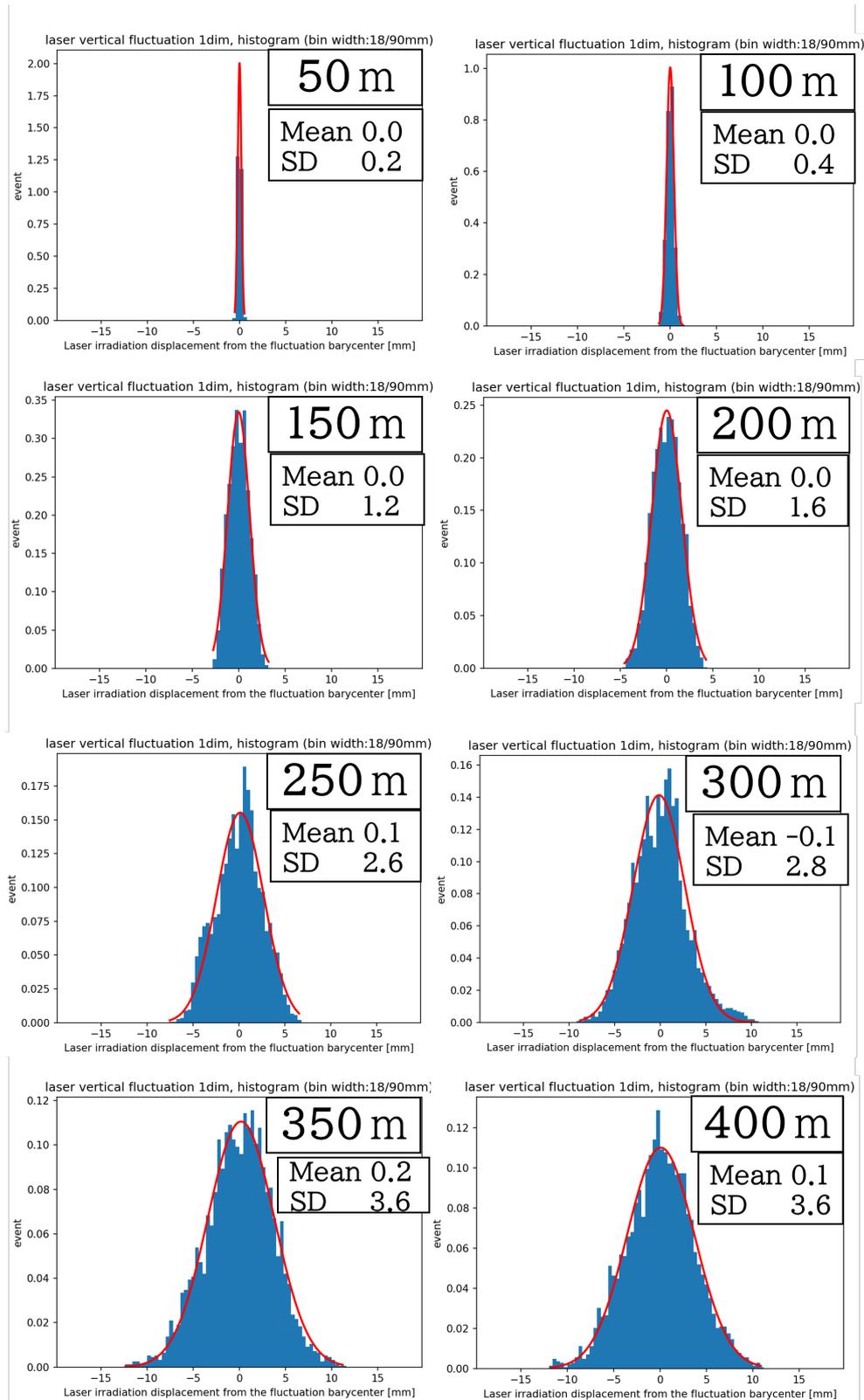


図 4.4.11 各伝送距離における重心位置の垂直方向の相対変位 (Δy) を詰めたヒストグラム。縦軸は全イベント数で規格化。赤線はガウスフィッティング。フィッティング結果の平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位はミリメートル。

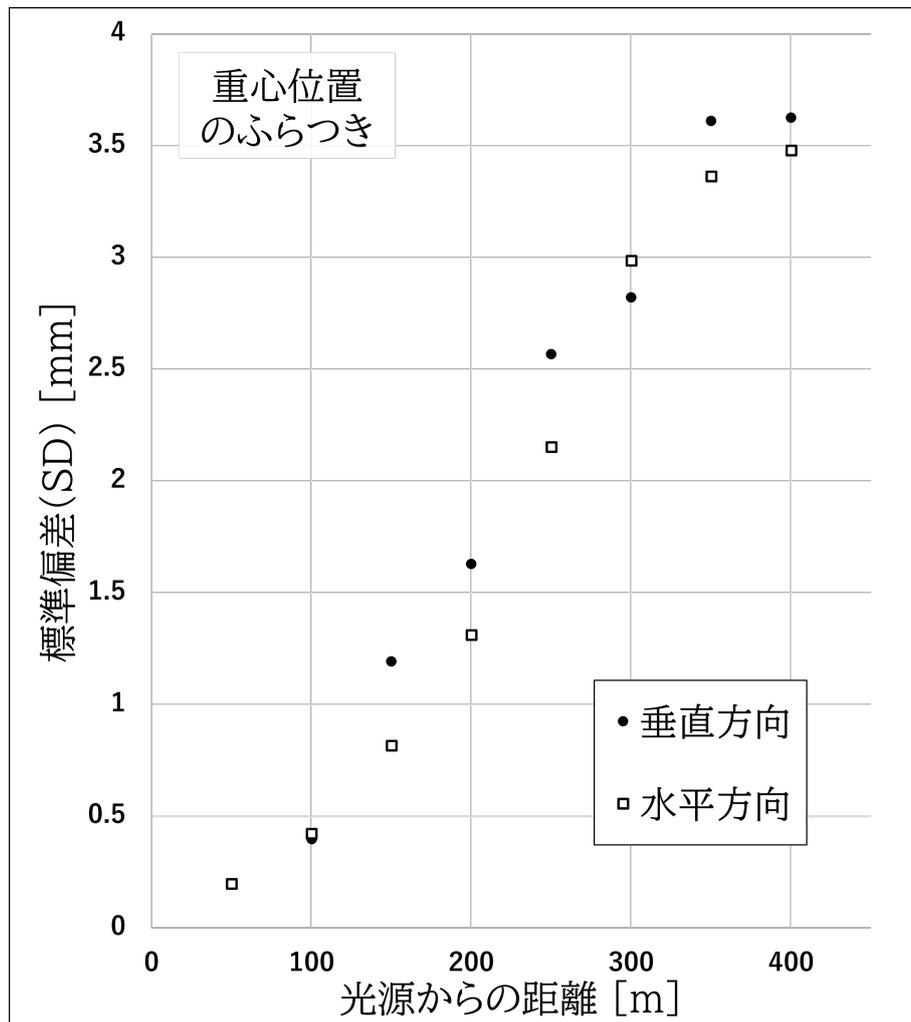


図 4.4.12 図 4.4.10 及び 4.4.11 のフィットから得られた σ を伝送距離に対してプロットしたグラフ. 伝送距離に対する軌道ふらつきの単調増加が確認できる.

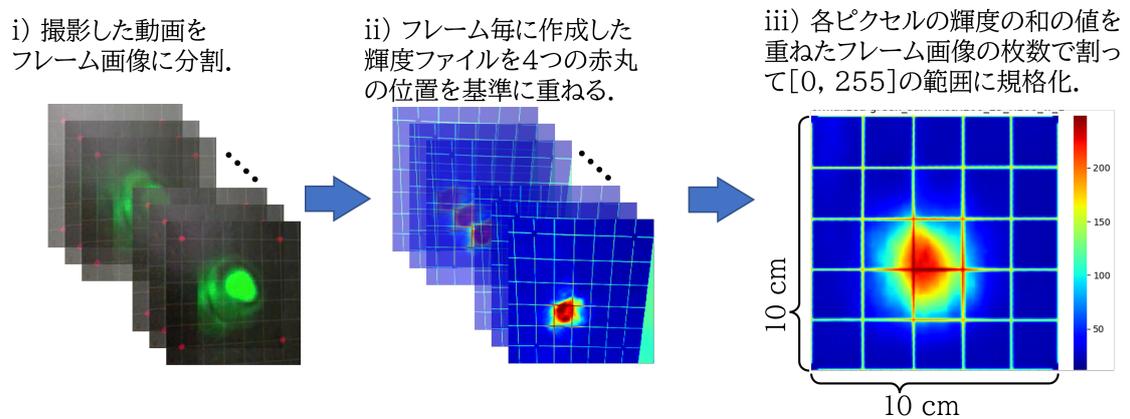


図 4.4.13 方眼ボードの赤い丸の位置を基準にしてフレーム画像を重ね合わせる手順. [0, 255] の輝度範囲で撮影したので、最後に重ね合わせたフレーム画像の枚数で割って規格化している.

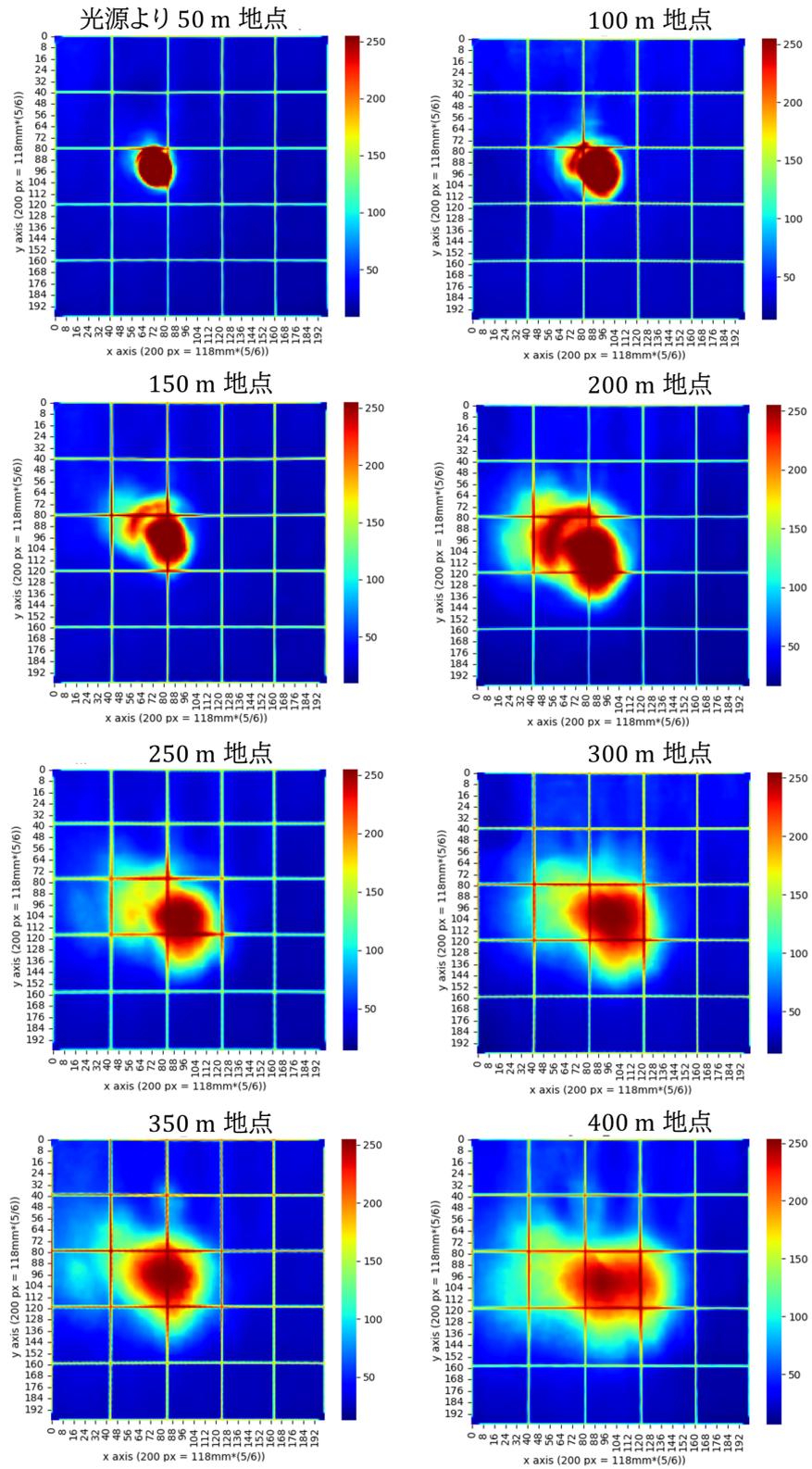


図 4.4.14 各伝送距離 8 地点に対し、各フレームを方眼ボードの 4 つの赤い丸を基準に重ね合わせた輝度の図。縦横の辺は共に 200 px で、これが実際の長さでは赤丸間距離の $19\frac{2}{3} \times 5 = 98\frac{1}{3}$ mm なので $(98\frac{1}{3})/200$ mm/px ≈ 0.492 mm/px をかけて mm に換算出来る。

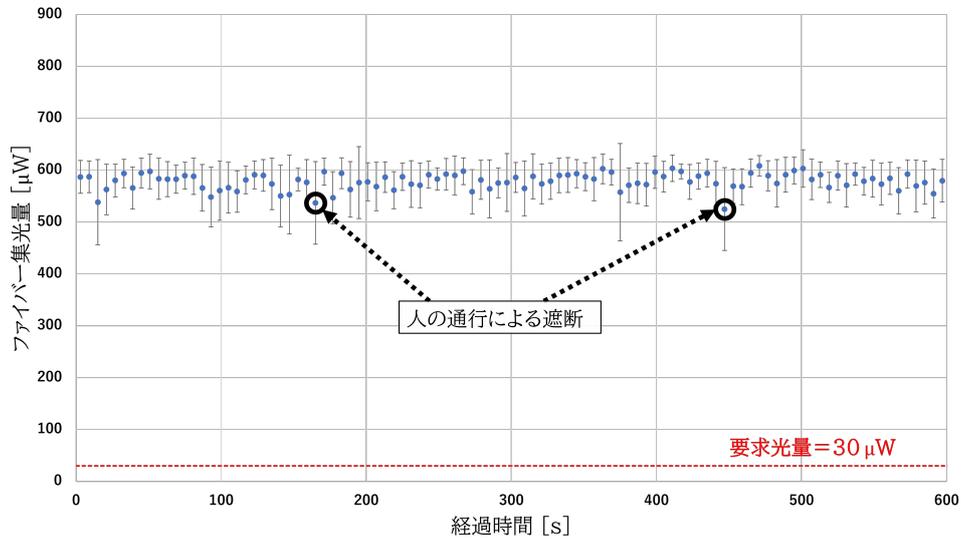


図 4.4.15 4.4.2 節で述べたセットアップで $910\ \mu\text{W}$ レーザーを $400\ \text{m}$ 伝送した時のファイバー集光量を 6 秒間毎に平均値と標準偏差を計算してプロットしたグラフ. 黒丸で囲んだ箇所は人の通行によりレーザーが遮断されたことで光量低下が起きた. 赤破線はアポルトリガーモジュールの要求光量、 $30\ \mu\text{W}$ のラインを表す.

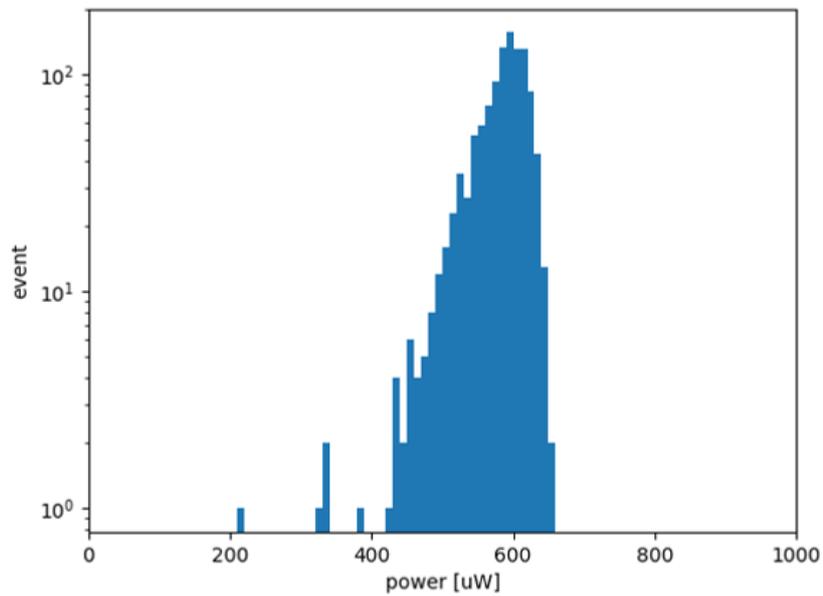


図 4.4.16 4.4.2 節で述べたセットアップで $910\ \mu\text{W}$ レーザーを $400\ \text{m}$ 伝送した時のファイバー集光量を 1 次元ヒストグラムに詰めた結果. ヒストグラムの横軸は光量 $[\mu\text{W}]$ 、縦軸は対数表示の頻度.

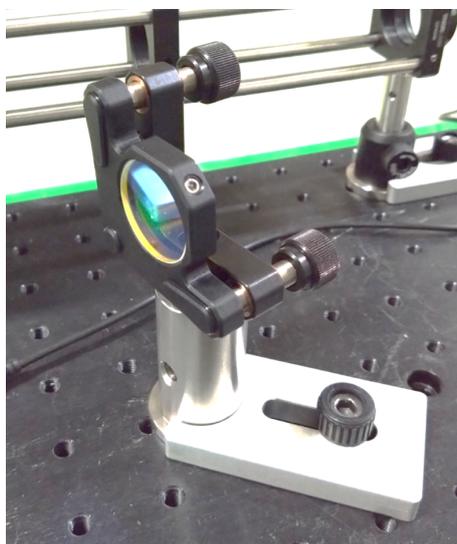


図 4.4.17 定盤に固定した球面ミラーの様子. 図は $R = 50 \text{ m}$ の球面ミラー.

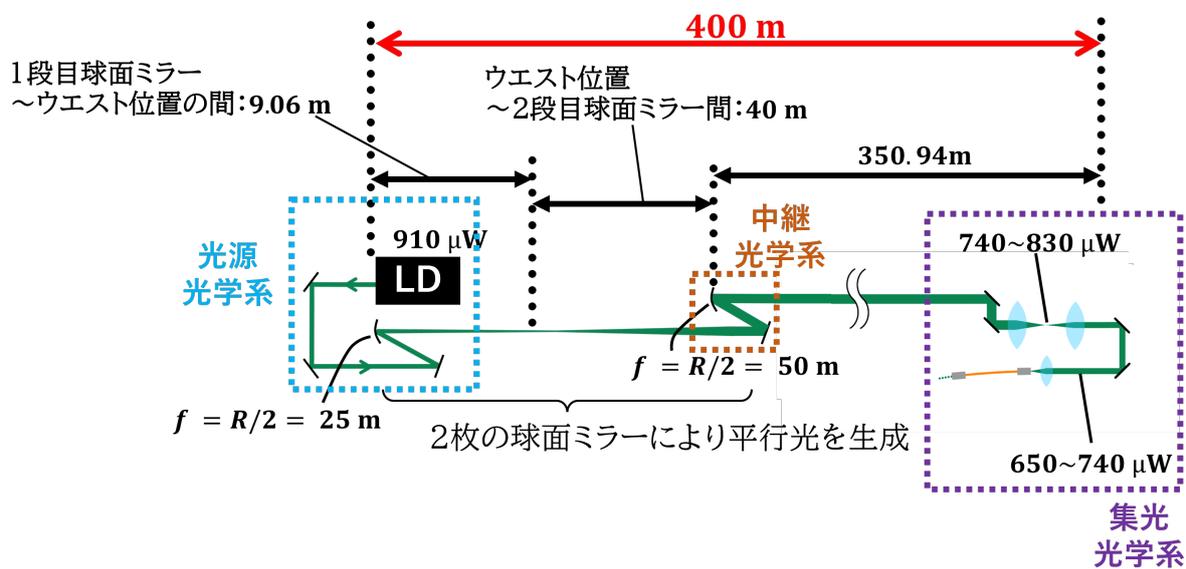


図 4.4.18 2 枚の球面ミラーでレーザーを 400 m 伝送するセットアップ. 球面ミラーの焦点距離の組み合わせが $f = R/2 = 25 \text{ m}$, $f = R/2 = 50 \text{ m}$ なのでレーザービームサイズを 2 倍拡大で伝送している.



図 4.4.19 図 4.4.18 のセットアップにおける光源光学系 (上) と中継光学系 (下) の様子. 光源光学系 (上) にてレンズを固定するためのケージアッセンブリロッドが有るがこの時はレンズは取り外している.

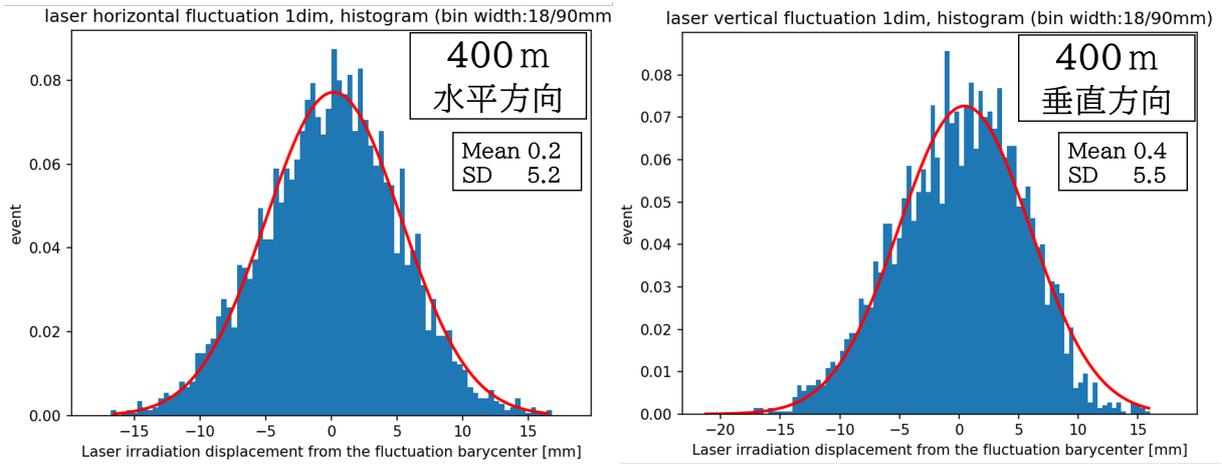


図 4.4.20 4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時の軌道ふらつきの解析結果。縦軸は全イベント数で規格化。ガウスフィットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位は共にミリメートル。球面ミラーによる伝送でも水平、垂直方向における違いは見られない。

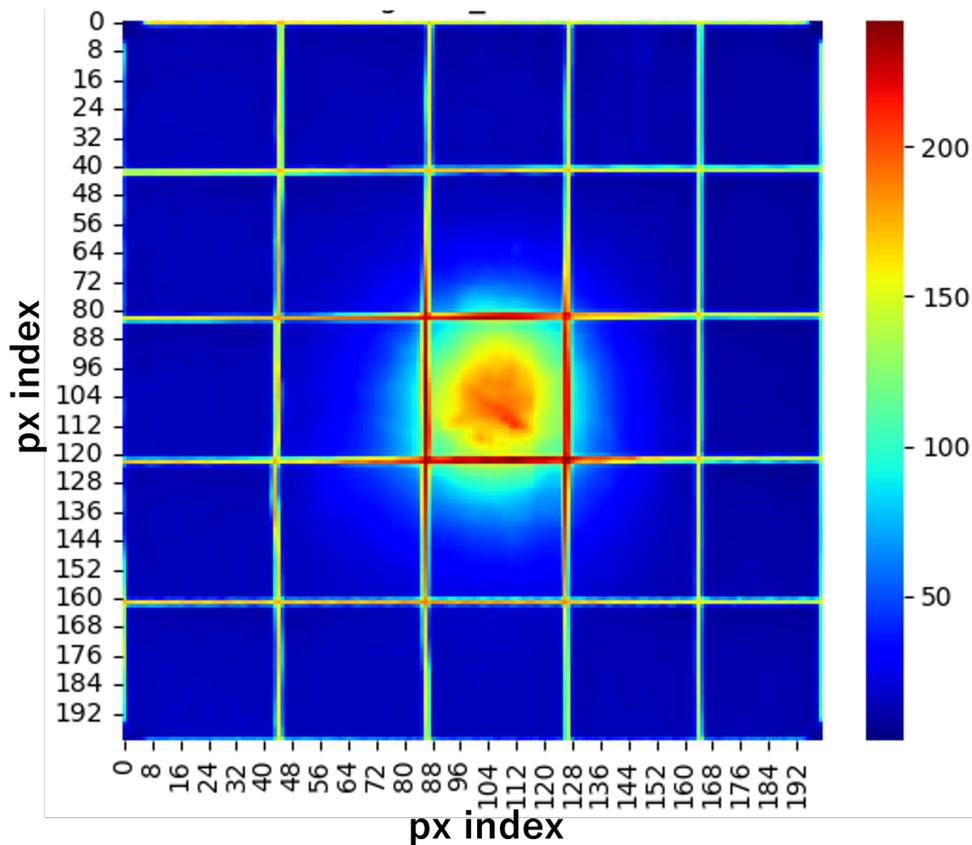


図 4.4.21 4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時の、各フレームを方眼ボードの 4 つの赤い丸を基準に重ね合わせた輝度の図。縦横の辺は共にピクセル数で、 $98\frac{1}{3}/200$ mm/px \approx 0.492 mm/px をかけて mm に換算出来る。

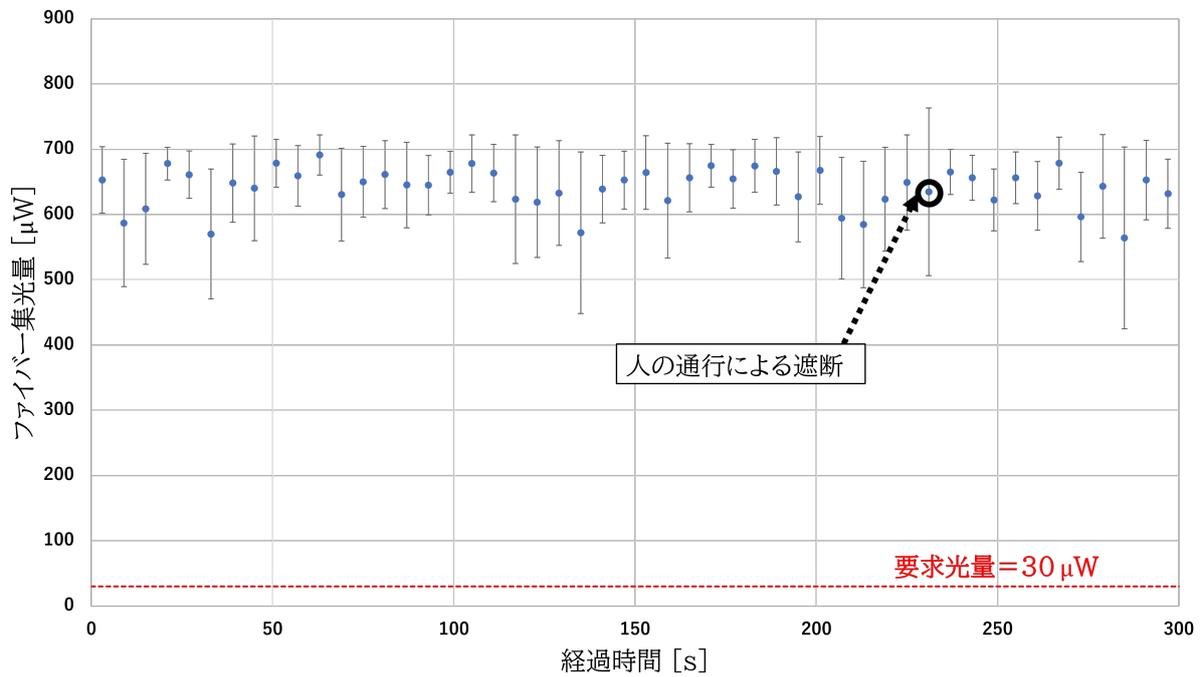


図 4.4.22 4.4.2 節で述べたセットアップで 910 μ W レーザーを 400 m 伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグラフ。パワーメータの測定は 0.3 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒ごとに平均した値をプロット。エラーバーはそのときの標準偏差。黒丸で囲んだ箇所は人の通行によりレーザーが遮断されたことで 6 秒の時間内でのばらつきが大きくなっている。赤破線はアボートトリガーモジュールの要求光量、30 μ W のラインを表す。

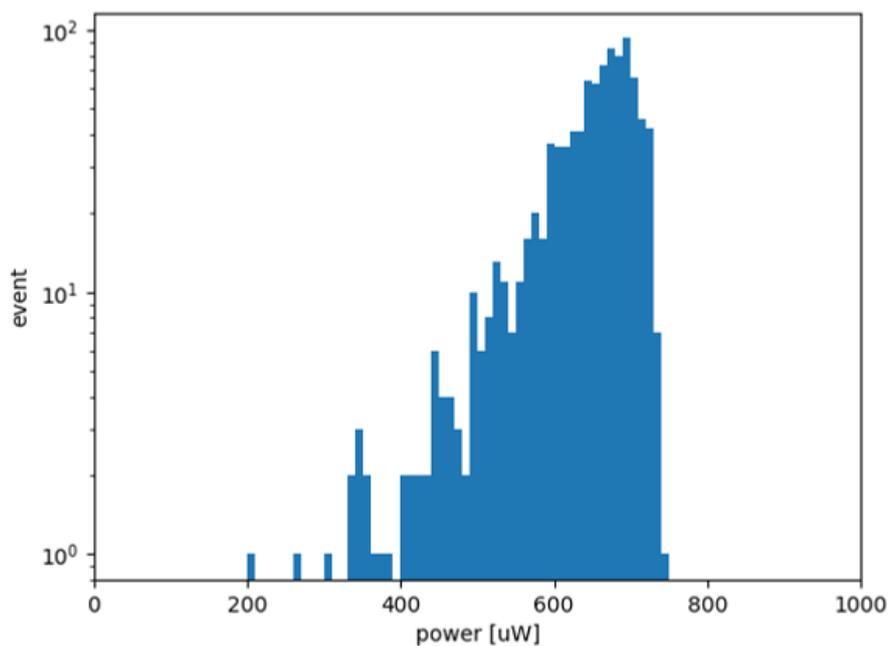


図 4.4.23 図 4.4.18 のセットアップで 0.3 s 毎にパワーメーターで測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒストグラムで表した結果。横軸に光量 [μ W]、縦軸に頻度を対数で取った。通行により遮断された際のデータは除いている。

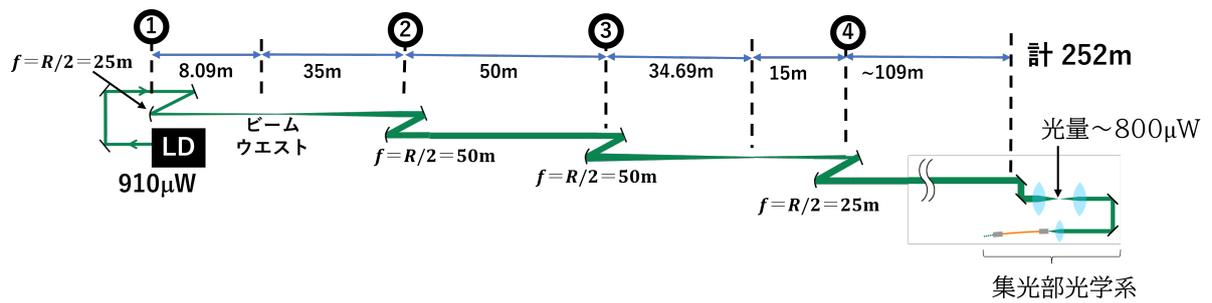


図 4.4.24 球面ミラーを用いた光源光学系と 1 段階中継光学系の配置に中継光学系③と④の 2 つを追加して 250 m 伝送するセットアップ。

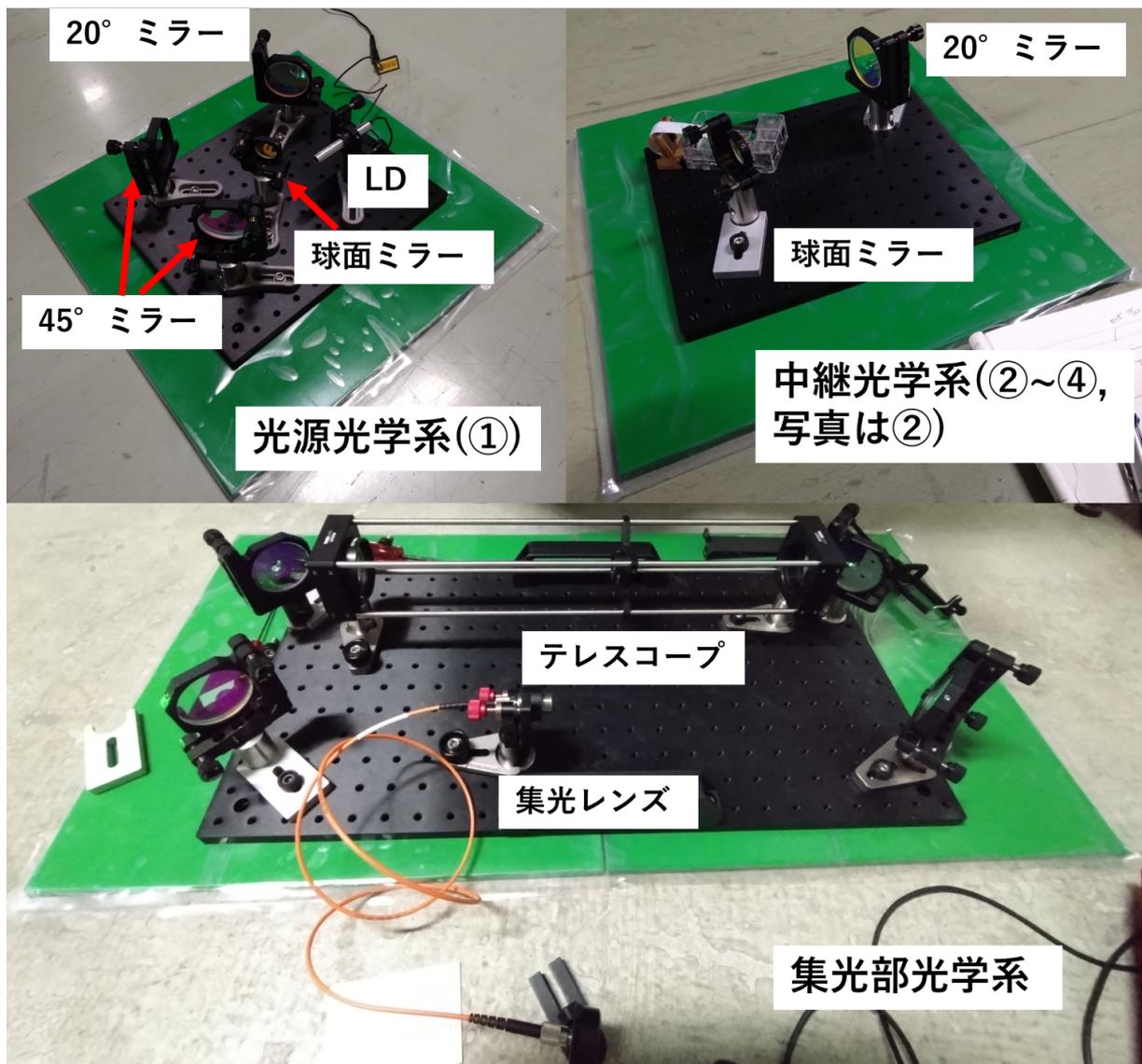


図 4.4.25 図 4.4.24 が表すセットアップの各光学系の様子. 中継部については 3 つあるうちの②を示す.

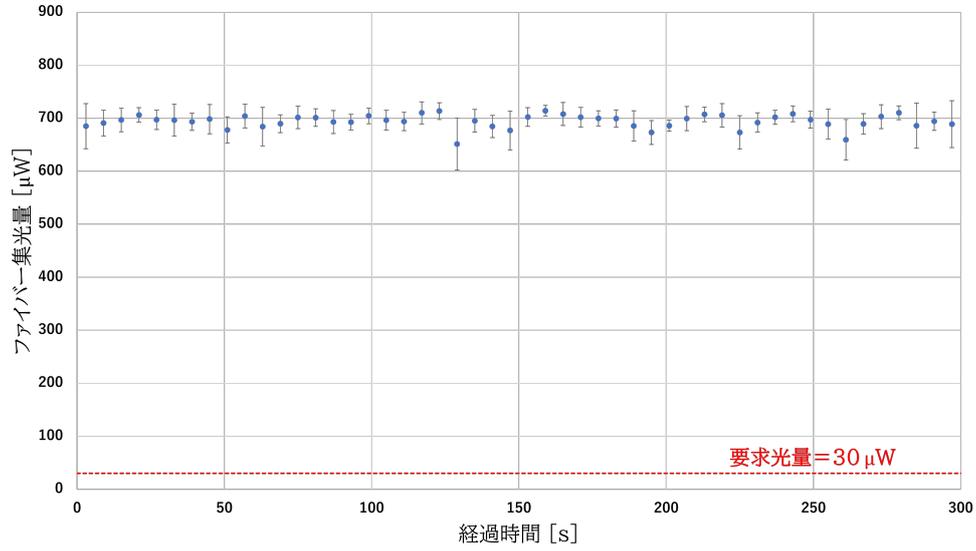


図 4.4.26 図 4.4.24 のセットアップで 250 m 伝送した時のファイバー集光量を 6 秒間毎に平均値と標準偏差を計算してプロットしたグラフ.

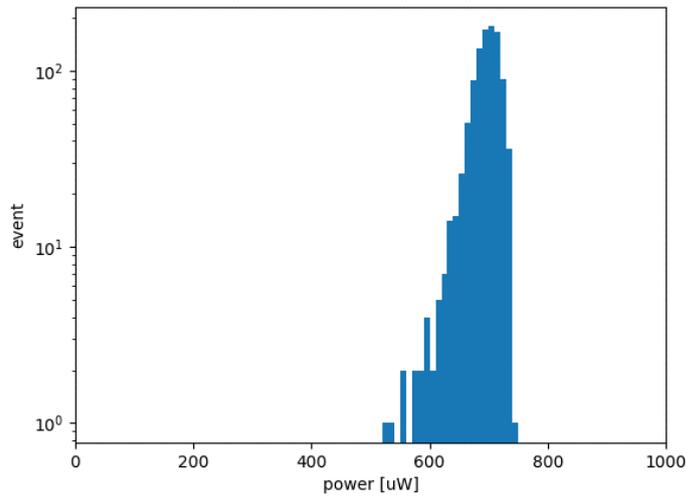
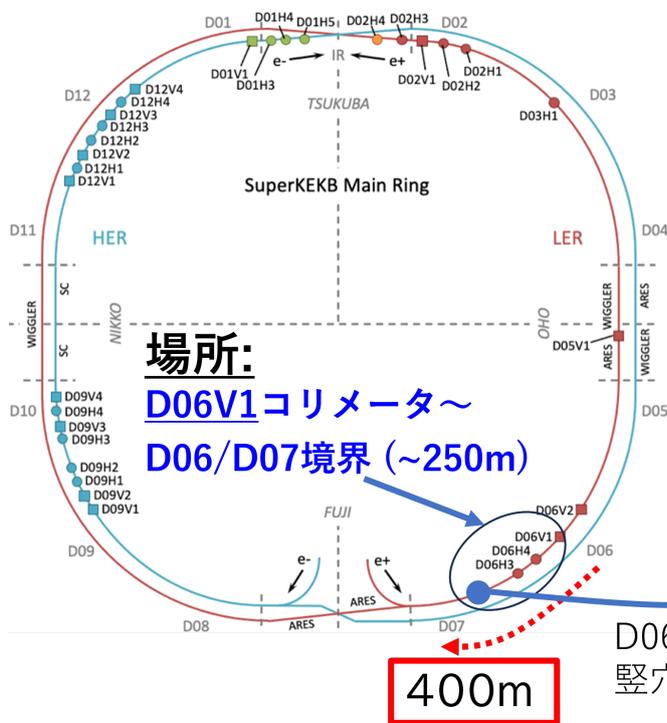


図 4.4.27 図 4.4.24 のセットアップで 250 m 伝送した時のファイバー集光量の値を詰めた 1 次元ヒストグラム. 横軸は光量、縦軸は対数表示の頻度.



D06V1から～250m地点にケーブル用
 縦穴(真上のキッカー電源に繋がる)

図 4.5.1 真上のキッカー電源に繋がる縦穴の加速器トンネルにおける位置 (左) と縦穴の様子 (右).

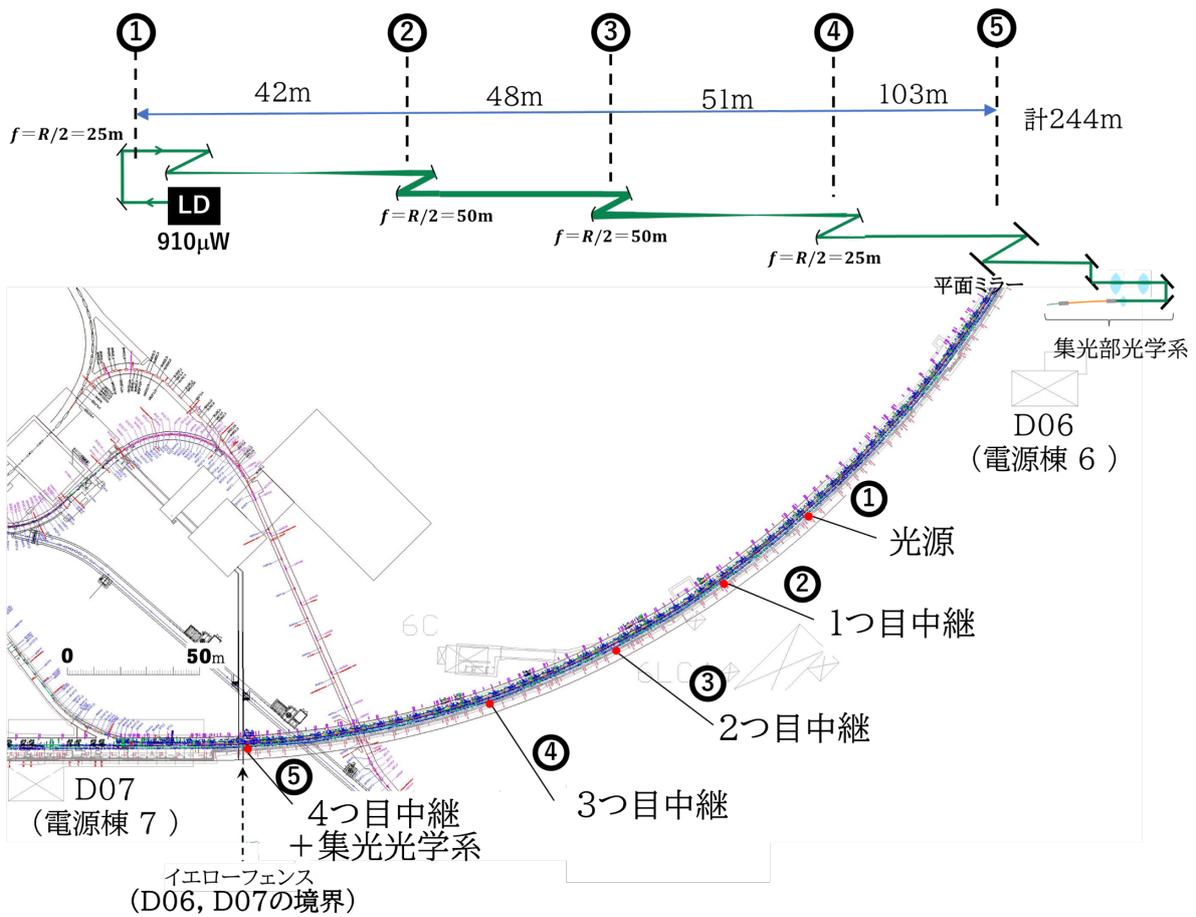


図 4.5.2 加速器トンネル内に設置したセットアップの模式図 (上) とその各光学系の配置箇所 (下).

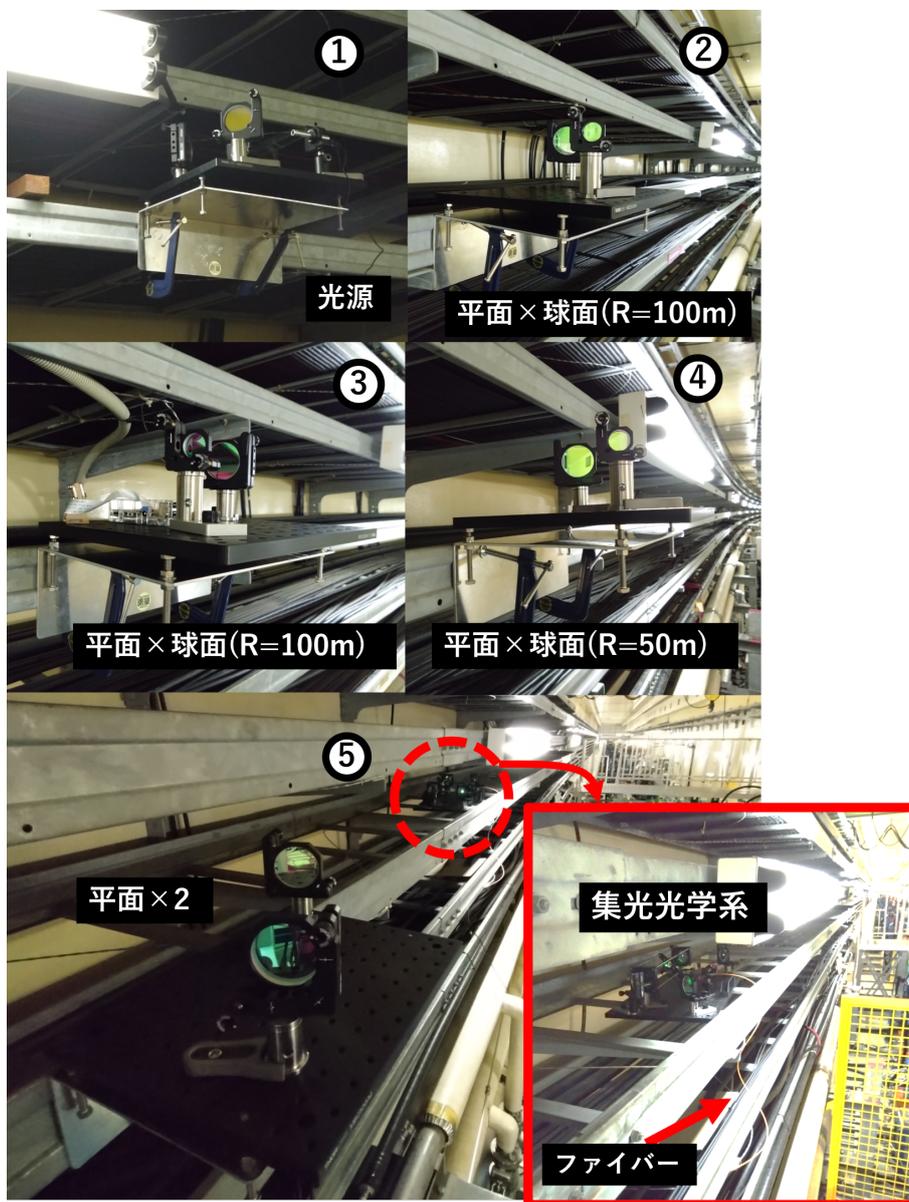


図 4.5.3 ラックへ設置した各光学系の様子. L 字プレートの上に定盤を置き、4 つ角をネジで固定する. 今回は、そのセットを L 字プレートの短い側を 2 ヶ所 C クランプでケーブルラックと一緒に挟んで仮止めした. ⑤において平面ミラー × 2 の中継光学系の直後に設置してあるのは集光光学系 (図中右下の赤枠で囲んだ写真).

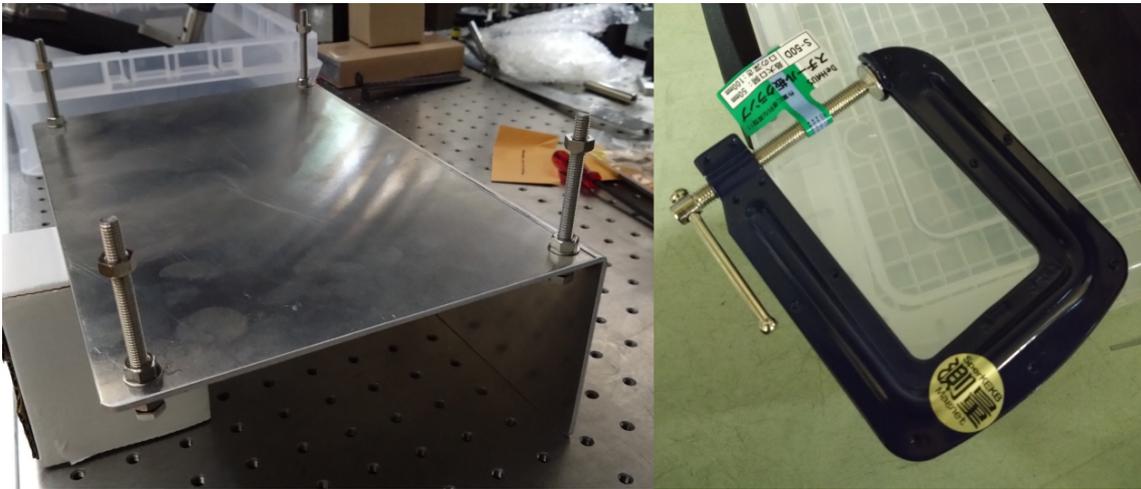


図 4.5.4 本実験で用いた L 字プレート (左) と C クランプ (右) . 4 つ角をネジで固定する仕様となっている. L 字プレートの短い側を 2 ヶ所 C クランプでケーブルラックと一緒に挟んで固定する.

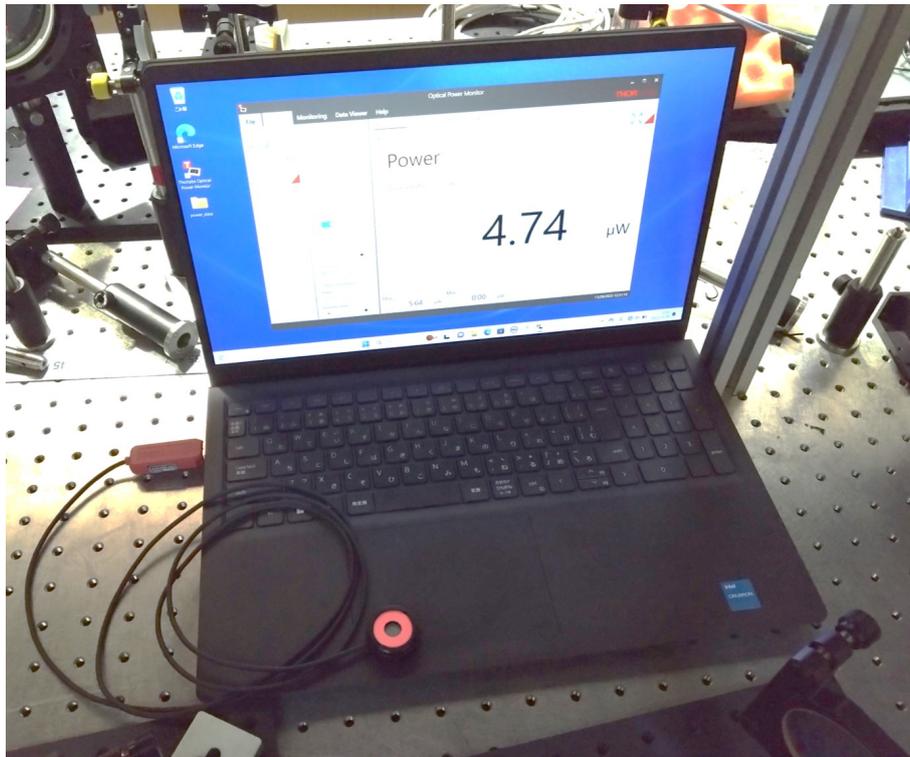


図 4.5.5 PM16-120 - USB パワーメータ (標準型フォトダイオードセンサ付き、Si、400~1100 nm、50 mW Max) を USB コネクタで、専用のソフトウェア (NI VISA) [64] をインストールしたパソコンに繋いだ様子. データは .CSV 形式で保存される.



図 4.5.6 ファイバー集光量測定の様子。ファイバーと PM-16-120 はこれまでと同様ファイバーアダプターキャップ (S120-FC) で接続している。双極磁石の上にあるパソコンでファイバー集光量を表示させている。この写真の右側の黄色い柵が D6/D7 の境界であるイエローフェンス。

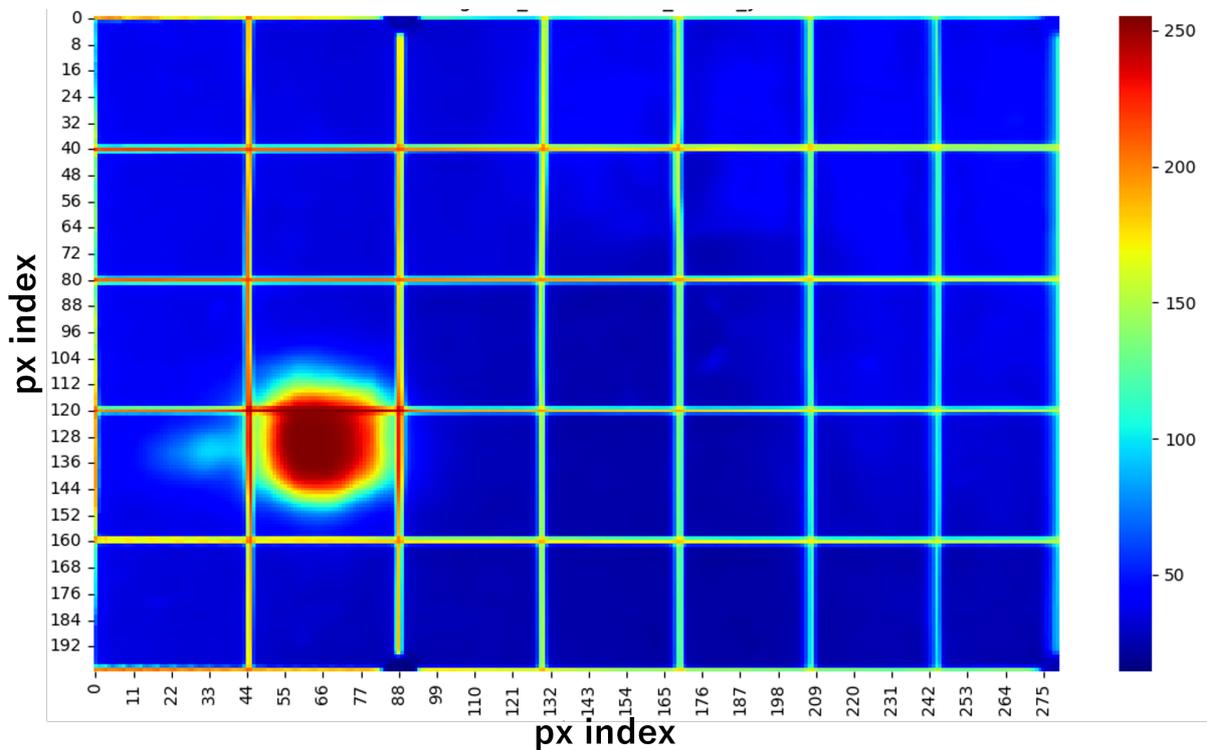


図 4.5.7 D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m 伝送したレーザーの撮影動画から作成した重ね合わせの輝度の図. ピクセルからの換算も今までと同様に $98\frac{1}{3}/200 \text{ mm/px} \approx 0.492 \text{ mm/px}$ をかけて出来る. 2023 年 11 月 27 日の午後に撮影.

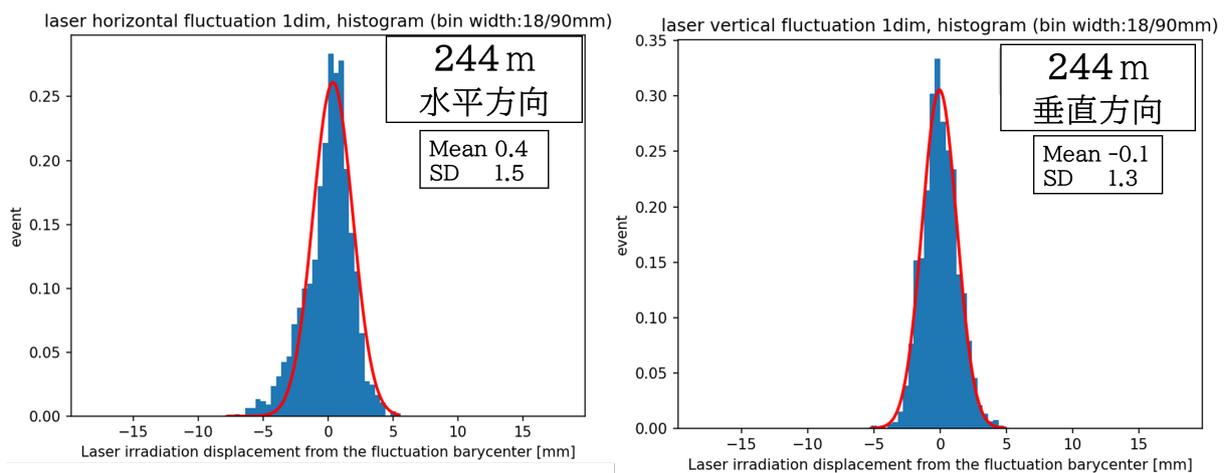


図 4.5.8 2023 年 11 月 27 日の午後に撮影したレーザーの軌道ふらつきの解析結果. 縦軸は全イベント数で規格化. ガウスフィットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位は共にミリメートル.

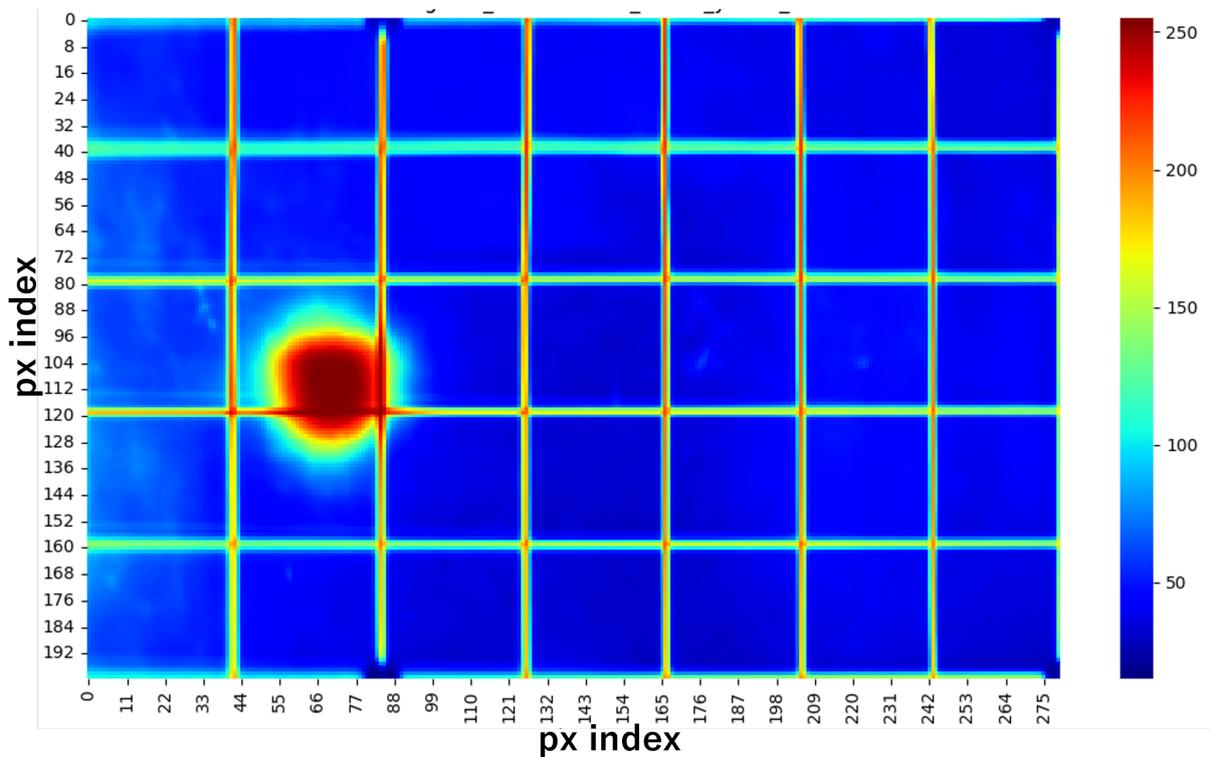


図 4.5.9 D06V1 ~ イエローフェンス間 244m 伝送したレーザーの撮影動画から作成した重ね合わせの輝度の図. 換算も今までと同様に $98\frac{1}{3}/200 \text{ mm/px} \approx 0.492 \text{ mm/px}$ をかけて出来る. 2023 年 11 月 28 日の午前に撮影.

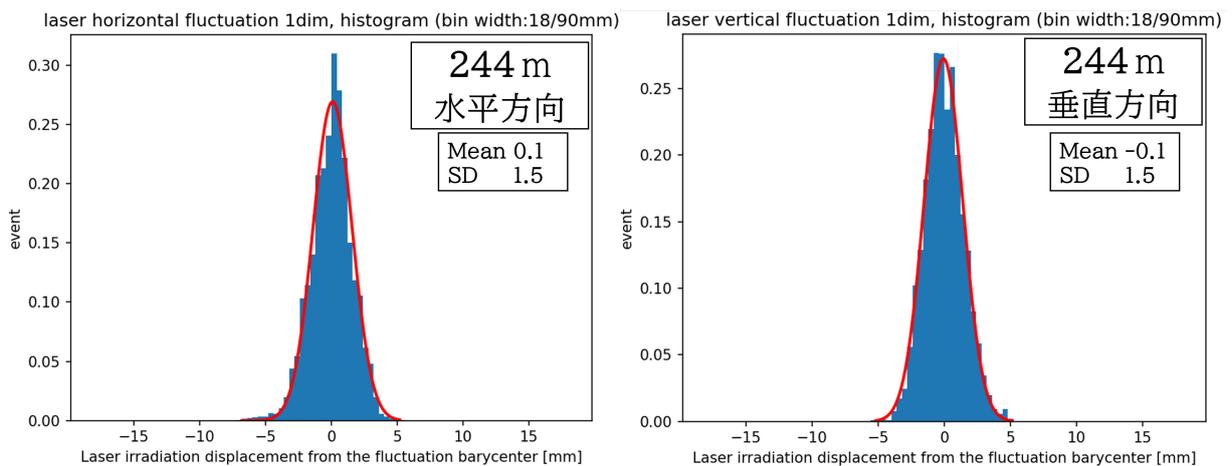


図 4.5.10 2023 年 11 月 28 日の午前に撮影したレーザーの軌道ふらつきの解析結果. 縦軸は全イベント数で規格化. ガウスイットした平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の単位は共にミリメートル.

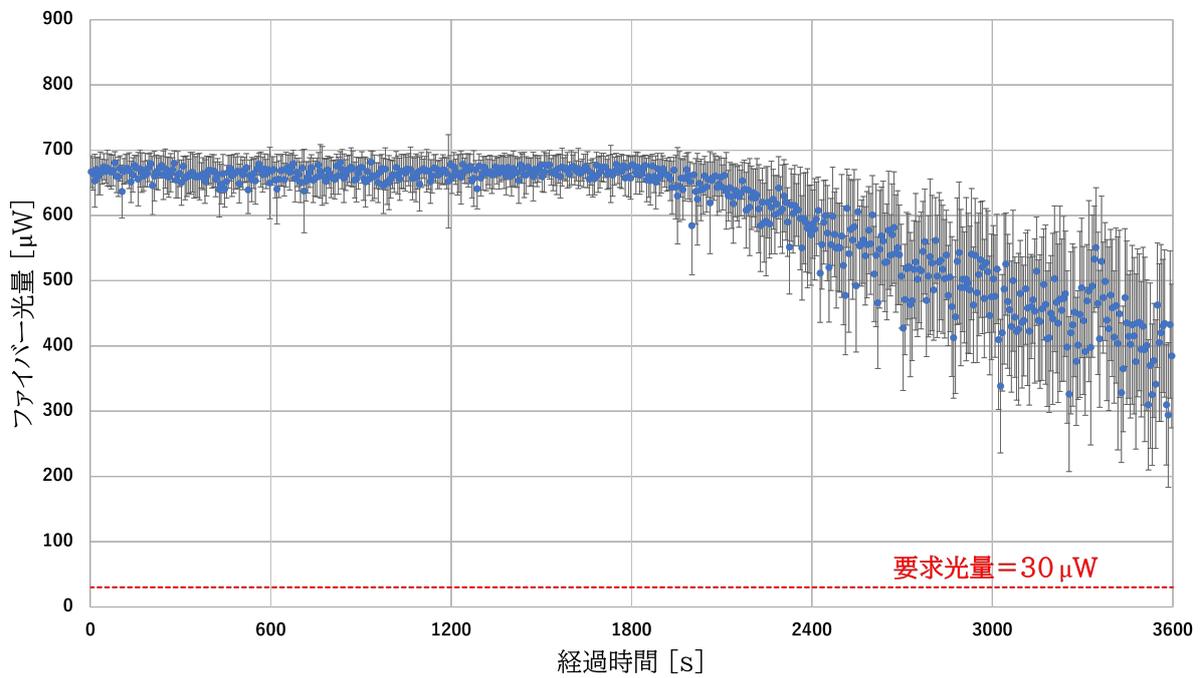


図 4.5.11 910 μW レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m 伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグラフ。パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒ごとに平均した値をプロット。エラーバーはそのときの標準偏差。2023 年 11 月 27 日の午後 1 時間測定。

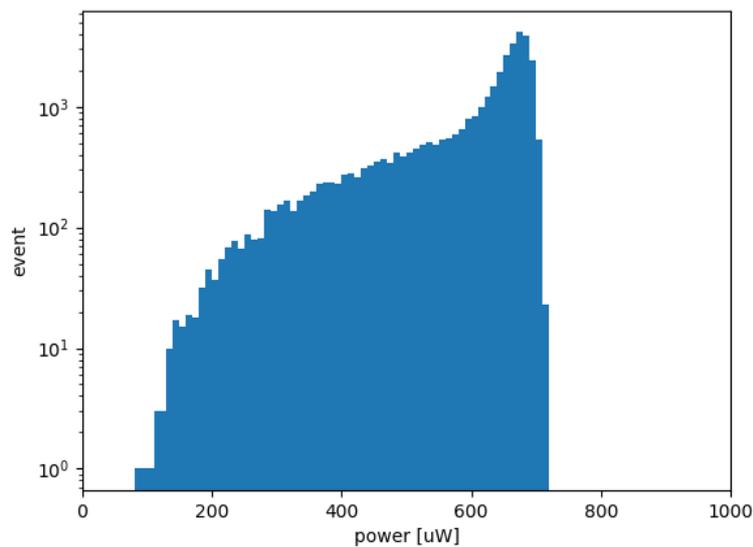


図 4.5.12 図 4.5.11 と同じデータ、0.1 s 毎に 1 時間測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒストグラムで表した結果。横軸は光量 μW 、縦軸は対数表示の頻度。

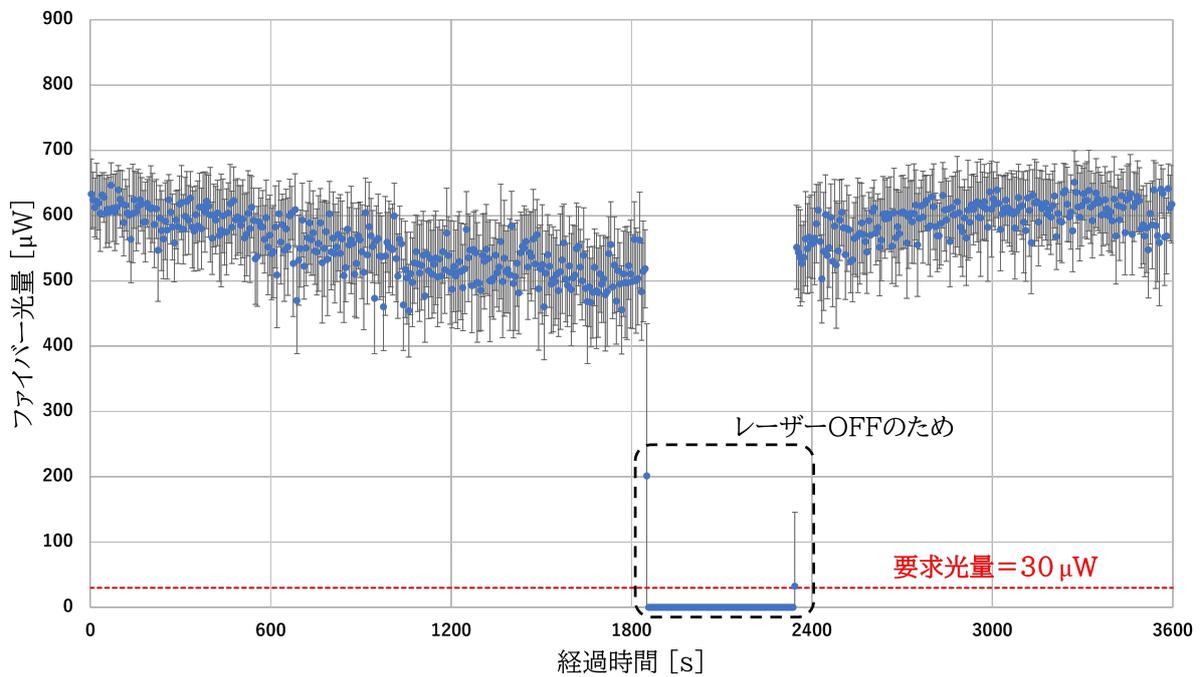


図 4.5.13 910 μW レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244 m 伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグラフ. パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒ごとに平均した値をプロット. エラーバーはそのときの標準偏差. 2023 年 11 月 28 日の午前に 1 時間測定. 黒点線で囲んだ場所は人の通行があり、ヒヤリハット防止のためレーザーを OFF にした期間.

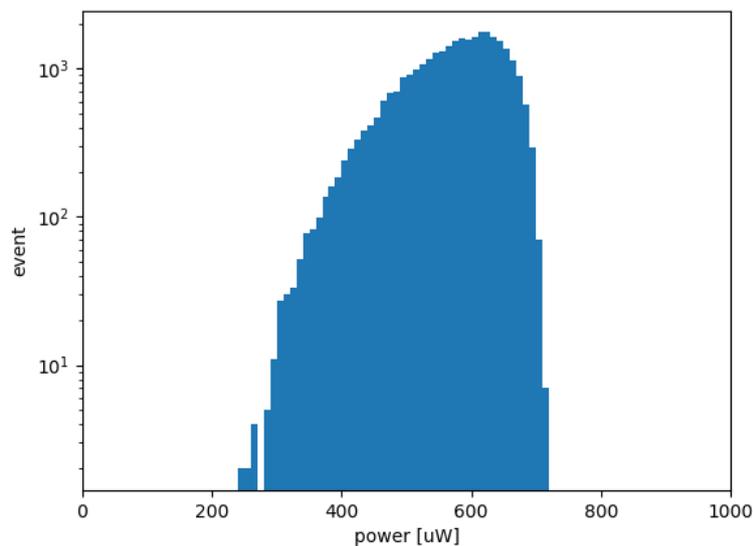


図 4.5.14 図 4.5.13 と同じデータ、0.1s 毎に 1 時間測定したファイバー集光量データを 1 次元ヒストグラムで表した結果. 横軸は光量 μW 、縦軸は対数表示の頻度. レーザーを OFF にした際のデータは除いている.

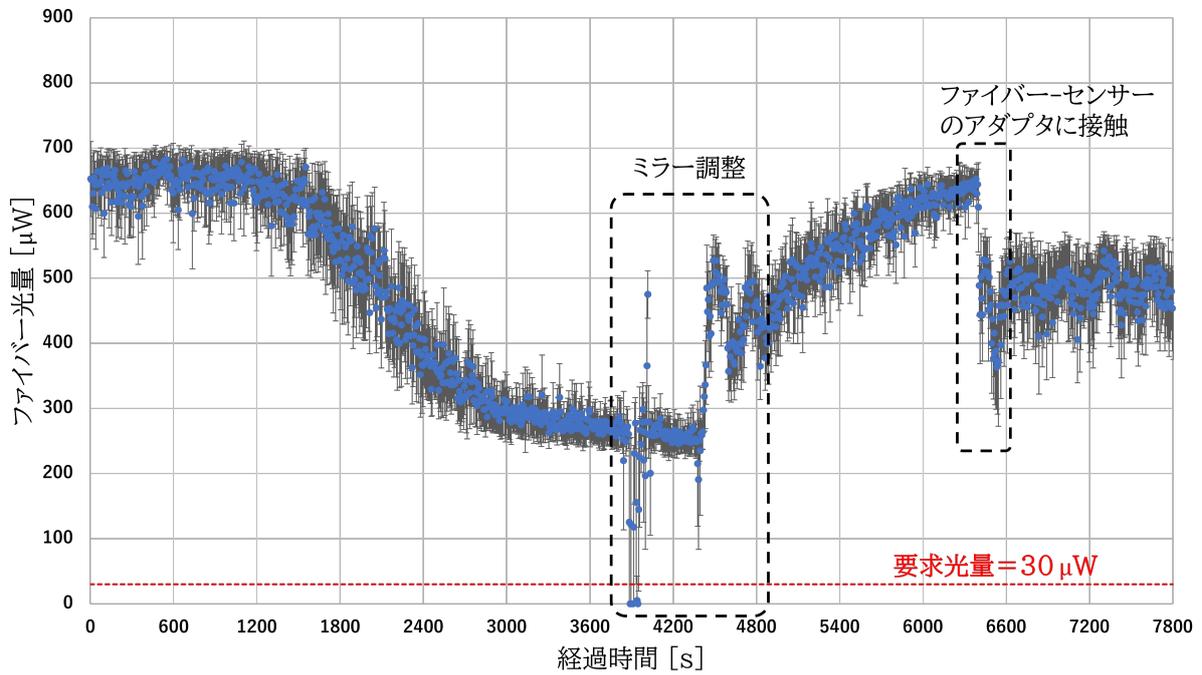


図 4.5.15 910 μW レーザーを D06V1 ~ イエローフェンス間 244m 伝送した時のファイバー集光量をプロットしたグラフ。パワーメータの測定は 0.1 秒毎に行ったが、図の縦軸にはそれを 6 秒ごとに平均した値をプロット。エラーバーはそのときの標準偏差。2023 年 11 月 28 日の午後に 130 分測定。1500s 経過してから光量が一定して下がるが 4500s あたりでレーザーを固定するキネマティックマウントのつまみでレーザー軌道を微調整すると再び光量を回復させられた。また 6300s あたりでファイバーとセンサーの接続部分に接触したことで光量が低下した。

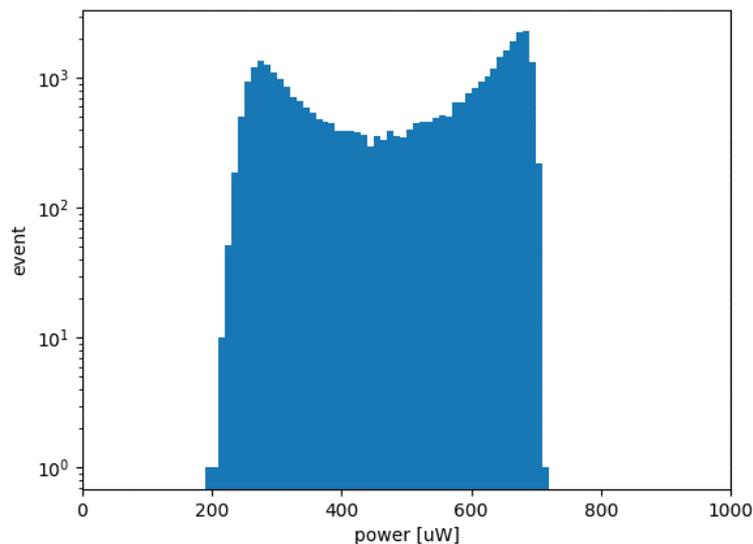


図 4.5.16 図 4.5.15 のデータの一部、0.1s 毎に 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整前の 0s から 3600s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果。横軸は光量 [μW]、縦軸は対数表示の頻度。

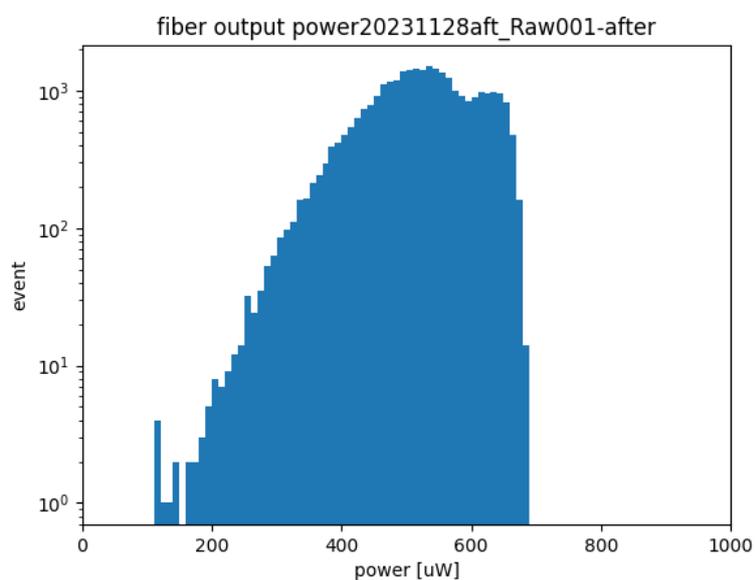


図 4.5.17 図 4.5.15 のデータの一部、0.1s 毎に 130 分測定したファイバー集光量データの内、調整後の 5000s から測定終了の 7800s の間のデータを 1 次元ヒストグラムで表した結果. 横軸は光量 [μW]、縦軸は対数表示の頻度.

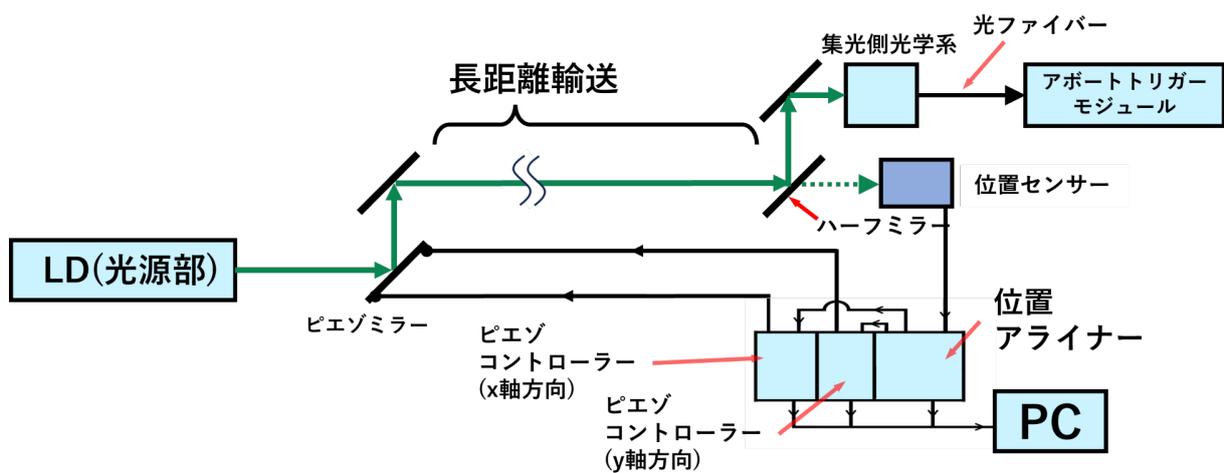


図 4.5.18 センサーとピエゾミラーによるレーザー軌道の自動制御システムの模式図 (上)、ハーフミラーからの光量を感じ取るセンサーの様子 (左下)、位置アライナーとピエゾコントローラー (下中央) 及びピエゾミラー (右下)。センサーの中心に常時光が来るようにセットし、レーザー軌道がずれてセンサーの中心から外れた場合はそのフィードバック信号を基にピエゾコントローラーでピエゾミラーに適切な電圧をかけて角度補正する。センサーと PC の wifi 接続でセットアップの更なる長距離化も可能である。

1668 第 5 章

1669 結論

1670 2022 年における SuperEKEB の運転は Sudden Beam Loss (SBL) と名付けられたアクシデント事象によ
1671 り、阻害もしくは制限された。SBL 事象から加速器機器を保護するにはビームロスが増幅する前にビーム
1672 を正常にアボートすることが有効である。そこでビーム異常の早期発見にむけたアボート検出器の設置場所の
1673 改善とアボートリクエスト信号の伝送速度向上の 2 つからアプローチする研究した。

1674 先ず前者について、D06 区域のような上流に同検出器を設置していればより早いアボート発報ができると
1675 予想されるため、本研究でどれ程早くアボート発報が行えるか計測した。

1676 D06 区域のビームロスモニターをアボート検出器と見立てて D06 ロスモニターのビームロス検知の信号を
1677 中央制御棟のアボートマスターモジュールに送信する実験を実施した。2022 年 6 月に実際に発生した SBL
1678 事象において、D06 で最初にビームロス検知した場合、実際の運用アボート信号よりも最大で約 10 μs 早く到
1679 達することが確認できた。この研究成果によ SuperKEKB プロジェクトでは、2024 年以降の運転では上流
1680 側の D06 や D05、HER の D09 のコリメータ付近に設置することが決定した。

1681 また後者のアボートリクエスト信号の伝送速度向上について、現行光ファイバー信号の代わりに、大気中で
1682 のレーザー伝送による信号送信を開発した。大気中でレーザーを数百メートル間、信号として伝送する手法、
1683 レーザーアボートシステムを検証した。

1684 レーザー信号を現行のアボートトリガーシステムに組み込めるよう、レーザーをファイバーに集光する光学
1685 系を開発した。2 種類の集光レンズと、開口数とコア径の異なる 8 種類の光ファイバーの組み合わせを試し
1686 て光ファイバーへの集光効率を測定し、入射するレーザービームサイズのサイズと集光レンズの焦点距離から
1687 求まる幾何学的開口数よりファイバーの開口数が大きければほとんどの場合において集光効率が 90 % 以上を
1688 達成でき、コア径が大きい程レーザーを容易に入射させられることを確認した。特に集光レンズはより直径の
1689 大きい 11.05 mm ϕ のマルチモードレンズ、ファイバーは開口数が 0.50、コア径が 400 μm の M124L01 で最
1690 も集光効率が高く、最大で 99.1 % を実現できた。この結果を受けてレーザーを光ファイバーへ集光する部分
1691 のデザインとして集光レンズに 11.05 mm ϕ のマルチモードレンズ、ファイバーに開口数が 0.50、コア径が
1692 400 μm の M124L01 を採用した。

1693 次にレーザーアボートシステムのシステムの導入を検討している最初の場所は D06V1 からアボートキッ
1694 カー電磁石電源直下の間、加速器トンネル内の曲線部で、この区間自体の距離は約 400 m である。従って
1695 400 m 反射ミラー、凸レンズ、球面ミラーなどの光学パーツを用いてレーザーを長距離伝送する光学系を作成
1696 した。複数の球面ミラーと反射ミラーでレーザーのビームサイズの制御かつ軌道の調整、レンズで集光レンズ
1697 へ光を漏れなく入射させることで伝送、集光を行った。910 μW のレーザーを 400 m 伝送後、光ファイバー
1698 に 642 $\mu\text{W} \pm 72 \mu\text{W}$ 集光できた。これはアボートトリガーモジュールから要求される光量、30 μW の 21 倍

1699 以上であり、システムを運用するには十分な光量である。開発した光学系を用い、実際の加速器トンネル内に
1700 て、複数のミラーでレーザー軌道をトンネルの曲線に合わせて曲げ、約 250 m 伝送したところ、最大 600 μ W
1701 程のファイバー集光量を達成した。一方でファイバー集光量が数十分スケールで 400 μ W 程変動する挙動も
1702 確認された。これは加速器トンネル内における温度変化や空調機などによる空気の乱れなどでレーザー軌道が
1703 変化するためと考えられる。試験中、30 μ W を下回ることが無かったもののシステムの安定運用では問題と
1704 なる。しかし光量が低下した状態でレーザーの角度を調整したところ、再度光量を 600 μ W 程にまで回復させ
1705 られ、よってミラーの角度を制御する仕組みを組み込めばシステムを安定運用できることが分かった。

1706 本研究の成果は SuperKEKB 加速器に関するものだが、アボートを高速化する手法としては汎用的な研究
1707 成果であると言える。ILC や FCC 等、次世代型加速器は SuperKEKB よりも更なる大型化が見込まれる。
1708 アボートトリガー発報位置を含めたアボート信号の送信経路の改善による信号伝達時間ゲインの増大が予想さ
1709 れること [66] から、アボート信号送信パスの最適化と信号速度の高速化はこれら加速器の安定した長期運転
1710 を実現するうえでも重要である。

謝辞

1711

1712 本論文執筆にあたり、多くの方々にご指導及びご鞭撻を賜った。

1713 東京都立大学大学院理学研究科物理学専攻高エネルギー物理実験研究室教授 角野秀一先生には、お忙しい
1714 中 Loss Monitor ミーティングにまでご出席なさってください終始適切にご指導を賜った。ここに深謝の意を
1715 表す。

1716 同研究室助教授 汲田哲郎先生には、本論文や発表用スライド、アブストラクトの添削において、適切なご
1717 助言を賜った。衷心より感謝申し上げます。

1718 元高エネルギー加速器研究機構研究員 吉原氏には、当時 KEK や現場作業について右も左も分からない私
1719 に懇切丁寧に教えて頂いただけでなく、SBL 検知位置改善に関する研究で生じる疑問などに日々毎度親切に
1720 ご対応して頂いた。ここに感謝の意を表す。

1721 高エネルギー加速器研究機構研究員 梶氏には、SBL 検知位置改善に関する研究に加えてレーザーアポート
1722 システムの研究において事細かな研究の指針を頂いただけでなく、日々の研究を進める上で生じる大小様々な
1723 疑問にも厭わず毎度御丁寧且つ御親切に答えて頂いた。またデータの解析方法や発表用スライド等作成におい
1724 て数多のご助言を賜り感謝の念に堪えない。厚く御礼申し上げます。

1725 同研究機構研究員 張氏には、レーザーアポートシステムの研究を進めるうえで不可欠な光学部品の扱い方を
1726 ご丁寧に教えて頂いた。また光学に関する専門的な知識について素人である私にも非常に分かりやすくご教授
1727 して下さったことや、研究とは直接関係のない点においても心強く支えて下さった。心より感謝申し上げます。

1728 同研究機構研究員 中山氏には、吉原氏より引き続いて Loss Monitor Group を運営して頂き日々の研究進
1729 捗を定期的に確認して下さい。また学会発表の為のスライド作成にあたり、細かく精査及びご助言を頂き、
1730 感謝の念に堪えない。またレーザーアポートシステムの実装を想定した KEKB トンネル内で実施した数日に
1731 及ぶ試験においてもご協力頂いたことについても重ねてお礼申し上げます。

1732 同研究機構研究員 宇野氏には、中山氏と共に Loss Monitor Group を通じて日々の研究に関する幾多の助
1733 言を頂いた。また学会発表にあたり練習の機会を設けて下さったこと、KEKB トンネル内レーザーアポ
1734 トシステム試験にも含めて多大なご尽力頂いた。厚く御礼申し上げます。

1735 同研究機構研究員 伊藤氏には D06 電源棟にてロスモニターからの信号をビームロスを観測した場合のみ信
1736 号が見られるようにする NIM 回路を組む際、一から十までご丁寧にご享受下さった。お陰で第 3 章で述べた
1737 実験、解析を試みる事が出来た。心より感謝申し上げます。

1738 同研究機構研究員 電磁石グループ 増澤氏には、レーザー光学系の加速器トンネル内ラックへの設置を始め、
1739 レーザー長距離伝送実験に手厚くご協力頂いた。おかげで加速器トンネル内でのレーザー試験の貴重なデータ
1740 も収集することができた。深い感謝の意を表す。また入射器棟ギャラリーでのレーザー伝送実験では 100
1741 Hz ピークの振動を調査するために加速度センサーを用いた実験を行って下さったにも関わらず、私の力量
1742 が足らず本論文にまとめることが出来なかった。心よりお詫び申し上げます。

1743 同研究機構研究員 電磁石グループ 大澤氏には、増澤氏と共に KEKB トンネル内レーザーアポートシステム試験実施のための光学部品設置等にご尽力頂いた。ここに感謝の意を表す。

1745 東京都立大学大学院 強相関電子論研究室 宮平氏には第 4 章、長距離伝送後レーザーの照射の様子を解析する上で大変有効なご意見を頂いた。動画をスライスして取得したフレーム画像の輝度データを加重平均して赤点やレーザー照射の位置を pixel 数から cm 単位などに換算する際、1 pixel のデータ毎に加重平均を行った為に計算が終わらないほど長くなってしまったが、彼の案により最初は先ず粗く加重平均を行い、その後候補位置の近傍を細かく再度加重平均する方法に変えたことで、1 動画あたりの校正時間が数時間に短縮することに成功した。感謝する。

1751 Loss Monitor Group の皆様には、隔週のミーティングにおける進捗にて貴重且つ大変有効なご助言、ご協力を多大に頂いた。ここに誠意を表す。

1753 同研究室の皆様には、本研究の遂行にあたり数多くのご助言、ご協力頂いた。御礼申し上げます。

1754 本研究の遂行にあたり、快くご指導ご鞭撻及びご協力下さった皆様に、感謝する。

1755 最後に、両親、祖父母には、これまでの人生において生活面、経済面、精神面など、あらゆる場面で私を支えて下さった。この場をお借りして感謝の意を表す。

1757 2024 年 1 月 9 日

1758 北村 和樹

参考文献

1759

- 1760 [1] J-PARC. "素粒子・原子核研究". J-PARC ホームページ. [https://j-parc.jp/c/facilities/](https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/index.html)
1761 [nuclear-and-particle-physics/index.html](https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/index.html), (閲覧日: 2023-12-02)
- 1762 [2] Particle Data Group. "REVIEW OF PARTICLE PHYSICS". *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 年 8
1763 月 8 日, 2022, 083C01 <https://academic.oup.com/ptep/article/2022/8/083C01/6651666>, (閲覧
1764 日: 2023-12-02)
- 1765 [3] JAEA. "ミュオン粒子". 原子力百科事典 ATOMICA. [https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/](https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_2663.html)
1766 [dic_detail_2663.html](https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_2663.html), (閲覧日: 2023-12-03)
- 1767 [4] KEK. "小柴昌俊先生を偲んで". ILC 通信. [https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2021/01/29/](https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2021/01/29/a-tribute-to-koshiba-sensei/lc-newsline/)
1768 [a-tribute-to-koshiba-sensei/lc-newsline/](https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2021/01/29/a-tribute-to-koshiba-sensei/lc-newsline/), (閲覧日: 2023-12-03)
- 1769 [5] Ashok Das, Thomas Ferbel 著. 末包文彦, 白井淳平, 湯田春雄 訳. "素粒子・原子核物理学の基礎～実験
1770 から統一理論まで～". 共立出版株式会社, 2012 年 2 月 1 日 初版第 2 刷発行
- 1771 [6] Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa. "CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak In-
1772 teraction". *Progress of Theoretical Physics*, Volume 49, Issue 2, pp. 652-657, 01, February 1973.
- 1773 [7] A. Ceccucci (CERN), Z. Ligeti (LBNL) and Y. Sakai (KEK). "12. CKM Quark-Mixing Ma-
1774 trix". *The Review of Particle Physics (2023)*. March 2022, [https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/](https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2022-rev-ckm-matrix.pdf)
1775 [rpp2022-rev-ckm-matrix.pdf](https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2022-rev-ckm-matrix.pdf)
- 1776 [8] CKM fitter group website. [http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_spring21/png/](http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_spring21/png/belle_rhoeta_large.png)
1777 [belle_rhoeta_large.png](http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_spring21/png/belle_rhoeta_large.png), (閲覧日: 2023-05-23)
- 1778 [9] Belle II 内部ページ. <https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity>, (閲覧日:
1779 2023-09-06)
- 1780 [10] 大西幸喜. "SuperKEKB 加速器の最近の運転状況". 第 19 回日本加速器学会年会, 2022 年 10
1781 月 18 - 21 日 (TFP001)[https://ibic12.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/](https://ibic12.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/)
1782 [proceedings/](https://ibic12.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/), (閲覧日: 2023-11-14)
- 1783 [11] Belle グループ. "Belle グループ活動報告 202212". 2022 年 12 月 [https://www2.kek.jp/ipns/ja/](https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/3616/)
1784 [research_introduction/report/3616/](https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/3616/), (閲覧日: 2023-11-14)
- 1785 [12] KEK. "KEKB (一般向け) トップ". KEKB 加速器について. (更新日付: 2009-06-18). [https://www2.](https://www2.kek.jp/accl/legacy/introKEKB/index.html)
1786 [kek.jp/accl/legacy/introKEKB/index.html](https://www2.kek.jp/accl/legacy/introKEKB/index.html), (閲覧日: 2023-11-19)
- 1787 [13] A.G. Akkeroyd, *et al.* [BELLE collaboration], *Physics at Super B Factory*
- 1788 [14] 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構ホームページ Home > イメージアーカイブ > つくば
1789 キャンパス 2023. <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2023/05/Aaerial2023-01.jpg>, (閲
1790 覧日: 2023-10-19)

- 1791 [15] 末次祐介. "SuperKEKB の概要". OHO'19 テキスト 1, 2019 年, <http://accwww2.kek.jp/oho/OH0txt4.html>, (閲覧日: 2023-12-10)
- 1792
- 1793 [16] 久保浄. "単粒子ビーム力学". OHO'12 テキスト 1, 2012 年, <http://accwww2.kek.jp/oho/OH0txt4.html>, (閲覧日: 2023-12-10)
- 1794
- 1795 [17] 日本加速器学会. "加速器ハンドブック". 丸善出版, 2018 年 4 月 30 日
- 1796 [18] Kazunori Akai, Kazuro Furukawa, and Haruyo Koiso. "SuperKEKB collider". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 907:188–199, nov 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218309616>, (閲覧日: 2023-11-18)
- 1797
- 1798
- 1799
- 1800 [19] T.Abe, *et al.* "Achievements of KEKB". Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 年 3 月 26 日, 2013, 03A001, <https://doi:10.1093/ptep/pts102>, (閲覧日: 2023-11-18)
- 1801
- 1802 [20] Y. Ohnishi, *et al.* Accelerator Design at SuperKEKB. Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 年 3 月 26 日, 2013, 03A011, <https://doi:10.1093/ptep/pts083>, (閲覧日: 2023-11-18)
- 1803
- 1804 [21] 飯嶋徹, 中山浩幸, 後田裕. "Belle II 実験". 2011 年 2 月 12 日, 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニュース, Vol. 29, No.4. <https://jahep.org/hepnews/2010/113Belle-02.pdf>, (閲覧日: 2023-11-18)
- 1805
- 1806
- 1807 [22] 飯田直子. "SuperKEKB 計画進捗状況". 2010 年 5 月 19 日, 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニュース, Vol. 29, No.1. <https://jahep.org/hepnews/2010/Vol29No1-2010.4.5.6.Iida2.pdf>, (閲覧日: 2023-11-18)
- 1808
- 1809
- 1810 [23] N. Ohuchi, Y. Arimoto, *et al.* "Superkekb beam final focus superconducting magnet system". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1021:165930, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221008949#b3>
- 1811
- 1812
- 1813
- 1814 [24] 大内徳人. "SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (QCS) の建設". 2018 年 8 月 9 日, 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニュース, Vol. 37, No.2. <https://jahep.org/hepnews/2018/18-2-3-SuperKEKB-QCS.pdf>, (閲覧日: 2023-11-19)
- 1815
- 1816
- 1817 [25] 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構ホームページ Home > イメージアーカイブ > 「SuperKEKB プロジェクト」 Belle II 実験の本格的な物理解析のためのデータ取得 (フェイズ 3) がいよいよ始まる. https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/10/20180320_superkekb_001.png, (閲覧日: 2023-12-06)
- 1818
- 1819
- 1820
- 1821 [26] 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構ホームページ Home > イメージアーカイブ > プレスキット 「SuperKEKB/Belle II で電子・陽電子の初衝突を観測」. https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/10/20180425_belle2_001.png, (閲覧日: 2023-12-06)
- 1822
- 1823
- 1824 [27] 浜田尚. "Belle II 実験に使用する粒子識別用光検出器 HAPD の放射線耐性評価". 修士論文. 東邦大学大学院. 理学研究科, 2014 年
- 1825
- 1826 [28] 西田昌平. "Belle II Aerogel RICH 検出器の建設と運転". 2019 年 8 月 20 日, 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニュース, Vol. 38, No.2. <https://jahep.org/hepnews/2019/19-2-2-arich.pdf>, (閲覧日: 2024-01-07)
- 1827
- 1828
- 1829 [29] 吉原圭亮, 梶裕志. "SuperKEKB でのビームロスとの戦い". 2023 年 5 月 21 日, 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニュース, Vol. 42, No.1. <https://jahep.org/hepnews/2023/42-1-3-kekb>.
- 1830

- 1831 pdf, (閲覧日：2023-11-19)
- 1832 [30] T. Ishibashi *et al.* "Movable collimator system for SuperKEKB". PHYSICAL REVIEW AC-
1833 CELERATORS AND BEAMS23, 053501 (2020). [https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/341368558_Movable_collimator_system_for_SuperKEKB)
1834 [341368558_Movable_collimator_system_for_SuperKEKB](https://www.researchgate.net/publication/341368558_Movable_collimator_system_for_SuperKEKB), (閲覧日：2023-11-19)
- 1835 [31] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, and M.
1836 L. Yao. "SuperKEKB vacuum system operation in the last 6 years operation". PHYSICAL RE-
1837 VIEW ACCELERATORS AND BEAMS 26, 013201 (2023). [https://journals.aps.org/prab/](https://journals.aps.org/prab/references/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.013201)
1838 [references/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.013201](https://journals.aps.org/prab/references/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.013201), (閲覧日：2023-11-19)
- 1839 [32] 三増 俊広. "SuperKEKB 電子リングのビームアポートシステム". 第 14 回日本加速器学会年会, 2017
1840 年 8 月 1 日 - 8 月 3 日 (TUP001)
- 1841 [33] Toshihiro Mimashi, Kazuhiko Abe, Naoko Iida, Mitsuo Kikuchi, Takashi Mori, Atsushi Sasagawa,
1842 Akira Tokuchi, "SUPERKEKB BEAM ABORT SYSTEM". 2014, [https://api.semanticscholar.](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110717927)
1843 [org/CorpusID:110717927](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110717927), (閲覧日：2023-12-10)
- 1844 [34] Toshihiro Mimashi, Kazuhiko Abe, Yoshinori Enomoto, Naoko Iida, Mitsuo Kikuchi, Keisuke Kise,
1845 Kota Kodama, Takashi Mori, Yusuke Suetsugu, Akira Tokuchi, "Performance of SuperKEKB
1846 High Energy Ring Beam Abort System". 2014, [https://api.semanticscholar.org/CorpusID:](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:145902633)
1847 [145902633](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:145902633), (閲覧日：2023-12-10)
- 1848 [35] N. Iida, *et al.* "Recent progress of wire scanner systems for the KEKB injector linac and beam
1849 transport lines". Proceedings of EPAC2000, THP1A09, p. 1738, 2000 年
- 1850 [36] 池田 仁美. "ロスモニター". OHO'20 テキスト 8 , 2020 年, [http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt5.](http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt5.html)
1851 [html](http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt5.html), (閲覧日：2023-2-20)
- 1852 [37] 池田仁美、福岡均、フラナガンジョン、古屋貴章、飛山真理. "SuperKEKB でのアポート診断". 第 14 回
1853 日本加速器学会年会, 2017 年 8 月 1 日 - 8 月 3 日 (WEP089)
- 1854 [38] 佐々木信哉, 秋山篤美, 岩崎昌子, 内藤孝, 中村達郎. "SuperKEKB 用アポート・トリガー・システムの開
1855 発". 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 9 日 - 8 月 11 日 (SUP093)
- 1856 [39] MOUSER ELECTRONICS. ホームページ、All Products > Optoelectronics > Fiber Optics >
1857 Fiber Optic > Transmitters, Receivers, Transceivers > Broadcom / Avago HFBR-24E2Z >
1858 HFBR-24E2Z Datasheet (PDF), [https://www.mouser.jp/datasheet/2/678/AV02_0176EN_2023_](https://www.mouser.jp/datasheet/2/678/AV02_0176EN_2023_01_26-1827546.pdf)
1859 [01_26-1827546.pdf](https://www.mouser.jp/datasheet/2/678/AV02_0176EN_2023_01_26-1827546.pdf), (閲覧日：2023-09-19)
- 1860 [40] Hitomi Ikeda, Mitsuhiro Arinaga, John Walter Flanagan, Hitoshi Fukuma and Makoto Tobiyama.
1861 "BEAM LOSS MONITOR AT SUPERKEKB". Proceedings of IBIC2014, Monterey, CA, USA, 2014
1862 年 (TUPD22)
- 1863 [41] Vishay. "BPW34 Datasheet (PDF) - Vishay Siliconix". Electronic Components Datasheet Search.
1864 <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26251/VISHAY/BPW34.html>, (閲覧日：2023-
1865 12-11)
- 1866 [42] 宇野健太. "ロスモニター設置状況 Installation of loss monitor". Loss Monitor Meeting, 2023 年
1867 11 月 21 日, [https://kds.kek.jp/event/49075/contributions/254150/attachments/173443/](https://kds.kek.jp/event/49075/contributions/254150/attachments/173443/228817/2023.11.21_LossMon_Kuno.pdf)
1868 [228817/2023.11.21_LossMon_Kuno.pdf](https://kds.kek.jp/event/49075/contributions/254150/attachments/173443/228817/2023.11.21_LossMon_Kuno.pdf), (閲覧日：2023-11-26)
- 1869 [43] Yuxin Liu. "Study of beam loss of SuperKEKB based on new loss monitor system for Belle II". 日
1870 本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 - 8 日 (6aA421-4)

- 1871 [44] CIVIDEC Instrumentation. "B4 HIGH-RADIATION DIAMOND DETECTOR". CIVIDEC Instru-
1872 mentation ホームページ. <https://cividec.at/>, (閲覧日: 2023-12-15)
- 1873 [45] 株式会社ネオトロン. "製品一覧>結晶>シンチレーション結晶> CsI(Tl), CsI(Na), Pure CsI". 株式会
1874 社ネオトロン, http://www.neotron.co.jp/crystal/cr_body.htm, (閲覧日: 2023-11-26)
- 1875 [46] Y Ashida, M Friend, A K Ichikawa, T Ishida, H Kubo, K G Nakamura, K Sakashita, and W Uno.
1876 "A new electron-multiplier-tube-based beam monitor for muon monitoring at the T2K experiment".
1877 Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, 2018 年 10 月 10 日, 103H01,
1878 <https://doi.org/10.1093/ptep/pty104>, (閲覧日: 2023-12-08)
- 1879 [47] 和泉奈央. "T2K 実験ミュオンモニターのための新型検出器・電子増倍管の電子ビーム照射試験 (2):
1880 電子増倍管の性能評価". 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 - 15 日 (12aT2-7)
- 1881 [48] 古賀太一郎. "EMT status and plan". 2021 年 10 月 11 日 [https://kds.kek.jp/event/39769/
1882 contributions/198081/attachments/148147/184992/koga_emt_2021_10_10.pdf](https://kds.kek.jp/event/39769/contributions/198081/attachments/148147/184992/koga_emt_2021_10_10.pdf), (閲覧日: 2023-
1883 12-09)
- 1884 [49] CERN. "The White Rabbit Project". <http://white-rabbit.web.cern.ch/>, (閲覧日: 2023-12-08)
- 1885 [50] "White Rabbit". OPEN HARDWARE REPOSITORY. [https://ohwr.org/projects/
1886 white-rabbit](https://ohwr.org/projects/white-rabbit), (閲覧日: 2023-12-08)
- 1887 [51] "Simple pcie fmc carrier". OPEN HARDWARE REPOSITORY. [https://ohwr.org/project/
1888 spec/wikis/home](https://ohwr.org/project/spec/wikis/home), (閲覧日: 2023-12-08)
- 1889 [52] 株式会社ミッシュインターナショナル. "ホーム> FMC (ANSI/VITA 57.1) とは", [https://www.
1890 mish.co.jp/fmc](https://www.mish.co.jp/fmc) とは/, (閲覧日: 2023-12-08)
- 1891 [53] 小笠原舜斗, 池田仁美, 小林鉄也, 西脇みちる. "SuperKEKB における高速光ファイバービームロスモニ
1892 ターシステムの開発". 第 20 回日本加速器学会年会, 2023 年 8 月 29 日 - 9 月 1 日 (WEP08)
- 1893 [54] 矢野 喜治, 帯名 崇, 道園 真一郎. "光ファイバービームロスモニター". 第 9 回日本加速器学会年会,
1894 2012 年 8 月 8 日 - 11 日 (THPS021)
- 1895 [55] 中西功太, 赤井 和憲, 海老原 清一, 可部 農志, 小林 鉄也, 西脇 みちる. "SuperKEKB の RF システムで
1896 使用するアークセンサ用光ファイバの性能評価". 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 9 日 - 11 日
1897 (SAP108)
- 1898 [56] 飛山 真理, フラナガン ジョン, ドラゴ アレッサンドロ. "SueprKEKB リング用個別バンチフィールドバッ
1899 クシステム". 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 8 月 8 日 - 8 月 10 日 (TUOM06)
- 1900 [57] HAMAMATSU. "光電子増倍管 PHOTOMULTIPLIER TUBE その基礎と応用 第 4 版". 技術
1901 資料. [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_
1902 SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf), (閲覧日: 2023-11-24)
- 1903 [58] KEK e+/e- Linac ホームページ、入射器情報> Layout > Linac Element Web Page(New)、[https:
1904 //www-linac.kek.jp/index-j.html](https://www-linac.kek.jp/index-j.html), (閲覧日: 2023-09-26)
- 1905 [59] THORLABS ホームページ. <https://www.thorlabs.co.jp/>, (閲覧日: 2023-12-17)
- 1906 [60] 駿河精機 株式会社. 光学実験機器>ベース: ポストシステム>ポストフォーク:A21-PF. [https://jpn.
1907 surugaseiki.com/products/series/A21-PF](https://jpn.surugaseiki.com/products/series/A21-PF), (閲覧日: 2023-12-17)
- 1908 [61] 北村和樹, *et al.* "SuperKEKB 加速器におけるビームアポート高速化に向けた基礎研究". 日本物理学会
1909 第 77 回春季大会, 2023 年 3 月 22 - 25 日 (24pT3-8)
- 1910 [62] 北村和樹, *et al.* "SuperKEKB 加速器ビームアポート高速化のための大気中レーザーによる信号伝送の

- 1911 研究”. 日本物理学会 第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 16 - 19 日 (18pRA34-1)
- 1912 [63] 谷田貝豊彦. ”光学”. 朝倉書店, 2017 年 5 月 25 日 初版 第 1 刷
- 1913 [64] THORLABS. ”Optical Power Monitor Operation Manual”. [https://www.thorlabs.com/
software/MUC/OPM/v5.0/TL_OPM_V5.0_web-secured.pdf](https://www.thorlabs.com/software/MUC/OPM/v5.0/TL_OPM_V5.0_web-secured.pdf)
- 1915 [65] 角野 秀一. プライベートコミュニケーション
- 1916 [66] 梶 裕志. プライベートコミュニケーション

1917 付録 A

1918 ビームアボートに関する各情報の取得方法

1919 A.1 White Rabbit により記録された信号の到着時刻

1920 Get text data from Archiver Appliance by ROOT は KEK 内部ネットワークの為、VPN 経由でリモート
1921 ト接続出来るように先ず KEK ccPortal 計算機サービス申請を通じて専用のアカウントを取得する。

1922 Get text data from Archiver Appliance by ROOT は以下のリンクからアクセスできる。

1923 http://kekb-co-web.kek.jp/epics/aa/get_text_data/

ここにアクセスすると図 A.1.1 のような画面が表示される。一番上の PV Name の欄に取得したい信号の

Get text data from Archiver Appliance by ROOT

The screenshot shows a web form titled "Get text data from Archiver Appliance by ROOT". It contains the following elements:

- A text input field for "PV Name" containing "TM_WR_SPEC1.DIO.CH0.STA".
- Two date-time pickers for "Start" (2022/05/25 00:00:00) and "End" (2022/06/23 00:00:00).
- A "Time Format" section with two radio buttons: "JST" (selected) and "Unixtime".
- A blue "GetFile" button.

図 A.1.1 Get text data from Archiver Appliance by ROOT にアクセスした時の表示画面

1924 到着時刻が記録されている PV Name を入力する。信号の出力場所と送信先に関する情報とそれに対応する
1925 PV Name は表にまとめてある。White Rabbit の設置は 2023 年 6 月現在、進行中であるため随時確認の
1926 必要がある。

1927 その下の欄は取得したいデータの記録期間を入力する箇所、左側の Start に取得開始日時、右側の End
1928 に取得終了日時を入力する。

1929 これらのデータは宇宙線由来の信号記録も含まれるので入射と同期していない LER ビームアボートの情報
1930 を選び出す必要がある。この点については「アボートサマリーページ (http://kekb-co-web.kek.jp/doc/Image/BELLE/abort_summary/web/json/index.php)」から確認できる。図はこのページの例である。

1931 このページで Ring の欄が "Both" もしくは "LER"、BT orbit が "not in-sync. with inj." であるも
1932 のが選び出すべき SBL 由来のアボート動作のデータに該当する。

Time	Ring	Source	I LER [mA]	I HER [mA]	Nb	Dia(L) [mRad/s]	Dia(H) [mRad/s]	Diamond abort	LossMon (L)	LossMon (H)	BOR/BCM (L)	BOR/BCM (H)	Inj(L) [us]	Inj(H) [us]	BT orbit	AbtBPM (L)	AbtBPM (H)	Earth quake	Pressure burst	Comment
2022-06-02 23:20:57 TimeStamp	HER	Loss Monitor D10-2	1147	916	2151	30	75								not in-sync with inj.					
2022-06-02 22:55:02 TimeStamp	Both	Belle2 CLAWS +diamond	1299	1036	2151	209	9	53 mRad							not in-sync with inj.					D04_L08 QW4OLP /GV(D04_L02)
2022-06-02 21:57:29 TimeStamp	Both	Belle2 VXD diamond	493	235	2151	97	4	17 mRad					8							
2022-06-02 21:31:15 TimeStamp	Both	Belle2 VXD diamond	1286	1038	2151	57	9	4 mRad					13							D04_L08 QW4OLP /GV(D04_L02)
2022-06-02 20:19:41 TimeStamp	Both	Belle2 VXD diamond	955	466	2151	46	5	4 mRad					-2							
2022-06-02 20:01:50 TimeStamp	Both	Belle2 VXD diamond	1295	1037	2151	52	8	5 mRad					2							D04_L08 QW4OLP /GV(D04_L02)
2022-06-02 17:53:55 TimeStamp	HER	Loss Monitor D10-2	1032	820	2151	28	87								not in-sync with inj.					
2022-06-02 16:16:57 TimeStamp	Both	Belle2 CLAWS +diamond	597	498	2151	53	1	30 mRad							not in-sync with inj.					D02_L25 QKBRP /BLC1RP /GV(D02_L04)
2022-06-02 13:34:05 TimeStamp	HER	RF D4-F	0	0	2151	0	0								not in-sync with inj.					
2022-06-02 10:30:34 TimeStamp	Both	Belle2 CLAWS	1197	954	2053	60	8								not in-sync with inj.					
2022-06-02 07:07:18 TimeStamp	LER	RF D7-B	1096	875	2053	46	6								not in-sync with inj.					
2022-06-02 04:43:05 TimeStamp	Both	Belle2 VXD diamond	115	112	2053	28	5	8 mRad					-61							Lv2
2022-06-02 04:30:54 TimeStamp	LER	Belle2 VXD diamond	797	0	2053	62	0	4 mRad					-1							
2022-06-02 04:22:06 TimeStamp	HER	CCG D8	946	757	2053	43	6								not in-sync with inj.					D08_H05 D09V1collimator
2022-06-02 03:50:13 TimeStamp	HER	CCG D8	997	795	2053	41	5								not in-sync with inj.					D08_H05 D09V1collimator
2022-06-02 03:03:26 TimeStamp	HER	CCG D8	947	755	2053	48	5								not in-sync with inj.					D08_H05 D09V1collimator
2022-06-02 02:10:57 TimeStamp	Both	Belle2 CLAWS +diamond	947	729	2053	43	171	14 mRad							not in-sync with inj.					
2022-06-02 00:24:58 TimeStamp	HER	CCG D8	699	556	2053	37	4								not in-sync with inj.					D08_H05 D09V1collimator

図 A.1.2 アポートサマリーページにアクセスした時の表示画面. 左から 2 列目の「Ring」、16 列目の「BT orbit」がそれぞれ「アポートが実行されたリングの名称」、「入射に同期していたか否か」を表す。

A.2 アポートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー

図 A.1.2 に示したアポートサマリーページにて、一番左の列の「Time」にある「TimeStamp」をクリックすると以下の図 A.2.1 に示すページが表示される。

MR 各所から送られた信号が CCB に届いた順番に上から順に並べられている。このうち、「MESSAGE」欄が水色で表示されているものが CCB の WR-TDC で記録されている信号である。これらの信号は WR システムで同期が取られている。従って水色の欄の中で最も早く信号を届けたものを「アポートリクエスト信号を CCB へ最初に届けたセンサー」として分類をおこなった。この 2022 年 6 月 2 日 22 時 55 分 2 秒に発生した SBL 事象の例では「COLSAFE:CCC:ABORT:D05」となっている。これは D05 のアーク放電センサーを表している。つまりこの場合は D05 のアーク放電センサーが「アポートリクエスト信号を CCB へ最

22:55:02

RING	MESSAGE	DATE	DELTA
LER	Belle2 CLAWS	2022-06-02 22:55:02.656107300	0.000 000 000
LER	RF D5-F	2022-06-02 22:55:02.656108000	0.000 000 700
HER	Belle2 CLAWS	2022-06-02 22:55:02.656108100	0.000 000 800
LER	Loss Monitor D4-3	2022-06-02 22:55:02.656114500	0.000 007 200
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D5	2022-06-02 22:55:02.656114800	0.000 007 500
LER	Loss Monitor D7-1	2022-06-02 22:55:02.656115500	0.000 008 200
LER	Belle2 VXD diamond	2022-06-02 22:55:02.656116200	0.000 008 900
LER	Loss Monitor D1-1	2022-06-02 22:55:02.656116400	0.000 009 100
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D7	2022-06-02 22:55:02.656117000	0.000 009 700
HER	Belle2 VXD diamond	2022-06-02 22:55:02.656117000	0.000 009 700
HER	COHSAFE:CCC:ABORT:D2	2022-06-02 22:55:02.656117700	0.000 010 400
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D2	2022-06-02 22:55:02.656118300	0.000 011 000
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D4	2022-06-02 22:55:02.656119500	0.000 012 200
LER	Loss Monitor D4-1	2022-06-02 22:55:02.656120100	0.000 012 800
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D1	2022-06-02 22:55:02.656125700	0.000 018 400
LER	Loss Monitor D4-2	2022-06-02 22:55:02.656126200	0.000 018 900
LER	RF D5-A	2022-06-02 22:55:02.656131300	0.000 024 000
LER	RF D5-D	2022-06-02 22:55:02.656131300	0.000 024 000
LER	RF D5-B	2022-06-02 22:55:02.656131700	0.000 024 400
LER	RF D5-E	2022-06-02 22:55:02.656131700	0.000 024 400
LER	RF D5-C	2022-06-02 22:55:02.656132100	0.000 024 800
LER	RF D8-E	2022-06-02 22:55:02.656140500	0.000 033 200
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:D8	2022-06-02 22:55:02.656140600	0.000 033 300
LER	COLSAFE:CCC:ABORT:CCC-6	2022-06-02 22:55:02.656142100	0.000 034 800
LER	RF D8-A	2022-06-02 22:55:02.656142600	0.000 035 300
HER	RF D4-F	2022-06-02 22:55:02.656143800	0.000 036 500
LER	RF D8-B	2022-06-02 22:55:02.656144200	0.000 036 900
HER	RF D4-G	2022-06-02 22:55:02.656144400	0.000 037 100
HER	RF D4-H	2022-06-02 22:55:02.656145300	0.000 038 000

図 A.2.1 各センサーからのアポートリクエスト信号の CCB 到着時刻とその順序。この図は 2022 年 6 月 2 日 22 時 55 分 2 秒に発生した SBL 事象の例。上側に記載されているものほど早く CCB に到着していることを表す。

1944 初に届けたセンサー」として分類できる。

1945 A.3 MR ビームの周回においてビームロスを最も上流で検知したセンサー 1946 位置

1947 以下の URL、

1948 http://bpc-3-406-2.kek.jp/image_new/2022b_TVL/index.html

1949 にアクセスすると LER の各 SBL 事象に対する図 A.3.1 のようなプロットが掲載されている。図 A.3.1 は

1950 2022年6月2日22時55分2秒に発生したSBL事象における、各センサーの相対的なビームロス検知タイ
 1951 ミングを表している。それぞれの検知信号が集約される電源棟にはWR-TDCが設置されており、そのタイ
 スタンプが時刻の測定に用いられている。斜めに走る線は同じバンチであることをあらわしている。例え

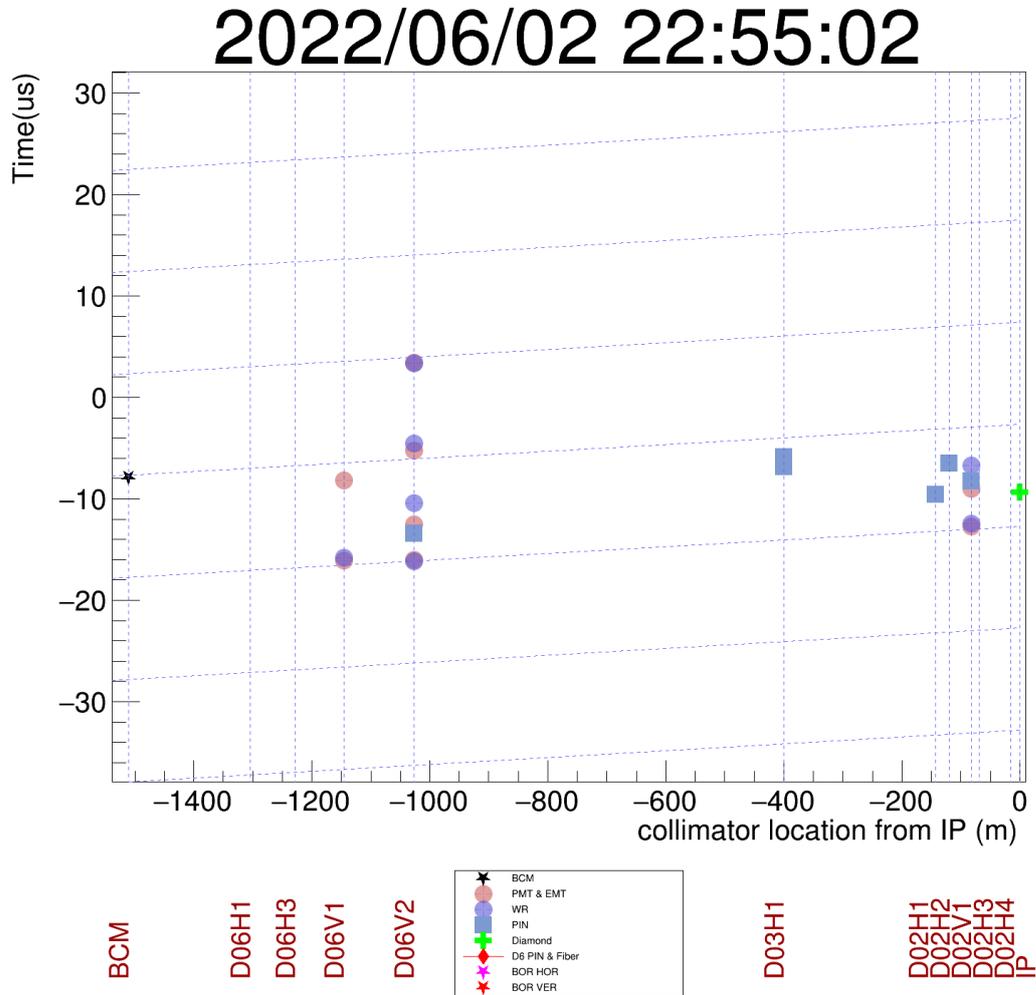


図 A.3.1 SBL 発生時における各センサーのビームロス検知タイミング。この図は 2022 年 6 月 2 日 22 時 55 分 2 秒に発生した SBL 事象における例。横軸は衝突点から各コリメータまでの距離、縦軸は検知タイミングの相対的な時間を表す。斜めに走る線は同じバンチであることを示す。

1952
 1953 ば下から 3 本目の破線を左から辿って見ていくと先ず D06V1 に置かれた LM が観測したことが分かる。そ
 1954 のまま右へ辿っていくと観測の記録があるのは D06V2、D02V1 の LM である。従ってこの事象では最も
 1955 上流で検知した LM の位置は D06V1 となる。観測自体はさらに上流に位置する BCM (最も左側の黒い五芒
 1956 星) にかんしても記録があるが、リング 1 周が 10 μ s であることを踏まえるとこれは D06V1 の LM に対し
 1957 て 1 周遅れで検知している。また D06V2 の検知タイミングは D06V1 のそれよりも僅かながら早い
 1958 が、各コリメータから D06 電源棟まで敷設された光ケーブルの長さが D06V1 からは 151m、D06V2 からは 114m
 1959 なので [43]、仮に二者のコリメータも中点地に SBL が発生すると D06 電源棟へ信号を届けるのは D06V2
 1960 の LM となる。従ってこのような観測例は同一ターンによる観測として扱い、最上流で SBL を検知したのは

¹⁹⁶¹ D06V1 の LM と判断した。

¹⁹⁶² こうした手順に従うと、このイベントでは「最上流検知 LM の位置は D06V1」、と分類される。

付録 B

レーザー伝送試験に用いたパーツ

- 光学定盤

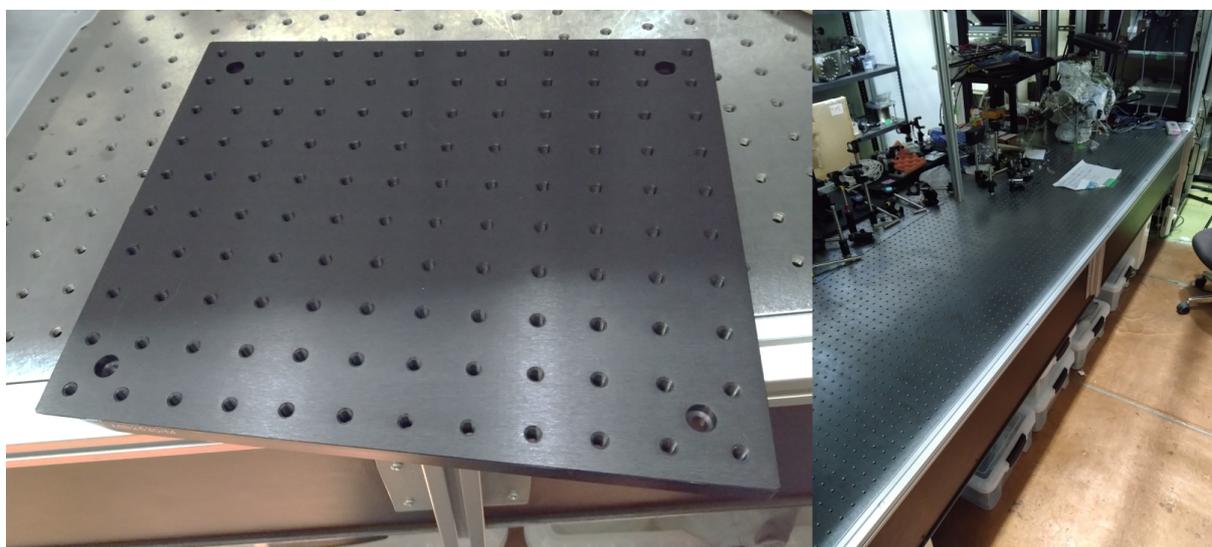


図 B.0.1 光学定盤. アルミニウム製ブレッドボード (MB2530/M)、250 mm×300 mm×12.7 mm、(左)と地面に固定されたステンレス製の台 (右). 定盤上のネジ穴は共に M6 タップ穴 (ミリ規格).

様々な光学パーツを設置し、1 インチ (=25.4 mm) 間隔に開けられた 6 mm 直径のネジ穴にネジで固定するための板である。材質はステンレス製やアルミニウム製、サイズも様々である。4.4.2 節などにおける送信側、集光側光学系には MB3060/M - アルミニウム製ブレッドボード、300 mm×600 mm×12.7 mm、M6 タップ穴 (ミリ規格) を使用している。

- レーザーダイオードモジュール (CPS532-C2)[59]



図 B.0.2 532 nm、910 μ W のコリメート DPSS レーザーダイオードモジュール. 筐体の直径は 11 mm.

1971
1972

波長は 532 nm、出力光量は 910 μ W で、出力ビームのビーム形状は円形である。また主力される光の強度分布は図のように釣鐘型のガウシアンビームである。

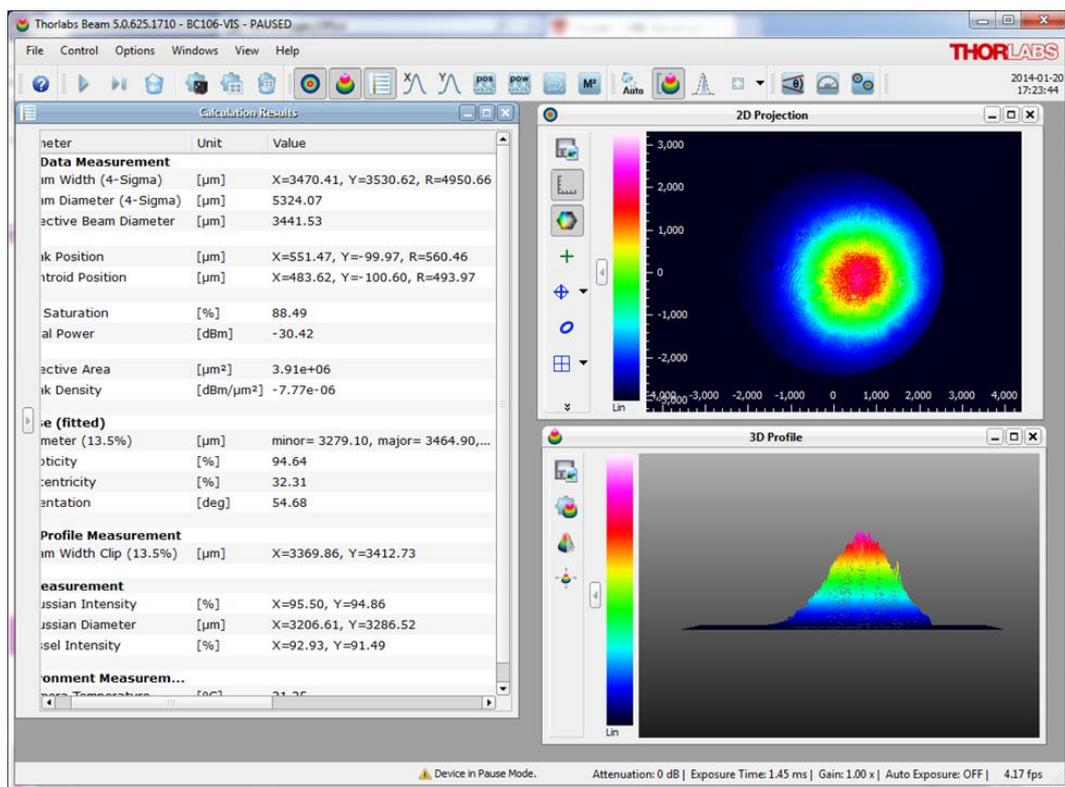


図 B.0.3 CPS532-C2 が出力する光の強度分布. 右側の図から釣鐘状の分布になっていることが確認できる.

1973
1974

このモジュールにはダイオード励起固体 (DPSS) レーザーが搭載されており、出力パワーをクラス II 強度の安全規格まで下げるために内部減衰器が使用されている。

1975

- 5 VDC 出力 AC アダプタ、2.5 mm フォノプラグ付き (LDS5)



図 B.0.4 LDS5 - 5 V 直流出力交流アダプタ. 2.5 mm フォノプラグでレーザーダイオードに電力供給する.

1976

- バッテリー (CPS1)



図 B.0.5 レーザー光源用 5 V 電圧供給バッテリー. 近くから電源を取って来れない時に使用する. USB コネクタなので USB-フォノケーブルでフォノ端子のレーザー光源に接続する.

1977

- キネマティックマウント

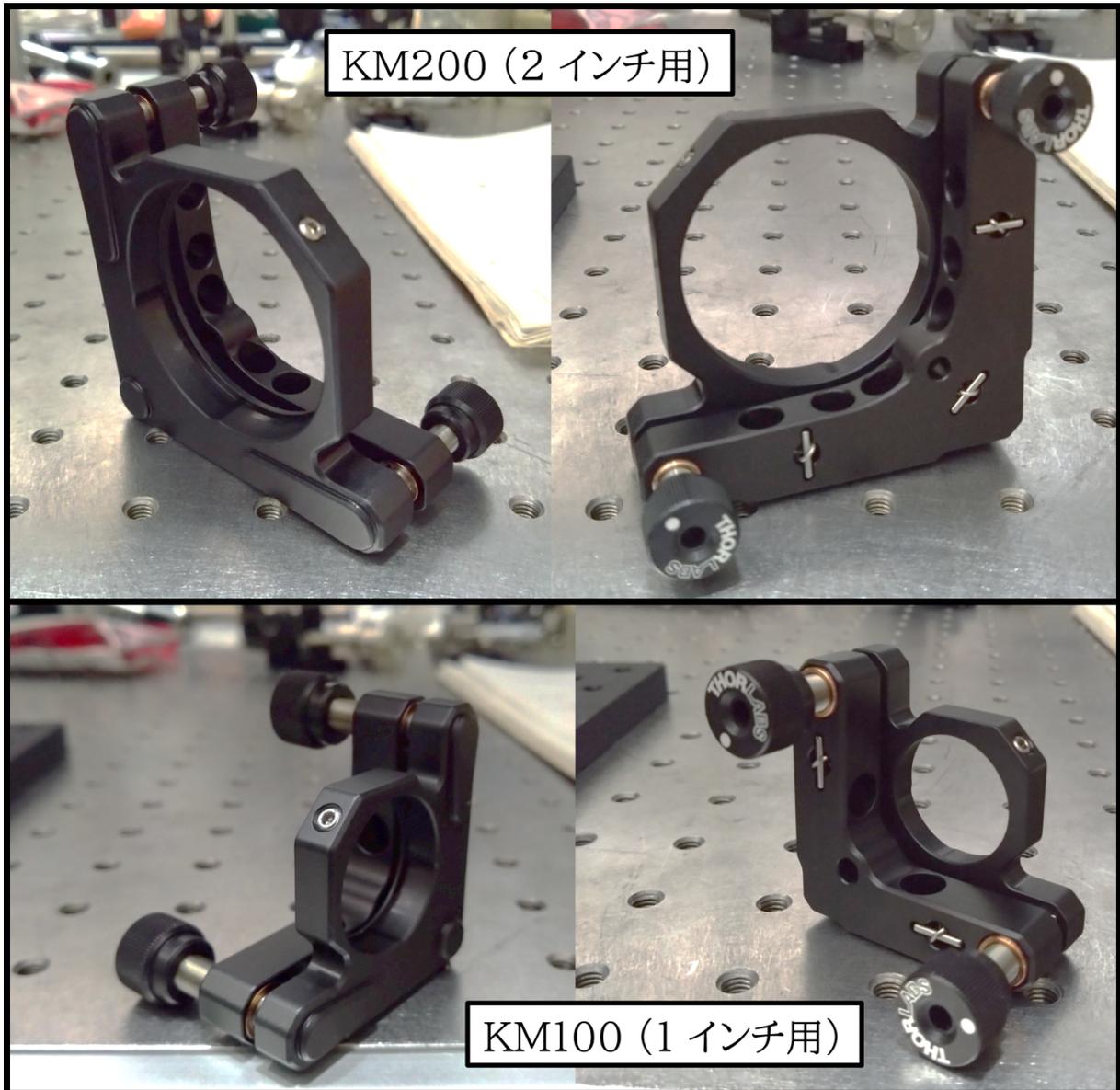


図 B.0.6 キネマティックマウント. KM200 は 2 インチ (=50.8 mm) 直径の、KM100 は 1 インチ (=25.4 mm) 直径のミラーの固定に用いる.

1978

- AE4M6M - ネジアダプタ、内ネジ-外ネジ、M4 - M6、長さ 10.0 mm (ミリ規格)



図 B.0.7 ネジアダプタ. 4mm 直径のネジを、6mm 直径のネジ穴に固定出来るようにする.

1979

- Φ25mm 台座付きピラーポスト、M6 タップ



図 B.0.8 ピラーポスト. 高さが 1.5 インチ (=38mm の RS1.5P\ M (左) と、2 インチ (=50mm の RS2P\ M (右). 前者は 2 インチミラー、後者は 1 インチミラーの台として用いる.

1980

- ポストスペーサ



図 B.0.9 ポストスペーサ. キネマティックマウントとポストの間に咬ませて任意の高さに変える. RS5M (左) は 5mm、RS4M (右) は 4mm の厚みがある. 前者は RS1.5P\ M 及び と、後者は RS2P\ M と用いてミラーの中心の高さが 80mm となるようにしている.

1981

- $\Phi 12$ mm ポスト (TR40/M-JP) 及び $\Phi 12$ mm ~ $\Phi 12.7$ mm ポストホルダ (PH40E/M)



図 B.0.10 TR40/M-JP - $\Phi 12$ mm ポスト、長さ 40mm、日本向け (ミリ規格) (左) と PH40E/M - 台座付き $\Phi 12$ mm ~ $\Phi 12.7$ mm ポストホルダ、バネ付き六角固定つまみネジ付き、長さ 44.7mm (ミリ規格) (右).

1982

キネマティックマウントの台として用いる。ポストホルダにつまみネジがついているので任意の高さに固定できる。

1983

1984

- CF125C\ M - クランプフォーク、31.5mm ザグリ穴付き、M6 キャップスクリュ (ミリ規格)



図 B.0.11 クランプフォーク.

- 1985 定盤にポストを固定するために用いる。ファイバー集光効率、テレスコープによるレーザー長距離伝送
1986 試験では SURUGA 製のポストフォーク：A21-PF[60] も併用した。
1987
- M4 ネジ



図 B.0.12 M4 ネジ. ポストにキネマティックマウントを固定するために用いる.

1988

- $\phi 25.4$ mm ネジ無しアダプタ 円筒形部品用



図 B.0.13 AD11NT (左) と AD15NT (右). 右の図において真ん中にセットされているのはマルチモードレンズ (F950FC-A).

1989

AD11NT は $\phi = 11$ mm 径の、AD15NT は $\phi = 11$ mm 径の円筒形部品を KM100 の内径に合わせるために用いる。本研究では AD11NT はシングルモードレンズ (F220FC-532) やレーザーダイオードモジュール (CPS532-C2)、AD15NT はマルチモードレンズ (F950FC-A) の固定に用いた。

1990

1991

1992

- N-BK7 平凸レンズ、AR コーティング:350~700 nm



図 B.0.14 ϕ N-BK7 平凸球面レンズ、直径が 1 インチ (左) のものと 2 インチ (右) のもの。写真は左から順に焦点距離が 50 mm、200 mm のレンズ。

1993

焦点距離の異なる 2 つのレンズで入射してきたレーザーのプロファイルサイズを変えて理想的には平行光を出すことが出来る。本研究では 1 インチ については焦点距離が 35 mm、50 mm、100 mm、150 mm の、2 インチの方は焦点距離が 200 mm のレンズを用いた。

1994

1995

1996

- $\phi 25$ mm ~ $\phi 25.4$ mm 光学素子用 XY 移動レンズマウント (ミリ規格, LM1XY/M)

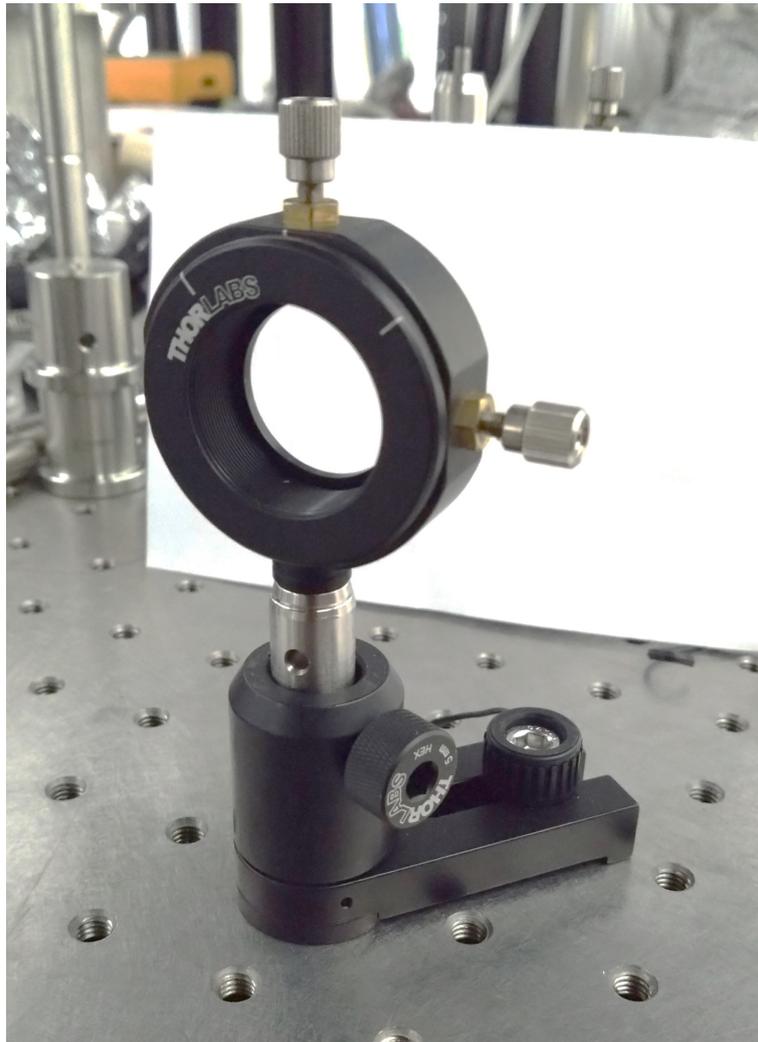


図 B.0.15 光学素子用 XY 移動レンズマウントを TR40/M-JP PH40E/M に取り付けられた様子.

- 1997 ファイバー集光効率の試験にて、1 インチのレンズを取り付けたものを 2 つ並べてテレスコープを作
1998 る際に使用した。取り付けられた光学素子の位置をレーザー進行方向に対して垂直な 2 方向別々に調整で
1999 きる。
- 2000 ● $\phi 6$ mm ケージアセンブリロード (ER12, ER8-P4)
 - 2001 asseblirod

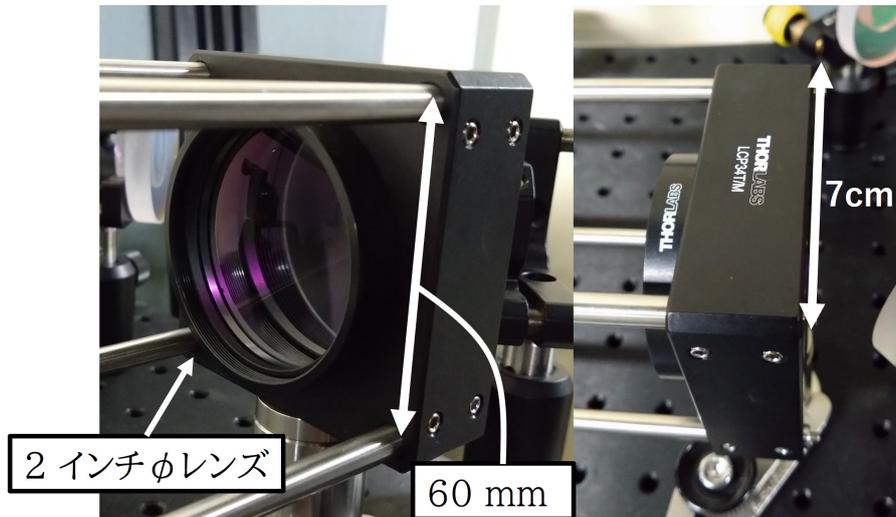


図 B.0.16 $\phi 6$ mm ケージアセンブリーロッド (ER12, ER8-P4) を 60 mm ケージプレートの 4 つ角の穴に通した様子. 赤矢印 4 本が指す金属棒がケージアセンブリーロッド.

2002
2003
2004

60 mm ケージプレートを互いに平行且つ同じ高さに固定するためにアセンブリーロッドを用いる。

- 60 mm ケージプレート、SM2 ネジ付き、厚さ 12.7 mm、M4 タップ穴、固定リング SM2RR 2 個付属 (ミリ規格) (LCP34/M)

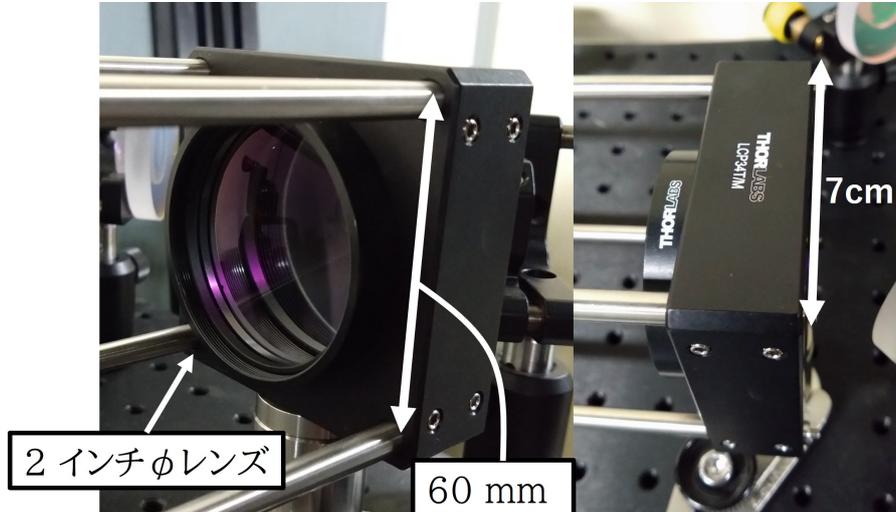


図 B.0.17 60 mm ケージプレートに 2 インチレンズを取り付けた様子 (左) と上から見た様子 (右).

2005

- ケージシステム変換アダプタ (LCP6X)

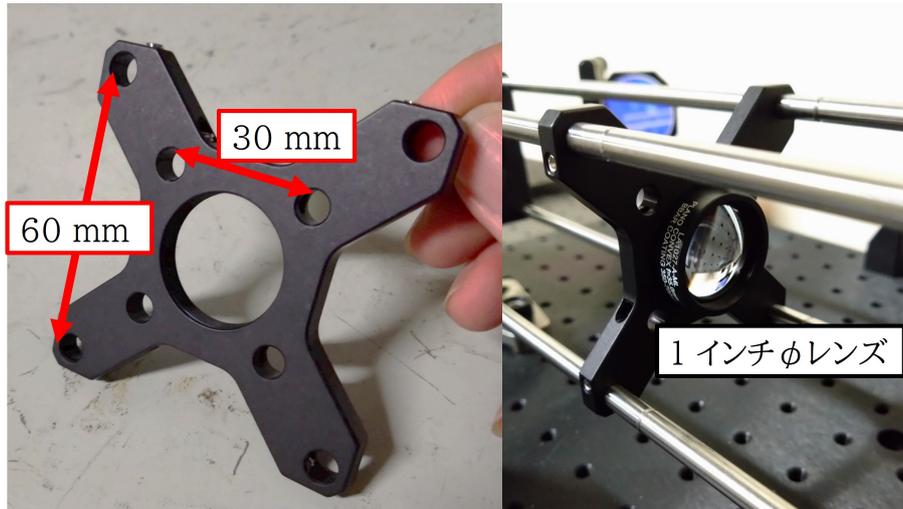


図 B.0.18 ケージシステム変換アダプタ、30mm-60mm、厚さ 6.0 mm (左) と 60 mm 幅で組んだケー
ジに変換アダプタを固定し 1 インチレンズを取り付けた様子 (右)。

- 2006 ● 集光レンズ
- 2007 ● マルチモードレンズ (F950FC-A)

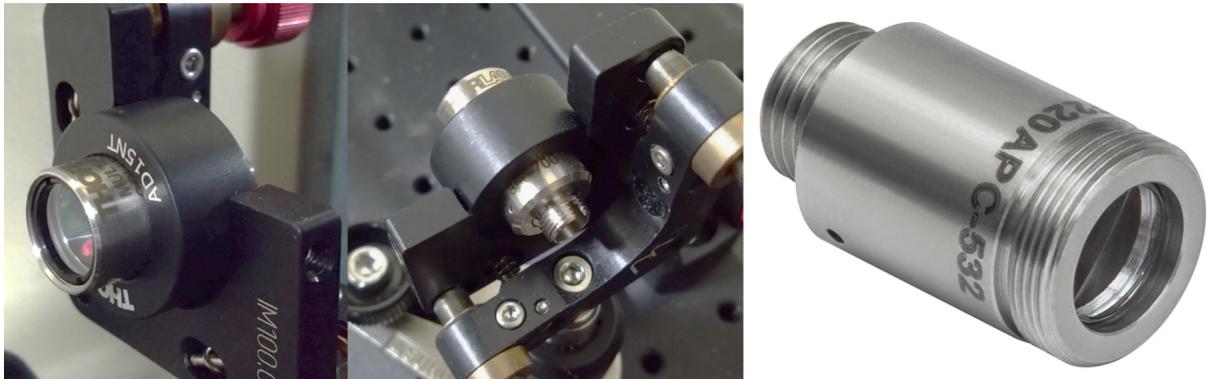


図 B.0.19 マルチモードレンズ (F950FC-A) を AD15NT を用いて KM100 に取り付けた様子 (左、中
央) とシングルモードレンズ (F220FC-532) (右)[59]. 写真 (中央) に示すように光ファイバーの FC コネ
クタを直接接続できる. シングルモードレンズも同様の接続が可能である.

- 2008 マルチモードレンズについて、 $NA = 0.54$ 、焦点距離は 9.9 mm で設計されており、レンズは直径
- 2009 11.05 mm である。350 ~ 700 nm の波長に対応している。
- 2010 シングルモードレンズについては、 $NA = 0.25$ 、焦点距離は 10.90 mm、532 nm の波長で設計されて
- 2011 おり、レンズは直径 7.2 mm である。
- 2012 ● マルチモード光ファイバー

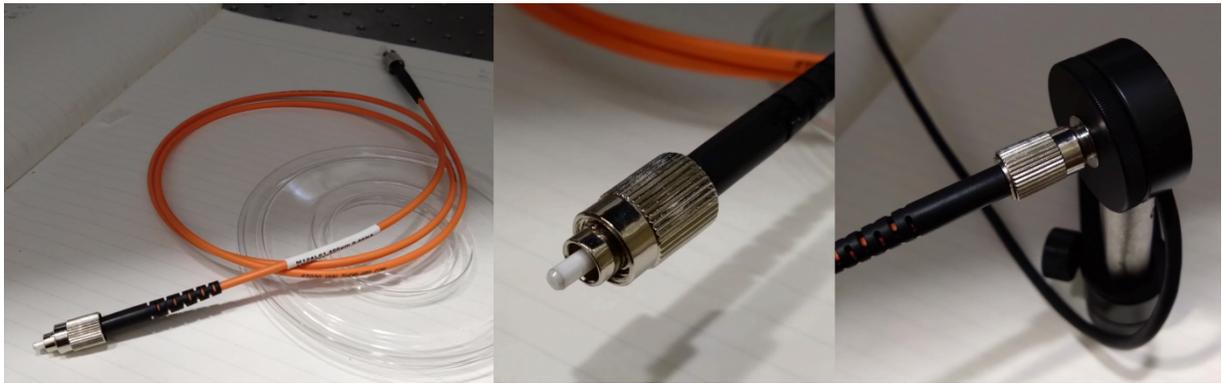


図 B.0.20 マルチモード光ファイバー (左)、ファイバーコネクタ部分 (中央) 及びコネクタをファイバーアダプターキャップでパワーメーターに接続した様子 (右). 写真のファイバーは M124L01 ($\phi = 400 \mu\text{m}$, $NA = 0.50$).

2013

● コーティングミラー

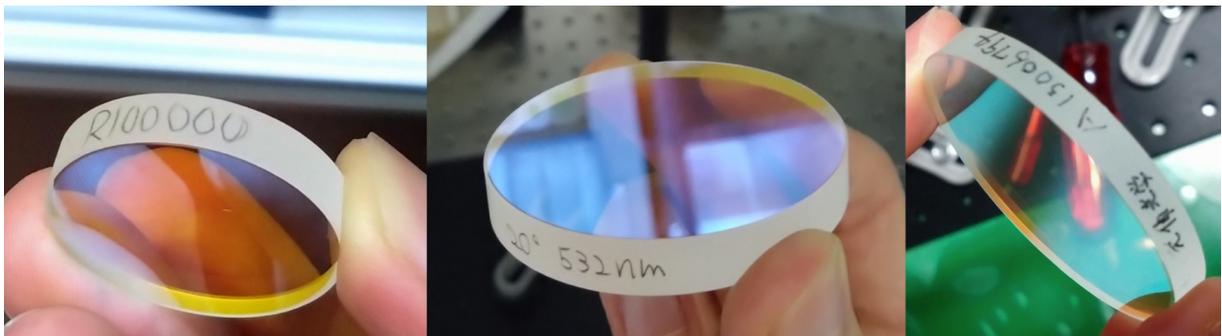


図 B.0.21 曲率半径 $R = 100 \text{ m}$ の 1 インチ球面ミラー (左)、入射角 20° 用 2 インチ平面ミラー (中央) 及び入射角 45° 用 2 インチ平面ミラー (右).

2014

1 インチ球面ミラーは図のものと曲率半径 $R = 50 \text{ m}$ の 2 種類があり、入射角が 20° で 99% の反射率を達成するように設計されている。532 nm の波長を最も反射するようにコーティング処理がなされている。

2015

2016

2017

● 1 インチミラーを張り付けた 2 インチミラー

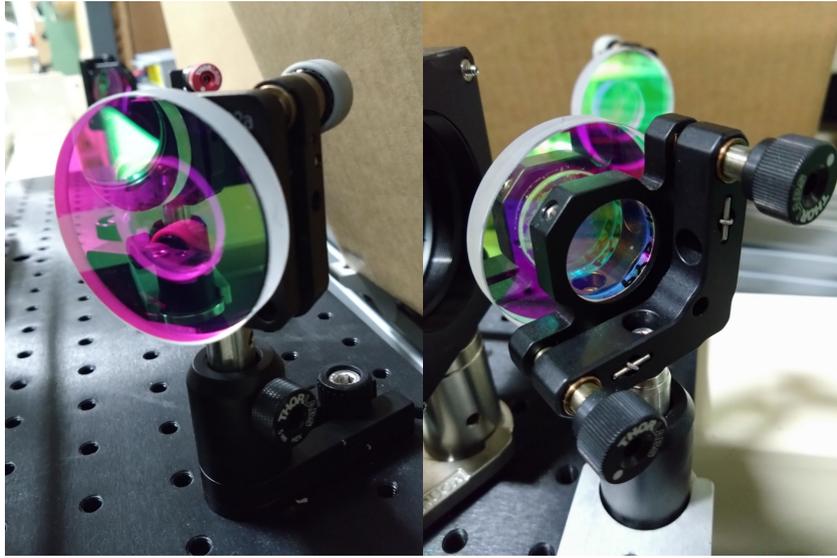


図 B.0.22 1 インチミラーを張り付けた 2 インチ平面ミラーを KM100 に取り付けて TR40/M-JP と PH40E/M で固定した様子。

- 2018 KM200 が不足していたため、1 インチミラーを紫外線照射で硬化する光学グルーで入射角
 2019 45° 用 2 インチ平面ミラーに張り付けて KM100 に固定できるようにした。ミラー表面は 532 nm の
 2020 波長に合わせたコーティング処理がなされている。
 2021 ● フォトダイオードパワーセンサとファイバーアダプターキャップ

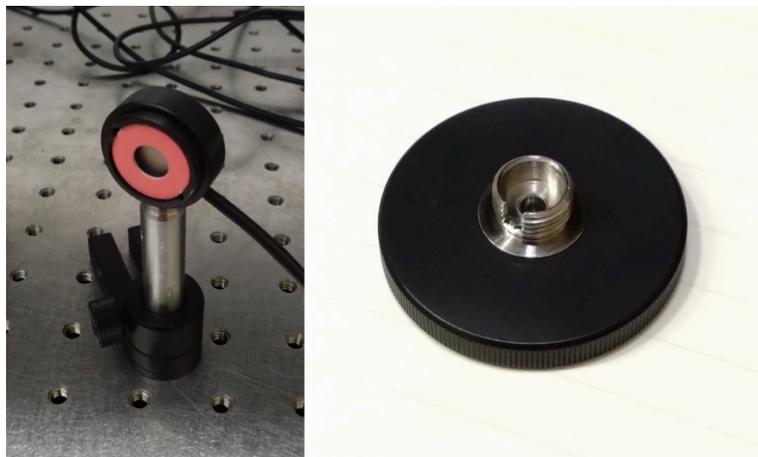


図 B.0.23 S120C - 標準フォトダイオードパワーセンサ、Si、400 ~ 1100 nm、50 nW ~ 50 mW (左) と S120-FC - FC/PC ファイバーアダプターキャップ、SM1 内ネジ付き、ワイドキー (2.2 mm) (右)。ポストにキネマティックマウントを固定するために用いる。

- 2022 ● PM100D - 小型パワー&エネルギーメーターコンソール、デジタル 4 インチ LCD



図 B.0.24 小型パワー&エネルギーメーターコンソール.

- 2023 ファイバー集光量を表示させる際に用いた。また SD カードで 0.3s 毎に入力光量のデータを CSV
2024 ファイル形式で記録できる。
- 2025 ● 赤外光アライメント用レーザー



図 B.0.25 赤外光アライメント用レーザー。

- 2026 ファイバー集光効率の試験にてレーザー軌道の調整に用いる。写真に示したファイバーの FC コネクタ
2027 から赤外光が出力され、この光の照射の様子を見る際は赤外光に感光する専用のカード、近赤外 (NIR)
2028 域ビューワカード (VRC4) を用いる。
2029 ● 緑防振シート B タイプ

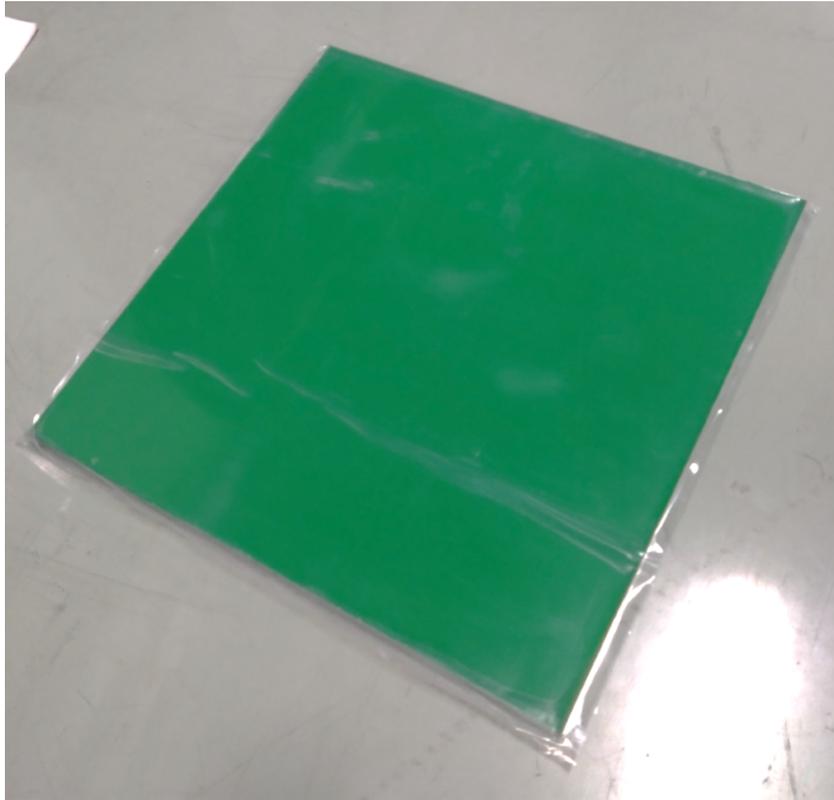


図 B.0.26 緑防振シート B タイプ. 寸法は 40 cm× 40 cm、厚さ 10 mm.

- 2030 入射器棟ギャラリーで長距離レーザー伝送を実施した際にレーザー軌道のふらつきを FFT 解析する
2031 と、原因不明の 100 Hz ピークが見られた。そこで数十 Hz 以上で防振性のあるシートで振動抑制する
2032 目的で用いた。
- 2033 ● 方眼ボード

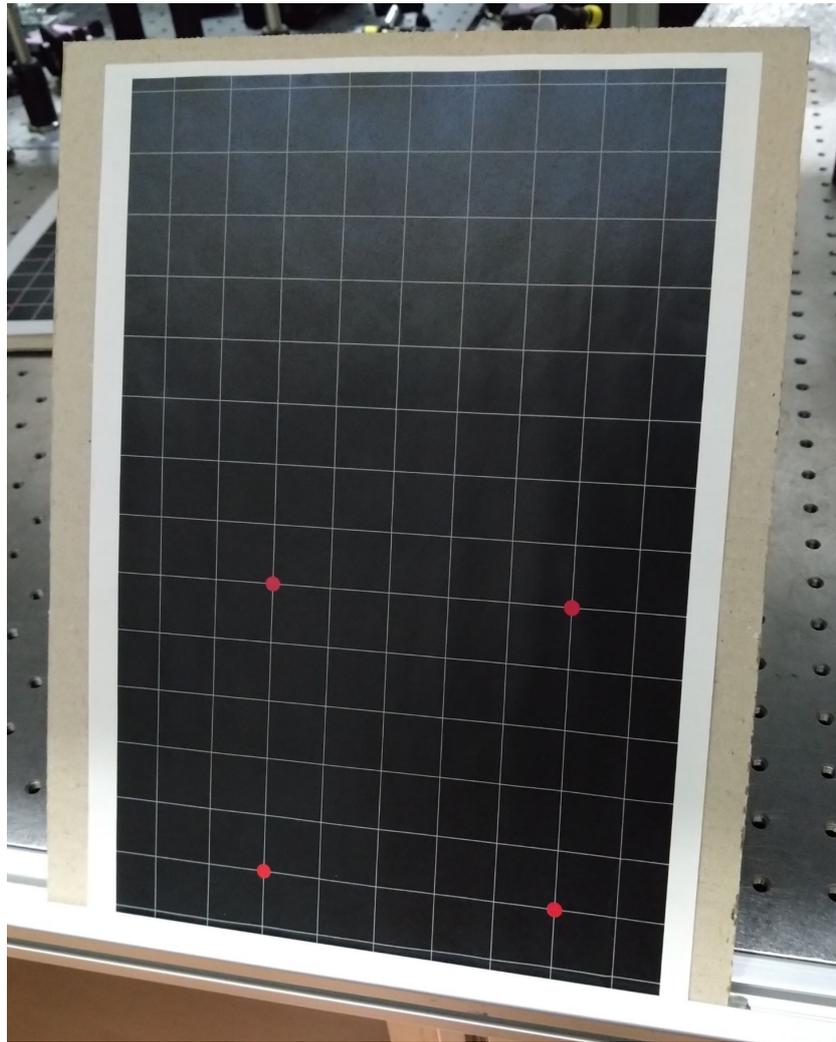


図 B.0.27 方眼ボード. 6 マスで 118mm なので 1 目盛 $19\frac{2}{3}$ mm .

2034 長距離伝送したレーザーをこれに照射してカメラで撮影した動画のピクセルを長さに校正する目的で
2035 使用する。1 目盛 $19\frac{2}{3}$ mm で 5 マスを 1 辺とする正方形の 4 頂点に赤い丸が打ってある。フレーム画
2036 像を赤色の輝度ファイルに変換、画像のピクセル座標とその座標の輝度の値による加重平均から 4 つ
2037 の赤い丸のピクセル座標をフレーム画像毎に求める。それら 4 つの赤丸ピクセル座標と赤丸間長さの
2038 対応関係から緑色レーザーのふらつきや照射範囲をピクセル値から長さへ校正する。緑色レーザーにつ
2039 いては各フレーム画像を緑色の輝度ファイルに変換して解析した。