

話 題

CERN 長期滞在における研究活動報告

安積 隆夫*

Research Activity Report in Long Stay in CERN

Takao ASAKA*

1. はじめに

2004年10月から約1年3ヶ月、欧州合同素粒子原子核研究機構（CERN）の次世代衝突型線形加速器、コンパクトリニアコライダー（CLIC）プロジェクトに参加し、電子・陽電子衝突部ビーム輸送系、および最終収束系の研究開発をおこなった。CLICは、CERNサイト内で現在建設が進められている大型ハドロンコライダー（LHC）の次期将来計画であり、質量起源の鍵を握るヒッグス粒子の発見とその性質の解明、そして標準模型を越える理論である超対称性大統一理論モデルの検証を目的としている。CLICの電子・陽電子衝突エネルギーは数 TeV で、 $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に迫るルミノシティを目指しており、これは世界の高エネルギー加速器研究所で掲げられた次世代加速器計画の中でも突出したビームパラメーターとなっている。これを具現するべく、CERNを中心とした国際協力により、加速器構成の検討、および加速器基本要素の技術開発が勢力的に進められている。

本共同研究の目的は、ビーム衝突点のビーム物理の研究、また、それを踏まえた主加速部出口から衝突点までのビーム輸送系、最終収束系の設計、そしてその性能評価を主眼とし、さらに巨大加速器のビーム運転とビーム安定化手法の確立である。このような加速器の先端的技術は CLIC だけにとどまらず、国際リニアコライダー（ILC）や電子線形加速器を基本とする X 線自由電子レーザー、エネルギー回収型線形加速器など、いわゆる第4世代放射光源の実用化においても貢献するものと考えられる。

本稿では、最初に CERN の概要を述べ、次に CLIC 加速器の紹介と本研究内容であるビーム輸送系、ならびに最終収束系の計算結果とその性能を示

す。また CERN という巨大な国際研究機関における活動を通して、研究推進のための事務的管理・支援など多くの貴重な経験を得ることができた。この点についてもあわせて報告する。

2. CERN の概要

CERN はスイスとフランスの国境にあるジュネーブ郊外に位置し、北はジュラ山脈、南はアルプス山脈に囲まれている（写真1）。CERN 設立は 1954 年で、現在、20 カ国の加盟国で構成されている。また、加盟国以外の国々でも最高意思決定機関である理事会への出席が認められるオブザーバー国（機関）として、日本、イスラエル、ロシア、トルコ、アメリカ、インドの 6 カ国に加え、国際連合教育科学文化機関（ユネスコ）、欧州連合（EU）の 2 機関がある。運営は加盟国からの分担金でおこなわれているが、研究部門の活動を中心に、加盟国、非加盟国の研究者にも、

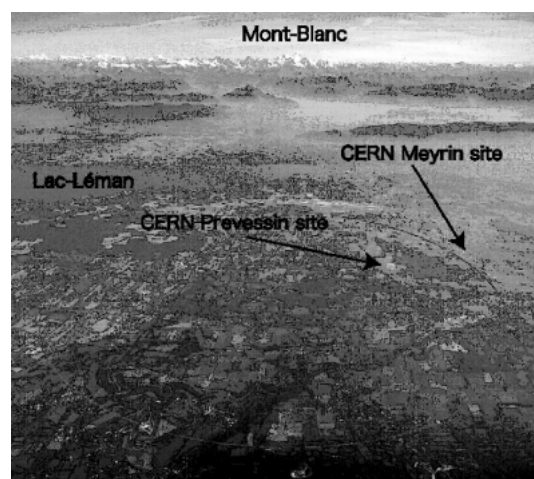


写真1 CERN, LHC 加速器配置

* 財高輝度光科学研究センター
(E-mail: asaka@spring8.or.jp)

ユーザーとして平等に開放されている。2004年10月時点の雇用者数は9799人で、加盟国から正規職員として2586人が派遣されている。さらにフェロー研究員が220人、客員研究員が322人、在外研究員を含むユーザーは6326人のほか、多くの作業関係者、業務委託者、学生が常駐しており、とくに夏期にはさらに多くの研究者、および学生が各国から来訪、常駐する。CERNは2つのキャンパスに分かれており、ひとつはジュネーブ・メイラン地区にある主キャンパスで、陽子加速器群、事務、図書、実験棟、各種研究棟などがあり、物理、加速器、検出器の研究者、技術者のほとんどが滞在している。もうひとつはフランス・プレバッサン地区にあり、現在、地下トンネルに設置予定であるLHC用電磁石、その他加速器機器が保管されている。

私が渡航した年である2004年はCERN設立からちょうど50周年を迎えた年で、多くの記念式典やイベントが催された。記念式典では、欧州各国はもとより、その他関係各国から政府代表者、国賓が招かれ、CERNがこれまで果たしてきた役割や実験成果、そして今後の展望などが紹介された。また一般市民に対して、加速器施設、粒子線検出器など実験設備が公開された。

CERNでは、2001年まで続けられた大型電子・陽電子コライダー（LEP）による加速器運転を終了し、その後、LHCの建設を開始した。14 TeV陽子・陽子衝突型加速器であるLHCは、LEPで使用したトンネルを再利用する周長27 kmの円形加速器で、地下100 mに加速器、4台の検出器が収められる。LHCは2007年完成を目指し、加速器用ビームダクト、超伝導電磁石、そして粒子検出器の製作、設置が進められており、またそれと同時に、国際的なビームコミッションの体制も形成されつつある。私が所属していた加速器部門全体会議では、900人ほどの職員が参加するが、ここではLHCの建設状況、スケジュールなどが報告される。この会議でとくに印象的だったのは、プレバッサン地区に設置予定であるLHC加速器オペレーションルーム内の端末や大型ディスプレイの配置などが、コンピューターグラフィックスによる3Dアニメーションを用いて示され、加速器運転に携わる人数や人の動きなどを見ることができた。これにより、効率的な加速器運転をおこなうための改善点や新たな提案など、活発な議論がなされた。

現在、CERNではLHC建設のほかに、陽子加速器（PS, SPS, AD）を用いた原子核・素粒子実験が継続され、多くの成果を出している。また電子・陽電子の

先端加速器開発もCLICプロジェクトを中心として、大電流ビーム生成試験や高電界ビーム加速の技術検証試験がおこなわれている。

3. CLIC プロジェクト

CLICが目指す素粒子物理実験は、LHC、およびILCに続く2020年以降のTeV領域エネルギーフロンティアであり、標準模型を越えた多くの新しい発見が期待される¹⁾。とくに電子・陽電子衝突実験であるILC, CLICには、次のような利点がある。

- 基本粒子同士の電磁相互作用によるので、物理信号に比べて雑音レベルが極めて低い。
- ビームエネルギーが有効に衝突エネルギーとして使われるので、2つの粒子の全エネルギーに至るすべての現象が基本的に検出できる。
- 基本粒子の衝突エネルギーが解っているので、ビームエネルギーをスキャンして新現象を見つけ出したり、重要な現象を精密に定量化し、基本原理に迫るというタイプの物理実験に最適である。

上記した電子・陽電子衝突実験のエネルギーは、ILCが0.5~1 TeVで、CLICが1~3 TeVをカバーする。両計画とも実現に向けて、国際協力のもと、多くの研究機関がその技術開発に参加している。また共通する研究項目も多く、例えば、極小エミッタンスビーム生成・維持、衝突点におけるビーム物理などがある。CLICプロジェクトでは世界各国のILC研究開発状況も踏まえながら、加速器構成、ビームパラメーター、および加速器パラメーターが随時、最適化されている。実際、月に一度、定例のCLICパラメーター会議が開催され、ビーム性能、および加速器機器パラメーターが最適化・更新される。現段階のCLICの主要パラメーターを表1に示す。

CLICでは、上記した衝突エネルギーを実現するために、大電力高周波生成用加速器と高エネルギービーム加速器が平行して並ぶ、ツービームアクセラレーターを基本構成としている²⁾。これは、図1に示すように、大電流・低エネルギードライブビーム（180 A, 70 ns, 250 MeV~2.5 GeV）から、低電流・高エネルギー衝突実験用ビーム（0.6 A, 60 ns, 9 GeV~1.5 TeV）のための加速ユニットへ高周波を供給し、150 MV/mの加速勾配を発生するものである。これにより全長33.2 kmで3 TeVの衝突エネルギーが達成可能となる。主加速部で1.5 TeVまで加速された電子、またそれと対向して加速された陽電子は、アップソーバー、およびコリメーターがあるビームコリメーション系を介して、衝突点のビームサイズがナノメー

表1 CLIC の主要パラメーター

Center of mass energy	3000	GeV
Main linac RF frequency	30	GHz
Luminosity	6.5	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Linac repetition rate	150	Hz
No. of particles/bunch	2.56	10^9
No. of bunches/pulse	220	
Bunch separation	0.267	ns
Bunch train length	58.4	ns
Beam power/beam	20.4	MW
Unloaded/loaded gradient	172/150	MV/m
Overall two linac length	28	km
Total beam delivery length	2×2.6	km
Proposed site length	33.2	km
Total site AC power	418	MW

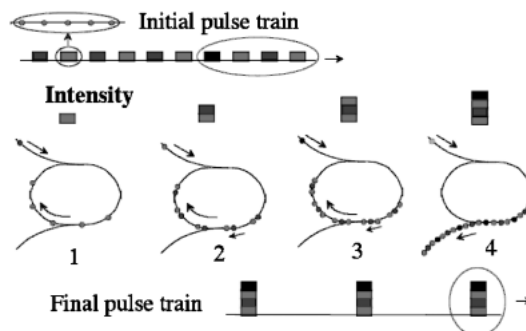


図3 コンバイナーリングの概念図

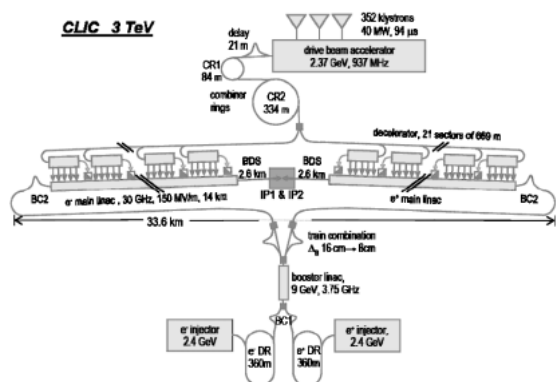


図1 CLIC 加速器システム

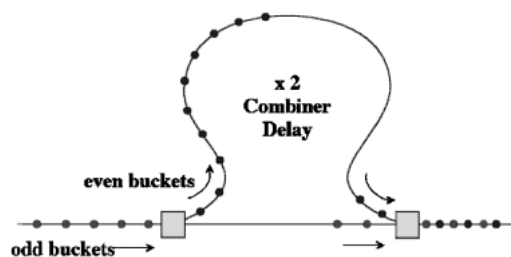


図2 デレイループの概略図

ター領域までビーム収束を可能とする最終収束系を通る。

CLIC の特徴のひとつである 150 MV/m の高加速勾配を得るために、従来の線形加速器で使用される加速周波数の数倍である 30 GHz を採用している。現在、最も有力な 30 GHz 大電力高周波の生成は、図2に示すような1台のデレイループ、また図3に示すようなコンバイナーリングを2台用いた段階的な

バンチ列合成と 30 GHz 高周波取り出し用空洞 (PETS) の組み合わせによる方式である³⁾。これは、最初 937 MHz を加速周波数とした大電流加速器により、2.1 ns バンチ間隔のバンチ列を高周波ディフレクターで 70 ns の間だけデレイループへ蹴りだす。次に、その後からやってくる 70 ns のバンチ列とデレイループを介したバンチ列を高周波ディフレクターにより合流させる。結果として、このバンチ列合成は、1.05 ns 間隔のバンチ列を形成する。そして、このバンチ列は2台の4通倍コンバイナーリングを介することにより、さらなるバンチ列合成を繰り返す。最終的には、33 ps 間隔のバンチ列を形成する。このバンチ列は、高エネルギー衝突実験用ビーム加速ユニットと平行して並ぶ PETS に入射され、30 GHz の大電力高周波を生成し、加速管への高周波電力投入をおこなない、高電界加速を実現する。現在、このバンチ合成の実証試験、PETS の開発、および 30 GHz 加速管の大電力試験が、CLIC 試験加速器施設 (CTF) にておこなわれている。実際に PETS から得られる高周波電力は、加速管アイリスにモリブデンを用いた試験用加速管に投入され、190 MV/m の世界最高の加速勾配を達成している⁴⁾。

4. CLIC ビーム輸送系・最終収束系

主加速部からの 1.5 TeV ビームは、ビーム輸送系 (BDS) を介して衝突点に達するが、このビーム輸送系は、ビームコリメーション系 (CS)、最終収束系 (FFS)、衝突点 (IP) そしてビーム廃棄系の4部分から構成される⁵⁾。ビームコリメーション系では、エラービームによる機器破損の回避、およびビームハローから生じる検出器雑音低減のため、エネルギーコリメーター部、およびベータトロンコリメーター部が設けられる。そして、その後方の最終収束系では、 $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを達成するために、衝突点の水平方向ビームサイズで $\sim 80 \text{ nm}$ 、垂直方向

表 2 ビーム輸送系の主要パラメーター

Lattice lengths		
FFS length		0.5 km
CS length		2.0 km
BDS length		2.5 km
BDS entrance		
Beam energy	E	1500 GeV
Energy spread	dE/E	1%
Hor. beta function	β_x	64.171 m
	α_x	-1.951
Ver. beta function	β_y	18.244 m
	α_y	0.606
Hor. emittance	$\gamma\epsilon_x$	680 nm
Ver. emittance	$\gamma\epsilon_y$	10 nm
Bunch length	σ_z	35 μm
IP		
Hor. Beta function	β_x^*	7 mm
Ver. Beta function	β_y^*	90 μm
Ideal beam size	σ_x^*	40.12 nm
	σ_y^*	0.55 nm

ビームサイズで ~ 0.7 nm まで絞られる。衝突後、ビーム廃棄のための輸送系を通りビームダンプへ導かれる。ビームコリメーション系、および最終収束系の主要パラメーターを表 2 に示す。ビーム輸送系は、1% のエネルギー広がりに対する $10^3 \sim 10^4$ のクロマチシティを配慮したオプティクスとしなければならないことから、補正用六極電磁石をエネルギー分散部に設置している。

初期の設計では、この六極電磁石による Geometric Aberration などの非線形成分をキャンセルするようなビーム輸送系を構成し、また偏向電磁石からのシンクロトロン放射を配慮すると、その全長は 8.9 km となった^{6,7)}。最近では、エネルギーコリメーター周辺のオプティクス最適化、および最終収束系に対して、P. Raimondi が提唱している最終段の四極電磁石付近にクロマチシティ補正用六極電磁石を設置するローカルコレクションをおこなうことで、全長が 2.5 km にまで短縮可能である結果を得ている^{7,8)}。この新オプティクスにより短縮された最終収束系の衝突点ビームサイズやエネルギーバンド幅などの性能を確認するために、著者が中心となり、複数の粒子トラッキングコードによる評価計算をおこなった。使用した粒子トラッキングコードは、CERN で開発された MAD および PLACET、および高エネルギー加速器研究機構

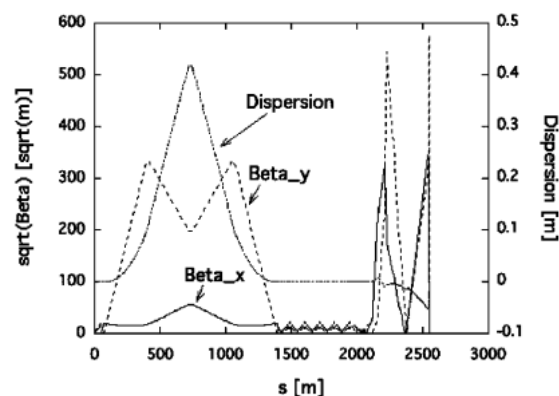


図 4 ビーム輸送系オプティクス

で開発された SAD である。各計算機コードの特徴を以下に記す。

SAD (Strategic Accelerator Design)^{9,10)}

- 6次元シンプレクティック条件に従う粒子トラッキング計算をおこなう。
- シンクロトロン放射は、各種電磁石に適用可能であり、その放射過程は1台の電磁石をスライス状に分割したものを仮定して、その境界からの放射を計算する。

MAD (Methodical Accelerator Design)¹¹⁾

- 粒子トラッキングは、TRANSPORT formalism に従い計算をおこなう¹²⁾。
- シンクロトロン放射は各電磁石入口、および出口での発生を仮定し、その生成はチェビシェフ多項式の積分を用いた MAD-X を使用している。
- 本ビーム輸送系の計算においては、シンクロトロン放射によるエネルギー損失補正を偏向電磁石毎におこなう。

PLACET (Program for Linear Accelerator Correction Efficiency Tests)¹³⁾

- CLIC の主加速部、ドライブビーム加速器におけるウェーク場、およびアライメント誤差によるエミッタンス増加を計算するために開発された粒子トラッキングコードで、今回、CLIC ビーム輸送系の計算のため、シンクロトロン放射計算過程を追加した改良を施した。
- MAD 同様、本ビーム輸送系の計算においては、シンクロトロン放射によるエネルギー損失補正を偏向電磁石毎におこなう。

SAD で計算されたビーム輸送系の水平、垂直方向のベータ関数 (β_x , β_y) とエネルギー分散関数 (η_x) を図 4 に示す。ただし、ここではビーム衝突点で $\beta_x^* = 7$ mm, $\beta_y^* = 0.09$ mm となるよう設計された最終収

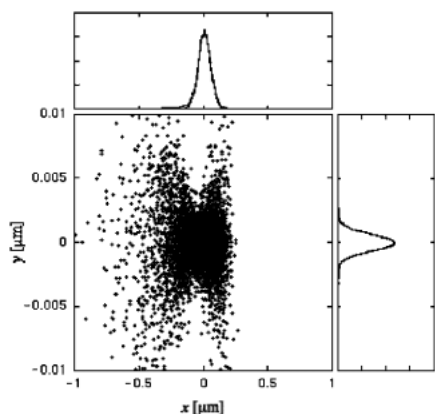


図5 衝突点のビームプロファイル（シンクロトロン放射は仮定していない）

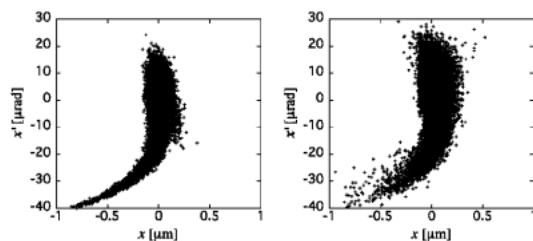


図6 衝突点の水平成分位相空間におけるビーム分布（シンクロトロン放射仮定なし（左）あり（右））

束系オブティクスとなっている。

図4に示したビーム輸送系について、SAD, MAD, PLACETによる粒子トラッキング計算では、偏向電磁石部および衝突点直前の四極電磁石でのシンクロトロン放射による衝突点ビームサイズへの影響をシミュレーションするとともに、エネルギーバンド幅特性、さらに、これらの計算で得られたビーム分布を用いてルミノシティの評価をおこなった。各計算機コードによるシミュレーションをおこなうにあたり、その初期条件として、粒子数を40000とし、表2に示したツイスパラメーターを使用した。またバンチ内のエネルギー分布は、PLACETによる主加速部の計算結果を利用しており、それはバンチ全域にわたって1%の均一な広がりとなっている。

PLACETで得た衝突点ビームサイズを図5に示す。図6および図7には、衝突点の水平成分、および垂直成分位相空間のビーム分布を示す。さらに各電磁石からのシンクロトロン放射を仮定した場合のビーム分布も示す。衝突点のビームサイズは、正規分布関数によるフィッティングで得られる標準偏差（水平成分： σ_x^* 、垂直成分： σ_y^* ）と統計処理による標準偏差（水平成分：Std. dev. x、垂直成分：Std. dev. y）を算出

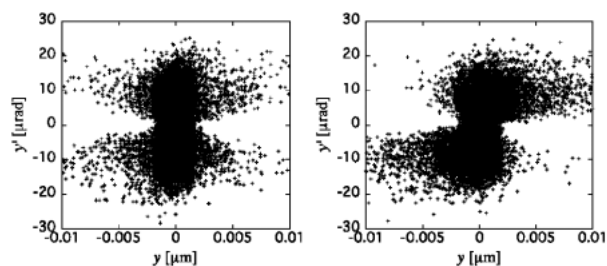


図7 衝突点の垂直成分位相空間におけるビーム分布（シンクロトロン放射仮定なし（左）あり（右））

表3 各電磁石からのシンクロトロン放射の有無に対して、SAD, MAD, PLACETから得られる衝突点のビームサイズ（正規分布関数によるフィッティング、および統計処理による標準偏差）

	Without SR		
	SAD	MAD	PLACET
Std. dev. x	84.8 nm	69.6 nm	84.0 nm
σ_x^*	48.0 nm	47.3 nm	48.0 nm
Std. dev. y	1.28 nm	1.11 nm	1.27 nm
σ_y^*	0.65 nm	0.65 nm	0.65 nm
	With SR		
	SAD	MAD	PLACET
Std. dev. x	82.8 nm	70.1 nm	77.6 nm
σ_x^*	57.1 nm	57.5 nm	57.1 nm
Std. dev. y	2.63 nm	1.96 nm	2.19 nm
σ_y^*	0.85 nm	0.73 nm	0.73 nm

し、ビームコア部分の大きさを定量化した。その結果を表3にまとめる。電磁石からのシンクロトロン放射を仮定しない場合、MADで得られたビームサイズ(Std. dev. x, Std. dev. y)は、PLACETおよびSADの結果よりも小さい値が得られた。これは、MADに用いたラティスにのみ、ビームコリメーション系において、ベータatronコリメーション、およびエネルギーコリメーターとする幾何学的制限を与えているので、著しく広がった粒子は損失するためである。この計算によれば、1%のエネルギー分布に対して、ビームコリメーション部で粒子数が4%損失する。

次に、衝突部直前にある四極電磁石で発生するシンクロトロン放射による収差から衝突点のビームサイズ増大を引き起こす、いわゆる“oide effect”についてSAD, MAD, PLACETによる評価計算をおこなった。まず、偏向電磁石、四極電磁石からのシンクロトロン放射を仮定しない場合、それぞれの計算機コード

表 4 SAD, MAD, PLACET で得られた衝突点ビーム分布を GUIMEA-PIG に適用して求められたルミノシティ

	SAD	MAD	PLACET
$L_{\text{without SR}} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$	11.305	10.714	11.655
$L_{\text{with SR}} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$	7.171	7.441	8.214

から得られたビームサイズ (σ_x^* , σ_y^*) については、表 3 に示すように水平・垂直成分ともほぼ同等の値となる。しかしながら、シンクロトロン放射を仮定した場合は、水平方向ビームサイズが 19%、垂直方向ビームサイズが 12% だけ増加している。また垂直成分において、SAD の計算結果は、他の 2 つの計算機コードと比べて 16% の増加した値となった。この理由として、SAD は各電磁石直後のエネルギー損失補正をしていないことと電磁石内のシンクロトロン放射の取り扱いが異なることが考えられる。

各粒子トラッキング計算で得たビーム分布からルミノシティを得るため、電子・陽電子衝突時に引き起こす様々なビーム効果 (Pinch effect, Beamstrahlung, Pair creation) を導入した計算機コード GUIMEA-PIG を使用した¹⁴⁾。その結果を表 4 に示す。ルミノシティの計算結果は、各粒子トラッキング計算で得たビームサイズを概ね反映したものとなっているが、とくに MAD については、粒子数損失による影響がみられる。

5. クロマティック効果

図 6 に示したように、衝突点での水平成分位相空間には、そのビーム分布が非対称となるエネルギー依存性が存在する。この依存性を調べるため、初期条件として、単一エネルギーで、かつ水平成分位相空間における楕円分布 (1σ)、垂直成分位相空間についてはビームサイズ、ならびに運動量の両方を 0 とするシートビームを仮定した粒子トラッキング計算をおこなった。ここで仮定した各オフセットエネルギーは、 $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 0.4\%$ である。さらに、衝突点の楕円中心 (x_c, x'_c) について、オフセットエネルギー (δ) に対する依存性を次式のような 3 次のテーラー展開から計算した。

$$x_c(\delta) \approx R_{16}\delta + T_{166}\delta^2 + U_{1666}\delta^3$$

$$x'_c(\delta) \approx R_{26}\delta + T_{266}\delta^2 + U_{2666}\delta^3$$

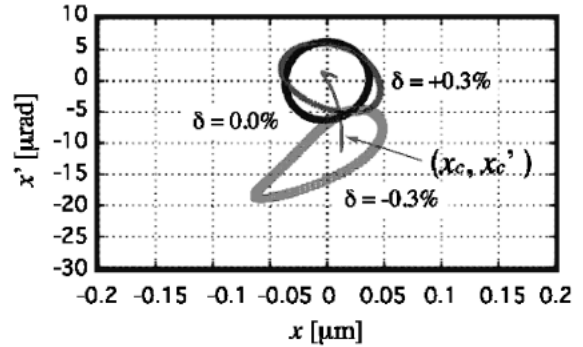


図 8-1 中心エネルギーが 0%、 $\pm 0.3\%$ に対する水平成分位相空間における楕円分布を用いた粒子トラッキング計算結果と 3 次までのテーラー展開で与えられる中心位置 (x_c, x'_c) の軌跡

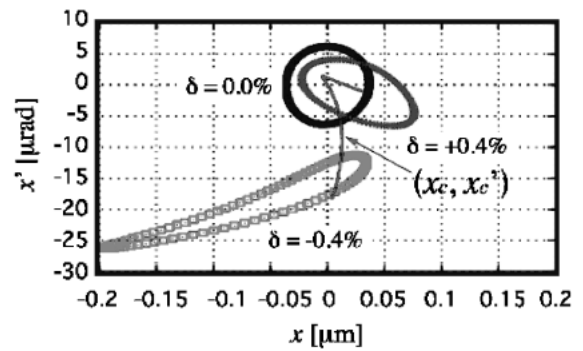


図 8-2 中心エネルギーが 0%、 $\pm 0.4\%$ に対する、水平成分位相空間における楕円分布を用いた粒子トラッキング計算結果と 3 次までのテーラー展開で与えられる中心位置 (x_c, x'_c) の軌跡

図 8-1, 8-2 には、この楕円分布の粒子トラッキング計算結果と上式で与えられる x_c, x'_c の軌跡を示す。上式では 3 次のエネルギー分散まで考慮しているが、オフセットエネルギーが $\pm 0.3\%$ までは、粒子トラッキング計算で得られた楕円中心と上式で求められる x_c, x'_c の軌跡の位置はほぼ一致している。しかしながら、オフセットエネルギーが -0.3% 以下になると、Geometric Aberration による影響が顕著になり、粒子トラッキング計算のビームサイズが増大し、楕円分布中心位置と上式で得られる x_c, x'_c の軌跡にずれが生じる。これは、ビーム輸送系で仮定しているラティスと各オフセットエネルギーから、上式の各次数における行列要素にも表れる。その計算結果を表 5 に示す。ここに示したビーム輸送系 (BDS)、最終収束系、ビームコリメーション系 (CS) の行列要素から、最終収束系 (FFS) では 2 次までの計算で十分であることが言えるが、ビームコリメーション系では 3 以上のエネルギー分散を配慮する必要がある。

表 5 ビーム輸送系の行列要素計算結果

	FFS	CS	BDS
R_{16} [m]	$-6. \times 10^{-6}$	0.	$-6. \times 10^{-6}$
R_{26} [rad]	1.818×10^{-3}	0.	1.818×10^{-3}
T_{166} [m]	-0.183×10^{-2}	0.457	0.114×10^{-2}
T_{266} [rad]	0.195×10^{-2}	0.273×10^{-2}	-0.607
U_{1666} [m]	0.	-6.735	0.598
U_{2666} [rad]	0.	0.246	20.382

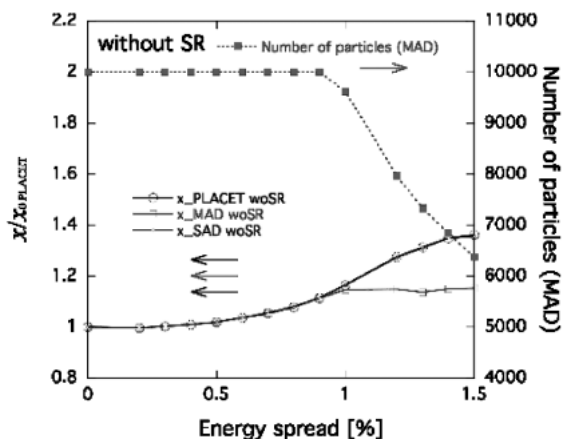


図 9-1 水平方向ビームサイズに関するエネルギーバンド幅 (シンクロトロン放射を仮定しない場合)

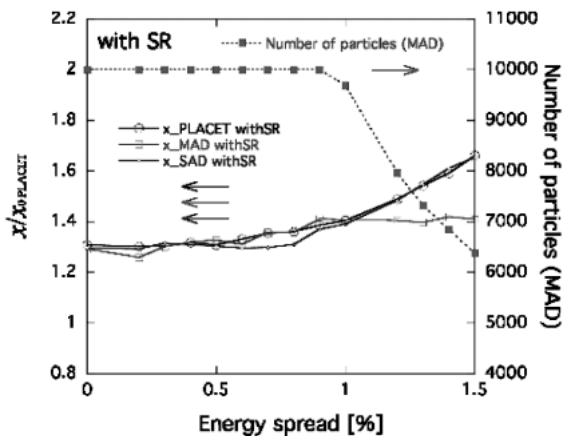


図 9-2 水平方向ビームサイズに関するエネルギーバンド幅 (シンクロトロン放射を仮定した場合)

6. エネルギーバンド幅

ビーム輸送系の入口でエネルギー幅に変化を与え、各計算機コードで得られる衝突点のビームサイズを比較した。さらに各エネルギー幅に対して、シンクロトロン放射によるビームサイズへの影響の比較もおこなった。水平方向ビームサイズを図 9-1, 9-2, 垂直方

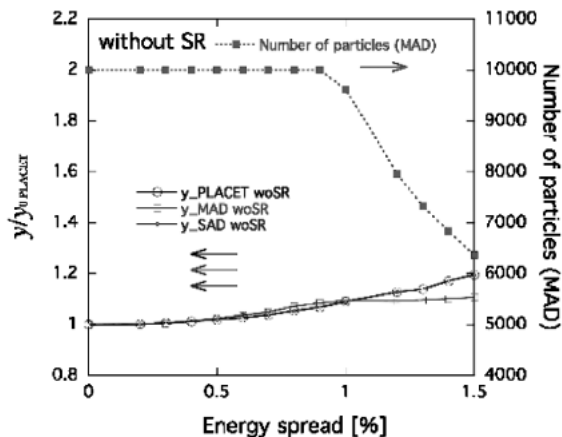


図10-1 垂直方向ビームサイズに関するエネルギーバンド幅 (シンクロトロン放射を仮定しない場合)

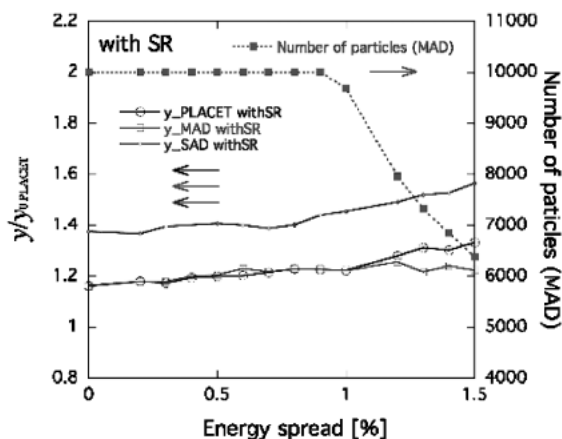


図10-2 垂直方向ビームサイズに関するエネルギーバンド幅 (シンクロトロン放射を仮定した場合)

向ビームサイズを図 10-1, 10-2 に示す。各ビームサイズは、エネルギー幅が 0% で、かつシンクロトロン放射がない場合の PLACET で得られたビームサイズで規格化している。MAD による計算では、先に述べたようにビームコリメーション系の幾何学的制限から、エネルギー幅が 0.9% 以上で粒子数の損失がある。この粒子数損失量も図 9-1, 9-2, 10-1, 10-2 に示す。さらに各計算機コードで得られたビーム分布から、GUINEA-PIG によるルミノシティ計算結果を図 11-1, 11-2 に示す。以上の結果から、ルミノシティが各々のビームサイズに反映していることが分かる。エネルギー幅によるルミノシティへの影響として、1% のエネルギー幅を持つビームは、0% のエネルギー幅で得られるルミノシティに比べて、約 30% のルミノシティ損失となる。またシンクロトロン放射がある場合には、エネルギー幅に関係なく 40% の粒子

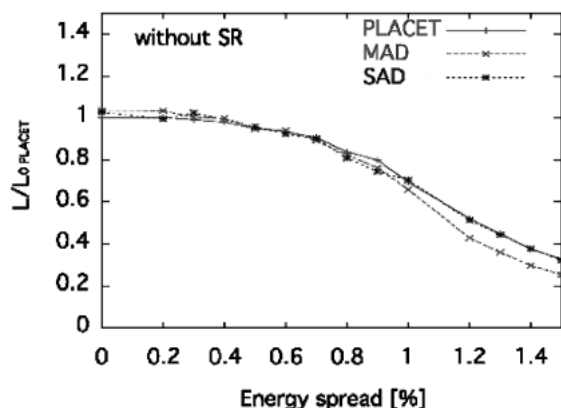


図11-1 ルミノシティのエネルギーバンド幅（シンクロトロン放射を仮定しない場合）

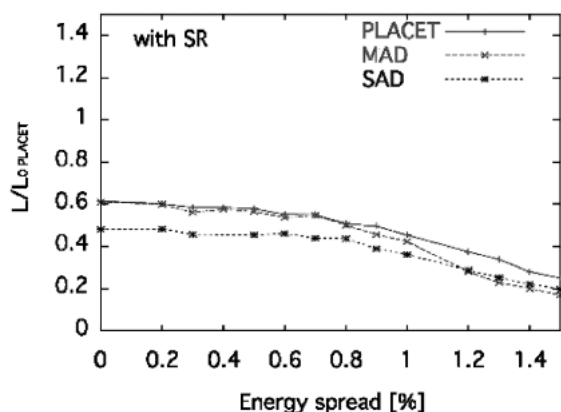


図11-2 ルミノシティのエネルギーバンド幅（シンクロトロン放射を仮定）

数損失となる。ルミノシティに関して1%のエネルギー幅、あるいはそれ以上のエネルギー変動がある場合より、最終段四極電磁石からのシンクロトロン放射による影響が重大であることが判明した。

7. まとめ

CERNの現状、CLICプロジェクトの目指す素粒子物理実験と加速器システムの概要、そして本共同研究であるCLICビーム輸送系の評価計算について紹介した。本共同研究では、新たにSADを使用し、ビーム輸送系の性能評価をおこなったことに加え、新たに短縮された最終収束系について、Geometric Aberrationや最終四極電磁石からのシンクロトロン放射による衝突点ビームサイズへの影響などの問題点を見出した。今後、上記した問題を配慮したオプティクスの最適化をおこなうとともに、さらなる衝突点でのビーム物理研究を進めていく予定である。本研究の詳細な内

容については、参考文献¹⁵⁻¹⁸⁾を参照していただきたい。

さて、CERNでの滞在中に感じた印象をいくつか述べおく。CERNでは連日、素粒子物理理論、検出器、加速器科学などのセミナーがあり、研究者だけでなく学生を対象としたものも多数開催されていた。これらのセミナーは基本的に自由参加であり、時間の許す限り出席し、多くの興味深い話を聞くことができた。このような科学セミナーとは別に、先にも述べた加速器部門全体会議、CLICパラメーター会議のほか、毎週おこなわれるCLIC会議、ビーム軌道解析会議に参加した。ここでは、プロジェクトに関する研究成果報告だけでなく、研究会報告や他の加速器研究所での活動報告など、世界各地でおこなわれている加速器開発状況が頻繁に報告された。いずれの会議でも、常に効率的な研究推進、および情報共有の重要性を念頭に置いた議論の進行がなされていた。その先には、各個人の能力を最大限発揮できるような環境を提供するため、多くのスタッフが努力していることを実感した。これは、一般の事務手続きにおいても同様であり、効率的な研究活動向上のための支援を随所に感じることができた。例えば、渡航当初、上記したような会議情報の入手や会議参加を含めた研究活動の開始にあたり、多くの事務手続きを予想していたが、すべてが電子文書処理システム(EDH)によりブラウザを介して、迅速、かつ円滑に進めることができた。これは、超過勤務時間、休暇届、出張届、物品購入手続きなどの一般的な手続きも可能であり、CERNの職員だけでなく登録されたユーザー、外注業者も共通して利用可能となっている。

最後に、私にとって初めてであるCERN長期滞在中は、俗にいう言語の壁、物事の進め方の相違などから思うように事が運ばない部分もあったが、それ以上に多くの温かい人々の手助けのもとで、有意義に過ごすことができた。とくに研究活動を通して、多くの科学者との交流や会議で与えられる発言の場は貴重な経験であり、現状の加速器科学における多くの問題について、共通した認識を深めることができた。また、ILC、CLICのような巨大加速器プロジェクトの推進や各地で展開されるであろうX線自由電子レーザー、エネルギー回収型線形加速器などの先端加速器技術開発において、国際的な協力関係の体制づくりの重要性を再認識することができた。

現在、日本に存在する多くの加速器とその性能は、世界の巨大加速器施設と比べても、水準の高いものになっているが、CERNの国際的な人材受け入れ体制、な

らびに人材育成のための様々な工夫については、多くの学ぶべき要素があると思う。

今後も、先端加速器開発を目指した CLIC プロジェクトをはじめとする CERN の多くのプロジェクトへの積極的な参加を推進させるとともに、日本と CERN の加速器技術水準の向上と双方の協力関係の更なる発展を祈念する。

謝辞

本共同研究の実現にご尽力頂いた皆様に心より感謝申し上げます。とくに、この協力関係を実現するにあたり、高輝度光科学研究センター 大野英雄専務理事、加速器部門 熊谷教孝部門長、同部門線形加速器グループ 花木博文リーダー、そして CERN 加速器部門 CLIC プロジェクト Jean P. Delahaye リーダー、同部門ビーム物理グループ Jean P. Riinaud リーダー、同部門リング・ビーム輸送グループ Luis Rinolfi リーダーには、多岐にわたる支援をいただきました。深く感謝申し上げます。

本研究に関して、CERN 加速器部門ビーム物理グループ Daniel Schulte 氏、Frank Zimmermann 氏には多くの有益な助言を頂きました。また、MAD, PLACET, GUINEA-PIG を用いた計算では、同部門ビーム物理グループ Javier R. Lopez 氏との議論を通して、オプティクス、ならびに CLIC ビーム輸送系におけるビーム物理について理解を深めることができました。

SAD の計算手法について、高輝度光科学研究センター加速器部門円形加速器グループ 藤田貴弘氏、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 紙谷琢哉氏、大西幸善氏、黒田茂氏、小磯晴代女史には、有益

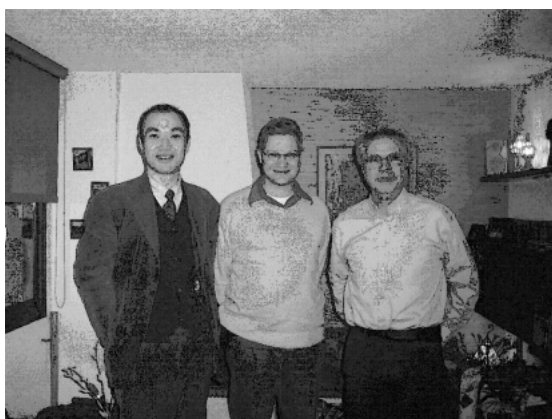
な助言と協力をいただきました。

CERN での研究活動、ならびに生活を始めるにあたり、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 安芳次氏、同機構 山口陽氏、岩見真二氏には、現地で様々な手助けをしていただきました。

こうした皆様の励ましや協力があって、有益な研究活動をおこなえることができました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) CLIC Physics Working Group, Physics at the CLIC Multi-TeV Linear Collider, M. Battaglia, A. De Roeck, J. Ellis and D. Schulte editors, CERN 2004-005.
- 2) The CLIC Study Team, A 3 TeV $e+e-$ Linear Collider Based on CLIC Technology, CERN 2000-008 (2000).
- 3) H. Braun, et al., A New Method of RF Power Generation for Two-Beam Linear Collider, Proc. EPAC '98 Stockholm, Sweden (1998).
- 4) W. Wuensch, et al., A Demonstration of High-Gradient Acceleration, Proc. PAC '03 Portland, OR., USA (2003).
- 5) M. Aleksa, et al., CLIC Beam Delivery System, Proc. Nanobeam '02 Lausanne, Switzerland (2002).
- 6) F. Zimmermann, et al., Final-Focus System for CLIC at 3 TeV, EPAC '00 Vienna, Austria (2000).
- 7) R. Assmann, et al., Overview of the CLIC Collimation Design, Proc. PAC '01 Chicago, IL., USA (2001).
- 8) P. Raimondi and A. Seryi, A Novel Final Focus Design for High Energy Linear Collider, Proc. EPAC '00 Vienna, Austria (2000).
- 9) Web site of the SAD home page:
<http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- 10) K. Ohmi, K. Hirata and K. Oide, Phys. Rev. E49, 751 (1994).
- 11) Web site of the MAD home page:
<http://mad.home.cern.ch/mad/>
- 12) K. L. Brown, et al., Transport-A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems, CERN 73-16.
- 13) Web site of the PLACET home page:
<http://home.cern.ch/dshulte/placet.html>
- 14) D. Schulte, et al., Beam-Beam Simulations with GUINEA-PIG, Proc. ICAP'98 Monterey, CA., USA (1998).
- 15) T. Asaka and J. Resta Lopez, Characterization and Performance of the CLIC Beam Delivery System with SAD, MAD and PLACET, CLIC Note 637 (2005).
- 16) A. Faus-Golfe, F. Zimmermann, A Nonlinear Collimation System for CLIC, Proc. EPAC '02 Paris, France (2002).
- 17) A. Faus-Golfe et al., Alternative Optics Design: Nonlinear Collimation System, Proc. Nanobeam '05 Kyoto, Japan (2005).
- 18) Web site of the CLIC BDS Day:
<http://ab-clic-bdsday.web.cern.ch/ab-clic-bdsday>



筆者 (左), Frank Zimmermann 氏 (中央), Jean P. Riinaud 氏 (右)