

特別寄稿

[掲載に至る経緯] 編集委員会は木原会長より、北垣敏男氏の一文「Separate function strong focusing 誕生の話」の提出を受けました。すでに6年以上前の文章ではありますが、内容的に優れたものであり、また氏の1953年の論文 (A Focusing Method for Large Accelerators, Phys. Rev., Vol. 89, No. 5 (1953) 1161) は、有名な“Courant-Snyder (Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron, Annals of Physics: 3, 1-48 (1958))”より5年早く発表されただけではなく、Courant-Snyderが気付いていなかった、分離機能型加速器とその強収斂を証明したものであります。多くの若い加速器専門家の方々に、日本の先駆性と先達の貢献を知って頂きたいと思い、ここに掲載することにしました。今回木原会長より北垣先生にその旨をお話したところ、掲載について快諾していただけたましたので、明らかな誤字等を除き、原文のままここに掲載します。(編集委員会)

Separate function strong focusing 誕生の話

北垣 敏男*

(日付 1999年3月15日)

私が加速器屋だったという事を知っている人は少なくなりました。若い人は、あれは東北で泡箱実験をやっていた人だ。もう少し古い人は、あれはKEKを作るのに頑張っていた人だということであるが、実は、私はその前には加速器屋だったのである(1944-1970)。いろいろなことがあったが、最も重要な仕事は機能分離型強収斂 (Separate-function strong focusing) の提案である。これは私にとって重要というだけでなく、その後の加速器の進展を眺めたときに極めて重要であり、それが日本で生まれたものであると言う点が重要なのである。

現在、高エネルギー研究所、フェルミ研究所の加速器及び之に続く大型加速器は全てこの Separate-function strong focusing に基づいており、加速器の形も大体これで決まってしまう。今、若い人に GeV の円形加速器を描かせれば、当然 Separate-function strong focusing 型となり、加速器というものはそういうものだという事になるが、ここが大切である。キューピーというキャラクターがある。私等の子供の時からキューピー人形などとして馴染まれており、天使と同じく、何の疑問もなくはじめから在るものであった。マヨネーズの名前になり、銀行のアイドルマークになっても何の抵抗も感じなかった。所が驚いたことに、一昨年これが著作権侵害、知的所有権侵害であるという訴えがアメリカから出てきた。

Separate-function focusing もこれと同じである。

皆が何の抵抗感も無く使っているから存在しないのではなく、それだけ不可欠、重要なものなのであって、特にそれが日本からの産物であるという事実は日本人にとっての誇りであり得るし、記憶されねばならないと思う。本文は少しでもこの事を裏付けるような事実を集めようとするものである。

少し古い人から、なぜ Separate-function focusing というようなものを考えたのかという質問をいただいた。私にとって、separate function 加速器は私のそれまでの研究の流れからして極めて自然なものであった。これを説明するには、少しく私の経歴を説明する必要がある。(以下、殆ど自伝のようになるが、これは皆さんの知らない事を掘り出しているのをご容赦願いたい。これと皆さんのご存知のことをつなぎ合わせると正しい歴史になる。)

理研 60 インチ, サイクロトロン

私が第七高等学校造士館から大阪帝国大学、理学部物理学科に入学したのは昭和 18 年 9 月である(1943)。大阪帝国大学物理教室は菊池正士先生が中心となりコックロフト-ワルトン型加速器、サイクロトロンがあって、理化学研究所につぐ日本の原子核研究の中心であった。

当時理化学研究所仁科研究室では世界最大級の 60 インチ、サイクロトロンを建設中であった。これは、ローレンス博士がカリフォルニア大学で建設中の世界

* 東北大学名誉教授

最大のものの設計図を持ち帰ってそのまま作っていたものである。(この例のように、戦前の日本の原子核研究は殆どが直輸入、再生であった。) 大阪大学1年生の私は勿論何もわからぬ普通の学生であったが、たまたま高等学校の指導教官の推薦で夏休みにこの理研サイクロトロンで働かせていただいた。杉本朝雄博士がプルトニウム分裂で学位を取られたのはこのサイクロトロンであるが、この60インチ、サイクロトロンは終戦時アメリカ軍が破壊し東京湾に投棄したので、そこで働いた経験のある人は現在私を除いてあまり居ないであろう。

質量分析と加速器

間もなく戦争が酷となり、上級生たちは軍関係の仕事に参加して研究室を去って行ったので、2年生になった私はいきなり質量分析器による同位元素測定を始めさせられた。これもウランニウム-235濃縮の軍研究の一環であった。私が働いたベインブリッジ-ヨルダン型質量分析器は、原子質量欠損測定用の高分解能分析器で、 $180/\sqrt{2}$ 度の円筒電場と60度セクター型磁場とを組み合わせた2次元収束性を持つもので、線源から線結像が得られる。私はこれに手を加え、質量測定 of 分解能を数倍改善した覚えがある。

当時、サイクロトロンの加速上限の問題というのがあった。サイクロトロンは一様磁場中での陽子の回転の等時性(サイクロトロン周波数)を用いて高周波加速を反復するものであるが、陽子のエネルギーが上がり相対論的な質量増加が1%にもなると加速位相の遅れが起これ加速は進まなくなる。この理論的加速上限に挑戦したのがローレンスで、薄い鉄板を挿入するシミングという実験的方法で上限をあげていった。

ベータートロンは戦争直前にカーストが発明した変圧器のようなインダクション型の電子加速器であるが、周回回数がサイクロトロンとはけた違いに大きくなり、電子の飛行距離は簡単に地球-月の距離を越える。この長い飛行の間電子を加速管内に保つためには、3次元的な収束性が要求される。(ベータートロン収束性)円形磁場軌道に沿った収束性としては、磁場が半径 r 大で減少すると磁力線が外側に凸にふくれて縦収束が得られ、 r の逆比例よりも大であると遠心力に打ち勝つ求心力が生まれ、横収束性が得られる。この両者を同時に兼ね備えるのは、 $B_z = B_0 (r_0/r)^n$ と置くと $0 < n < 1$ で、これがサイクロトロン、ベータートロンに要求されていた安定加速の為の磁場条件である[弱収束, 図1(a)].

終戦でアメリカ軍は国内のサイクロトロンを全部破

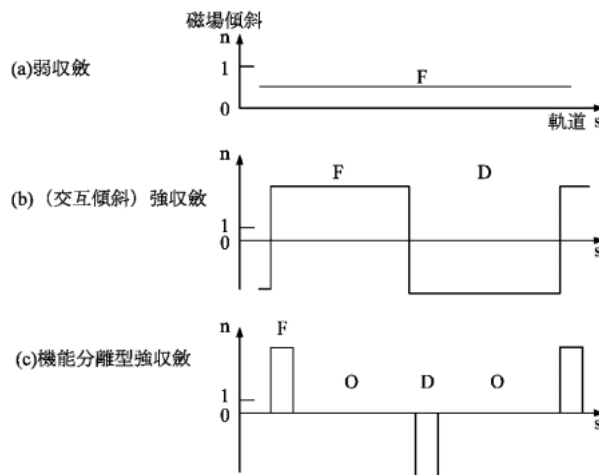


図1 加速器の集束方式の発展

壊、投棄し、日本の原子核研究は禁止された。大先生方が呆然としていた1946年頃、大学副手の私はまだ焼野が原の大阪市内で焼け落ちた電柱のトランスを拾ってトランスシートを集め、手作りでベータートロンを作った。サイクロトロンのような陽子加速器はとても手が出ないが電子加速器ならば可能だという考えであった。そして机の上に乗る軌道半径3.2cmの1.5 MeVベータートロンが完成した(1950)¹⁾。後にカーストに会ったとき、貴方は世界最大の380 MeVベータートロンを作ったが、私は世界最小のベータートロンを作ったと変な自慢をした。

このような経過の中で私は電磁気学を学び、イオン光学、加速器の収束を研究した。一般化された電場、磁場の組み合わせによる3次元収束又は高次収束質量分析器等を論じたイオン光学に関する研究が私の学位論文である。

東北 40 MeV シンクロトロン

1950年頃の日本は戦災の焼野が原から復興しつつあったが、原子核の実験研究は壊滅状態であった。その中で理化学研究所から東北大学に移った木村一治教授は中間子の出来る500 MeV電子シンクロトロンを作ろうとして私を東北に呼んだ。悪戦苦闘の末、結局予算的に40 MeV電子シンクロトロンを手作りする事になったが、1954年之は完成し、日本物理学会仙台年会の折、皆さんに日本初のシンクロトロン放射光をお見せすることが出来た。朝永先生が、君、眼は大丈夫かねと心配しながら覗いておられたが、電子エネルギーが低く末だ目をつぶす程のビーム強度ではなかった²⁾。

世界の加速器状況, 1952

世界では終戦直後に出たマックミランのシンクロトロンの考えが実際に適用された。パークレーの 400 MeV シンクロサイクロトロン, コーネルの 500 MeV 電子シンクロトロンが働き, パイ中間子を作って, 中間子物理学の大きな成果が上がりつつあった。GeV を越す加速器としては, ブルックヘーブンの 3 GeV コスモトロンが唯一動く加速器で, 始めて K-A 対が作り出された。パークレーの 6.5 GeV ベバトロンは未だ建設中であった。世界の数ヶ所で大きい加速器が計画されていたが, 何れも弱収斂加速器で, ドブナの 10 GeV フェゾトロンは鉄 10000 トンを使い, それ以上のものを作るという事は禁止的であった。この状況のなかで, どうすれば 100 GeV 以上の加速器が作れるかというのが私の考えたことであった。

私が 40 MeV 電子シンクロトロンを作り始めた 1952 年の秋, クーラン等により強収斂の考えが出された。これは縦, 横の磁場収束を同時に行うことをやめて, 外向きの急な磁場減少 ($0 \leq n$, 強い縦収束, 同時に強い横発散) と外向きの急な磁場増加 ($n \leq 1$, 強い縦発散, 同時に強い横収束) を交互に置くことにより総合的に強い縦, 横収束を得るものである [図 1 (b)]。これにより, エネルギーの 3 乗で増す鉄の量が 1 乗程度ですむ事になった画期的なものである。

強収斂の考えが誰かの手紙で伝わってきた時, 私はそれまでに習得していたイオン光学, 加速器収束の知識をフルに使ってこれを理解した。結論として, 伝えられた強収斂では軌道磁場に外向き, 内向きの大きな磁場傾斜を入れるため (交互傾斜, Alternate gradient), 中央の軌道磁場値を 10 kG 以上に上げる事が難しく, 30 GeV 以上にもなればやはり電磁石は非常に大型になってしまう。又, サイクロトロンで起こったような軌道磁場, 縦, 横収束場間の複雑な干渉, 補正の問題が存在する。(事実, 後のブルックヘーブン 30 GeV Alternate gradient synchrotron, CERN の 24 GeV Proton synchrotron は交互傾斜強収斂を用いた最大, 最後の加速器であった。)

そこでこの強収斂をこえて 100 GeV 以上の大加速器を可能にするために考え出されたのが機能分離型強収斂である。これは極端化した強収斂とも考えられるが, 軌道の曲げを与える軌道磁石は収束など忘れたことん強磁場の 2 極磁石とする。そして収束はこれとは完全に分離独立した 4 極磁石で与えるが, 中央磁場は 0, 非常に強い収束を与える磁場傾斜は電流で自由に制御できる。しかし実際の設計をしてみると,

この収束場は空間的にかなり離れたデルタ関数的なものになり, このようなラッティスで全体収束が得られるかと疑われたが, 確かに全体収束が得られる事が示せた [図 1(c)]。物性の周期ポテンシャルによるプリリアンゾーンが良い手本になった。これが separate-function strong focusing の誕生で, 1952 年, 動いている大加速器は 3 GeV コスモトロンだけという時代であった⁴⁾。この方式は大型加速器を経済的に実現するとともに, 設計, 運転を容易にする。初めてこの方式を採用したのはフェルミ研の 1000 GeV と KEK の 12 GeV 加速器であるが, それぞれ独立に採用, 実現した。今では大型加速器はそのようなものだというように常識化している。

世界の第一線研究者は賢明でヒントがあれば直ちに先を考える能力を持っているが, 直ぐ後に述べる R. R. Wilson のノート及び Fermilab Report のノートはフェルミ研と私の仕事との関係を示している。

Milton G. White

少しだけ, 時間を追って話を進める。プリンストン大学のホワイト教授はプリンストン大学のサイクロトロンを作り, ブルックヘーブンのコスモトロン 2 代目ディレクターを勤めた方である。当時, プリンストンでは加速器研究が盛んで, 今では普通になった衝突型加速器の考えもそこで生まれた。ホワイト教授は 1953 年京都理論国際会議でたまたま仙台を訪れたペンシルバニア大学のクライン教授より, 東北大学で北垣が separate-function strong focusing を公表し, そのテスト実験を行っているということを知らされた [図 2, 佐々木寛氏撮影]。実は, ホワイト教授自身が独立に separate-function focusing を考えていたので, 彼は直ちに私をプリンストン-ペンシルバニア加速器 (PPA, 最初の計画は 15 GeV, 実際は 3 GeV fast cycling) のデザインメンバー, 客員教授として呼んでくれた。未だ戦後で, 「日本人は猿のように人まねばかりする連中だと思っていたが, 貴方のような人が居たとは」と言うのが彼の率直な表現であった。3 年間にわたるこのプリンストン滞在は私の加速器研究にとって大事な期間であった。これが直ぐ後の日本の大加速器計画 (KEK) の推進につながる。

Robert R. Wilson:

Wilson 教授はフェルミ研究所 (最初は National Accelerator Lab.) の 400 GeV 加速器を提案, 製作したフェルミ研究所初代所長である。下は, 私が泡箱物理に転じた後の 1976 年 10 月に彼が東北大学, 泡箱

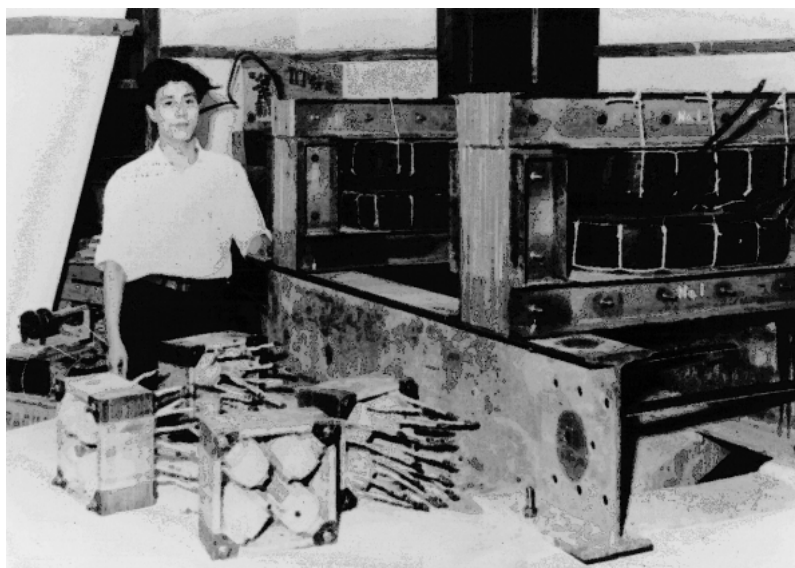


図2 機能分離型強収斂加速器テスト (1954年3月, 東北大学物理教室)

施設を訪れた際, 来客記念帖に残した言葉である.

It is a great pleasure to return to Sendai after 20 years and to visit the new Tohoku University. I am especially interested because of our strong collaboration. Prof. Kitagaki has given us the idea and the model of a separate function synchrotron—we give some (bubble chamber) pictures in exchange.

Thank you Robert R. Wilson 10/18/76

Fermilab Report (February 1980)

又, ついでに, フェルミ研究所加速器と私の関係を示すものとして, Fermilab Report (February 1980)に触れておこう. カバーに, ミューオン-ニュートリノ, ワークショップで講演中の私の写真があり, 下はその説明である [図3].

The cover: Toshio Kitagaki of Tohoku University, Japan, addressing the Tevatron Muon-Neutrino Workshop held at Fermilab in January.

Professor Kitagaki is also important in the development of Fermilab because he is an inventor of the separated-function strong-focusing lattice used in the Main Ring.

Owen Chamberlein;

バークレーの6.5 GeV ベバトロンで反陽子を発見. 1972年7月に東北大泡箱施設を訪れた際, 私の separate function のペーパーについての彼の意見. 「そ

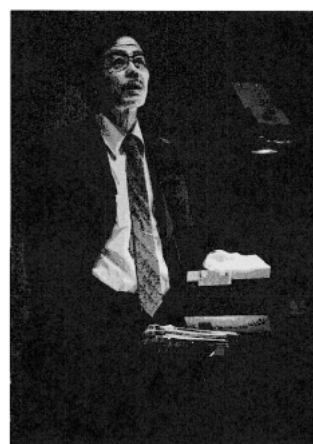


図3 Fermilab Report に掲載された著者の写真

こに例として上げた100 GeV シンクロトロン of ラッテイス, パラメータはフェルミ研で建設中の加速器のものと同様である。」

Wolfgang Paul;

中性子の磁気能率を用い, 強収斂磁場リングで中性子の閉じ込めに成功したボン大学教授(ノーベル賞). 1978年9月, 彼が東北大を訪れた際の会話. 「Separate function strong focusing を始めて言ったのは, 誰

か日本人だと聞いていたが、貴方だったのか。」

高エネルギー物理学研究所 (KEK) の建設、1971

世界では大型加速器による新しい素粒子物理学が目覚ましい進展を遂げつつあったが、日本は全くその外にあった。原子核研究所は原子核研究を主とし、何とか中間子を出そうとして 0.7 GeV (後に 1.3 GeV) 電子シンクロトロンを作っていたが、とても本格的研究にはならなかった。

日本にも中間子、新粒子を発生できる本格的な大型加速器が必要であるという湯川先生のご意見 (1961)、何とかして新天地をひらかなければという若手研究者の飢餓感と死に物狂いの努力、そして多くの関係者の長い努力が結実して、紆余曲折の末ではあるが高エネルギー物理学研究所設立の運びになったのは 1971 年である。この辺の詳細並びにその後の日本の高エネルギー物理学の展開については西川哲治氏の優れたまとめがあるのでそれをご覧いただきたい⁵⁾。

その間の国内での加速器研究としては東大西川哲治氏の二重周期構造型定在波ライナック等の線形加速器に関する世界的レベルの研究、東大宮本梧楼教授 (戦争初期に Spiral Orbit Spectrometer を発明したイオン光学の大家) 一統の富家雄、大河千弘、小林喜幸氏等の新しい加速器に関する研究、新研究所に対する具体的加速器設計 (高エネルギー将来計画検討本部、北垣、富家、柳父、鳥塚、宮沢、小谷) 等があげられる。

カスケードマシン

この具体的加速器設計の中に加速器のカスケード構造が出てくる。之は、巨大加速器の場合加速のエネルギー段階に応じて要求が変わるので加速器を分け、これをつないでいく方がずっと経済的だというものである。これも現在大型加速器設計に対しては常識的であるが、当時はなかなか本気で考えられなかった。それまでのコスモトロン等では入射線形加速器からメインリングに入射する。また、東北大で作った電子シンクロトロンでは、電子速度が光速に近づく 2 MeV までベータトロンとしてインダクション加速し、その後シンクロトロンに切り替えて高周波加速を行っている。このように、ビームを移すことはすでに在ったが、リングからリングに移すという意味では、コーネ

ル大ウイルソン教授の 8 字型加速器の考えが最初だろうと思う。

私は当時世界で計画されているものより更に一桁上のものを考えていたので、最初の提案が 12 GeV-300 GeV のカスケードマシンになった⁶⁾。このようにカスケードマシンは私の発明とは言わないが、大型加速器の具体的設計に対して私が始めて第二リングというような言葉で世界的に主張し、先鞭をつけた⁷⁾。

高エネルギー研究所を作る大詰めの時、加速器部長となった西川氏が私に言った言葉を覚えている、「ブースターを使う世界初のカスケードマシンで、主リングは機能分離型強収斂なのだから満足してほしい。」

Lillian Hoddeson;

Lillian Hoddeson はイリノイ大学の科学史家で、フェルミ研と日本の高エネルギー研究所の出来方の対比に興味を持った。大体同じ頃に、似たような科学的設計から出発したのにどうして日本では時間がかかり、フェルミ研の 400 GeV にたいして 12 GeV という差が出来たのかと言うことを論じた論文, Establishing KEK in Japan and Fermilab in the U.S., を出している⁸⁾。この中に私の separate-function focusing の事、ホワイト教授の事などが出てくる。

参考文献

- 1) 浅岡常三郎, 北垣敏男, 小型ベータトロンの試作, 岩波科学, Vol. 21, No. 6 (1951) 311
- 2) M. Kimura, T. Kitagaki and et al., Sci. Report, Tohoku University I, Vol. XI (1957) 233
- 3) Courant, Livingston, and Snyder, Phys. Rev. Vol. 88 (1952) 1190
- 4) T. Kitagaki, A Focusing Method for Large Accelerators, Phys. Rev., Vol. 89, No. 5 (1953) 1161
- 5) 西川哲治, 素粒子実験と加速器—戦後の日本を中心に, 日本物理学会誌 Vol. 51, No. 1 (1996) 11
- 6) 北垣敏男, 250-300 BeV Cascade Synchrotron, INS-TH-35 (1960)
- 7) T. Kitagaki, A Proposed 12 GeV Proton Synchrotron, Int. Conf. on High Energy Accelerators, Brookhaven (1961) 65
T. Kitagaki, C. Ishii and M. Masuda, Cascade Synchrotron for Energies up to 100 GeV, Int. Conf. on High Energy Accelerators, Frascati (1965) 41
- 8) L. Hoddeson, Establishing KEK in Japan and Fermilab in the U.S.: Internationalism, Nationalism and High Energy Accelerators, Social Studies of Science, SAGE, London, Vol. 13 (1983) 1-48