

国際協力

トムスク工大（ロシア）との共同研究

遠藤 一太*

Collaboration with Tomsk Polytechnic University, Russia

Ichita ENDO*

Abstract

Hiroshima University has been collaborating with Tomsk Polytechnic University, one of the major Technical Universities in Russia, since fifteen years ago. The main fields of joint research are radiation phenomena in periodic matter, e.g. parametric x rays and coherent pair creation, and R&D of small accelerators and their application.

1. 背景

トムスク工大と筆者のグループとの共同研究の歴史はすでに15年近くになるとうとしている。トムスクはちょうどユーラシア大陸の真中あたり、中部シベリアの都市である。人口は60万人程度であり、旧ソ連の都市としては小規模である。トムスクの人たちに言わせれば、ノボシビルスクがソ連政府の政策でシベリア地域の科学技術研究のために設置した新興都市であるのに対し、トムスクは帝政ロシア時代からある（由緒正しい）シベリア中部の商業・学術の中心都市だそう。冬はたしかに寒い、都市機能は完備しており、真冬でも公共交通機関は正常に動き、散歩をする人すら見られる。写真1は2月のある日の町の風景：鉄道駅の寒暖計が零下15度を示している。

ソ連にはたくさんの加速器があった。「世界の加速器カタログ」の中にトムスクの電子シンクロトロンも記載されていたような記憶がある。実際にトムスクの電子加速器を用いた実験結果の論文を意識したのは1985年ごろである。当時、筆者は東大原子核研究所の電子シンクロトロン（ES）実験プロジェクト「標識つき偏光ガンマ線生成」（責任者：丸山浩一氏）の一員として、単結晶に高エネルギー電子をあてたときに発生するコヒーレント制動放射の実験をおこなっていた。その過程で、ビームを結晶軸に平行に入射したとき、数十 MeV から 1 GeV までの光子エネルギー領域で「制動放射強度が一様に増大する」ことを見出



写真1 冬のトムスク市街風景

した¹⁾。このような現象の報告例を探すなかでトムスクの実験に遭遇したわけである²⁾。後者の論文では、我々の実験結果とまったく逆に、結晶軸とビームが平行になると「制動放射強度が減少する」という報告をしている。そこで、トムスク工大の研究グループと手紙による情報交換がはじまった。その後の実験で、この食い違いは検出立体角の違いで生ずるものであり、実は両者とも正しいというのがわかったのだが³⁾。

2. パラメトリック X 線とコヒーレント陽電子創生に関する共同研究

2.1 トムスク工大原子核研究所

トムスク工大原子核研究所の（故）ポロビヨフ所長の招きにより1991年6月に初めてトムスクを訪問し

* 広島大学大学院先端物質科学研究科
Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
(E-mail: ichita-endo@hiroshima-u.ac.jp)

た。当時東京大学原子核研究所におられた吉田勝英さんと共に、新潟から空路でハバロフスク経由ノボシビルスクにおり、迎えにきた車で約4時間かけてようやくトムスクに着いたことが懐かしく思い出される。当時はゴルバチョフ大統領によるペロストロイカ政策の真っ只中で、テレビではアメリカのホームコメディ（ロシア語同時通訳つき）を放映していた。

トムスク工大原子核研究所の電子シンクロトロン「シリウス」は当初1.5 GeVであったとのことだが、私の訪問時にはすでにフラットトップをつけて900 MeVに改造されていた。ほとんど同時期に建造された東大核研ESに比べてやけに大きい。RF周波数が低い（50 MHz程度だったような気がする）ためRF空洞が巨大であり、また弱収束なので磁石も非常に重そうである。ちなみに、入射器は小さなマイクロトロンである。この加速器建設当時を知っているKalinin博士をヘッドとする加速器運転チームがあり、5名程度の技術者が働いていたが、ソ連崩壊後、人員削減が行われ、加速器運転計画にあわせて臨時に雇用するという形態になったようである。

2.2 周期物質からのX線発生に関する共同研究

1991年10月—11月に再びトムスクを訪れた。このときには、大学院生であった小林隆氏（現KEK）を伴い、共同実験をおこなった。パラメトリックX線強度の温度依存性測定である。シリウスには電子引き出しラインがないため、内部標の実験である。加速器のビームパイプにいたゴニオメータはモスクワで作ったそうであるが、結晶を液体窒素で冷やすことができる。加速器は研究所の地下室にあり、制御とデータ取得は2階・3階でおこなう。長いケーブルを介してゴニオメータ制御やデータ取得をおこなうわけである。エレクトロニクスは独自のトランジスタ回路とCAMACの併用である。この実験は順調に進み、その結果はトムスクと広島の双方で解析してフィジカルレビュー誌に投稿したところ、直ちに掲載された⁴⁾。

一方、パラメトリックX線は発見されたばかりで、その発生メカニズムについては諸説があった。そこで核研ESの電子引き出し線を用いてパラメトリックX線の系統的实验をおこなうことにした。また、多層フォイルに高エネルギー電子を当てたときに発生する干渉トランジションX線放射についての実験も並行して準備した。後者については、トムスクの研究者を招聘し、核研ES共同利用実験をおこなった。

これらの共同研究をすすめるうちに、広島大学とトムスク工大の大学間協定締結の話が進展し、1997年に広島大学理学部とトムスク工大間に結ばれた協定

が、1998年には大学間協定に格上げされた。トムスク工大はソ連崩壊後いち早く国際化に取り組んでいる大学というので、高等教育省からいろいろな特典が与えられたようである。そのひとつが、1993年からはじまった国際シンポジウム“Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures” (RREPS) の開催支援である。これは1993年から一年おきに開かれている。開催地はトムスク、バイカル、ウラル地方などを転々とし、第7回シンポジウム（2005年9月）はイタリアのFrascatiであった。

2.3 陽電子発生

この国際シンポジウムRREPSにしばしば参加しているうちに、多くの旧ソ連の研究者と知り合うことができた。単結晶に高エネルギー電子を入射したときにおこるチャネリング放射やコヒーレントな電子・陽電子対創生をコライダーの陽電子源に用いるアイデアをまじめに考えはじめたのもこのシンポジウムのおかげである。核研ESやKEKの入射用線形加速器を用いた単結晶からの陽電子発生実験にはトムスク工大も参加している。

3. 小型電子加速器とその応用に関する共同研究

3.1 トムスク工大非破壊試験研究所

トムスク工大を何度か訪問しているうちに、“Research Institute of Introscopy” という大学附属研究所を見学させてもらった。耳慣れないIntroscopyという言葉は、「内部透視」という意味らしく、X線や超音波その他の手段を用いた非破壊試験方法の研究と機器開発をおこなっている。200人程度のスタッフを擁するけっこう大きな研究所である。面白いことに、研究だけでなく「製造・販売」も行っており、売り上げ収益で人件費や建物建造や設備の経費がまかなわれている。どうやら、ソ連崩壊以前からこういう学内ベンチャー企業のようなシステムが始まっていたようだ。買い手は主としてヨーロッパであるが、最近では中国向けも増えているようだ。ロシアで当初想定した用途はパイプラインや大型プラント設備の現場非破壊検査などであるが、現在は空港等でのコンテナ内部透視用にもかなり売れているらしい。

広島大学では、1995年にベンチャービジネスラボラトリー (VBL) の設置が認められ、同時に放射光施設HiSORの建設計画も承認された。このとき、HiSORの入射加速器活用と、ユニークなベンチャービジネス誕生の契機となることをねらって、「超高速電子周回装置」という150 MeV電子リングREFER



写真2 トムスク工大イントロスコピー研究所長(右)と筆者

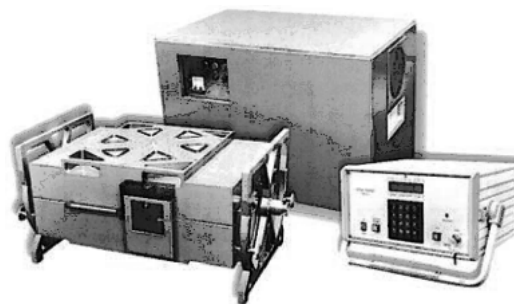


写真3 トムスク工大製4 MeV ベータトロン
 左手前：本体，後：電源部，右：コントローラ
 (写真提供：ハイビームテクノロジー社)

(Relativistic Electron Facility for Education and Research) を建設した。トムスク工大との共同研究プログラムのなかに REFER を用いた新 X 線源開発計画をもちこむと同時に、「売れる製品」開発をめざして「小型電子加速器の開発とその応用」という具体的共同研究テーマを推進することが両大学長間で合意された。トムスク工大ではベータトロンを用いた X 線源を製造販売しており、これをベースにして、日本市場の需要に合致した小型加速器をつくらうというのがねらいである。トムスク工大側の実行責任者はイントロスコピー研究所長の V. Chakhlov 博士、広島大学側は筆者である。写真2は筆者と Chakhlov 博士である。中心部に写っているのは同研究所が ISO9001 認証を受けたときの証明書である。

共同研究の進め方については、責任者間で協議し、以下のように定めた。

ステップ1 (2000年1月1日—2000年9月30日)

情報交換と小型加速器製品のデモ

ステップ2 (2000年10月1日—2002年9月30日)

新技術開発

ステップ3 (2002年10月1日—2004年3月30日)

新しい小型加速器の試作

各ステップの詳細は毎年見直しつつ実施した。試作のための経費が思うように集まらなかったため、技術開発結果のうちまだ実機に取り入れていない部分もあるが、ステップ3として1 MeV の新型ベータトロンのプロトタイプ製造にこぎつけた。この共同研究を基礎として、大学発ベンチャー企業“ハイビームテクノロジー株式会社(大西健広社長)”が2004年2月に設立された。

3.2 ベータトロン技術開発

トムスク工大ですでに製品化されてカタログにのっているベータトロンは4-7.5 MeV のものである。こ

れらの加速器の外見は写真3のようなベータトロン本体のはいった筐体と電源部、制御部に分かれている。これらは、移動使用を想定して作られており、空冷式かつ商用電源または移動式発電機で電力を供給するようになっている。加速用真空リングはガラスの封じ切りなので、排気ポンプは不要である。

共同研究での技術開発の要点は

- 1) 電子銃の改良
- 2) 軽量・小型化
- 3) 強度増大
- 4) 1 MeV に最適化した製品の製造

である。1)についてはナノ構造からの電子放出を利用した電子銃の可能性について調べた。2)は電磁石構造を工夫して軽量化をはかる。3)入射時の捕獲効率向上および、繰り返し周波数の増加。4)は日本では1 MeV 以上の X 線発生装置は放射線発生装置となり、移動使用が困難になるため、新たに開発することにしたものである。

4. 学生の交流

広島大学はトムスク工大との交流協定のもとで、これまでに学部生5名を短期留学生(1年間)として受け入れた。また、現在、トムスク工大出身者が広島大学先端物質科学研究科の博士課程後期学生として在籍している。これだけの人数と付き合ってみるとロシアの大学教育の様子がうかがい知れてなかなか面白い。一方、広島大学の大学院生でトムスク工大を訪問したものは3名。そのうち一名は自費で3ヶ月あまり滞在し、小型加速器の製造について学んで帰ってきた。日本とロシアの生活費の違いを換算すると、ほぼ3ヶ月で航空運賃が捻出できるのである。

5. まとめと今後

筆者らとトムスク工大の共同研究は特に大きな経費を使ったわけではないが、幸いユニークな研究分野の発掘という成果をあげることができた。共著論文は英文22編、露文数編を発表している。この15年間でトムスクの街は大きく変わった。暗くてぼろぼろだったトムスク空港は西欧風になり、走る車はドイツ車や日本車が目立つようになっている。銀行が増え、街角のATMで日本からもっていったクレジットカードを使って現地通貨でのキャッシングも可能である。若者のビジネス指向、研究離れが進んでいるとのことである。それでもロシアとソ連の重視してきた理工系教育の厚みは健在であり、今後も協力関係を継続したいと考えている。

関連文献

周期構造からのX線放射関係

- 1) I. Endo, T. Monaka, A. Sakaguchi, Y. Sumi, H. Uchida, N. Yamamoto, M. Tobiyama, K. Yoshida, K. Watanabe, T. Ohba, K. Baba and T. Emura, *Phys. Lett. A*146 (1990) 150–154.
- 2) A. N. Didenko, V. N. Zabaev, B. N. Kalinin, A. A. Kurkov, A. P. Potylitsin, V. K. Tomchakov and S. A. Voroviev, *Phys. Lett. A*82 (1981) 54.
- 3) I. Endo, T. Tanioka, M. Tobiyama, H. Uchida, M. Muto, K. Yoshida, K. Watanabe, T. Ohba, K. Baba and T. Emura, *Phys. Lett. A*164 (1992) 319–322.
- 4) K. Yu. Amosov, B. N. Kalinin, A. P. Potylitsin, V. P. Sarychev, S. R. Uglov, V. A. Verzilov, S. A. Voroviev, I. Endo and T. Kobayashi, *Phys. Rev. E*(1993) 2207–2209.
- 5) S. Asano, I. Endo, M. Harada, S. Ishii, T. Kobayashi, T. Nagata, M. Muto, K. Yoshida and H. Nitta, *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 3247–3250.
- 6) B. N. Kalinin, A. P. Potylitsin, V. A. Verzilov, I. E. Vnukov, I. Endo, M. Harada, T. Kobayashi, T. Kuwamoto, K. Yoshida, M. Muto and H. Nitta, *NIM. A*350 (1994) 601–604.
- 7) I. Endo, M. Harada, T. Kobayashi, Y. S. Lee, T. Ohgaki, T. Takahashi, M. Muto, K. Yoshida, H. Nitta, A. P. Potylitsin, V. N. Zabaev and T. Ohba, *Phys. Rev. E* 51 (1995) 6305–6308.
- 8) M. Yu. Andreyashkin, V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, I. Endo and T. Kobayashi, *NIM A* 359 (1995) 518–522.
- 9) M. Yu. Andreyashkin, V. N. Zabaev, V. V. Kaplin, E. I. Rozum, S. R. Uglov, K. Yoshida and I. Endo, *JETP Letters*, 62 (1995) 770–774.
- 10) M. Yu. Andreyashkin, V. V. Kaplin, A. P. Potylitsin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, K. Aramitsu, I. Endo, K. Goto, T. Horiguchi, T. Kobayashi, Y. Takashima, M. Muto, K. Yoshida and H. Nitta, *NIM B* 119 (1996) 108

-114.

- 11) M. Yu. Andreyashkin, V. N. Zabaev, V. V. Kaplin, S. R. Uglov, K. Nakayama and I. Endo, *JETP Letters* 65, No. 8, 625–631 (1997).
- 12) Y. Takashima, K. Aramitsu, I. Endo, A. Fukumi, K. Goto, T. Horiguchi, T. Isshiki, V. Kaplin, T. Kobayashi, T. Kondo, K. Matsukado, M. Muto, K. Nakayama, H. Nitta, Y. Okazaki, A. Potylitsin, T. Takahashi and K. Yoshida, *NIM B* 145, 25–30 (1998).
- 13) M. Yu. Andreyashkin, V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, K. Yoshida, I. Endo, *NIM B*145, 203–208 (1998).
- 14) K. Nakayama, M. Sekimura, I. Yanase, I. Endo, Y. Takashima, V. Kaplin and A. Potylitsin, *NIM B*145, 236–238 (1998).
- 15) O. V. Chevonov, B. N. Kalinin, G. A. Naumenko, D. V. Padalko, A. P. Potylitsyn, I. E. Vnukov, I. Endo and M. Inoue, *NIM B*173 18–26 (2001).
- 16) K. Chouffani, M. Yu. Andreyashkin, I. Endo, J. Masuda, T. Takahashi and Y. Takashima, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B*173 241–252 (2001).
- 17) I. Endo, D. Iseki, T. Ohnishi, C. Moriyoshi and A. V. Shchagin, *NIM B* 217 (2004) 666–670.
- 18) Y. Takabayashi, I. Endo, K. Ueda, C. Moriyoshi and A. V. Shchagin, *NIM B*243 (2006) 453–456.

結晶からの電子陽電子生成関係

- 19) K. Yoshida, K. Goto, T. Isshiki, I. Endo, T. Kondo, K. Matsukado, T. Takahashi, A. Potylitsin, C. Yu. Amosov, B. Kaplin, G. Naumenko, V. Verzilov, I. Vnukov, H. Okuno and K. Nakayama, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 1437–1446.
- 20) Yu. L. Pivovarov, Yu. P. Kunashenko, I. Endo and T. Isshiki, *NIM B*145, 80–91 (1998).
- 21) B. N. Kalinin, G. A. Naumenko, A. P. Potylitsin, V. A. Verzilov, I. E. Vnukov, K. Yoshida, K. Goto, I. Endo, T. Isshiki, T. Kondo, K. Matsukado, T. Takashima, T. Takahashi, H. Okuno and K. Nakayama, *NIM B*145, 209–220 (1998).
- 22) Yu. P. Kunashenko, Yu. L. Pivovarov, I. Endo and T. Isshiki, *Surface Investigation* 14 632–642 (1998).
- 23) Y. Okazaki, M. Andreyashkin, K. Chouffani, I. Endo, R. Hamatsu, M. Inuma, H. Kojima, Yu. P. Kunashenko, M. Masuyama, T. Ohnishi, H. Okuno, Yu. L. Pivovarov, T. Takahashi and Y. Takashima, *Phys. Lett. A*271 (2000) 110–114.
- 24) M. Inoue, S. Takenaka, K. Yoshida, I. Endo, M. Inuma, T. Takahashi, A. V. Bogdanov, A. M. Kolchuzkin, A. P. Potylitsin, I. E. Vnukov, H. Okuno, S. Anami, A. Enomoto, K. Furukawa, T. Kamitani, Y. Ogawa and S. Ohsawa, *NIM B*173 104–111 (2001).
- 25) I. Endo, Y. Okazaki, Yu. P. Kunashenko and Yu. L. Pivovarov *NIM B* 179 (2001) 343–350.

小型加速器開発関係

- 26) T. Ohnishi, I. Endo, K. Hayashi, A. Kohara, T. Yoshida, G. L. Chakhlov, E. L. Malikov, A. P. Naydukov, T. Ekino and F. Nishiyama, *NIM A* 539(2005) 16–24.