

■ 読者投稿欄

放射光の図の話

安居院あかね (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (QST) 放射光科学研究センター)

磁場と電場を受けながら高速で円運動する荷電粒子は進行方向に電磁波を放射する。1940年代に電子シンクロトロンからの電磁波の放射が報告されてから70年以上の時が経った。Synchrotron radiation = シンクロトロン放射, が直訳と思われるが, 日本では (天文学などを除き) 「放射光」という言葉が定着している。

1956年に Tombouliau らが描いた放射光発生概念図 (Fig. 1(a)) は, 放射光の高輝度性, 指向性などの長所をよく表現し, その後も類似の図が数多く描かれてきた。

Fig. 1(b)~(e)にその一端を列挙する。

Fig. 1に示したどの図も, 左に電子の運動の速度が小さいとき ($\beta \ll 1$), 右に大きいとき ($\beta \approx 1$) を描いている ($\beta = v/c$, v : 電子の速度, c : 光速)。Fig. 1の $\beta \approx 1$ の図 (a), (b)で, 放射は野球のバットのよう描かれているが, 後に出版された(c)~(e)では先端が太く根元が細く変化している。また, 放射の先端付近に凹みのようなものが描かれている。

Fig. 1(e)は近年 (2014年) 出版されたものだが, 手軽に利用できる描画ソフトが普及している現在でも60年近く前に描かれた Fig. 1(a)の図を踏襲している。物理現象の概念図なので極端に変わることはないとはいえ, Tombouliau らが描いた図の完成度の高さが窺える。

Fig. 1が放射光関係の教科書に掲載されている図であるのに対し, Fig. 2(a)は電磁気学の教科書⁶⁾, Fig. 2(b)は光学の教科書⁷⁾に掲載されている図である (Tombouliau らは参考文献として⁶⁾を挙げている)。放射のパワーが前方に伸びているのは Fig. 1の $\beta \approx 1$ の図と同じだが, Fig. 2では, 後方にもパワー分布が丸く描かれている。

放射光を光源として物性測定などに利用するだけなら, 放射光の発生原理など知らなくとも大した問題ではない。しかしながら, シンクロトロン放射のパワーの分布は電磁気学の基本問題としてもよく挙げられ, (パソコンを使えば) 簡単に描画できる。

電子の運動の速度と加速度が直交する場合について考える。電子の運動方向への極角を θ , 運動方向と運動の軌道に垂直な面内での方位角を ϕ とすると (Fig. 3(a)), 放射パワー ($dP/d\Omega$) は

$$\frac{dP}{d\Omega} \propto \frac{1}{(1 - \beta \cos \theta)^3} \left\{ 1 - \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{\gamma^2 (1 - \beta \cos \theta)^2} \right\} \quad (1)$$

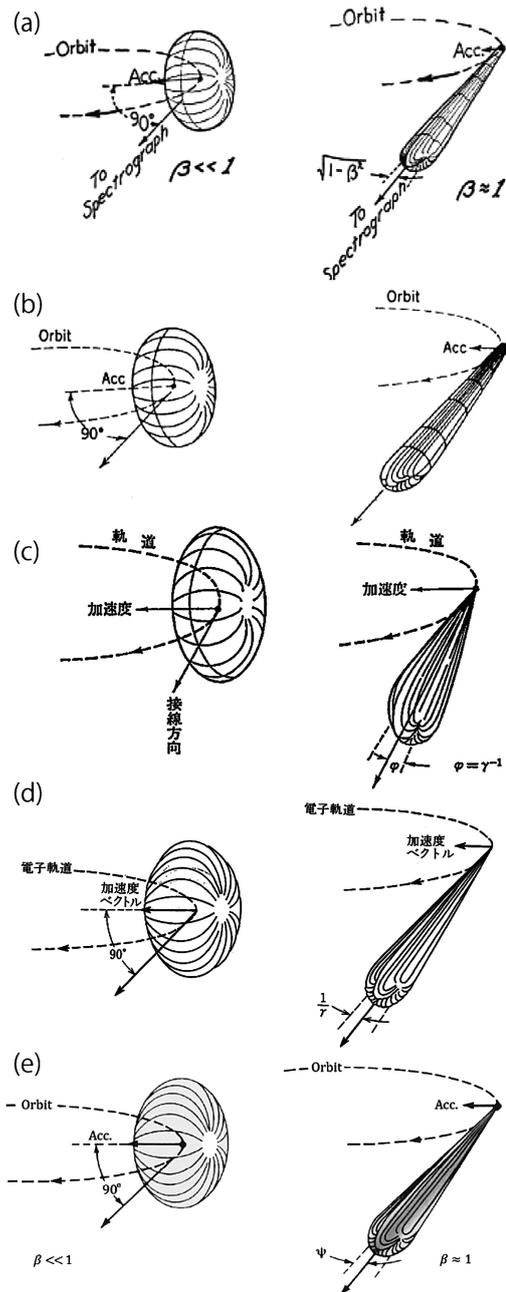


Fig. 1 Radiation pattern. (a) Fig. 1.1 of ¹⁾, (b) Fig. 1 of ²⁾, (c) Fig. 3-17 of ³⁾, (d) Fig. 5.16 of ⁴⁾, (e) Fig. 1.8 of ⁵⁾.

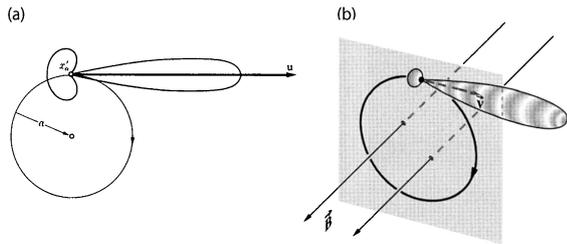


Fig. 2 Radiation pattern. (a) Fig. 19.7 of 6), (b) Fig. 3.30 of 7).

と書ける ($\gamma=1/\sqrt{1-\beta^2}$)^{8,9)}。計算結果を Fig. 3(b) に示す。

Fig. 3 の $\beta=0.001$ の図は穴のないドーナツのようにになっている。これが Fig. 1 の $\beta \ll 1$ の図に相当する。 β が大きくなるにつれ、ドーナツは電子の運動方向に引き伸ばされ、パワー分布が前方に大きく伸びていく。後方はあまり伸びていない。放射のパワー分布は軌道面に垂直に扁平し、6) の Fig. 19.7 の注意書きにもあるように、 θ について非対称であることがわかる。

さらに β が大きくなるとパワーは急速に、前方に集中していく。Fig. 1 では、 $\beta \ll 1$ も $\beta \approx 1$ も同じような大きさに描かれているが、Fig. 3 のグラフを見ると、 $\beta \ll 1$ に比べ $\beta \approx 1$ ではパワーが桁で大きいことがわかる (Fig. 3 の計算も単位などを含めれば厳密ではないが)。Fig. 1 の $\beta \approx 1$ の図ではパワー分布の先端が太く描かれているが、Fig. 3(b) を見ればそれは誇張であることがわかる。また、Fig. 2(a), (b) に描かれている後方の丸い分布も、大きめに誇張されていることがわかる。Fig. 3 の $\beta=0.7$ および 0.9 の図には、放射の根元付近の拡大図も併せて示した。後方の丸い分布が前方に回り込んでいるのがわかる。Fig. 1 の $\beta \approx 1$ の図に描かれている凹みは、これを誇張したものと思われる。Fig. 1 の凹みに記されている $\sqrt{1-\beta^2}$ や $1/\gamma$ は放射分布の角度を表し、この程度の角度広がりの中にパワーは集中する。その外側にも大きな分布があるように見えるのはこの誇張のためと思われる。

Fig. 1 でも Fig. 2 でも図が出版された国に依らず、電子軌道は時計回りに描かれている。電子を加速・蓄積するのに、電子の運動方向に物理的制約はない。実際 SPring-8 では蓄積リングに入射する前段の加速器シンクロトロンでは時計回り、蓄積リングでは反時計回りになっている。

放射光を利用するのに電子の運動は時計回りでも反時計回りでもよい。世界各地の放射光施設について、電子軌道の向きを見てみると、約2/3が時計回り、約1/3が反時計回りである (Table 1)。しかし以前は、欧米の蓄積リングでは電子軌道は時計回り、日本の蓄積リングでは反時計回りという、都市伝説めいたものがあった。

日本の放射光施設は SOR-RING から始まった。SOR-RING の配置図を Fig. 4 に示す¹⁰⁻¹²⁾。電子シンクロトロン (ES) の S2 から電子が取り出され、一旦曲げられてから壁に沿うように SOR-RING に入射されている。結果、電

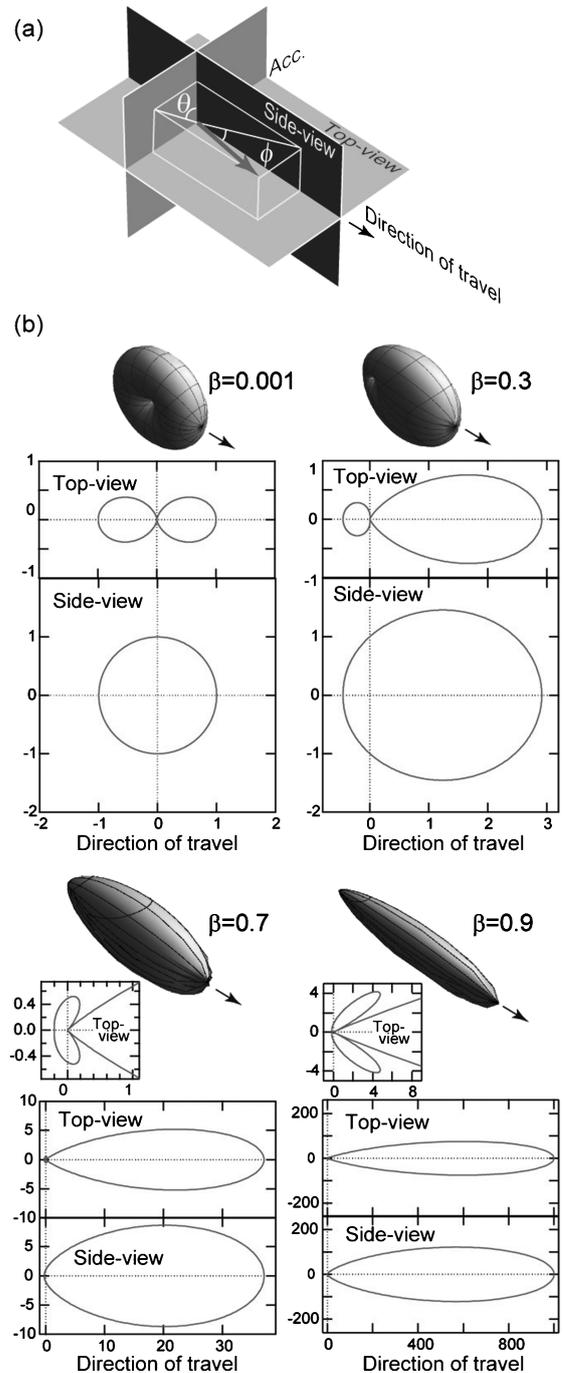


Fig. 3 (a) Coordinate system. (b) Radiation patterns for $\beta=0.001, 0.3, 0.7,$ and 0.9 .

子は反時計回りに蓄積されている。これが日本での反時計回りの始まりだろう。その後、PF も電子が反時計回りに蓄積されるように建設された。SOR-RING で使われていた分光器を PF に移設して使うこともできたそう¹³⁾。さらに UVSOR や SPring-8 でも反時計回りが採用され、日本の放射光施設では反時計回りが定着していったと思われる。

ある時、UVSOR で使われていた前置鏡を佐賀シンクロ

Table 1 Direction of electron motion.

CCW
INDUS-I (India), PF (Japan), UVSOR (Japan), SPring-8 (Japan), NewSUBARU (Japan), AichiSR (Japan), SSRF (China), PLS (Korea), ASTRID, ASTRID2 (Denmark), ELSA (Germany), Siberia-1, Siberia-2 (Russia), VEPP-3 (Russia), SURF-III (USA)
CW
INDUS-II (India), HiSOR (Japan), SAGA-LS (Japan), AURORA (Japan), SPS (Thailand), SESAME (Jordan), BEPC (China), NSRL (China), TLS, TPS (Taiwan), Helios II (Singapore), ESRF (Europe), Synchrotron SOLEIL (France), BESSY-II (Germany), DORIS III, PETRA III (Germany), ANKA (Germany), ELETTRA (Europe), ALBA (Spain), MAX-I, MAX-II, MAX-III, MAX-IV (Sweden), SLS (Switzerland), Diamond Light Source (Britain), VEPP-4M (Russia), CLS (Canada), APS (USA), CAMD (USA), ALS (USA), NSLS-II (USA), SPEAR3 (USA), Aladdin (USA), Australian Synchrotron (Australia), LNLs synchrotron light source SIRIUS (Brazil)

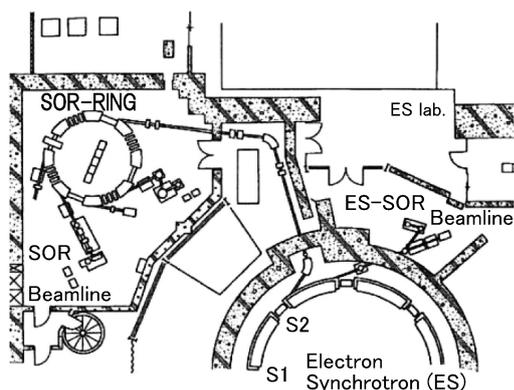


Fig. 4 Layout of SOR-RING (the figure is based on Fig. 7 of ¹⁰). The diameter of SOR-RING is about 5.5 m.

トロンに移設するという話が持ち上がったようだ。UV-SOR では電子は反時計回り、佐賀シンクロトロンでは時計回りである。前述のように電子がどちらに回っていても放射光を利用できる。しかし、時計回りと反時計回りでは放射光を取り出す光学系は異なる。結局、その前置鏡は使えなかったようだ¹⁴。

もし、ES からの電子の取り出し口が S1 であったならば、SOR-RING の電子軌道は時計回りであったかもしれない¹⁵ (ただ、S1 は ES への線形加速器の入射部であり他の直線部も既に使われていたので、S2 が SOR-RING への取り出し口になったのは必然であった)。日本の放射光利用が時計回りから始まれば、世界中の多くの放射光施設で採用されているように、日本でも時計回りが主流になったかもしれない。そして放射光施設間で、取り出しパーツ部品が共通化され、簡易かつ安価にビームライン建設ができるようになっていたかもしれない。

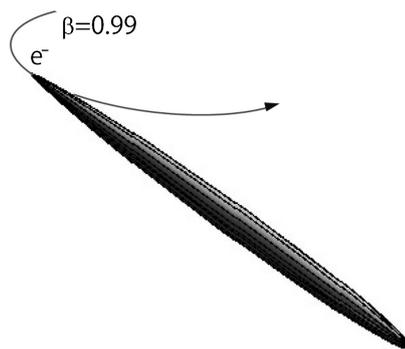


Fig. 5 Sketch of the synchrotron radiation pattern for an electron in the counter clockwise motion.

SOR-RING が建設される前、電子シンクロトロンに寄生し、本当の意味で日本で最初に放射光を利用した ES-SOR (Fig. 4) は時計回りだった。蓄積リングの設計時の土地の制約や入射器等との関係で、電子の回る向きは自ずと決まる。単に前例を踏襲して蓄積リングが設計されるわけでもない。いつの時代も新しい放射光施設の建設が議論される。これから建設される蓄積リングが時計回りか反時計回りかわからないが、SOR-RING に敬意を表し、反時計回りの放射光発生概念図を Fig. 5 に示しておく。

本稿については、より深い見地からのご意見も多いと存じます。ご教授いただけましたら幸いです。

引用した図は国内法に則り使用しています。

参考文献

- 1) D. H. Tomboulion and P. L. Hartman: Phys. Rev. **102**, 1423 (1956).
- 2) J. A. Samson and D. L. Ederer: "Vacuum Ultraviolet Spectroscopy" Academic Press (2000).
- 3) 相原惇一, 井口洋夫, 里子允敏, 菅野暁, 中村正年, 石井武比古, 原田義也, 関一彦: "電子の分光", 共立化学ライブラリー-16, 共立出版株式会社 (1978).
- 4) 菊田惺志: "X線回折・散乱技術(上)", 東京大学出版会 (1992).
- 5) Eds. S. Mobilio, F. Boscherini and C. Meneghini: "Synchrotron Radiation — Basics, Methods and Applications —" Springer (2014).
- 6) W. K. H. Panofsky and M. Phillips: "Classical Electricity and Magnetism", Addison - Wesley Press, Cambridge (1955); パノフスキー, フィリップス著, 林忠四郎, 天野恒雄訳: "電磁気学(下)", 吉岡書店 (1961).
- 7) E. Hecht: "OPTICS" 5th edition Pearson (2016).
- 8) 大柳宏之編: "シンクロトロン放射光の基礎", 丸善株式会社, (1996).
- 9) 渡辺誠, 佐藤繁編: "放射光科学入門", 東北大学出版会 (2004).
- 10) 上坪宏道: 放射光 **20**, 3 (2007).
- 11) SOR-RING REPORT, No. 7, p. 17.
- 12) H. Kitamura, T. Miyahara, M. Watanabe, T. Katayama and T. Sasaki: JJAP **15**, 1349 (1976).
- 13) 高輝度光科学研究センター (JASRI) 加速器部門 大熊春夫氏私信.
- 14) 佐賀大学シンクロトロン光応用研究センター 鎌田雅夫氏私信.
- 15) 大阪大学産業科学研究所 磯山悟朗氏私信.