

## SAGA-LS 電子蓄積リング加速過程のオプティクス評価

### ESTIMATION OF OPTICS FUNCTIONS IN RAMP-UP PERIOD AT THE SAGA-LS ELECTRON STORAGE RING

岩崎能尊#, 高林雄一, 金安達夫, 江田茂

Yoshitaka Iwasaki #, Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu, Shigeru Koda

SAGA Light Source

#### Abstract

We analyzed the orbit response matrix (R-Matrix) at several energies, for increasing the storage current of the SAGA Light Source (SAGA-LS) electron storage ring, quickening the ramp-up speed, and injecting at a new operating point. The differences between observed tunes and calculated tunes by R-Matrix analyses were less than (0.019, 0.026) horizontal and vertical respectively. Dispersion functions were also measured to compare the results of the R-Matrix analysis and the direct measurements. It was found that the distortions of the optics functions during ramp-up period were small except for the injection energy. Dispersion function analyzed by the R-Matrix method at the energy of 0.928 GeV was inconsistent with the direct measurement. The results of excitation properties of the quadru-pole magnets strengths will be used for the control of the tunes and the optics functions during the ramp-up period.

#### 1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS) 電子蓄積リングにはリニアックにより 0.257 GeV まで加速された電子を入射する。蓄積リング内で所定の電流量まで蓄積した後、蓄積リング内で 1.4 GeV までランプアップする。ランプアップ所要時間は約 4 分である。現在の最大蓄積電流量約 340 mA であり、放射光ユーザーに 300 mA 程度の蓄積電流量でビームの提供を行う。

蓄積リング電磁石電源の励磁パターンは、コミッション期に磁場データから検討し、更に試行錯誤による補正を加えて構築した。

将来、加速電流の増加、加速時間の短縮、あるいは新しい動作点でのランプアップを可能とするために、蓄積リング電磁石電源励磁パターンの計画的な構築が必要とされる。そこで、加速過程における蓄積リングオプティクスを、軌道応答行列解析の手法を用いて評価することとした。

#### 2. SAGA-LS 蓄積リングラティス及び電源構成

SAGA-LS 電子蓄積リングのラティスは 8 回対称の Double Bend である<sup>[1]</sup> (Figure 1)。4 極電磁石は 3 つのファミリー (QF1, QD1, QF2) で構成される。超伝導ウィグラー<sup>[2][3]</sup>による強いチューンシフトを補正するため、長直線部 LS2 および LS5 上下流の 4 極電磁石ダブレットはそれぞれ QFW1 及び QDW1、QFW2 及び QDW2 電源で励磁される。蓄積リング主要電磁石電源は、BM, QF1, QD1, QF2, QFW1, QDW1, QFW2, QDW2, SF, SD の合計 10 台である。このうち、6 極電磁石用電源 SF 及び SD は、励磁電流に対して磁場が比較的線形な QF2 に比例する

ように励磁する。その他の主要電磁石電源は、PLC の内部メモリーに格納された励磁パターンに従って出力電流が増大される。ランプアップパターンのセットポイントは、各電源につき 10000 点あり、PLC より各電源に約 4 分間でセットポイントが出力される。

QFW2 及び QDW2 は、2015 年秋のシャットダウンにインストールされる住友電気工業ビームライン超伝導ウィグラーのために、2014 年に設置された<sup>[4]</sup>。

2015 年春には超伝導ウィグラー 2 号機設置に伴う真空槽の置き換えが終了し、2 台目となる超伝導ウィグラー設置のための各種準備が整った<sup>[5]</sup>。

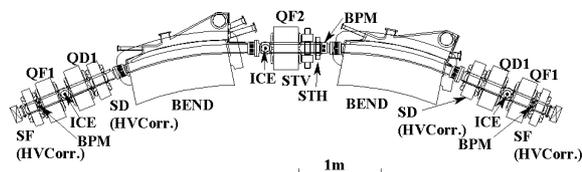


Figure 1: Lattice of the SAGA-LS storage ring.

#### 3. 軌道応答行列解析

蓄積リングのオプティクスを、軌道応答行列 (R-Matrix) のフットィングにより評価する方法<sup>[6]</sup>は、多くの放射光リング等において適用されている (参考文献<sup>[7-9]</sup>など)。SAGA-LS においても、ユーザー運転時におけるオプティクス評価のために、独自に計算コードを開発した。

R-Matrix のフットィングによるオプティクスの解析は、計算による R-Matrix と実測による R-Matrix の差が最小になるように、蓄積リングの各種パラメーターを最適化するものである。フットィングパラメーターを増やすことにより、skew4 極成分の分布

# iwasaki@saga-ls.jp

等も計算可能であるが、ここでは、リニアラティスにとって最も重要な、4極電磁石 K 値、ステアリング電磁石キック力、BPM のゲインエラーのみのフィッティングを行った。

なお、R-Matrix 解析においては、ステアリング電磁石キック力と、BPM ゲインエラーの間には自明な非独立性がある。つまり、全てのステアリング電磁石キック力を定数倍し、全ての BPM ゲインエラーを定数で割ったものは、等しい R-Matrix となる。文献 [9] においては、R-Matrix のフィッティングに加え、分散関数の測定値もフィッティングパラメータに加えている。SAGA-LS にはスクリーンモニターがあるため、ステアリング電磁石 1 台のキック力はユニークに決定される。従って、分散関数はフィッティングパラメータとしては含めていない。

#### 4. 加速過程のチューン測定と R-Matrix 解析

ユーザー運転時は、257 MeV で入射完了後、約 4 分間で 1.4 GeV までランプアップを行うが、ランプアップを途中のエネルギーで停止させ、各エネルギーにおけるチューンを計測した。また、各エネルギーでの R-Matrix を取得した。分散関数も計測したが、分散関数の測定結果については次節において記述する。

##### 4.1 加速過程のチューン測定

入射エネルギーから 1.4 GeV までのランプアップに対し、ランプアップを途中で停止し、チューンの測定を行った。測定結果を Figure 2 チューンダイアグラム上に示す。Figure 2 に示すように、ランプアップ中、チューンは大きく変動し、差共鳴を何度か横断しつつ 1.4 GeV に到達する。ランプアップパターンは、3 次の共鳴を避けるように試行錯誤により構築されたことがわかる。ランプアップ中のビームロス、加速直後および 1 GeV 付近で生じることが多かったが、それは、そのエネルギー付近における動作点が 3 次の共鳴に接近することが原因だと推定される。1.399 GeV と 1.4 GeV でチューンが若干異なるのは、ランプアップ終了後、外部 DCCT による電磁石電源フィードバックが機能するためである。なお、Figure 2 では加速エネルギーの順序を見やすくするために、観測点を実線で結んでいる。

チューン測定は、ランプアップを停止させた状態で行った。実際のランプアップ最中のチューンは、真空チャンバーに誘導される渦電流の差用により若干異なる可能性がある<sup>[10]</sup>。SAGA-LS では蓄積リングとしてはやや速いランプアップを行うが、真空チャンバーに流れる渦電流による効果はほぼ無視できると仮定した。また、偏向電磁石、4極電磁石はそれぞれ厚さ 1 mm、0.5 mm の電磁鋼板で積層されており、電磁石内部に流れる渦電流の効果も少ないと仮定した。

##### 4.2 R-Matrix 解析による 4 極電磁石励磁特性

ランプアップを途中で停止し、各エネルギー

において R-Matrix を取得し、解析を行った。R-Matrix 解析においては、水平・垂直合計 80 台のステアリング電磁石、水平・垂直合計 48 台の BPM による 3840 個の要素に対し、4極電磁石 K 値 (40 個)、ステアリング電磁石キック力 (80 個)、BPM ゲインエラー (48 個) の合計 168 個のパラメータフィッティングを行った。

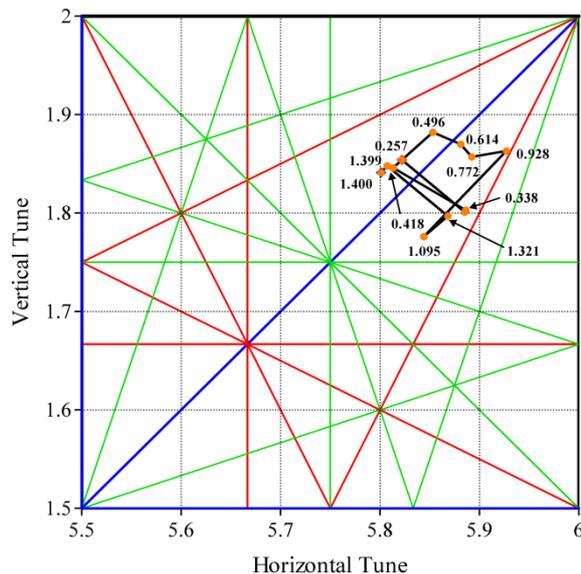


Figure 2: Measured horizontal and vertical tunes in the tune diagram. Blue lines, red lines, and green lines indicate 2nd, 3rd, and 4th resonance respectively. Numerical values are the beam energies (GeV).

R-Matrix 解析においては、4極電磁石の実効的な K 値が算出される。磁場勾配  $G$  (T/m) を得るためにはビームのエネルギーを知る必要がある。ビームのエネルギーは、偏向電磁石の磁場データより求めた。Figure 3 に R-Matrix 解析により得られた各エネルギーにおける 4極電磁石 (QF1-1) の実効的な磁場勾配の励磁特性を示す。Figure 3 には 4極電磁石の積分磁場測定データより求めた励磁特性も合わせて示した。実効的な磁場勾配は、磁場勾配の積分  $G \cdot L$  積 (T) を電磁石の物理的な長さ  $L$  (m) で割ることにより算出した。

R-Matrix 解析により算出した 4極電磁石磁場勾配は、磁場測定データに対し、励磁電流が増大するにつれて違いが大きくなる。励磁電流が増大するにつれ、実効的な磁場勾配が減少する傾向がある。その差は 1.4 GeV の励磁時で約 6%であった。Figure 1 に示すように、SAGA-LS 電子蓄積リングのラティスは非常にコンパクトに設計されている。4極電磁石と隣り合う 6極電磁石の間隔は 85 mm しかない。磁場測定はスタンドアロンの状態で行われており、磁場の干渉により、実効的な磁場強度が落ちているのかもしれない。SAGA-LS では、電源設定値と磁

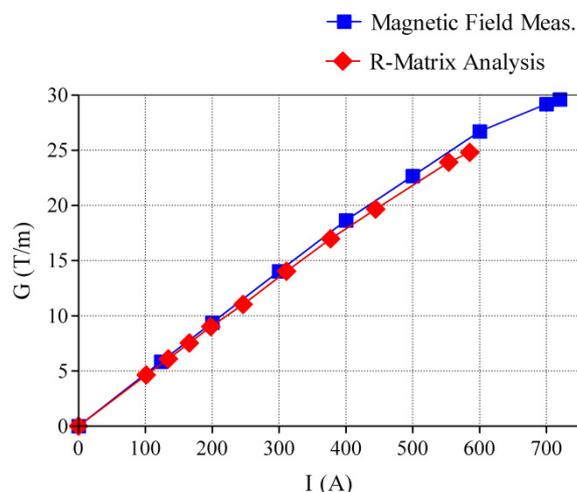


Figure 3: Excitation curve of the QF1-1 magnet. Squares and rhombuses denote the results of magnetic field measurements and R-Matrix analysis respectively. Lines are their linear interpolations.

場データから計算されるチューンが実験値を再現しないが、磁場の干渉がひとつの原因かもしれない。この点については、3D磁場計算で検証したいと考えている。

#### 4.3 R-Matrix 解析による加速過程のチューン推定

各エネルギーにおいて R-Matrix 解析を行い、偏向電磁石磁場データより得られるエネルギーより実効的な 4 極電磁石磁場勾配を算出した。各エネルギーでの磁場勾配を線形補間することにより、任意のエネルギーにおける K 値が算出される。Figure 4 に各エネルギーにおける R-Matrix 解析より算出される水平・垂直チューンを示す。R-Matrix 解析によるチューンと、実測によるチューンの差は、水平・垂直各(0.019, 0.026) 以下であった。これは、加速過程におけるチューン変動幅に比べて十分に小さい。

Figure 4 の実線は、R-Matrix 解析から得られる各エネルギーの磁場勾配を線形補間し、ランプアップパターン設定値ごとにチューンを計算したものである。R-Matrix を測定したのは、入射エネルギーと定格の 1.4 GeV を含む 10 のエネルギーであるが、R-Matrix を測定していない任意のエネルギーにおけるチューンについてもある程度推定できるようになった。今後、ランプアップ過程におけるチューン制御の精度が向上すると期待できる。

### 5. 加速過程のオプティクス

R-Matrix 解析により各エネルギーにおける K 値が算出される。その K 値を用いてオプティクス関数を計算した。Figure 5 に各エネルギーにおける R-Matrix 解析より得られたオプティクス関数と RF 周

波数を変化させ計測した分散関数を示す。計算にはトラッキングコード Tracy2<sup>[11]</sup>を用いた。分散関数を測定したのは、計算と実験値との整合性を確認するためである。分散関数の算出に当たっては、モーメントコンパクションファクターとビーム軌道の変位を知る必要がある。モーメントコンパクションファクターは、R-Matrix 解析からも算出される。また、ビーム軌道の変位は、BPM のゲインエラーを含んでいる。BPM ゲインエラーは R-Matrix 解析からも算出される。しかし、分散関数の測定値としては、モーメントコンパクションファクターにデザインオプティクスの値を使用し、BPM のゲインエラーはないと仮定した。

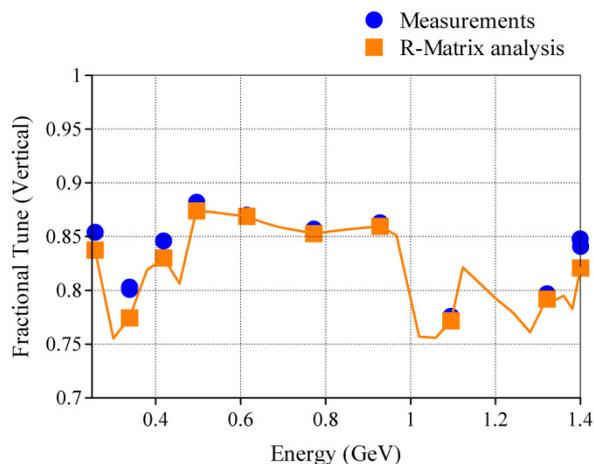
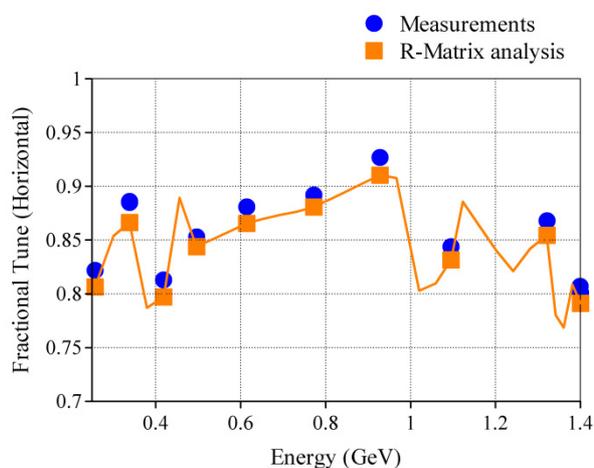


Figure 4: Fractional tunes of horizontal and vertical during ramp-up period. Blue dots are measured tunes and orange squares are calculated tunes from the R-Matrix analysis. Lines are calculated tunes from the linear interpolated quadru-pole field gradient by R-Matrix analysis.

Figure 5 に見られるように入射エネルギーでは、

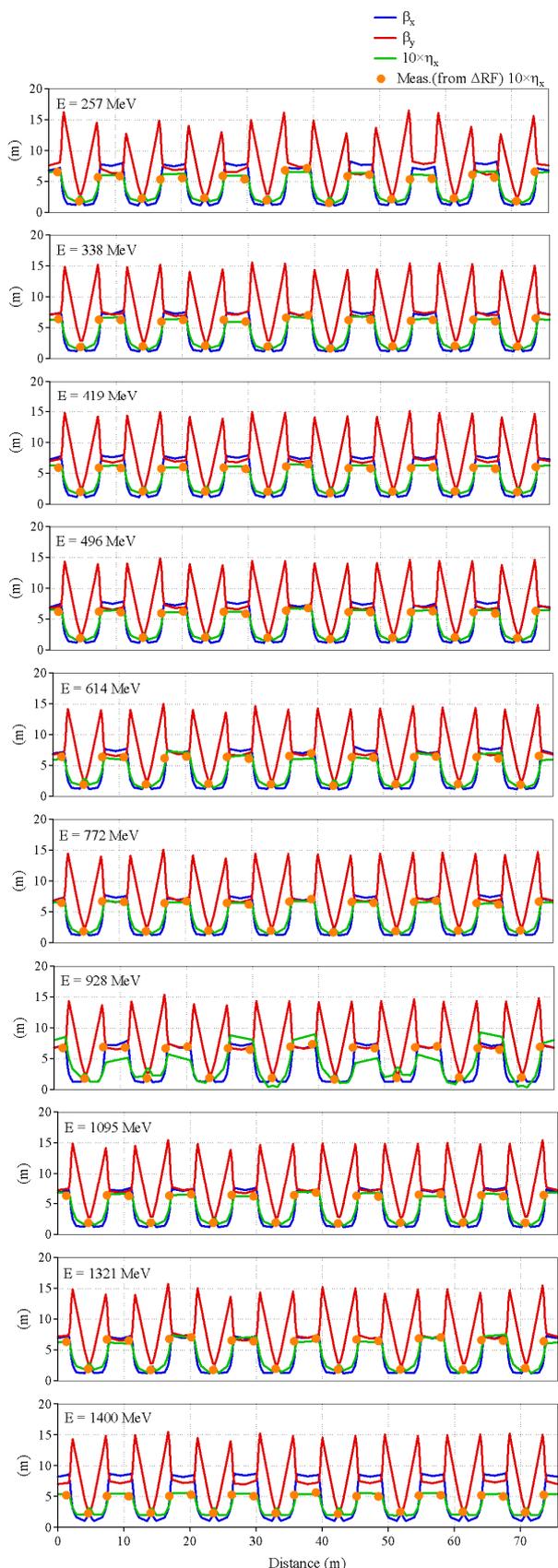


Figure 5: Optics functions during ramp up. Dots are results of direct measurements of dispersion functions.

ベーター関数のやや大きな歪みが見られる。これは、入射エネルギーにおいては、QF1 (QD1) ファミリーに属する QFW1 (QDW1) 出力値の誤差がそれぞれ、 $-0.43\%$ 、 $+0.25\%$ と大きいのが原因である（電源外部に設置した DCCT のモニター値による）。しかし、入射セプトム電磁石、キッカー電磁石の設定値とタイミングは、このオプティクスで入射速度が最大となるように最適化されており、特に入射に支障はない。300 mA 蓄積に要する入射時間はおよそ 3 分程度であり、日常のユーザー運転においては、バンチフィリングの均一性を保つため、更に入射速度を意図的に低下させている。

1.4 GeV ユーザー運転時においては、ベーター関数、分散関数共に大きな歪みは見られない。チューンのデザイン値は(5.796, 1.825)である。チューンの計測値は(5.801, 1.841)であり、R-Matrix 解析によるチューンの計算値は(5.791, 1.821)であった。計算値の計測値に対する差は、水平・垂直各 ( $-0.01$ ,  $-0.02$ ) であり、計測値をよく再現した。長直線部の分散関数はデザイン値では 0.6 m であるが、計測したところ、0.5 m であった。R-Matrix 解析によるオプティクス解析によっても同様であった。R-Matrix 解析により得られる K 値から計算されるエミッタンスは、27 nm-rad である。デザイン値は 25nm-rad である。分散関数のデザイン値との差が輝度に与える実効的な影響は大きくないと考えられるため、分散関数の補正を行う予定はない。

加速過程において、大幅なベーター関数の歪みは見られなかった。しかし、エネルギー0.928 GeV の時だけ、R-Matrix の解析による分散関数の計算値に大きな歪みが見られた (Figure 5 のエネルギー0.928 GeV 参照)。一方で、実測値では分散関数の歪みは見られない。このエネルギーにおける R-Matrix の解析だけ実測による分散関数を再現しなかった。このエネルギーにおいては計 4 回の R-Matrix を取得し、解析を行ったがいずれも分散関数の計測値を再現しなかった。原因については現在のところ不明である。

## 6. まとめと今後の予定

加速電流の増加、加速時間の短縮、あるいは新しい動作点でのランプアップを行うために、ランプアップを途中で停止し、R-Matrix を取得した。得られた R-Matrix を解析し、各エネルギーでのオプティクスを評価した。

加速過程において大きなチューンの変動が見られ、3 次の共鳴を避けるようにランプアップパターンが構築されていた。

各エネルギーにおいて R-Matrix 解析を行い、4 極電磁石の磁場勾配励磁特性を算出した。ビームのエネルギー算出には、偏向電磁石の磁場ゲーターを用いた。任意のエネルギーの 4 極電磁石磁場勾配は、各エネルギーで求めた磁場勾配を線形補間すること

で導出した。R-Matrix 解析により得られる 4 極電磁石励磁特性は、スタンドアロンでの磁場測定結果よりも最大で約 6%小さく算出された。4 極電磁石と 6 極電磁石との磁場の干渉が原因の可能性がある。

R-Matrix 解析により算出される K 値を用いたチューンは計測値を概ね再現し、その差は最大でも (0.019, 0.026) 以下であった。これは、ランプアップ過程におけるチューン変動幅に対し十分に小さい。

R-Matrix 解析の手法を用いることにより、任意のエネルギーにおけるオプティックス制御の精度が向上すると考えられる。

しかし、エネルギー 0.928 GeV においては R-Matrix 解析により計算した分散関数は、計測値を再現しなかった。原因については不明である。

今後、解析結果を用いてランプアップパターンの見直しを行いたい。特に、加速直後と、1 GeV 付近は 3 次の共鳴に近く、大電流のビーム蓄積のためにはランプアップパターンの計画的な更新が必要と考えられる。

また、今後、電磁石電源モニターシステムの高速化を行い、リアルタイムのオプティックス計算システムを構築したいと考えている。現在は、蓄積リング電磁石電源出力値は 1Hz でモニターしているが、ランプアップ直後の速い電源の応答や、ビーム貯蔵中のビーム寿命の急落などの原因は特定されていない。DC 確度 0.1%, サンプリング速度 1ks/sec 程度の電源モニターシステムとオプティックス解析により、これまで原因が特定できなかった事象についても理解が深まると期待される。

R-Matrix の取得には、蓄積リング全周で約 1 時間要している。これは、BPM の読み取り速度が 1Hz と遅いのが要因である。今後、BPM 読み取り速度向上のためのシステムも検討している。

## 参考文献

- [1] Y. Iwasaki, et al., "Lattice Design of SAGA Synchrotron Light Source", Proceedings of PAC'03, Portland, 3270-3272, 2003.
- [2] S. Koda et al., "Design of a Superconducting Wiggler for the SAGA Light Source Storage Ring", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 21, 32 (2011).
- [3] S. Koda, et al., "Effects of a hybrid superconducting three-pole wiggler on the stored beam at the SAGA-LS storage ring", Nucl. Instrum. Methods A682, 1(2012).
- [4] Y. Iwasaki, "Control System of Two Superconducting Wigglers and Compensation Magnets in the SAGA Light Source", Proceedings of the PCaPAC2014, Karlsruhe, 84-86, 2014.
- [5] Kaneyasu, et al., "Installation of a Second Super Conducting Wiggler at SAGA-LS", 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2015), to be published.
- [6] J. Safranek, "Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements", Nucl. Instr. and Meth. A 388, p. 27-36 (1997).
- [7] C. Steier, et al., "Fully Coupled Analysis of Orbit Response

- Matrix at the ALS", Proceedings of EPAC2000, Vienna, 1080-1082, 2000.
- [8] A.-S. Muller, et al., "Linear and Nonlinear Optics Studies in the ANKA Storage Ring", proceedings of PAC'03, 3273-3275, 2003.
- [9] Laurent S. Nadolski, "Use of LOCO at Synchrotron SOLEIL", proceedings of EPAC08, Genoa, 3131-3133, 2008.
- [10] Edited by Alexander Wu Chao and Maury Tigner, "Handbook of Accelerator Physics and Engineering" 2nd Printing, 268.
- [11] H. Nishimura, "TRACY, A Tool for Accelerator Design and Analysis", EPAC 88,803,1989.