

シンクロトロン光用中規模蓄積リングのための DBA ラティスの検討

江田茂*・鎌田雅夫*・加藤政博**・渡邊誠***

Design Study of DBA Lattices for Medium-sized Synchrotron Radiation Source

By

Shigeru KODA, Masao KAMADA, Masahiro KATOH and Makoto WATANABE

Abstract: Six lattices of double bend achromat (DBA) and extended double bend achromat (EDBA) were investigated for medium-sized synchrotron radiation facility under conditions of the ring circumference of 75 m and of relatively small emittance (< 100 nmr) with two superconducting wigglers of 7.5 T. Practical cell number of the lattice was found to be six to eight in viewpoint of balance between dynamic aperture, emittance and margin of straight sections for insertion devices. The lattice of six and seven cells had straight sections with length of more than 3 m and the lattice of eight cells had straight sections with about 2 m.

Key words: synchrotron radiation, storage ring, lattice design, double bend achromat

1. はじめに

本論文の目的は double bend achromat (DBA)⁽¹⁾ セルによって構成されたシンクロトロン光用中規模電子蓄積リングにおいて、現実的な加速器デザインを行う上でのセル数の影響を考察することである。

シンクロトロン光用蓄積リングにおいては高輝度光を得るといった観点から低エミッタンスを実現することが重要となっている。多くの放射光施設において採用されているセルとして DBA がある。セルの構成を Fig. 1 に示す。図中左側の偏向磁石内で発生する分散が次の偏向磁石で丁度打ち消されるように中央部に 4 極磁石を置く構成となっている。分散はこの二つの偏向磁石内及びこの間でしか発生しない。長直線部で分散がゼロであることは、入射及び挿入光源等を設置した際のビームへの影響が抑えられる利点も持っている。Fig. 1 でセル両端の収束、発散 4 極磁石は β 関数を調整するために利用される。

一般に周長が決まっている場合にはセル数を増加させることによってエミッタンスをより減少させることが可能である。しかしながらセル数の増加は一方で色収差補正のための六極磁石の磁場強度も強くさせる傾向を持つ。しかしこれは力学的に電子が周

平成 14 年 5 月 1 日受理

*シンクロトロン光応用研究センター

**岡崎国立共同研究機構分子科学研究所

***東北大学多元物質科学研究所

回可能な断面の大きさ(ダイナミックアパーチャ)を大きく制限することにつながりやすく、安定な運転が困難になる可能性がある。またセル数の増加は挿入光源が設置できる直線部の長さを短くする。

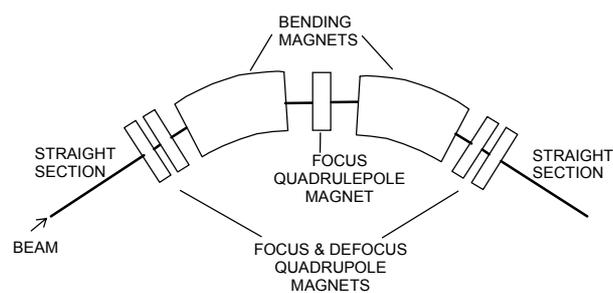


Fig.1 Basic structure of DBA Cell.

以上の議論から挿入光源利用を前提とした中規模放射光用 DBA リングをデザインする上ではセル数の決定は重要な問題であり、エミッタンス、直線部長さ、ダイナミックアパーチャ間の現実的なバランスを考え、決定する必要がある。蓄積リングデザインにおける考慮すべきパラメータは多く、解析的手法による一般的考察は困難であることから本論文では現実的な中規模リングの条件を設定し、これを満たす複数のラティスのケーススタディを通して、セル数と加速器パラメータの関係について考察した。

2. リングに求められる条件

中規模リングの条件を Table 1 のように設定した。X 線用超伝導ウィグラー2 台の常設を想定し、また複数のアンジュレータ設置も考慮した。

Table 1 Common Conditions of Lattices

Circumference	~75 m
Energy	1.4 GeV
Curvature Radius	3.2 m
Lattice Type	DBA, EDBA
Wiggler	7.5 T×2
Emittance (with 2 wigglers)	< 100nmr
Dynamic Aperture @center of long straight section	
Horizontal	≧ 20mm
Vertical	≧ 10 σ_y *

* vertical beam size

セルとしては DBA に加え、これを拡張した extended double bend achromat (EDBA) についても検討を行った。これは Fig. 1 における中央の 4 極磁石の代わりに収束及び発散 4 極磁石を偏向磁石脇に設置したものである。これにより新たに偏向磁石間に直線部が出来、通常の DBA の倍の直線部を有することになる。これはより多くの挿入光源を設置できるという利点になる。このセルは Super-ACO⁽²⁾ 及び現在進行中の分子研 UVSOR の高度化⁽³⁾ において採用されている。

実際のリングでは直線部には入射用キッカーマグネット、RF キャビティ等機器が設置されることから挿入光源が十分な数設置できるように直線部の数に下限を設けた。また長直線部の長さには入射系高周波空洞、挿入光源等を考慮し下限(2m)を設けた。ダイナミックアパーチャの水平方向は入射におけるセプトムの厚み、バンプオービットの振幅を考慮して設定した。垂直方向はビームサイズを十分含む大きさを下限とした。

超伝導ウィグラーはメインポール1つ、サイドポール2つから成る単純な3極タイプとし、各磁石をハードエッジの偏向磁石としてモデル化した。条件を Table 2 に示す。このウィグラーの臨界エネルギーは Table 1 の条件では 10keV である。

Table 2 Parameters of Super Conducting wiggler

	Main Pole	Side Pole
Magnetic Field (T)	7.50	3.75
Length (cm)	10.0	10.0

3. ラティス計算

ラティスパラメータの計算、最適化には KEK で開

発されたビーム力学計算コード SAD⁽⁴⁾ を用いた。得られた全モデルのラティスパラメータを Table 3 に示す。Fig. 2-7 にそれぞれの (a) 磁石配置、(b) ラティス関数、(c) ダイナミックアパーチャを示す。ラティス関数の図の原点は磁石配置図のリング最下部の直線部中央に対応し、電子の運動方向は時計回りとしている。各ラティスについて以下に列挙する。

(1) DBA8 セル型 I

典型的な DBA 構成である。短直線部中央の収束 4 極電磁石 QFC、長直線部両端に設置されたダブルレット (収束電磁石 QF、発散電磁石 QD) から成る構成となっている (Fig. 2 参照)。6 極収束磁石 SF の強度を抑えダイナミックアパーチャを十分取ることを目的に短直線部中央の最も β_x の大きな位置に 6 極を設置し、4 極磁石 QFC を 2 分割とした。Table 3 においてラティスタイプ 8Cell I がこれに対応している。

(2) DBA8 セル型 II

4 極磁石配置をより単純にした場合を考察するため短直線部中央の 4 極電磁石 QFC を (1) の場合と異なり 1 体とし両側に 2 個収束 6 極電磁石 SF を配置した (Fig. 3 参照)。Table 3 においてラティスタイプ 8Cell II がこれに対応している。

(3) DBA7 セル型

前述 (1) のラティスに準じセル数を 1 減じた磁石構成である (Fig. 4 参照)。Table 3 においてラティスタイプ 7Cell がこれに対応している。

(4) DBA6 セル型

前述 (1) のラティスに準じ、セル数を 2 減じた構成である (Fig. 5 参照)。Table 3 においてラティスタイプ 6Cell がこれに対応している。

(5) DBA 準 6 セル低 β_y 型

前述 (4) の場合、長直線部は 4m 近くある。そこで 6 セル DBA ラティスにおいて一部直線部に 4 極電磁石を直線部両側に追加し、垂直方向のベータ関数 β_y を制御し 1 m 以下となる直線部を持つ DBA ラティスも検討した。

真空封止アンジュレータ等磁極ギャップの狭い (数ミリ) 挿入光源の設置を考慮した場合、直線部の β_y が大きな値を持つと残留ガス-電子ビーム間のラザフォード散乱で決まるビーム寿命を短くする可能性がある。加えて超伝導ウィグラー等強磁場を持つ挿入光源の不整磁場の摂動的影響はベータ関数の大きさに比例する。これら β_y に依存する効果を抑えるためのラティスとして検討を行った。ラティスとしては前述 (4) に準じた構成で対称的に 3 箇所低 β_y 区間を設けた (Fig. 6 参照)。Table 3 においてラティスタイプ 6CellLow β_y がこれに対応している。ウィグラーは低 β_y 区間に設置して計算を行った。

(6) EDBA6 セル型

典型的な DBA ラティスにおける偏向磁石間中央の 4

Table 3 Lattice Parameters

Lattice Type	8Cell I	8Cell II	7Cell	6Cell	6CellLow β_y	6CellEDBA
Circumstance (m)	75.397	75.397	75.400	75.400	75.880	75.360
Tune(V_x, V_y)	(6.71, 2.32)	(6.77, 2.37)	(6.21, 2.25)	(5.40, 2.20)	(6.45, 3.35)	(5.21, 4.45)
Emittance (nmr)						
no wiggler	37.4	35.7	43.5	78.8	67.2	78.2
2 wigglers	47.7	46.8	57.3	82.6	49.8	67.5
Long Straight Section						
No.	8	8	7	6	6	12
Length (m)	2.19	2.19	3.18	3.99	3.99/2.75*	2.00
β_x (m)						
@straight section center	8.94	9.13	10.44	9.90	11.07/0.56*	4.07
β_y (m)						
@straight section center	7.74	7.07	7.92	8.99	8.83/0.40*	2.41
Natural Chromaticity						
(ξ_x, ξ_y)	(-10.6, -9.28)	(-11.32, -8.58)	(-11.3, -8.61)	(-8.13, -7.77)	(-13.7, -11.5)	(-7.71, -12.5)

* low β_y straight section

極磁石を取り払い、偏向磁石両脇へ収束、発散4極を配置した構成と成っている (Fig. 7 参照)。

Table 3 においてラティスタイプ 6CellEDBA がこれに対応している。直線部の分散を完全にゼロにした場合、エミッタンスとダイナミックアパーチャの条件を同時に満たすことが困難であった。Fig. 7 (b) に示されているように直線部分散の条件を緩和し計算を行った。

4. 考察及び課題

本計算では Table 1 の条件を満たす範囲で可能なエミッタンスは 47~83nmr (ウィグラー2台設置時) であった。これはいわゆる第三世代リングと呼ばれる低エミッタンスリングと第二世代リングの中間的な大きさにあたる。7.5T 超伝導ウィグラー2台設置の条件で、より低エミッタンスにすることはダイナミックアパーチャの減少を招き Table 1 の条件を満たす範囲では困難であった。周長75mの典型的なDBAラティスでは50nmr程度が現実的な下限と考えられる。

DBAラティスにおいては6, 7, 8セルどれも Table 1 の条件を満たすことは可能であった。しかしながら8セルでは直線部が2mと短く挿入光源の設置にあってはミニポールアンジュレータ等の小型のものに限られる。

EDBAにおいても直線部が2mであり、本計算で与えられた周長では6セルのみが現実的なセル数であった。またこの周長では完全に分散をゼロにすることが困難でありEDBAに関してはより現実的なものとするためには周長の増大が必要と考えられる。

準6セル低 β_y 型及びEDBA型ではウィグラー2台設置時のエミッタンスが、ウィグラーのない場合に比べ減少している。これはダンピングウィグラーと

して機能しているものと考えられる。このことはX線発生用ウィグラーをダンピングウィグラー兼用として積極的に利用し低エミッタンス化を実現できる可能性を示している。今後、より詳細の検討が必要である。6極磁石の配置についてはDBA8セル型I、DBA8セル型IIの比較ではリングの色収差の強さの指標となるクロマチシティが概ね同じ程度 (Table 3 参照) で双方とも Table 1 の条件を満たすオペレーションポイントを見つけることが可能であった。現実的な選択としてはDBA8セルIIが4極磁石の個数が少なく単純でラティス構造上有利と考えられる。

準6セル低 β_y ラティスに関しては4極電磁石を新たに設置するため直線部が2.75mのスペースとなる。この直線部は特に低 β_y を要求される小型の挿入光源に適すると考える。セル数をこれ以上増加させた場合には挿入光源の設置には空間的制約が大きくなると考えられる。

本計算では超伝導ウィグラーを単純な3極ハードエッジモデルで近似した。超伝導ウィグラーは強磁場でかつ磁極数が少ないために3次元的な漏れ磁場の効果が大いと考えられ、ビームへの影響 (特に多極成分によるダイナミックアパーチャの縮小) を検討することが今後のより精度の高い議論を行う上で重要と考えられる。

本計算では垂直方向のダイナミックアパーチャの下限をビームサイズの見地から設定した。より現実的検討としては入射器に依存する入射ビームのサイズを考慮する必要がある。また真空封止型マルチポールウィグラー等ギャップ間隔を非常に小さくできる挿入光源に対しては、さらに電子-残留ガス間ラザフォード散乱によって決まるビーム寿命という見地からの挿入光源個別の仕様に即したダイナミックアパーチャの条件設定が必要と考えられる。

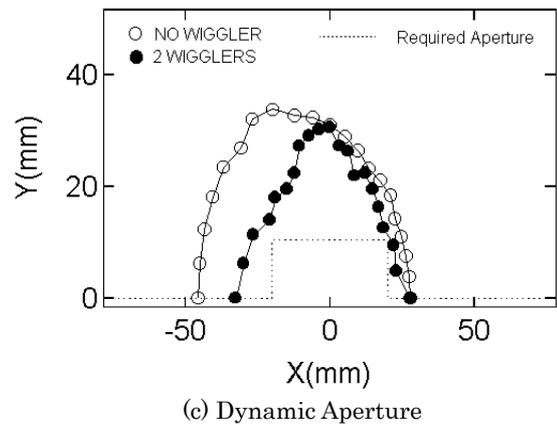
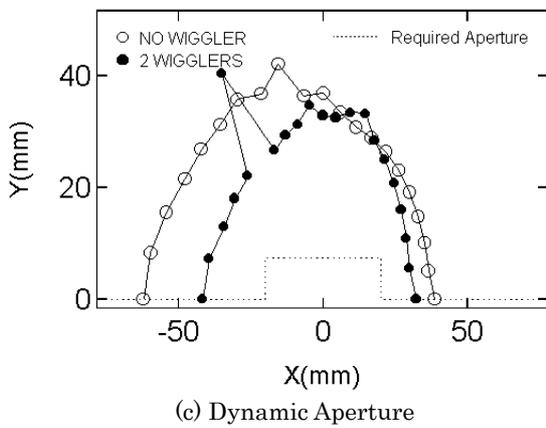
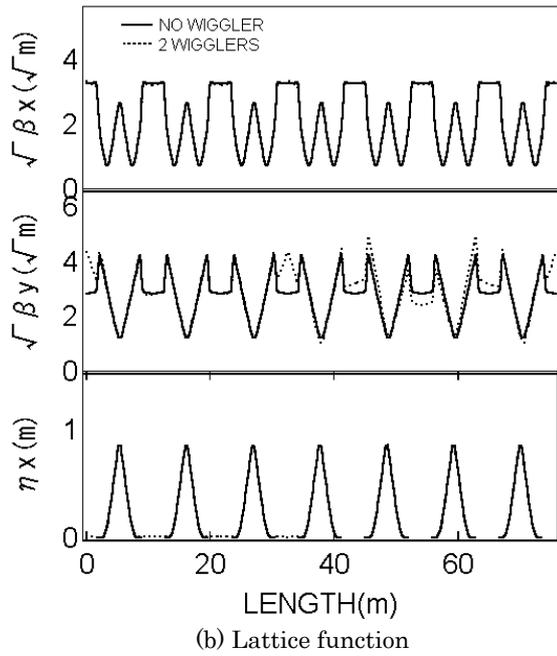
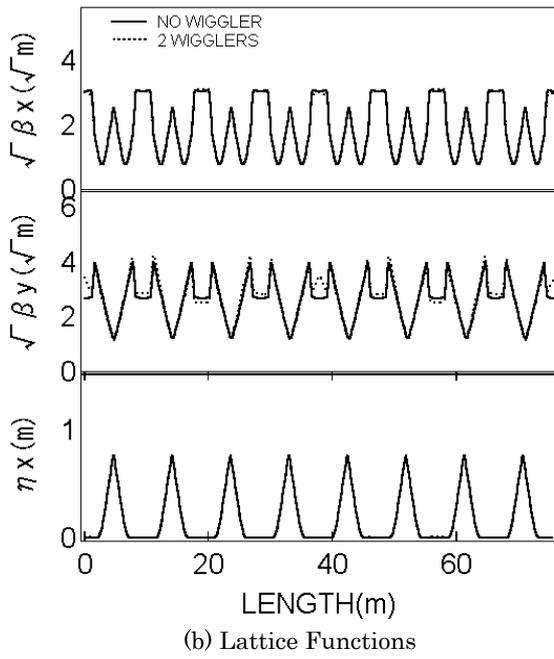
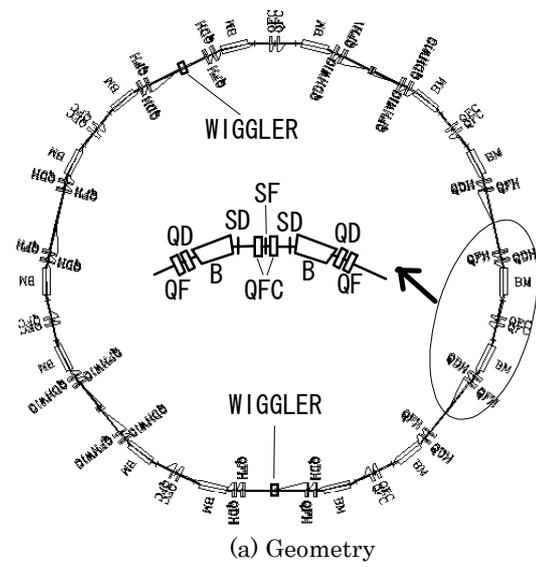
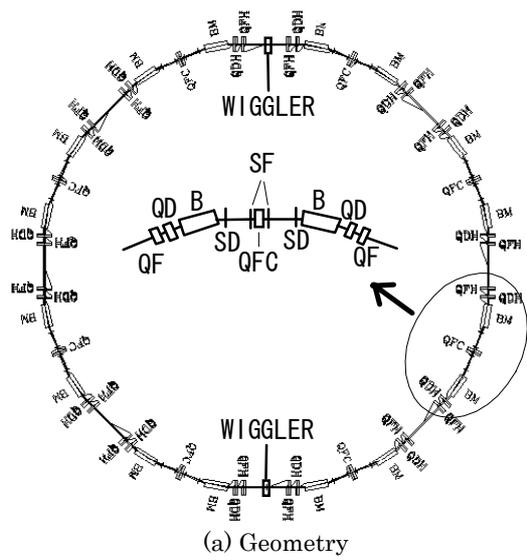


Fig. 3 Calculation results of 8 cells DBA lattice, which is defined as 8Cell II in Table 3.

Fig. 4 Calculation result of 7cells DBA lattice, which is defined as 7Cell in Table 3.

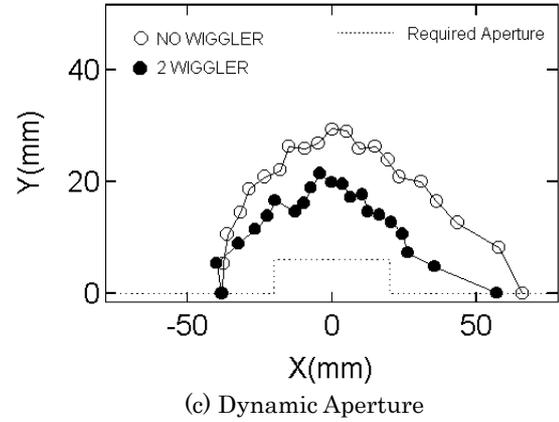
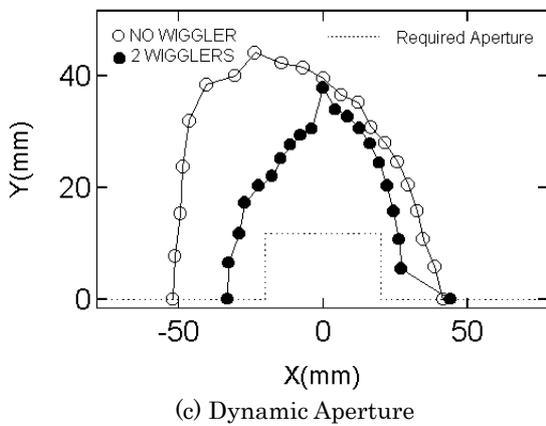
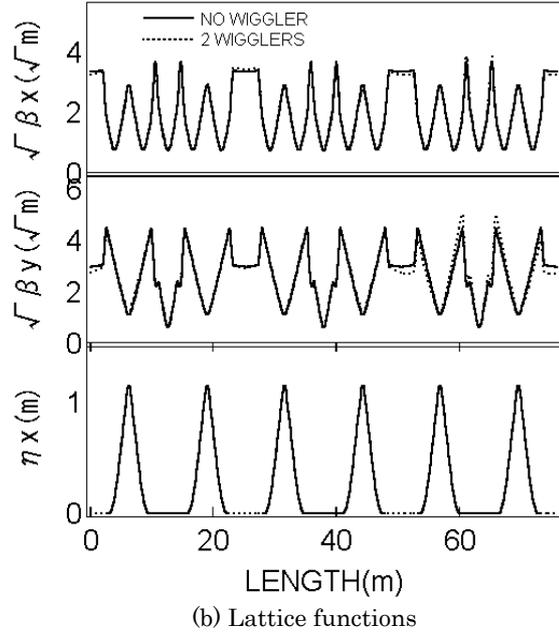
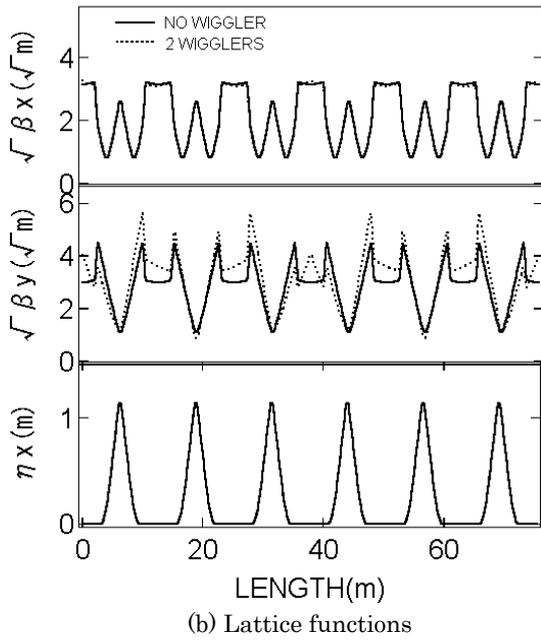
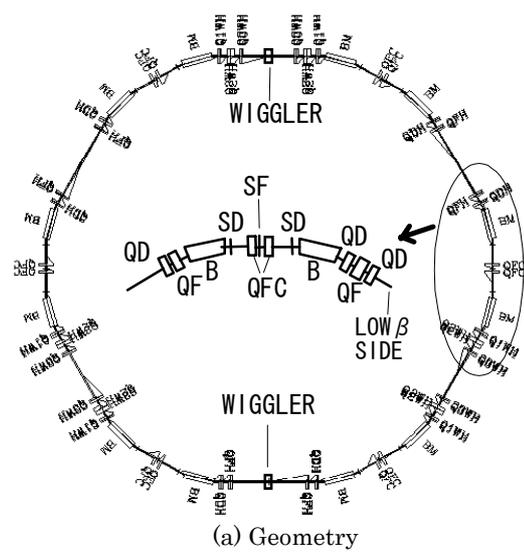
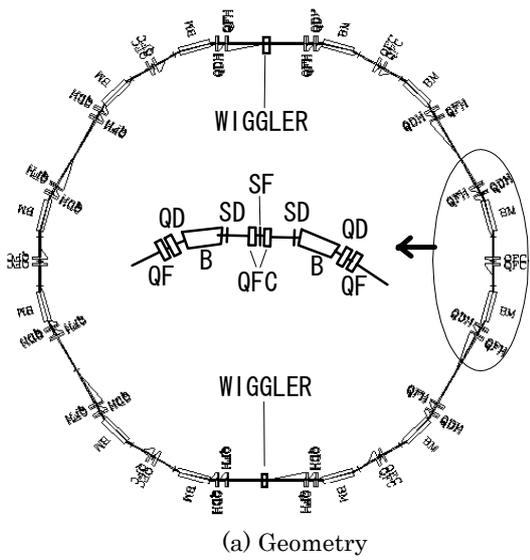
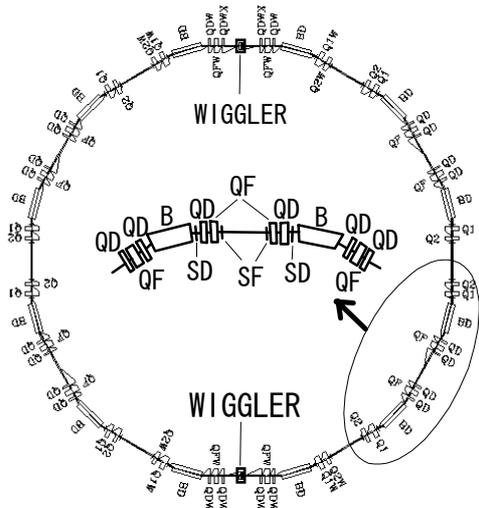
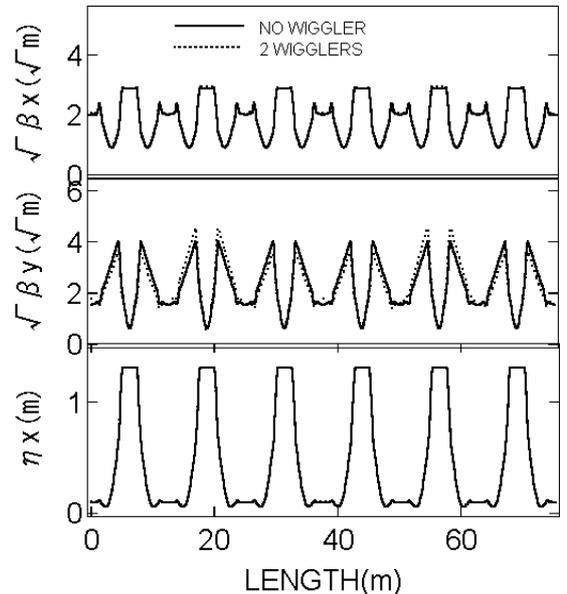


Fig. 5 Calculation result of 6cells DBA lattice, which is defined as 6Cell in Table 3.

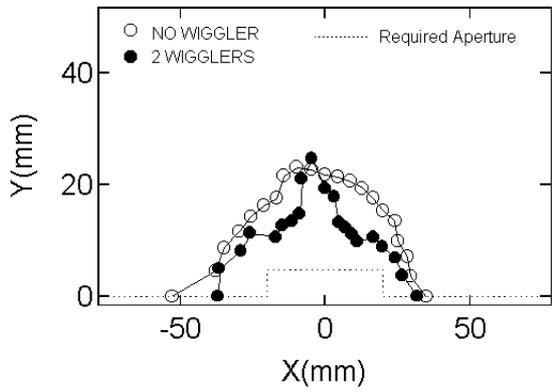
Fig. 6 Calculation result of low β_y lattice, which is defined as 6 CellLow β_y in Table 3.



(a) Geometry



(b) Lattice functions



(c) Dynamic Aperture

Fig. 7 Calculation result of 6 cells EDDBA lattice, which is defined as 6CellEDDBA in Table 3.