

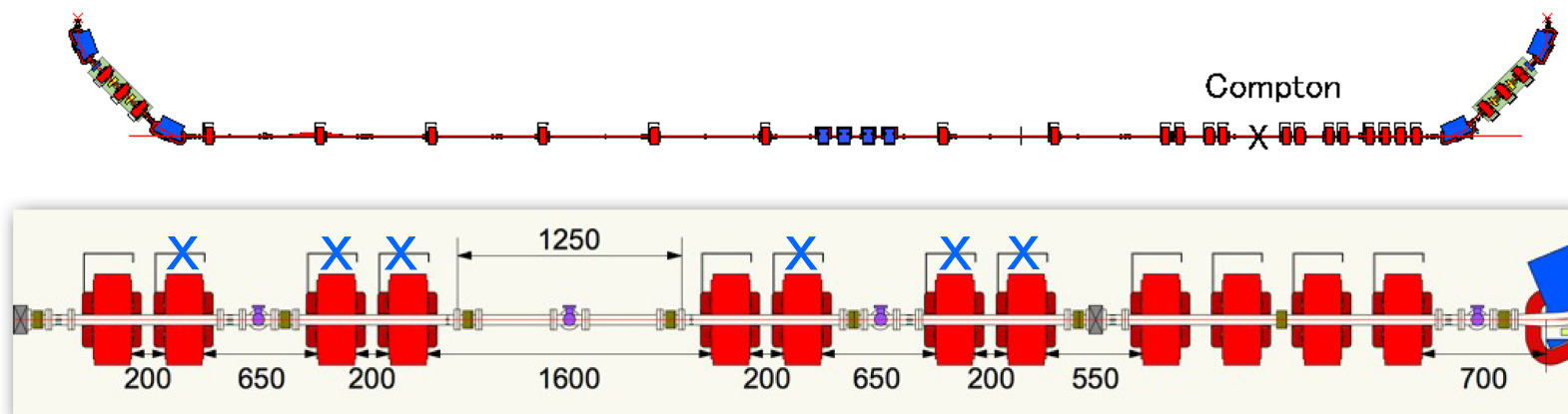
cERL周回部のエミッタンス測定 について

高エネルギー加速器研究機構

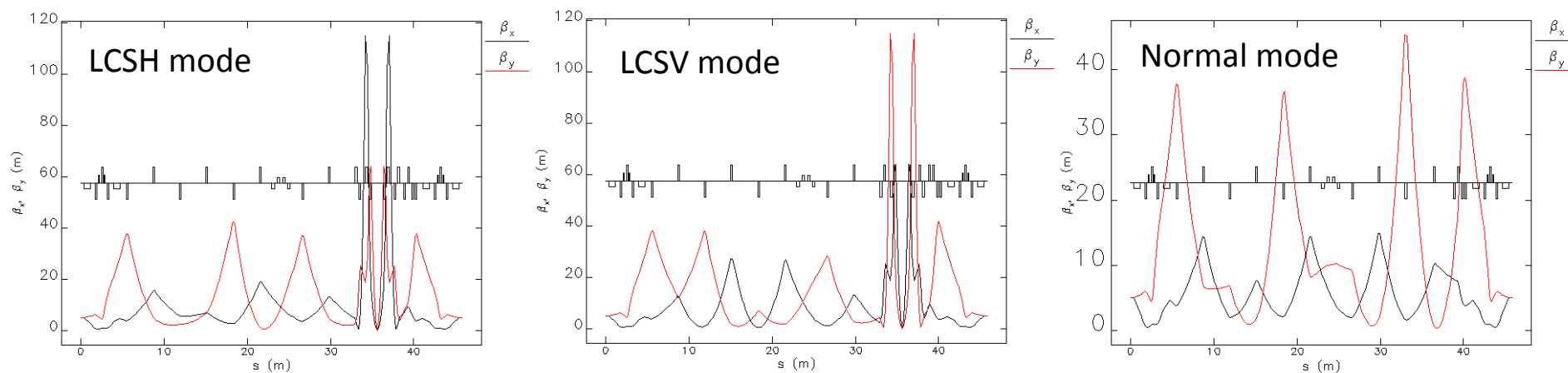
中村 典雄

2012年11月07日 第74回ビームダイナミクスWGミーティング

LCS オプティクスのマッチング



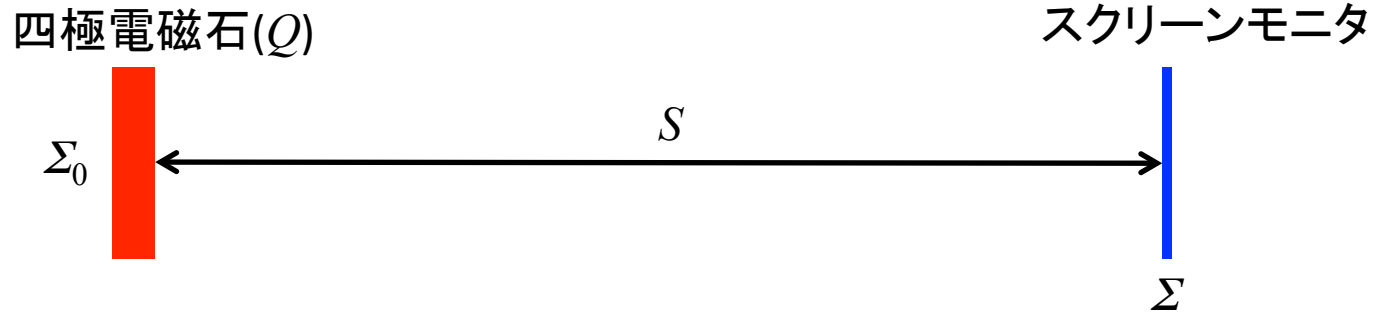
X: 通常運転モードでは使用しない。



島田氏計算

周回部でのエミッタンス測定を検討する必要がある。

Q-Scan法によるエミッタンス測定(1)



ビーム行列(Beam Matrix)

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix} = \varepsilon_x \begin{pmatrix} \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_x & \gamma_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (\text{if } \langle x \rangle = 0)$$

$$\varepsilon_x = \det \Sigma = \Sigma_{11}\Sigma_{22} - \Sigma_{12}\Sigma_{21} = \langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2$$

ビーム行列(Beam Matrix)の転送

$$\Sigma = R\Sigma_0R^T = SQ\Sigma_0Q^T S^T$$

$$R = SQ = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} + kS_{12} & S_{12} \\ S_{21} + kS_{22} & S_{22} \end{pmatrix} \quad \text{thin lens近似}$$

$$\Sigma_{11} = S_{12}^2 \Sigma_{110} k^2 + 2(S_{11}S_{12}\Sigma_{110} + S_{12}^2 \Sigma_{120})k + (S_{11}^2 \Sigma_{110} + 2S_{11}S_{12}\Sigma_{120} + S_{12}^2 \Sigma_{220})$$

Q-Scan法によるエミッタンス測定(2)

ビーム行列の k 依存性

$$\begin{aligned}\Sigma_{11} &= A(k - B)^2 + C \\ &= Ak^2 - 2ABk + (C + AB^2)\end{aligned}$$

$$A = S_{12}^2 \Sigma_{110}, \quad B = -\frac{S_{11}S_{12}\Sigma_{110} + S_{12}^2 \Sigma_{120}}{S_{12}^2 \Sigma_{110}}, \quad C = S_{12}^2 \left(\Sigma_{220} - \frac{\Sigma_{120}^2}{\Sigma_{110}} \right)$$

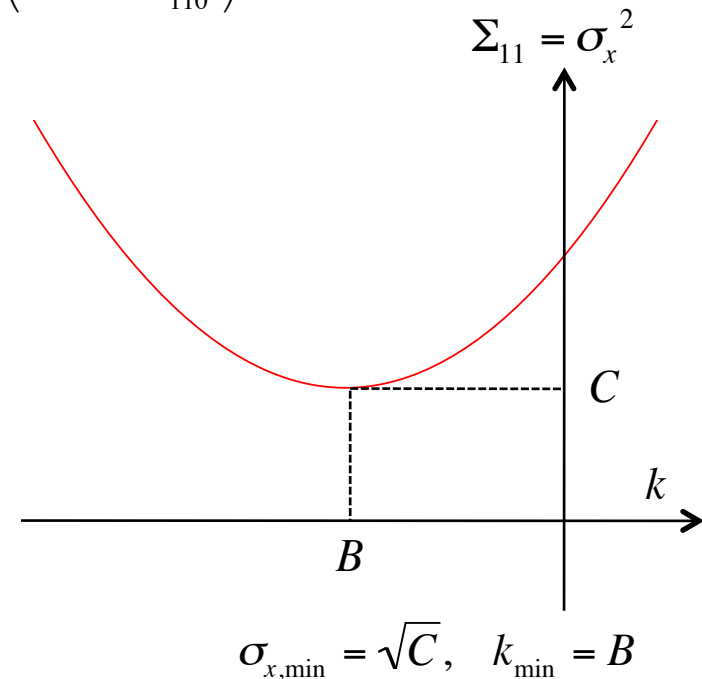
$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{AC}}{S_{12}^2}, \quad \beta_x = \sqrt{\frac{A}{C}}, \quad \alpha_x = \sqrt{\frac{A}{C}} \left(B + \frac{S_{11}}{S_{12}} \right)$$

ドリフトスペースの場合

$$S = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (S_{11} = S_{22} = 1, S_{12} = L, S_{21} = 0)$$

$$A = L^2 \varepsilon_x \beta_{x0}, \quad B = \frac{\alpha_{x0}}{\beta_{x0}} - \frac{1}{L}, \quad C = \frac{L^2 \varepsilon_x}{\beta_{x0}}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{AC}}{L^2}, \quad \beta_x = \sqrt{\frac{A}{C}}, \quad \alpha_x = \sqrt{\frac{A}{C}} \left(B + \frac{1}{L} \right)$$



ビームサイズ2乗の k 依存性データを2次曲線でfitして、エミッタンスを求める。

空間電荷効果の影響

2次元rmsビームエンベロープ方程式

$$\sigma_x' = \frac{\varepsilon_{nx}^2}{\gamma^2 \beta^2 \sigma_x^3} + \frac{I}{\gamma^3 \beta^3 I_0 (\sigma_x + \sigma_y)}$$
$$\sigma_y' = \frac{\varepsilon_{ny}^2}{\gamma^2 \beta^2 \sigma_y^3} + \frac{I}{\gamma^3 \beta^3 I_0 (\sigma_x + \sigma_y)}$$

右辺第1項: 熱エミッタンスの項
右辺第2項: 空間電荷効果の項

σ_x, σ_y : 水平・垂直rmsビームサイズ

I : ピーク電流 $I = Q/\sqrt{2\pi}\sigma_t$

Q : バンチ電荷

σ_t : バンチ長

I_0 : Alfven電流, 17000A

$\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$: 水平・垂直規格化エミッタンス

γ, β : ローレンツ因子, 電子速度/光速度

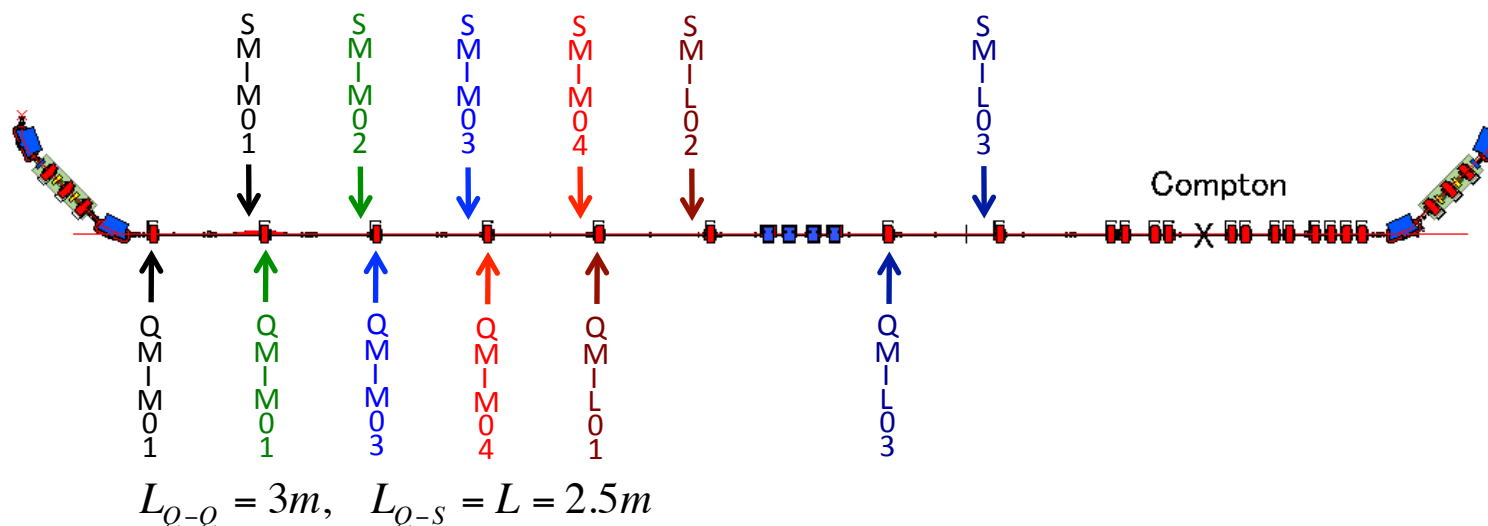
空間電荷効果の影響

エンベロープ方程式の右辺2項の比

$$R_x = \frac{I\sigma_x^3}{I_0(\sigma_x + \sigma_y)\gamma\beta\varepsilon_{nx}^2}$$
$$R_y = \frac{I\sigma_y^3}{I_0(\sigma_x + \sigma_y)\gamma\beta\varepsilon_{ny}^2}$$

Q-Scan法による測定が有効であるためには、 $R_{x,y} \ll 1$ であることが必要である。

cERL周回部でのエミッタンス測定



cERL南直線部

周回部エミッタンス測定の検討

- (1) 単純なQ-scan配置(四極電磁石ースクリーンモニタ間はドリフトスペース)
- (2) 四極電磁石ースクリーンモニタ間のドリフトスペース長 $L=2.5m$ を仮定
- (3) 6つの配置案(SMIM01-04,SMIL01,SMIL03)について比較検討
- (4) モニタの測定可能ビームサイズ $0.1mm$ (YAG Screenを仮定)
- (5) 規格化エミッタンス $1.0 \text{ mm-mrad}/0.3 \text{ mm-mrad}$
- (6) Normal modeのオプティクスを基本とする。

Q-Scanパラメータ_Normal mode(1)

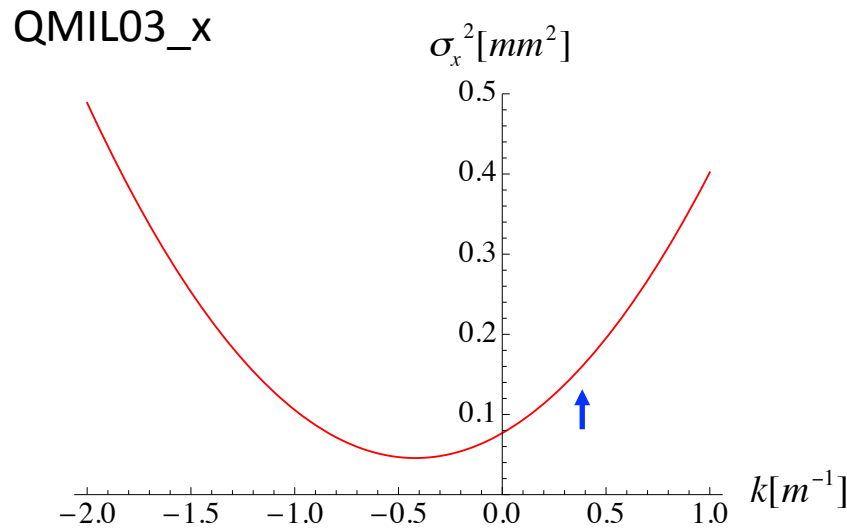
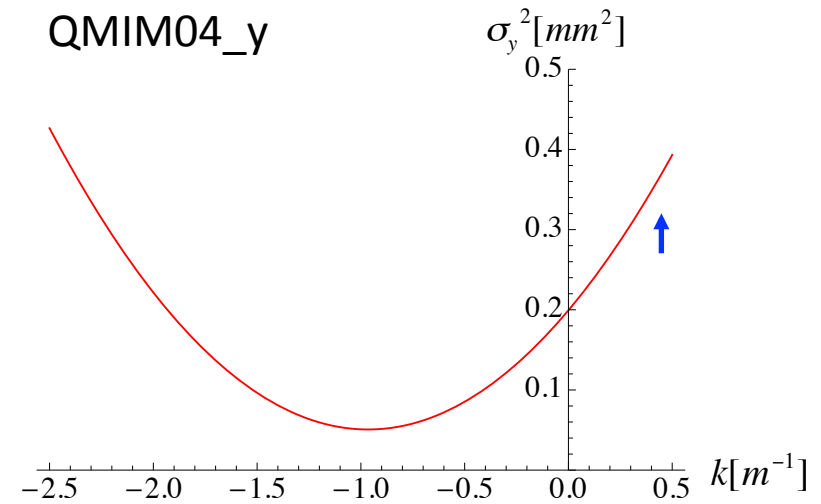
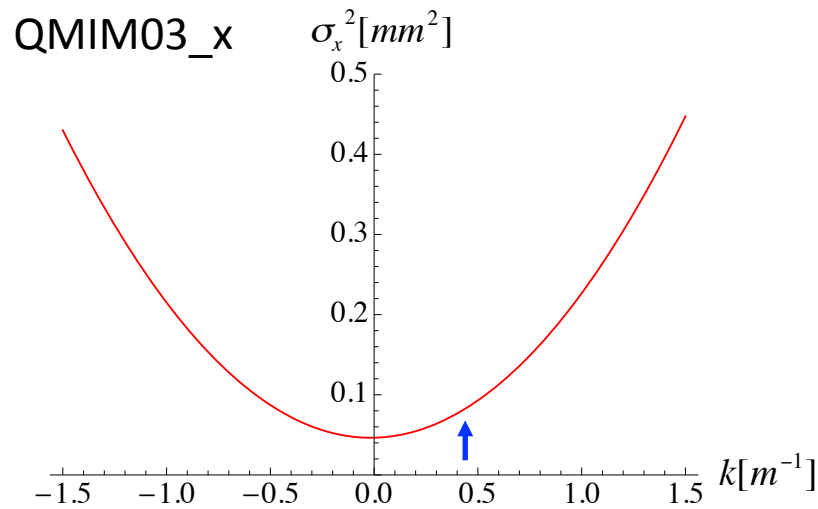
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=1.0\text{ mm-mrad}$

Scanned Q	$A_x[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{x,\min}[\text{um}]$	$\sigma_y[\text{um}]$	R_x
QMIM01	3.31E-07	-0.27781	0.37206	156.32	355.84	0.00281
QMIM02	1.34E-06	-0.57243	-0.39963	77.70	1327.36	0.00120
QMIM03	1.74E-07	-0.01662	0.42744	215.41	215.86	0.0218
QMIM04	7.09E-07	-0.62342	-0.44738	106.77	1055.64	0.00203
QMIL01	1.82E-07	-0.34265	0.42746	210.53	360.59	0.00593
QMIL03	1.77E-07	-0.41844	0.38146	213.69	411.98	0.0134

Scanned Q	$A_y[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{y,\min}[\text{um}]$	$\sigma_x[\text{um}]$	R_y
QMIM01	3.53E-06	-0.58045	-0.37206	47.89	2180.79	0.000252
QMIM02	5.92E-07	0.03508	0.39963	116.90	128.76	0.00279
QMIM03	6.24E-07	-0.44431	-0.42744	113.87	711.03	0.00477
QMIM04	1.60E-07	-0.96519	0.44738	225.18	803.20	0.00947
QMIL01	3.41E-06	-0.65038	-0.42746	48.68	2403.59	0.000287
QMIL03	8.27E-07	-0.38203	-0.38146	98.87	702.03	0.00252

Q-Scanプロット_Normal mode(1)

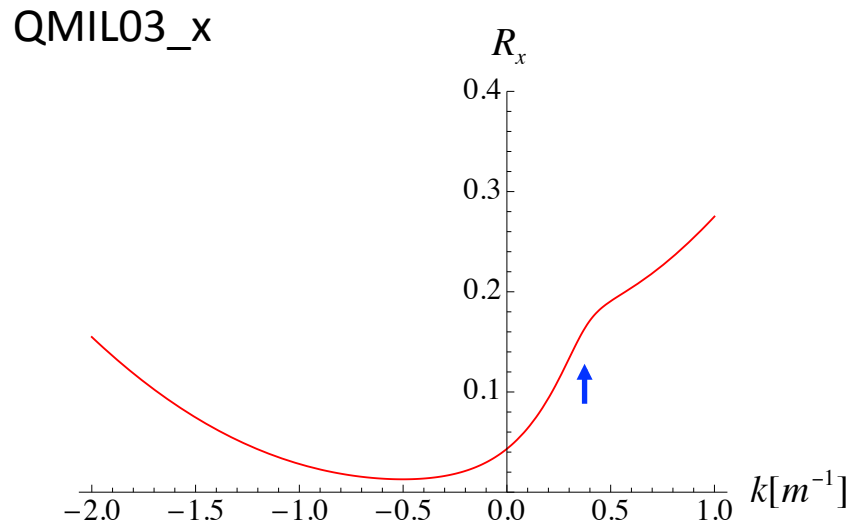
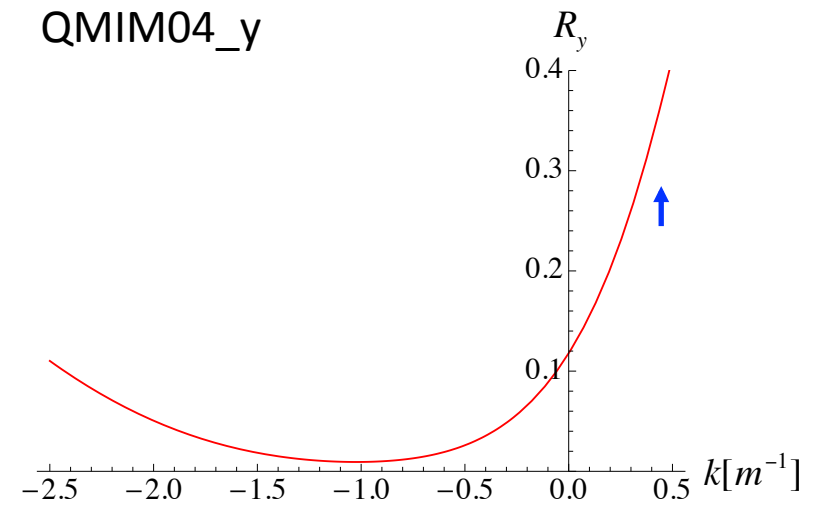
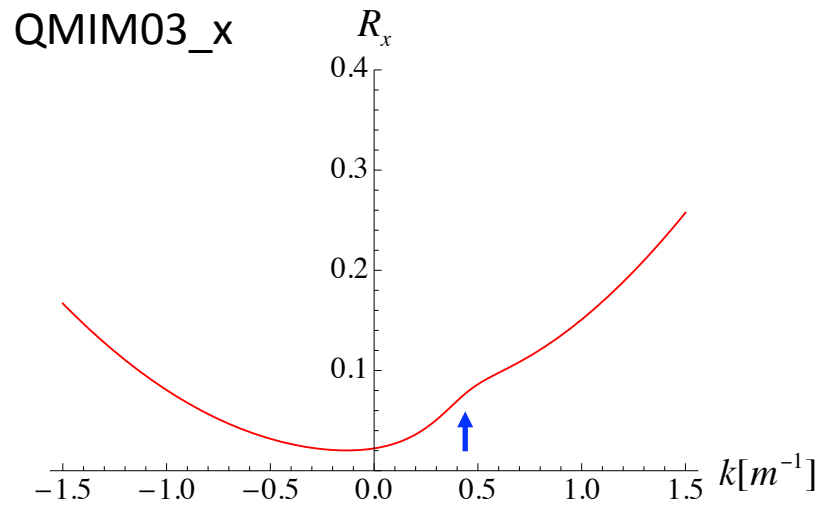
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=1.0\text{ mm-mrad}$



青矢印はNormal modeでの k 値
($k < 0 \rightarrow$ 収束)

$R_{x,y}$ - k 依存性_Normal mode (1)

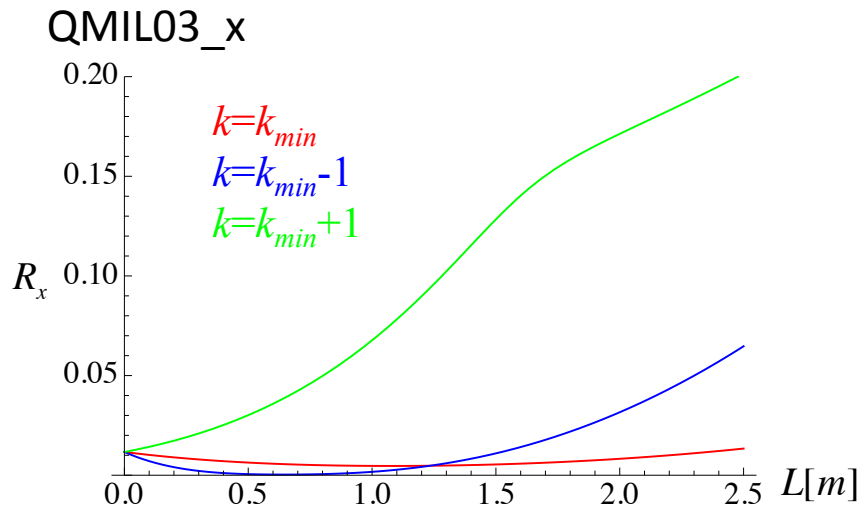
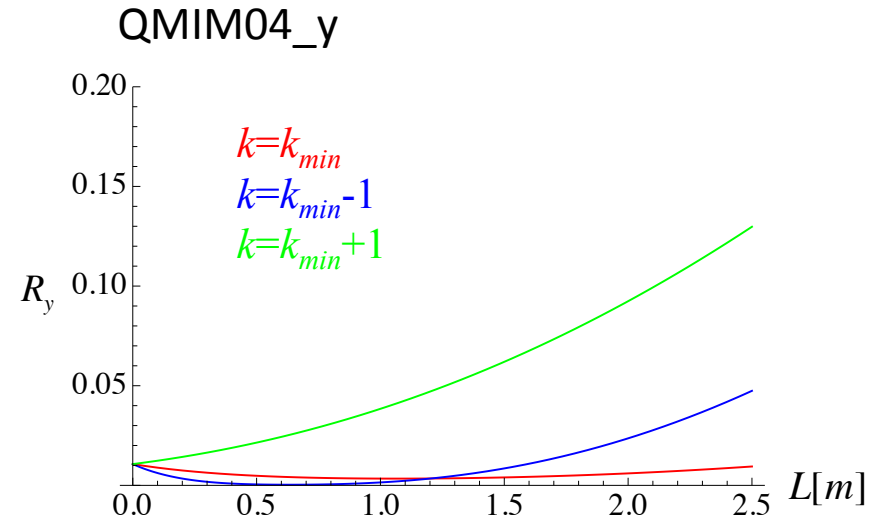
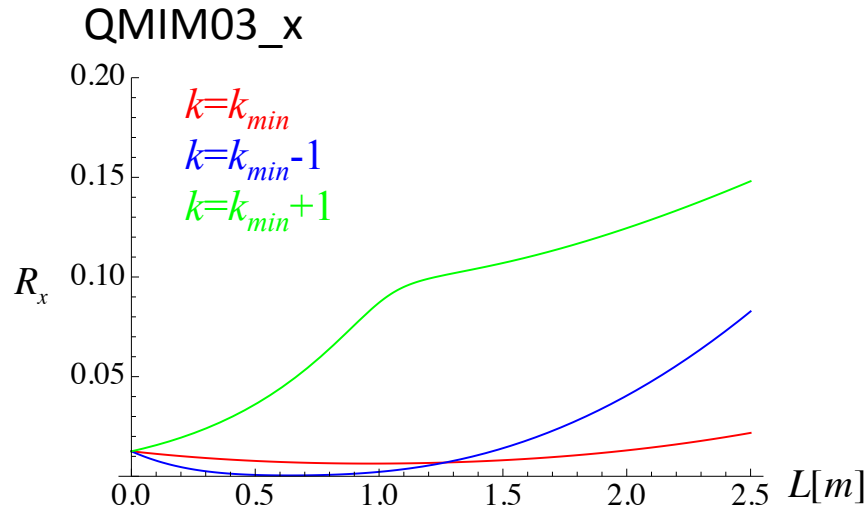
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=1.0$ mm-mrad



青矢印はNormal modeでの k 値
($k < 0 \rightarrow$ 収束)

$R_{x,y}$ -L依存性_Normal mode(1)

Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=1.0$ mm-mrad



Q-Scanパラメータ_Normal mode(2)

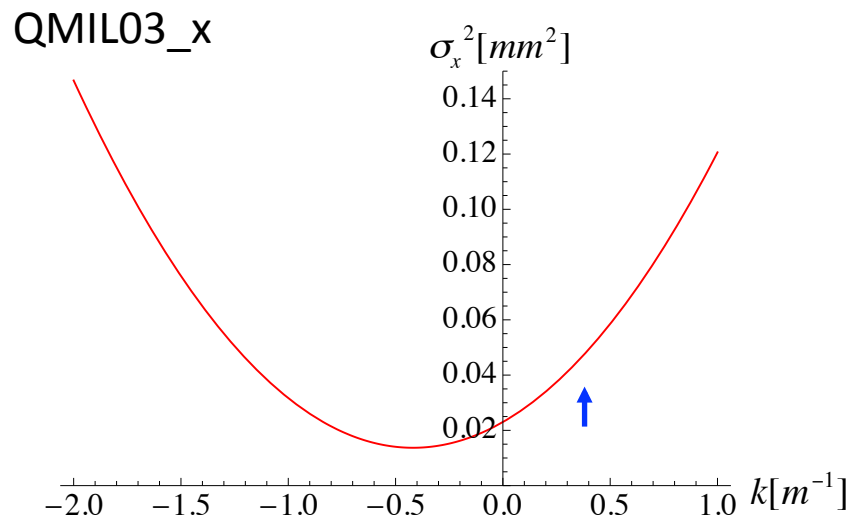
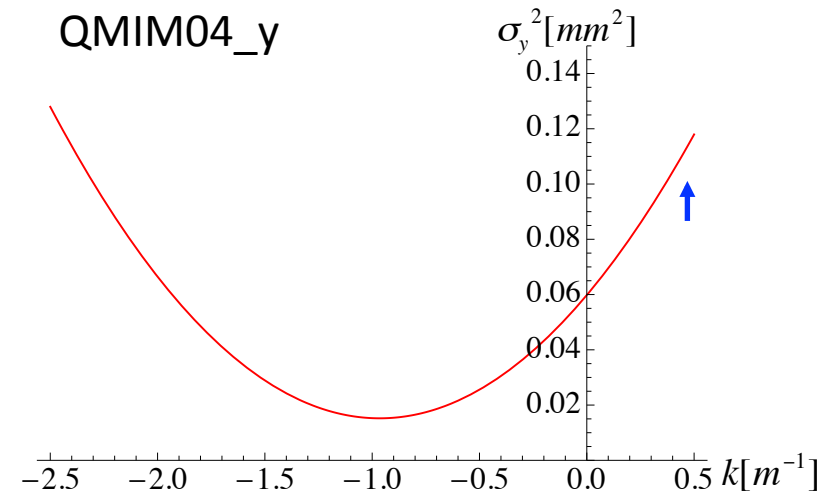
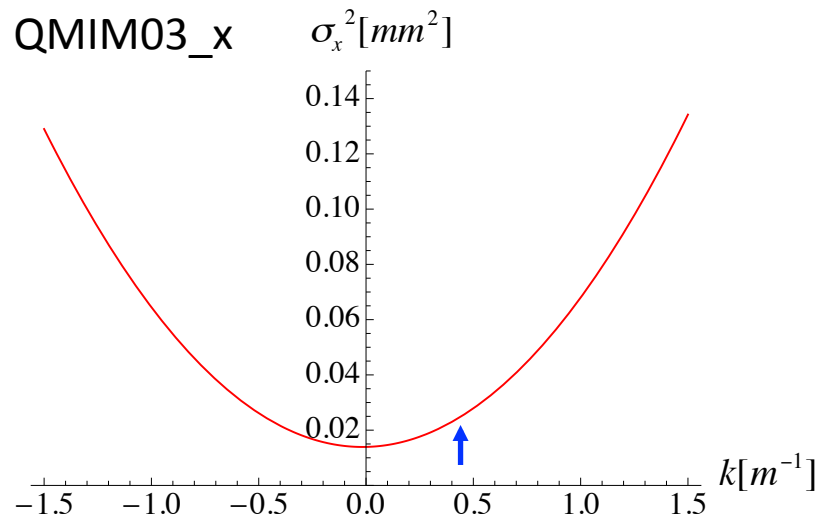
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3\text{ mm-mrad}$

Scanned Q	$A_x[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{x,\min}[\text{um}]$	$\sigma_y[\text{um}]$	R_x
QMIM01	9.93E-08	-0.27781	0.37206	85.62	194.90	0.00936
QMIM02	4.02E-07	-0.57243	-0.39963	42.56	727.03	0.00401
QMIM03	5.23E-08	-0.01662	0.42744	117.99	118.23	0.0726
QMIM04	2.13E-07	-0.62349	-0.44738	58.48	578.20	0.00676
QMIL01	5.47E-08	-0.34265	0.42746	115.31	197.50	0.0198
QMIL03	5.31E-08	-0.41844	0.38146	117.04	225.65	0.0446

Scanned Q	$A_y[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{y,\min}[\text{um}]$	$\sigma_x[\text{um}]$	R_y
QMIM01	1.06E-06	-0.58045	-0.37206	26.23	1194.47	0.000841
QMIM02	1.78E-07	0.03508	0.39963	64.03	70.52	0.00931
QMIM03	1.87E-07	-0.44431	-0.42744	62.37	389.45	0.0159
QMIM04	4.79E-08	-0.96519	0.44738	123.34	439.93	0.0316
QMIL01	1.02E-06	-0.65038	-0.42746	26.66	1316.50	0.000957
QMIL03	2.48E-07	-0.38203	-0.38146	54.15	384.52	0.00841

Q-Scanプロット_Normal mode (2)

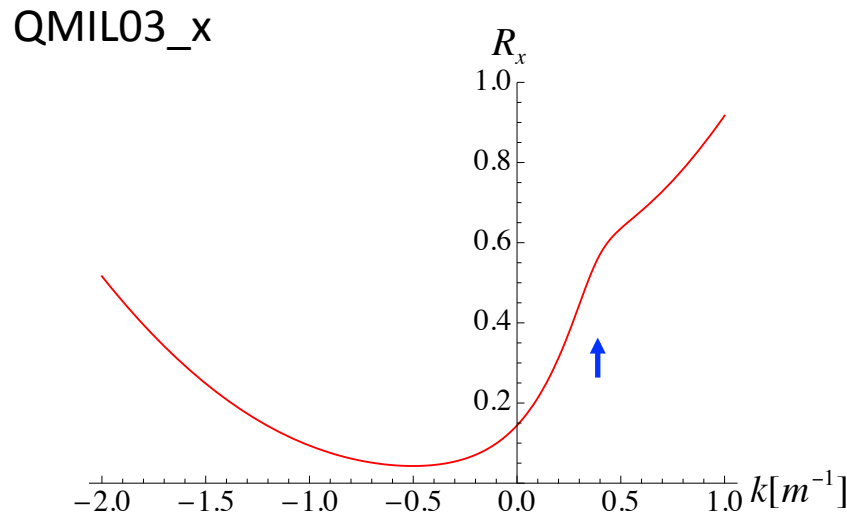
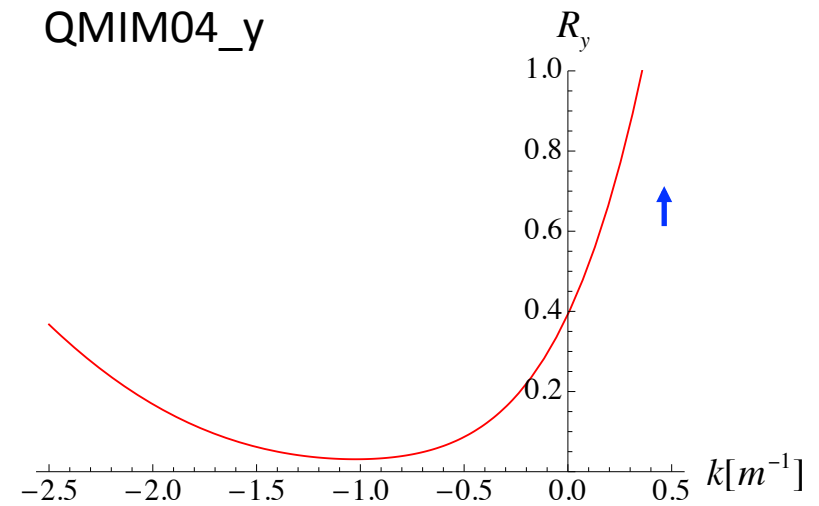
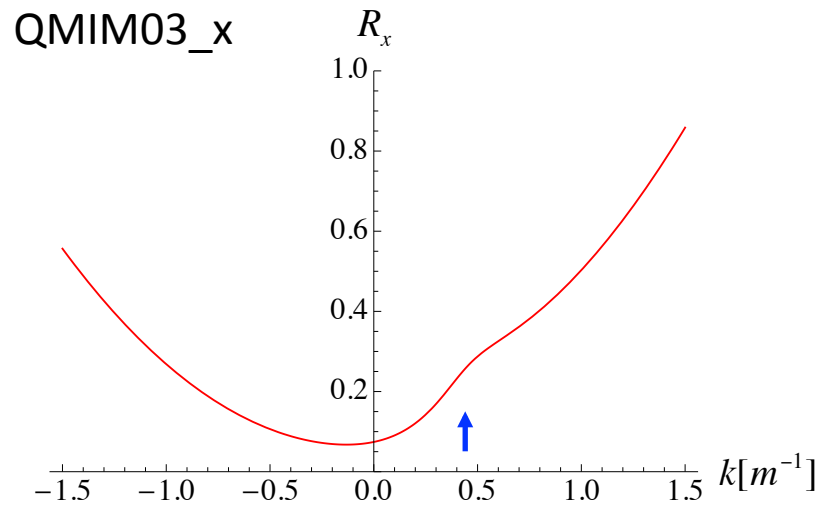
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3\text{ mm-mrad}$



青矢印はNormal modeでの k 値
($k < 0 \rightarrow$ 収束)

$R_{x,y}$ - k 依存性_Normal mode (2)

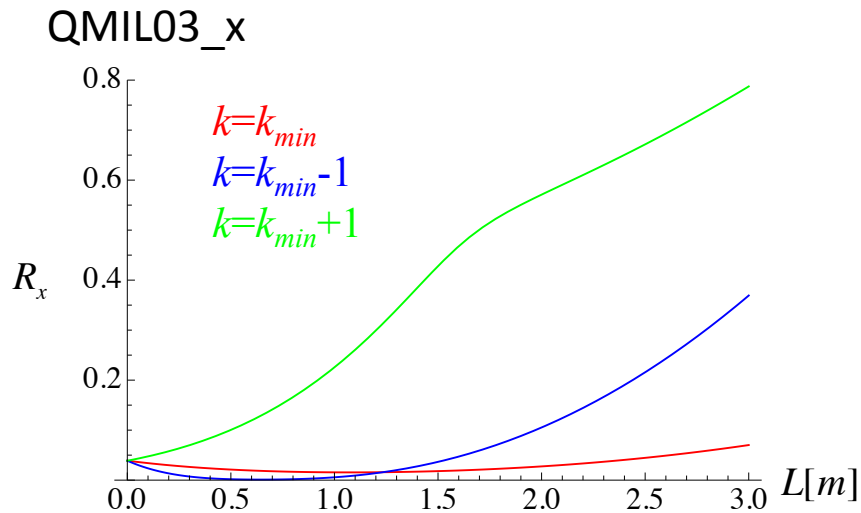
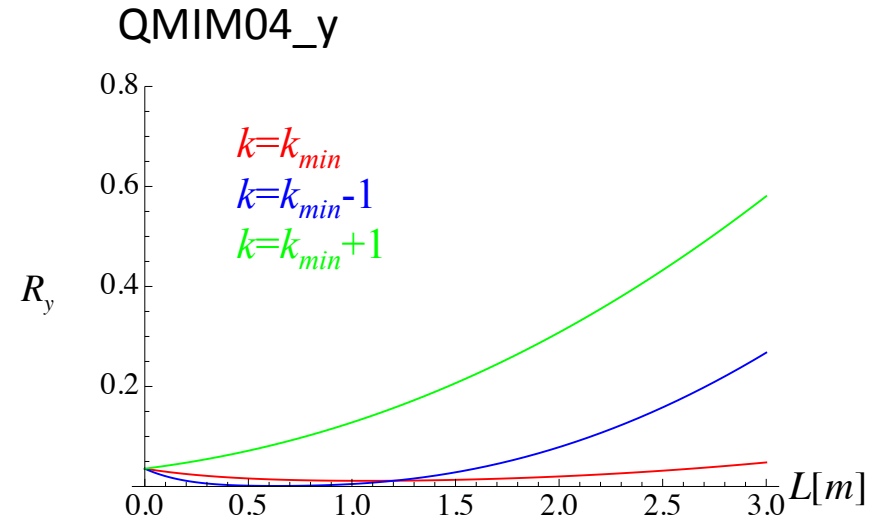
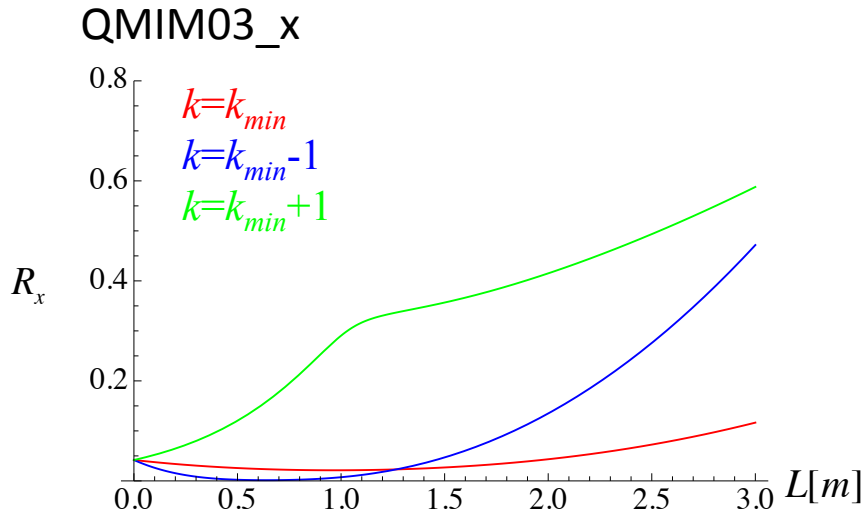
Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3$ mm-mrad



青矢印はNormal modeでの k 値
($k < 0 \rightarrow$ 収束)

$R_{x,y}$ -L依存性_Normal mode (2)

Normal mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3\text{ mm-mrad}$



Q-Scan/パラメータ_LCSH mode (1)

LCS mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=1.0\text{ mm-mrad}$

Scanned Q	$A_x[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{x,\min}[\text{um}]$	$\sigma_y[\text{um}]$	R_x
QMIM01	3.31E-07	-0.27781	0.39346	156.32	355.84	0.00281
QMIM02	1.43E-06	-0.57579	-0.31874	75.33	1377.00	0.00149
QMIM03	4.95E-07	-0.21405	0.17178	127.89	327.08	0.00217
QMIM04	6.21E-07	-0.47420	-0.26422	114.11	756.12	0.00200
QMIL01	2.32E-07	-0.37899	0.46922	186.56	410.28	0.00398
QMIL03	3.00E-07	-0.22888	0.40413	164.28	299.65	0.00342

Scanned Q	$A_y[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{y,\min}[\text{um}]$	$\sigma_x[\text{um}]$	R_y
QMIM01	3.53E-06	-0.58045	-0.39346	47.88	2180.79	0.000252
QMIM02	4.19E-07	0.16883	0.31874	139.01	258.94	0.00554
QMIM03	2.86E-07	-1.86489	-0.17178	168.09	2002.67	0.00378
QMIM04	6.19E-07	-0.59834	0.26422	114.30	948.50	0.00201
QMIL01	3.96E-06	-0.59114	-0.46922	45.17	2354.26	0.000218
QMIL03	3.46E-06	-0.58919	-0.40413	48.35	2192.44	0.000280

Q-Scanパラメータ_LCSH mode (2)

LCS mode, $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_t=2\text{ps}$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3\text{ mm-mrad}$

Scanned Q	$A_x[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{x,\min}[\text{um}]$	$\sigma_y[\text{um}]$	R_x
QMIM01	9.93E-08	-0.27781	0.39346	85.62	194.90	0.00936
QMIM02	4.27E-07	-0.57579	-0.31874	41.26	754.21	0.00496
QMIM03	1.48E-07	-0.21405	0.17178	70.05	179.15	0.00724
QMIM04	1.86E-07	-0.47420	-0.26422	62.50	414.14	0.00667
QMIL01	6.97E-08	-0.37899	0.46923	102.18	224.72	0.0133
QMIL03	8.99E-08	-0.22888	0.40413	89.98	164.13	0.0114

Scanned Q	$A_y[\text{m}^4]$	$k_{\min} [\text{m}^{-1}]$	$k_{\text{ini}}[\text{m}^{-1}]$	$\sigma_{y,\min}[\text{um}]$	$\sigma_x[\text{um}]$	R_y
QMIM01	1.06E-06	-0.58045	-0.39346	26.23	1194.47	0.000841
QMIM02	1.26E-07	0.16883	0.31874	76.14	141.83	0.0185
QMIM03	8.59E-08	-1.86489	-0.17178	92.07	1096.91	0.0126
QMIM04	1.86E-07	-0.59834	0.26422	62.61	519.51	0.00669
QMIL01	1.19E-06	-0.59114	-0.46923	24.74	1289.48	0.000728
QMIL03	1.04E-06	-0.58919	-0.40413	26.48	1200.85	0.000932

Q-Scan/パラメータ_LCSV mode (1)

LCSV mode (x,y交換), Q=7.7pC, $\sigma_t=2ps$, $\epsilon_{nx}=\epsilon_{ny}=1.0$ mm-mrad

Scanned Q	$A_x[m^4]$	$k_{min}[m^{-1}]$	$k_{ini}[m^{-1}]$	$\sigma_{x,min}[um]$	$\sigma_y[um]$	R_x
QMIM01	3.31E-07	-0.27781	0.32969	156.32	355.84	0.00281
QMIM02	1.18E-06	-0.56556	-0.50941	82.82	1231.15	0.000918
QMIM03	7.66E-08	-1.06442	0.40653	325.05	672.76	0.0133
QMIM04	2.59E-06	-0.67159	-0.58571	55.87	2163.03	0.000764
QMIL01	3.44E-08	0.00978	0.62309	484.90	484.90	0.135
QMIL03	9.09E-08	-0.32340	0.35031	298.38	356.42	0.0208

Scanned Q	$A_y[m^4]$	$k_{min}[m^{-1}]$	$k_{ini}[m^{-1}]$	$\sigma_{y,min}[um]$	$\sigma_x[um]$	R_y
QMIM01	3.52E-06	-0.58045	-0.32969	47.89	2180.79	0.000252
QMIM02	1.03E-06	-0.14056	0.50941	88.66	298.64	0.00105
QMIM03	3.52E-06	-0.54546	-0.40653	47.94	2047.09	0.000239
QMIM04	1.40E-07	0.71628	0.58571	240.34	587.48	0.0545
QMIL01	6.51E-07	-0.75696	-0.62309	111.50	1226.20	0.00293
QMIL03	2.60E-06	-0.52132	-0.35031	55.75	1682.76	0.000503

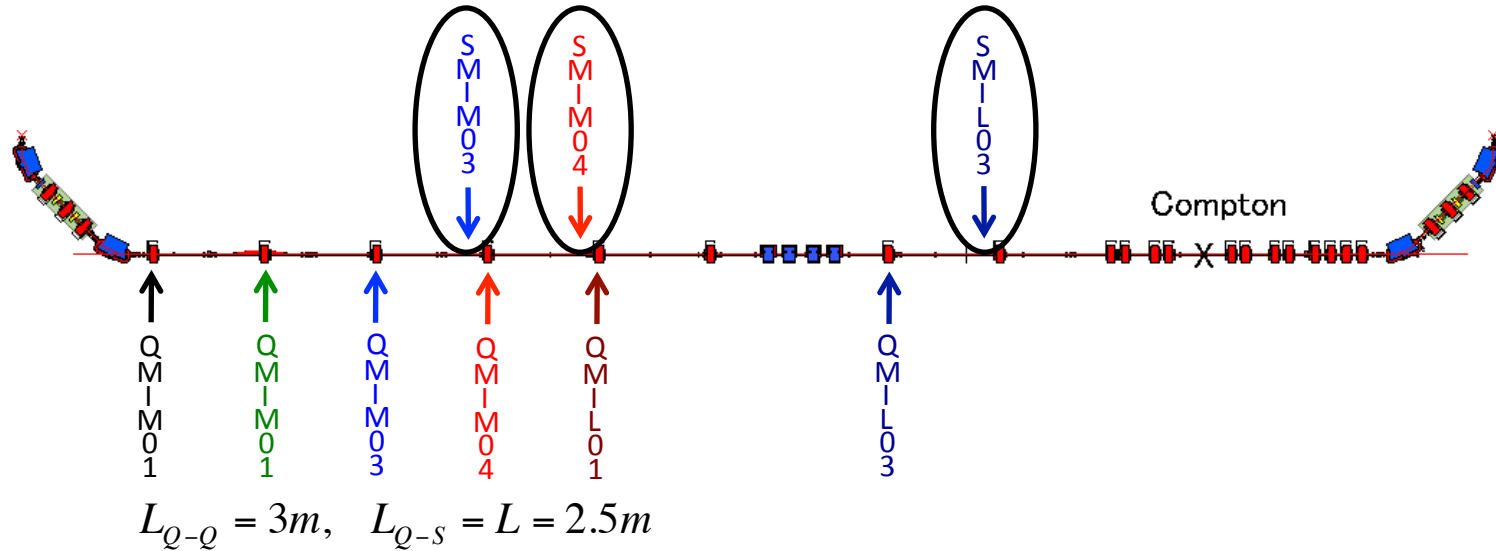
Q-Scan/パラメータ_LCSV mode (2)

LCS mode (x,y交換), Q=7.7pC, $\sigma_t=2ps$, $\varepsilon_{nx}=\varepsilon_{ny}=0.3$ mm-mrad

Scanned Q	$A_x[m^4]$	$k_{min}[m^{-1}]$	$k_{ini}[m^{-1}]$	$\sigma_{x,min}[um]$	$\sigma_y[um]$	R_x
QMIM01	9.93E-08	-0.27781	0.32969	85.62	194.90	0.00936
QMIM02	3.54E-07	-0.56556	-0.50941	45.36	674.33	0.00306
QMIM03	2.30E-08	-1.06442	0.40653	179.04	368.48	0.0445
QMIM04	7.77E-07	-0.67159	-0.58571	30.60	1184.74	0.00255
QMIL01	1.03E-08	0.00978	0.62309	265.59	265.60	0.450
QMIL03	2.73E-08	-0.32340	0.35031	163.43	195.22	0.0693

Scanned Q	$A_y[m^4]$	$k_{min}[m^{-1}]$	$k_{ini}[m^{-1}]$	$\sigma_{y,min}[um]$	$\sigma_x[um]$	R_y
QMIM01	1.06E-06	-0.58045	-0.32969	26.23	1194.47	0.000841
QMIM02	3.09E-07	-0.14056	0.50941	48.56	163.33	0.00351
QMIM03	1.06E-06	-0.54546	-0.40653	26.25	1121.23	0.000797
QMIM04	4.20E-08	0.71628	0.58571	131.64	321.78	0.182
QMIL01	1.95E-06	-0.75696	-0.62309	61.07	671.62	0.00957
QMIL03	7.81E-07	-0.32340	-0.35031	30.54	921.69	0.00168

cERL周回部でのモニタ配置案



cERL南直線部

cERL周回部エミッタンス測定用スクリーンモニタ配置案

- (1) 周長補正シケイン前に2台 (x,y各方向の測定)
- (2) 周長補正シケイン後に1台 (x方向のシケインの影響をチェック)
- (3) Normal modeが基本であるが、LCS modeでも測定可能

まとめと課題

- 南側直線部のラティス & オプティクスをもとにQ-Scan法によるエミッタンス測定の可能性を調べた。
- エネルギー35.5MeV, バンチ電荷7.7pC, 規格化エミッタンス1.0(0.3) mm-mrad, バンチ長2psに対してビームサイズが0.1mm以上になるモニタ設置場所を選ぶことができた。このパラメータでは空間電荷効果の影響は限定的であった。
- さらに低エミッタンス、大電流、大バンチ電荷、短バンチ(バンチ圧縮)におけるエミッタンス測定方法について検討する必要がある。