

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600141

研究課題名(和文) 陰極近傍の鏡像効果による電子ビームのエミッタンス減少メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of physical mechanism in self-reduction of electron beam emittance due to mirror image effect in vicinity of cathode

研究代表者

増田 開 (Masuda, Kai)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：80303907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：「一旦増加した電子ビームのエミッタンスが、外力によらず、極低エミッタンスまで減少することがある。」本研究は、研究代表者らによるこの発見を端緒としている。本研究では、電子ビーム放出面である陰極の極近傍における非線形電界によって、電子の位相空間分布が自己線形化するメカニズムを明らかにした。また、数値シミュレーションによる定量的な評価から、この新奇な現象を利用することで、従来の常識を覆すような極低エミッタンスを実現できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：“Electron beam emittance may reduce without introducing any external force.” This discovery by ourselves has motivated this study. As the result of this study we have made it clear that phase space distribution of an electron beam is linearized by its self-induced nonlinear fields in the very vicinity of the electrode where the electrons are emitted. The numerical results indicated that this novel phenomenon, when utilized appropriately with the new knowledge, can lead to an extremely low emittance beam generation.

研究分野：荷電粒子ビーム物理

キーワード：電子銃 エミッタンス 空間電荷効果 鏡像効果 陰極 自己線形化 電子軌道解析 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

先端科学技術分野における革新的ツールの代表である高輝度量子放射光源の更なる高度化のためには電子ビームの低エミッタンス化が不可欠である。特に電子エネルギーが低く空間電荷効果の最も顕著な電子銃の性能向上が極めて重要であり、その設計ツール、あるいは、実験と理論との橋渡し役を担うシミュレーションへの要求はより高度になっている。

(1) 陰極近傍での鏡像効果によるエミッタンス減少現象の発見

研究代表者はこのような要求に応えるため、シミュレーションコードの開発を進めると共に、陰極の鏡像効果によるエミッタンス増加のメカニズム解明に取り組んできた。その中で、研究代表者の開発した数値シミュレーションコード KUAD2 による数値解析において、図1のように、陰極から放出された電子ビームが加速される過程で、エミッタンスが陰極から僅か 1 mm で極大値を迎え (図1中 A 点) その後減少して極小を取る (B 点) ことを見出した。

その後、このようなエミッタンスの増減挙動は、B 点の極小値が異なるものの、他のシミュレーションコードでも再現された。図1のように印加電界強度やビーム電流密度の条件によってエミッタンス発展の様子が大きく変化することも判明した。

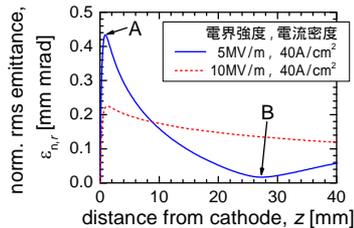


図1 陰極から一様電界で加速された電子ビームのエミッタンス発展

(2) 鏡像効果とエミッタンスについての従来の理解

エミッタンスの定義と物理的意味

エミッタンス ϵ_r は、ビーム中心軸からの径方向距離 r と径方向運動量 p_r とのなす位相平面においてビームを囲む楕円の面積として定義され、 r に線形な力 F_r が働いた場合には変化しない。ゼロエミッタンスの理想的なビームは、線形な力を加えることによって、平行ビームとすることや、空間電荷効果で決まる最小値にまで集束することができる。

非線形な力 F_r がビームに加わるとエミッタンス ϵ_r は変化する。したがって、非線形な力を加えることでエミッタンスを減少させることも原理的に可能ではあるが、加える力の非線形性をビームの位相平面分布の非線形性に合わせる必要があるため、容易ではなく、一般には行われない。したがって、エミッタンスはビームに加わった非線形力の蓄積のようなものとも言え、増加させることは

容易だが、一旦増加させてしまうと、それを元に戻すことは困難であると一般に認識されている。

エミッタンスと空間電荷効果の関係

ビーム中の電子密度分布が一様な場合、境界の存在しない自由空間においては、空間電荷効果による発散力 F_r は位置 r に対して線形となり、エミッタンスは変化しない。逆に、一様ではないビームの空間電荷力は非線形でありエミッタンスを変化させる。また、一様なビームであっても、境界が存在する場合、例えばビーム発生面である陰極の近傍では空間電荷力は非線形となり (鏡像効果) エミッタンスが増加する。

従来の研究動向

従来、鏡像効果を相対的に小さくするための電子銃の高電界化の開発や、鏡像効果の働かない領域に到達した時点でのビームの密度分布を “water bag” と呼ばれる一様分布にすることで、その後のエミッタンス増加を抑制しようとする研究などは行われてきた。しかしながら、本研究のように鏡像効果によるエミッタンス増加自体を理解して制御しようとする研究は行われていなかった。

その理由は、鏡像効果の解析的な記述が極めて困難であることと、数値的に解く場合には、互いに因果関係を有する電子の位相空間分布と電子に働く非線形空間電荷力の計算に極めて高い精度が要求されることにある。このため、研究開始当初の時点では、鏡像効果によるエミッタンス増加は、存在は知られ、定性的には理解されているものの、不可避なものとしてしか認識されていなかった。

2. 研究の目的

図1の数値解析結果において、一旦増加したエミッタンスが減少に転じること自体も驚きではあったが、従来の常識に反するとも言える最も驚くべき点は、鏡像効果により働いた非線形力の影響がほぼ完全に打ち消され、陰極表面での初期のエミッタンス (図1に示した数値シミュレーションではゼロ。現実の電子銃では熱エミッタンス) に戻ることがあるという点である。この現象を理解して利用することができれば、常識を覆すような極低エミッタンスを実現できる可能性があると考え、本研究を計画するに至った。

本研究は、最終的には、従来の常識を覆すような極低エミッタンスの電子ビーム生成の実現により、先進量子放射光源の飛躍的な進歩に資することを目差すものである。そのため、本補助金事業においては、以下を目的とした。

- ・ エミッタンス極小値と極小点の陰極からの距離の、電流密度や電界強度への依存性を明らかにする。
- ・ その依存性を支配しているメカニズムを明らかにする。

- ・この現象を利用した極低エミッタンスの電子ビーム生成法を提案する。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションコード間の比較

図1の数値解析結果にみられたようなエミッタンス増減の傾向は他の複数のコードでも再現されていたものの、その極小値が 0.1 mm mrad を下回るような極低エミッタンスとなることは KUAD2 コード以外では再現されていなかった。一般に、シミュレーション結果による特に定量的な議論には、異なる解析手法に基づく複数のコードで同じ結果が得られることが、その説得性を高めるために極めて重要で不可欠である。

そこで、KUAD2 コードによる結果で初めて見られた極低エミッタンスの可能性を他のコードを用いて検証すると共に、鏡像効果の数値解析に適した解析手法や必要な計算精度を明らかにすることを目的として、複数コード間の比較を行った。

具体的には、汎用コードのうち、予備検討の結果有望と考えられた GPT コード[1]を導入した。加えて、JASRI/Spring-8 の水野明彦氏の協力を得て、同士の開発したコード[2]も比較対象とした。KUAD2 を含む 3 つのコードは、相対論的運動方程式と Maxwell 方程式を軸対称 2 次元において自己無撞着に解いていることは共通しているが、自己電磁場（空間電荷効果）の解析手法が以下のようにそれぞれ異なる。

- KUAD2：有限要素法
- GPT：Point-to-Point 法
- 水野氏コード：Bulk-to-Point 法[2]

(2) エミッタンス変化のパラメータ依存性の調査

研究開始当初の背景の中で述べた通り、前出図1のようなエミッタンス発展の様子が、電子銃への印加電圧や陰極からの放出電子電流により変化することが分かっていた。このことを利用して、例えば極低エミッタンスとなる位置を後段加速管の位置に合わせるなどすることができれば、加速後のエミッタンスを劇的に向上させることができる。

そこで、図1のようなエミッタンス増減過程におけるエミッタンス極小値と、極小となる位置について、印加電界強度と初期ビーム電流密度への依存性を明らかにすることを目的として、数値解析を行った。

解析には研究代表者の開発した KUAD2 コードを用い、前出図1の場合と同様に、陰極面から放出された電子ビームが一様電界によって軸方向に加速される過程を計算し、印加電界強度と初期ビーム電流密度を変化させてエミッタンス増減過程の変化を調べた。加えて、オングストローム波長領域でのレーザー発振に成功した SACL A の試験加速器であった SCSS の電子銃[3] を対象として、同様のシミュレーションを行った。

(3) エミッタンス変化のパラメータ依存性のメカニズムの考察

前述(2)のパラメータサーベイで明らかにした依存性から特徴的なビーム生成条件を抽出して、それらの条件下での位相空間分布、及び、それに起因する電磁界分布の非線形性の変化の様子を調べ、依存性を支配しているメカニズムを考察した。

(4) 共通して用いた計算条件

本研究で対象とする新奇な現象を議論するために、以下の計算条件を共通して用いた。

- ・電子の初期エネルギーはゼロ（したがって、熱エミッタンスはゼロ）
- ・直流連続ビーム（定常）
- ・ビーム放出面はビーム軸に垂直な円形平面
- ・ビーム放出面において電流密度は一様

前述(2)の SCSS 電子銃[3]を対象とした計算においては、軸対称 2 次元の有限要素解析により同電子銃の電極形状を考慮した。これ以外の計算においては、現象の理解・議論を容易にするために、加速軸方向成分のみを持つ一様電界を外部からの印加加速電界とした。

いずれの計算結果においてもエミッタンスとしては、次式で定義される規格化 RMS 径方向エミッタンスを用いた。

$$\varepsilon_r = \sqrt{\langle r^2 \rangle \langle (\gamma \beta r')^2 \rangle - \langle r \gamma \beta r' \rangle^2}$$

ここに $r' = dr/dz$ で、 r は粒子の径方向位置、 z は放出面からの加速軸方向距離、 γ は粒子のローレンツ因子、 β は光速で規格化した粒子速度、 $\langle \rangle$ は全粒子に亘る総和を表す。

4. 研究成果

(1) シミュレーションコード間の比較

一様加速電界中のエミッタンス発展を異なるコード間で比較した。

図2に GPT と KUAD2 との比較を、図3にそれぞれのコードで計算されたエミッタンス極小値の粒子数依存性を示す。GPT においては、計算精度の向上に伴って、KUAD2 で見られていたようなエミッタンスが減少する現象が現出した（図2）。図3において、GPT の計算結果で特に顕著に、粒子数の増加（計算精度の向上）に伴って、エミッタンス極小値が減少している。計算精度向上に伴い KUAD2 の計算結果に近づいていったが、本研究の計算機環境においては図2に示した計算精度が限界であった。

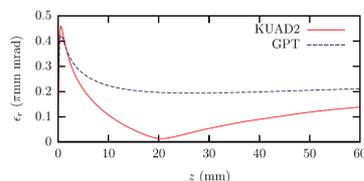


図2 GPT と KUAD2 の計算結果の比較 [4]

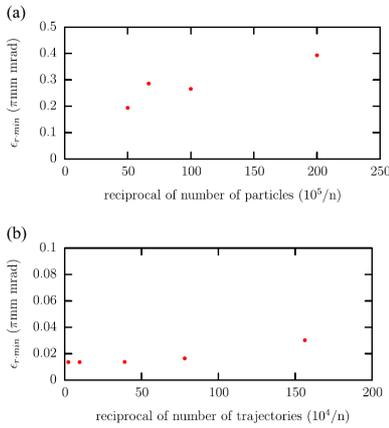


図3 (a) GPT と(b) KUAD2 の計算結果の計算に用いた粒子数に対する依存性 [4]

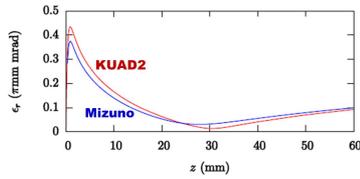


図4 KUAD2 と水野氏のコード[2]の計算結果の比較

次に、図4にKUAD2と水野氏のコード[2]との比較を示す。同氏の開発した新たな解析手法[2]により、KUAD2の計算結果をよく再現できていることが分かる。

(2) エミッタンス減少(径方向位相平面分布の自己線形化)のメカニズム

本研究の結果判明したエミッタンス減少のメカニズムを、図5に示したエミッタンス発展の場合を例に説明する。図5中に示した点①～④における電流密度 J と径方向電界 E_r の径方向分布や、径方向位相平面($r-r^2$ 平面)分布の変化の様子を図6に示す。

点①、すなわち電子放出面上において、電子の速度はゼロであるためエミッタンスはゼロである。 $r-r^2$ 平面上では、 $r^2=0$ 軸上に直線状に分布している。放出される電子ビームの電流密度 J は一樣である。点①においてはもちろん $E_r=0$ であるが、陰極から少しでも離れると(点②) J は径方向に一樣(図6左上段)である一方、 $E_r=0$ はゼロではなくなり、しかも、陰極の近傍では鏡像効果によりその E_r は r に非線形(図6左中段)となる。この非線形力によって $r-r^2$ 平面分布は下に凸な非線形な分布となり(図6左下段)点③に至るまでエミッタンスが増大する(図6右下段)。

このような陰極近傍での非線形力、すなわち $r-E_r$ の非線形性は、同時に、 J の径方向分布を非一樣化する(図6右上段)。このような分布形状の電子ビームの作る自己電界 E_r は、一樣ビームの場合とは異なり非線形となる。この $r-E_r$ の非線形性が下に凸(図6右中段)であるため、上に凸であった $r-r^2$ 平面分布を線形に戻す働きをする。このような位相平面分布の自己線形化により、エミッタ

スは点③で減少する。その後、点④で極小値を取って増加に転じる(図6右下段)。

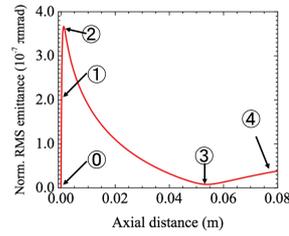


図5 エミッタンス発展の例(KUAD2コードによる計算)

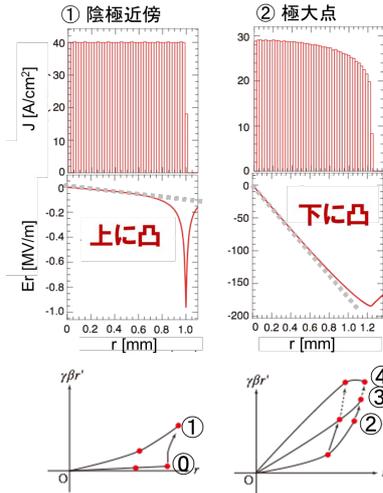


図6 図5中の点①および点②における電流密度の径方向分布(上段)、点①と点②における径方向電界の径方向分布(中断)、及び点①～④における位相平面分布の推移の模式図(下段)

(3) エミッタンス変化のパラメータ依存性 — 一樣加速電界の場合

印加加速電界 E_0 を1.0–10 MV/mの範囲で、放出電流密度 J_0 を10–100 A/cm²の範囲でそれぞれ変化させて計算を行った。いくつかの計算結果例を図7に示す。

図7に見られるように、 E_0 と J_0 によってエミッタンス発展は大きく変化する。エミッタンス極大位置は、陰極近傍の凡そ $z=1$ mmで大きく変わらない一方、極小位置は大きく変化する。もう一つ判明した重要な点は、極小位置は変わるもののその極小値は、空間電荷制限となる場合を除き、今回のパラメータ範囲ではいずれも0.1 mm mradを下回るような極低エミッタンスとなった。

SCSS 電子銃の場合

SCSS 電子銃の場合にも、一樣加速電界の場合と同様の傾向が見られた。

図8に見られる通り、ビーム電流と印加電圧を同電子銃の典型的な運転条件(1A, 500kV)から20%変化させると、それぞれ10cm程度ずつエミッタンス極小位置を変化させる効果があることが分かる。

また、例えば図8における右端の位置($z=$

90 cm)でのエミッタンスの変化に着目すれば、従来知られていなかったこのエミッタンス増減現象が、運転条件によるエミッタンス変化に与える影響が無視できない大きな影響であることが分かる。

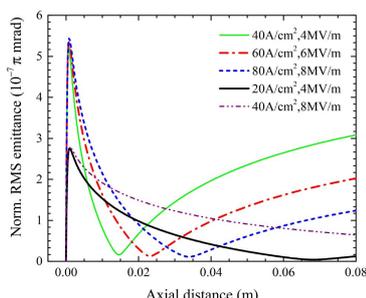


図7 一様加速電界中のエミッタンス発展のパラメータによる変化[5]

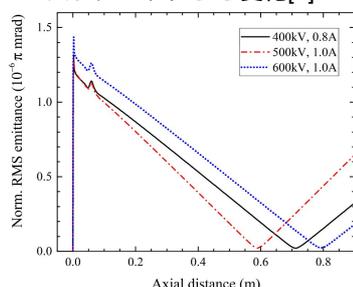


図8 SCSS 電子銃中のエミッタンス発展のパラメータによる変化[5]

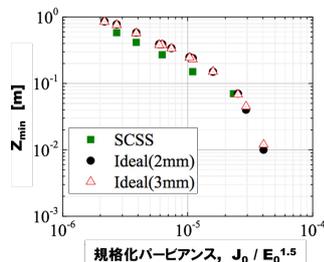


図9 エミッタンス極小位置 Z_{\min} の規格化パービアンسに対する依存性。緑四角はSCSS 電子銃の場合、黒丸は一様電界で放出面直径 2mm の場合、赤三角は同 3mm の場合。

エミッタンス極小位置のパラメータ依存性

エミッタンス極小位置 Z_{\min} を、一様電界の場合(放出面直径 2mmφ と 3mmφ の 2通り)と SCSS 電子銃の場合(放出面直径 3mmφ)の両方について、図 9 に示す。横軸は、陰極(放出面)上の印加加速電界 E_0 と初期電流密度 J_0 とで定義される規格化パービアンス $P = J_0 / E_0^{1.5}$ としている。

図 9 に見られるように、今回の 3 通りの電極形状の場合については、エミッタンス極小位置 Z_{\min} が規格化パービアンス $P = J_0 / E_0^{1.5}$ で統一的に記述できることが分かった。

一様電界の場合とは異なり SCSS 電子銃の場合には、印加加速電界 E は z に対して変化しており、電子銃内での平均電界 E_{ave} は E_0 の凡そ 1/2 である。規格化パービアンス P を

E_{ave} ではなく E_0 を用いて定義する方が $P - Z_{\min}$ において一様電界の場合との一致が良いことは、前述(2)で説明した本現象のメカニズムから理解できる。

(4) エミッタンス極小位置のパラメータによる変化のメカニズム

前項(3)に見られたようにエミッタンス極小位置が電子銃パラメータで変化する理由は、図 10 に抽出した 2 例を比較することで理解できる。この 2 例(図中#1 と #2)は、エミッタンス極大位置まではほぼ同じエミッタンス発展を見せているが、その後の自己線形化の速さが異なっている。

図 10 右図は、エミッタンス極大位置における径方向電流密度分布($r-J$ 分布)である。比較のために r 、 J ともそれぞれの最大値で規格化している。図に見られる通り、#1 の方が $r-J$ の非線形性が僅かに強い。つまり自己線形化の非線形力が大きいため #1 の方が自己線形化が速く進むことが、#1 の方が陰極に近い位置でエミッタンス極小点を迎える原因である。

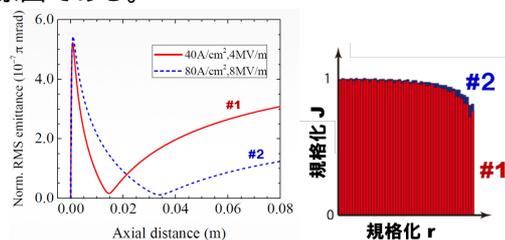


図10一様加速電界中のエミッタンス発展と、エミッタンス極大位置における径方向電流密度分布

#1 の方が $r - J$ の非線形性が強くなる理由は、#1 の方がパービアンスが高いため #2 よりもビーム径の広がりが速いことから容易に理解できる。

なお、図 11 に示した点は、陰極から僅か 1mm 程度の極近傍であり、したがってビーム径の広がりも極僅かである。これらのことから、この現象の数値解析に極めて高い精度が要求されることが理解できるだろう。

(5) まとめ

KUAD2 コードの計算結果に見られた新奇なエミッタンス増減挙動は、定式化・離散化とも全く異なるコードでも再現することができたことから、解析手法や離散化誤差などに起因するのではなく、共通の Maxwell 方程式と相対論的運動方程式とで記述される物理現象であると考えて良いであろう。また、従来知られていなかったこの新奇な現象が、電子銃設計や後段加速管の位置を含む電子入射器設計に小さからぬインパクトを与えることは、本稿に示した通り明らかである。

一旦増加したエミッタンスが減少するメカニズムは、本研究により明らかにすることができた。

陰極の極近傍での鏡像効果を含む非線形な空間電荷力が、位相平面分布の急激な非線形化と、その後の緩やかな自己線形化の両方の原因となっている。後者には、前者の結果としてもたらされた電流密度分布の非一様性が重要な役割を担っている。

一方で、最も不思議な点、すなわち、一旦曲がった位相平面分布が曲げ戻る（自己線形化する）のは理解できるとして、何故、殆ど直線（すなわちゼロエミッタンス）とも言えるような極近近くまで上手く曲げ戻るのかは、依然として明らかではない。曲げ戻したときに何故「S字状」になってしまわないのか？この点において本現象は依然として「不思議な現象」である。

実用的な観点では、エミッタンスが極小となる位置を電子銃パラメータで変化させることができる点が、その極小値が常識を覆すような極低エミッタンスである点と合わせて、重要である。

後段加速管の位置に調整することを考える場合、エミッタンス極小位置を陰極面から数 m 程度とする必要がある。そのためには、現実的な印加電界強度の範囲では、陰極面状の放出電流密度を $10\text{A}/\text{cm}^2$ 以下に抑える必要があることも分かった。ビーム電流を確保しつつ極低エミッタンスを実現するためには、やや口径の大きい陰極を利用した電子銃設計・加速器設計が必要となるであろう。あるいは、本稿では紹介することができなかったが、初期電流密度分布に適切な非一様性を与えることで、更にエミッタンス極小位置を更に遠方に調整できることも分かってきており、この効果の利用も検討に値する。

いずれにしても、本現象の理解に基づく電子銃と入射器設計により、従来の達成値を遙かに下回る低エミッタンスの可能性が十分にあると考えている。そのための次の重要なステップは、この「不思議な現象」の実験による観測であろう。

出典・参考文献：

- [1] Pulsar Physics, (<http://www.pulsar.nl/gpt>).
- [2] A. Mizuno, *Physical Review Accelerators and Beams* **19** (2016) 024201.
- [3] K. Togawa et al., *Physical Review Accelerators and Beams* **10**, (2007) 020703.
- [4] A. Mizuno et al., *Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. A* **774** (2014) 51-59.
- [5] 野儀 武志他, 第12回日本加速器学会年会プロシーディングス (2015) 39-42.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

野儀 武志、増田 開、山下 大樹、守田 健一、Konstantin Torgasin、桂山 翼、村田 智哉、Sikharin Suphakul、全 炳俊、紀井 俊輝、長崎 百伸、大垣 英明、「陰極近傍に

おける鏡像効果による電子ビームエミッタンス増減現象の電子銃パラメータ依存性」, 第12回日本加速器学会年会プロシーディングス (2015) 39-42. (査読無し)

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEOL/WEOL05.pdf

Akihiko Mizuno, Kai Masuda and Masashi Yamamoto, "Reduction of Transverse Emittance in Electron Injectors Caused by Space Charge Effects", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **774** (2014) 51-59. (査読有り)

DOI: 10.1016/j.mina.2014.11.068

〔学会発表〕(計4件)

増田 開、野儀 武志、山下 大樹、水野 明彦、山本 昌志、「陰極近傍での空間電荷効果による電子ビームの径方向位相平面分布の自己線形化」, 日本原子力学会 2015年秋の大会、静岡大学静岡キャンパス(静岡県静岡市)、2015年9月9日~11日。

Takeshi Nogi, Tsubasa Katsurayama, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Kenichi Morita, Tomoya Murata, Kazunobu Nagasaki, Hideaki Ohgaki, Sikharin Suphakul, Konstantin Torgasin, Hiroki Yamashita and Heishun Zen, "Image Charge Effect on Emittance Reduction Phenomenon in Electron Gun", *37th International Free Electron Laser Conference*, Daejeon, KOREA, August 23-28, 2015.

野儀 武志、増田 開、山下 大樹、守田 健一、Konstantin Torgasin、桂山 翼、村田 智哉、Sikharin Suphakul、全 炳俊、紀井 俊輝、長崎 百伸、大垣 英明、「陰極近傍における鏡像効果による電子ビームエミッタンス増減現象の電子銃パラメータ依存性」, 第12回日本加速器学会年会、プラザ 萬象・あいあいプラザ(福井県敦賀市)、2015年8月5~7日。

野儀 武志、増田 開、山下 大樹、村田 智哉、犬飼 元晴、梅村 勇輔、Sikharin Suphakul、吉田 恭平、Konstantin Torgasin、全 炳俊、紀井 俊輝、長崎 百伸、大垣 英明、「陰極近傍における鏡像効果によるエミッタンス増減現象の電子銃パラメータ依存性」, 第12回高輝度高周波電子銃研究会、早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区)、2015年1月20~21日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 開 (MASUDA, Kai)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：80303907

(2) 研究協力者

野儀 武志 (NOGI, Takeshi)

山下 大樹 (YAMASHITA, Hiroki)