

Proceedings of Tokai University
Research Institute of Science and Technology

東海大学紀要

総合科学技術研究所

2013 Vol.34



Research Institute of Science and Technology

東海大学 紀要 総合科学技術研究所

Proceedings of Tokai University
Research Institute of Science and Technology

2013 Vol. 34



ご挨拶

東海大学総合科学技術研究所は、1948年に設置された産業科学研究所をその前身とし、本学創立者松前重義博士の科学技術立国の思想を脈々と受け継いでいる研究所であり、東海大学の付置研究所としては、最も歴史の古い研究所であります。

当研究所は、その名の示す通り幅広い研究分野を対象とし、総合的な立場からその研究を促進し、フレキシブルな研究活動を推進することをモットーとしております。今年度も、宇宙、計測技術、自然環境、有機分子までマクロからマイクロに至る広範囲にわたる研究に取り組んでおります。引き続き、学術的な貢献は勿論、地域への貢献、産学の連携を視野に入れた研究を展開することを目指し活動して参ります。

2013年度「東海大学紀要 総合科学技術研究所」として研究論文を掲載し、研究所の活動の一端をご紹介しますので、ご高覧頂ければ幸いです。今後の研究所の活動に対しご指導ご鞭撻のほどお願い申し上げます。

東海大学総合科学技術研究所
所長 渡邊 幹夫

目次—CONTENTS—

- 総合科学技術研究所 所長挨拶・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2

- ラクチドとアミノ酸誘導体の開環反応を利用した
N-ラクトイルアミノ酸誘導体の合成法・・・・・・・・・・・・・・・・4
 渡邊 幹夫（総合科学技術研究所、理学部化学科）
 島 弓子（理学部化学科）

- ラングミュア・キャピトンとプラズマ電気二重層様電位構造の形成・・・・・・・・14
 谷川 隆夫（総合科学技術研究所）

- デジタル一眼レフカメラによる鋼球の自由落下の瞬間写真撮影・・・・・・・・24
 —現象とカメラの同期問題—
 横山 直樹（総合科学技術研究所）

- 一般住宅における青色光生体リズム障害量の測定とその評価・・・・・・・・30
 竹下 秀（総合科学技術研究所）

- 2013年度総合科学技術研究所 活動記録・・・・・・・・・・・・・・・・36

ラクチドとアミノ酸誘導体の開環反応を利用した N-ラクトイル アミノ酸誘導体の合成法

渡邊 幹夫 (東海大学・総合科学技術研究所、理学部化学科)
島 弓子 (東海大学・理学部化学科)

The Method for the Preparation of N-lactoyl Amino Acid Ester by Using
Ring-opening Reaction of Lactide with Amino Acid Ester

Mikio WATANABE (Research Institute of Science and Technology, Tokai
University Department of Chemistry, School of Science, Tokai University)

Yumiko SHIMA (Department of Chemistry, School of Science,
Tokai University)

キーワード : ラクチド, アミノ酸エステル誘導体, 開環反応
Keywords: Lactide, amino acid ester derivatives, ring-opening reaction

Abstract

Depsipeptides are naturally occurring materials and important as Antibacterial materials. We have reported that the ring-opening reaction of lactide with amines proceeded smoothly followed by hydrolysis to give corresponding lactic acid amides in high yields.^[4]

We described here the method for the preparation of condensation product of lactic acid with amino acid ester derivatives by utilizing the ring-opening reaction followed by hydrolysis.

It was found that when excess amount of amino acid derivatives were used in this ring-opening reaction, the ring-opening products reacted excess amino acid to afford N-lactoyl amino acid derivatives without hydrolysis step.

1. はじめに

乳酸アミド結合を分子内に有するデプシペプチドは自然界にも存在し、抗菌性を有することから、近年、注目を集めている化合物の一つである。^{[1], [2], [3](a), (b), (c)}

我々は、昨年、D, L-, D-, L-ラクチドとアミンの開環反応、開環生成物を加水分解することにより、簡単に乳酸アミドを合成する方法、さらに、開環反応において、3~6当量の過剰のアミンを用いることにより、第1段階の開環生成物が、未反応のアミンと反応し、加水分解行程を経ることなく目的とする乳酸アミドが合成できることを報告している。^[4]

本報では、その続報としてアミノ酸エステルを用い同様な方法で、デブシペプチドの基本骨格となるN-ラクトイルアミノ酸エステルの合成法について検討し、前報で報告した二つの方法がいずれもスムーズに進行し、デブシペプチドの基本骨格となるN-ラクトイルアミノ酸骨格を合成する方法を確立したので報告する。

2. 結果と考察

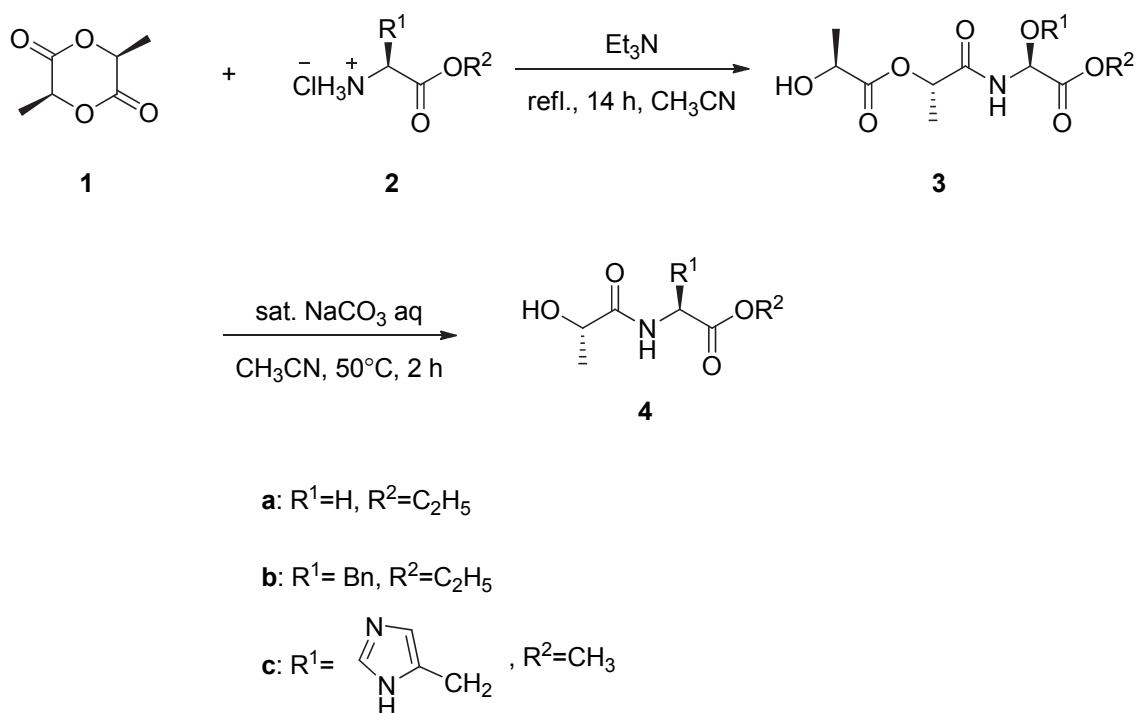
まず初めに、立体障害が小さく、最も簡単な構造を持つグリシンエチルエステル誘導体との反応について検討した。グリシンエチルエステルは、通常塩酸塩として市販されているため、反応時、トリエチルアミンを用い遊離の状態とし、ラクチドとの反応を行った。

アセトニトリル溶媒中、グリシンエチルエステル塩酸塩 (**2a**) にトリエチルアミンを加え、30分攪拌した後、L-(-)-ラクチド (**1**) を加えて室温で6日間攪拌し反応させたところ、目的とする開環生成物(S)-(S)-1-((2-エトキシ-2-オキシエチル)アミノ)-1-オキシプロパン-2-イル 2-ヒドロキシプロパノエート (**3a**) を85%の収率で得ることができた。さらに、反応条件について種々検討した結果、還流下、14時間反応させることにより、94%の収率で**3a**が得られることを見出した。

次に、得られた開環生成物**3a**の加水分解反応について種々検討を行った。前報で報告した1%の水酸化リチウムを用いて加水分解を行った場合、ラクトイル基のエステル結合だけでなく、アミノ酸エチルエステルの部分も加水分解されることが明らかとなった。そこで、塩基性の弱い炭酸水素ナトリウム水溶液を用いて加水分解反応について検討した。アセトニトリルに飽和炭酸水素ナトリウム水溶液を加え、50℃で、2時間攪拌し加水分解を行い、クロロホルムで抽出したところ、65%の収率で(S)-エチル 2-(2-ヒドロキシプロパンアミド)アセテート (**4a**) が得られることを見出した。(scheme 1)

次に、比較的立体障害の大きな中性アミノ酸として、L-フェニルアラニンエチルエステルを用い同様の反応を検討した。

すなわち、窒素雰囲気下、アセトニトリル溶媒中、L-フェニルアラニンエチルエステル塩酸塩 (**2b**) に対して、塩基として等量のトリエチルアミンを加えて30分間攪拌することにより遊離のL-フェニルアラニンエチルエステルとし、その後、L-(-)-ラクチドを加えて、24時間還流を行ったところ、目的である(S)-エチル 2-((S)-2-(((S)-2-ヒドロキシプロパノイル)オキシ)プロパナミド)-3-フェニルプロパノエート (**3b**) を93%の収率で得た。



scheme 1

次に、得られた **3b** の加水分解について検討を行った。

グリシンエステル誘導体の場合と同様に、アセトニトリル溶媒中、50°Cで、飽和炭酸水素ナトリウムを加えて4時間攪拌した後、反応を処理し塩化メチレンで抽出を行ったところ、(S)-エチル 2-((S)-2-ヒドロキシプロパナミド)-3-フェニルプロパノエート (**4b**) を、64%の収率で得た。

さらに、イミダズリル基を持つ L-ヒスチジンエステル誘導体でも、同様に反応が進行するかどうか種々検討を行った。

まず、塩基性アミノ酸である L-ヒスチジンメチルエステル二塩酸塩(**2c**) を用い、1との開環反応について検討した。

まず、窒素雰囲気下、アセトニトリル溶媒中、**2c** に塩基として2当量のトリエチルアミンを加えて30分間攪拌することにより遊離のL-ヒスチジンメチルエステルとし、その後、**1**を加えて室温で6日間反応を行い、水を加え反応を処理し塩化メチレンを抽出溶媒として用いたところ、(S)-メチル 2-(((S)-2-(((S)-2-ヒドロキシプロパノイル)オキシ)プロパナミド)-3-(1H-イミダゾール-5-イル)プロパノエート (**3c**) を34%の低収率ではあるが得た。薄層クロマトグラフィーにより、反応を追跡したところ反応はスムーズに進行しており、反応の処理が問題であると考えた。

そこで、反応温度、反応時間、抽出条件など種々条件を検討した結果、アセトニトリル溶媒中、8時間還流し反応を行い、副生するトリエチルアミン塩酸塩を酢酸エチル：メタノール=5：1の溶液を溶出溶媒として用、短いシリカゲルカラムを通して除去す

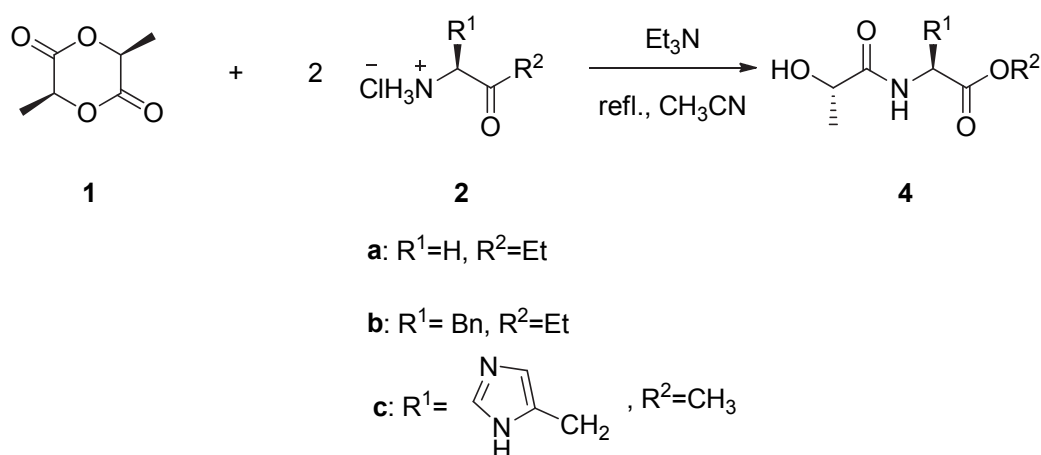
ることにより、97%の収率で **3c** が得られることを見出した。次に、**3c** のラクトイル基のエステル部分を加水分解条件について検討した。炭酸水素ナトリウム水溶液を用い反応条件について種々検討したが、50°Cで1.5時間攪拌し反応させたときに、わずかに4%の収率で(S)-メチル 2-((S)-2-ヒドロキシプロパナミド)-3-(1H イミダゾール-5-イル)プロパノエート (**4c**) を得た。**3c** の加水分解条件、反応の処理、抽出条件について種々検討したが、収率を向上させることは困難であった。

table 1. The yield of **3** and **4** in the ring-opening reaction followed dy hydrolysis.

| entry | amino acid derivatives 2 | yield of 3 | yield of 4 |
|-------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 2a | 3a 94% | 4a 65% |
| 2 | 2b | 3b 93% | 4b 64% |
| 3 | 2c | 3c 97% | 4c 4% |

このように、開環反応、加水分解反応と2段階の反応により生成物を得る方法において、開環生成物が分子内に二つのエステル基を有するため、選択的加水分解または、両方のエステル基が加水分解された場合の生成物の抽出が困難であったため、これ以上収率を向上させることは困難であった。

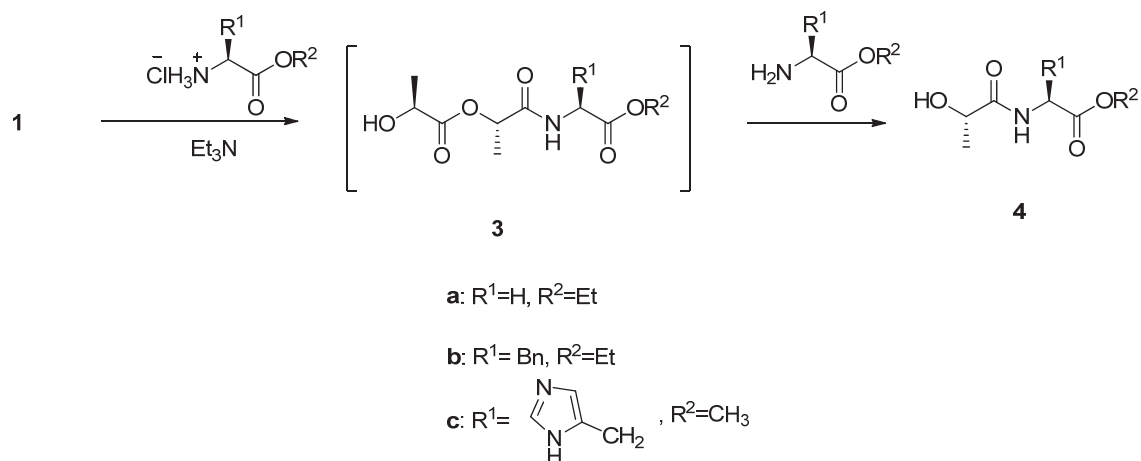
そこで、アミノ酸エステル誘導体の場合も、アミン類の場合^[1]と同様に過剰のアミノ誘導体を反応させることにより、開環生成物 **3** にさらにグリシンエチルエステルが反応し、加水分解の工程を経ることなく、目的である **4** が得られるのではないかと検討を行った。



scheme 2

まず、窒素雰囲気下、アセトニトリル溶媒中、4 当量の **2a** に対し、4 当量のトリエチルアミンを加えて 30 分間攪拌することによりグリシンエチルエステルを遊離した後、1 当量の L-($-$)-ラクチドを加えて 40 時間還流し反応を行った。

反応混合物を減圧濃縮し溶媒を除去した後、シリカゲルカラムクロマトグラフィーにより単離精製したところ、90%の収率で得られることを見出した。(scheme 2)



scheme 3

次に、窒素雰囲気下、アセトニトリル溶媒中、L-($-$)-ラクチドに対して 4 当量の **2b** に、塩基として 4 当量のトリエチルアミンを加えて 30 分間攪拌することにより L-フェニルアラニンエチルエステルを遊離した。その後、L-($-$)-ラクチドを加えて 70 時間還流し、反応溶液を濃縮して酢酸エチルを溶出溶媒として用いシリカゲルの相を通じ副生成する塩類を取り除いたところ、**4b** を 79%の収率で得た。さらに、L-($-$)-ラクチドに対し 6 当量の **2b** を用いて同様の反応を行ったところ、**4b** が 89%の収率で得られることを見出した。さらに、ヒスチジン誘導体についても同様に検討した。すなわち、先と同様、**2c** にトリエチルアミンを加え遊離の状態とし、**1** を加え 80 時間還流し反応させ、前述したフェニルアラニンの場合と同様に反応を処理し、抽出溶媒等種々検討したが、**4c** の収率は 32%で、これ以上収率を向上することは困難であった。

table 2. The yield of **4** in the reaction of **1** with excess amount of amino acid ester **2**.

| entry | amino acid derivatives 2 | yield of 4 |
|-------|---------------------------------|-------------------|
| 4 | 2a | 4a 90% |
| 5 | 2b | 4b 89% |
| 6 | 2c | 4c 32% |

以上、述べたようにグリシン、フェニルアラニンなどの中性アミノ酸場合、L-($-$)-ラクチドとの開環反応、さらに、開環生成物を炭酸水素ナトリウム水溶液を用いて加水分解することにより、効率よく N-ラクトイルアミノ酸エステル誘導体を合成する方法を確立した。また、L-($-$)-ラクチドに対して 2 当量以上の過剰のアミノ酸エステル誘導体を用いて反応を行うことにより、開環生成物に対しさらに、もう 1 分子のアミノ酸エステル誘導体が末端のラクトイル基のカルボニル基に求核的に反応し、目的物である N-ラクトイルアミノ酸誘導体が一気に得られることを見出した。この方法は、側鎖に塩基性基であるイミダゾイル基を持つヒスチジンなどのアミノ酸エステル誘導体においては特に有効で、アミノ酸の N-ラクトイル化反応とし利用でき、デプシペプチド合成の基本反応として活用できるものと期待できる。

3. 実験の部

(S)-(S)-1-((2-エトキシ-2-オキソエチル)アミノ)-1-オキソプロパン-2-イル 2-ヒドロキシプロパノエート (3a)

50mL ニロナスフラスコにグリシンエチルエステル塩酸塩 0.211 g(1.51mmol)を入れ、簡易窒素置換をした後、アセトニトリル 4mL を加えた。トリエチルアミン 0.1594g(1.58mmol)の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、室温にて 30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 0.145g(1.01mmol)の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、14 時間還流した。10%の塩酸を加えて pH を 2 程度にし、水 10mL を加え、塩化メチレン 30mL で 6 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した。ろ過して、ロータリーエバポレーターを用いて減圧濃縮を行ったところ、NMR 上でラクチドが完全に反応したことが確認され油状物である(S,S)-2-ラクトイル-N-(グリシンエチル)プロパンアミド **3a** のみを 0.2346g (収率 94%) で得た。

^1H NMR (500MHz, CDCl_3)

δ (ppm) = 1.30(3H, t, $J=7.1\text{Hz}$), 1.54(6H, d, $J=7.0\text{Hz}$), 4.02(1H, dd, $J=4.7\text{Hz}$, 12.8Hz), 4.08(1H, dd, $J=5.2\text{Hz}$, 13.4Hz), 4.24(2H, q, $J=7.2\text{Hz}$), 4.39(1H, q, $J=6.9\text{Hz}$), 5.33(1H, q, $J=6.9\text{Hz}$), 6.62(1H, s)

^{13}C NMR (125MHz, CDCl_3)

δ (ppm) = 14.1, 20.9, 40.9, 61.6, 68.4, 170.0, 175.4

(S)-エチル 2-(2-ヒドロキシプロパンアミド)アセテート (4a)

ジムロート冷却器をつけた 100mL ニロナスフラスコに恒温槽を 50°C にセットして、得られた開環生成物 **3a** 2.346g(9.49mmol)の 40mL アセトニトリルを入れ、飽和炭酸水素ナトリウム水溶液 30mL を滴下して加えて、2 時間攪拌した。10%の塩酸を加え pH を 3 程度にし、クロロホルム 50mL で 3 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗浄し、硫酸マグネシウムを加え一晩乾燥した。ろ過してロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ、(S)-N-ラクトイルグリシンエチルエステル **4a** を 1.144g (収率 65%) で得た。

¹H NMR (500MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 1.29(3H, t, *J* = 7.2Hz), 1.46(3H, d, *J* = 6.9Hz), 4.03(1H, dd, *J* = 5.4Hz, 10.8Hz), 4.09(1H, dd, *J* = 5.5Hz, 10.8Hz), 4.23(2H, q, *J* = 7.2Hz), 4.31(1H, q, *J* = 6.9Hz)

¹³C NMR (125MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 14.1, 20.9, 40.9, 61.6, 68.4, 170.0, 175.4

L-(-)-ラクチドと過剰のグリシンエステル誘導体の反応

100mL 二口ナスフラスコにグリシンエチルエステル塩酸塩 5.592g(40.1mmol)を入れ、簡易窒素置換をした後、アセトニトリル 10mL を加えた。トリエチルアミン 4.069g(40.2mmol)の 20mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、室温にて 30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 1.445g(10.0mmol)の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、40 時間還流した。反応溶液を減圧濃縮して、溶出溶媒として酢酸エチルを用いて 10cm 程度のシリカゲルを詰めたカラム管に通し、TLC で目的物が確認されなくなったら、溶出を止める。溶出した溶液を収集して、減圧濃縮したところ、油状物である **4a** を 2.961g (収率 90%)得た。

(S)-エチル 2-(((S)-2-(((S)-2-ヒドロキシプロパノイル)オキシ)プロパナミド)-3-フェニルプロパノエート (**3b**)

50mL 二口ナスフラスコに L-フェニルアラニンエチルエステル塩酸塩 0.231g(1.00mmol)を入れ、簡易窒素置換した後、アセトニトリル 4mL を加えた。トリエチルアミン 0.108g(1.1mmol)の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 0.145g(1.0mmol)の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、24 時間還流した。10%の塩酸を加えて pH を 1 程度にし、水 10mL を加え、塩化メチレン 30mL で 4 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した。ろ過して、ロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ油状物である(S,S)-2-ラクトイル-N-(フェニルアラニンエチル)プロパンアミド **3b** が 0.313g 得た。また、次の加水分解反応では得られた開環生成物 **3b** を単離することなくそのまま使用した。

¹H NMR (500MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 1.26(3H, t, *J* = 7.2Hz), 1.38(3H, d, *J* = 7.0Hz), 1.47(3H, d, *J* = 6.9Hz), 3.14(1H, dd, *J* = 5.5Hz, 13.9Hz), 3.19(1H, dd, *J* = 5.8Hz, 13.9Hz), 4.19(2H, q, *J* = 7.2Hz), 4.30(1H, q, *J* = 7.0Hz), 4.84(1H, dt, *J* = 5.7Hz, 7.9Hz), 5.24(1H, q, *J* = 6.9Hz), 6.49(1H, d, 7.4Hz), 7.10-7.31(5H,m)

¹³C NMR (125MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 14.1, 17.8, 20.2, 37.8, 52.6, 61.8, 66.8, 71.4, 127.3, 128.6, 129.4, 169.3, 171.2, 174.2

(S)-エチル 2-((S)-2-ヒドロキシプロパナミド)-3-フェニルプロパノエート (4b)

ジムロート冷却器をつけた 100mL ニロナスフラスコに恒温槽を 50°C にセットして、得られた **3b** 0.305g (0.90mmol) の 4mL アセトニトリルを入れ、飽和炭酸水素ナトリウム水溶液 3mL を滴下して加えて、2 時間攪拌した。10% の塩酸を加えて pH を 3 程度にし、クロロホルム 50mL で 3 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、硫酸マグネシウムを加えて一晩乾燥した。ろ過してロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ、(S)-N-ラクチルフェニルアラニンエチルエステル **4b** を 0.138g (収率 64%) 得た。

¹H NMR (500MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 1.25(3H, t, *J* = 7.1Hz), 2.71(3H, d, *J* = 6.9Hz), 3.10(1H, dd, *J* = 6.3Hz, 13.9Hz), 3.18(1H, dd, *J* = 5.9Hz, 13.9Hz), 4.18(2H, q, *J* = 7.2Hz), 4.21(1H, q, *J* = 6.9Hz), 4.86(1H, dt, *J* = 6.1Hz, 8.2Hz), 6.88(1H, d, *J* = 7.2Hz), 7.11-7.30(5H, m)

¹³C NMR (125MHz, CDCl₃)

δ (ppm) = 14.1, 21.0, 38.0, 52.7, 61.6, 68.3, 127.1, 128.5, 129.3, 135.7, 171.6, 174.2

L-(-)-ラクチドと過剰のフェニルアラニンエチルエステル塩酸塩の反応

100mL ニロナスフラスコに L-フェニルアラニンエチルエステル塩酸塩 0.923g (4.02mmol) を入れ、簡易窒素置換をした後、アセトニトリル 4mL を加えた。トリエチルアミン 0.408g (4.0mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、室温にて 30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 0.145g (1.0mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、70 時間還流した。反応溶液を減圧濃縮して、溶出溶媒として酢酸エチルを用いて 10cm 程度のシリカゲルを詰めたカラム管を通しトリエチルアミン塩酸塩を除去し、した後、シリカゲルカラムクロマトグラフィーにより精製し、展開溶媒 酢酸エチル : ヘキサン (4 : 1) 溶出部より **4b** を 0.200g (収率 79%) 得た。

(S)-メチル 2-((S)-2-(((S)-2-ヒドロキシプロパノイル)オキシ)プロパナミド)-3-(1H-イミダゾール-5-イル)プロパノエート (3c)

50mL ニロナスフラスコに L-ヒスチジンメチルエステル二塩酸塩 0.243g (1.0mmol) を入れ、簡易窒素置換した後、アセトニトリル 2mL を加えた。トリエチルアミン 0.202g (2.0mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 0.145g (1.01mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、8 時間還流した。反応溶液を減圧濃縮して、溶出溶媒として酢酸エチル : メタノール = 5 : 1 の溶液を用いて 10cm 程度のシリカゲルを詰めたカラム管に通し、TLC で目的物が確認されなくなったら、溶出を止めた。溶出した溶液を収集してロータリーエバポレーターで減圧濃縮したところ、透明な油状物である (S,S)-2-ラクチル-N-(ヒスチジンメチル)プロパンアミド **3c** を 0.303g (収率 97%) 得た。また、次の加水分解反応では得られた開環生成物 **3c** を精製することなくそのまま使用した。

^1H NMR (500MHz, CDCl_3)

δ (ppm) = 1.52(3H, d, $J=6.9\text{Hz}$), 1.53(3H, d, $J=6.9\text{Hz}$), 3.10(1H, dd, $J=4.5\text{Hz}$, 5.5Hz), 3.20(1H, dd, $J=4.5\text{Hz}$, 6.8Hz) 3.68(3H, s), 4.44(1H, q, $J=7.0\text{Hz}$), 4.75(1H, dt, $J=5.2\text{Hz}$, 7.2Hz), 5.28(1H, q, $J=6.9\text{Hz}$), 6.85(1H, s), 7.63(1H, s), 8.08(1H, d, $J=7.4\text{Hz}$)

^{13}C NMR (125MHz, CDCl_3)

δ (ppm) = 20.1, 20.4, 20.7, 28.7, 52.4, 67.4, 71.1, 115.7, 135.4, 170.2, 171.3, 174.0

(S)-メチル 2-((S)-2-ヒドロキシプロパナミド)-3-(1H イミダゾール-5-イル)プロパノエート (4c)

ジムロート冷却器をつけた 50mL ニロナスフラスコに恒温槽を 50°C にセットして、得られた開環生成物 **3c** 0.291g (0.93mmol) の 7mL アセトニトリル溶液を入れ、飽和炭酸水素ナトリウム水溶液 3mL を滴下して加えて、1 時間半攪拌した。水 10mL を加えて、クロロホルム 30mL で 3 回抽出した。有機層に硫酸マグネシウムを加えて一晩乾燥した。ろ過してロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ、(S)-N-ラクトイルヒスチジンメチルエステル **4c** を 0.008g (収率 4%) 得た。

^1H NMR (500MHz, D_2O)

δ (ppm) = 1.14(3H, d, $J=6.9\text{Hz}$), 2.98(1H, dd, 8.4Hz, $J=14.9\text{Hz}$), 3.08(1H, dd, $J=5.4\text{Hz}$, 14.9Hz), 3.64(1H, s), 4.11(1H, q, $J=6.9\text{Hz}$), 4.61(1H, dd, $J=5.4\text{Hz}$, 8.4Hz), 6.86(1H, s), 7.59(1H, s)

^{13}C NMR (125MHz, D_2O)

δ (ppm) = 19.5, 28.0, 48.8, 53.1, 67.5, 117.0, 133.9, 135.1, 172.8, 177.4

L-(-)-ラクチドと過剰の L-ヒスチジンメチルエステル二塩酸塩の反応

50mL ニロナスフラスコに L-ヒスチジンメチルエステル二塩酸塩 0.9772g(4.04mmol) を入れ、簡易窒素置換をした後、アセトニトリル 2mL を加えた。トリエチルアミン 0.8140g(8.04mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、室温にて 30 分間攪拌した。その後、L-ラクチド 0.1441g(1.00mmol) の 4mL アセトニトリル溶液を滴下して加えて、80 時間還流した。反応溶液を減圧濃縮して、溶出溶媒として酢酸エチル：メタノール = 5 : 1 の溶液を用いて 10cm 程度のシリカゲルを詰めたカラム管に通し、トリエチルアミン塩酸塩を除去したのちカラムクロマトグラフィー(展開溶媒 ジエチルエーテル：メタノール = 1 : 1) によって単離生成したところ **4c** を 0.152g (収率 32%) 得た。

4. 参考文献

- [1] Fernando Albericio, Klaus Burger, Javier Ruiz-Rodriguez, and Jan Spengler, *Org. Lett.*, **33**, 3413-21 (1999).

- [2] Fernando Albericio, Klaus Burger, Javier Ruiz-Rodriguez, and Jan Spengler., *Org.Lett.*, **2005**, 7, 4
- [3] Brockmann. H; Schmidt-Kastner, G, *Chem. Ber.*, **1955**, 88, 57
- (a) B. Dietrich, J. M. Lehn, and J. P. Sauvage, *J. Chem. Soc., Chem. Commum.*, **1973**, 15
- (b) S. Akabori and T. Yoshii, *Tetrahedron Lett.*, **1978**, 4523
- (c) 平岡道夫, 柳田博明, 小原正明, 古賀憲司, ホスト・ゲストケミストリー, 講談社 **1984**
- [4] Mikio Watanabe and Yumiko Shima, Proceedings of Tokai University Research Institute of Science and technology, **33**, 34~41(2014)

ラングミュア・キャビトンとプラズマ電気二重層様電位構造の形成

谷川隆夫（東海大学・総合科学技術研究所）

Formation of a Double Layer-Like Potential Structure associated with a Langmuir Caviton

Takao TANIKAWA (Research Institute of Science and Technology, Tokai University)

キーワード：プラズマ電気二重層，ラングミュア・キャビトン，共鳴吸収，マイクロ波-プラズマ系

Keywords: double layers, Langmuir cavitons, resonance absorption, microwave-plasma system

Abstract

A mechanism of generating a double layer-like potential structure at the location of a density cavity created by an intense localized electron plasma oscillation (caviton) is experimentally investigated in microwave-plasma interaction systems. Upon the injection of the microwave pulse into a non-uniform plasma from the lower density side, an intense electron plasma wave (EPW) is resonantly excited at the critical layer. The ponderomotive force associated with this inherently localized EPW expels electrons out of the resonance region, raising the potential there almost instantaneously. This results in the acceleration of ions in this region, depleting the ions there. In this way, a negative potential dip is formed near the original resonance layer in the time scale of $\geq 1/f_{pi}$, where f_{pi} is the ion plasma frequency. It appears that this potential dip repels background electrons, causing the expansion of the negative potential region. This process eventually leads to the formation of a double layer-like potential structure. The observed particle distribution functions are consistent with the observed potential structure. An ion phase-space hole may have been generated following the formation of a caviton in our experiments. One-dimensional electrostatic particle-in-cell computer simulations have been carried out in order to understand our experimental results.

1. はじめに

電子プラズマ波（ラングミュア波）のような高周波の静電プラズマ波動が、変調不安定性などを通して局所的に大振幅波になると、波動電場の強度勾配に比例する非線形力（ポンドロモーティブ力）の効果が顕著になり、プラズマ電子は波動振幅の大きな領域から小さな領域へと排除される。その結果、大振幅波領域にイオンが取り残される形になるが、十分な時間が経過すると両極性電場の効果によりイオンもこの領域から排除され、大振幅波に付随して周囲よりプラズマ密度の低い密度キャビティが生じる。この密度キャビティの周辺には排除された粒子により初期密度より若干密度の高い部分が生じるため、密度キャビティは自身を作る原因となった大振幅ラングミュア波にとり文字通りキャビティとして作用し、波はこのキャビティ内に捕捉される。この局在化ラングミュア波（包絡ソリトン状と言える

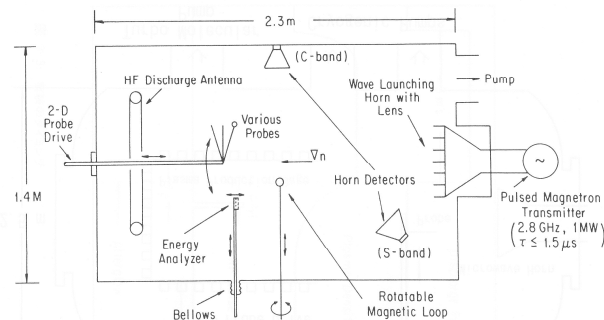


Figure 1. Schematic diagram of the Large Caviton Device (LCD).

だろう)と低密度キャビティがペアになった非線形波動を“ラングミュア・キャビトン(Langmuir caviton)”と呼ぶ。1970年代前半に理論[1]、実験[2]、コンピュータ・シミュレーション[3, 4]でその存在が確認された。

プラズマは比較的容易に非線形状態になり易い媒体であり、ラングミュア・キャビトン(以下単にキャビトンと記すことにする)が生じるような状態にまでプラズマを駆動することはそう難しいことではない。キャビトンは局所的に強い密度変調を伴い、キャビトンが多数存在するような状態ではそもそもバックグラウンドのプラズマに対して線形理論が予測するような分散関係を仮定することは不適切であり準線形理論は破綻し、プラズマは純粋に非線形な領域に入る。この例として“強いラングミュア乱流” [5 - 9]がある。この乱流状態にあるプラズマ中ではキャビトンがランダムに次々生成・消滅を繰り返す。キャビトンに付随する強い密度変調故に、同一箇所によく多くのプラズマ周波数が混在することになり ω -スペクトルのバンド幅が広がることになる。さらに、空間的局在性故に、 k -スペクトルのバンド幅も同時に広がる。この様に、キャビトンの存在自体が自然にプラズマを強い乱流状態に導くことになる。

キャビトンはこの様に強い乱流状態にあるプラズマ中で重要な役割を果たすが、それ自体いろいろな面白い性質を有している。キャビトンに付随する密度キャビティはラングミュア波にとって文字通りキャビティ(共鳴箱)として作用する。従って、キャビトンがサポート出来る波束は離散的な固有モードだけである[10]。キャビトンはある条件下で急速に収縮する。この時、密度キャビティに捕捉されている固有モードの振幅はサイズの収縮につれ急激に増大し、密度キャビティの深さも同時にさらに深くなる。これが所謂キャビトンの“崩壊(collapse)”である[1, 11]。キャビトンは崩壊に伴い静電波や電磁波を放射する[12 - 14]。さらに我々はマイクロ波-プラズマ系の実験で、キャビトンの生成に伴いその近辺のプラズマ空間電位が著しく変化し電気二重層様の電位構造が生じることを見出した[15]。これが本論文の主題である。

本質的に局所的な高周波振動であるキャビトンがプラズマ空間電位にdc的な影響を与え得るという現象の解明は、強いラングミュア乱流状態にあるプラズマの性質を正しく理解する上でも重要であると考えられる。スペースプラズマ中の加速現象にキャビトンが関わっている可能性も指摘さ

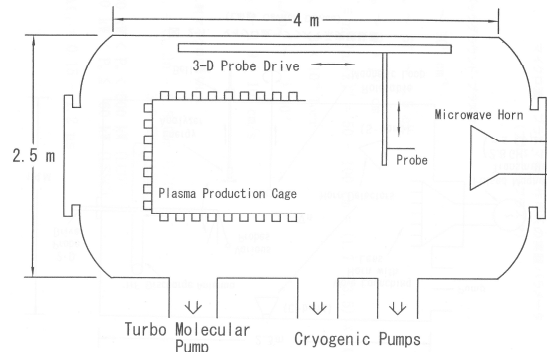


Figure 2. Schematic diagram of the Large Space Simulation Chamber (LSSC).

Table 1. Typical Experimental Parameters

Background Argon Plasma

- $n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
- $T_e \sim 6T_i \sim 1.5 \text{ eV}$
- $\lambda_D \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm}$
- $L \equiv n_c (\partial n / \partial z)^{-1} = 50 \sim 100 \text{ cm} = (1.7 \sim 3.5) \times 10^4 \lambda_D$
- $p_n \sim 3 \times 10^{-4} \text{ Torr}$
- $v_{en} / \omega_{pe} \sim 4 \times 10^{-4}$
- $c_s \sim 1.9 \times 10^5 \text{ cm/s}$

Microwave Pulse

- $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 2.8 \text{ GHz (for LCD)}$
 $= 3.0 \text{ GHz (for LSSC)}$
- $80 \text{ kW} < P_0 < 500 \text{ kW (for LCD)}$
 $0 \text{ kW} < P_0 \leq 60 \text{ kW (for LSSC)}$
- $\Delta t_{rf} = 0.15 \sim 1.2 \mu\text{s}$

れており、電気二重層様電位構造の形成との関連なども興味のあるところである。本研究ではマイクロ波のプラズマによる共鳴吸収を利用してキャビトンを生じ電気二重層様電位構造を発生させているが、これは言い換えればマイクロ波によるプラズマ空間電位の遠隔制御であり、プラズマ・プロセッシング、制御核融合研究などへの応用も期待できるかもしれない。本報告で紹介する結果は、科学研究費補助金の成果報告書[16]として以前取り纏められたものからであるが、正式な論文として発表されていない部分も多く、現象の重要性に鑑み、この機会にまとめ直したのが本論文である。

2. 実験装置

本研究では、単独のキャビトン生成を明確な位置に生成し、その特性を詳しく調べることが出来るように、密度勾配のある非一様プラズマ中に短いマイクロ波パルスを打ち込むマイクロ波-プラズマ系の実験を採用している。実験装置としては、UCLAのLarge Caviton Device (LCD) (Fig. 1) 及びJAXA宇宙科学研究所のLarge Space Simulation Chamber (LSSC) (Fig. 2) を用いた。LCDではプラズマ生成に周波数 ~400 kHz、ピークパワー ~15 kW の高周波放電を用いた。一方、LSSCではプライマリー電子閉じ込め用の永久磁石が多数並べられたマグネット・ケージ内に、120本程のタングステン線をカソードとして配置したdc放電でプラズマ生成を行った。双方の装置で、放電は放電長3~10 msのパルス放電であり、実際の実験は比較的静かなアフターグロー・プラズマ中で実施された。主な実験パラメータをTable 1にまとめる。この表からも分かるように、キャビトン励起用マイクロ波の周波数が2つの装置で若干異なる。2つの装置の最も大きな違いは、入射マイクロ波の最大ピーク・パワー (P_0) である。LCDでは

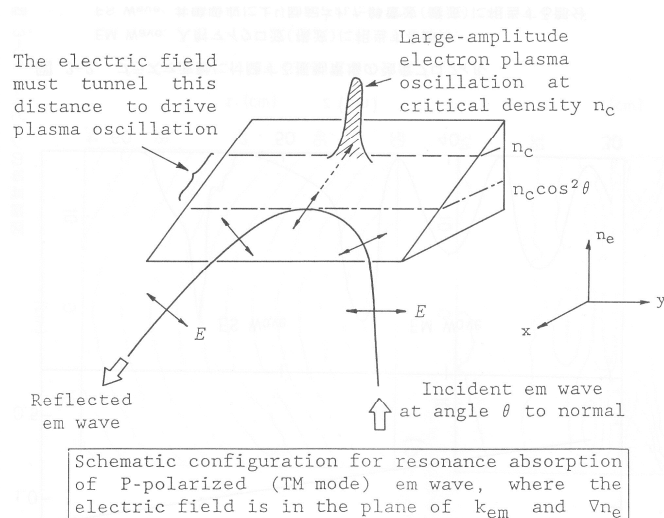


Figure 3. Resonance absorption of an electromagnetic (em) wave by a non-uniform plasma.

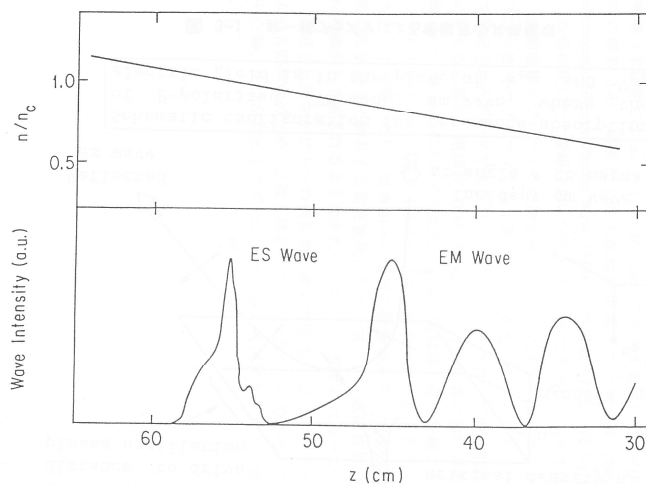


Figure 4. Axial profiles of the intensity of oscillating electric fields associated with the incident microwave (designated as EM wave) and the excited electrostatic wave (designated as ES wave) in the evanescent region of the incident microwave.

80 kW < P_0 < 500 kW とピーク・パワーが大変大きいので、生じる非線形効果も非常に大きい。そのため電気二重層様の電位変化が大きく、比較的現象を容易に捉えることが出来る。しかしながら、大出力マイクロ波の影響で測定が難しく、細かい変化の様子を捉えるのが容易でない。一方、LSSC では $P_0 \leq 60$ kW であり、電位構造の変化の絶対値は小さいが、変化の生じる詳細を比較的追い易いという利点がある。2つの装置での実験はこの様に互いに相補的であった。

測定には平面及びワイヤ型のラングミュア・プローブを用いた。マイクロ波がプローブに種々の非線形効果を引き起こし、データの正しい解釈を困難にすることはよく知られている[17,18]。強力なマイクロ波の影響を避けるため、プローブ測定はマイクロ波を切った直後に行った。従って、時間発展のデータは入射マイクロ波のパルス幅 Δt_{rf} を変化させて得られたものである。イオン及び電子の分布関数は、マルチグリッド型静電エネルギーアナライザーを用いて測定した。

3. 実験結果 及び 考察

マイクロ波を密度勾配のある非一様プラズマ中に低密度側から入射すると、電子プラズマ周波数 ω_{pe} がマイクロ波の周波数 ω_0 と一致する共鳴層(本実験では $n_e \sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ に相当する層)でマイクロ波は共鳴的に吸収され局在化した大振幅静電電子プラズマ波 (large amplitude electrostatic Electron Plasma Wave (EPW)) が励起される (Fig. 3 を参照) [19]。この局在化大振幅 EPW が引き金となりキャビトンが生成される。波動電場のプロファイルの測定例を Fig. 4 に示す。バックグラウンドのプラズマ密度プロファイルを上のフレームに示してある。波動電場は rf ピックアップ・プローブで測定した。このプローブの静電波 (ES Wave) に対する応答と電磁波 (EM Wave) に対する応答に違いがあるため共鳴層 ($z \sim 55 \text{ cm}$) における静電波の振幅は電磁波の最大振幅よりも実際にはかなり大きい筈だが図ではほぼ同じ強度になっている。また、プラズマのサイズが有限であるため、境界からのマイクロ波の反射の影響があり、マイクロ波は真空容器の形状などに

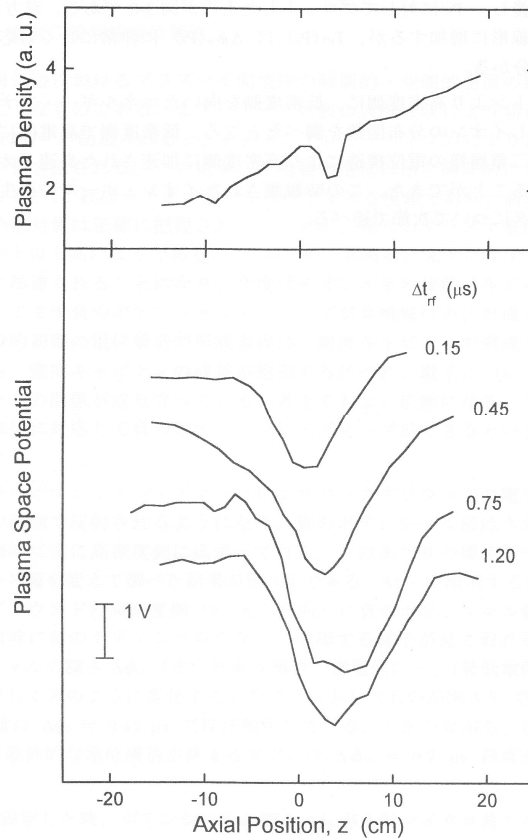


Figure 5. Profiles of the plasma space potential developed around the location of a caviton measured at $\sim 0.5 \mu\text{s}$ after the termination of the microwave pulse of duration Δt_{rf} . Each trace is vertically displaced for clear presentation. The peak power of the incident microwave pulse was $\sim 160 \text{ kW}$. The plasma space potential was determined from a full I-V characteristics of a cold Langmuir probe. The density profile for the case of $\Delta t_{rf} \approx 0.75 \mu\text{s}$ is shown in the upper frame.

依存する定在波状になっている。従って、電磁波部分のプロファイルは理論から予測されるような綺麗なエアリー関数様にはなっていない。

2つの装置における実験結果を総合すると、共鳴層付近におけるプラズマ空間電位の時間的・空間的発展の様子は概ね次のようなものである。マイクロ波の共鳴吸収により局在化大振幅 EPW が励起されると、そのポンドロモーティブ力の効果により電子が共鳴層より排斥される。その結果、共鳴層付近の電位は殆ど瞬間的に著しく高電位になる。これはマイクロ波パルス内で起こる現象で、高周波の影響により絶対値は正確に測定出来ないが、周辺プラズマの電位よりも数十ボルト以上高いと推測される。続いて、この高電位により共鳴層に元々存在するイオンが急速に加速される。従って、もとの共鳴層付近に今度はイオン不足の状況が発生する。この様にして負のポテンシャル・ディップがもとの共鳴層付近に形成される。

この比較的初期の電位構造の形成過程は、密度キャビティの生成と相呼応している。密度キャビティの成長が飽和するにつれ電子についてはほぼボルツマンの関係が成り立っていると考えるとよい状態になる。これは、密度キャビティの位置に負のポテンシャル・ディップができるという事実と矛盾しない。

この負のポテンシャル・ディップによりバックグラウンドの電子はキャビティの両側で反射されるようになり、負のポテンシャル部はさらに深くなる。同時に主に高密度側に広がって行く。このあたりの様子を入射マイクロ波のパルス幅を変えて調べた結果が Fig. 5 である。 Δt_{rf} が増加するにつれ高密度側 (z 大の方向) に負のポテンシャル領域が広がり、同時に負のポテンシャルの深さが増加する様子が見てとれる。負のポテンシャルの深さ $\Delta \phi_p$ (= (低密度側の一定電位) - (最低電位)) が Δt_{rf} に対してどう変化するかをプロットしたものが Fig. 6 である。 $\Delta \phi_p$ の値は $\Delta t_{rf} \approx 0.45 \mu\text{s}$ でほぼ飽和している。しかしながら、広がりまで含めた最終的な電位構造が決まるまでには $\Delta t_{rf} \approx 0.7 \mu\text{s}$ 程度が必要である。

Δt_{rf} を固定した時ポテンシャルの深さ $\Delta \phi_p$ が入射マイクロ波のピーク・パワー P_0 に対してどのように変化するかを示したのが Fig. 7 である。 $\Delta \phi_p$ は P_0 についてほぼ線形に増加している。

キャピトンから 3.5 cm 高密度側に設置されたエネルギーアナライザを用いてイオンの分布関数の時間発展の様子を測定していったところ、マイクロ波の入射時点から 20 μs も経った時点でビーム状の分布関数を観測した (Fig. 8)。この時

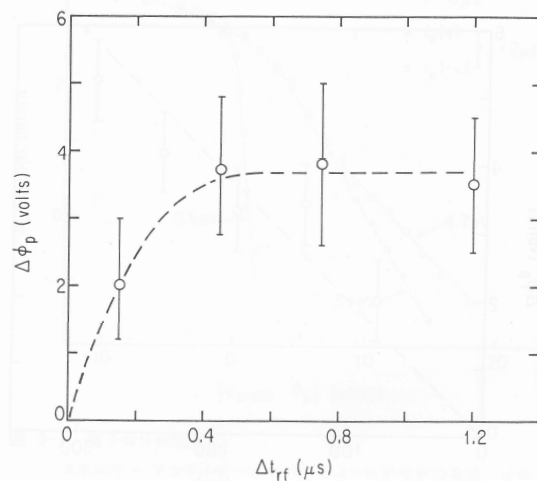


Figure 6. Depth of the negative potential well, $\Delta \phi_p$ versus the duration of the incident microwave pulse, Δt_{rf} . The peak power of the incident microwave pulse was $\sim 150 \text{ kW}$.

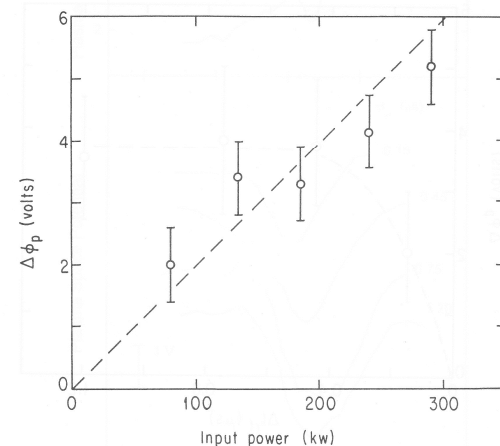


Figure 7. $\Delta \phi_p$ versus the peak power of the incident microwave pulse, P_0 . The duration of the pulse, Δt_{rf} , was $\sim 1.2 \mu\text{s}$.

のマイクロ波 パルス幅 は $1.2 \mu\text{s}$ であり、 $t = 20 \mu\text{s}$ までにはマイクロ波の直接の影響は全くないと考えられる。また、バックグラウンドのアフターグロー・プラズマの密度にもかなり変化が生じてきている(密度は減少している)。さらに、この時点までにはプラズマ空間電位の プロフィールも ほぼ一様になっていた。この様な状況に鑑み、上の結果をイオンビームと解釈することには無理があると考えられる。イオンの位相空間 ($\mathbf{v-x}$ 空間) 内の局所的に密度が極めて低い部分である イオン・ホールが キャビトンの 生成に 付随 して キャビトン 位置に 発生し、 $v = 3.5 \text{ cm} / (20 - 1.2) \mu\text{s} = 1.9 \times 10^5 \text{ cm/s}$ (\sim イオン音速) で高密度側に移動し、これがアナライザを通過した、と 解釈するとデータを比較的自然的に理解できそうである。Fig. 9 にイオン・ホール発生の様子を模式的に示す。電気二重層形成にイオン・ホールが関与する可能性があるという理論[20]もあり興味深い。今後の実験研究などで解明すべき課題であろう。

ところで、理論では電気二重層の駆動源として電流を必要とする。我々のケースでは、キャビトンに捕捉された局在化 EPW は transit-time-damping 機構[21]を通してバックグラウンドの電子を主に低密度側に加速する。この様にして発生する電子の高速成分が電気二重層の駆動源である可能性がある。このあたりも今後解明すべき課題であろう。

4. コンピュータ・シミュレーション

電気二重層形成過程は粒子の分布関数の時間・空間発展に直接依存する複雑な非線形過程である。特に我々のケースは非一様プラズマ中におけるものであり、単純化されたモデルで理解することは難しい。そこで、手始めに 1 次元多粒子モデルによるコンピュータ・シミュレーションを試みた。模擬したい

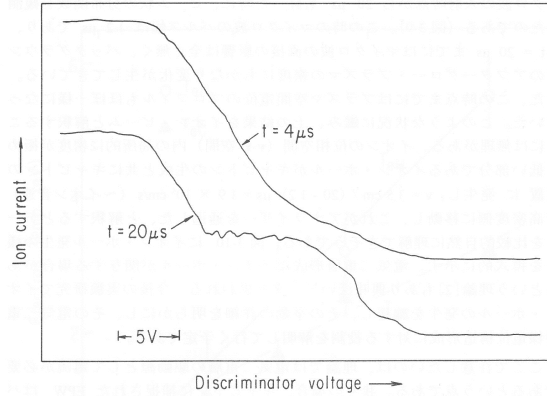


Figure 8. Possible observation of the generation of an ion phase-space hole associated with a caviton. The traces shown here are the I-V characteristic curves of a retarding-grid ion energy analyzer measured at $t = 4 \mu\text{s}$ and $20 \mu\text{s}$ after the microwave injection ($\Delta t_{rf} = 1.2 \mu\text{s}$). The energy analyzer was located at 3.5 cm from the caviton in the higher density side of the plasma.

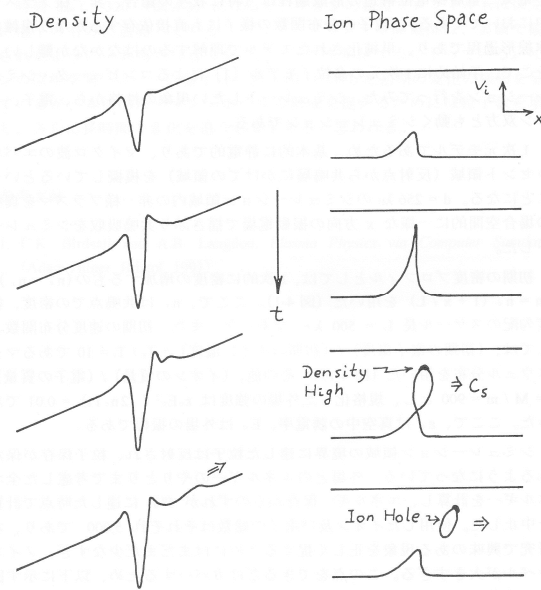


Figure 9. Generation of an ion phase-space hole associated with a caviton (model). Due to the rapid density modification, the population depletion occurs in the ion phase-space (the 1st and 2nd frames). Eventually, an ion hole is generated (the 3rd frame). It moves upward with the ion acoustic speed c_s (the 4th frame). Because the total number of ions is conserved, a soliton-like high-density region associated with the ion hole is also generated and moves with c_s (the 3rd and 4th frames).

現象の性格から電子・イオン双方共に動くシミュレーションを実施した。

1次元モデルであるため基本的に静電的であり、マイクロ波のエバネッセント領域（反射層から共鳴層にかけての領域）を模擬しているというイメージである。 $d = 256 \lambda_D$ のシミュレーション領域内の非一様プラズマを真空であれば空間的に一様である x 方向の振動電場で揺さぶり共鳴吸収をシミュレートした。

初期の密度プロファイルは $n = n_c (1 + x/L)$ であり、電子とイオンで同一のプロファイルである。ここで、 n_c は共鳴点における密度、密度勾配のスケール長 $L = 500 \lambda_D$ である。初期の速度分布関数としては (初期の電子温度) / (初期のイオン温度) = $T_e / T_i = 10$ であるマクスウェル分布を用いた (Fig. 10)。また、(イオンの質量) / (電子の質量) = $M / m = 900$ であり、規格化された外部より印加された振動電場の強度は $\epsilon_0 E_0^2 / (2n_c T_e) = 0.01$ であった。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 E_0 は外部振動電場の振幅である。

シミュレーション領域の境界に達した粒子は反射され、粒子保存が保たれるようになっている。外部振動電場とのエネルギーのやりとりまで考慮した全エネルギーを計算し、エネルギー保存からのズレが5%に達した時点で計算を中止した。使用した電子及びイオンの総数はそれぞれ 5,000 であり、本研究で興味のある現象を正しく捉えるためにはまだまだ少なすぎノイズレベルが大きすぎる。この問題をできるだけカバーするため、ここで示す図では、振動電場の強度については外場の一周期にわたっての平均値、空間電位についてはイオンプラズマ周波数の逆数にわたる平均値、さらに空間的には近接セルにわたって平均した値をプロットしてある。但し、位相空間プロットについては、この様な平均操作を施していない (5,000 個全てがプロットされているわけではない)。この様な操作の結果、現象の大まかな特徴は捉えられたと思われる。

時刻 $\omega_{pe} t = 220$ におけるプラズマの様子を Fig. 11 に示す。共鳴点に励起された EPW は $\langle \epsilon_0 E^2 \rangle / (n_c T_e) = 3.3$ (ここで、 $\langle \dots \rangle$ は一周期にわたる時間平均を表す) にまで成長しており、電子が急激に共鳴層より弾き出されるため、共鳴層付近の電位は周囲のプラズマ電位より高くなっている。この時点までにはイオン密度にも強い変調がかかり始めていることが見て取れる。

時刻 $\omega_{pe} t = 320$ (Fig. 12) になると、イオン密度プロファイルもほぼ完全に電子のものに追随している。さらに、プラズマ空間電位は実験で観測されたように共鳴点付近で負のディップを形成するに至っている。イオンの位相空間プロットを見ると Fig. 9 に示した初期の変化の様相を呈しているが、本格的なイオン・ホール生成の生成を捉えるためには粒子数が不足していると考えられる。

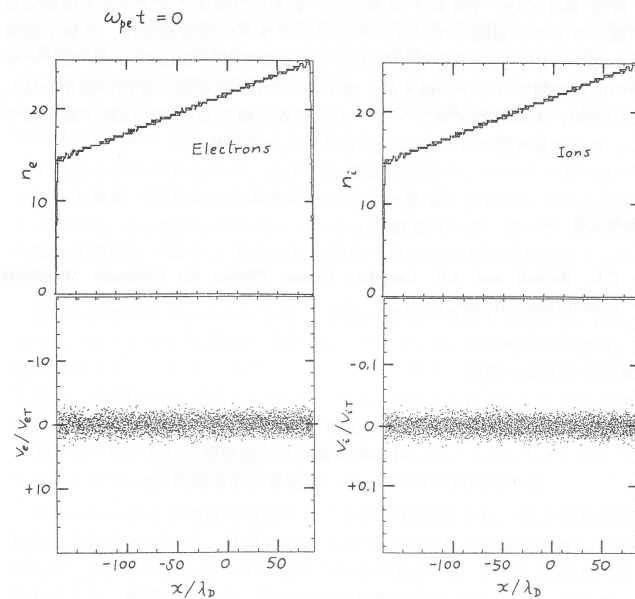


Figure 10. Initial conditions used in our one-dimensional (1-D), electrostatic (es), particle-in-cell (PIC) computer simulations.

5. まとめ

大型の真空容器を用いたマイクロ波-プラズマ系の実験で、キャビトン生成に伴いその近傍のプラズマ空間電位が著しく変化し、電気二重層様の空間電位構造が形成されることが見出された。この電位構造の形成過程を明らかにすべく1次元多粒子モデルに基づくコンピュータ・シミュレーションも実施した。実験及びコンピュータ・シミュレーションの結果から判明したことをまとめると概ね以下ようになる。

マイクロ波の非一様プラズマ中における共鳴吸収の結果として、大振幅静電電子プラズマ波が共鳴層に励起されると、局在化した波動の非線形効果によりプラズマ電子が直ちに共鳴層より弾き出される。そのため共鳴層の電位がまず著しく高くなる。その反動として今度はイオンが共鳴層より排除されるが（キャビトンの生成）、その結果共鳴層に負のポテンシャル・ディップが生成される。これがその後の電位構造形成を誘発することになる。

キャビトン生成に付随してキャビトン付近にイオン・ホール（位相空間内でイオンが局所的に欠落している部分）が発生したことを示唆するデータが得られている。しかしながら、イオン・ホールの電気二重層形成に対する役割は未だ不明であり今後の課題として残されている。

アンテナ近接場を用いて局在化した電子プラズマ波を励起しプラズマ空間電位を制御する試みが以前になされた[22]。これに対して我々の場合は、マイクロ波入射により遠隔的にプラズマ空間電位を制御することができ、境界による影響を排除できるという点でユニークであろう。

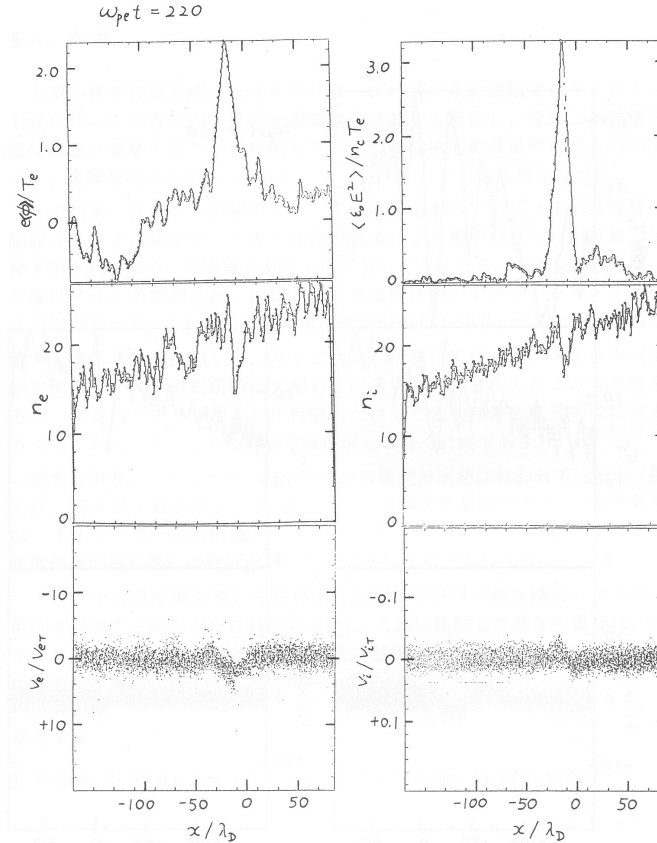


Figure 11. Profiles of the plasma space potential (averaged over the ion plasma period), the oscillating electric field strength (averaged over the electron plasma period), the instantaneous electron and ion densities, and the instantaneous electron and ion phase-space plots at $\omega_{pe} t = 220$.

謝辞

Large Caviton Device の使用を快諾して下さった UCLA の A. Y. Wong 教授に謝意を表したい。Large Space Simulation Chamber の使用にあたっては実験当時 JAXA におられた中村良治先生、担当技官だった故相原賢二氏に大変お世話になったのでここに心よりの謝意を表す。

参考文献

- [1] V. E. Zakharov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **62**, 1745 (1972) [Sov. Phys. JETP **35**, 908 (1972)].
- [2] A. Y. Wong, in *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, edited by Helmut J. Schwarz and Heinrich Hora (Plenum, New York, 1977), Vol. 4B, pp. 783 – 840.
- [3] E. J. Valeo and W. L. Kruer, Phys. Rev. Lett. **33**, 750 (1974).
- [4] K. G. Estabrook, E. J. Valeo, and W. L. Kruer, Phys. Fluids **18**, 1151 (1975).
- [5] 谷川 隆夫, 核融合研究 **68**, 148 (1992).
- [6] 安藤 利得, 飽本 一裕, 谷川 隆夫, プラズマ・核融合学会誌 **81**, 94 (2005).
- [7] A. Y. Wong, P. Y. Cheung, and T. Tanikawa, in *Statistical Physics and Chaos in Fusion Plasmas*, edited by C. W. Horton, Jr. and L. E. Reichl (Wiley, New York, 1984), pp. 131 – 153.
- [8] M. V. Goldman, Rev. Mod. Phys. **56**, 709 (1984).
- [9] D. F. DuBois, H. A. Rose, and D. Russell, J. Geophys. Res. **A95**, 21221 (1990).
- [10] T. Tanikawa, A. Y. Wong, and D. L. Eggleston, Phys. Fluids **27**, 1416 (1984).
- [11] A. Y. Wong and P. Y. Cheung, Phys. Rev. Lett. **52**, 1222 (1984).
- [12] P. Y. Cheung, A. Y. Wong, C. B. Darrow, and S. J. Qian, Phys. Rev. Lett. **48**, 1348 (1982).
- [13] P. Y. Cheung, A. Y. Wong, T. Tanikawa, J. Santoru, D. F. DuBois, H. A. Rose, and D. Russell, Phys. Rev. Lett. **62**, 2676 (1989).
- [14] T. Tanikawa and A. Y. Wong, Radiophys. Quantum Electronics **37**, 596 (1994).
- [15] T. Tanikawa and A. Y. Wong, in *Double Layers and Other Nonlinear Potential Structures in Plasmas*, edited by R. W. Schrittwieser (World Scientific, Singapore, 1993), pp. 309 – 314.
- [16] 谷川隆夫, 「科学研究費補助金研究成果報告書」基盤研究 (C) (2) 07680515 (1995–1996 年度).

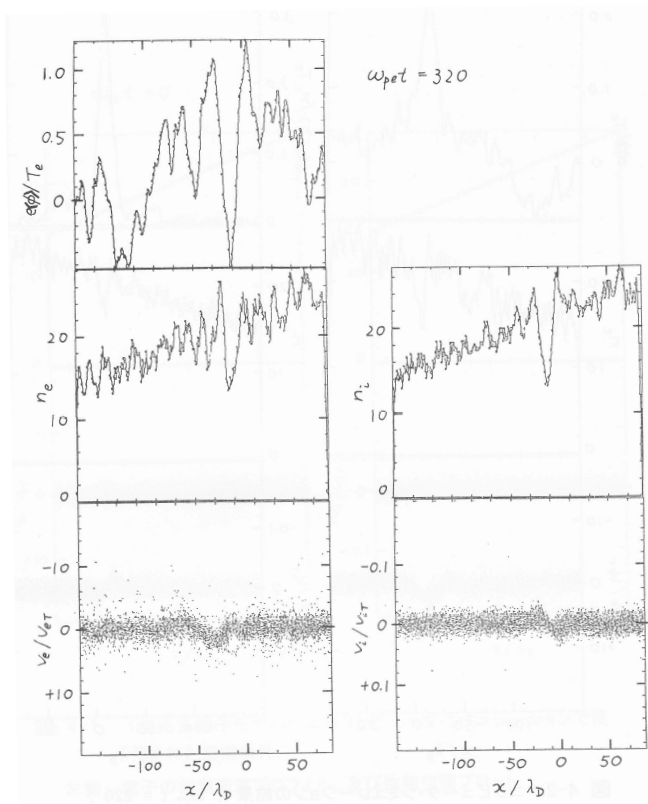


Figure 12. Profiles of the plasma space potential (averaged over the ion plasma period), the instantaneous electron and ion densities, and the instantaneous electron and ion phase-space plots at $\omega_{pe} t = 320$.

- [17] K. Takayama, H. Ikegami, and S. Miyazaki, *Phys. Rev. Lett.* **5**, 238 (1960).
- [18] R. L. Stenzel, H. C. Kim, and A. Y. Wong, *Radio Sci.* **10**, 485 (1974).
- [19] V. L. Ginzburg, *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas*, 2nd ed. (Pergamon, Oxford, 1970).
- [20] A. Hasegawa and T. Sato, *Phys. Fluids* **25**, 632 (1982).
- [21] A. Y. Wong, P. Leung, and D. Eggleston, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 1407 (1977).
- [22] N. Sato, R. Hatakeyama, and N. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **64**, 4196 (1995).

デジタル一眼レフカメラによる鋼球の自由落下の瞬間写真撮影 — 現象とカメラの同期問題 —

横山直樹（総合科学技術研究所）

Synchronization of Digital Camera and Event in Windows and Linux Environment

Naoki Yokoyama (Research Institute of Science and Technology)

キーワード：デジタル一眼レフカメラ 自由落下 同期

Keywords: Digital Camera, Free fall of steel ball, Synchronization

Abstract

Suitable synchronization between camera and free fall event was discussed. Digital camera and event trigger were both controlled by PC. Under semi real-time OS such as Linux, it was much better method to synchronize camera and event.

1. はじめに

比較的あたらしいデジタルカメラ（一眼レフタイプに限らない）では、カメラ本体に USB インタフェースを備えるものが多い。その第一の目的は、Windows や MacOS から接続したカメラをストレージデバイスとして認識し、カメラ内部に保存された画像を PC 側から読み込むことを簡単に行うためである。さらに USB 経由で制御することができるカメラも多数存在する。カメラを PC 等から制御する目的で、各社は自前のアプリケーションを開発するための SDK (Software Development Kit) を配布している場合がある。具体例としては、Canon 製のカメラ (EOS シリーズ) に対しては、EDSDK という SDK が配布されており、これを用いて PC からカメラに対して多様な制御を行うことが可能である。ただし残念なことに、Canon は日本国内ではこの EDSDK をサポートしておらず、入手等に工夫が必要である。また USB 経由でカメラのシャッター制御を行い、現象との同期をはかる場合には、そのタイムラグが問題となる。本論文では、対象現象として鋼球の自由落下を取り上げ、EDSDK を使ってカメラのシャッター制御を行った場合、カメラのレリーズ接点のオン-オフを PC から制御してシャッター制御を行った場合を Windows あるいは、Linux で実験し、瞬間写真の同期において最適な手法を比較検討した。

2. 実験方法

本研究で用いた対象現象は直径 25.5mm の鋼球を白色塗装したものを、直流リレーから取り外した電磁石でつり下げておき、その励磁電流をカットした際の自由落下であった。PC 側からの制御回路を Fig. 1 に示す。ここで電磁石（コイル）と並列に入っているダイオードは誘導逆起電力による回路の損傷を防ぐためのものである。Vcc は Fig. 2 にあるように 28V 程度で十分に鋼球の吸着が可能であるから、Fig. 1 のようにディスクリートのトランジスタでドライブするのではなく、オープンコレクタ型の外部 I/F であれば、直接 I/O カードからドライブすることもできる。後半のレリーズコントロールの際は、そのようにした。

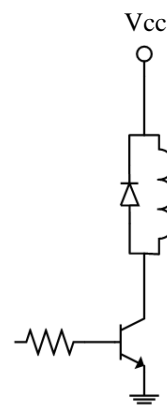


Fig. 1 Schematic of solenoid driver circuit

Fig.2 において、図右側のスケールは位置の概略を測定するために配置している。また長さの校正のためにも使用した。カメラのシャッター制御は、EDSDK によるものと、リリースを I/F を介してオン・オフする二つの方式を用いた。後者は、汎用の DIO ボード(Interface 社 PEX-285122) を用いた。このボードは、Windows のみならず、Linux のドライバも供給されているので、Linux から自由落下とカメラのシャッター制御を行った。

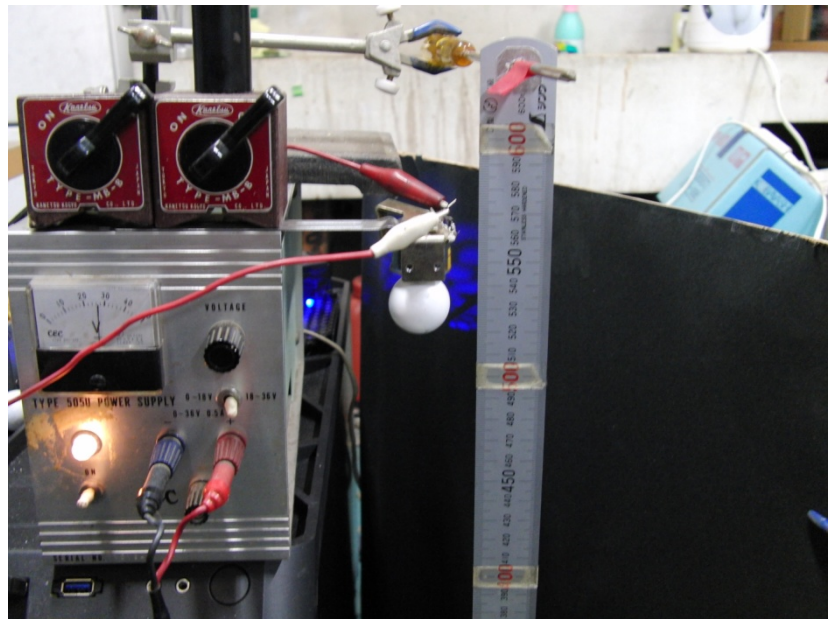


Fig. 2 Schematics of solenoid driver

3. 実験結果

まず鋼球を自由落下させ、適当なディレイタイムの後にシャッターを EDSDK 経由で切ることによって瞬間写真を得た。その結果を Fig. 3-1~2 に示す。この時のディレイタイムはゼロ (ディレイ無し) であった。Fig. 3-1 はシャッタースピードが 1/1600 秒の場合、3-2 は 1/3200 の場合である。レイアウト上紙面では鉛直方向が左右方向になっている。左端付近にソレノイドの端面を見ることができる。鋼球はソレノイド端面を離れ、右側へ落下していくことになる。

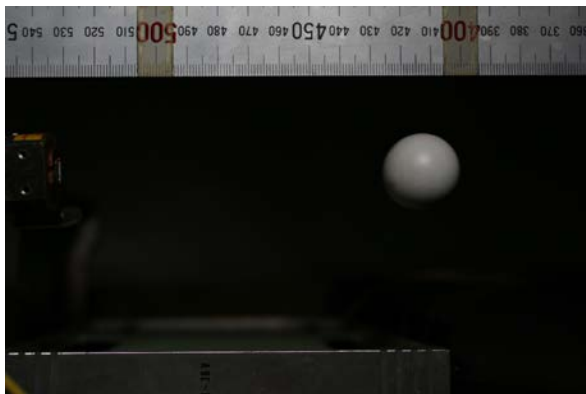


Fig. 3-1 Experimental Result 1 SS=1/1600

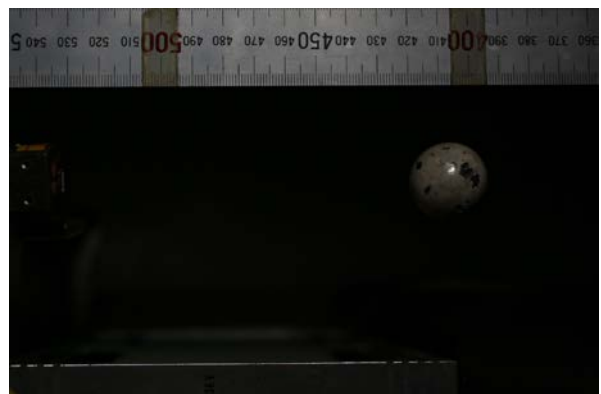


Fig. 3-2 SS=1/3200

シャッタースピードが短くなり、わずかに右側の画像が暗くなっているが、対象物体のブレはほぼ無視できる程度になっている。ここで問題なのは、ディレイタイムがゼロなのに、物体がすでに 115mm 程落下していることである。これは EDSDK のオーバーヘッドによるものと考えられ、タイミングを逆にすることで落下初期の物体を捕らえることは一応可能である。つまり EDSDK 経由でシャッターを切り、その後現象をトリガする。これを便宜上リバーストリガと呼び、通常のトリガをノーマルトリガと称している。リバーストリガで撮影した結果(ss=1/1600)の一例を Fig. 4 に示す。



Fig. 4 Experimental result in case of “Reverse synchronization” $ss=1/1600$

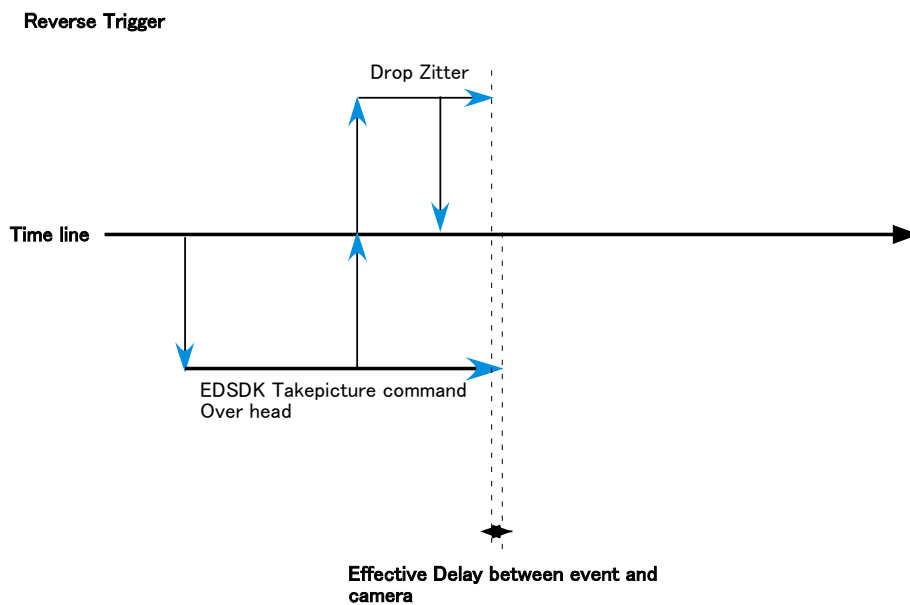
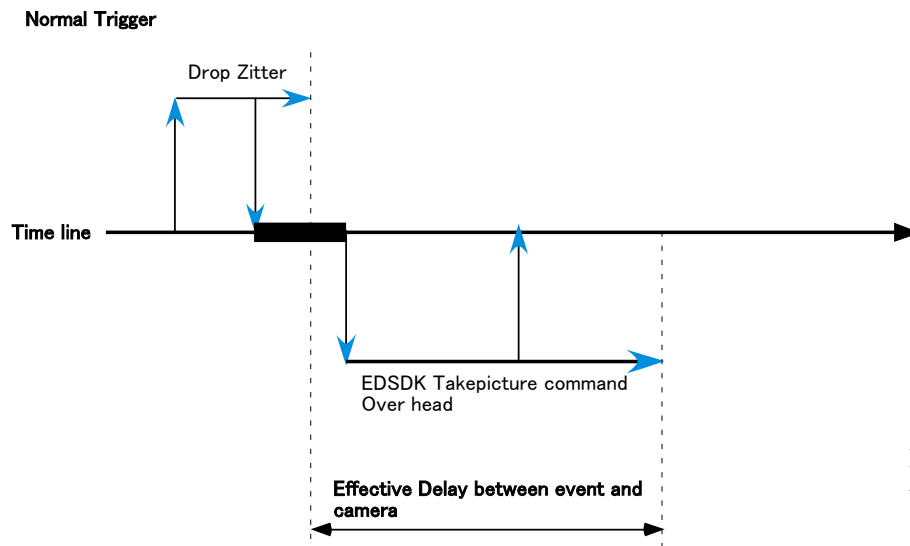


Fig. 5 Difference of effective delay time between “Normal Trigger” and “Reverse Trigger”

Fig.4 で明白のように、現象の初期が記録できてはいるが、ここからディレイタイムを増加しても、落下位置が上がる（上図では左にずれる）だけである。この関係を図で説明したものが、Fig. 5 である。この図で上側 Normal Trigger の時間軸上の太線部分が CPU による delay time である。Zitter の時間は誇張して描いている。また実際にはこの Zitter 等もばらつきがあることが予想される。

この関係図からわかるように、EDSDK でシャッターを切ることを行う限り、Fig.4 での対象物体と Fig. 3-1 のそれとの中間状態を捕らえることは困難である。もちろんマルチスレッドを利用して、対象物体を落とすことと、EDSDK でシャッターを切ることを別時間軸で並列に行うことができれば、もっと柔軟にデッドタイム（欠落時間）も無く同期が可能となるが、EDSDK のイベント処理の根幹に関わり、これは技術的・時間的な点で困難であった。従って、次に前述の Digital I/O ボードを利用して、鋼球の落下およびシャッター制御の両方を行った実験について述べる。EDSDK を経由する場合は所詮 USB 経由の制御になるので、高速とはいえシリアル制御特有の Zitter やオーバーヘッドが問題となるが、Digital I/O ボードにより直接ドライブする場合は、ソレノイドやカメラ内部での処理のオーバーヘッド以外は比較的問題になりにくいと思われる。カメラのリリース接点を直接ドライブする回路は、フォトカプラ TLP621 を用いて入出力をアイソレートしたものを採用した。回路は単純なものなので、回路図は省略する。撮影結果の一部を Fig. 6 に示す。



Fig. 6 Experimental Results from left to right delay time was varied

上図に見られるように、現象初期から物体を撮影できている。つまり Fig. 3-2 と Fig. 4 の間を埋めるタイミングでも記録可能であり、瞬間撮影では問題となるデッドタイム（記録不能時間帯）を取り除くことが可能であった。次に、現象初期の一連の撮影から、カメラのリリース接点を直接ドライブした場合のカメラの反応時間を検証してみた。一連の撮影結果（一部）を Fig. 7 に示す。Fig. 6 より若干拡大しているのは、位置＝時間計測精度を少しだけ高めるためである。

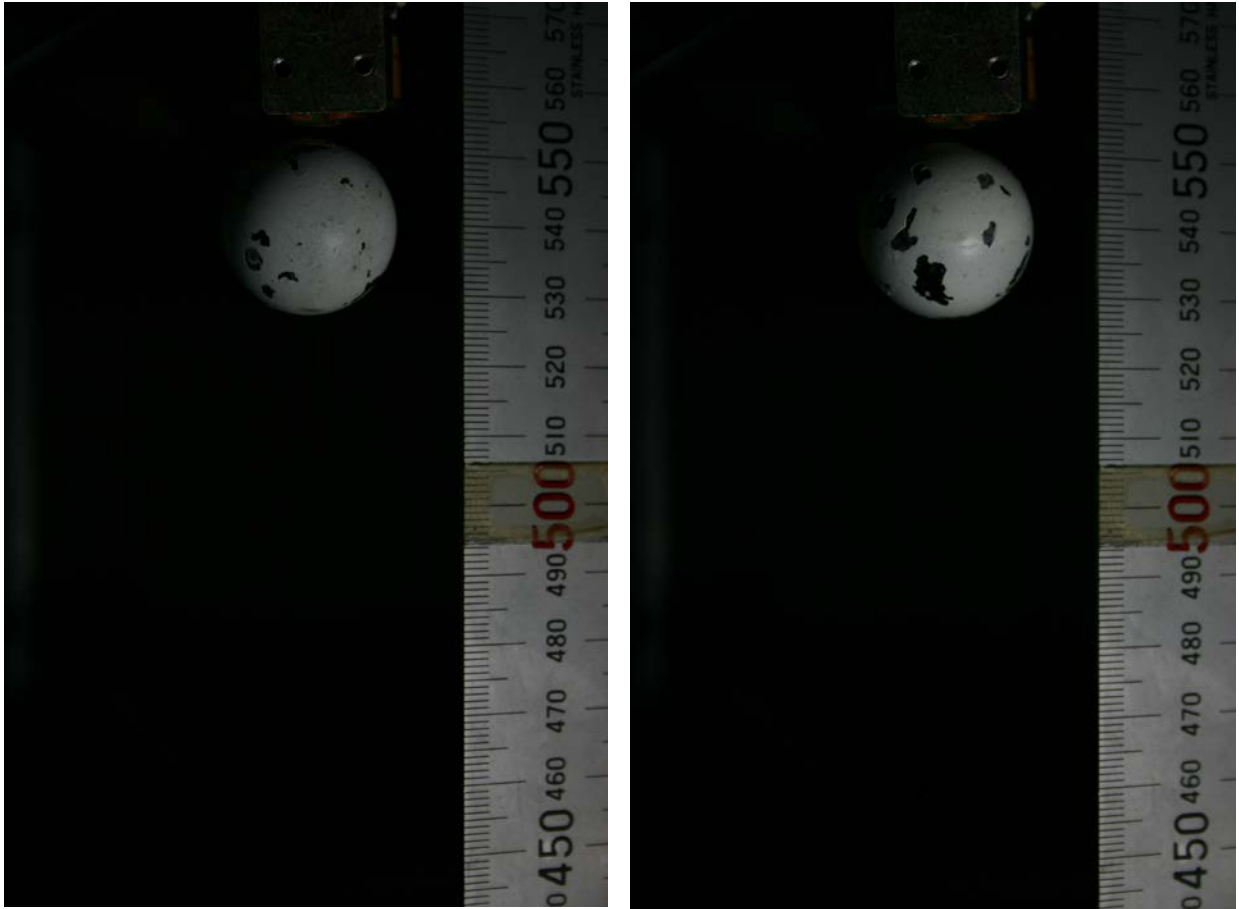


Fig. 7 Experimental Results in case of small delay time

Fig. 7 の撮影結果から、設定遅延時間と鋼球の位置からカメラの応答時間を解析した。カメラの応答時間は機械系であるから、回路の応答時間のばらつきに比べるとかなり大きいと考えられが、結果を表としてまとめると次ページの Table 1 が得られた。この結果から、初期のデジタル一眼レフカメラである、EOS Kiss Digital N は、レリーズ接点をショートしてから約 256ms の遅れでシャッターが切れるということがわかった。カメラには機種固有のレリーズタイムラグ²⁾が存在するのであるが、その値の倍の結果になった。正式な公表値や計測方法が定かではないが、値自体を検討するためには、別機種で同様な実験をすることが必要となるであろう。

4. 結論

デジタル一眼レフカメラを PC から制御し、鋼球の自由落下を撮影した。制御は、カメラの USB 端子をカメラ専用の SDK からドライブする方法と、カメラのレリーズ端子を直接電氣的にショートする二つの方法を用いた。前者の場合は、瞬間写真としては致命的な現象欠落時間帯が現れてしまった。後者の方法では現象の駆動順序を工夫することで、比較的自由的な遅延時間を実現できた。カメラの応答時間としては 256ms 程度という結果となった。現象の撮影の場合は、この値を考慮する必要がある。今後は比較的新しいカメラで同様な実験を行い、カメラディレイの比較検討を行い、デジタル一眼レフカメラを PC から制御して瞬間写真撮影を行う場合の同期問題を実験的に検討したい。

Table 1 EOS Kiss Digital Experimental Results

| EOS Kiss Digital 計測結果 | | | | | | |
|-----------------------|--------|-------|----------|---------|-----------------|----------------|
| exp # | 鋼球上縁位置 | ソレノイド | 落下距離 (m) | 換算時刻(s) | デレイ設定 時間(ms) | カメラデレイ (ms) |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | 432.5 | 553 | 0.121 | 0.157 | 100 | 256.8 |
| 4 | 443 | 553 | 0.110 | 0.150 | 110 | 259.8 |
| 5 | 465 | 553 | 0.088 | 0.134 | 120 | 254.0 |
| 6 | 468 | 553 | 0.085 | 0.132 | 130 | 261.7 |
| 7 | 487.5 | 553 | 0.066 | 0.116 | 140 | 255.6 |
| 8 | 497.5 | 553 | 0.056 | 0.106 | 150 | 256.4 |
| 9 | 502 | 553 | 0.051 | 0.102 | 160 | 262.0 |
| 10 | 517 | 553 | 0.036 | 0.086 | 170 | 255.7 |
| 11 | 523 | 553 | 0.030 | 0.078 | 180 | 258.2 |
| 12 | 532 | 553 | 0.021 | 0.065 | 190 | 255.5 |
| 13 | 534 | 553 | 0.019 | 0.062 | 195 | 257.3 |
| 14 | 532 | 553 | 0.021 | 0.065 | 197 | 262.5 |
| 15 | 538 | 553 | 0.015 | 0.055 | 199 | 254.3 |
| 16 | 535 | 553 | 0.018 | 0.061 | 202 | 262.6 |
| 17 | 543 | 553 | 0.010 | 0.045 | 210 | 255.2 |
| 18 | 545 | 553 | 0.008 | 0.040 | 220 | 260.4 |
| 19 | 550 | 553 | 0.003 | 0.025 | 230 | 254.7 |
| 20 | 550 | 553 | 0.003 | 0.025 | 240 | 264.7 |
| 21 | 553 | 553 | 0.000 | 0.000 | 250 | 250.0 |
| 22 | 551.5 | 553 | 0.002 | 0.017 | 245 | 262.5 |
| 23 | 552 | 553 | 0.001 | 0.014 | 245 | 259.3 |
| 24 | 552.5 | 553 | 0.001 | 0.010 | 247 | 257.1 |
| 25 | 552 | 553 | 0.001 | 0.014 | 243 | 257.3 |
| 26 | 552 | 553 | 0.001 | 0.014 | 240 | 254.3 |

参考文献なし URL

- [1] <http://www.h5.dion.ne.jp/~p-taro/kizai/kamera/reri-zutimragu.html>
- [2] http://cweb.canon.jp/pls/webcc/wc_show_contents.EdtDsp?i_cd_pr_catg=%3C%21--%25PRODUCT%25CATG%25CODE%25+-%3E&i_cd_pr=%3C%21--%25PRODUCT%25CODE%25+-%3E&i_cd_qasearch=Q000009125&i_cl_form=%3C%21--%25FORM%25CL%25+-%3E&i_tx_search_pr_name=%3C%21--%25PRODUCT%25SEARCH%25WORD%25+-%3E&i_tx_contents_dir=%2Fe-support%2Ffaq%2Fanswer%2Feosd&i_tx_contents_file=9125-1.html&i_tx_keyword=%3C%21--%25KEY%25WORD%25+-%3E&i_tx_qasearch_url=%3C%21--%25QA%25SEARCH%25URL%25+-%3E&i_cd_transition=%3C%21--%25TRANSITION%25CODE%25+-%3E&i_fl_edit=%3C%21--%25EDIT%25FLAG%25+-%3E

一般住宅における青色光生体リズム障害量の測定とその評価

竹下 秀（東海大学 総合科学技術研究所）

Measurement and evaluation of melatonin suppression irradiance emitting from different light sources in a domestic lighting condition

Shu TAKESHITA (Research Institute of Science and Technology, Tokai University)

キーワード：青色光, 生体リズム, メラトニン分泌抑制放射量

Keywords: blue light, circadian rhythm, melatonin suppression irradiance

Abstract

Melatonin suppression irradiances emitting from incandescent lamp, fluorescent lamps and LED lamps in a domestic lighting condition were measured and evaluated. Melatonin suppression irradiance of LED lamps at a position of eye measured are about 30 % higher than that of fluorescent lamps which correlated colour temperature as same as LED lamp. This phenomenon is caused by the differences of total flux of light source. If illuminance at a position of eye produced by LED lamp is as same as by fluorescent lamp, melatonin suppression irradiance is as same as irradiance produced by fluorescent lamp. Melatonin suppression irradiance depends on the correlated colour temperature. The high correlated colour temperature light source produces high melatonin suppression irradiance, clearly.

1. はじめに

日本国内におけるオフィスや一般住宅用の照明光源は、主力光源として使われてきた蛍光灯から固体光源である白色 LED ランプに急速に変わりつつある状況が製品出荷統計に表れている。一般照明用器具の白色 LED を含む SSL 器具が国内出荷数に占め割合は、2013 年には 43 %、2020 年には 100 %になると予測されている¹⁾。このように国内で白色 LED 化が進む背景には、白色 LED が環境負荷に優しい省エネルギー光源であるとの理解が一般に浸透したことと、「エコポイント」という政治的な施策によると考えられる。一方、世界に目を向けると、パリの地下鉄の駅では構内設備の改装工事が 2014 年春から実施され、これに伴って照明は白色 LED 化されている。これは省エネルギーに関する EU 指令に対応するためである。さらに、国際的な施策として、水銀に関する水俣条約が 2012 年 10 月に締結された。この水俣条約が発効すると一般照明用蛍光灯は水銀の使用量により、その製造・流通・販売が規制される²⁾。いまや、脱蛍光灯・白色 LED ランプ化は世界的な潮流である。白色 LED の普及とともに注目され始めたのは、白色 LED の白色光に含まれる青色光による障害の懸念である。

なお、青色光による「障害」という用語は、照明分野では「障害」と「傷害」の 2 つに分類し、それぞれ別の意味を持たせている。照明分野では「障害」という用語は、生物の最小単位である細胞は傷ついていないが、十分な機能を果たさないという意味で使用される。この代表例は、青色光による人間の生体リズム障害(概日リズム障害、サーカディアンリズム障害とも呼ばれる)である。一方、「傷害」という用語は、生物の最小単位である細胞が傷つき、十分な機能を果たさないという意味で使用される。この代表例は、青色光による人間の眼の網膜傷害である。

本研究では、青色光による生体リズム障害に着目し、一般住宅において照明光源を取り換えた際の青色光による生体リズム障害量の違いを分光放射照度測定によって評価した結果を報告する。

2. 実験方法

照明は、一般住宅においてさまざまな作業で使用されている。本研究では、同一場所での作業時間と照明器具までの距離に着目した。同じ場所での作業時間が長く、照明器具までの距離が近い場合、作業中に目に照射される光のエネルギーは大きくなる。本研究では、ダイニングで食事をしている場面を評価対象に選択した。これは、1) 大部分の住宅では、ダイニングテーブルの中央上方にはテーブルを照らすペンダント形の照明器具が取り付けられ、この照明器具は天井から吊り下げられているため、目と照明器具との距離は必然的に近いこと、2) 1回の食事時間は30分以上と考えられるため同じ体勢でいる時間が長い時間である。一般住宅のダイニングにおいて椅子に着席状態での目の位置における鉛直方向の光の分光放射照度を測定し、生体リズム障害量を評価した。評価したダイニングの測定装置の配置と照明器具を図1に示す。

実験に使用したダイニングのテーブルの中央上方には、E26口金が2つ取り付けられたペンダントが吊り下げられている。光源は、白熱電球、電球形蛍光ランプ、LED電球を選択した。これは、白熱電球から電球形蛍光ランプへ、そしてLED電球へ、一般消費者が自分自身でペンダントに装着する光源を取り換える場面を想定している。ペンダントの2つの口金に60W白熱電球（フロストバルブ）、60形電球形蛍光ランプ（フロストバルブ：電球色、昼白色、昼光色）、60W白熱電球相当の明るさのLED電球（フロストバルブ：電球色、昼白色、昼光色）を順番に取り付けた。LED電球は広配光タイプの製品を選択した。また、電球形蛍光ランプは、同一製造会社の同一型式の光源色が異なる製品を選択した。電球形LED電球は、電球色と昼白色は同一製造会社の同一型式であり、昼光色のみ製造会社が異なる。評価した電球形蛍光ランプとLED電球を図2に示す。

椅子に着席した時の目の高さは、経済産業省が平成16年度から18年度に実施した人間特性基盤整備事業（size-JPN 2004-2006）の調査結果で得られた全年代（20歳から80歳）の男女平均値を利用した³⁾。椅子に着席した時の目の高さは、この調査結果で得られた水平な座面から外眼角点までの鉛直距離座位外眼角高と、足底支持面から膝のすぐ後にある大腿二頭筋の腱までの鉛直距離である座位膝窩高を足し合わせた高さとなり、113 cmである。なお、この時の目からペンダントまでの距離は89 cmとなる。

目に入射する光の分光放射照度は、分光放射照度計（S2440、相馬光学）を使用して測定した。計測器の受光部は、椅子に着席した時の床から目の高さの位置（床から113 cmの高さ）に、床に

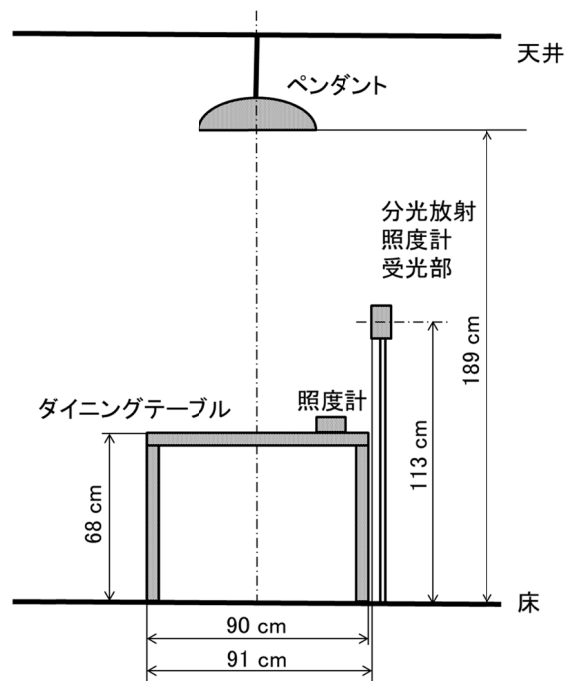


Figure 1 schematic layout of this research.



Figure 2 Light sources used for this research

対して鉛直に、照明器具の方角に向けて設置した。この分光放射照度計はアメリカ国立標準技術研究所（NIST）トレーサブルの分光放射照度標準電球によって校正されている。テーブル上の個人の食器を配膳する位置には、照度計（T10p、JIS AA 級、ユニカミノルタ）を設置し、テーブル上の水平面照度も同時に測定した。評価したダイニングとペンダントに取り付けた光源の写真を図 3 に示す。

測定は、光源の安定時間を考慮し、光源点灯から 30 分以上経過した後に、ダイニングテーブル上のペンダント以外のすべての照明器具は消灯した条件で、夜間を実施した。



Figure 3 Photograph of the dining evaluated.

測定した分光放射照度を生体リズム障害量に変換するための生体リズム障害の作用スペクトルには、ドイツ規格協会（DIN）によって規格化されているメラトニン分泌抑制作用スペクトル⁴⁾を使用した。メラトニン分泌抑制放射量は、測定した分光放射照度にこの作用スペクトルを波長別に乘じて波長積分して算出した。使用したメラトニン分泌抑制作用スペクトルを図 4 に示す。この方法で算出されたメラトニン分泌抑制放射量は、角膜上のメラトニン分泌抑制放射量となる。さらに、明るさの基本単位である角膜上の照度も分光放射照度から計算した。本論文では、これを角膜照度と定義する。

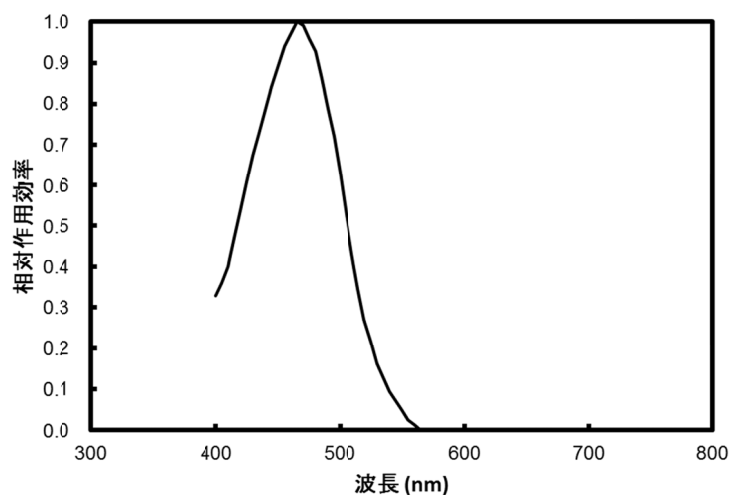


Figure 4 Melatonin suppression spectrum defined by DIN.

3. 結果と考察

光源色ごとの分光放射照度の測定結果を図5に示す。光源によって分光放射照度が異なることが明らかになった。測定結果を用いて算出した光源の相関色温度、光源の全光束（カタログ値）、水平面照度、角膜照度、メラトニン分泌抑制放射量を表1に示す。表1に示す結果より、同じ光源色の蛍光灯とLED電球を比較すると、LED電球の方がメラトニン分泌抑制放射量はすべての光源色で約30%大きいことが明らかになった。さらに、水平面照度と角膜照度は、蛍光灯よりもLED電球がすべての光源色で約31%大きいこともわかる。蛍光灯よりもLED電球のほうが、メラトニン分泌抑制放射量、水平面照度および角膜照度が大きい理由は、使用したランプの全光束のカタログ値が、LEDランプのほうが平均で約11%大きいことに主に起因すると考察される。電球から蛍光灯に取り換えたときは部屋が暗くなり、蛍光灯からLEDランプに取り換えた際に、部屋が明るくなったと感じたが、測定値からこの感覚が正しいことが確認された。

角膜照度が500 lxあたりのメラトニン分泌抑制放射量を計算し、これと相関色温度の関係を図6に示す。図6より、LED電球のメラトニン分泌抑制放射量は、角膜照度が蛍光灯と同一ならば蛍光灯とほぼ同一であり、光源の相関色温度が高くなると増加することが明らかになった。この結果は、高橋の報告⁵⁾と一致する。

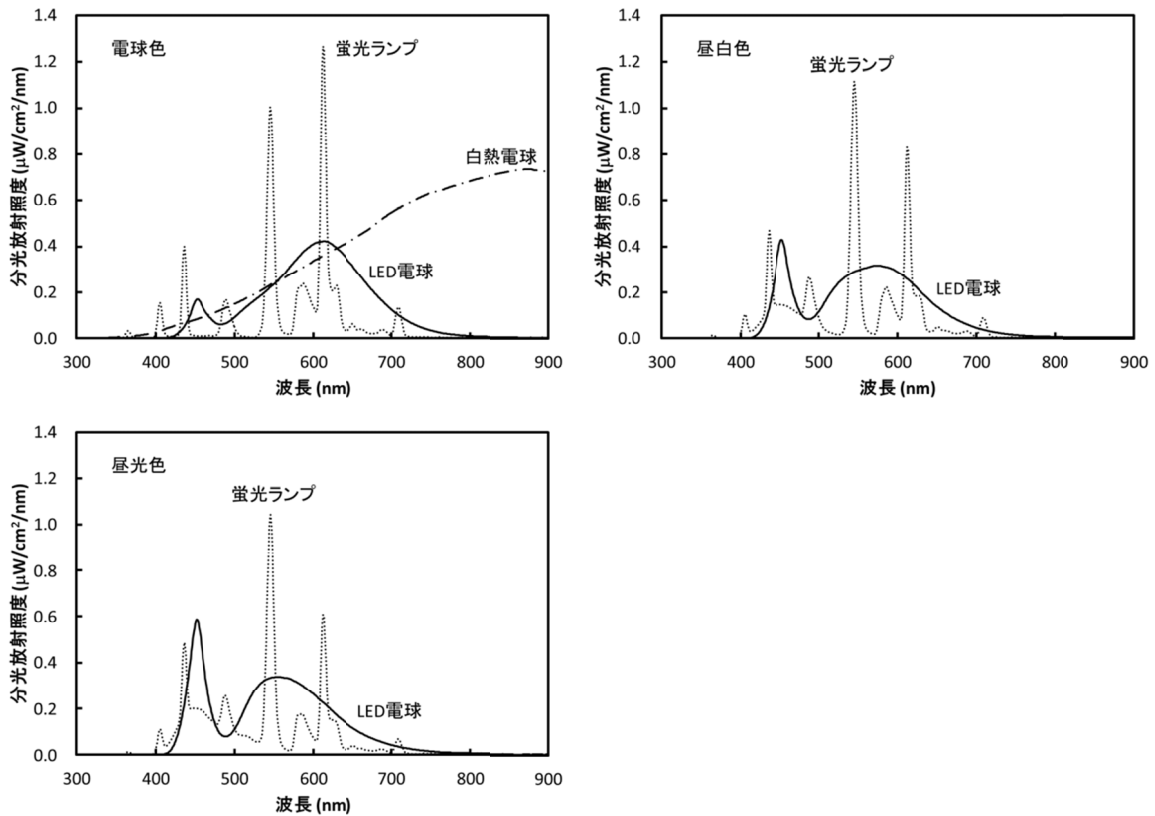


Figure 5 Spectral irradiance measured at the position of eye in the dining.

Table 1 Correlated colour temperature, total flux, horizontal luminance, cornea irradiance and melatonin suppression irradiance measured at the dining coursed by different light sources.

| 光源 | 相関色温度 (K) | 全光束 ¹⁾ (lm) | 水平面照度 (lx) | 角膜照度 (lx) | メラトニン分泌抑制放射量 (W/m ²) |
|---------|-----------|------------------------|------------|-----------|----------------------------------|
| 白熱電球 | 2831 | 810 | 238.0 | 190.7 | 0.05047 |
| 蛍光灯電球色 | 2865 | 725 | 180.0 | 150.7 | 0.03092 |
| LED 電球色 | 2629 | 810 | 240.0 | 195.0 | 0.04343 |
| 蛍光灯昼白色 | 4784 | 780 | 191.3 | 153.3 | 0.06884 |
| LED 昼白色 | 4711 | 810 | 230.0 | 190.1 | 0.08437 |
| 蛍光灯昼光色 | 6499 | 695 | 170.0 | 142.0 | 0.08243 |
| LED 昼光色 | 5956 | 810 | 239.0 | 198.1 | 0.1073 |

1) 全光束はカタログ値

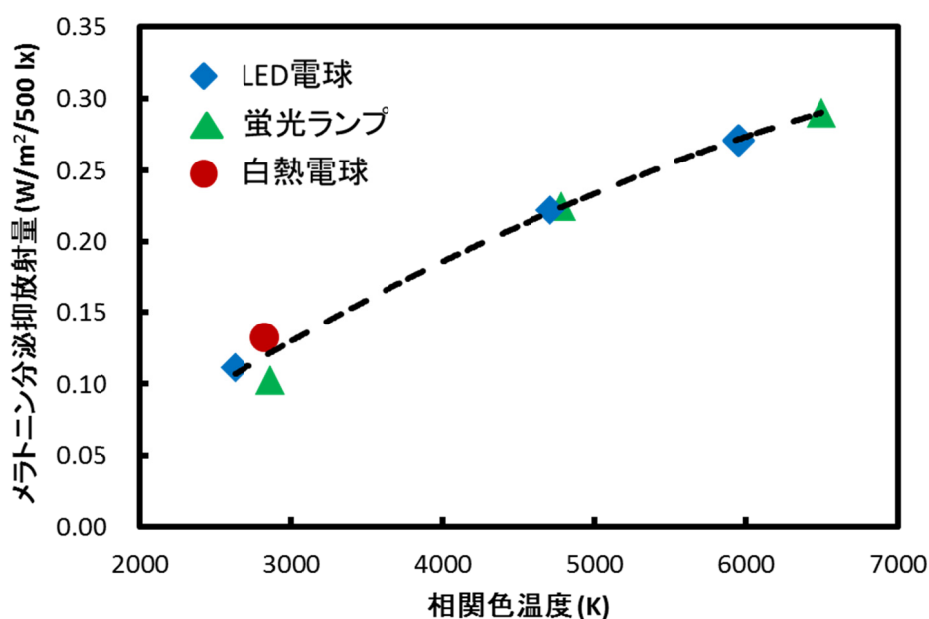


Figure 6 Relationship between correlated colour temperature and melatonin suppression irradiance measured at the position of eye in the dining.

メラトニン分泌抑制反応の発生に必要な光エネルギー量は明らかにされていない。また、日本やアジアの国々では、ヨーロッパや北米の国々と異なり、相関色温度が高い昼白色や昼光色の蛍光ランプがこれまで主に使用されてきた。しかし、これらの国々で、通常の生活の場面においてメラトニン分泌抑制反応が発生した（生体リズム障害が発生した）という報告は認められない。

さらに、メラトニン分泌抑制反応を引き起こす信号を発する内因性光感受性網膜神経節細胞 (ipRGCs) の網膜内での存在場所が特定されていない。本研究では目の高さにおける分光放射照

度を測定し、この測定結果から角膜上のメラトニン分泌抑制放射量を計算した。しかし、人間の目には角膜と水晶体という光学系がある。このため、角膜上のメラトニン分泌抑制放射量で評価するのではなく、網膜上におけるメラトニン分泌抑制放射量を、この光学系を考慮して評価する必要がある。

一般照明器具は、通常、視野に入らないよう設置されているため、長時間直視することはない。本研究の測定条件でも、照明器具の見込み角は約 59 度となる。つまり、メラトニン分泌抑制反応の発生が光化学の第 1 法則（Grotthus-Draper の法則）に従うと仮定し、目の光学系を考慮すると、ipRGCs が網膜の中心窩から 59 度離れた場所に存在しない限り、照明によるメラトニン分泌抑制反応は発生しない。以上のべた理由により、メラトニン分泌抑制反応は、作業空間における照明が原因で発生すると断定できない。メラトニン分泌抑制反応の発生原因を明らかにするためには、ipRGCs の網膜内での存在場所の解明が必須と考察される。

4. 結論

本研究では、一般住宅で実際に行われることが容易に予想される蛍光灯から LED 電球への光源取り換えによる角膜におけるメラトニン分泌抑制放射量の変化を、分光計測の結果から推定した。この結果、蛍光灯から同色で、同一の明るさを謳う LED 電球への取り換えによる角膜上のメラトニン分泌抑制放射量は、約 30 %の増加が見込まれた。この原因は、蛍光灯と LED 電球の全光束の違いにあることを明らかにした。蛍光灯を、同色で角膜照度が同一になる LED 電球に取り換えた場合は、LED 電球への取り換えによってメラトニン分泌抑制放射量は決して増えると言えないことが示された。ただし、相関色温度がより高い製品に取り換える場合や、同色でもより明るい、全光束が大きい製品に取り換える場合は、メラトニン分泌抑制放射量が増える可能性があることが示された。

現在のところ、メラトニン分泌抑制反応の発生に必要なエネルギー量は明らかにされていない。また、メラトニン分泌抑制反応を引き起こす信号を発する ipRGCs の網膜内での存在場所が特定されていない。さらに、人間の目は光学系を有している。以上をまとめると、メラトニン分泌抑制の発生原因が一般照明にあるとは断定できないと考察された。青色光による生体リズム障害に関する研究では、ipRGCs の網膜内での存在場所の特定が優先課題であると考えられる。

最後に、本研究で使用した分光放射照度計を貸与してくださった相馬光学関係者と、ダイニングを利用して頂いた家主に、この場を借りて謝意を表します。

5. 参考文献

- [1] (一社) 日本照明工業会: 照明成長戦略 2020.
http://www.jlma.or.jp/information/LV2020_web.pdf
- [2] (一社) 日本電球工業会: 水銀に関する条約の制定について.
http://www.jlma.or.jp/information/20130125UNEP_Suigin.pdf
- [3] 経済産業省: size-JPN 2004-2006 調査結果について
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1368617/www.meti.go.jp/press/20071001007/20071001007.html>
- [4] DIN V5031-100: 2009, “Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren”.
- [5] 高橋良香: 生物時計機構への作用の定量化に関する研究動向, 照明学会誌, 96(10), 713-716, 2012.

■第 247 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2013年9月11日(水) 10:00～11:00

テーマ：「理科教育における演示実験」

所 属：日本工業大学 准教授 佐藤 杉弥

科学技術教育およびその前段である理科教育において実験の果たす役割は大きい。特に自然現象を身近に体験することが少なくなり、理科離れの叫ばれる昨今ではその重要性は増している。教育における実験には大きく演示実験（教師実験）と学生実験があるが、ここでは主にモチベーション喚起を目的とした演示実験についてとりあげる。演示実験はファラデー以来の伝統があるクリスマスレクチャーが有名であるが、特に学生実験では行い難い大規模なものや危険性のあるものにその効用がある。演示実験は現在も新たな実験開発や改良が各所でおこなわれているが、我々が開発・実施しているものをいくつか紹介する。それらはTVでもしばしば取り上げられている大型真空砲（大気圧砲）、新方式の光学演示装置やモンキーハンティング実験、液体窒素を用いた低温実験、セグウェイを用いた力学講義、クント管による定常波の実験などである。これらの内容および実施事例について映像も交えて述べる。また、これらの実験の解析を通じて、物理としての新しい知見が得られることや、大学レベルでの高度な活用が期待できることもあわせて報告する。また、実際の真空砲の試射も体験していただく。

■第 248 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2013年10月23日(水) 10:30～11:30

テーマ：「高速度ビデオグラフィにおける運動解析プログラムの開発

- 粒子などを対象とした ROI の自動生成 -」

所 属：総合科学技術研究所 教授 横山 直樹

高速度ビデオシステムによって記録された動画を対象とし、対象物体の運動を自動解析するプログラムを開発し、その有効性を実験的に検証してきた。特に時間分解能を高めた高速度ビデオシステムにおいては、空間分解能に制限があり、各フレームにおける対象物体の位置の計測精度が低くなりがちであるが、画像相関値を評価関数とし、その極大値が得られる位置を物体位置として把握するアプローチでは、位置情報をサブピクセルの単位で求めることが可能であること示した。しかし正規化相関を用いたアプローチでは、その計算量が膨大になるために、実用的にはなんらかの計算負荷軽減が必要である。そのために相関計算を並列化することを試み、CPUの複数のコアあるいはGPUを利用することで高速化が可能であることを示した。

今回は、画像処理の手法により、原画像に多数含まれる粒子や気泡を対象とし、その外郭となるようなROI(Region of Interest)を自動生成することを目指す。このROIデータを利用して運動解析プログラムから相関計算によるトレースを行う。

■第 249 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2013年12月6日（金）10:30～11:30

テーマ：「光源及び光源装置の光生物学的安全性評価規格の課題」

所 属：総合科学技術研究所 准教授 竹下 秀

国際照明委員会（CIE）によって規格化された光源及び光源装置の光生物学的安全性規格 CIE S009: 2002 は、この分野唯一の国際規格として全世界で活用されている。CIE は 2013 年 4 月の CIE100 周年記念大会に併せて開催された CIE 理事会においてこの規格の改訂作業の開始を決定し、国際電気会議（IEC）と共同でその作業を開始した。現行規格の最大の問題点は、光放射計測上の制限を全く考慮せずに規格が制定されたことである。このためこの規格に基づいて評価可能な光源及び光源装置は、評価対象の製品の極一部である。この談話会では、光放射計測上の問題点などを講演する。

■第 250 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2014年1月19日（水）10:30～11:30

テーマ：「ヘリコン・無電極プラズマスラスターの開発」

所 属：総合科学技術研究所 教授 谷川 隆夫

外部磁界のある環境下に高周波を用いて高効率でプラズマを生成するヘリコンプラズマ源は、容易に高密度プラズマを生成することが可能で、汎用性が高く、プラズマのいろいろな分野で注目されている。励起アンテナをプラズマ外部に設置すれば摩耗部品のない「無電極」プラズマ源である。ヘリコンプラズマ源で生成されたプラズマを「無電極」電磁加速することで、高効率・長寿命である究極の電気推進機が実現可能である。この、ヘリコン・無電極プラズマスラスターの開発を目指す基礎研究が HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thrusters) Project（代表者：篠原俊二郎 東京農工大学教授）として進められている。このプロジェクトでは既に種々のユニークな特徴を持つヘリコンプラズマ源を完成させてきている。話題提供者も参加しているこのプロジェクトの今までの成果について紹介する。完全無電極プラズマスラスターは将来の深宇宙探査などで必須の推進機であるが、このような推進機の基礎開発研究をこれだけ系統的に進めてきているグループは世界に類がない。今後のさらなる成果が期待されている。

東海大学 総合科学技術研究所 紀要編集委員会

委員長 渡邊 幹夫 総合科学技術研究所 所長
理学部化学科 教授

委員 横山 直樹 総合科学技術研究所 教授

事務局 志賀 桂子 研究推進部研究支援課
(総合科学技術研究所担当)

本紀要の全ての掲載情報は、著作権者の許諾なしに、著作物の全部または一部を無断で複製複製（コピー）することは、著作権法上での例外を除き、禁じられています。



Research Institute of Science and Technology

東海大学紀要 総合科学技術研究所

発行日 2015年3月31日

発行人 渡邊 幹夫（東海大学総合科学技術研究所 所長）

発行 東海大学総合科学技術研究所

住所 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目四丁目1番1号

電話 0463-58-1211（代表）

Proceedings of Tokai University
Research Institute of Science and Technology

東海大学紀要

総合科学技術研究所

2013 Vol.34



Research Institute of Science and Technology