

水中ストリーマ放電における分岐現象の統計学的解析

市來龍大*, 金澤誠司, 友清浩介, 赤峰修一 (大分大学)

M. Kocik, J. Mizeraczyk (ポーランド科学アカデミー)

Statistical study on branching phenomena of underwater streamer discharge
Ryuta Ichiki*, Seiji Kanazawa, Kosuke Tomokiyo, Shuichi Akamine (Oita University)
Marek Kocik, Jerzy Mizeraczyk (Polish Academy of Sciences)

The 3D observation of branching angle in underwater streamers proved that distributions of angle are bell-shaped. Moreover, the mean angle is observed to increase with water conductivity. We performed the statistical t-test to the distribution to conclude that the branching angle is a physical quantity that depends on water conductivity.

キーワード: 水中ストリーマ放電, ストリーマ分岐, 統計検定, t 検定, 水の導電率, 3次元観測
(underwater streamer discharge, streamer branching, statistical test, t-test, water conductivity, 3D observation)

1. 研究背景

近年、液中で発生するストリーマ放電の研究が世界規模で行われており、その応用は水の浄化⁽¹⁾、ナノ粒子の創製⁽²⁾など多岐にわたる。水中放電の応用範囲の拡大のためにはストリーマ進展のメカニズムが明確化されるべきであり、そのために放電路の進展や分岐現象などの基礎特性を調べ実験データを蓄積していくことが必要だと考えている。本来、ストリーマ放電は3次元的な現象であるため、これらの調査は3次元的に行うことが重要である⁽³⁻⁸⁾。これまでに我々は、2方向から被写体を撮影する通常の立体撮影法を発展させ、気中および水中ストリーマ放電の立体撮影に特化した3次元観測手法を開発してきた⁽⁵⁻⁷⁾。ここでは、水中を進展するストリーマ放電の3次元構造、特に分岐角度を当該の観測手法により調査した結果を報告する⁽⁸⁾。ストリーマの分岐角度は常に一定の値にならず、多数のデータを収集することにより広がりを持つ釣り鐘状の分布が得られる。本稿では、水導電率などの実験パラメータが分岐角度分布に与える影響を調査するため、分布の変化を統計学的に判定し、影響の有意性を議論する。結論として、水中ストリーマ放電の分岐角度が水導電率に依存することを報告する。

2. 実験方法

〈2・1〉水中ストリーマ放電 水中ストリーマ放電の実験は、図1に示すアクリル製リアクター (約100 mm 四方) に水を導入して行った。ノズル電極 (外径 0.42 mm, 内径 0.21 mm) は先端約 0.5 mm の長さを露出させ、残りの部分

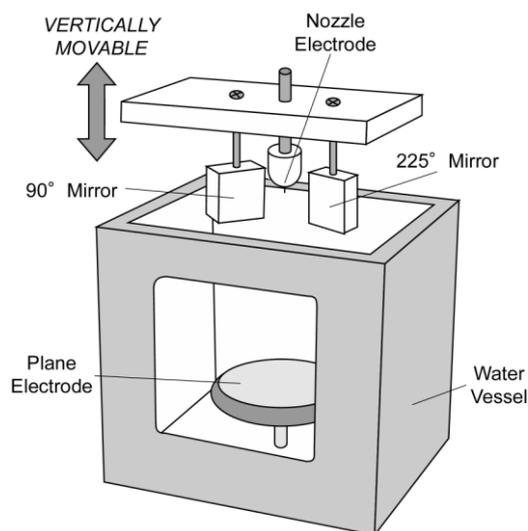


図1 水中放電装置の概略図。

Fig. 1. Schematic of experimental setup for underwater discharge.

を樹脂で絶縁したものを使用し、容器上部から水中に挿入した。一方、容器の底に平板電極 (直径 70 mm 円盤) を配置した。電極間距離は 40 mm に固定した。図 2(a)に示すパルス発生回路により、ノズル電極に正極性高電圧パルス (23 kV, パルス幅 10 μ s, 10 Hz) を印加し放電を生成した。図 2(b)に典型的な放電電流および電圧波形を示す。ノズル電極に電圧が印加されて数 100 ns ~ 数 μ s 後に放電が開始し、ストリーマの進展が見られる主モードが 200 ns 程度持続する、

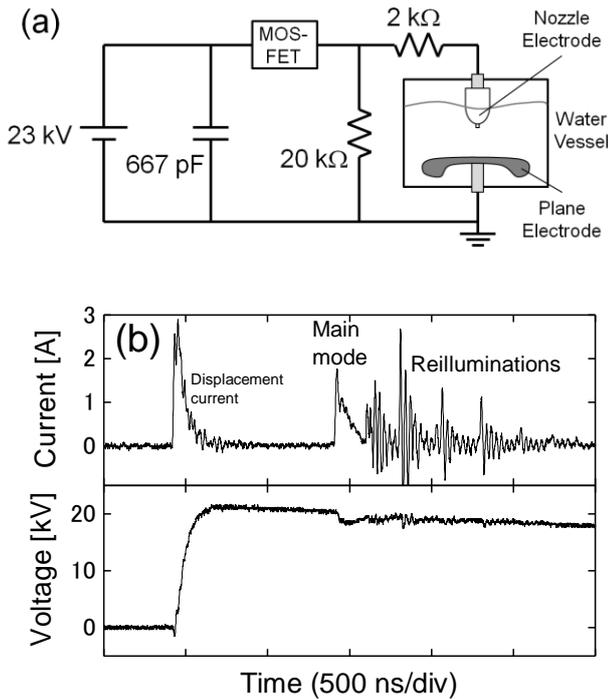


図2 (a) 正極性高電圧パルス発生回路. (b) 典型的な放電電流・電圧波形.

Fig. 2. (a) Positive high-voltage pulse generator. (b) Typical waveforms of current and voltage.

その後、再発光と呼ばれるスパイク状の電流を伴う放電が数 100 ns の間続く⁽⁹⁾.

〈2・2〉3次元観測法 ここで用いる観測法では、正面(0°)、側面(90°)、及び斜め方向(225°)の3方向から被写体であるストリーマ放電を撮影する⁽⁵⁾. 図3はノズル対平板電極系を上から見た図である. 今回は1台のICCDカメラで3つの画像を同時に撮影するため、この図に示すように

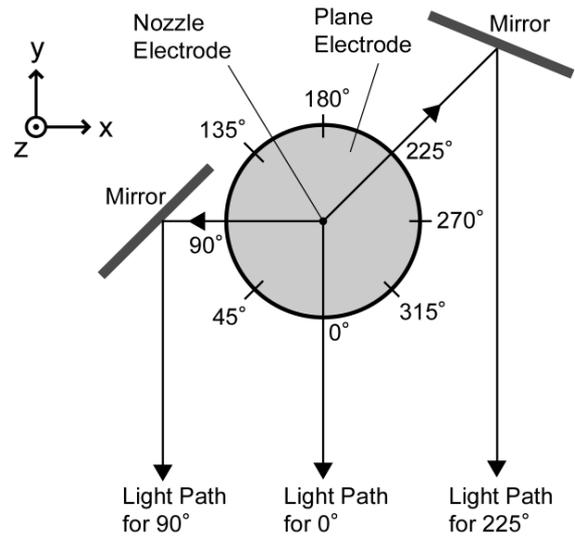


図3 3次元観測用の電極系および光学系の上面図.
Fig. 3. Overhead view of electrode and mirror setup for 3D observation.

電極系の周辺に2枚のミラーを設置する. 3次元座標 x, y, z を図のように定義すると、0°の画像からは各放電路の x, z 座標が得られ、90°の画像からは y, z 座標が得られる. このように、観測する角度が直交していることから x, y, z のそれぞれの直交座標が独立に得られるため、従来の小角度差の立体撮影法^(3,4)よりも座標の誤差(この場合は y 座標の誤差)が小さくなる. 角度差が大きすぎる代償として、0°および90°の画像に写ったストリーマ放電の外観はかけ離れたものになっており、そのため2つの画像中に写った各ストリーマの対応付けが極めて困難になる. この対応付けのため、225°の斜め方向から観測した画像を用いる⁽⁵⁾.

本実験では、3次元観測用ミラーは放電の観測時には水中

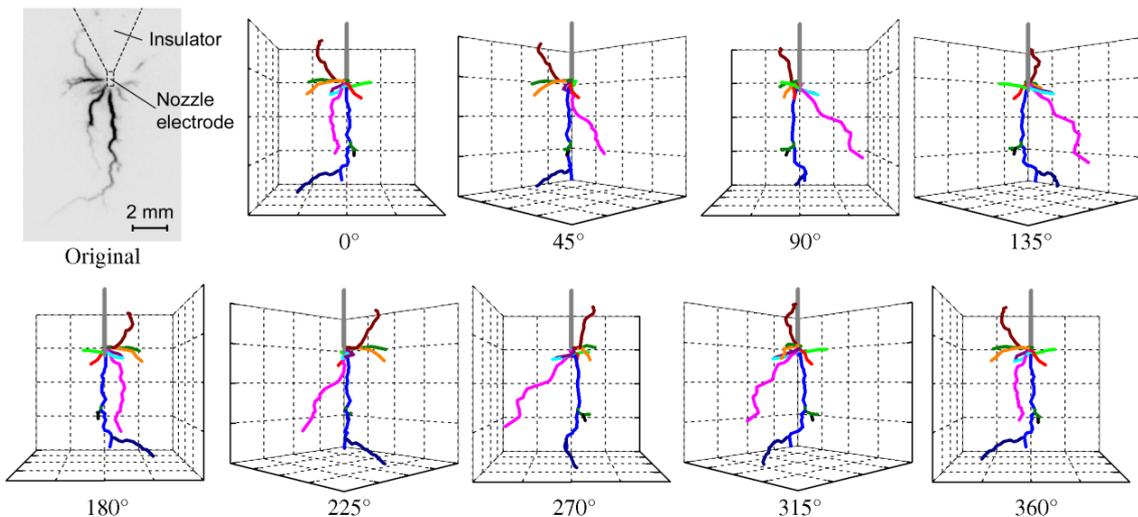


図4 再構成した水中ストリーマの3次元構造.
Fig. 4. Reconstructed 3D structure of underwater streamers.

に沈めて使用した。ストリーマからの発光は水、石英、空気と屈折率が異なる媒質を通過してカメラに到達するため、ミラーの角度を調節する作業も水中で行う必要がある。調節後にミラーを固定したまま角度調節用の被写体を水中から取り除く必要があるために、ミラーはノズル電極とともに鉛直方向に精密に可動するよう作られている。ノズル電極と各ミラーの距離は約 15 mm である。一方、ストリーマ放電の進展距離は高々 5 mm 程度であるため、ミラーの存在は放電特性に大きな影響を与えていないと考えられる。リアクター前面には石英窓を設けており、電極から 55 cm の距離から ICCD カメラ (Andor i-Star) でストリーマ放電の撮影を行った。CCD の画素、光学系の歪み、遠近補正の全ての要素を考慮して、本実験の空間的分解能は 0.1 mm の程度である。

水中ストリーマ放電を 0° から撮影した画像および再構成された 3 次元放電路の例を図 4 に示す⁽⁷⁾。ここでは各軸の 1 目盛が 2 mm に対応している。図より、撮影されたストリーマのほぼ全てが 3 次元化されていることが分かる。大気中ストリーマ放電とは異なり、水中では放電路の進展方向の急激な変化などが見られるが、これらの特徴的な現象も 3 次的に再現されている。

ストリーマ分岐角度の導出法を図 5 に示す。本観測実験では、分岐後のストリーマが約 0.5 mm 進展した場所と分岐点をそれぞれ直線で結び、その直線がなす角度を分岐角度 θ と定義し、観測を行った。

3. 実験結果

図 6 および 7 は、分岐角度 θ のヒストグラムである。各パラメータでの標本数は 263~285 である。図より、 θ ヒストグラムは釣り鐘状分布となり、平均値は 65° から 75°、標準偏差は 20 程度であった。過去の研究では、大気中ストリーマの分岐角度も釣り鐘状になることが確認されている^(3,5)。

図 6 は θ ヒストグラムの水導電率依存性を示している。ここで、導電率 11 $\mu\text{S}/\text{cm}$ および 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の水は蒸留水に NaCl を添加して調整を行い、導電率 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の実験は水道水を

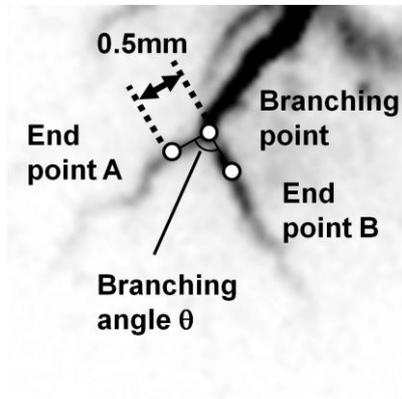


図 5 分岐角度 θ の定義。

Fig. 5. Definition of branching angle θ .

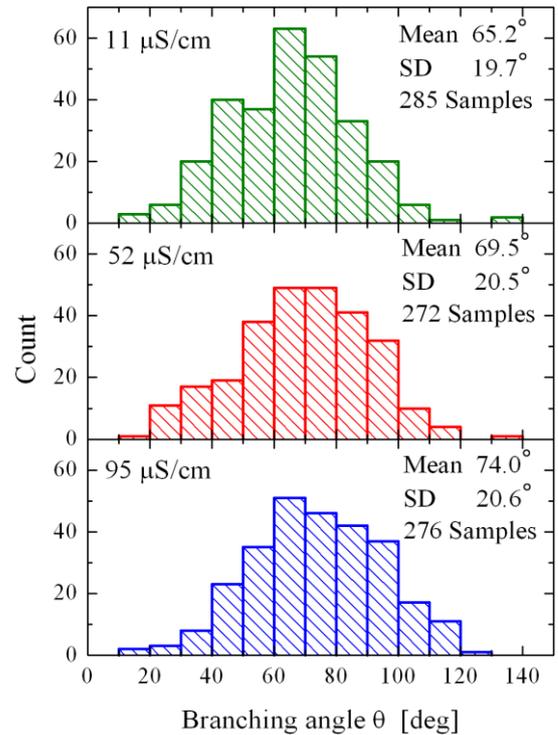


図 6 分岐角度 θ ヒストグラムの水導電率依存性。
Fig. 6. Histograms of θ for several water conductivities.

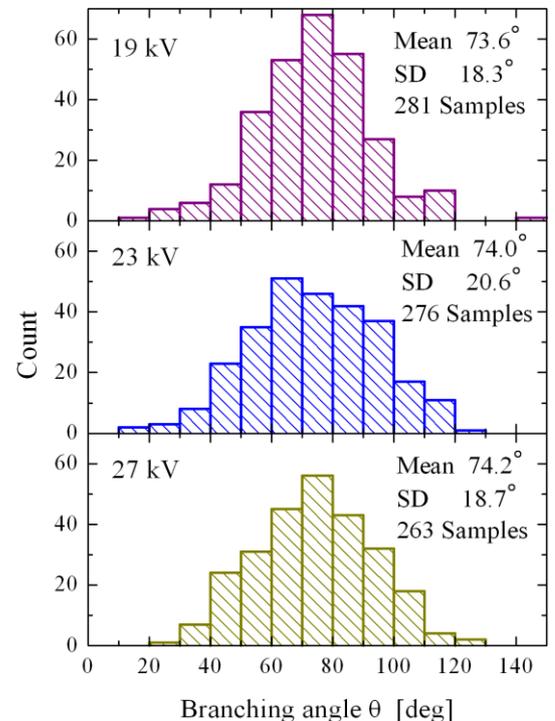


図 7 分岐角度 θ ヒストグラムの印加電圧依存性。
Fig. 7. Histograms of θ for several applied voltages.

用いて行った。印加電圧は 23 kV である。結果として、導電率の増加に伴い θ の平均値が 65.2°から 74°へ単調に増加する傾向が得られた。これは研究当初の我々の予想とは逆の結果であった。水の導電率が増加するとストリーマ中の電荷が水を介して逃げやすくなるため、分岐したストリーマの総電荷量も減り、分岐後のストリーマ同士の斥力が弱まり、分岐角度が小さくなるのではないかと考えていたためである。今回得られた、 θ が導電率と共に増加する理由は今のところ考察できていない。それ以前に、この θ ヒストグラムの平均値のシフトが物理的に有意なものであるのか、それとも標本数の不足などによる統計的な誤差に過ぎないのか、図 6 を眺めているだけでは判断が難しい。この問題を明らかにするため、次節では θ ヒストグラムのシフトの統計的有意性を調査する。

図 7 は θ ヒストグラムの印加電圧依存性を示している。水導電率は 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。今回調査した印加電圧 19~27 kV の範囲では、明確な θ ヒストグラムの変化は確認されなかった。

4. 統計検定

前節では、得られた θ ヒストグラムの平均値が水の導電率に依存しているという実験結果を紹介した。しかし図 6 のヒストグラムを俯瞰したのみでは、 θ の平均値のシフトに興味があるのか、単なる誤差であるのか、判断がつかない。従って本節では、 θ の平均値のシフトが統計学的に妥当なものであるかどうか、得られた分布を医学^(10,11)、生物学^(12,13)、農学^(14,15)などで多用される統計検定にかけ、変化の有意性について議論を行う。

ここでは、分布の平均値の差の有意性を調べる際に最も一般的に用いられる「Student の t 検定」を用いる^(16,17)。 t 検定ではまず、2つの標本分布は同一の平均値を持つ母集団から無作為に抽出されたものであると仮定する。その場合、標本数は有限であるため母集団の平均値（真の平均値）からズレた平均値が得られ、標本数が少なければ少ないほどズレた平均値が得られる確率が上がる。そのズレの大きさの確率分布が t 分布である。実験で得られた平均値のズレが t 分布の低確率の部分に位置する場合、それは「どちらの標本も同一の平均値を持つ母集団から抽出したものである場合、このような平均値のズレはまれにしか起こらない。」ということの意味する。それが「どちらの標本も同一の平均値を持つ母集団から抽出したという仮定があやまりである。」という判定につながる。この判定はすなわち、「2つの標本は別々の平均値を持つ母集団、すなわち異なる物理現象から抽出した標本である。」ということであるから、実験で得られた平均値の差は物理的に意味のある差であると結論される。

詳細な手順を以下に示す。

1. 帰無仮説 H_0 「異なる水導電率下での θ の母集団は同じ平均値を持つ。」を宣言する。
2. 実験パラメータを用い、次の統計量 t を導出する。

$$t = \frac{\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2}{s/\sqrt{n}} \quad (1)$$

ここで $\bar{\theta}_1$ および $\bar{\theta}_2$ は、導電率 1 および 2 で得られた θ 平均値であり、 s は θ の母集団の標準偏差、 n は標本数である。この統計量 t は簡単に言えば、実験で得られた θ 平均値の差を、標準誤差で規格化した量である。 s の値は不明であるため、実験で得られたヒストグラムの標準偏差からの推定値を用いる。

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

ここで n_1 および n_2 は導電率 1 および 2 で得た標本数であり、 s_1 および s_2 は導電率 1 および 2 で得られたヒストグラムの標準偏差である。また、式(1)の n には次の換算量を用いる。

$$n = \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (3)$$

3. 仮説 H_0 が正しい場合、統計量 t は自由度 $n_1 + n_2 - 2$ の t 分布をとる。図 8 は t 分布の確率密度関数であり、 t_c を実験値とする。このとき斜線部の総面積は、仮説 H_0 が正しい場合に統計量 t が t_c もしくはそれ以上の値になる確率を表し、 p 値と呼ばれる。 p 値が非常に低い場合、統計量 t が t_c になる確率が非常に低いことを表しており、すなわち帰無仮説 H_0 があやまりであると判断される。背理法により、対立仮説 H_1 「異なる水導電率下での θ の母集団は異なる平均値を持つ。」が支持され、これにより θ 平均値は導電率に真に依存する量であることが結論される。

表 1 は、図 6 の各ヒストグラム間で計算した t_c および p 値を示している。どちらの場合も p 値は 0.011 と低い値を示した。一般的に、帰無仮説を棄却できると判断する p 値（有意水準）は 0.05 が多用されている。今回得られた p 値はこの有意水準よりも低いことから、我々は水中ストリーマ放電の分岐角度 θ は水の導電率に真に依存し、導電率と共に増加する物理量であると結論した。

続いて、 θ の印加電圧依存性を調査するため図 7 のヒストグラムの t 検定を行い、表 2 の結果を得た。この場合、 p 値が 0.84 および 0.90 と有意水準 0.05 よりも高い。この結果より、以下の 2 つの結論が考えられる。

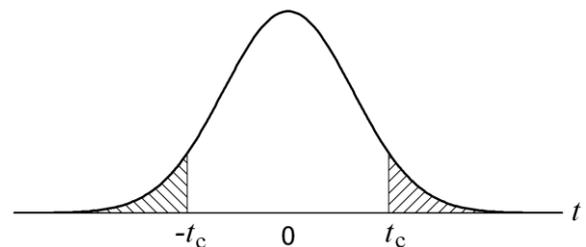


図 8 統計量 t の確率密度関数。

Fig. 8. Probability density function of t statistic.

表 1 水導電率の異なる θ ヒストグラム間の t_c および p 値.

Table 1. t_c values and p-values for θ histogram pairs of different water conductivity (cf. Fig. 6).

Histogram pair	t_c	p-value
11–52 $\mu\text{S}/\text{cm}$	2.5	0.011
52–95 $\mu\text{S}/\text{cm}$	2.5	0.011

表 2 印加電圧の異なる θ ヒストグラム間の t_c および p 値.

Table 2. t_c values and p-values for θ histogram pairs of different applied voltages (cf. Fig. 7).

Histogram pair	t_c	p-value
19–23 kV	0.20	0.84
23–27 kV	0.113	0.90

- 分岐角度 θ は印加電圧に依存しない物理量である.
- θ は印加電圧に依存する量かもしれないが、それを実証するためには、大幅に標本数を増やすか、もしくは印加電圧の範囲を増やす必要がある.

これらを明確にするには、さらなる調査が必要となる.

5. 結論

我々は独自に開発したストリーマ放電の3次元観測法を用い、水中ストリーマ放電の分岐角度を測定し、ヒストグラムの実験パラメータ依存性を統計的に調査した. その結果、水の導電率の増加にしたがい分岐角度が増加する物理量であることを発見した.

このような水中ストリーマ放電の幾何学的特徴に関するデータの蓄積が、近い将来に水中ストリーマの物理機構の明確化に貢献すると考えている.

謝辞

本研究の遂行にあたり、大分大学・柴田克成准教授に統計検定に関する有用な助言を頂きました. ここに御礼を申し上げます.

文 献

- (1) B. R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M. R. Hoffmann, and J.-S. Chang: "Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment", *Ind. Eng. Chem. Res.* **45**, 882 (2006)
- (2) J. Hieda, N. Saito, O. Takai: "Size-regulated Gold Nanoparticles Fabricated by a Discharge in Reverse Micelle Solutions", *Surf. Coat. Technol.* **202**, 5343 (2008)
- (3) S. Nijdam, J. S. Moerman, T. M. P. Briels, E. M. van Veldhuizen, and U. Ebert: "Stereo-photography of streamer in air", *Appl. Phys. Lett.* **92**, 101502 (2008)
- (4) S. Nijdam, C. G. C. Geurts, E. M. van Veldhuizen, and U. Ebert: "Reconnection and merging of positive streamers in air", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 045201 (2009)
- (5) 市來龍大, 金澤誠司, 友清浩介, 原秀明, 赤峰修一, Marek Kocik, Jerzy Mizeraczyk: 「ストリーマ放電における進展経路の3次元観測法」, *電学論 A* **130**, 683 (2010)
- (6) 市來龍大, 金澤誠司, 友清浩介, 原秀明, 赤峰修一, Marek Kocik, Jerzy Mizeraczyk: 「大気中および水中ストリーマ放電の立体構造に関する考察」, *電気学会研究会資料 バルスパワー/放電合同研究会*, PPT-10-064/ED-10-104 (2010)
- (7) R. Ichiki, S. Kanazawa, K. Tomokiyo, H. Hara, S. Akamine, M. Kocik, and J. Mizeraczyk: "Observing Three-Dimensional Structures of Streamer Discharge Channels", *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39**, 2228 (2011)
- (8) R. Ichiki, S. Kanazawa, K. Tomokiyo, S. Akamine, M. Kocik, and J. Mizeraczyk: "Investigation of Three-Dimensional Characteristics of Underwater Streamer Discharges", *Jpn. J. Appl. Phys.*, in press.
- (9) P. H. Ceccato, O. Guaitella, M. Rabec Le Gloahec, and A. Rousseau: "Time-resolved nanosecond imaging of the propagation of a corona-like plasma discharge in water at positive applied voltage polarity", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 175202 (2010)
- (10) N. A. C. Cressie and H. J. Whitford: "How to Use the Two Sample t-Test", *Biometrical J.* **28**, 131 (1986)
- (11) T. Nakamura, Y.-J. Liu, H. Nakashima, H. Umehara, K. Inoue, S. Matoba, M. Tachibana, A. Ogura, Y. Shinkai, and T. Nakano: "PGC7 binds histone H3K9me2 to protect against conversion of 5mC to 5hmC in early embryos", *Nature* **486**, 415 (2012)
- (12) R. Sawarkar, C. Sievers, and R. Paro: "Hsp90 Globally Targets Paused RNA Polymerase to Regulate Gene Expression in Response to Environmental Stimuli", *Cell* **149**, 807 (2012)
- (13) S. K. Sonkusare, A. D. Bonev, J. Ledoux, W. Liedtke, M. I. Kotlikoff, T. J. Heppner, D. C. Hill-Eubanks, and M. T. Nelson: "Elementary Ca^{2+} Signals Through Endothelial TRPV4 Channels Regulate Vascular Function", *Science* **336**, 597 (2012)
- (14) M. D. Edgerton, J. Fridgen, J. R. Anderson Jr., J. Ahlgrim, M. Criswell, P. Dhungana, T. Gocken, Z. Li, S. Mariappan, C. D. Pilcher, A. Rosielle, and S. B. Stark: "Transgenic insect resistance traits increase corn yield and yield stability", *Nat. Biotechnol.* **30**, 493 (2012)
- (15) A. Jírová, A. Klaudivová, and K. Prach: "Spontaneous restoration of target vegetation in old-fields in a central European landscape: a repeated analysis after three decades", *Appl. Veg. Sci.* **15**, 245 (2012)
- (16) 東京大学教養学部統計学教室 編: 「統計学入門」, 東京大学出版会 (1991)
- (17) 吾妻一興, 鈴木義也, 大野芳希, 高木 育: 「統計学概説」, 培風館 (1987)