

**特別講演会(1)**

**「大気圧放電プラズマの特性と応用」  
(基礎編)**

—ニューノーマルの時代での新たな試み—

**大分大学 理工学部  
金澤 誠司**

2020年11月20日、大分大学よりオンライン

**自己紹介**

大分大学広報誌  
BUNDAI.OITA より

03  
**放電プラズマの計測の深化と  
次世代技術の創生に向けて**

電気現象の中でも  
**プラズマは光って見えるから面白い**

電気は目に見えなくて怖い、と思われがちですが、放電現象は  
常に代表されるように唯一われわれの目で見る事ができる現象  
です。こちらの方が電圧も高くて危険なのですが、その神秘的な  
光であるプラズマに惹かれて30有余年研究してきました。大気圧  
の放電で発生するプラズマは、空気の水の環境改善からプラズマ  
医療や農業への利用さらには先端材料の処理まで多岐にわたる  
応用範囲が期待されています。

20年ほど前にボートと突るプラズマを撮影のカメラで撮影  
したところ面白いフラッシュのストリーマと呼ばれる放電が観  
測されました。とても小さな雷放電といった様相です。こ  
のような放電現象をナノ秒-数マイクロメートルの時間空間分  
解能で観測しています。3次元観測により分岐や曲がりなどの複雑  
なグラフィック的に撮影して、画像処理を併用することによ  
り成功しました。最近では水中から水中や気液界面でのストリーマの  
発生機構について完全の解明に達しています。その成果は学術  
誌の論文や書籍に発表されています。

**理工学部 創生工学科 電気電子コース 金澤 誠司 教授**

かなざわ せいじ。大分県出身。日本大学大学院自然科学研究科博士課程修了。  
専門は静電気、高電圧、放電プラズマ工学で、主に大気圧での放電現象の解明と、  
そのプラズマの応用による環境浄化技術として電気水質浄化技術の開発に従  
事。実験から得た、世界中で発表されてきた。その経験による見聞も豊富で、  
期待がどうしようもないので、満足は学生までに留まっている。  
<http://web03.cc.obu-u.ac.jp/plasma/>

**今日のお話**

1. コロナの話
2. 大気圧非熱平衡プラズマ
  - ・気体温度は常温:熱的ダメージの回避
  - ・電子温度は数万度
3. コロナ放電の計測
4. 発光種と非発光種の計測
  - ・OES and LIF

新たな試み

5. 実験室へ
  - ・コロナの実験

**大気圧非熱平衡プラズマを生成する3大放電**

	コロナ放電	パリア放電	プラズマジェット
電極構造	針対平板 線対平板 線対円筒	平行平板 同軸円筒 誘電体を入れる	ガラス管を使用し、 外側に電極を巻き 内側に線電極挿入
ギャップ長	数mm~数10cm	100μm~数mm	数mm~数cm
ガス種	主に空気	空気、酸素、ヘリウム	ヘリウム、アルゴン
放電条件	DC, AC, Pulse, 数kV~100 kV	AC, RF, Pulse, 数kV~10 kV	AC, RF, Pulse, 数kV~10 kV
電子密度	10 <sup>14</sup> ~10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>14</sup> ~10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>14</sup> ~10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>
特徴	Townsend理論:ad=2.4~4.6 Meekの条件:ad=20	マイクロ放電、グロー放電 ガス流(Plasma Actuator)	自由空間へのPlasma Bullet
応用	電気集じん、イオナイザ、 コピー機	オゾン生成、表面処理 PDP	プラズマ医療 バイオ

針電極  
ギャップ(数cm~10cm)  
平板電極

誘電体(ガラス、セラミックス)  
マイクロ放電  
フラ

ガラス管  
リング電極  
電源

**コロナとは**

SARS-CoV-2  
COVID-19

太陽コロナ  
46億年前

コロナの名前はギリシャ語の王冠または光冠に由来する

写真/画像 Wikipediaより

**プラズマボールのICCDカメラによるコロナ観測**

Gate 1 ms, Gain 150

Gate 100 μs, Gain 200

Gate 1 ms, Gain 100

Gate 1 μs, Gain 255<sup>6</sup>

### コロナとは、コロナ放電

セントエルモの火  
St. Elmo's fire, 303年  
ローマ時代




避雷針  
1750年

7

### 今日のコロナ放電



ギャップ長: 10mm、印加電圧: 正極性パルス、8 kV、放電電流: 1 A  
圧力: 準大気圧 30 kPa、雰囲気ガス: 窒素


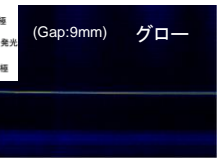
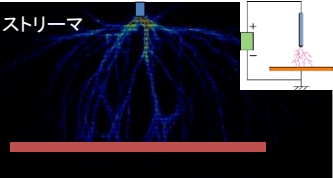
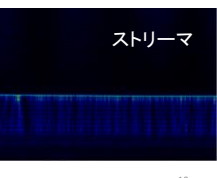
8

### コロナ放電に貢献した人たち

 Townsend (1868-1957)	 Cottrell (1877-1948)	 Carlson (1906-1968)	 増田閃一 (1926-1995)
 Reather (1909-1986)	 Loeb (1891-1978)	人物写真 Wikipediaより	 Jen-Shih Chang (1949-2011)

9

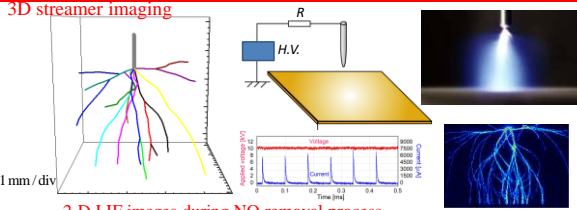
### 不平等電界-針対平板と線対平板における正コロナ

<p>グロー (Gap: 22mm)</p> 	<p>針(棒)電極 点状の発光 平板電極</p> <p>(Gap: 9mm) グロー</p> 
<p>ストリーマ</p> 	<p>ストリーマ</p> 

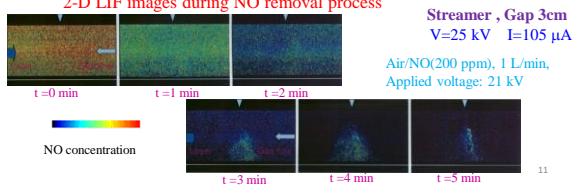
10

### コロナ放電: われわれの研究

3D streamer imaging



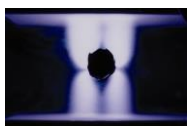
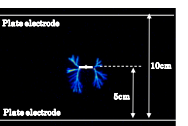
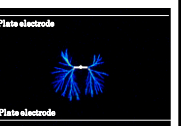
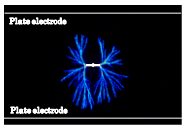
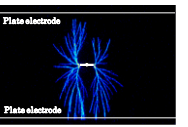
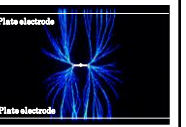
2-D LIF images during NO removal process



Streamer, Gap 3cm  
V=25 kV I=105 μA  
Air/NO(200 ppm), 1 L/min,  
Applied voltage: 21 kV

11

### 気中でのストリーマコロナの進展

 8 s	 (b) 0-100ns	 (c) 0-150ns
 (d) 0-200ns	 (e) 0-300ns	 (f) 0-500ns

Experimental condition      Streamer head velocity :  $2.5 \times 10^5$  m/s  
 In NO(100ppm)/Air, 3L/min    ICCD camera : Delay time 2710ns, Gate time 50-500ns  
 Applied Voltage: 30kV, Corona Current: 134μA

12

### Corona discharge and EHD in an ESP

$U = -27.4 \text{ kV}$   
 $I = 260 \mu\text{A}$   
 $V = 0.6 \text{ m/s}$

提供 Prof. J. Mizerczyk

**The EHD effects in an ESP with a two-sided spike electrode.** Three phenomena are shown: 1) Plasma columns between the spike electrode and collection electrodes (blue-violet colour, 2.5-s photograph exposure), 2) Particle flow streamlines in plane A (coloured continuous lines obtained from PIV measurements, the colour of the streamline in each point corresponds to the magnitude of the velocity vector in this point, see the coloured velocity scale) and 3) Dust deposit on the collecting electrode. 13

### コロナ放電の極性効果とモード

- Locally ionized plasma
- Has different discharge modes depending on voltage and its polarity
- Base for the plasma jet by adding the gas shield and He/Ar supply

**Positive corona**

**Negative corona**

**Corona-discharge characteristics**

- Current-voltage (*I-V*) curve
- Corona onset voltage (corona inception voltage)

### 直流コロナ放電の計測：従来法

**Positive corona**

Glow mode operation

$$I = AV(V - V_c)$$

Onset :  $V_c = 9 \text{ kV}$

Gap : 30mm in air

Needle electrode: brass rod, 6 mm diameter (Curvature radius of the tip, 0.5 mm)  
 Plate electrode: brass plate, 100 mm diameter

S. Kanazawa, T. Ito, Y. Shuto, T. Ohkubo, Y. Nomoto and J. Mizerczyk: J. Electrostat., 55, (2002) 343

### 直流コロナ放電の計測：新規開発法

放電分野への **DX**

	Positive	Negative
Peak value	+10 kV	-14 kV
Frequency (Period)	20 Hz (50 ms)	

Applied voltage

K. Tachibana, T. Koshiishi, T. Furuki, R. Ichiki, S. Kanazawa, T. Sato and J. Mizerczyk: J. Electrostat., 108, (2020) 103525

### Voltage and current waveform and I-V characteristic (positive polarity)

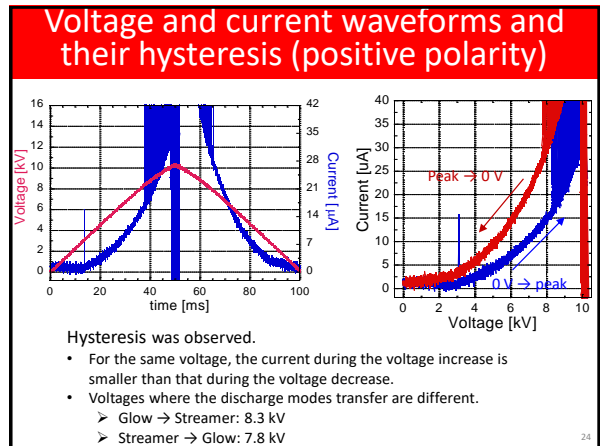
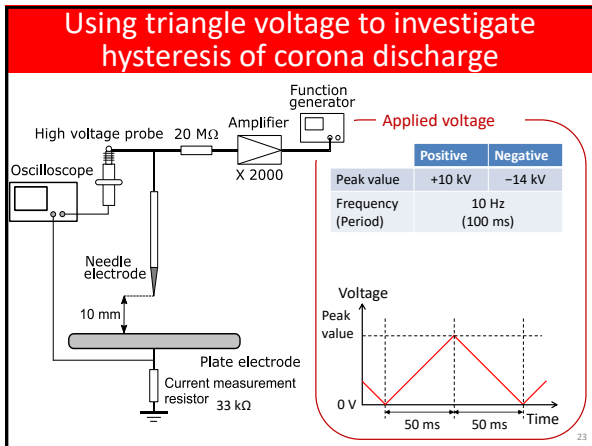
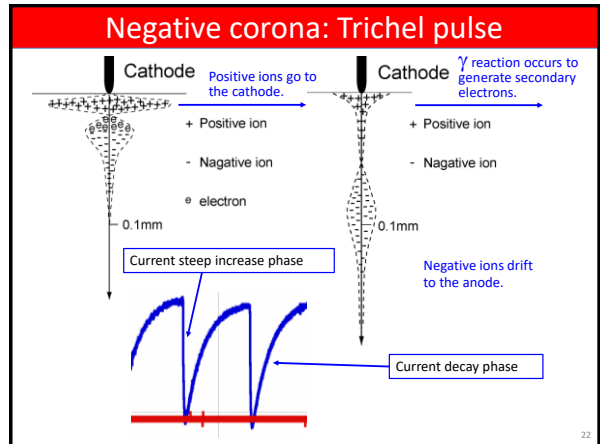
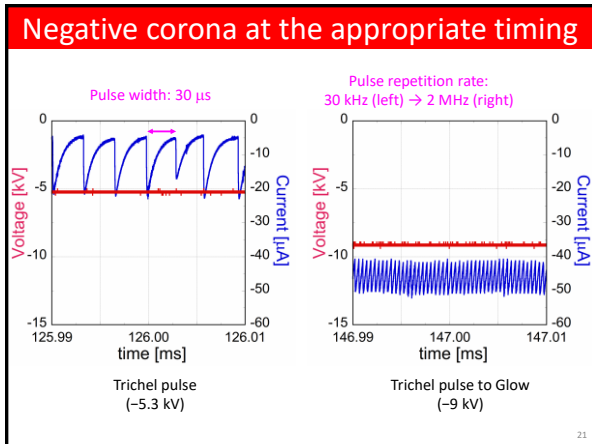
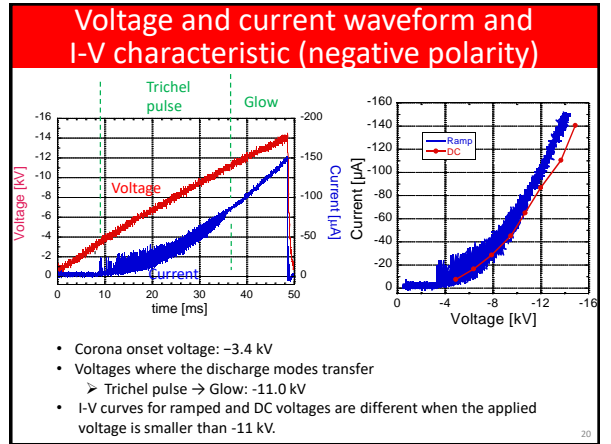
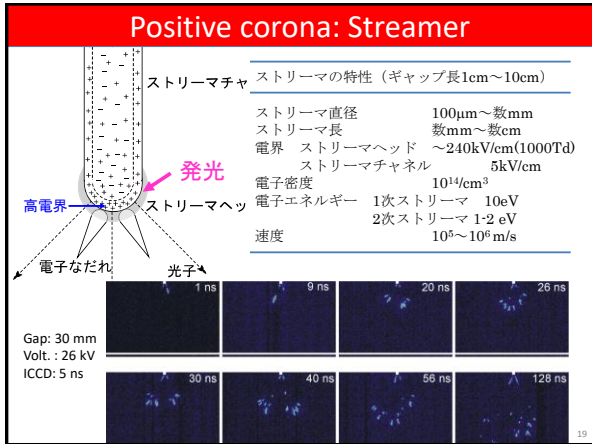
- Corona onset voltage: +4.8 kV
- Voltage where the discharge modes transfer
  - Glow → Streamer: +8.9 kV
- I-V curves for ramped and DC voltages are almost the same.

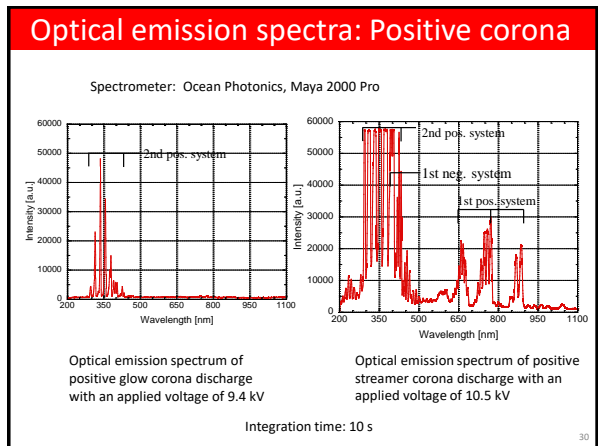
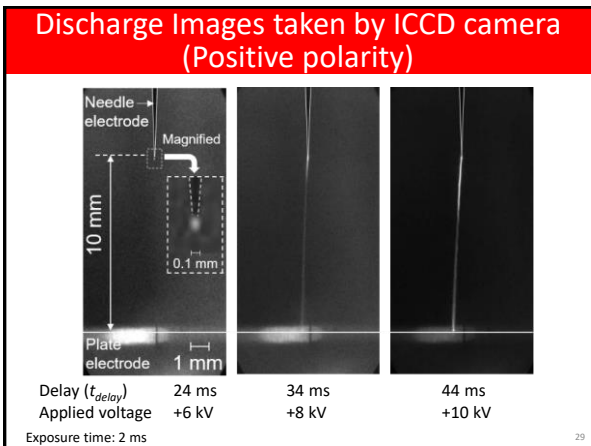
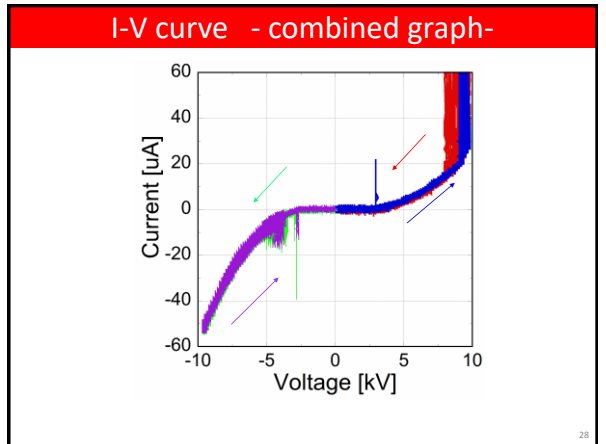
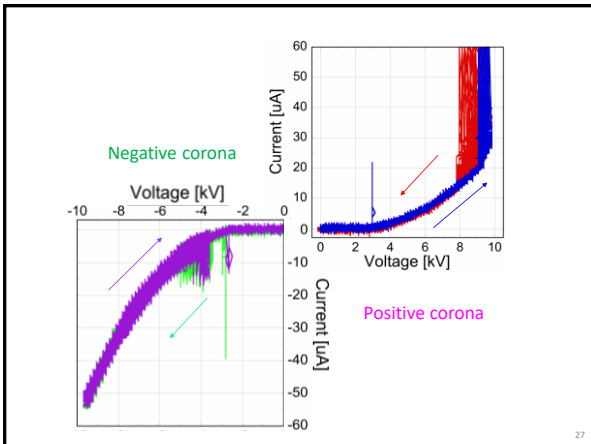
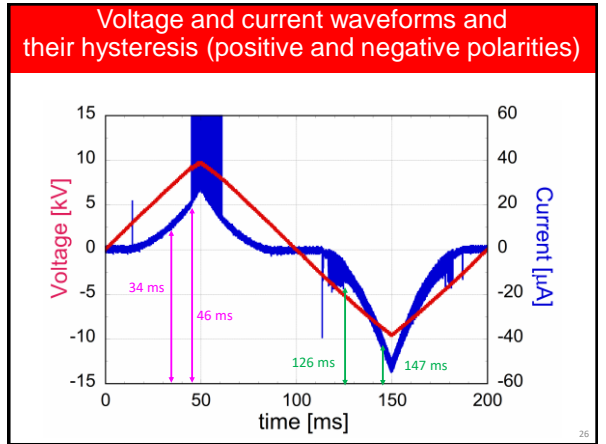
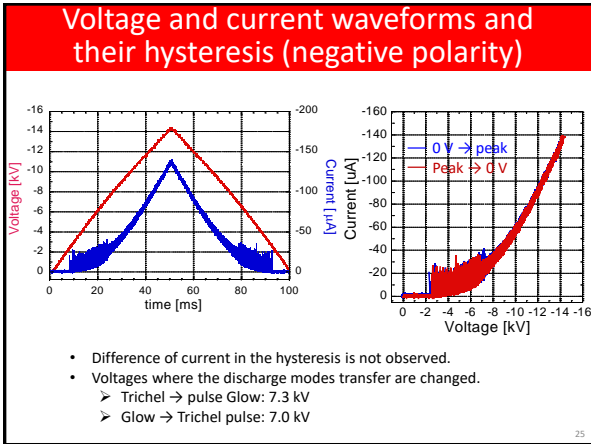
### Positive corona at the appropriate timing

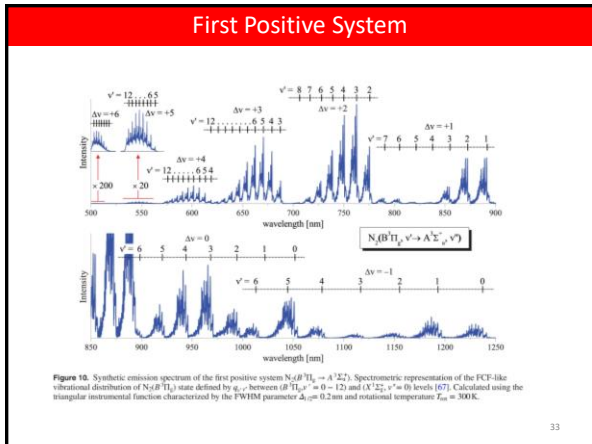
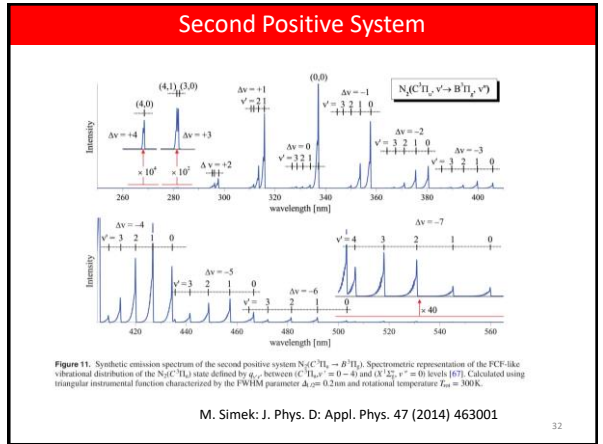
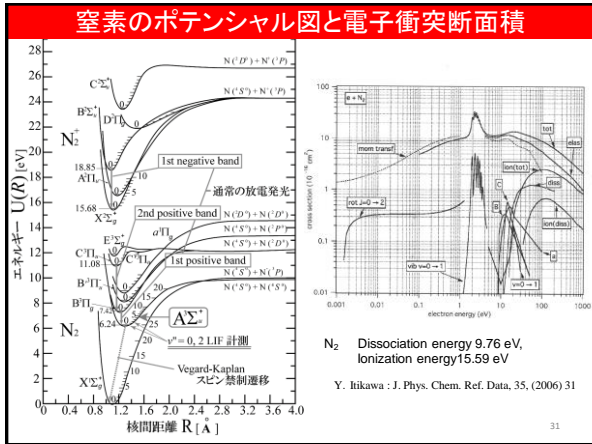
Pulse width: a few  $\mu\text{s}$   
 Pulse repetition rate: 10 kHz

Glow (+7 kV)

Streamer (+9 kV)







### 窒素について

- 地球の大気の約78.08%を占める
- 三重結合で安定、負イオンを作らない
- 窒素の空中固定：ハーバー・ボッシュ法
- 酸化や炭化に比べて窒化は難しい
- 放電プラズマで活性窒素(RNS)へ
- 一番低い励起状態  $A^3\Sigma_u^+$  は準安定状態であり、寿命は2秒

### Measurement of $N_2(A^3\Sigma_u^+)$

**Laser-induced fluorescence (LIF)**

$$I_{LIF} = kV \frac{A_{23}}{Q_2 + A_2} B_{12} I \tau N_1$$

where  $k$  is a constant determined by the optical setup,  $V$  is the measurement volume,  $A_{13}$  and  $B_{12}$  are the Einstein coefficients,  $Q_2$  is the quenching rate,  $I$  is the laser intensity, and  $\tau$  is the laser pulse duration.

**Cavity ring-down spectroscopy (CRDS)**

Typical measured ring-down signals in  $N_2$  inductively coupled plasma for  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ . (Absorption of 1st Positive System (FPS)  $B'Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$  at 771.10 nm have been measured.  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  density:  $N = 1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ )  
 Ref. K.Sasaki: J. Plasma fusion Res., 91 (2015) 2

### 窒素分子の分光記号

- 分光記号は電子の配置を決める(スピンと角運動量)
- 分子からの発光は、分子の置かれた状態の変化が光のスペクトルとして現れたもの

分子軸を通る平面に関して電子の波動関数が鏡映対称であるかないかを示す。対称の時は $\Sigma^+$ 、反対称の時は $\Sigma^-$ と記す

**スピン多重度**

1: 全ての電子が対になっている。一重項 (singlet) 窒素

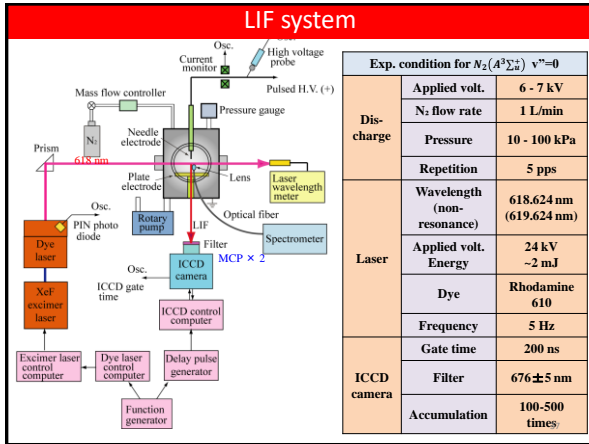
3: 対電子が2個で、多重度は3となり三重項 (triplet) 窒素

$X^1\Sigma_g^+$

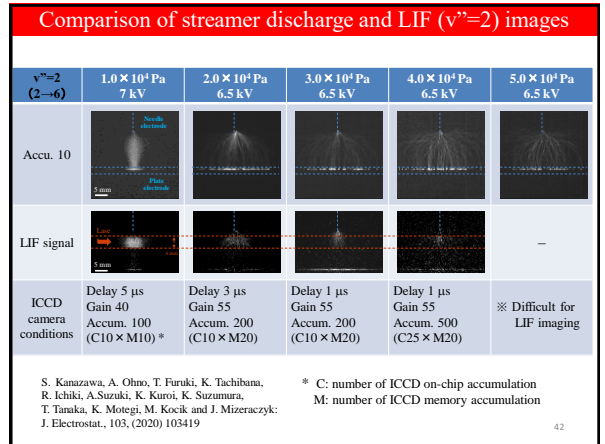
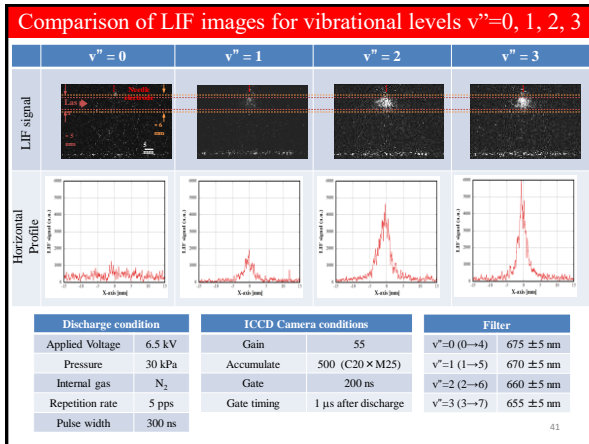
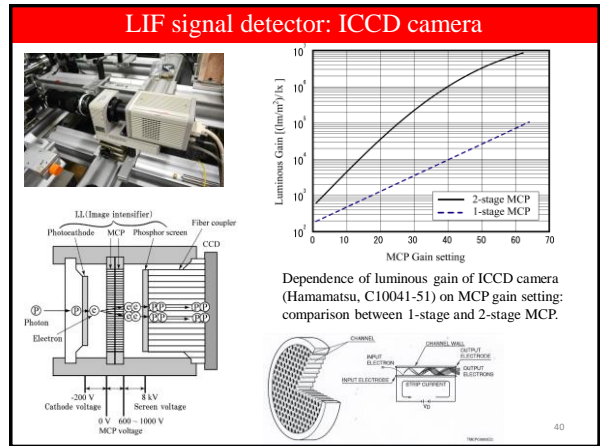
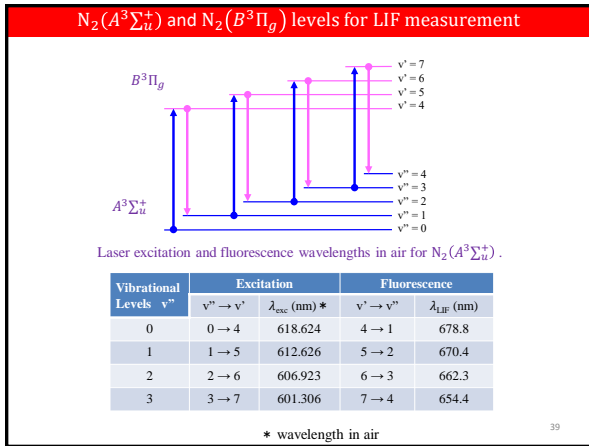
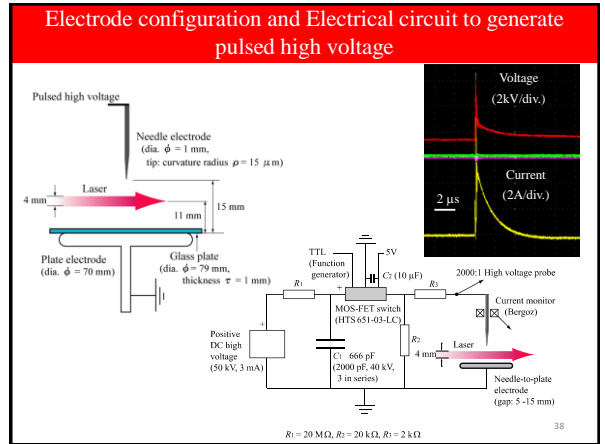
$A^3\Sigma_u^+$

分子の全軌道角運動量を指定する

電子の波動関数が座標の反転に対して符号が変化しないかどうかを示す。符号が変わらないときはg, 変わる時はuを右下に添字として記す。



Exp. condition for $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ $v''=0$	
Dis-charge	Applied volt. 6 - 7 kV
	$N_2$ flow rate 1 L/min
	Pressure 10 - 100 kPa
Laser	Repetition 5 pps
	Wavelength (non-resonance) 618.624 nm (619.624 nm)
	Applied volt. 24 kV
	Energy ~2 mJ
	Dye Rhodamine 610
ICCD camera	Frequency 5 Hz
	Gate time 200 ns
	Filter 676 ± 5 nm
Accumulation 100-500 times	



**Estimation of  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  number density**

**Electron-impact excitation:**  
 $N_2(X^1\Sigma_g^+) + e_{fast} \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, C^3\Pi_u) + e_{slow}$  (1)

**Radiative decay cascades:**  
 $N_2(C^3\Pi_u) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + h\nu_1 \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + h\nu_2$  (2)

**In the postdischarge, the  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  metastable molecule population decreases mainly by the pooling reaction:**  
 $N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+) + N_2^+$  (3)  
 where  $N_2^+$  are  $N_2$  molecules in the higher states of  $N_2(C^3\Pi_u)$ ,  $N_2(C^3\Pi_g)$ ,  $N_2(C^3\Sigma_u^+)$  and  $N_2(B^3\Pi_u)$ .

**Rate equation for the pooling reaction (3)**  
 $\frac{dN}{dt} = -kN^2$ , (4)  
 where  $N$  is the  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  molecule number density in the state  $v''=2$ ,  $t$  is the postdischarge time, and  $k$  is the rate coefficient.

**Solution of Eq. (4)**  
 $N(t) = \frac{N_0}{N_0 kt + 1}$  (5)  
 where  $N_0$  is initial  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  molecule number density in the state  $v''=2$  at  $t=0$ .

43

**Postdischarge time-dependence of the normalized  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  molecule number density in the state  $v''=2$  for various values of  $N_0$**

Discharge condition	
Applied voltage	6.5 kV
Pressure	30 kPa
Internal gas	$N_2$
Repetition rate	5 pps

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{N_0 kt + 1}$$

$k(300K) = 4 \times 10^{-10} [cm^3/s]$   
 $N_0 = 6 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{15} [cm^{-3}]$   
 $t = 0 \sim 10 [\mu s]$

$A^3\Sigma_u^+ (v''=2) \ 3 \times 10^{14} / cm^3$

44

**まとめ**

- コロナ放電は放電条件(電極系、電圧印加法とその極性、ガス・湿度等の環境)により形態が大きく変化する。
- コロナ放電の発光は、高速の電子や光による励起、解離、電離が複雑に作用して生成される分子の電子状態にもとづくものである。
- 先人たちの研究に敬意を払い、さらに未解明の現象解明と応用を開拓する必要がある。

プラズマは“ポーっと光ってんじゃねーよ！”

**ガッテン**      ご清聴ありがとうございました

45