

HOKKAIDO
UNIVERSITY

大気圧以上のガス圧を有するマイクロ波プラズマにおける レーザー散乱計測

量子理工学専攻
プラズマ応用工学研究室
相馬俊太郎

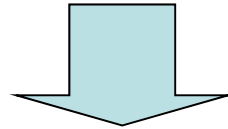
実験の背景・目的

地球温暖化対策のために自動車の燃費性能を向上することは非常に重要

⇒ エンジン内の着火方式に**プラズマ支援着火**を用いる

- 従来の火花点火と比べて希薄な空燃比での着火が可能となる
- 非平衡プラズマ**であることが重要

プラズマのガス温度が5000 K以上だとNO_xの発生につながり問題となる
高エネルギーの電子でラジカルを発生させ燃焼着火の化学反応を促進させる



ガソリンエンジン内の圧力は大気圧を超える(~1MPa)
大気圧を越えるプラズマの研究は少ない

大気圧以上の圧力下におけるプラズマ支援着火の詳細なメカニズムは
あまり明らかになっていない

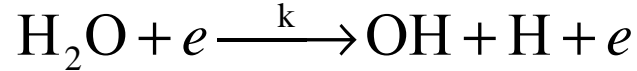


プラズマのガス温度や電子温度、電子密度を計測した



実験の背景・目的

高エネルギーの電子で燃焼着火の化学反応を促進



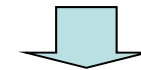
$$k = [\text{H}_2\text{O}][e]\bar{k}$$

$$\bar{k} = \langle \sigma v \rangle$$

$$= \int_0^{\infty} \sigma(\varepsilon) (2\varepsilon/m_e)^{1/2} f(\varepsilon) d\varepsilon$$

反応速度係数

◆ プラズマの電子エネルギー分布関数が非常に強い関数



プラズマ支援着火では電子温度は重要

電子温度計測

- ◆ 静電プローブ法
- ◆ マイクロ波干渉法

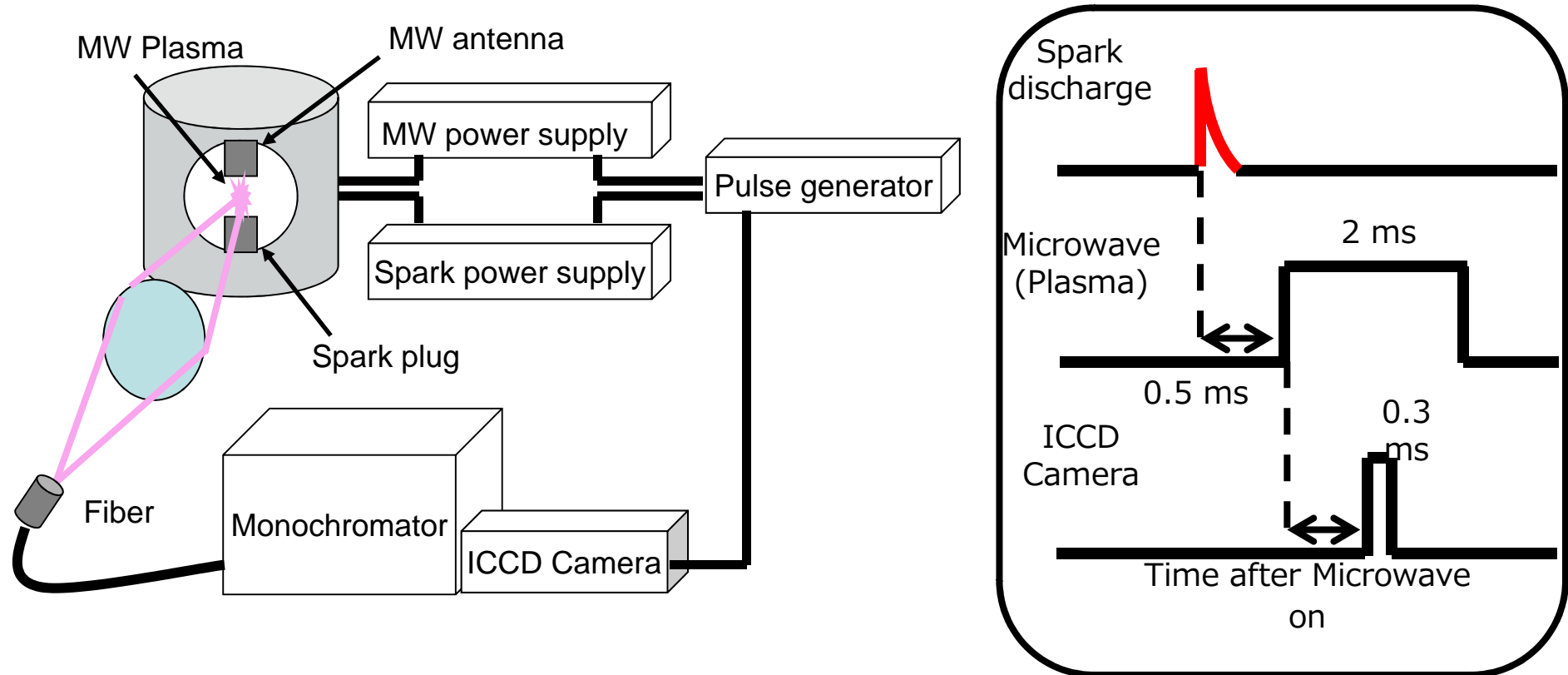
比較的簡易な計測法であるが、プラズマは小体積なため計測が困難

レーザートムソン散乱計測法が最適

本研究では大気圧以上でマイクロ波プラズマの電子温度をレーザートムソン散乱計測法を用いて計測した



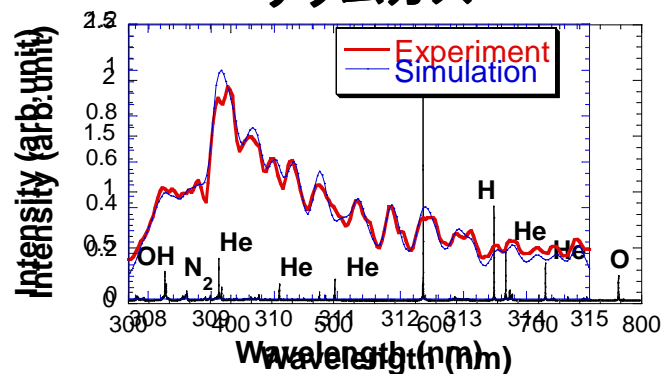
発光分光法実験装置図



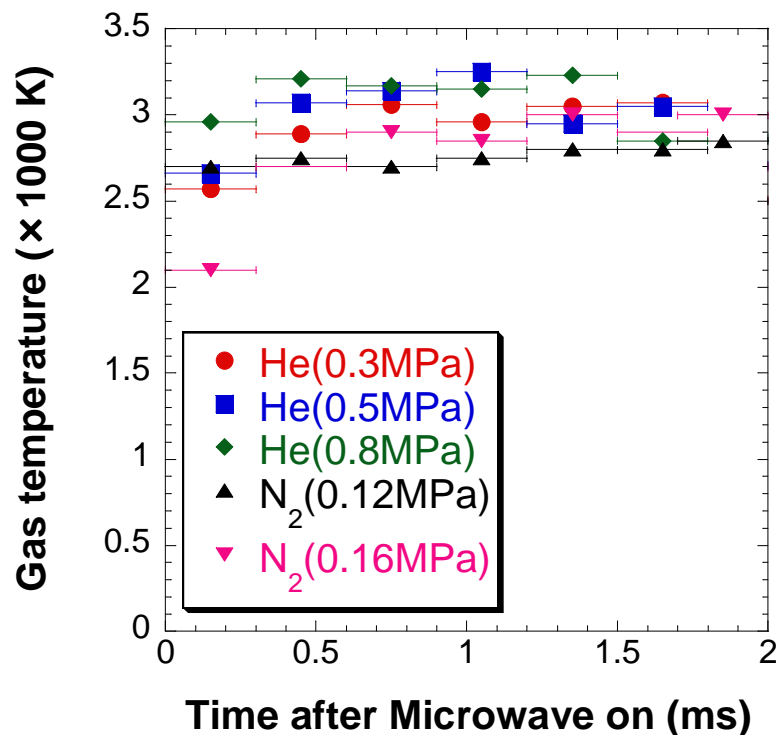
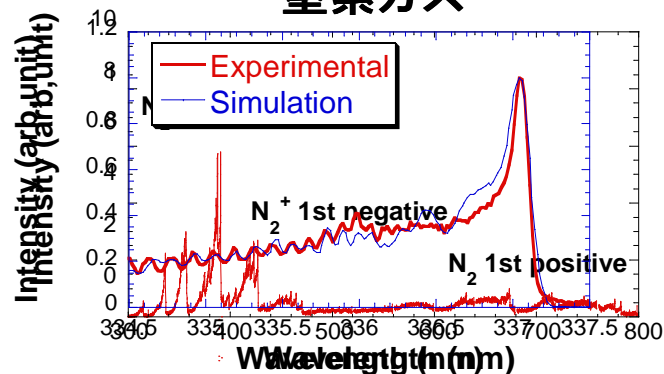
- プラズマ源はスパークプラグ及びマイクロ波アンテナから構成されている
- マイクロ波の瞬時電力は200Wとした
- カメラのゲート幅は0.3msとした
- スパーク放電してからマイクロ波を投入するまでの遅れ時間を0.5 msとし、カメラのゲート幅を開くタイミング(Time after Microwave on)を変化させて様々な条件での発光スペクトルを計測した

発光分光法によるガス温度

ヘリウムガス



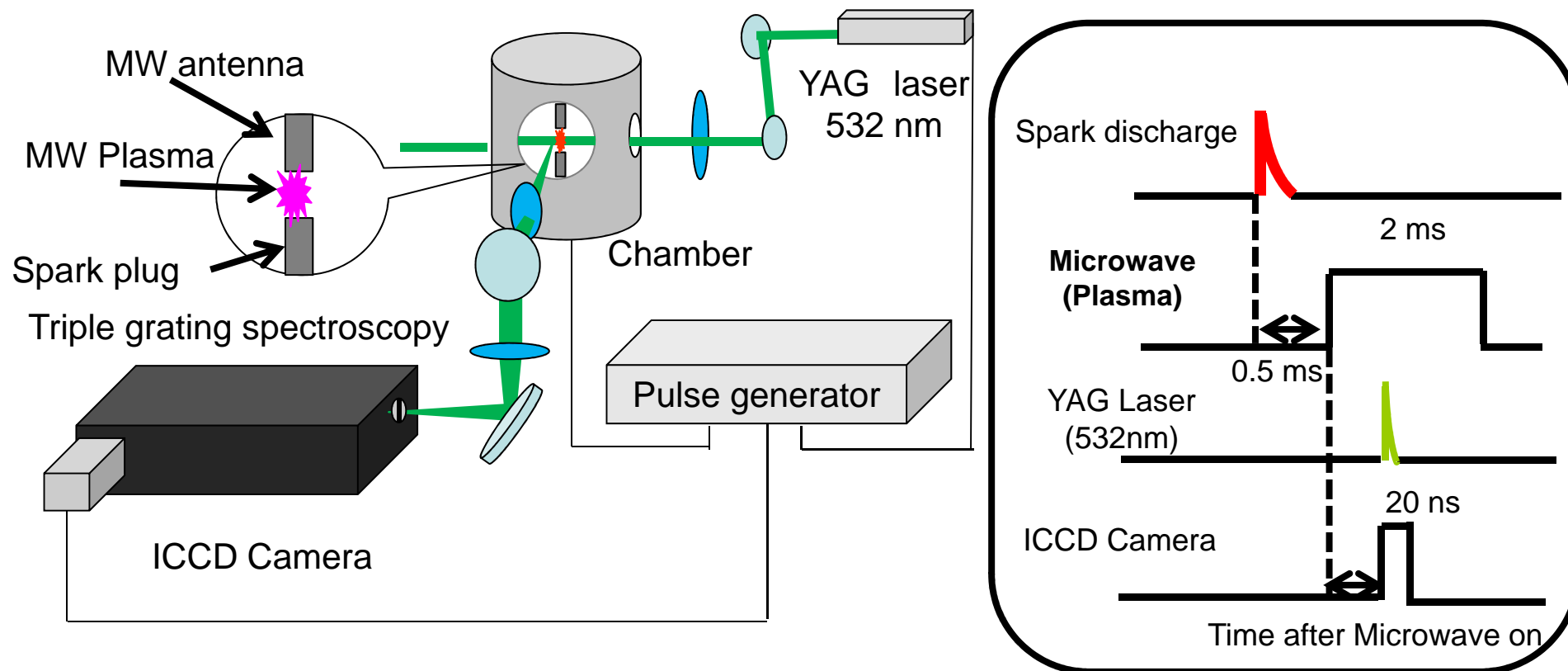
窒素ガス



- ヘリウムガスによるプラズマはヘリウムや不純物由来の水素、酸素原子などの線スペクトルのほか窒素分子やOH分子のバンドスペクトルから構成されていた
- 窒素ガスによるプラズマは窒素分子や窒素分子イオンのバンドスペクトルから構成されていた
- 様々な圧力下でのガス温度は3000 K程度であり、マイクロ波電力投入1 ms程度の間においてガス温度の上昇が確認された



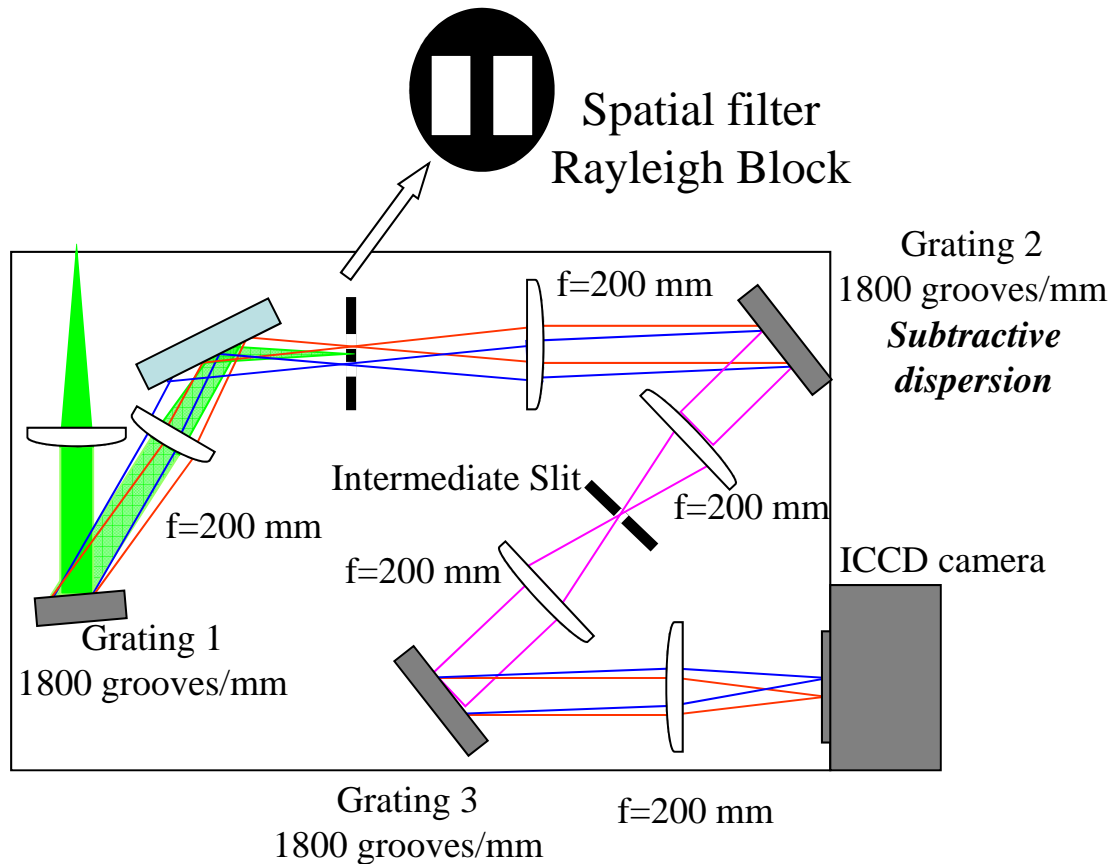
トムソン散乱計測実験装置図



- プラズマにレーザー光を照射し、散乱光を三重回折光子型分光器で分光計測することでトムソン散乱スペクトルを求めた
- スパーク放電してからマイクロ波を投入するまでの遅れ時間を0.5 msとし、レーザーとカメラのゲートを開くタイミング(Time after Microwave on)とガス圧を変化させて様々な条件でのトムソン散乱スペクトルを計測した

三重回折格子型分光器

- 発生させたプラズマは非常に小さく、またマイクロ波アンテナなど構造物の近傍にできるので**迷散乱光**が非常に多い
- 散乱光にはトムソン散乱光のほか非常に強い信号である**レイリー散乱光**が含まれる



第一回折格子で入射した散乱光を加分散する



レイリーブロックと呼ばれる特殊な空間フィルタで散乱光のレーザー波長成分(532nm)を除去する



第二回折格子で532nm成分を除去した散乱光を減分散する



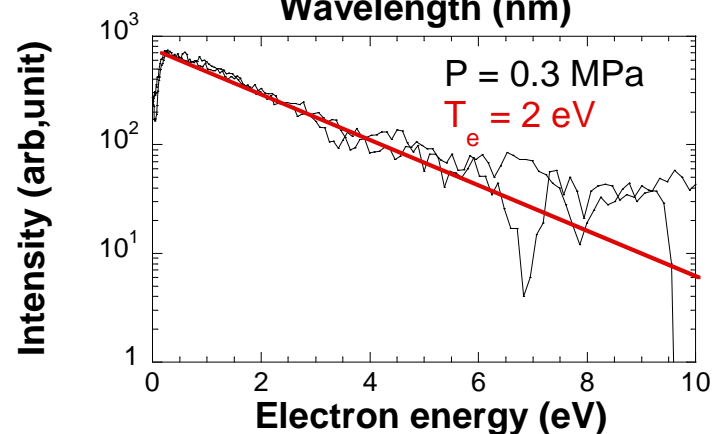
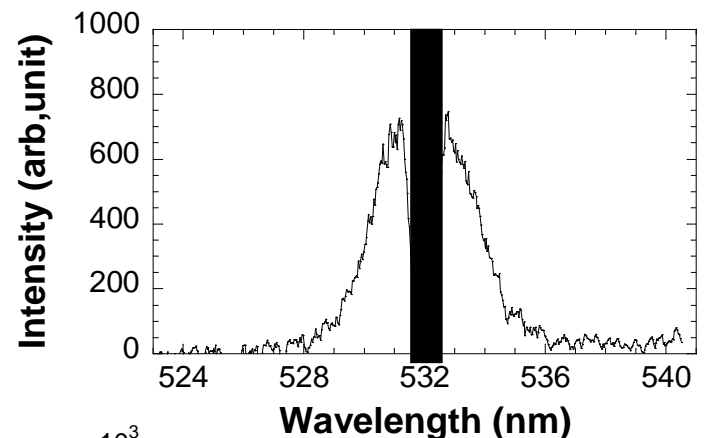
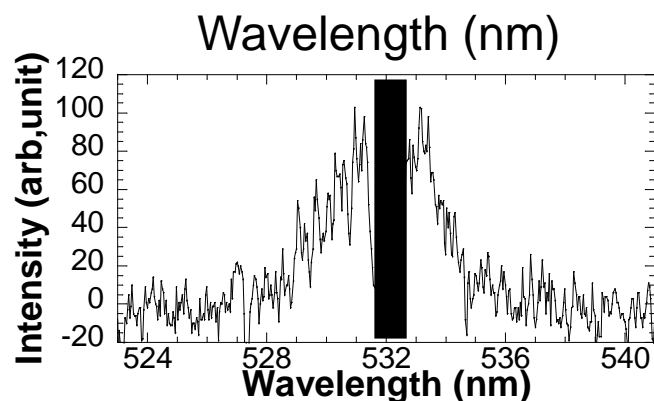
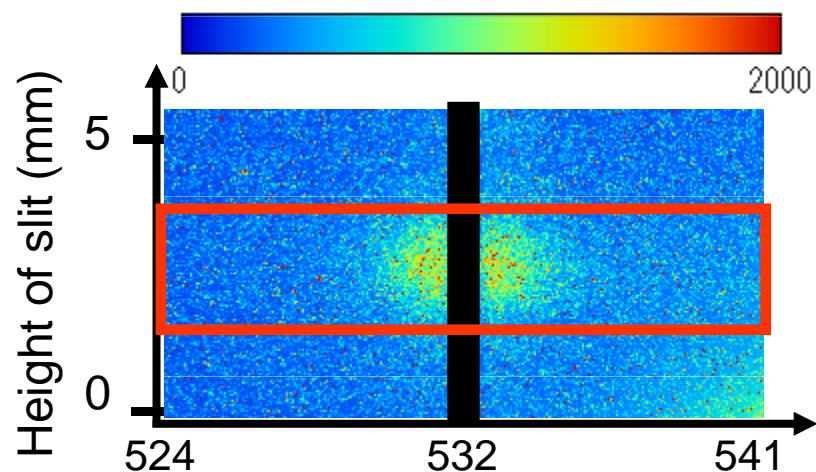
散乱光を中間スリットに通し、第三回折格子にてもう一度、加分散する



レーザー波長(532nm)から波長シフトしたスペクトルをICCDカメラにて検出する

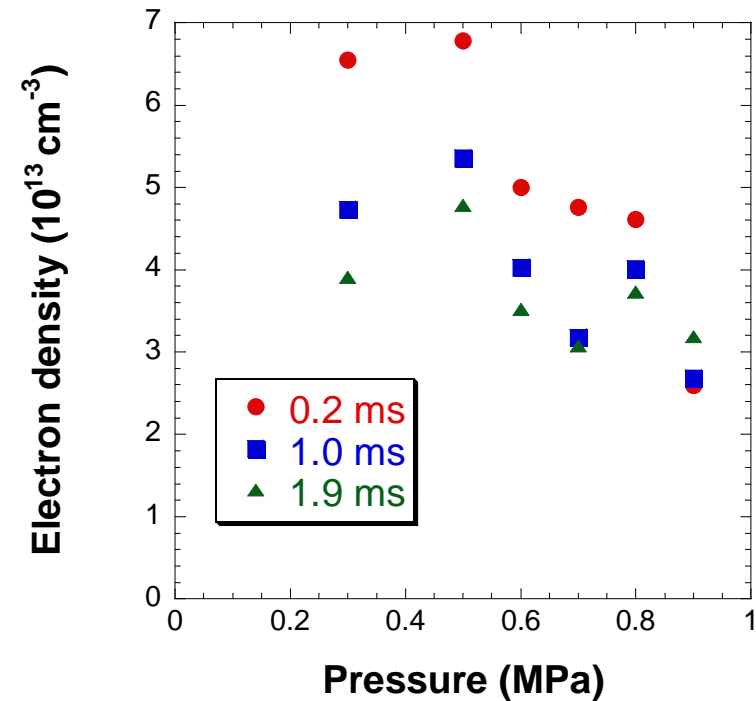
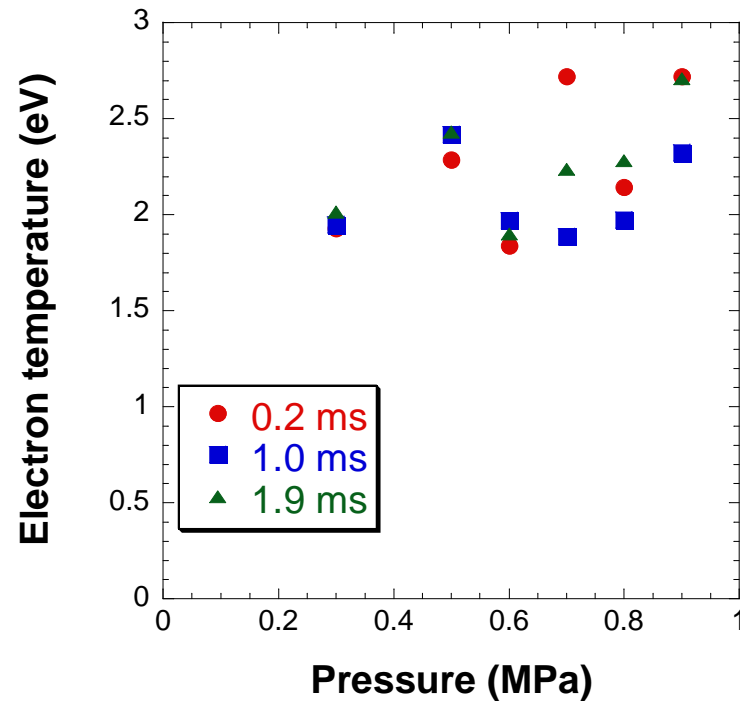


トムソン散乱スペクトルの例



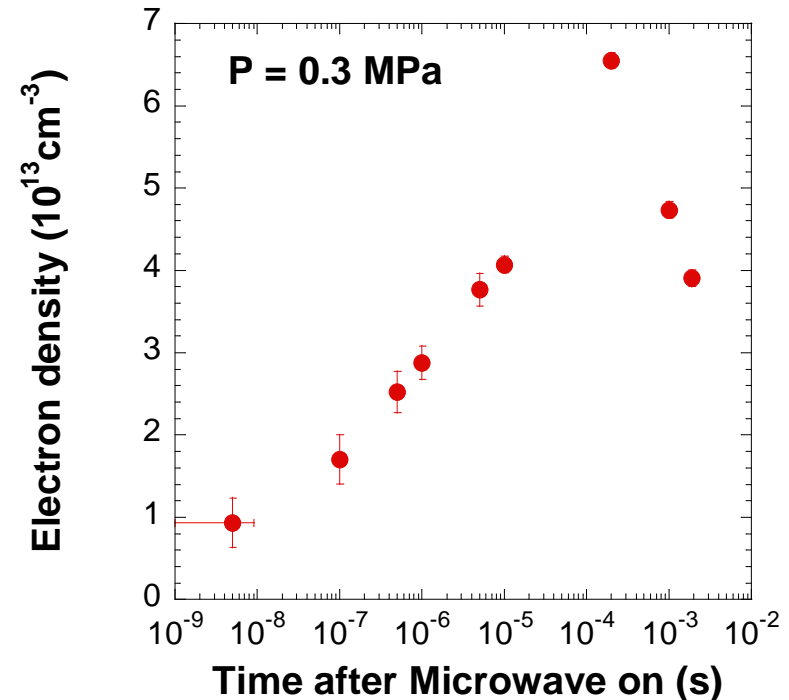
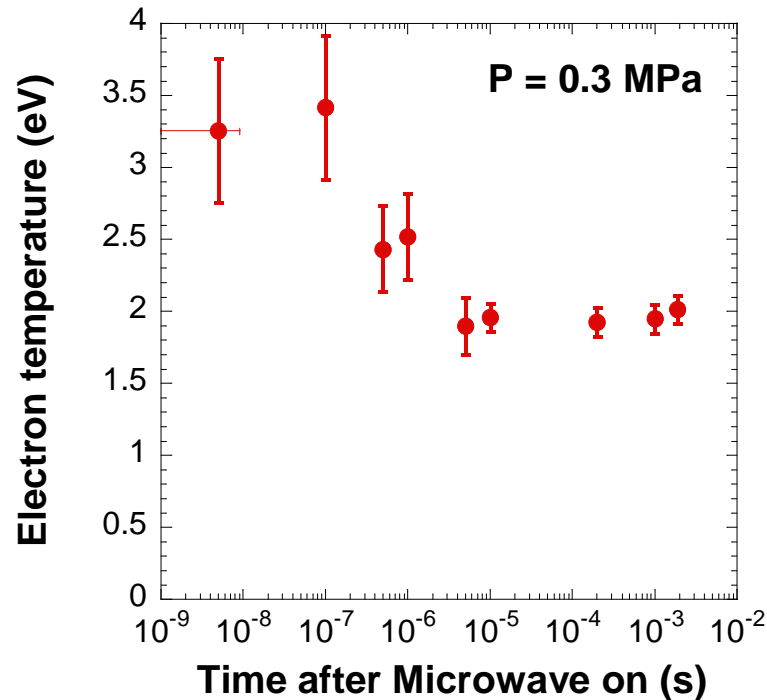
- 迷光除去のためのレイリーブロックの両側の波長領域にトムソン散乱光が明瞭に見られる
- 光子計数法の導入により信号対雑音比を大幅に改善した(右上図)
- トムソン散乱光の波長シフトの大きさを電子のエネルギーに換算すると, 電子エネルギー分布関数が得られ, 電子温度が評価できる(右下図)

電子温度および電子密度の圧力に対する依存性

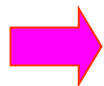


- 電子温度および電子密度を9気圧までの圧力範囲で評価することに成功した
- 電子温度は1.5 eV以上で、圧力に対して弱く増加傾向にある。電子密度は 10^{13} cm^{-3} のオーダーにあり、圧力に対して弱く減少傾向にある
- 発光分光法により求めたガス温度は3000 K程度であり、圧力が9気圧までの範囲でプラズマは強い非平衡状態にあることがわかった

電子温度および電子密度の時間変化



- トムソン散乱の高時間分解能(8 ns)を活かし、マイクロ波電力投入後の電子温度と電子密度の時間変化を調べた
- 電子温度は極めて高速に立ち上がり、およそ10 nsで約3.5 eVに達した後に時間的に低下し10 μ s で2 eV程度となり定常状態となった。電子密度の立ち上がりは比較的緩やかで10-100 μ sにおいて最大値となった後に時間的に低下した



エンジン内での放電時間は100 μ s程度が最適と思われる



まとめ

大気圧以上の圧力下におけるプラズマ支援着火のプラズマの状態を検討するため
ガス温度や電子温度、電子密度を計測した



- 様々な圧力下 (0.3~0.9 MPa) において電子温度は1.5 eV~3.5 eVであり、圧力に対し弱く増加傾向であることが分かった
- 電子密度は 10^{13} cm^{-3} のオーダーであり、圧力に対し増加傾向であることが分かった
- 電子温度は10 nsという極めて高速に3.5 eV程度まで上昇する。その後10 μs まで時間的に低下し、2 eV程度で定常状態となった
- 電子密度は10-100 μs において最大値となった後に時間的に低下した
- ガス温度と電子温度の差は大きく、生成したプラズマは非平衡プラズマであることが分かった



電子密度算出法

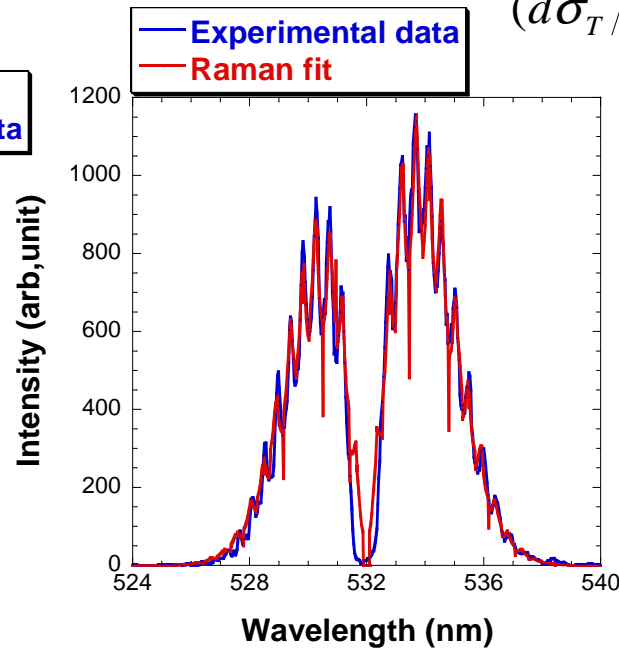
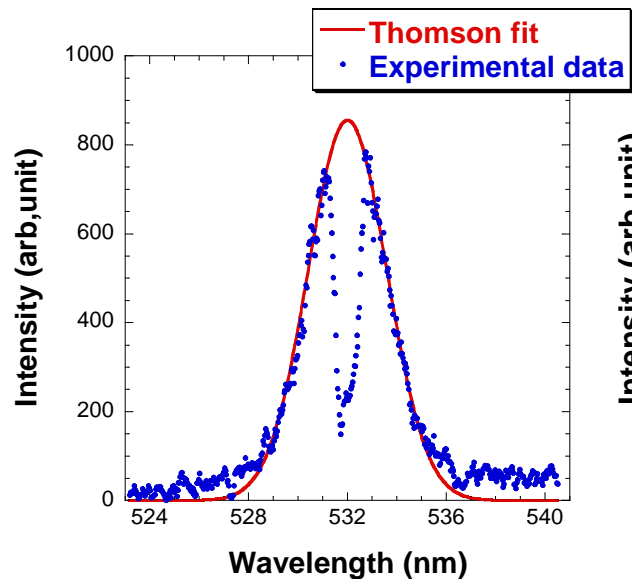
$$P_T \propto P_i n_e \frac{d\sigma_T}{d\Omega} \Delta\Omega$$

$$P_{Rm} \propto P_i n_{N_2} \frac{d\sigma_{Rm}}{d\Omega} \Delta\Omega$$

→

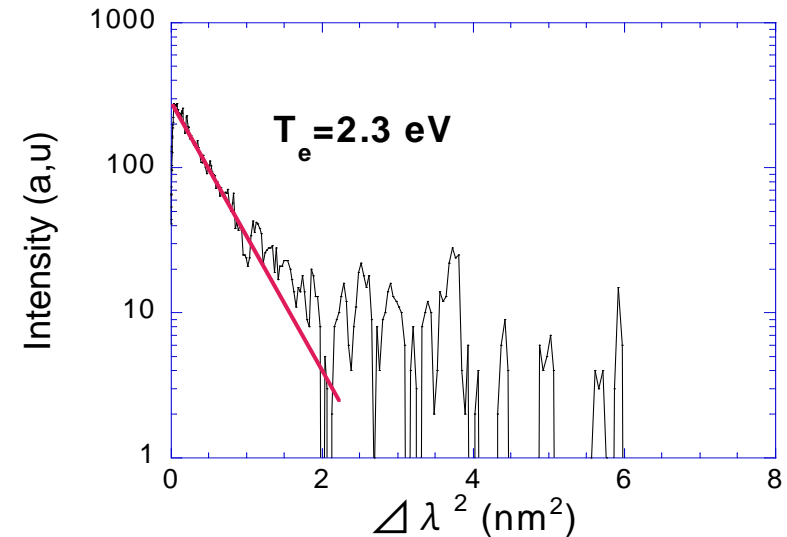
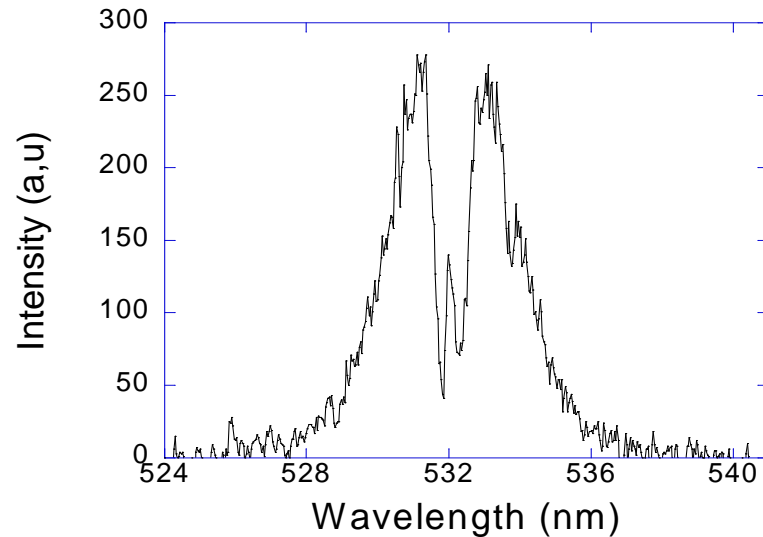
$$n_e = n_{N_2} \frac{P_T}{P_{Rm}} \frac{(d\sigma_{Rm}/d\Omega)}{(d\sigma_T/d\Omega)}$$

$$\frac{(d\sigma_{Rm}/d\Omega)}{(d\sigma_T/d\Omega)} = 8.15 \times 10^{-5}$$



ラマン散乱は分子の振動回転エネルギーの変化に相当する周波数シフトを伴う場合をラマン散乱と呼ぶ

電子温度算出



$$I_T(\Delta\lambda, \theta)\Delta\Omega\delta\lambda = I_0 n_e \Delta V \cdot d\sigma_T(\Delta\lambda, \theta) \cdot \Delta\Omega\delta\lambda$$

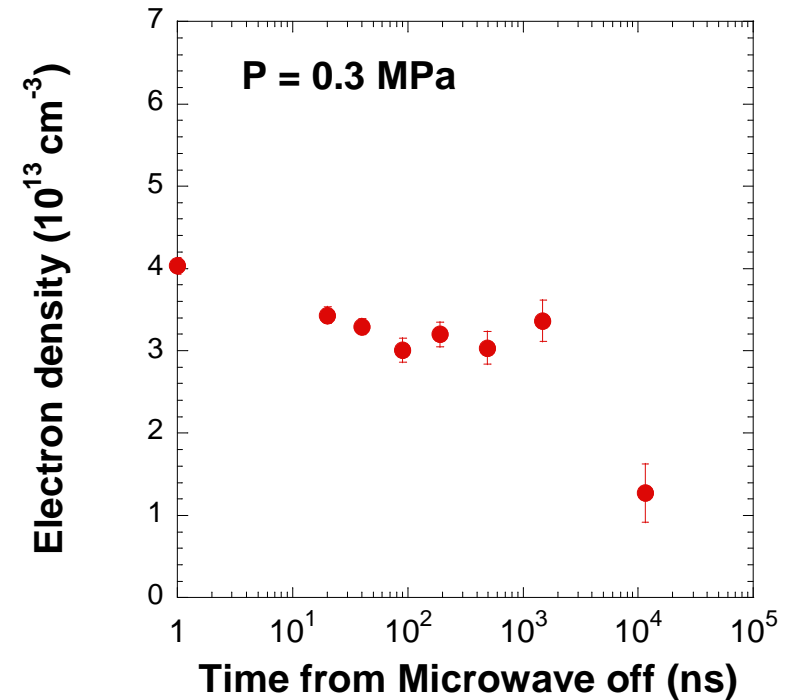
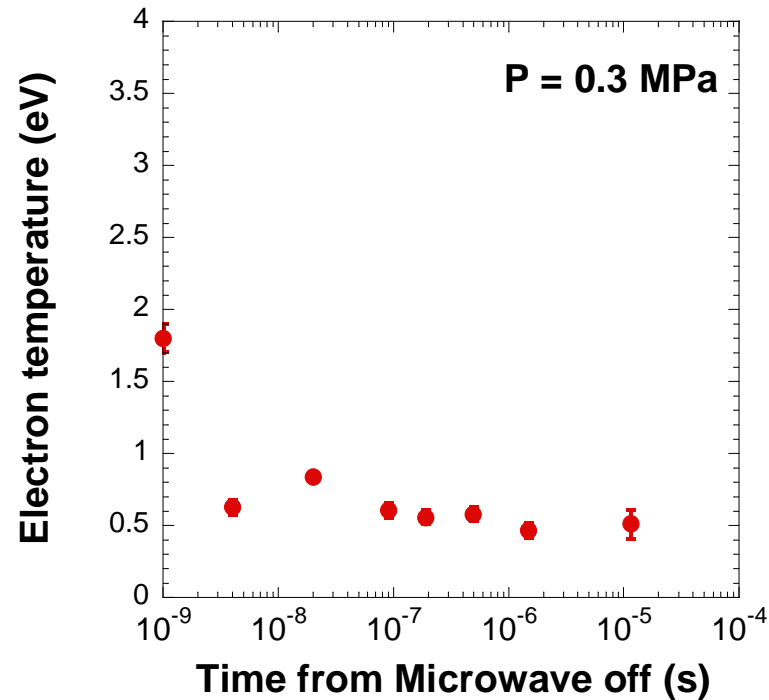
$$d\sigma_T(\Delta\lambda, \theta) = r_0^2 [1 - \sin^2 \theta \cos^2 \xi] \cdot S(\Delta\lambda, \theta) \quad \theta = \xi = 90^\circ$$

$$S(\Delta\lambda, \theta) = \left(\frac{m_e}{2\pi e T_e}\right)^{1/2} \left(\frac{c}{2\lambda_i \sin(\theta/2)}\right) \exp\left\{-\frac{m_e}{2e T_e} \left(\frac{c\Delta\lambda}{2\lambda_i \sin(\theta/2)}\right)^2\right\}$$

◆ Y軸に対数を取り、傾きを求めることで電子温度を求めることができる

トムソン散乱はマクスウェル型に近似できる

電子温度および電子密度の時間変化(アフターグロー)



- マイクロ波電力供給停止後40 ns後には電子温度は0.8 eVにまで急激に低下し、その後10 μs 程度が経過するまで 0.5 eVの電子温度を維持した。
- 電子密度は比較的緩やかに減少し、マイクロ波電力停止後10 μs 程度まで 10^{-13} cm^{-3} のオーダーを維持した。