

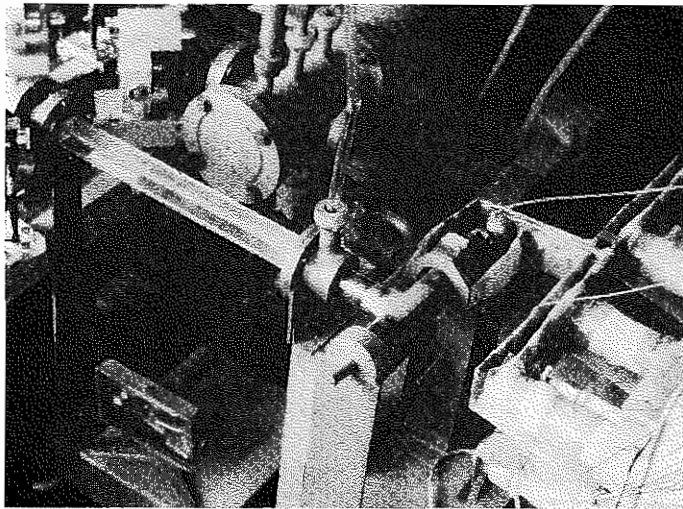
2. プラズマ衝撃波

中 井 貞 雄*

山 中 千 代 衛*

ま え が き

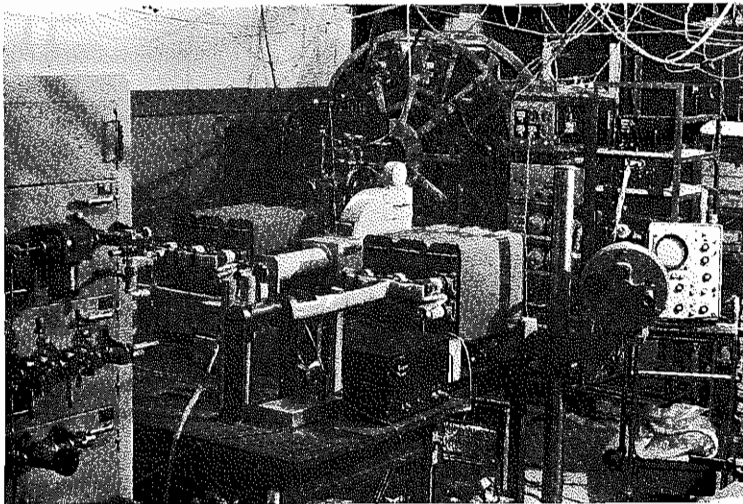
超音速飛行や人工衛星の大気圏再突入の際に問題となる衝撃波による電離現象を電気的方法により計測し、その機構を実験的に解明してきた。この現象は核融合プラズマ研究の分野においてもプラズマ加熱、高密度完全電離プラズマ発生的手段として重要である。衝撃波発生にはT字型、円錐型、誘導放電型等の電磁衝撃波管および2段膜圧力衝撃波管を用いた。筆者等の研究室におけるこれらの装置を第1図、第2図、第3図に示す。



第1図 T字型衝撃波管

流しカメラ、ファラデーセルカメラを用いて衝撃波の発生、伝播、反射の状況を調べ、発光フロントと圧力フロントを識別して電離時間を求めた。さらに電気探針を用いプラズマ密度、電子と分子およびイオンとの温度緩和時間等を測定した[1]。プラズマ境界面におけるマイクロ波反射係数の測定より電子密度、衝突周波数を求めるマイクロ波反射係数直視装置を開発した。これを用い衝撃波により発生した高密度プラズマ ($10^{12} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) の計測法を確立し[2]、また衝撃波フロント前方に存在する precursor electron に関し明らかにするところがあった[3]。マイクロ波測定の上限よりさらに高電子密度のプラズマ計測のためレーザー等を用いたマッハツェンダー干渉計によるプラズマ測定法を開発した[4]。

* 大阪大学工学部電気工学教室

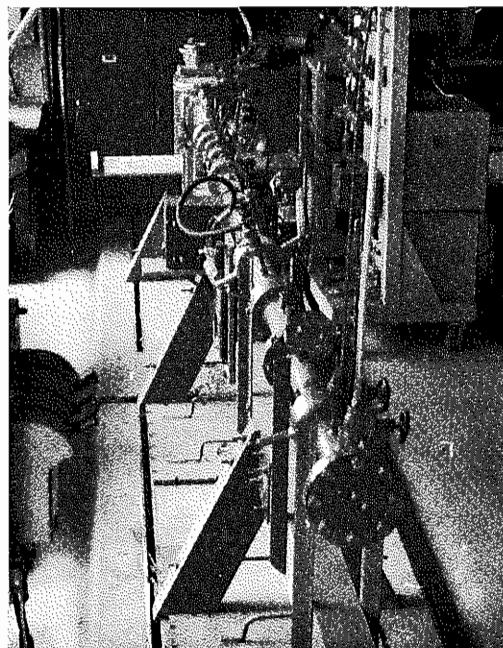


第2図 円錐型衝撃波管（後方円形合）および各種測定装置，ミリ波装置（左端）流しカメラ（中央），ダイナファックスこま取りカメラ（右端）

磁場中プラズマに発生する電磁流体的な衝撃波，collision less shock の研究はプラズマ物理，宇宙現象に関連してはなほ興味深い重要な研究である．このため筆者らは超高速衝撃波管により collision less 領域における衝撃波の実験的研究をはじめている[7]．

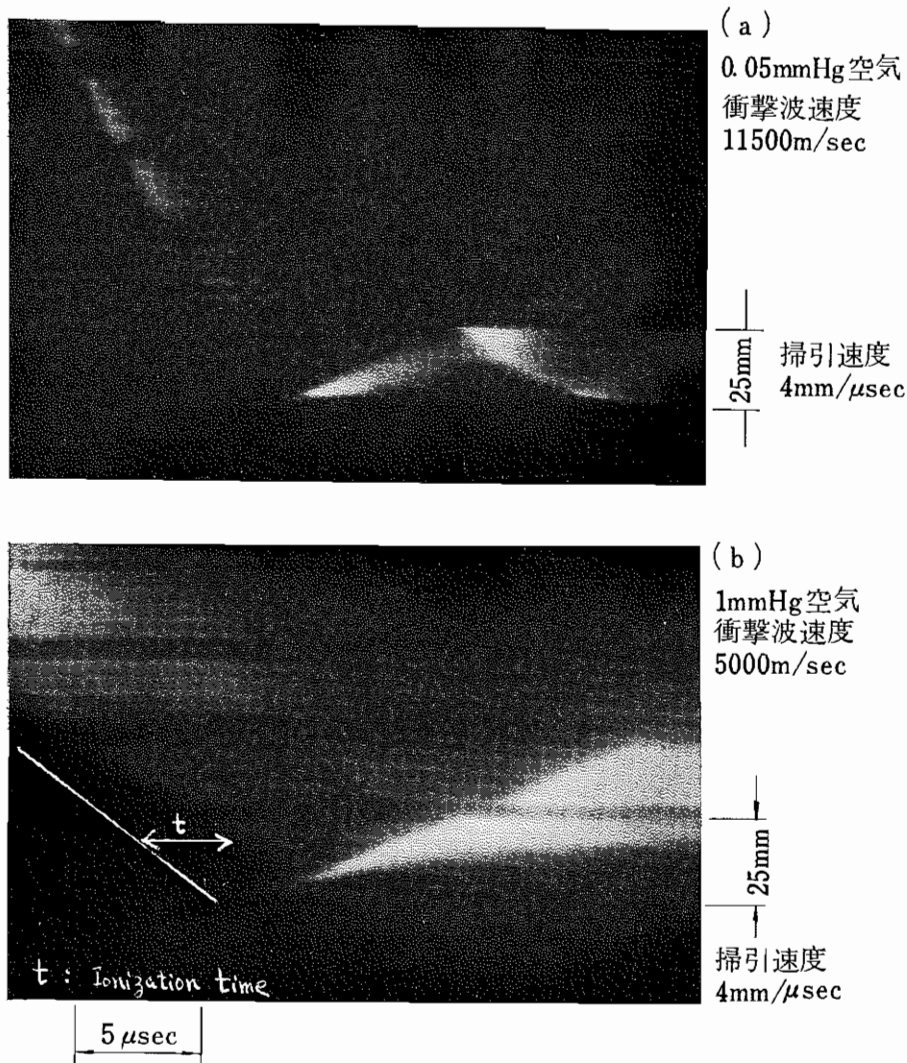
実験および結果

1. 高速度写真観測 剛体壁での衝撃波反射の状況を撮影した流し写真を第4図に示す．衝撃波速度が小さい場合はフロントにおける発光はみられない．速度が増大すると圧力フロントから，少し遅れて発光する．これより電離時間が求まる（第4図bのt）．さらに速度が増大すると圧力フロントと発光フロントとは接近する（第4図a）．ファラデーセルカメラにより撮影された，誘導放電により発生した2衝撃波相互衝突の状況を第5図に示す．



第3図 2段膜圧力衝撃波管

2. 電気探針測定 衝撃波速度の測定より Rankine-Hugoniot の関係を用いてフロント背後のイオン，分子温度が推定できる．探針[7]により電子温度の変化を測定すると電子とイ



第4図 衝撃波反射の状況と Ionization Relaxation.

〔オン, 分子間の温度緩和の過程がわかる。

3. マイクロ波反射測定 急峻な電子密度の立上りをもつプラズマ境界平面でのマイクロ波反射係数は

$$R = \frac{p_0 - p}{p_0 + p} = -1 + \frac{2k_0(k_0 + \beta)}{\alpha^2 + (k_0 + \beta)^2} + j \frac{2\alpha k_0}{\alpha^2 + (k_0 + \beta)^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここに

$$p = \alpha + j\beta = jk_0 \left[1 - \frac{\eta}{1 \pm \gamma - j\delta} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$p_0 = jk_0$$

であり $\eta = (\omega_p/\omega)^2$, $\delta = \nu_c/\omega$, $\gamma = \omega_c/\omega$ である. ω_p , ν_c , ω_c はそれぞれプラズマ周波数, 衝突周波数, 電子サイクロトン周波数である. 電子密度を n_e , 質量を m , 電荷を e とするとプラズマ周波数 ω_p は

$$\omega_p = \frac{4\pi n_e e^2}{m} = 5.63 \times 10^4 n_e^{1/2} \text{ (rad/sec)} \quad (3)$$

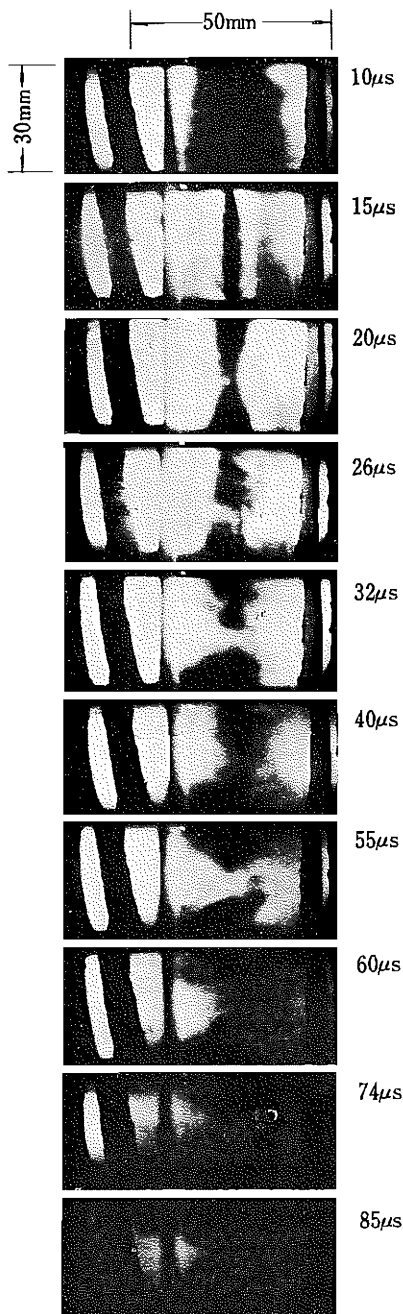
で与えられる. (1), (2)式により種々の η , δ , γ におけるマイクロ波反射係数を計算し, 第6図のようなベクトル図を作成した. これにより複素反射係数を直接 $X \cdot Y$ シンクロ面上に描かせると直ちに電子密度, 衝突周波数が求まる. 第7図にこの目的のため製作したマイクロ波反射係数直視装置およびそれを衝撃波管に応用した実験[2]の概略を示す. 衝撃波を剛体壁で反射させるとそこで急峻なプラズマ境界面が形成され本測定は精度よく適用できる. 入射衝撃波速度と発生したプラズマ密度との実測例を第8図に示す. 進行中の衝撃波に関しては, 光倍管による特殊な同期回路を用いて測定した結果フロント前方にかなり高密度の precursor electron の存在が見出された. 第9図にその軸方向密度分布の状況を示す.

4. マッハツェンダー干渉測定 完全電離プラズマの屈折率 n_e および屈折率の変化による干渉じまの移動数 N_s は次式で与えられる.

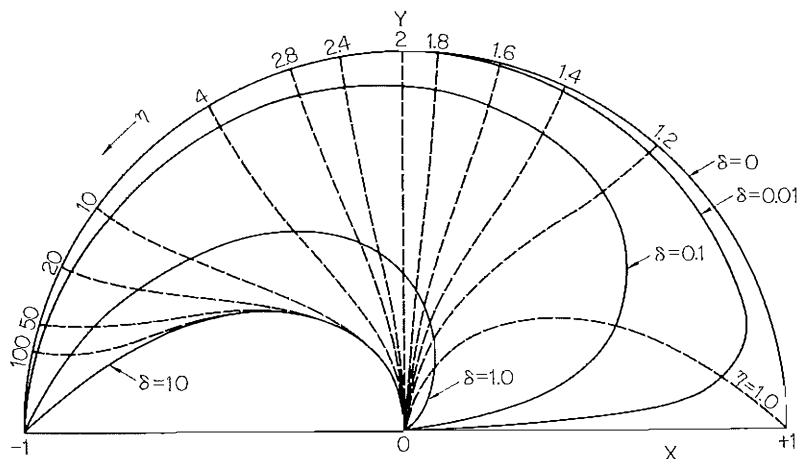
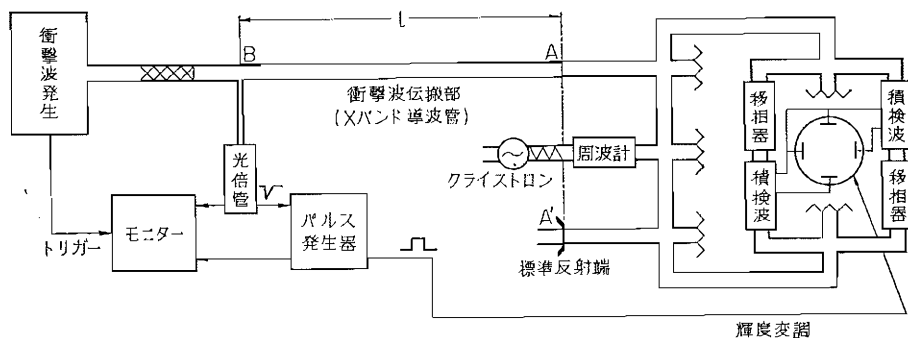
$$n_e = \sqrt{1 - (\omega_p/\omega)^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \quad (4)$$

$$N_s = l(n - n_e)/\lambda \quad (5)$$

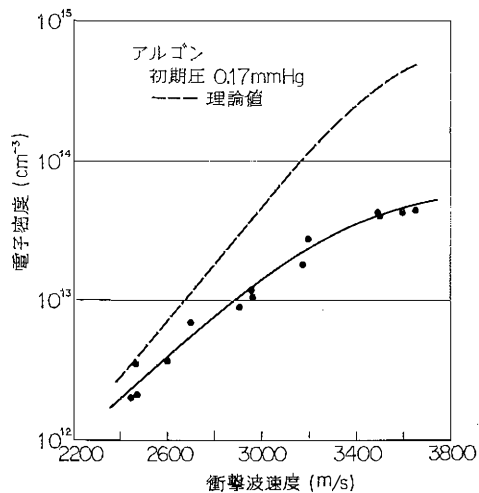
ここに n , l , λ はそれぞれ基準部の屈折率, 測定部の光路に沿った長さ, 干渉光の波長である. したがって屈折率の変化による干渉じまの移動数を測定すれば電子密度が求まる. $\lambda = 5,000 \text{ \AA}$, $l = 2 \text{ cm}$ とすると $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ で一つしみが移動する. 実際にはしまの移動を光倍管で検出し, オシロスコープ上にフリッジとして観測した. この際プラズマからのふく射光が干渉光と重なり妨害となる. これを除去するため第10図に示すような差動法を考案した. 偏光子1により直線偏光となった干渉光は偏光



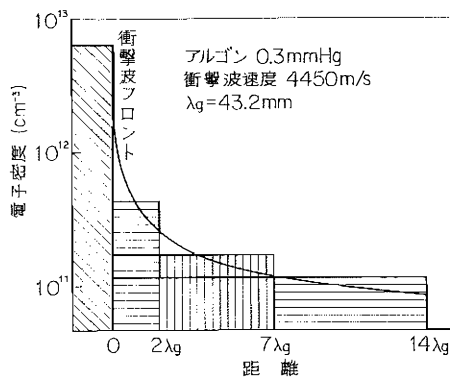
第5図 衝撃波相互衝突のフェラデー写真 (時間は放電開始後の経過時間)

第6図 マイクロ波反射係数と η , δ の関係 ($\gamma=0$ のとき)

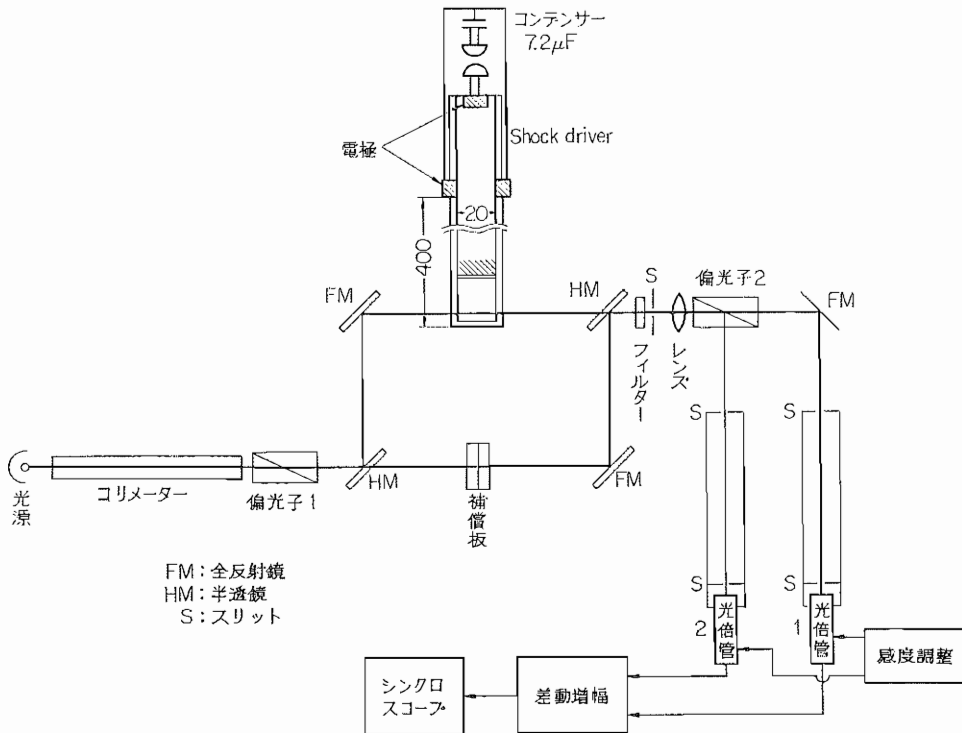
第7図 マイクロ波反射係数直視装置によるプラズマ衝撃波測定



第8図 衝撃波速度と電子密度



第9図 衝撃波フロント前方の precursor electron 分布

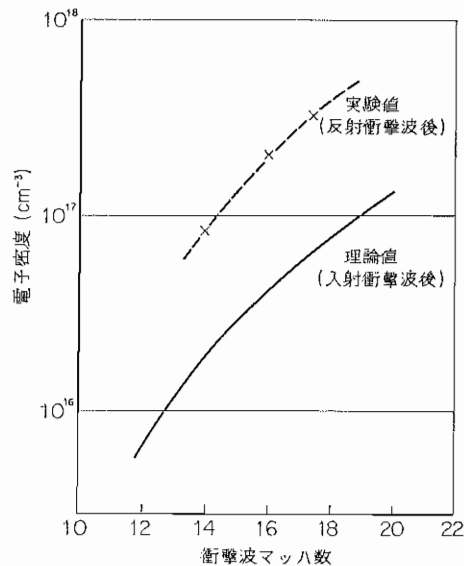


第 10 図 マッハツェンダー干渉計によるプラズマ衝撃波測定

子2を通過して光倍管1に入射する。偏光していないプラズマからの光は偏光子により直交した二つの直線偏光に分離され、それぞれ光倍管1, 2に入射する。両光倍管の出力を差動増幅することにより干渉光による信号のみを取り出すことができる。この方法により測定した入射衝撃波速度とプラズマの電子密度との関係を第 11 図に示す。高輝度で単色性、可干渉性のすぐれたレーザー光を干渉計の光源として用いた実験の結果、上述の困難点が除去でき、測定が非常に容易となった[8]。

衝撃波による電離

衝撃波フロントにおいてはこれに相対的な運動エネルギーがエントロピー増大を伴った断熱圧縮により熱エネルギーに変換される。かかる流体力学的圧縮フロントの厚さは平均自由行程の数倍であり[5]、電離の進展はこれよりはるかに長い緩和時間をもつ。実験での衝撃波条件を考慮すると分子間衝突についてはこの値は数 100 μ s となる。電子衝突による電離を考えると電離緩和時間は 20 μ s となる。流し写真、光倍管によるフロントの光波形の観測[1]、マイクロ波による電子密度の測定等の実測値[2]は数 μ s である。観測されたかなり高密度の precursor electron の存在や、フロント背後のプラズマからのふく射によるフロント前方の気体分子の励起等がフロントにおける電離機構に重要な役割をはたしているものと解釈される。又電子とイオンとの熱平衡のメカニズムとして通常のクーロン衝突によるもの



第11図 衝撃波速度とプラズマの電子密度

は緩和時間が長くなり、急激に緩和が進展するためには他の機構、たとえばプラズマ波動の励起等による急速な熱平衡化を考慮する必要がある。超高速衝撃波においては衝撃波系としてこれらを含めた取扱いをせねばならない。現在衝撃波発生機構の異なる2方法すなわち電磁衝撃波管と圧力衝撃波管の実験結果を比較して現象の解明を行なっている。

参 考 文 献

- [1] 山中, 山村: 電学誌 **81**, 96 (昭 36)
- [2] 中井, 山中: 物理学会秋季分科会 21 a E 7 (昭 37.9)
: 電学誌 **85-2**, 289 (昭 40)
- [3] 中井, 山中: 物理学会春季分科会 2 ap 3 (昭 39.4)
: 核融合研究 **13**, 312 (1964)
- [4] 中井, 山中: 物理学会 19 年回 8 p C 4 (昭 39.10)
: 応用物理 **34**, 586 (1965)
- [5] H.M. Mott-Smith: Phy. Rev. **82**, 385 (1951)
- [6] A. von Eengel: Ionized Gases, p. 60 (1955)
- [7] 阪上, 中山: 核融合研究 (昭 40. 9)
- [8] 中井, 山中: 核融合研究 (昭 40. 9)