

# Delayed Emission Triggered by a High Power Microwave Pulse

佐々木 進・金子 修・大藪修義・河島信樹

## Delayed Emission Triggered by a High Power Microwave Pulse

By

Susumu SASAKI, Osamu KANEKO, Nobuyoshi OHYABU  
and Nobuki KAWASHIMA

**Abstract:** The interaction of high power microwave with a magnetized plasma has been studied experimentally. Delayed emissions at cyclotron harmonics are observed after the termination of the pumping wave when the frequency of the pumping wave is equal to the harmonics of the cyclotron frequency and is near at the plasma frequency.

### 概 要

高密度プラズマに大出力マイクロ波パルスを打ち込んだ時ひきおこされる現象について述べる。

$f \sim f_{pe} \sim n f_{ce}$  ( $f$ : マイクロ波周波数,  $f_{pe}$ : プラズマ周波数,  $f_{ce}$ : サイクロトロン周波数,  $n$ : 整数) の条件のもとで, パルス入射が終わった後, プラズマからサイクロトロン周波数の整数倍のエミッションが戻ってくる。

### 1. 緒 論

プラズマに high power R.F を打ち込んだ時ひき起こされる現象は, 最近非常に注目され, 各所で実験が行なわれている。特に R.F の周波数がプラズマ周波数付近で, 異常吸収, 異常散乱等, 非線形現象の例が報告されている。これらの現象は物理的に興味深い粒子と波動の非線形相互作用を含み, 基礎プラズマ研究の面だけでなく, 磁気圏における波動と粒子の相互作用のシミュレーションとして, 又核融合の研究への応用として重要なものである。

我々は, 高密度定常プラズマに high power microwave pulse を打ち込んで一連の実験を進めているが, その過程で microwave pulse の打込みが終わった後, プラズマからサイクロトロン周波数の整数倍の emission が戻ってくるという興味ある現象を見出した。このような性質を持った emission はこれまで報告された例がなく, 現在その発生機構について調べているが, この発生プロセスに electrostatic instability が関与していると考えられるようになった。それに関連して Alouette 衛星で行なわれた R.F による static wave の励起実験との関連性を調べている。更に最近この emission の発生を人為的に制御

することができるようになり、やがてこの emission の発生メカニズムの全体が明らかになる事が期待できる。

## 2. 測定装置

実験装置の概略については Fig. 1 に示すとおりである。プラズマ発生装置は、いわゆる T

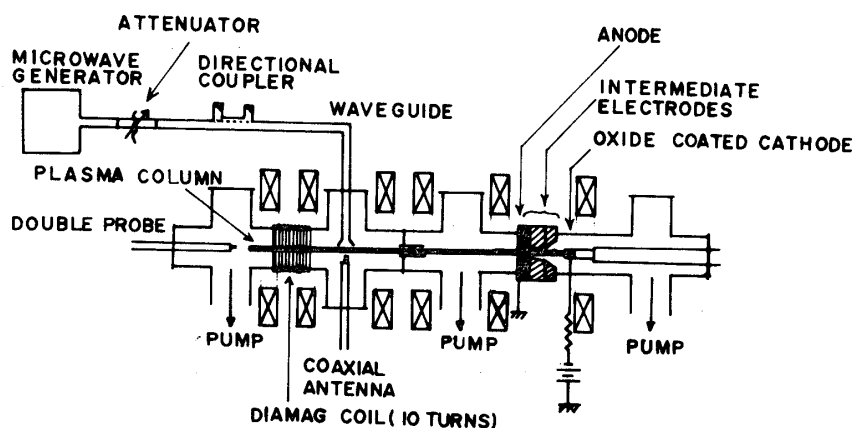


Fig. 1 実験装置

PD装置と呼ばれるもので、カソードから出た電子を、アノードとの間の電場で加速し、そのビームによって定期的にプラズマを維持するものである。ガスはHeを用いており、プラズマコラムの径は約10 mm、密度は $10^{12}$  個/cm<sup>3</sup>、電子温度は数 eV 程度である。このプラズマをコイルによって作られたミラー場の中に導き、そこにマグネトロンから減衰器を通してマイクロ波のパルスをプラズマコラムの垂直方向から入射する。マイクロ波の出力は最大10kw、パルス巾は10  $\mu$ sec、周波数は9.36 GHz である。これによってプラズマ内に発生する波をホーン型アンテナで受け、1 GHz から10 GHz まで連続的に測定できるレシーバーで観測する。更にプラズマ密度測定用の double probe、高エネルギー電子測定用のX線シンチレーションカウンター、プラズマ内でのエネルギー変化量を調べる diamagnetic coil、ビーム測定用のログスキーコイル、その他種々の形状のプロープを使用して実験を行なっている。

## 3. 測定結果

9.36 GHz のマイクロ波パルスをプラズマに入射すると、その瞬間に発生する emission (simultaneous emission) と共に、入射が終わった後に遅れて出てくる emission (delayed emission) が観測された。(Fig. 2) これらの emission、特に delayed

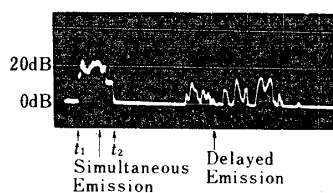


Fig. 2 simultaneous emission と delayed emission の写真。t<sub>1</sub> ~ t<sub>2</sub> 間にパルスを打ち込んでいる。  
12.5  $\mu$ sec/div

emissionは delay time が 100  $\mu$ sec にもおよぶ特殊な現象で、以下に示すような非常に興味深い性質を持っており、我々は特にこの現象に注目して実験を行なっている。

まずその発生が磁場に極めて critical に依存する。即ち入射マイクロ波の周波数を  $\omega_0$  とすれば、 $\omega_0 = n \omega_{ce}$  ( $n$ は整数、 $\omega_{ce}$ は電子のサイクロトロン周波数)、 $\omega_0 \sim \omega_{pe}$  ( $\omega_{pe}$ は電子のプラズマ周波数)なる条件を満たす時にのみ発生する。(Fig.3)

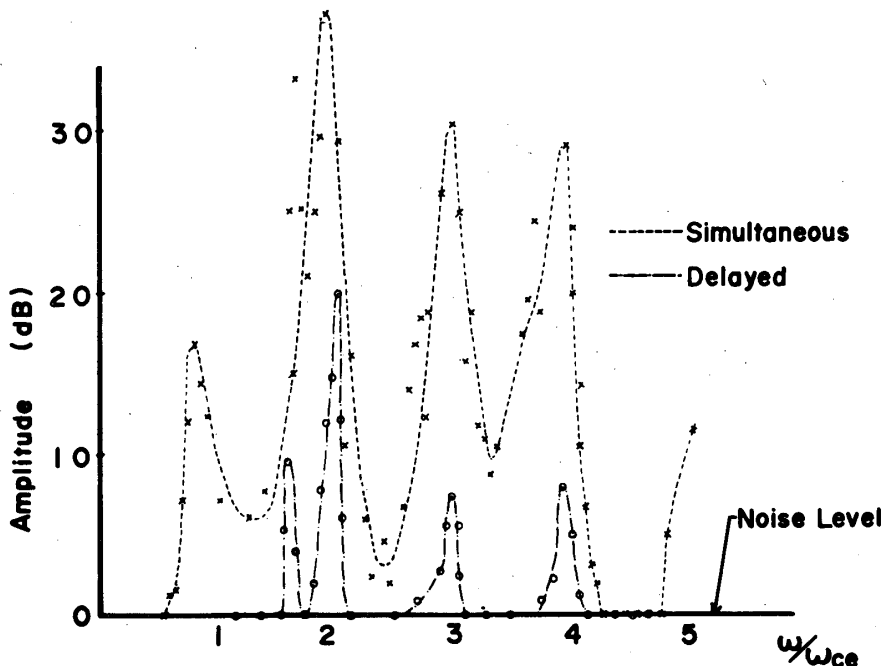


Fig. 3 simultaneous emissionとdelayed emissionの磁場依存性。 $\omega_0 = n \omega_{ce}$ のところでは delayed emissionが発生する。

更にその周波数については、磁場が $\omega_0 = n \omega_{ce}$ を満たしている時、観測される delayed emissionの周波数は $\omega = \omega_{ce}$ ,  $2 \omega_{ce}$  ……  $(n - 1) \omega_{ce}$ ,  $n \omega_{ce}$ のものであった。(Fig.4, ここでは各々 $\omega_0 = 4 \omega_{ce}$  ( $B = 835$  gauss)  $\omega_0 = 5 \omega_{ce}$  ( $B = 668$  gauss)におけるスペクトラムを示す)。 $\omega = \omega_{ce}$ ,  $\omega = n \omega_{ce}$ の delayed emissionも存在することを最近確認したが、他のモードに比して極めて小さい。特に  $n = 2$  のモードはどの場合でも最も大きいことが注目される。

次に simultaneous emissionと delayed emissionのパワーの入射パワーに対する依存性を調べてみると、ある臨界点以下では発生せず、それを越すと急激に出始めていることがわかる。又、密度に対する依存性については正確な測定はまだだが、TPD装置の場合プラズマ密度は back pressure に比例していると考えられるので、参考までに back pressureに対する依存性を見てみると (Fig.5) delayed emissionは狭い密度領域でしか発生しない事がわかる。プローブ測定によれば、この密度はほぼ  $10^{12}/cc$  前後である。

上記のような特徴ある磁場依存性はパワー入射が ECR によることを想起させる。実際

diamagnetic coil を用いてプラズマ密度温度の変化〔 $\Delta(nT)$ 〕を調べてみると各ECRの場所で大きな立ちあがりが見られる。(Fig.6) 更にX線カウンターによってX線の発生を測定した結果、各共鳴点でX線が観測された。

(Fig.7) このエネルギーは、カウンターの頭部に種々の厚さのAl板を置いて測定したところ10~15 keVと見積もられた。又、プローブ測定でも各共鳴点で高エネルギーの電子が発生していることがわかった。(Fig.8) このようにして作られた高エネルギー電子はミラー場に閉じ込められていると考えられるが、実際ミラー比を変化させてみると、ミラー比が1以下では simultaneous emission だけで delayed emission は観測されなかった。(Fig.9) 更にX線も遅れるものはなかった。この事は高エネルギー電子が delayed emission に関係している事を示し、実際X線の delay time と delayed emission の delay time はほぼ同じである。又 delayed emission のうち特に大きいものはX線の burst を伴っている事が観測された。(Fig.10)

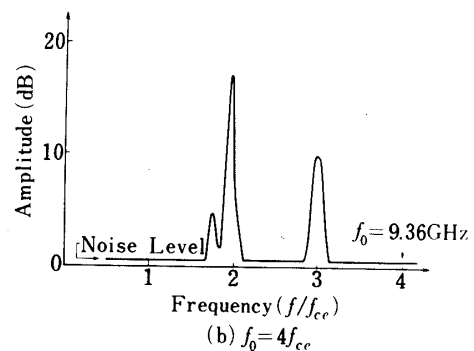
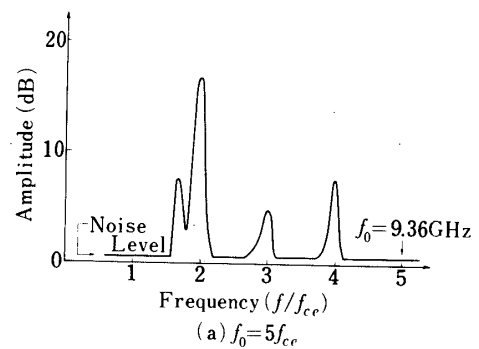


Fig. 4 (a)  $f_0 = 4f_{ce}$  における delayed emission の周波数スペクトラム  
(b)  $f_0 = 5f_{ce}$  における delayed emission の周波数スペクトラム

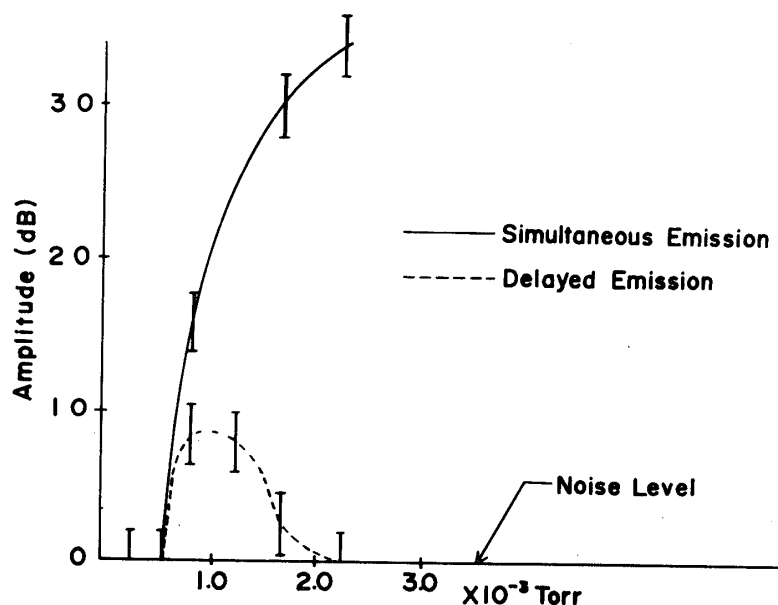


Fig. 5 simultaneous emission と delayed emission の密度依存性

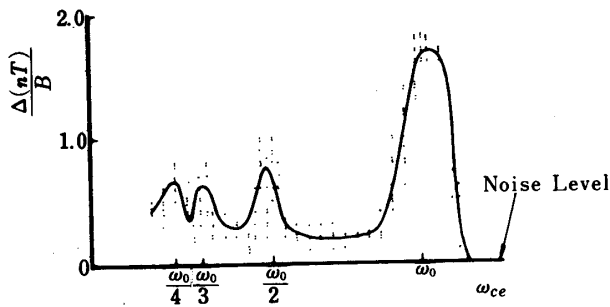


Fig. 6 共鳴点における密度温度の変化

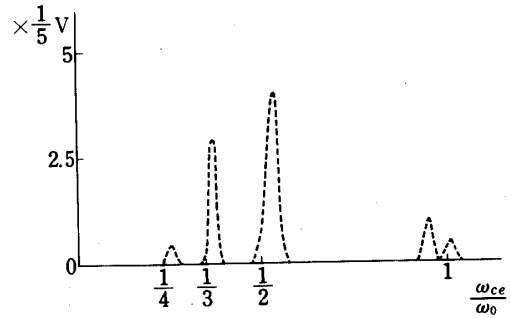


Fig. 7 X線の磁場依存性。

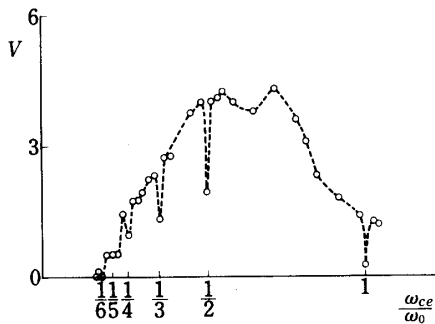


Fig. 8 プローブによる共鳴点での high energy electron の測定

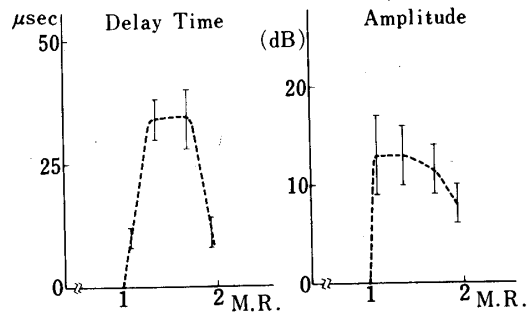


Fig. 9 delayed emission のミラー比に対する依存性。

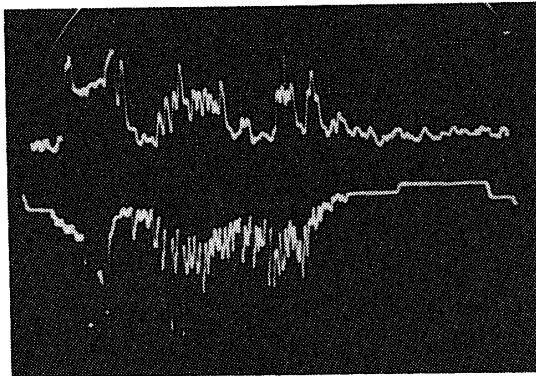


Fig. 10 delayed emission (upper beam) に伴う X 線 burst (lower beam)

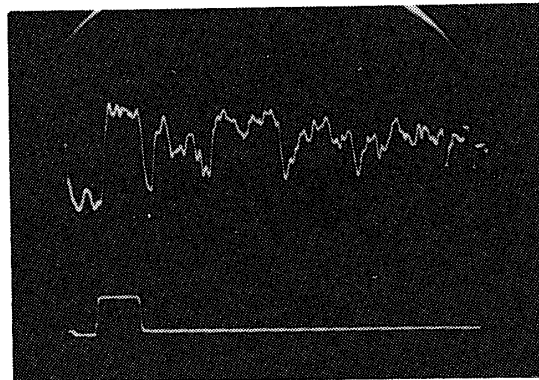


Fig. 11 別種の delayed emission (lower beam) は反射 microwave signal

今まで述べてきたのは Fig. 2 に見られるような delayed emission についてであったが、これとは様子の異なる delayed emission も観測された。(Fig. 11) この delayed emission の観測される領域は前の delayed emission の発生する密度領域より 50% 程度下であり、磁場は  $\omega_0 = 2\omega_{ce}$  の時顕著に観測される。特に先に述べた delayed emission の

スペクトラムが鋭いのに対して、この delayed emission のスペクトラムが極めてブロードであることが注目される。 $((1.5 \sim 2)\omega_{ce})$  又、プラズマからの反射マイクロ波を測定してみると、前に述べた delayed emission が起きる時は、真空の時よりも増加しているのに対し、この delayed emission の起きる時は真空の時より小さくなっており、この点は非常に興味深い。

これらの delayed emission の発生機構を調べる為、現在人為的にこの delayed emission の発生を制御する実験を行っており、実験領域の cold のプラズマ密度をパルス的にあげると delayed emission が出なくなり、TPDのビーム電流量をパルス的に増やすと delayed emission が出易くなるという結果を得ている。

#### 4. 考 察

delayed emission の発生の為には

- (1) プラズマによるエネルギーの吸収
- (2) プラズマによるエネルギーの保持
- (3) プラズマからのエネルギーの放射

の3つの過程が存在しなければならない。

(1)に関してはFig.6, 7, 8 が示すように、ECRによるものと考えられるが、ミラー場なので stochastic process も関与している可能性があり、又  $\omega_0 \sim \omega_{pe}$  付近の密度で特にエネルギーが入り易くなっている事は parametric instability による異常吸収が起きている可能性がある。

(2)に関してはFig.9, 10 で明らかなように磁場に垂直な方向に high energy を持った electron がミラー場に閉じ込められているという形でエネルギーが保持されている。

(3)に関してはこの実験で最も興味深い process である。high energy electron の energy が数百 keV 程度であれば whistler instability が起きる可能性があるが、今の場合 10~15 keV 程度で electrostatic instability が起きていると考えられる。この場合、hot electron と cold electron の比が instability を支配するひとつの要因となるが、実際 cold electron をパルス的に増やしてやると delayed emission は出なくなる。磁場に垂直方向の cold electron 分布関数を Maxwell 分布で、hot electron 分布を  $\delta$  関数で近似し、磁場に平行な electron 分布を Maxwell 分布で近似すれば、この instability で発生する波は  $\omega = n\omega_{ce}$  ( $n \geq 2$ ) となり実験とよく合う。更に我々が注目しているのは、現在の TPD 装置の場合実験領域に 1 A 程度の electron beam が走っているが、この beam を pulse 的に数十%増加させてやると delayed emission が trigger されて出てくるという事実である。この事は磁場に平行な electron 分布に beam の分布を考慮して分散式を解かねばならない事を示しており、現在検討中である。

前述したようにこの delayed emission のうち特に大きいものは X線 burst を伴っているが (Fig.10) これは更にマクロな例えば flute instability が励起されて high energy electron の burst が起きていると考えられる。

第2の emission はスペクトラムがかなり broad である事が特徴的であるが、この場合は power の入り方から electron の分布が  $T_{\perp} \gg T_{\parallel}$  の形になっていると考えられ、

その場合の instability (Harris 型) で発生する波は  $\omega = (1.5 \sim 2) \omega_{ce}$  となる。

Alouette 衛星で行なわれた RF による static wave 励起実験は、我々の実験と異なり、RF 周波数を sweep しその周波数のみの縦波を受信したものであるが、そのスペクトラムは我々の実験のものと極めてよく似ている。

今後我々はこの種の emission の発生機構をより明らかにすると共に、スペースでの現象と関連させて実験を進展させていく予定である。

1974年7月30日新設部 (科学)

#### 参 考 文 献

- [1] C.F. Kennell, F.L. Scarf, R.W. Fredricks, J.H. McGehee and F.V. Coroniti, J. Geophys. Res., 75, 6136 (1970).
- [2] H. Oya, J. Geophys. Res. 75, 4279 (1970).
- [3] H. Exbank, Phys. Fluids, 14, 2551 (1971).
- [4] H. Dreicer, C. Ingraham and D. Henderson, Phys. Rev. Lett. 26, 1616 (1971).
- [5] A.Y. Wong and R.J. Taylor, Phys. Rev. Lett. 27, 644 (1971).
- [6] R.P.H. Chang, M. Porkolab and B. Grek, Phys. Rev. Lett. 28, 206 (1972).
- [7] M. Porkolab, Nucl. Fusion 12, 329 (1972).
- [8] H. Ikegami, S. Aihara and M. Hosokawa, Phys. Fluids 15, 2054, (1972).
- [9] B. Grek and M. Porkolab, Matt-953, (1973).