収斂性の半球状静電衝撃波に関する実験^{*}

本 沢 忠 夫 (宇都宮大工)^{**}

(51年5月24日受理)

§1 はじめに

先の論文¹⁾で、我々は平面状グリッドを有する二重プラズマ装置(double plasma device)を用いて一方のプラズマ側から他方のプラズマ中に不連続面を有するイオン流を打ち込むことによってバックグラウンドのイオンとその打ち込まれたイオン流との相互作用を通じて形成される大振幅で、しかも高いマッハ数をもつ静電衝撃波を発生させることができることを報告した。その実験でえられた衝撃波の性質が Forslund と Shonk の計算機シミュレーション²⁾によってその存在が示されている静電衝撃波に非常に似かよっていることから、両者は同じものと考えられる。ところが上記の衝撃波は色々な点で低マッハ数のイオン音波衝撃波^{3),4)}とは性質を異にしていることがわかった。このことは静電衝撃波には低マッハ数($M \lesssim 1.6$)においてのみ laminar であるイオン音波衝撃波と $M \lesssim 3.5$ のような比較的高いマッハ数においてさえ laminar 状態にあるような静電衝撃波との二種類が存在していることを示している。

我々は、先の実験¹⁾の発展として、グリッドの形状を平面状から半球状に変えて半球状静電衝撃波を発生させる実験を現在行なっている。この場合の衝撃波は、半球状であるという点を除けば、実験条件や発生方法が殆んど前と同じであることから、本質的には論文¹⁾で報告した衝撃波と同じものであると考えられる。しかし、これまでの予備的実験でも、平面状衝撃波の際には観測されなかった幾つかの興味ある現象が観測された。ところで、現段階では、それらの諸現象について充分理解をえるところまで至っていないので、ここでは、その予備実験の方法とそれによってえられた結果の紹介にとどめる。

§2 装置と実験方法

第1図に示すような半球状グリッドGを有するDP装置を用いて実験を行なった。衝撃波の発生

*) Experiment on Converging Hemispherical Electrostatic Shocks

**) Tadao Honzawa
Department of Electronic Engineering, Utsunomiya Univ.

本沢

方法は論文¹⁾の実験で用いた方法と全く同じで、ターゲット・プラズマの電位を固定しておき、ドライバー・プラズマの電位をパルス的に上昇させることによってドライバー側からターゲット側にイオンを注入し、ターゲット・プラズマ中に大振幅波動を励起するやり方である。この際、グリッドGの電位 V_g をプラズマに対して充分負になるように保ち、両プラズマ

第1図 装置の概略図

間で電子成分の交換が殆んど起らないようにしてあるため、各プラズマの性質は互いに独立に制御される。

このような方法でえられた半球状の波動はターゲット・プラズマ中に挿入されたプローブを用いて観測される。衝撃波の軸方向(x 軸方向)の一次元的な振舞いは軸上に設置され、その上で軸に沿って可動な平面プローブ(直径 15ϕ)を用いて観測される。波動の三次元的な振舞いは軸上プローブ(on-axis probe)と軸から径方向に或る距離だけ離れた位置に設置され、しかも軸に平行に動きうる平面プローブ(off-axis probe)を用いて同時観測をすることによって調べた。プローブからの信号はオシロスコープに導びき観測する。

また、この実験で使用したガスは高純度アルゴンであり、ガス圧は $(2.5 \sim 3.5) \times 10^{-4}$ torrである。したがって、この場合のイオン・中性粒子間の衝突(弾性散乱と荷電交換が支配的)に対する平均自由行程は装置の大きさ(直径 40 cm , 長さ 40 cm)程度である。このような条件下でえられるプラズマは密度が $n_e \lesssim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度がかなり低く $T_e \simeq 0.1 \sim 0.3 \text{ eV}$ 程度, イオン温度が $T_i \simeq 0.2 \text{ eV}$ 程度である⁵⁾。したがって、プラズマの温度比が $T_e/T_i \sim 1$ となっている。このようなプラズマ中におけるイオン音波の伝播速度は $C_s \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^5 \text{ cm/s}$ 程度である。この実験ではドライバー・プラズマに印加するパルスの波高

収斂性の半球状静電衝撃波に関する実験

を $1 \sim 12 \text{ V}$ と比較的高くしている。

§ 3 実験結果

半球状のグリッド G を通してドライバー・プラズマ側からイオンをパルスの注入することによりターゲット・プラズマ中に半球状で、振幅の大きな静電波を励起することができる。その静電波はやがて半球状衝撃波に成長し、半球の中心に向ってターゲット・プラズマ中を進む。このような半球状衝撃波の性質は、半球状になっているという点を除けば、本質的には論文¹⁾に記した静電衝撃波と同じもので、波面の厚さはイオン・中性粒子間の衝突に対する平均自由行程にくらべて充分薄いので無衝突衝撃波ともみなせる。

A 半球状衝撃波が収斂時に示す振幅増加

上記のような半球状衝撃波は半球の中心に向って進み、ついには中心点近傍の狭い領域に集中或いは収斂する。第 2 図は軸上の色々な位置で平面プローブを用いて観測した衝撃波パルスである。この図からわかるように衝撃波は中間グリッド G とプローブ P 間の距離 x が増すにつれ振幅を増し、半球グリッドの半径 $R \approx 12.5 \text{ cm}$ に等しい x 近くで最大の振幅をもつに至り、その後 ($x > R$) は x の増加と共にゆっくり減少してゆく。第 3 図及び第 6 図はこの様子をよりはっきり示している。

また、第 3 図には軸上のプローブ (on-axis probe) でえた衝撃波の振幅変化を示す曲線のほかに、軸から 6.5 cm の距離を保ちつつ軸に平行に可動なプローブ (off axis) でえた衝撃波パルスの振幅変化を示す曲線もかき添えてある。こ

第 2 図 進化する衝撃波パルス

AMP. (rel. scale)

第 3 図 衝撃波パルスの振幅の空間変化

の off-axis プローブでえられた曲線においては最大振幅は $x \approx 7 \text{ cm}$ ($< R$) の位置に現われるが, $x \geq R$ ではきわだった振幅増加はみられない。軸から 3.5 cm の距離だけ離れた off-axis プローブを用いた場合にもこれと同様の結果をえるが, この場合には最大振幅が現われる位置は $x \approx R$ の点より近くなっている。このような on-axis プローブと off-axis プローブとでえられた結果の比較から, 半球状衝撃波は半球の中心近傍の狭い領域に収斂してゆき, そこで殆んど非弾性的に衝突しあってかなり密度の高いプラズマ塊を形成すること, 更にそのプラズマ塊は直ちに散逸することなく, しばらくは波のような形で集団的に振舞うということがわかる。その場合のプラズマ塊の運動は大雑把にいて一次元的なものみなしてよさそうである。

上記のような原因により衝撃波の振幅は収斂に伴って急速に増大する。しかし, その際の増幅率は初期の半球状衝撃波の振幅に大いに依存して変るということが, 印加パルスの波高を色々変えて調べてみることによりわかった。第 4 図に印加パルスの波高と衝撃波の初期振幅との関係, 更に波高と収斂時の増幅率との関係を示した。ここで, 初期振幅としては $x = 5 \text{ cm}$ に

おける衝撃波の振幅 $\tilde{N}(5)$ を
以て定義し、また増幅率とし $\frac{\tilde{N}(13)}{\tilde{N}(5)}$
では $x = 5\text{ cm}$ と $x = 13\text{ cm}$ と
における衝撃波の振幅の比 $\tilde{N}(13)/\tilde{N}(5)$ を以て定義し
ている。第4図からいえるこ
とは初期振幅はパルス波高に
大体比例して変化するが、増
幅率はパルス波高と共に急激
な変化をするが或る程度以上
の波高では飽和する傾向にあ
るということである。

B 衝撃波の速度変化

衝撃波の x 軸方向の伝播速
度は time-of-flight 法を
用いて実験的に割に正確に求
めることができる。第2図の
ような衝撃波パルスの図から、
各ピークに対応して第5図に
示すような折線がえられるが、
これらの直線部分の勾配から 第4図 衝撃波の初期振幅 $\tilde{N}(5)$ と収斂時の増幅率
 $\tilde{N}(13)/\tilde{N}(5)$ の印加パルス波高依存性
各ピークに対応した波の伝播
速度が求められる。第5図で

Main 2nd と名付けた波が主衝撃波（第2図での最大ピークに相当するもの）と考えられるが、
その伝播速度は

$$U_2 = 6.0 \times 10^5 \text{ cm/s} \quad (x \lesssim 12 \text{ cm})$$

$$U_2^* = 8.1 \times 10^5 \text{ cm/s} \quad (x > 12 \text{ cm})$$

のように $x \approx R$ なる点近くで起っている半球状衝撃波の収斂の前後で変化している。すなわち
収斂時に衝撃波の伝播速度に変化が生じている。同様な速度変化は Main 1st と名付けた副衝

第 5 図 衝撃波の飛行時間 τ と距離との関係

第 6 図 衝撃波パルスの振幅の空間変化

収斂性の半球状静電衝撃波に関する実験

撃波（第2図で主衝撃波の前面にあるピークに相当するもの）にもみられる。それは次のようである。

$$U_1 = 7.2 \times 10^5 \text{ cm/s} \quad (x \lesssim 12 \text{ cm})$$

$$U_1^* = 11.3 \times 10^5 \text{ cm/s} \quad (x > 12 \text{ cm})$$

C 反射イオン群に起因する前駆パルス

第2図で主衝撃波のピークの前面にみられるMain 1stと名付けたピークは主衝撃波の波面で反射された軽い不純物イオンに起因するものと思われる。ただし、不純物イオンとして放電に伴って一価のアルゴン・イオン Ar^+ と一緒につくられうる二価イオン Ar^{++} も含まれるものとする。実際このような二価イオン Ar^{++} は衝撃波面のところに存在する電場内で $A/Z=20$ の質量数

をもったネオン・イオン Ne^+ と同じように振舞うのである。質量分析器を用いた実験からも Ar^{++} の存在の可能性は示された。

このMain 1stパルスは $x < R$ の範囲でも存在し、そこでsteepeningを起し衝撃波に成長しているが、 $x \simeq R$ の点に近づくにつれてその振幅は急増し、最大に達した後 $x > R$ では徐々に減少している。その様子は主衝撃波の振幅変化と共に第6図に示した。また、この副衝撃波も、第5図に示すように $x \simeq R$ の前後で伝播速度を変化させている（前小節を参照）。

更に、上記の副衝撃波の前面にも、詳しく観察してみると、 $\tilde{N}/N_0 \simeq 3\%$ 程度の小振幅の前駆パルスがみられる。その前

PULSE
X(cm)
8
9
10
11
12
13
14

PRECURSOR PULSE
abscissa : $2 \mu\text{s/div}$
ordinate : 0.2 V/div
: 5 V/div for upper

第7図 前駆パルスの波形

本 沢

駆パルスの振幅変化は第 6 図に precursor と名付けた曲線で示した。この図から明らかなように、この前駆パルスは $x \simeq R$ 近傍から目立つようになり、 $x > R$ の範囲でその存在が鮮明になる。そして、これは x 方向に伝播してゆくにつれて steepening を起し、非常に高いマッハ数の衝撃波に成長する。この前駆パルスの進化の様子は第 7 図の写真から或る程度わかるであろう。この反射イオン群に起因して形成され则认为られる高マッハ数衝撃波の伝播速度はかなり大きな値をもつ。実験条件によっても多少変るが、第 5 図に示す例ではその速度は

$$U_p \approx 3.4 \times 10^6 \text{ cm/s} \quad (x \gtrsim 12 \text{ cm})$$

の値となる。この速さに相当するイオンが有する運動エネルギー W_i は、もしその前駆パルスを構成しているイオンがアルゴン・イオンだとすると

$$W_i(\text{Ar}) \simeq 232 \text{ eV}$$

となり、また考へうる不純物元素の中で最も軽いと思われる窒素原子イオンをとると

$$W_i(\text{N}) \simeq 81 \text{ eV}$$

のエネルギー値をえる。前駆パルスを構成しているイオンの種類がいかなるものであるにしても、このような大きな速度を有するイオン群が実在しているということは、ここでえられたような大振幅の静電衝撃波によってかなり高いエネルギーのイオンの発生が可能であることを示している。

§ 4 結 び

これまでの予備的な実験で、半球状の無衝突・静電衝撃波が収斂を起す時に幾つかの興味ある現象がみつかった。その実験では、まず半球状グリッドを有する DP 装置を使って振幅が大きく、収斂性の半球状静電衝撃波を発生させる。この衝撃波は半球の中心部の狭い空間に収斂する時にかなり振幅を増す。その際の増幅率は衝撃波の初期振幅に大きく依存して変る。また収斂時に何らかの原因で衝撃波の伝播速度に変化が起る。一方、衝撃波の振幅が増大するにつれて衝撃波面で反射されるイオンの量が急増し、それらの反射イオン群に起因した前駆パルスが形成されるが、そのパルスは伝播してゆくうちに steepening を起し、非常に高いマッハ数を有する衝撃波に成長する。

以上が今回の実験でえられた結果であるが、それらの諸現象について物理的理解をえるにはもっと詳細な定量的観測が必要である。これらの定量的測定を今後は実行してゆきたい。

収斂性の半球状静電衝撃波に関する実験

参 考 文 献

- 1) 本沢：核融合研究，35，81 (1976)
- 2) D.W.Forslund and C.R.Shonk: Phys. Rev. Lett. 25, 1699 (1970)
- 3) R.Z.Sagdeev: Reviews of Plasma Physics Vol. 4 (Consultants Bureau, New York, 1966), etc.
- 4) R.J.Taylor, D.R. Baker and H.Ikezi: Phys. Rev. Lett. 24 206 (1970)
- 5) 本沢：核融合研究 34，578 (1975)