

熱電離気体の平衡=非平衡導電度の測定

坂 尾 富士彦

Experiments Concerning Equilibrium and Nonequilibrium Conductivity in a Seeded, Thermally Ionized Gas.

By

Fujihiko SAKAO

Abstract: Measurements of conductivity were made in a plasma composed of argon or helium seeded with potassium vapor. The gas temperature was between 1300°C and 1700°C; the pressure, 1 atm; and the potassium concentration was between 0.01 and 0.5 mole-percent. The current density ranged from 10^{-5} amp/cm² to 2 amp/cm².

It was found that the current density-conductivity relation can be divided into three parts according to the value of current density. (1) At a small current density, conductivity is independent of the current density but strongly dependent on the gas temperature. (2) At a large current density electrons are heated to a higher temperature through the Joule heating. It is the electron-temperature that determines the fraction of ionization. Thus the conductivity increases with the current density, and depends only weakly on the gas-temperature. (3) At intermediate region of the current density electrons are heated, but since their number density is relatively small, the fraction of ionization is still determined by the gas-temperature. On the other hand, in argon at those temperatures in our case, mobility of electrons is reduced by heating of electrons. Thus in this region, conductivity decreases with increasing current density.

概 要

アルゴンまたはヘリウムに0.1%内外のカリウム蒸気を添加した気体を1,300°Cないし1,700°Cに加熱し、熱電離を生じさせてその導電度を測定する。測定に用いる電流が小さければ導電度は熱電離によるものだけである。しかし電流が大きくなるとそれによって電子が加熱され非平衡電離によって導電度が増加する。この際気体温度までも上昇しないよう、電流としては短いパルス波を用いる。全く熱平衡にあると考えられる、 10^{-6} A/cm²程度の電流密度から、かなりの導電度増加を生ずる10 A/cm²程度まで広い範囲の電流密度において電流密度と導電度の関係を実測した。その結果導電度は熱平衡状態の値から、電流が増すにつれていったん減少し、次いで増加することが見出された。この導電度がいったん低下することは従来の理論では考えに入れていなかったアルゴン原子と電子の衝突断面積の電子エネルギーによる変化を考慮することで説明できそうである。結局導電度

—電流密度曲線は三つの部分に分けられる：第一の部分では電流は小さく電流が流れていることが気体の状態に影響を及ぼさない。したがって導電度は一定である。第二の部分では電流の Joule 熱の影響で電子が加熱され平均エネルギーが増す。しかし電子数そのものは少ないため電離度は気体温度で定まり別段増加しない。導電度は電子温度が昇ったための衝突断面積の変化によって変り、千数百度、1気圧のアルゴンではこの部分で導電度は低下する。第三の部分では電流が十分大きく、電子はますます加熱されて電離度・電子数が増加するため導電度が増加する。

1. 緒 論

近年、電磁流体力学発電 (MHD 発電) およびロケットの電気推進と関連して気体の電気伝導が盛んに研究されている。特に前者の影響により従来あまり研究されていなかった圧力大気圧付近・温度数千度での弱電離気体の研究が熱心に行なわれるようになった。対象となる弱電離気体は大別して2種類ある。一つは石炭・石油・石油系ガスなどの燃料を空気もしくは酸素と混合して燃焼させて得た高温気体に、適当な方法で電離しやすいアルカリ金属あるいはその化合物の蒸気を少量混合したものである。他の一つは不活性気体にアルカリ金属蒸気を少量添加したものを、外部の熱源によって加熱し、熱電離させたものである。われわれは数年来、後者について電氣的性質を調べる実験を行なっている。不活性気体を主体とする弱電離気体は組成が単純で物理的見地からの解析に適している。また不活性気体は一般に電子との運動量交換の断面積が小さく、比較的低電離でもよい導電性が得られる。また電子とのエネルギー交換の断面積も小さいため、電子の温度と気体の残りの粒子の温度（今後簡単のため気体温度と呼ぶことにする）が異なる、非平衡状態を生じやすい。このことを巧みに利用すれば、気体温度をあまり上げないで高い電子温度に相当する高い導電度を得ることができるという点で実用上重要である。また物理的にも種々の興味ある問題を提供する。

アルカリ金属蒸気を添加した不活性気体の熱電離ならびに非平衡電離についてはここ数年種々の研究が行なわれている。MHD 発電機としての実験のような、純工業的見地からのものを除くと関心は主として熱平衡状態ならびに非平衡状態における導電度の値を中心として、それに影響をおよぼす種々な事柄たとえば電離と再結合の種々な過程・電子のエネルギー分布・損失の種類とその見積りなどについての論議に向けられている。しこうして実験は意外に少ない。熱平衡状態における導電度の値については Harris [1][2]、坂尾 [3] 等の測定がある。Harris はアルゴン (Ar)・ヘリウム (He) を始めとする種々の不活性気体に、アルカリ金属であるセシウム (Cs)・カリウム (K) をそれぞれ種々な割合で添加したものをアルミナ製円筒筒内に入れて電気炉で加熱し、円筒両端においた電極の間の電流電圧特性を測定して気体の導電度を算出した。この実験には測定部の気体・電極・またそれを包む壁のすべての温度が一樣で正確に測り得るといふ大きな特長がある。しかし一方で、測定用の電流を供給する電極と電極の間の電位差を電極間距離で割って気体内の電場としているため、気体の電極に接する部分に集中した電位差、いわゆる「さや電位差」の存在を無視したことになる。

Harris はこの誤差は小さいと主張しているが、われわれの実測によればさや電位差は後に述べるようになりに大きい。われわれの実験ではこの影響は探針を用いて電場を測ることに

よって除いてある。

Kerrebrock & Hoffman[4] や Zukoski et al.[5][6] は予熱された弱电離気体の流れについて非平衡電離による導電度の測定を行なった。同様の実験は日本原子力研究所においても行なわれている[7][8]。これらの実験においては気体中を流れる電流による Joule 熱が直接には電子に与えられる結果として生ずる。Kerrebrock et al[4] や Zukoski et al.[5][6] の測定で得られた導電度の値は、電流密度が相当大なる場合、したがって電子の密度が十分大きい場合には光のふく射による損失をも考慮に入れた2温度模型* (電子と残りの気体粒子とが互いに異なる温度でそれぞれ熱平衡にあり、電離度は電子温度によって決定されるとするもの) によって計算した値と傾向的によく一致する。電場の測定には探針を用いており、さや電位差の影響はない。しかしこれらの実験では加熱された気体が、別に熱源を持たず適当に保温されているだけの測定部に噴出する形式であるため、気体の温度は不明確になる。すなわち円柱状測定部の中心軸上では高温であり管壁に近い所は低温である。管壁はさらに著しく低温である。中心軸上の気体の温度もまた正確に知ることはできない。しかもこのような温度したがって熱電離による導電度の著しい不均一は、流れる電流の密度分布に不均一をひき起し非平衡の程度もまた不均一になる。端的に言えば Kerrebrock et al および Zukoski et al の実験で、ある条件のもとでは電流は中心軸付近のみに集中して流れているのではないかという疑いが濃い。もしそうであれば測定した導電度や電流密度の値はほとんど無意味になる。最近、日本原子力研究所で行なわれた研究[8]によれば、同様な型の装置においては実際にそうであることが確かめられた。

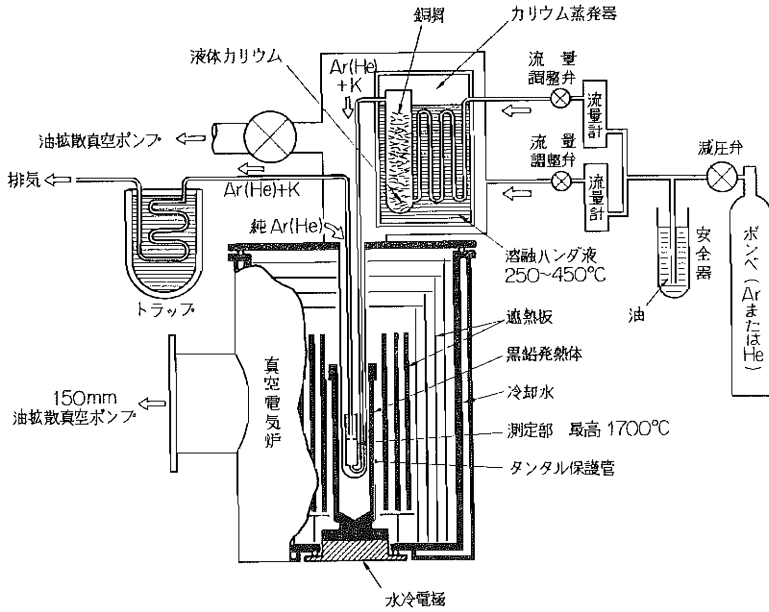
さらに一つの問題点として、電流密度が比較的小さい所での導電度の値がある。従来の考え方によれば電流が減少するにつれて非平衡電離は減少し、導電度の値も単調に減少して一定値すなわち熱平衡状態の値に収束するはずである。しかるに Kerrebrock et al. の実験では電流密度の小さい所で逆に導電度が上昇するのが見られ、その説明は今日までなされていない。

われわれはこのような事情を考慮して、従来行なわれている実験の欠点あるいは疑点を除いた方法で信頼度高い測定値を得ることを試みた。またこれまでよりはるかに小さい電流密度にまで実験の範囲を拡張し、熱平衡状態と考えられる小電流領域から、非平衡電流によって導電度が上昇する大電流領域まで統一的に実験を行なった。その範囲の中には前述の Kerrebrock et al の測定において導電度が電流の増加につれて減少する領域が含まれている。この現象を確認し、その原因を解析することもわれわれの研究の目的である。後に述べるようにわれわれはほぼこの現象の原因を明らかになし得たと信じている。

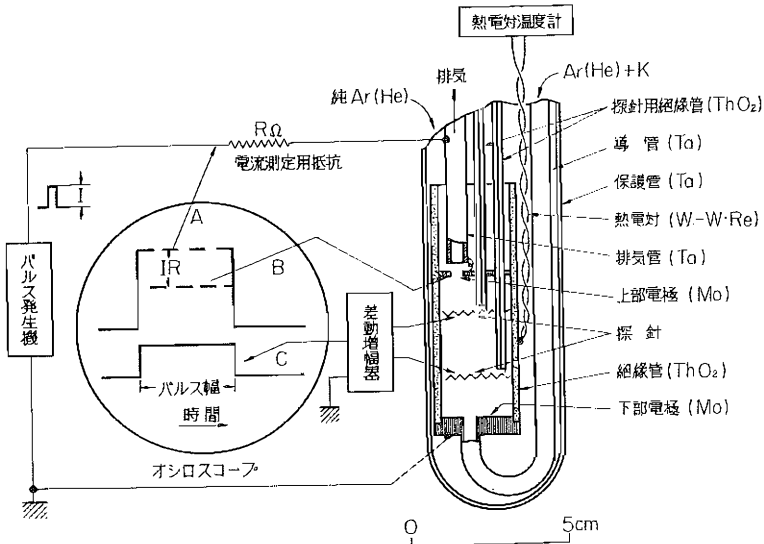
2. 実験装置

第1図に実験装置の概要を、また第2図に測定部を示す。アルゴンまたはヘリウムはまず一定温度に保たれている金属カリウム蒸発装置を通り、カリウム蒸気でほぼ飽和した後、測定部に入る。測定部は耐熱絶縁物円筒の両端に平板電極を置いたものである。この内部に供

* 種々の文献があるが、総合報告[9]または[10]に解説されている。



第1図 実験装置



第2図 測定部と測定方法. 電圧 A と B の差は電流 $I \times$ 抵抗 R, B は電極間電位差, C は探針間電位差をそれぞれ表わす.

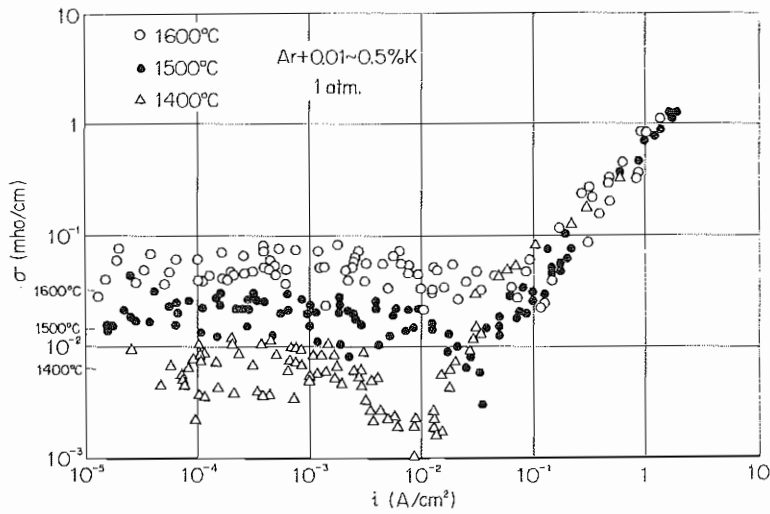
試気体を導き、熱電離を生じさせる。両端の電極を通じて気体内に電流を流し、電位差を測る。円筒内には2個の探針を軸方向に一定距離、離して並べ、気体内の電場を測る。これによって Harris[1][2]の実験と異なり、電極のさや電位差にわずらわされることなく、電場を知ることができる。また電極間の電位差と比較してさや電位差を知ることができる。さらに構造上測定部の温度は気体・電極・周囲の壁いずれもほぼ一様に保つことができ、熱電対によって測ることができる。これは Kerrebrock et al[4], Zukoski et al[5][6]の実験には無い特長である。

測定部と外部との間の気密を良好に保つことは困難であったので、測定部の周囲をさらにタンタル製保護管で包み、その中に測定部と同じ圧力の純アルゴン（または純ヘリウム）を満した。測定部はこのタンタル製保護管の外側から真空電気炉で加熱され、1,300°C ないし1,700°C が普通であった。各所の管壁・器壁によるカリウムの吸着と再放出、測定部と外部との間の漏洩・各所のガス放出等のために気体の成分が変ることを防ぐため、測定部に入る供試気体・周囲を満す純アルゴン（または純ヘリウム）共に、絶えず新たに補給され、古い気体は共通の管を通して排出される。この流れは常温での体積で各々 2 cc/sec 程度で、流れによる熱的電気的特性への影響は全く無視できる。気体の圧力は測定部においてほぼ大気圧である。

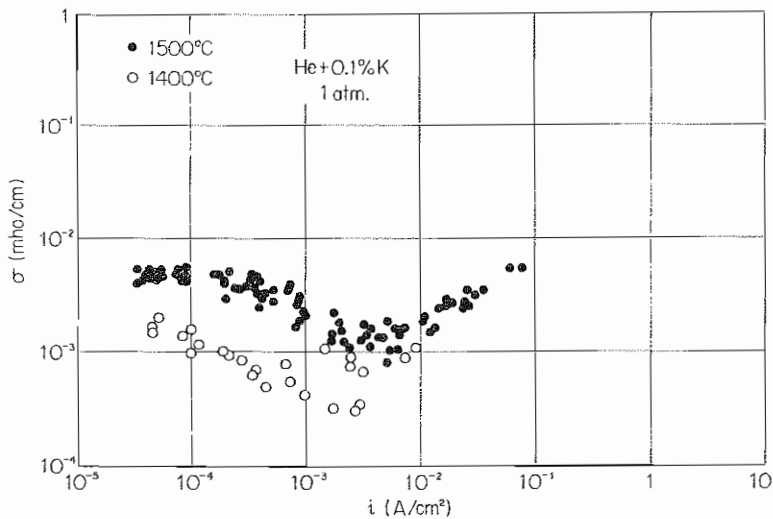
気体中に流す電流が十分小さいときは、電流が気体の状態に及ぼす影響は小さく気体は電子を含めて熱平衡にある。特にわれわれの場合には周囲の壁も同じ温度であるからふく射による影響も無い。電流が大きくなると Joule 熱は電子を加熱し、電子はそのエネルギーを中性原子またはイオンに伝達するが、このエネルギー伝達には温度差が必要であり電子温度（正しくは電子の平均エネルギーというべきである）は気体温度よりも高く、非平衡状態となる。電流が定常であると気体もまた電子から伝えられる熱によって次第に加熱され、気体温度は初めに設定した温度よりも高くなってしまふ。Zukoski et al[5][6] は Ben Daniel ら GE グループの方法にならって0から急に一定値に上昇する段状電圧を印加し、電子温度・電離度などはすみやかに準定常値に達するが気体温度はまだ著しい変化をしない、そのような時間内に測定を完了する方法を取った。われわれは電圧の代わりに電流を制御する方法を選び、波形も段状でなくパルスを用いて終りを明確にし、終末後の再結合過程の研究も行なえるようにした。各部の電圧をオシロスコープで観測する様子は第2図中に示してある。電流の極性は正負共に用いた。パルスの幅（持続時間）は場合に応じ 50~200 μ s とした。これは電子に関する諸過程すなわち電子温度の上昇それによる電離の増加にとつては十分長く、かつ気体の温度を変えるには短かすぎる時間である[5]。

3. 測定結果

第2図中に示したようなオシログラムから得られるものは、電流 I （波形AとBの差を抵抗 R で割ったもの）・電極間電位差 V_p （波形B）・探針間電位差 ΔV （波形C）の各時刻における値である。これから直ちに測定部の平均電流密度 i ・電場 E ・さや電位差が求められ導電度 σ も求められる。電流が小さいときはこれらの諸量はパルス電流が通じている間一定である。電流が大きく非平衡電離が著しいときは電流はほぼ一定であるが電場は時間が



第3図 アルゴン+カリウムの導電度測定結果. 横軸 i は電流密度, 縦軸 σ は導電度, 縦軸に沿ってつけてある温度目盛は熱平衡導電度と温度の関係を示す.



第4図 ヘリウム+カリウムの導電度測定結果. 横軸 i は電流密度, 縦軸 σ は導電度.

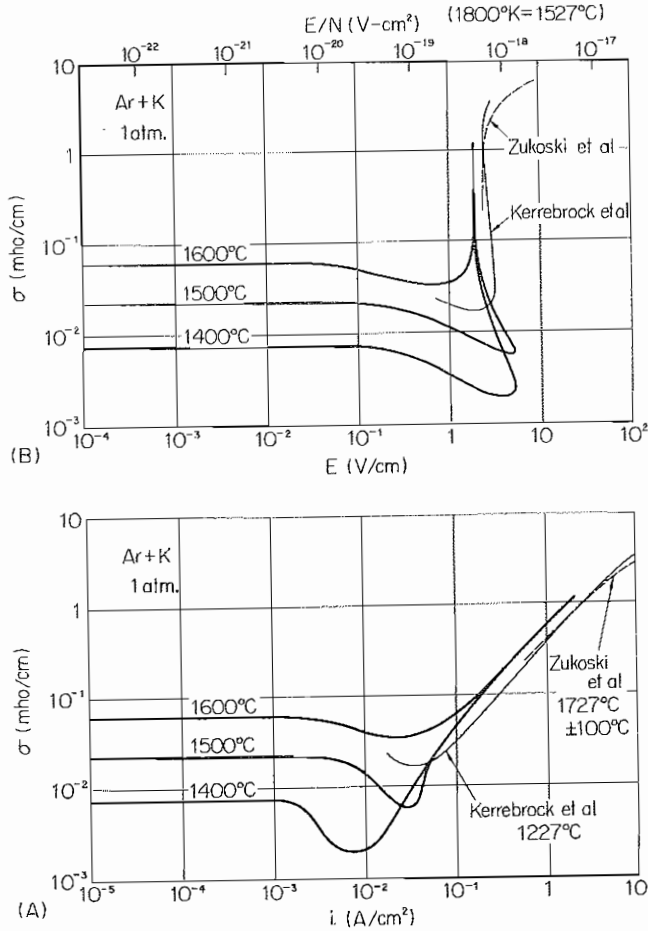
経つにつれ初め急激に、後にはゆるやかに減少してほぼ一定になる。これは電子の加熱・電離の進行等が一段落してそのときの気体温度に対する定常状態に落ち着いたものと見られ、この状態における諸量を読み取ってデータとする。このようにして得られた結果を第3図と第4図に示す。第3図はアルゴン+カリウム、第4図はヘリウム+カリウムの場合である。(※注1)

これらの結果を見て直ちに気付くことは、導電度 σ と電流密度 i の関係が i の値によって大体三つの部分に分けられることである。すなわち左方の電流密度 i の小さい範囲では導電度 σ は i によらず一定であると見られる。次に i が増すと σ はいったん減少し、さらに i が大きくなると σ は i と共に増し、電場 E は i によってあまり変らない。最後の部分はすなわち電流（もしくは電場）による電子の加熱とそれによる非平衡電離が進み導電度が増加する領域である。この領域ではまた導電度 σ が気体温度にあまり依存しないことも注目される。この節では (a) i の小さい、熱平衡の領域、(b) i の大きい、非平衡電離が主役を演ずる領域について論じ、その中間にある、 i の増加によって σ が減少する領域については次の節で論ずることにしたい。

(a) 熱平衡領域

第3図および第4図において左方 i が小さく、 i - σ の関係が水平と見られる部分は、測定電流による電子の加熱が問題にならない部分である。したがって電子温度は気体温度に等しく、電離その他の反応はすべてその温度での平衡に達している。特にふく射についても、われわれの実験では気体の周囲の壁の全部が気体と同じ温度であるから、その影響はない。電流が状態を変えないから、当然電流パルス期間中に電場その他は変化せず、オシログラムは第2図そのままの矩形的変化を示している。次に述べる i の大きい領域での σ の測定値がかなりまとまっているのに反し、 i の小さい領域での σ の測定はかなり困難でばらつきが大きい。図に示したものはその中で特に慎重な測定の結果得られた、信頼できる値である。もっとも i の非常に小さい領域ではまた再現性良好で、中間の σ がいったん減少する領域とその付近がもっともばらつきが大きいようである。

導電度 σ は気体の組成と温度によって変化する。第3図と第4図を比較すれば直ちにわかるように同程度のカリウムを添加したアルゴンとヘリウムでは同じ温度において、 i の小さい領域（それには限らないが）ではアルゴンの方が数倍高い導電度を示す。これはアルゴンの電子に対する運動量交換衝突断面積がヘリウムのそれより約一けた小さいためである。温度が上昇すれば電離度が増すため導電度はこの程度の温度範囲ではほぼ $\exp(-\alpha/T)$ (T は絶対温度) のように増加する。実験値もそのようになっている。カリウムの添加割合については、電子密度がカリウム濃度のほぼ平方根に比例して増加する一方、カリウムの電子との衝突断面積が著しく大きいため、最適値があり、アルゴンとカリウムについてはカリウム 0.1% 内外で導電度最大になるといわれている。われわれの実験においてカリウム 0.01% と 0.1% を比較してみると後の方が導電度が大きいことが認められた。第3図で点が散らばっている原因の一部は、0.01% から 0.5% までのカリウム濃度に対する結果を一緒に収めてあるためである。Kerrebrock[9] は異なるカリウム濃度に対する結果を換算してまとめたが、われわれの場合換算の基礎になる最適濃度の値などに多少不安があるので換算を行わないで生の値を示した。最適濃度より大きい濃度では導電度 σ は低下するはずであるが、

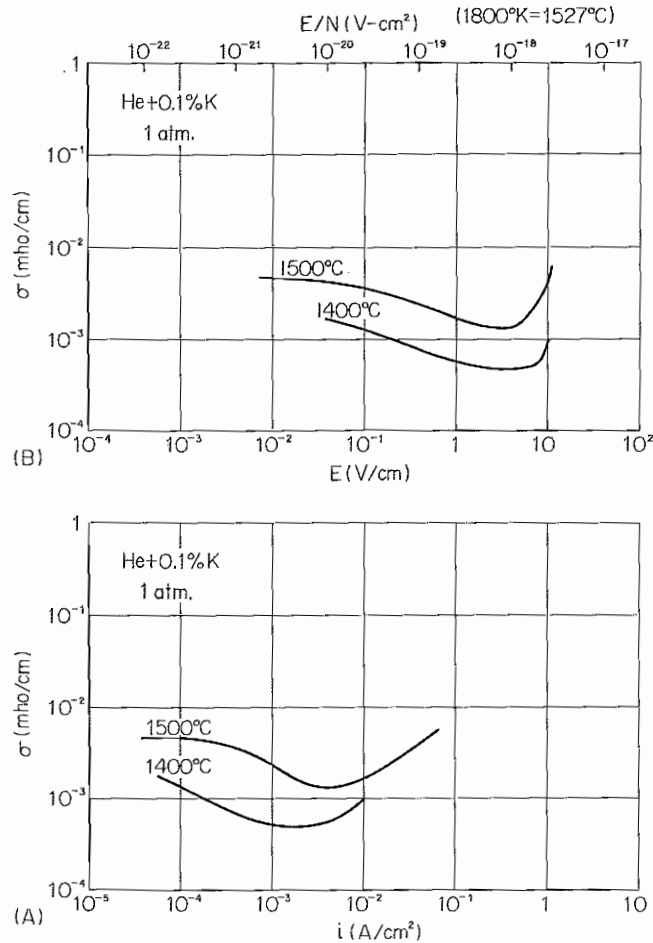


第5図 アルゴン+0.01~0.5% カリウムの場合

(A): 第3図の測定結果を曲線で代表させたもの。横軸 i は電流密度, 縦軸 σ は導電度, Zukoski et al[5][6], Kerrebrock et al[4]の結果は[9]の Fig. 4 に整理されており, それから引用した。

(B): (A)図を横軸を変えて書き直したもの。横軸 E は電場, 縦軸 σ は導電度, 上方の横軸目盛 E/N は電場 E を気体粒子数密度 N で割った換算電場, N として $1,800^\circ\text{K}$ ($1,527^\circ\text{C}$) の値を用いたが, $1,400\sim 1,600^\circ\text{C}$ でたいした誤差はない。

この実証には成功しなかった。ヘリウムの方では、ヘリウムの電子衝突断面積が大きいためカリウムの最適濃度は1%内外になり、それ以上の濃度でカリウムを添加することは蒸発装置の能力上でできなかった。アルゴンの場合電流密度 i の小さい所では導電度 σ の値は Frost [11], Frost & Phelps[12]の方法並びに衝突断面積を用いて計算した値に近いが多少高い。ヘリウムの方は計算値よりもかなり高い。原因の一つに測定部の絶縁管 ThO_2 が高温で絶縁



第6図 ヘリウムカリウムの場合

(A): 第4図の測定結果を曲線で代表させたもの。横軸 i は電流密度, 縦軸 σ は導電度。

(B): (A) 図を横軸を変えて書き直したもの。横軸 E は電場, 縦軸 σ は導電度, 上方の横軸目盛 E/N は換算電場 (説明は第5図(B)のそれに同じ)。

抵抗が低下することが考えられるかも知れぬ。しかし従来発表されている抵抗の測定値によれば、たいした影響はないはずである。特にヘリウムの場合の抵抗が著しく高く出ている以上、ヘリウムに関する測定値はともかく、はるかに導電度の大きいアルゴンの場合については ThO_2 の絶縁低下による影響は小さいはずである。(末註1)

(b) 非平衡電離領域

第3図と第4図で右の方にある測定値は電流密度 i が増すにつれて導電度 σ が増加することを示す。この領域では電流による電子の加熱・それによる電離度の向上すなわち電子数の

増加が著しく、導電度が電流と共に増加する。この部分では第 3 図と第 4 図でわかるように気体温度による差があまり大きくない。特に電流密度 i の大きい方では 1,400°C と 1,600°C 程度の差はほとんど影響しないように見える。第 5 図と第 6 図の (A) はそれぞれ第 3 図と第 4 図の測定値を最も良く表わすと考えられる線を描いて、傾向を見やすくしたものである。また (B) は横軸を電流密度 i から電場 E に変換したものである。図中にこれまで発表されている他所での実験値もあわせ示してある。また図示されていないが、アルゴン+カリウムの 1,227°C (1,500°K) の場合については Hiramoto [13] の詳しい計算があり、Kerrebrock の結果の中で電流密度 i の比較的大きい部分とよく一致している。またわれわれの実験とこれらの実験あるいは理論とも、よく符合しているように見える。それらの間にみられる多少の差はわれわれの実験では他の実験あるいは Hiramoto の理論の仮定とも異なっており、周囲の壁が気体と等温でありふく射損失が少ないこと、気体温度の差、カリウム濃度の違い、および実験誤差を考慮すれば説明できるであろう。

• しかしながら 1 節で述べたように Kerrebrock et al, Zukoski et al の実験では温度が不均一かつ不正確であり、電流は測定部の中心軸付近を集中して流れている疑いが濃い。先に述べたように非平衡電離が強い、電流密度 i の大きい範囲では導電度 σ は温度に鈍感なので、温度が不均一であることそのものはたいした欠点と考えられないが、温度の不均一は当然電流の不均一をもたらすという点で致命的と考えられる。すなわち、これらの実験では測定部がかなり長く気体にかかる電場 E は断面内ではほぼ一様とみられるが、導電度 σ 、したがって電流密度 i は非平衡電離領域では第 5 図 (B) に示すように E によってきわめて急激に、ときには負特性を示して変化するので、温度の不均一による σ - E 曲線のわずかな左右へのずれが、同一の E に対する i のきわめて大きい変化をもたらす。 i のさらに大きい領域では (B) 図 σ - E 曲線は上部が右に曲り i - E 特性は正特性となる。そこでは電流の集中は緩和され測定値は信頼できるであろう。しかし $\sigma=1\text{ mho/cm}$ 付近より下の Kerrebrock et al, Zukoski et al の測定値は、上に述べた事情で電流の集中した状態に対応しているであろう。ゆえに平均電流密度と平均導電度はかなり小さい値まで測定されているように見えても、実際は断面の一部に高い電流密度と高い導電度を持つ部分があって、この部分の相対的な断面積が増減することが平均電流密度の増減となって現われているに過ぎないのではなかろうか。すなわち i - σ 曲線の水平との傾きが 45° より急な部分には実際は測定値は無いのではなかろうか。

われわれの実験では測定部の温度は一様であるから、電流の集中を招く原因の一つは無い。しかし i - σ 曲線の傾きが 45° より急な、 i - E 特性が負抵抗特性となる部分では、これによる電流集中が考えられる。けれどもわれわれの実験では電流の通路が太さに比べて短いので、電流分布は電極のさや電位差の i - V 特性によって強く影響されるであろう。われわれの実験によるとさや電位差は温度と気体の種類によつて定まるある一定の電流密度以下では、電流密度はほぼ正比例する。この状態では電流密度はほぼ一様であると見られる。もっとも非平衡電離領域では電子温度は気体温度および周囲温度より高いから、側壁面に接した部分は電子とイオンが壁へ拡散して再結合するというような現象が影響して電流密度は小さくなるであろうが、電流密度 i が大きくなるとさや電位差は一定もしくは逆に低下する。こうな

るとわれわれの実験でも、もはや電流分布が一様であるとは断言できない。電流は気体中でもまた電極面上でもどこかに集中している恐れが十分である。さや電位差が正比例から一定へと変る境界を与える電流密度、すなわち電流分布が一様と集中の2状態の境界となる電流密度は、まだ実験結果の整理が完了していないけれども i - σ 曲線で σ が極小を示す電流密度の3倍ないし10倍のようである。ヘリウム主体の場合もアルゴン主体の場合も、また温度が異なってもほぼそのようである。ゆえに第5図および第6図の各(A)において、各曲線の最低点より右へ、 i が3倍ないし10倍の範囲まではわれわれの測定値は信頼してよいと思われる。それ以上の電流密度においては疑問である。

4. 導電度の減少する領域

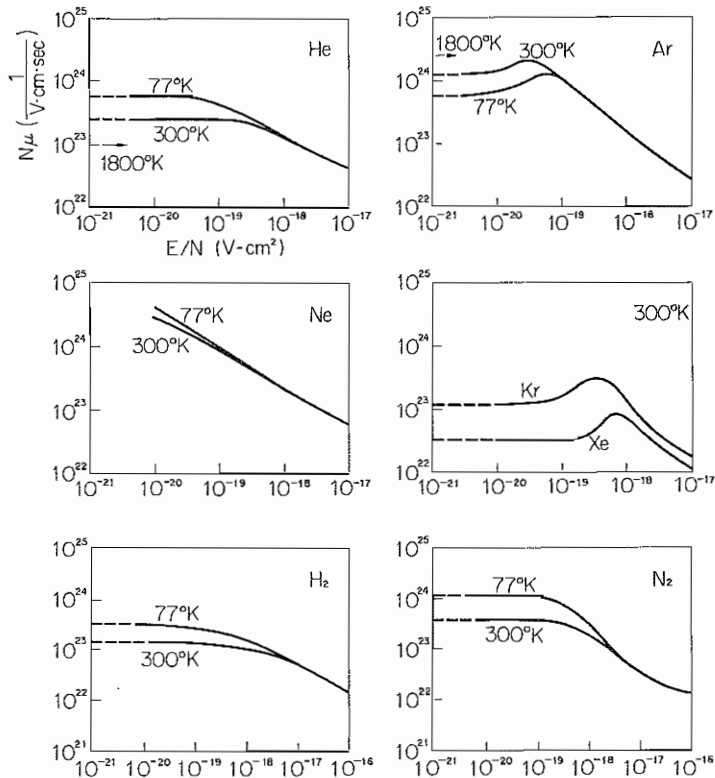
第3図および第4図(未注1)において導電度 σ が電流密度 i の増加につれて減少している領域が明かに認められる。それは前節で述べた熱平衡領域 (σ が i によつて変らない領域) と非平衡電離領域 (σ が i とともに増大する領域) の中間にある。この現象は Kerrebrock & Hoffman[4] によつて初めて注意された。彼らは電流密度 i が減少するとき、ある点以下でかえって導電度 σ が上昇し、その値が気体温度 1,500°K (1,227°C) に相当する計算値よりもはるかに高いことを見出し、その原因は全くわからないと述べている。Zukoski & Cool [6] は彼らの実験において電流密度 i がある値より小さくなると、導電度 σ がそれ以上低下しないこと、その値は気体温度 2,000°K (1,727°C) に相当する計算値より高いことを見出したが、探針による小さい電場の測定に確信が持てないとして測定を打切ってしまった。ところでわれわれの実験は電流密度 i の非常に小さい所から大きい所までおよんでおり、電流密度 i が減少するにつれて導電度 σ はいったん増加するが、さらに電流密度が減少すれば一定値となり、気体温度での熱平衡導電度の計算値に近い。これを見れば Zukoski et al が疑ったような探針による電場測定の誤差が原因ではなさそうである。第5図および第6図にわれわれと、他の人々の実験結果を見やすく表示してある。おのおの(B)図を見れば問題の領域は電場 E が 0.1 V/cm 以上であることがわかる。われわれの場合探針間距離は 2 cm であったから、電位差は 0.2 V 以上であり大きい方は 4 V (アルゴン) または 20 V (ヘリウム) 程度に達する。二つの探針の温度や仕事関数の差は実際には多少あり、電流が流れていなくても小さい電位差はある。しかし導電度 σ の算出の基礎になる電位差としては、電流値が0のときの電位差と、所定のパルス電流が流れているときの電位差との差を取ったので、温度その他の静的な誤差は消去されているはずである。電流に即応して変化する電子密度の不均一その他を考えると、問題の領域での測定に重大な影響を与えるような大きな誤差はないと見積られる。しかも電流の極性を逆にしても結果は一致すること、熱平衡領域におけるはるかに小さい電場まで測定に成功していることを考えれば、問題の現象はやはり測定誤差ではなく真実であると見られる。

なお Kerrebrock et al の結果は第5図(A)によればあたかも気体温度 1,500°C 以上のような形をしているが、パルスまたは階段波電流でなく定常電流を用いているための気体の加熱も影響しているのかも知れない。あるいは気体の加熱方法に問題があって局所的に予定以上の高温を生じているのかも知れない(未注2)。Zukoski et al の結果はやはり温度が高すぎ

るのかも知れないが、計算値より多少高く出るといふ点でわれわれの実験結果とも符合しているとも見られるし、むしろ平衡導電度の計算値が低すぎるのかも知れない。

電流密度 i (もしくは電場 E) が増すと導電度 σ が減少する原因として考えられるのは、気体の電子との衝突断面積が電子のエネルギーによつて変化することである。電子が加熱されて気体温度よりも高い温度になった場合、それによつて電離度が増加し導電度が増すが、一方気体と電子の衝突断面積が電子のエネルギーの増加と共に増すならばこれは導電度を下げることになる。ところで、Hiramoto[13]の計算によれば電子密度があまり高くない場合、電離度は電子温度よりもむしろ気体温度に支配され、電子温度が数百度程度上昇するまではほとんど変化がない。それ以上になって電子密度が増加し始めるとますます電子温度の影響力が増し、ついには電子温度のみで定まるようになる。Hiramoto が例に取ったのはヘリウム+セシウムの場合であったが、電離電圧がより高く、同一条件において電子密度のより小さいカリウムの場合には電子温度が少しくらい上昇したときの電離度の増加はなおさら少ないであろう。一方気体と電子の衝突断面積は電子温度が変れば直ちに影響を受けるから、電子温度の上昇の影響はまず衝突断面積の変化として、したがって移動度の変化として現われるであろう。ゆゑに気体の電子との衝突断面積が電子のエネルギーと共に増す場合には、電子温度が上昇すれば移動度の低下のために導電度はいったん低下し、次に電離度の増加が効いてきて導電度は上昇し始めると推定される(注3)。もしそうであれば気体温度が低く電子密度が小さいほど電流の増加に伴う導電度のいったん低下する程度が大きく、気体温度が高く電子密度が高ければ導電度はほとんど下らないままで非平衡電離領域に入るはずである。第5図において実際そうであることが認められる。

気体中の電子の移動速度を電場の関数として測つた例は多い。その中で特に信頼できる測定の一つである。Pack & Phelps[14] および Frost & Phelps[12] の結果を移動度(移動速度/電場の強さ)に直して第7図に示してある。種々の気体で電場が大きくなると移動度が下ることが認められる。特にアルゴン、ヘリウムにおいてもそうである。これらの測定とわれわれの実験とでは温度が異なっているが、電場の小さいときの移動度は容易に算出できるので代表的な高温の場合の値が図中に示してある。その値と、電場が大きければ電子温度は気体温度に弱く依存するだけであることをあわせ考えれば、アルゴンの場合 $E/N=3 \times 10^{-20}$ V-cm² の付近から移動度が低下するであろうことが予測できる。第5図(B)の実験はまさにそうであることを示している。ヘリウムについては一致はそれほど良くない。なおわれわれの実験ではアルゴン、ヘリウムのほかにカリウムを含んでいるし、イオンも存在している。しかし温度が比較的低いので電離度が低く、イオンと電子の衝突は無視してよい。またヘリウムの場合と、アルゴンでもカリウム濃度の小さい場合とでは、カリウム原子と電子の衝突を無視しても大きい誤りはない。カリウム濃度の大きい場合には純アルゴンの場合に比し電場の小さい所での移動度が小さいのと、電子温度の上昇が妨げられるので導電度の低下が著しくない。第3図には区別して示されていないが実際そうであることが認められた。なお電子密度の低い場合、電場のもとでは電子のエネルギー分布は容易に Maxwell 分布からずれてしまう。したがって電子温度は厳密な意味では定義できないので、正しくは電子の平均エネルギーともいふべきであるが、便宜上電子温度と呼んでおいた。電子のエネ



第7図 いろいろな気体中の電子の移動度と電場の強さの関係

横軸 E/N は換算電場=(電場 E)/(気体の粒子数密度 N), 縦軸 $N\mu$ は換算移動度=(移動度 μ) $\times N$, Frost & Phelps[12] および Pack & Phelps [14]の結果より算出. K_r , X_e は [12] による. 他は [14] による.

ルギー分布のずれをも考慮して移動度を求める計算法は知られており, それを用いて第7図の低温での移動度の測定結果をわれわれの実験の高温の場合のそれに換算する作業は目下進行中である.

5. 結 論

温度が正確にわかり, 電極のさや電位差も消去した状態で電流密度の広い範囲にわたって電流密度の関数として導電度を測定し, 次のような結果を得た.

(1) 電流密度による導電度の変化の様子によって, 電流密度の大きさは以下の三つの領域に分れる.

(2) 電流密度が十分に小さいとき, 電流が流れていることは気体の状態に影響せず, 導電度は熱平衡状態での値をとる. この領域では導電度は温度と共に上昇する.

(3) 電流密度が中位の大きさであるとき, 電流によって電子が加熱される. 気体温度が低く電子密度が小さいとき, 電子が加熱されても電離度はあまり上昇しない. アルゴン等の

気体では電子の加熱により移動度が減少するため、電離度と移動度の積に比例する導電度は電流密度の増加と共に小さくなる。気体温度が高く電子密度が大きければこのような現象は目立たなくなる。同一電流密度に対しては導電度は気体温度と共に上昇する。

(4) 電流密度が十分大きければ電離度は加熱された電子の温度によって決定され、電流密度と共に上昇し電場の強さはあまり変化しない。この状態で導電度は気体温度には弱く依存するだけである。この領域中電流密度の比較的小さい方では電流-電圧特性が負抵抗特性を示す場合があり、その部分での従来の実験結果には疑問がある。

本稿には2月の講演以後、執筆当時までの進展も加えて書いたもので、講演内容に無かった事柄も含まれていることをお断りしておきます。

この研究に絶えず援助と指導とを与えて下さった谷 一郎教授・佐藤浩教授に深く感謝致します。また講演の際種々討議して下さいました参会者の方々、特に有益な助言を与えられた橋本英典教授にもお礼を申し上げます。

1966年7月15日

参 考 文 献

- [1] L. P. Harris: Electrical conductivity of cesium-seeded atmospheric pressure plasmas near thermal equilibrium: *Joar. Appl. Phys.*, **34** (1963) pp. 2958-2965.
- [2] L. P. Harris: Electrical conductivity of potassium-seeded argon plasmas near thermal equilibrium: *Joar. Appl. Phys.*, **35** (1964) pp. 1993-1994.
- [3] 坂尾富士彦: 熱電離気体の導電度測定: 日本物理学会年会講演, 昭和40年10月, 応数力学分科
- [4] J. L. Kerrebrock & M. A. Hoffman: Nonequilibrium ionization due to electron heating: II, experiments: *AIAA Jour*, **2** (1964) pp. 1080-1087.
- [5] E. E. Zukoski, T. A. Cool, & E. G. Gibson: Experiments concerning nonequilibrium conductivity in a seeded plasma: *AIAA Jour*, **2** (1964) pp. 1410-1417.
- [6] E. E. Zukoski, T. A. Cool: Nonequilibrium conductivity measurements in argon and helium seeded plasmas
- [7] T. Hiramoto, S. Yano, S. Matsunaga, & H. Shirakata: Enhancements in the electron temperature in nonequilibrium-Ar plasmas seeded with Na: *Jour. Phys. Soc. Japan*, **20**(1965) pp. 1910-1920.
- [8] 松永朔郎, 平本立躬, 矢野淑郎, 白形弘文, 藤野治之: Ar-K 非平衡プラズマの導電率の測定: 日本物理学会年会講演, 昭和41年4月, プラズマ物理分科.
- [9] J. L. Kerrebrock: Magnetohydrodynamic generators with nonequilibrium ionization: *AIAA Jour*, **3** (1965) pp. 591-601.
- [10] 坂尾富士彦: 非平衡プラズマ中の電子=イオン再結合, 第7回電磁流体力学シンポジウム論文集 (東京大学宇宙航空研究所報告, 第1巻特別号) (1965) pp. A6-A15.
- [11] L. S. Frost: Conductivity of seeded atmospheric pressure plasma: *Jour. Appl. Phys.*, **32** (1961) pp. 2029-2036.
- [12] L. S. Frost & A. V. Phelps: Momentum-transfer cross sections for slow electrons in He, Ar, Kr, and Xe from Transport coefficients.
- [13] T. Hiramoto: Nonequilibrium characteristics of the working plasmas for magnetoplasma dynamic

(MPD) generators: Jour. Phys. Soc. Japan, **20** (1965) pp. 1061-1072.

- [14] J. L. Pach & A. V. Phelps: Drift velocities of slow electrons helium, neon, argon, hydrogen, and nitrogen: Phys. Rev., **121** (1961) pp. 799-806.

校正に際し付加した注意

- 注 1. ThO₂ 製絶縁円筒の抵抗を実測した結果, その漏洩電流はヘリウム+カリウムの場合には測定結果に重大な影響を及ぼすことが判った. ThO₂ の電圧電流特性は非直線的であり, 第4図, 第6図の結果は定性的な傾向についても修正が必要である. しかしアルゴン+カリウムについては漏洩電流の影響は10%を超えることはなく数値の修正は必要であるが話の筋はそのままでよい.
- 注 2. Kerrebrock 自身が後に発表した所によれば, 気体は初め高温に熱せられ途中自然に冷却しながら測定部を通過するが, その際電子温度は初めの高温のままであるかも知れないとのことである.
- 注 3. その後詳しい検討によれば, 電子のエネルギー分布が Maxwell 分布であるとしては, Hiramoto の結果を参考にしてもなお, 導電度が一旦低下することは説明できない. e-e, e-a 等の衝突頻度を見積ってみると電子のエネルギー分布は, 高エネルギー部分が著しく不足した形であることが推定される. これを考慮に入れると初めて導電度が一旦低下することが説明できる. これらについては近日発表の予定.