Na-He および Na-Ar 混合気体中における電子移動速度の測定

正員 吉田 賛一郎 (慶応大)

非会員 杉山 尚夫 (慶応大)

正員 中村 義春 (慶応大)

1. はじめに

著者らは、これまで縦形および横形ヒートパイプドリフトチューブを開発して、アルカリ金属を中心に、純粋金属蒸気中における電子移動速度の測定を行ってきた。このヒートパイプドリフトチューブは蒸気の圧力と温度の測定ならびに設定が容易であること、金属蒸気についての測定では、それまで不可避であった電極導入端子部の絶縁障害を避けることのできるなどの特徴があり、これを用いることにより幾つかの新しい測定⁽¹⁾⁻⁽³⁾ができた。

この方法は、均一で純粋な金属蒸気をドリフトチューブ内に発生させるために、オープンヒートパイプ⁽⁴⁾の原理を用いたものであり、従ってヒートパイプ内で凝縮した蒸気(動作物質)を液体の形で加熱部へ戻し、そこで再び蒸発させるウィックの機能が、均一でしかも純粋な蒸気を長時間安定に発生させるために不可欠となる。動作中のヒートパイプのウィックには、蒸気域から蒸気物質の融点に相当する温度のところまで液体の動作物質が存在する。そして、その境界から低温側へ拡散する蒸気は絶えずそこで凝固し、ウィック表面に堆積する。しかし、特にアルカリ金属は融点付近の蒸気圧が低く($\sim 10^{-8}$ Torrあるいはそれ以下)、上記の過程でヒートパイプの安定な動作にあずかる動作物質が減少する量(これを凝縮損失と呼ぶ)は極めて少ない。一方、カドミウムあるいは亜鉛などは融点付近の蒸気圧が高く(Cd: 0.1 Torr, Zn: 0.14 Torr)、

代表的な装置寸法(内径 3 cm)を仮定したときの簡単な概算では凝縮損失は約 15 mg/s (Zn の場合)にも達する。従って、このような物質をヒートパイプ中に封入し、その蒸気を長時間安定に保つことは不可能になる。これがヒートパイプドリフトチューブの一つの弱点であり、しかしながらまた、上述で引用した Cd, Zn などはレーザ媒質として極めて有用な金属でもある。水銀も蒸気圧は高いが、それは常温で液体であり凝縮損失の不利は免れる⁽¹⁾。

また、さきに引用した著者らの装置は、いずれもヒートパイプおよびウィックの材料としてステンレス鋼(SUS 304)を、電極材料としてニクロムをそれぞれ用いている。これはいずれも入手および加工が容易であるが、使用できる上限温度は 1,100°C 程度である。優れた耐熱材料はほかにも考えられるが、この温度以上ではどの材料でもそれ自身からの熱電子放出が激しくなり、電子移動速度を測定するためには極めて不利な条件になると考えられる。しかも、移動速度としては電子がエネルギー的に十分緩和したときの値を測ることが必要であることから、測定のためには数 Torr 以上の蒸気圧力を得る必要がある。

これらのことから、前記の融点付近の蒸気圧の高い物質のほかに、高い融点をもつ物質(例えば銅)についてもヒートパイプドリフトチューブによる測定は困難になることが予想される。これが著者らの開発したヒートパイプドリフトチューブのもう一つの弱点である。

通常、金属蒸気を媒質とする実用機器においては、それは緩衝ガスとの混合物として使用される。従って実用的な媒質中での電子輸送係数(例えば、電子の移動速度・拡散係数など)を測定の対象とすれば、蒸気の混合割合に応じて蒸気圧力(従って、蒸気温度)を

A Measurement of the Electron Drift Velocity in Na-He and Na-Ar Mixtures. By Sanichiro Yoshida, Member, Hisao Sugiyama, Non-member & Yoshiharu Nakamura, Member (Keio University).

吉田賛一郎: 正員, 慶応義塾大学
杉山尚夫: 非会員, 慶応義塾大学
中村義春: 正員, 慶応義塾大学

の内壁および内管の内・外壁にウィックを貼ったもので、外管の内壁と内管の外壁のウィックはつながれている。内管および外管は独立して排気および緩衝ガス導入ができる。外管の中央部はヒータで加熱され、一方、内管と外管の両端部は水冷される。内管および内管と外管の間の空間にはそれぞれ動作物質(図中 A および B) が封入される。内管と外管の間の空間が通常のオープンヒートパイプとして動作し(外側ヒートパイプ)、図の右下りの斜線部分が物質 B の純粋蒸気で満たされる。オープンヒートパイプの原理⁽⁴⁾から、その蒸気圧力は緩衝ガス圧力(図中 p_2)と平衡する。物質 A, B に対して、(b)図に示すような蒸気圧曲線を仮定すると、動作状態にあるときの外側ヒートパイプ

の温度分布および B 蒸気分圧の分布は、(c)図の T (破線) および B (実線) のようになる。そして、内管は B 蒸気によって(外側ヒートパイプによって)斜線を施した長さによって一定温度 T_2 に加熱され、内管の左下りの斜線を施した領域に p_A の圧力の A 蒸気が発生する。従って、内管の緩衝ガス圧力 p_1 を調節することで内管斜線部に任意の混合割合 R

$$R = (p_A/p_1) \times 100 (\%)$$

の均一混合蒸気(温度は T_2)を得ることができる。

本研究で試作に成功した二重ヒートパイプドリフトチューブの概略断面図は図1に示した。それは基本的にはシリコン油(HIVAC F-5, 信越化学製)を封入した、底のある縦形円筒容器(内径 91 mm, 外径 97 mm, 図2の外側ヒートパイプに相当する)を円筒(図2の内側ヒートパイプに相当し、図1(b)の電極系と共にドリフトチューブを構成する。内径 39 mm, 外径 45 mm, ただし縦形容器と交錯する部分は肉厚 1 mm)が貫通する構成になっている。

ドリフトチューブの内壁にはウィック(120 メッシュ/in の SUS 304 織網を二重にしたもの)が貼られている。縦形容器の内壁およびドリフトチューブの外壁にはウィックは貼られていない。本研究で、二重ヒートパイプを図1のように変形したのは下記の理由による。二つのヒートパイプを同軸に配置する図2の構成では、ウィックの中の動作物質は毛細管力で加熱部へ還流するが、図1の縦形容器では内壁に凝縮した動作物質は重力の作用で底部(加熱部)へ還流する。従って、後者ではウィックは不要になる。また、毛細管力に依存する図2の構成では、その径が数 cm を超えるとき内壁のウィック全体に一樣に動作物質を浸透させることは難しく、上部のウィックが乾いたままであることが多い。このようなときは外側ヒートパイプは正常な動作をしない。図1の構成ではこのような欠点はない。本研究でも初期の段階で図2の構成で実験を試みたが失敗し、装置を図1のようにすることで初めてヒートパイプとして安定に動作させることができた。

本実験では、ドリフトチューブ内の金属蒸気には Na を使い、その混合割合は 0.5~10% を予定していたので、その蒸気圧は 0.1~1 Torr となり、従って加熱温度は 360~440°C となることが予想された。そのため取扱いが容易で、かつこの温度範囲で測定しやすい蒸気圧力(50~300 Torr)を持つと予想される⁽⁸⁾HIVAC F-5を縦形容器内

(a) 二重ヒートパイプの原理図

(b) 物質 A, B の蒸気圧曲線

(c) 二重ヒートパイプの温度分布 (T) および A, B の蒸気圧分布 [上図の蒸気域と示す領域の内管中に混合蒸気(混合比 P_A/P_1)ができる]

図2 二重ヒートパイプの原理

Fig. 2. Principle of the double heat pipe.

の動作物質に選んだ。

縦形容器の底部はヒータ (0.7mmφ ニクロム線を無誘導巻きにしたもの) により加熱され、それがオープンヒートパイプとして動作しているときは、その内部には緩衝ガス圧力 (緩衝ガスには N_2 を用い、またその圧力はセトラ社製圧力変換器により測定) に等しい圧力の油蒸気が発生し、そこを貫通するドリフトチューブを蒸気温度に加熱する。油蒸気により加熱される部分のドリフトチューブの温度は、その表面に溶接された4組のクロメル-アルメル熱電対により測定される (図1参照)。ドリフトチューブ内壁に貼ったウィックには、あらかじめ Na が染込ませてあり (実験方法の項参照)、油蒸気で加熱することによりドリフトチューブ内には、その温度に対応する圧力の Na 蒸気が発生する。そして、前述のようにドリフトチューブ内の緩衝ガス (Ar または He) の圧力を調整することで所定の混合比を得ることができる。希ガス圧力は油マノメータ (HIVAC F-5 使用, 20°C で感度 12.5mm/Torr) により測定される。なお、ドリフトチューブは冷却トラップ、油拡散ポンプおよび油回転ポンプを用いた排気系に、また縦形容器は油回転ポンプを用いた排気系にそれぞれ接続されている。

(2) 電子移動速度測定電極系 電子移動速度測定のための電極形の概形を図1(b) に示す。その構成と動作原理は文献(3)で用いたものと同じである。また陽極と陰極の直径は 24.5mm であり、それぞれには軸上の電界を改善するためのガードリングが取り付けである。フィラメント、電子シャッタおよび陰極はリード線を兼ねる 1.5mmφ ニクロム線上に組立てられ、図1(a) に示すようにドリフトチューブの一端から混合蒸気域へ挿入し固定される。また陽極はもう一方の端から挿入されるが、それを支持する 1.5mmφ タングステン線他端は同図右端の陽極駆動機構に接続されており、それにより陽・陰極間の距離 (電子ドリフト距離 d) を 1~3cm の間で調節することができる。また、測定器系の構成も文献(3) (同文献図2参照) と同じである。

〈2・2〉 実験方法 本実験では、上述の装置を用い次の手順に従って測定を行なった。

(1) 予備加熱 電極系を挿入しない状態で、ドリフトチューブに Na 片 (数 g) と 1~2Torr の He ガスを封入し、ヒータによる加熱を開始する。縦形円筒容器内の緩衝ガス (N_2) 圧力を調整して、ドリフトチューブ表面が 420°C 前後になるように加熱し、ドリフトチューブ内に Na 蒸気が発生させ、またウィックに液体 Na を十分染込ませる。ドリフトチューブ端部

の窓からの視察および透過光の色から、ウィックのぬれの状態および Na 蒸気発生が確認できる。そして、この状態のまま数時間加熱を続けてドリフトチューブ内で Na の蒸発・凝縮を繰返させ、またドリフトチューブ内の緩衝ガスを循環させてヒートパイプのもつ自己浄化作用⁽⁴⁾による Na の純化をする。また、この間に縦形容器の緩衝ガス圧力を変化させながら、ドリフトチューブ表面の温度およびその分布を4組の熱電対により測定する。縦形容器内が緩衝ガスと平衡した油蒸気で満たされるまでは温度分布は平坦ではなく、しかもその温度はそこでの緩衝ガス圧力には依存せず、ヒータ電力に依存する。しかし、温度分布が平坦になり、しかもその温度が緩衝ガス圧力に依存して変化すると、縦形容器内には緩衝ガス圧力と平衡した油蒸気が発生していると考えられ、従ってその温度と緩衝ガス圧力 (= 油蒸気圧力) との関係から、本実験で用いた HIVAC F-5 の蒸気圧曲線の決定が可能になる。

(2) 電子移動速度の測定 以上の測定の後、全系を冷却して電極系を挿入する。所定の測定温度に応じて縦形容器内の緩衝ガス圧力を設定し、また測定混合比に応じてドリフトチューブ内の緩衝ガス (Ar あるいは He) 圧力を設定して加熱を開始する。熱電対によりドリフトチューブの温度分布を常時監視しながらヒータ温度を徐々に上昇させ、所定の温度と分布が得られたらドリフトチューブ内の緩衝ガスを数回入れ換え、再び正確に所定圧力に調整した後、電子移動速度の測定を開始する。ここでドリフトチューブ内の緩衝ガスを入れ換えるのは、加熱に長時間を要することから、リークあるいは放出による不純物ガスがあってもこの操作によりそれを系外へ排出するためである。また、電子移動速度の測定はドリフト距離を 1.2cm から 2.6cm まで 2mm 間隔で変化させて行ない、ドリフト距離とドリフト時間の差分から速度を決定している⁽³⁾。

3. 実験結果

〈3・1〉 二重ヒートパイプの動作 図3に、二重ヒートパイプドリフトチューブの温度上昇の過程を示す。また、図中にドリフトチューブ表面に溶接した熱電対の位置を示す略図を付した。熱電対4はドリフトチューブ中央に、そしてそれから 1cm 間隔で3組の熱電対 (3~1) が溶接されている。また、測定電極系はそのドリフト空間 (陰極-陽極間の空間) がドリフトチューブのほぼ中央に位置するように配置されている。ヒータ電流はスライダックにより 4~5A の間で

図3 二重ヒートパイプドリフトチューブの加熱の過程

Fig. 3. Heating process of the double heat pipe drift tube.

調節する。図中、実線で熱電対4の指示温度を、また点線で熱電対1の指示温度を示す。加熱開始後3時間10分、4時間30分、5時間経過後に縦形容器内の緩衝ガス(N₂)圧力を、それぞれ80, 130, 200 Torrに変化させ、そのときの温度上昇の経過も示している。80 TorrにN₂圧力を設定してから約1時間後に熱電対1と4の指示温度の差は約5°C以内になり、縦形容器内にはN₂圧力と平衡した油蒸気が発生し、ドリフトチューブが約375°Cにほぼ一様に加熱されたことを示す。次いでヒータ電流をそのままに保ち、N₂圧力を130 Torrに増すと指示温度分布は約400°Cではほぼ平坦になるが、このときは熱電対1と熱電対4の温度差が5°C以上あり、ヒータ電流が不足している。更にヒータ電流を5Aに増し、同時にN₂圧力を200 Torrに増すと約20分後に平衡した油蒸気が発生し、ドリフトチューブが約407°Cに一様に加熱されていることがわかる。

前述のように、ヒータ電流の調節にはスライダックしか用いていないが、縦形容器内の緩衝ガス圧力を一定に保つことにより熱電対指示温度を極めて安定に保つことができる。なお、本実験の場合、積算して約100時間の加熱ののち緩衝ガス圧力と熱電対指示温度は良い対応を見せなくなり、また油に変色・硬化など劣化が認められたので、このような現象が見られたときは油を交換した。また、油の劣化は高温加熱時に著しい。

図4には、加熱途中におけるドリフトチューブの温度分布を○印で、また縦形容器内に平衡した油蒸気が発生したと思われる状態での温度分布を●印で、また

●印: 平衡蒸気が外管中にできた状態での温度分布
○印: 加熱途中の温度分布
×印: シリコン油 HIVAC F-5 を入れない状態での温度分布

図4 内管(ドリフトチューブ)の温度分布

Fig. 4. Temperature profiles of the inner pipe (the drift tube).

そのときの緩衝ガス圧力(Torr)を図中に示す。またHIVAC F-5油を入れない状態での温度分布も比較のために×印で示す。平衡蒸気のない状態での温度分布(○印および×印で示した)には大きな温度こう配が見られるが、平衡蒸気が発生したと思われる状態での温度分布も完全に平坦(等温)ではなく、若干の傾斜をもつ。しかし、それは4点の温度測定値の平均値(本実験ではこの値を混合蒸気の測定温度とした)に対して最大 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 以内にあり、測定 E/N (ただし、 E は印加電界、 N は気体密度を示し、また $1Td=1 \times 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ である)に対して最大 $\pm 0.3\%$ 程度、混合比に対してはその値の $\pm 5\%$ 程度の影響を与えるのみである。

更に、この温度分布と縦形容器内の緩衝ガス圧力の関係からHIVAC F-5の蒸気圧曲線を求めた結果を図5に示す。本実験で求めた蒸気圧曲線は低温での測定値⁽⁸⁾と滑らかにつながる傾向を示している。

以上の結果から、本実験のため試作した装置は、その縦形容器内の緩衝ガス圧力を調節することで容易にドリフトチューブの温度を任意に、しかも均一に保つことが可能で、混合蒸気中での電子輸送係数の測定に適した性能を備えていることが明らかになった。

〈3・2〉 Na-He 混合気体中における電子移動速度

Na-He 混合気中における電子移動速度の測定は、Na 混合比が0.5, 1.0, 5.0, 10%の各値について360~430°Cの測定温度(〈3・1〉節参照)の範囲で行なった。しかし、測定温度が低いときは混合気体の圧力(以下では 0°C 換算圧力 $p_0(\text{Torr})$ を主に用いる)も低く、

図 5 シリコン油 HIVAC F-5 と Na の蒸気圧曲線
Fig. 5. Vapour pressure curves for silicon oil (HIVAC F-5) and sodium.

特に高い混合比での測定が制限される。また、測定温度が高いときは低混合比での測定圧力が油マンオメータの測定圧力範囲 (最大 80 Torr) を超えることがあり、測定が制限される。一方、測定圧力を一定に保ったときの E/N の測定範囲の上限は、フィラメント付近での電氣的破壊により、またその下限は陰極-陽極間の主電圧 V_{ac} の下限 (V_{ac} はシャッタバイアス V_{sc} に比べて大きいことが必要であり、本実験では V_{ac} の下限を 10 V としている) により決まる。

Na-He 混合気体中の電子移動速度の測定結果の一部を図 6 に示す。同図には Na 混合比が 0.5 および 5.0% の場合について示し、測定圧力ならびに測定温度は図中に示してある。いずれも測定結果は E/N のみに依存し、測定圧力 (あるいは測定温度) に対する依存性は見られない。このことから、各混合比における測定においては測定温度 (従って Na 分圧) を変化しても混合比は一定に保たれるものと考えられ、前項の温度分布の測定結果と合せて、今回試作に成功した二重ヒートパイプドリフトチューブは電子ドリフト空間の蒸気混合比を正確に、しかも均一に保つことができるものであると考えられる。

各混合比での測定値の平均値と分散を求め図示したのが図 7 である。なお、煩雑になるのを避けるために混合比 0.5% の測定値は○印で示す。図中の実線ある

図 6 Na-He 混合気体中における電子移動速度の測定例

Fig. 6. Examples of the measured electron drift velocities in Na-He mixtures at different temperatures.

図 7 Na-He 混合気体中における電子移動速度の測定結果

Fig. 7. Measured electron drift velocities in Na-He mixtures.

いは破線 (混合比 0.5% の場合) はボルツマン解析 (後述) により求めた電子移動速度の計算値⁽⁶⁾で、実測値との一致は良い。また、比較のため純粋 He 中および純粋 Na 中の計算値を各々点線で示す。

〈3.3〉 Na-Ar 混合気中における電子移動速度

この場合も測定圧力に対する依存性は見られず、図 8 のように測定値の平均と分散を示すことができる。

図 8 Na-Ar 混合気体中における電子移動速度の測定結果

Fig. 8. Measured electron drift velocities in Na-Ar mixtures.

なお、図 7 と同様○印は 0.5 % での測定値を示す。ここでも実線あるいは破線 (0.5% 混合比の場合) はそれぞれ対応する混合比でのボルツマン解析による移動速度の計算値⁽⁶⁾であり、点線は純粋 Ar 中および純粋 Na 中の計算値を示している。そして、この場合も混合気体中における電子移動速度の測定値と計算値の一致は良い。また、Na-Ar 混合気中の移動速度の混合比に対する依存性は Na-Ar 系中におけるより強く、特に混合比の低いときにその傾向は著しい。

〈3.4〉 混合気中における破壊電圧 Na-希ガス混合気中での上記の測定における E/N の上限はフィラメント付近での電氣的破壊を起こす主電圧の値で決められることは既に述べた。その値を測定圧力に対して、各々の混合気体および混合比を区別してプロットしたのが図 9 である。この場合の破壊電圧値は図に示すように混合気体の種類、混合比および全圧 (従って温度) に依存しているようであるが、更にその値はフィラメント電流にも依存し、フィラメント電流を増すと破壊電圧は低下する傾向がある。また、破壊が陰極-陽極間ではなくて、フィラメント付近 (フィラメントの負端子が最も負にバイアスされている) で発生していることから、図 9 は通常の意味での破壊電圧と気体圧力の関係を示すものではないが、それが E/N の測定上限を決めるものであることから重要であり、また、その値が極めて低いこと (最低破壊電圧 ~18V)、Na-Ar 混合気体中のほうがより低い傾向にあることなど興味深い。

図 9 Na-He および Na-Ar 混合気体中の破壊電圧
Fig. 9. Electrical breakdown voltage in Na-He and Na-Ar mixtures.

4. Na-希ガス混合気体中におけるボルツマン方程式解析

第 1 章で述べたように、本実験を行なうに先立ち、Na-希ガス混合気体中での電子の移動速度、特性エネルギー D/μ (D : 横拡散係数, μ : 移動度)などをボルツマン解析により求め、実験を実行するうえで重要となる幾つかの知見を得ていた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本章では、この混合気体中のボルツマン方程式解析について簡単に述べ、また前述の実験結果との比較についても記述する。

〈4.1〉 計算方法 混合気体中における電子群のエネルギー分布関数を表わすボルツマン方程式⁽¹⁰⁾を二項近似を用いて解き、移動速度などの電子輸送係数を算出した。このとき、電子と各々の成分原子との衝突が混合比に比例して起きるようにボルツマン方程式に修正を加えた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。計算方法の詳細については、文献(10)を参照されたい。

〈4.2〉 計算に用いた各種衝突断面積

(1) He He 原子の各種衝突断面積としては、竹多氏ら⁽¹⁰⁾と同一のものをを用いた。

(2) Ar 運動量変換断面積 Q_m としては、Frost 氏ら⁽¹²⁾の値を用いた。電子励起断面積 Q_{ex} としては、励起開始エネルギー 11.5 eV の準安定励起断面積には Borst 氏⁽¹³⁾の結果を、その他の電子励起断面積としては Sakai 氏ら⁽¹⁴⁾の全電子励起断面積から、上記の Borst 氏の断面積を差し引いたものを用いた。この励起開始エネルギーは 12.9 eV とした。ま

た、電離断面積として Rapp 氏⁽¹⁵⁾の結果を用いた。

(3) Na Na 原子の各種衝突断面積については、1975 年に Schlie 氏⁽¹⁶⁾がそれ以前の資料を詳しく吟味して計算を行なっているので、ここではそれらの断面積をそのまま用いた。すなわち、運動量変換断面積としては Norcross 氏⁽¹⁷⁾の計算値を、電子励起断面積としては Enemark 氏⁽¹⁸⁾(励起開始エネルギー 2.1 eV)、および Zapesochnyi 氏⁽¹⁹⁾(励起開始エネルギー 3.75 eV)の結果を、また電離断面積(電離開始エネルギー 5.14 eV)としては McFarland 氏⁽²⁰⁾の結果をそれぞれ用いた。

〈4・3〉 計算結果ならびにそれと測定結果との比較

前述の各種衝突断面積を用い、ボルツマン方程式解析により求めた電子移動速度は、実線あるいは破線で図 7 (Na-He 混合気体について)および図 8 (Na-Ar 混合気体について)に示した。そして、既に〈3・3〉節および〈3・4〉節で述べたように、計算結果は実験値を極めて正確に表現していると言える。

Na 蒸気の混合比に伴って混合気体中における電子移動速度が変化するの、主に Na 原子の共鳴励起単位(励起開始エネルギーは 2.1 eV)のためである。また、Na-Ar 混合気体中におけるほうが Na-He 混合気体中におけるより混合比に伴う移動速度の変化が大きいのは、He 原子の運動量変換断面積が平坦なエネルギー依存性をもつのにに対し、Ar 原子のそれには Ramsauer 効果による極小があるためで、その点についてはボルツマン解析により求められる電子エネルギー分布(ここでは省く)に対する検討から明らかになっている。

5. ま と め

金属蒸気と希ガスの混合気体中において、電子輸送係数を測定するための新しい装置として二重ヒートパイプドリフトチューブを試作し、それを用いて Na-He および Na-Ar 混合気体中において電子移動速度の測定を行なった。

その結果、次の諸点が明らかになった。

(1) 今回試作に成功した二重ヒートパイプドリフトチューブは電子ドリフト空間の金属蒸気の分圧を正確に、しかも、均一に保つことができることを確認した。

(2) 電子移動速度の測定は希ガス(He および Ar)中の Na 混合比が 0.5, 1, 1.5, 10% の各場合について行なった。そして、そのいずれの場合も、測定温度を変化しても(従って、Na 蒸気分圧を変化させ、それに伴って混合比を一定に保つように希ガス圧力を変化させる)移動速度の測定結果にはそれに対する依存性はみられなかった。

(3) 上述の移動速度の測定結果は、いずれもボルツマン解析による計算値と極めて良く一致した。

(4) 以上の諸結果から、本論文で述べた二重ヒートパイプドリフトチューブは金属蒸気を含む希ガス中の電子輸送係数を測定するために必要な条件を十分備えていることが確認できた。そして第 1 章で述べたように、本装置を用いることにより著者らのヒートパイプドリフトチューブ^{(1)~(3)}よりはるかに広い範囲の金属蒸気を対象にした測定が可能になると考えられる。

終りに、本実験に協力された横田純平君に感謝します。
(昭和 57 年 10 月 19 日受付)

文 献

- (1) Y. Nakamura, et al.: *J. Phys. D*, **11**, 325 (1978)
- (2) Y. Nakamura: "Electron drift velocity and momentum transfer cross section in potassium vapour", *Proc. Int. Sem. on Swarm Experiments in Atomic collision Research*, p. 42 (1979)
- (3) 中村・坂井: 電学論 A, **102**, 397 (昭 57-7)
- (4) C.R. Vidal, et al.: *J. Appl. Phys.*, **40**, 3370 (1969)
- (5) 西塚, 他: 「ナトリウム-ヘリウム混合蒸気中の電子輸送係数」, 昭 54 電気関係学会東海支大
- (6) 吉田, 他: 「アルゴン-ナトリウム混合蒸気中の電子輸送係数」, 昭 55 電気学会全大
- (7) C.R. Vidal, et al.: *Rev. Sci. Instrum.*, **42**, 1779 (1971)
- (8) 信越シリコン product data, 油拡散ポンプ用オイル H1VAC F-4/F-5
- (9) *Handbook of Chemistry and Physics*, D-187, 54th Edition, (1974) CRC Press
- (10) 竹田・中村: 電学論 A, **102**, 556 (昭 57-10)
- (11) J.J. Lowke, et al.: *J. Appl. Phys.*, **44**, 4664 (1973)
- (12) L.F. Frost, et al.: *Phys. Rev.*, **136**, 6A, 1538 (1964)
- (13) W.L. Borst: *ibid.*, **A 9**, 3, 1195 (1974)
- (14) Y. Sakai, et al.: *J. Phys. D*, **10**, 1035 (1977)
- (15) D. Rapp, et al.: *J. Chem. Phys.*, **43**, 1464 (1965)
- (16) L.A. Schlie: *J. Appl. Phys.*, **47**, 1397 (1976)
- (17) D.W. Norcross: Private communication (1976)
- (18) E.A. Enemark, et al.: *Phys. Rev.*, **A6**, 1, 192 (1972)
- (19) I.P. Zapesochnyi, et al.: *Opt. Spectr.*, **19**, 268 (1965)
- (20) R.H. McFarland, et al.: *Phys. Rev.*, **137**, 4A, 1058 (1965)