卒業論文

イオントラップ法による 極微量分析装置の開発

平成 13 年 2 月

高知工科大学知能機械システム工学科 木村・戸名グループ

森下 祥代

(共同研究者:高市 智章)

目次	
----	--

1章	緒言		1
2章	Paul	Trap の原理	3
2	2 - 1	Paul Trapの理論	3
2	2 - 2	Paul Trap内でのイオンの運動	5
3章	Paul	Trap を用いた質量分析	8
3	- 1	- Paul Trap 装置及び原理	8
3	8 - 2	TOF(Time of Flight: 飛行時間)法	10
	()	TOF 法の原理	10
	()	TOF 装置及びパルスシーケンス	12
4章	実験郩	装置の開発及び性能テスト	
4	- 1	閉じ込め用 RF AMP(高周波増幅器)	13
	()	原理及び製作方法	13
	()	性能テスト結果	23
4	- 2	パルサー	24
	()	原理及び製作方法	24
5 章	測定	結果	
6章	総括	••• •••	
参考資	資料		
謝辞	••• •••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
参考了	と献 …		

1章 緒言

イオントラップとは、真空中に電磁場からなるポテンシャルの作用によって、 イオンを三次元的に閉じ込めて保持する技術や装置の総称である。^{1),2),3)}

イオンを電極に囲まれた空間に閉じ込める(ポテンシャルを形成する)方法に は、ポールトラップ(Paul trap)、ペニングトラップ(Penning trap)、キングド ントラップ(Kingdon trap)などがある。³⁾

それらのイオントラップ法の研究は、1923年のキングドン(K.H.Kingdon)に よって始まっている。キングドントラップは、円筒電極とその中心に金属芯線 を張り両電極間に静電圧を印加すると、イオンが芯線の周りにキングドン軌道 を描いて運動するというものである。また最近では、ポールトラップと呼ばれ る 1953年にポール(V.W.Paul)により考案された、三次元的回転双曲面電極に高 周波電場を印加させてイオンや電子の閉じ込める方法も使われている。これに より、高分解能分光などの研究が可能となり、この業績により、ポールはデー メルト(H.G.Dehmelt)と共に 1989年にノーベル物理学賞を受けている。他にも、 ペニングトラップと呼ばれる、1936年にペニング(F.M.Penning)が用いた、電 極に静電圧と静磁場を印加し、閉じ込めを行う方法も有用されている。これら、 イオントラップに閉じ込められたイオンは原理的には永久に蓄積される。

イオントラップの特徴としては、

- ・長時間イオンを蓄積出来るため、微量のサンプルで良い。
- ・反応時間の長い現象を壁からの影響を排除して観測出来る。
- ・蒸気圧が極めて小さい物質でも、電子ビームでガス化することによって蓄積 できる。

・超精密分光の研究が可能である。

などが挙げられる。

これらイオントラップの特徴を利用し、最近次のような研究が行われている。 トラップ内でイオンは最初、数eV(数万K)のエネルギーを持っていても、レー ザー冷却法を用いることにより1K以下のイオン温度に下げる事が可能となっ ている。レーザー冷却はイオンの運動によるドップラー効果を利用しており、 イオンの吸収スペクトルをドップラー効果の広がりのない状態で測定出来る。 この結果、高分解能分光などの研究が可能となり、精度の高い周波数標準器を 作る試み 5)もなされている他、ウィグナー結晶の形成や強結合プラズマにおける協同現象などに応用出来るのではないかと期待されている。

また、イオントラップは質量分析器としても有効利用されており、反陽子の 質量⁶⁾、不安定原子核の質量の測定^{7),8)}などの他に電子の磁気双極子モーメント の測定⁹⁾にも用いられている他、極めて遅い化学反応の時間変化の観測にも用 いられている。

ポールトラップ法を用い未知の物質の質量分析を行うことが最終的な目標で あるが、本実験では、TOF(Time of Flight:飛行時間)法を用いた質量分析を行 うことを目指して、交流電場を用いる Paul trap 装置の開発・性能テストを行 うことにした。また、サンプルガスとして Ar ガスを用いて質量分析を行った。

2章 Paul Trapの原理

2-1 Paul Trapの理論

ポールトラップは、前に述べたとおり、ポール(V.W.Paul)により考案された、 三次元的回転双曲面電極に高周波電場を印加させてイオンや電子を閉じ込める 方法である。図2-1にイオントラップ電極を示す。



図 2-1 イオントラップ電極

図 2 - 1 のようにイオントラップ装置は、エンドキャップと呼ばれる一対の上下電極とリングと呼ばれる中央電極からなっている。これらの電極は z 軸に対して回転対称となっている。また、リングの内側の半径 r_0 と上下のエンドキャップ間の距離 $2z_0$ には、 $r_0^2 = 2z_0^2$ の関係が成り立っている。イオンはこれら 3 つの電極に囲まれた空間に閉じ込められる。

ポテンシャルを形成するためには、リング電極とエンドキャップ電極に、Vの 静電圧と高周波電圧を重畳させて印加させる方法を用いている。イオンは RF の高周波電圧の周波数により、振幅変調をされながらそれより遅い周波数の調 和振動を行う。また閉じ込めのポテンシャルエネルギーは普通、数eV から数 十eVの深さがある。



図2-2にトラップ内のポテンシャルの様子を示す。

図2-2 トラップ内のポテンシャル

これはリング電極、エンドキャップ電極にそれぞれ+V_{dc}、 - V_{dc}を印加した場合のものである。トラップの各電極に交流電圧を印加すれば、ポテンシャルは時間的に変化する。

2-1 Paul Trap内のイオンの運動

ポールトラップ中でのイオンの運動については、Dehmelt によって詳しく示 されている。一対のエンドキャップ同士を等しい電位に保ち、リングとの電位 差をΦ₀とすると、前述のように、リング電極の内径の最小半径_{r₀}、エンドキャ ップ間の最小距離_{2z₀}の間には次の関係がある。

 $r_0^2 = 2z_0^2$. (2.1) トラップ電極のうち、リング電極に直流電圧+ V_{dc} を、2枚のエンドキャップ電極には直流電圧- V_{dc} を印加した場合、トラップ空間内でのポテンシャルは次のように与えられる。

$$\Phi(r,0) = \frac{V_{dc}}{r_0^2} \left(r^2 - 2z^2 \right) \,. \tag{2.2}$$

このポテンシャルによる電場ベクトル(*Ē*)の分布を、図2-2に示す。

図 2 - 3 $\vec{E} = -grard(\Phi)$ の図 (\vec{E} は電場ベクトル) このポテンシャルの中に正の電荷を持つイオンがある場合、r方向には安定 して閉じ込められるが、z軸方向には逆にトラップ外に逃がすような力が働き、 不安定である。そこでリング電極とトラップ電極の間に角振動数 Ω 、振幅 V_{ac} の 交流電圧と直流電 EV_{dc} を印加する。この場合 (2.21)式で直流電圧 V_{dc} を交流電 $EV_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t$ と置きかえる。するとトラップ内のポテンシャルは次式のよう に表される。

$$\Phi(r,z) = \frac{V_{ac}\cos(\Omega t) + V_{dc}}{r_0^2} \left(r^2 - 2z^2\right) .$$
(2.3)

このトラップ内での電荷*e*、質量*m*のイオンがただ1個存在するときのイオンの運動方程式は、*r*、*z*方向について次のようになる。

$$\frac{d^{2}r}{dt^{2}} - 2\frac{V_{ac}(\Omega t) + V_{dc}}{r_{0}^{2}} \frac{e}{m}z = 0 ,$$

$$\frac{d^{2}r}{dt^{2}} + \frac{V_{ac}(\Omega t) + V_{dc}}{r_{0}^{2}} \frac{e}{m}r = 0 .$$
(2.4)

ここでt、a、qを(2.5)式のように定義する。これらのパラメータを使って(2.4) 式の変数変換を行うと(2.6)式のようになる。

$$t = \frac{\Omega t}{2} ,$$

$$a_z = -2a_r = -\frac{8eV_{dc}}{mr_0^2 \Omega^2} ,$$

$$q_z = -2q_r = \frac{4}{mr_0^2 \Omega^2} .$$
(2.5)

$$\frac{d^2 u_i}{dt} + (a_i - 2q_i \cos 2t)u_i = 0 \qquad (i = r, z) .$$
(2.6)

(2.6)式は、Mathiew 方程式と呼ばれており、Mathiew によって詳しく解析されている。図 2 - 4 にパラメータ*a*を縦軸、*q*を横軸とした安定領域のダイアグラムを示す。つまり、パラメータ*a*、*q*が斜線部の安定領域に存在すれば安定解を持ち、イオンは安定してトラップされることになる。



図 2 - 4 安定領域

3章 Paul Trap を用いた質量分析

3 - 1 Paul Trap 装置の原理及び実験方法
 本実験で用いた Paul trap 装置の略図を図 3 - 1 に示す。



図 3-1 イオントラップ装置の略図

まず、イオントラップを設置した真空 chamber 内にサンプルとして少量の希 ガスを充填する。電流を流すことにより熱せられたフィラメントから熱電子が 発生する。電子は加速され電子ビームとなり、トラップ内のガス原子に当たり、 原子内の電子を弾き飛ばす。電子を失った原子はイオン化する。イオン化され たイオンは RF 電場によってトラップされる。

次に下側のトラップ電極にパルサーによって、引き込み電圧 - 50V を印加す

ると、クーロン力により、イオンはトラップから引き出される。このイオンは - 2.8KV の直流電圧を印加したセラトロンによって検出される。イオンがセラ トロンに当たると 2 次電子を放出し、2 次電子はセラトロンの中を増幅されな がら進む。最終的に図の抵抗を 2 次電子が通過することにより電圧が変化し、 その電圧変化をデジタルオシロスコープにより観測し、データをコンピュータ ーに取りこむ。

引き出しパルスを加えたときからオシロスコープにイオンのシグナルが現れ るまでのイオンの飛行時間とその距離により、分子の質量を求め、分子種を決 定する。



図3-2に本実験で使用したイオントラップ装置とその内部写真を載せる。



図3-2 イオントラップ装置の写真

(左:高真空にできる chamber 右: chamber 内のイオントラップ装置) 右の写真は、ロータリーポンプとターボポンプを用いて高真空にする事が可 能な、イオントラップ装置が入っている chamber である。右の写真が、その chamber 内に入っているイオントラップ装置である。

3-2 TOF(Time of Flight: 飛行時間)法

() TOF 法の原理

本実験では、質量分析法として TOF 法を用いる。図 3 - 3 に TOF 法を用い た質量分析計の原理を示す。間隔 2*d* の平行平板電極 A、B の中心に質量*m* のイ オンがあり、A に + *v*、B に - *v*の電位を加えることにより、このイオンを加 速する。



図 3-3 TOFの原理図

イオンは一定の加速電圧Vで加速されると、トラップ内の電場Eは

$$E = \frac{V}{d} \tag{3.1}$$

と表される。イオンに加わる力 Fは

$$F = eE \quad . \tag{3.2}$$

一方加速度を a とすると、ニュートンの運動方程式より

$$F = ma \quad . \tag{3.3}$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad . \tag{3.4}$$

よってイオンの速度vは

$$v = \frac{F}{m}t \quad . \tag{3.5}$$

電極内でトラップされていたイオンは、引き込み電圧によって加速されるので 引きこみ電圧を加えている場所(電極 B)までのイオンの飛行時間_t,は

$$t_1 = \sqrt{2d\left(\frac{m}{F}\right)} \tag{3.6}$$

となり、これを(3.5)式に代入するとイオンの速度_収は次のように表される。

$$v_{1} = \frac{F}{m} \sqrt{2d\left(\frac{m}{F}\right)}$$
$$= \sqrt{2d\frac{F}{m}} . \tag{3.7}$$

また、トラップを逃れてからセラトロンに到達するまでは等速運動を行っているので、その間の飛行時間をt,とすると

$$t_2 = \frac{L}{v_1} = \frac{L\sqrt{m}}{\sqrt{2DF}} \ . \tag{3.8}$$

よって飛行時間*T*は

$$T = t_1 + t_2$$

= $\sqrt{2d \frac{m}{F}} + \frac{L\sqrt{m}}{\sqrt{2dF}}$
= $\sqrt{m} \left(\sqrt{\frac{2d}{F}} + \frac{L}{\sqrt{2dF}} \right)$
 $\propto \sqrt{m}$

(3.9)

となり、飛行時間*T* はイオンの質量によって異なり、質量*m*の平方根に比例する。また、図 3-3 内で異なった電場がかかっていたとしても、これは言える。 このように、質量の小さいイオンから順次検出器に到着することになる。

このように、イオンの飛行時間を求めることにより質量が決定できるので、 TOF(Time of Flight:飛行時間)法と呼ばれている。

() TOF 装置のパルスシーケンス

次に実際に本実験に使用したイオントラップ装置の略図とパルスシーケンス を図 3 - 4 に示す。



図3-4 パルスシーケンス

交流電場を形成するために、閉じ込め用の RF(1 MHz)を図のリング電極部分 に印加している。照射していた電子ビームを切った瞬間から、パルサーの引き 込み電圧を加えるまでの時間を「貯め込み時間」と言うが、図のエンドキャップ 電極に引き込み電圧(-50V)を加えると、イオンがトラップから逃れ、イオン検 出器であるセラトロンに引き寄せられる。

引き込み電圧がかかった瞬間からイオン検出器であるセラトロンにイオンが 到達するまでの時間、つまりオシロスコープに電圧変化が現れるまでの時間を 飛行時間と呼び、飛行時間はイオンの質量の平方根に比例することを用いて、 分子種を決定する。

TOF 法を用いた質量分析は、高質量の質量分析に適し、非常に高感度である という利点を持っているが、イオン生成のためのパルス幅やイオンの空間的広 がり、生成時のイオンのエネルギー幅などの要因によって分解能は低い。

4章 実験装置の開発及び性能テスト

4-1 閉じ込め用 RF アンプ(高周波増幅器)

() 原理及び製作方法

本実験では、イオンを安定に閉じ込めるために数百 V の電圧が必要なので、 RF アンプを製作した。

図 4 - 1 に製作した RF アンプの回路図を示す。また、RF アンプ内で使う OP アンプ用安定化直流電源(±15V)も製作した。その電源回路を図 4 - 2 に示す。 また、電源回路で用いる IC(MC7815、MC7915: MOTOROLA)の仕様書とそ の特性は、資料 1、2 に掲載する。



図 4-1 RF アンプの回路



図 4 - 2 ± 15V 安定化直流電源

イオンを安定して閉じ込めるためには、周波数・電圧ともに高精度で安定していなければならない。この回路は、ハイパス(広域通過)フィルタによってオシレータからの信号の高周波成分だけを通過させ、OPアンプとトランジスタによって電圧を増幅させる回路になっている。

次に、このRFアンプの回路について詳しく説明する。

ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタでは、ある周波数以下の信号を除去し、高周波成分が通過 する仕組みになっている。オシレータからの信号が、CR回路を通ることによっ て、低周波成分を失った信号となる。図 4-3にハイパスフィルタと OP アンプ 回路を示す。



図 4 - 3 ハイパスフィルタと OP アンプ

図の式ようにカットオフ周波数 fcより高い周波数が通過し、それより低い周波数が除去される。

また、ハイパスフィルタは図 4 - 4 に示されるような RC 直列回路なので、C両端の電圧を V_c 、 R_1 両端の電圧を V_R 、電源電圧Vとすると

$$\dot{V} = V_C + V_R \quad . \tag{4.1}$$

となり、ベクトルは図 4-4の右図となる。

$$V = \sqrt{V_C^2 + V_R^2}$$

= $\sqrt{(R_1 I)^2 + \left(\frac{I}{wC}\right)^2}$
= $\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{wC}\right)^2} \cdot I$
= $Z \cdot I$. (4.2)

ただし、インピーダンスZは、

$$Z = \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\mathbf{w}C}\right)^2} \quad . \tag{4.3}$$

である。以上より、回路に流れる電流は、次式のようになる。

$$I = \frac{V}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{2p_1^{\prime}C}\right)^2}}$$
(4.4)

上で述べた f は次のように与えられる。



図 4 - 4 RC 直列回路とそのベクトル図

今回用いた、ハイパスフィルタでの周波数と電流の関係(4 - 4)式を用いて計 算した結果を図 4 - 6 に示す。ここでは、 *R*₁ = 1 K 、 *C* = 2200 pF とした。



図4-6 ハイパスフィルターでの周波数と電流の関係

OP アンプ

本装置の開発に用いた OP アンプ(演算増幅器)(LH0032: MSK)の仕様書と特性は、資料1に掲載する。

OP アンプは電圧を増幅するための素子であり、また特別の性質を備えた増幅 器である。OP アンプは、入力の電圧信号を増幅して、大きな振幅の出力信号に するが、本実験では、負帰還増幅(negative feedback amplifier)になっている。 電圧の増幅率は、図 4 - 7の R_1 (=入力抵抗)と R_2 (フィードバック抵抗)の抵抗の 比率によって決まり、 R_2/R_1 =10より、10倍になる。



図 4 - 7 負帰還増幅(negative feedback amplifier)

パワートランジスタ

本装置の開発で用いたパワートランジスタ(2SC3421:TOSHIBA)の仕様書及 びその特性は、資料4に掲載する。

トランジスタは、半導体を npn 接合させた素子で、「電流 電流増幅素子」で ある。つまり、電流操作を行うことで、電圧増幅させる。トランジスタは、図 4-8のようにコレクタ、ベース、エミッタと呼ばれる3本の端子を持ち、ベー ス-エミッタ間に少量の電流が流れると、コレクタ-エミッタ間に大量の電流 (Ic or IB) が流れる仕組みになっている。つまり、Icを IBで制御している。



図 4-8 パワートランジスタ





図 4-9 バイアス回路

ここで用いたトランジスタ 2SC3421 のベース電圧は常に正でなければならな い。図 4 - 9 のようなバイアス回路を用いて OP アンプの出力を常に正の電圧に した。 またその他、図4-1の回路で使用した部品の詳細を次に示す。

2200 µF:この回路はハイパスフィルタ(広域通過フィルタ)の回路となっており、その一部として用いられているものである。直流成分を切るためにも用いる。

10 pF:デカップリング(再結合)コンデンサー 負荷急変、電圧変動を防ぐため。

0.1µF:高周波ノイズを除去するパスコン(デカップリング用) OPアンプが高速で動作しているとき、遠くの電源からでは電圧供給が間に合わ ないので、近くのコンデンサーから電圧を供給する。

4.7 µF:低周波ノイズ吸収用、電源回路の平滑用。

270 : R F アンプ - トランジスタ間の電位差があるため、直結したらどちらかが壊れてしまう。そのため、OP アンプから出た電圧を吸収するためにこれをつけると、電圧が増幅しても電流が増幅するだけである。

10 : コイルの内部抵抗が小さいため。もしこの抵抗が無ければ、トランジスタの Ic が大きくなりすぎ、トランスの加熱につながる。

2: 電流をネガティブフィードバックさせるため。

IC:7815,2200 µF:ファン用にノイズが多いので(別電源に)7815、2200 µF をつけて、ノイズ源を遠ざけるため。

電動ファン:トランジスタを冷やすため

コイル:トランスで、電圧を1次側と2次側のコイルの巻き数の比で増幅 させる。(パルス電圧はコイルの巻き数に比例する。)

出力回路にLC共振回路を用いるのは、入力信号波形の一部のみしか増幅しないために波形ひずみが著しいから。

電圧可変電源:リング電極にバイアスをかけるため。



図 4-10 製作した RF アンプ用シャーシ





前面

後面



正面 図 4 - 11 製作した RF アンプの写真

() 性能テスト結果

図 4 - 12 に製作した RF アンプ装置の性能テスト結果を示す。

このグラフは周波数特性を示している。入力電圧 0.6V に対し、出力電圧 240V なので、電圧の増幅度である電圧利得*G_v* は次式で表され、

$$G_V = 20\log \frac{e_o}{e_i} [dB] = 52dB$$
 . (4.1)

(e_I:入力電圧 e₀:出力電圧)

となっている。増幅器の増幅度は周波数によって変化するが、これは本実験で 必要な周波数帯域(500kHz~1MHz)をカバーしている。



周波数帯域:500 kHz~1 MHz

入力電圧: 0.6 V 最大出力電圧: 240 V 倍率: 52 dB

図 4 - 12 RF アンプの性能

4-2 パルサー

()原理及び製作方法

貯めこみ時間によるイオン数の変化を調べるためにパルスの幅を 0.5 s - 20 s まで変化させることができるパルサーを製作した。その回路図を図 4 - 13 に示 す。また、図 4 - 14 はパルサーに用いる + 5V 直流電流回路である。

図 4 - 13 のデジタル IC は、2 回路の単安定マルチバイブレーターである。こ のデジタル IC(TC74HC221AP: TOSHIBA)の仕様書と特性を資料 5 に掲載す る。

オシレータからの出力波形と同期した信号を INPUT から入れ、OUTPUT からの信号は高電圧パルスジェネレーター (HEWLETT PACKRD 8114A)のトリガーパルスとなる。また、パルスの長さは図の可変抵抗 200k によって、0.5 s-20 sまでパルスの幅を変えることが出来る。



図 4-13 パルサーの回路図



図 4 - 14 + 5V 安定化直流電源

単安定マルチバイブレーターは、CRの時定数を変えることによってパルス幅 を設定することが出来る。パルス幅*T*は普通、

 $T = CR \log 2 \cong 0.69 CR$. (4.2) で表されるが、このデジタル IC は時定数が 1ms 以上のときの出力パルス幅は ほぼ、次式で表される。

 $T \cong 1.0CR$.

(4.3)

これを用いて、図 4 - 15 にパルスシーケンスを示す。図中の 2, 13, 9, 5 の 数字は、マルチバイブレータ IC のピン番号に対応する。



図 4 - 15 パルサーのパルスシーケンス

図 4 - 16 に製作したパルサー用シャーシの製作図、図 4 - 17 にその写真を示 す。



図 4-16 製作したパルサー用シャーシ



前面

後面



正面 図 4 - 17 製作したパルサーの写真

5章 測定結果

Arをサンプルガスとして予備実験を行った結果、得られた質量スペクトルを 図 5 - 1 に示す。

この結果は、真空度 2.7 × 10⁻⁵Pa のチャンバー内に、Ar ガスを導入し、真空 度 5.3 × 10⁻⁴Pa のときに取得したデータで、50回分のシグナルを平均したも のである。この質量スペクトルには 3 本のピークが現れている。中央の大きな シグナルが Ar に対応するものであり、飛行時間と質量の関係から、残りのシグ ナルが残留ガスである N₂、O₂ であることが考えられ、計算とも一致する。



図 5-1 TOF 法によって得られた質量スペクトル

次に貯め込み時間とシグナルの強さの関係を図5-2に示す。



図 5-2 貯めこみ時間とシグナルの関係

これは、Ar ガスをサンプルガスとて導入し、50 回分の平均操作を行って得たものである。

今回は、電子ビームを照射し続けて測定を行った。引き込みパルスをかけ終った瞬間を0sとし、次の引き込みパルスをかけ始めるまでの時間を貯め込み時間とした。貯め込み時間が10msぐらいまではトラップ内のイオン数が増加しているが、10ms以降は飽和していることが分かる。このグラフによって、10msまでの間はイオンはトラップされていると言える。ただし、理想的にはイオンはトラップ内に半永久的に閉じ込めることが出来るが、この結果より、トラップ内でイオンがトラップされている時間が、期待していたよりもかなり短いことが分かった。

6 章 総括

本実験では、次のようなことを行った。

- ・RF アンプとパルサーを製作
- ・製作した装置の性能テスト
- ・Ar をサンプルガスとしてポールトラップ内に蓄積及び TOF 法による蓄積したイオンの質量分析(予備実験)

RF アンプとパルサーを製作し、性能テストを行った結果、RF アンプ・パルサ ー共に十分な性能を持っていることが分かった。予備実験では Ar⁺イオンの他、 残留ガスとしての N²⁺や O⁺イオンの観測もされた。

今後の課題としては次のようなことが挙げられる。

- ・貯め込み効率の向上
- ・未知の物質の質量分析
- ・クラスターイオンの研究に適用

このように、イオンを蓄積してから質量分析を行えば、高感度の分析が可能で あることを示すためにも、貯め込み効率の向上をはかることが課題である。ま た、イオントラップが高分解能である性質をいかして、これらの手法を用いて てクラスターイオンの研究に適用することを計画している。クラスターとは、 原子や分子が集まってできる粒子のことで、電荷を帯びたものを特にクラスタ ーイオンと言う。例えばAgなどを例に挙げると、Agに強いパルスレーザー光 を照射させると、Agクラスターイオンが放出されるが、原子数の違う Agクラ スターイオンをイオントラップによって質量分析を行うと、質量スペクトルが クラスターサイズによって単純に変化しないことが知られている。これらのク ラスターイオンについては、これまであまり詳しく解析されておらず、各分野 での応用が期待されている。クラスターについて調べることも今後の研究目標 としていきたい。

参考資料

資料1 IC(MC7815: MOTOROLA)の仕様書とその特性

- 3-Terminal Regulators
- Output Current up to 1.5 A
- Internal Thermal-Overload Protection
- High Power-Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Direct Replacements for Fairchild µA7800 Series

description

.

This series of fixed-voltage monolithic integrated-circuit voltage regulators is designed for a wide range of applications. These applications include on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. Each of these regulators can deliver up to 1.5 A of output current. The internal current-limiting and thermal-shutdown features of these regulators essentially make them immune to overload. In addition to use as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents, and also can be used as the power-pass element in precision regulators.

The μ A7800C series is characterized for operation over the virtual junction temperature range of 0°C to 125°C.

7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056E - MAY 1976 - REVISED JULY 1999



The COMMON terminal is in electrical contact with the mounting base.

TO-220AB







The COMMON terminal is in electrical contact with the mounting base



7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056E - MAY 1976 - REVISED JULY 1999

		PACKAGED	DEVICES	-
тJ	VO(NOM) (V)	PLASTIC FLANGE-MOUNT (KC)	HEAT-SINK MOUNTED (KTE)	FORM (Y)
	5	µA7805CKC	µA7805CKTE	µA7805Y
	6	µA7806CKC	µA7806CKTE	µA7806Y
	8	µA7808CKC	µA7808CKTE	µA7808Y
	8.5	µA7885CKC	µA7885CKTE	µA7885Y
0°C to 125°C	10	µA7810CKC	#A7810CKTE	µA7810Y
	12	µA7812CKC	µA7812CKTE	µA7812Y
	15	µA7815CKC	μA7815CKTE	µA7815Y
	18	µA7818CKC	µA7818CKTE	µA7818Y
	24	µA7824CKC	µA7824CKTE	µA7824Y

The KTE package is only available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., μ A7805CKTER). Chip forms are tested at 25°C.

schematic



7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056E - MAY 1976 - REVISED JULY 1999

electrical characteristics at specified virtual junction temperature, $V_{\rm I}$ = 23 V, $I_{\rm O}$ = 500 mA (unless otherwise noted)

DADAMETER	TETOO		μ				
PARAMETER	TEST COM	RDITIONS	TJI	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output un have	Io = 5 mA to 1 A,	Vi = 17.5 V to 30 V.	25°C	14.4	15	15.6	
Output voitage	P _D ≤15 W		0°C to 125°C	14.25		15.75	v
lan dualkana ara dallan	VI = 17.5 V to 30 V		0500		11	300	
input voitage regulation	VI = 20 V to 26 V		25%		3	150	mv
Ripple rejection	VI = 18.5 V to 28.5 V,	f = 120 Hz	0°C to 125°C	54	70		dB
2	IO = 5 mA to 1.5 A	0500		12	300		
Output voltage regulation	IO = 250 mA to 750 m	25-0		4 150		mv	
Output resistance	f = 1 kHz		0°C to 125°C		0.019		W
Temperature coefficient of output voltage	lo = 5 mA		0°C to 125°C		-1		mV/°C
Output noise voltage	f = 10 Hz to 100 kHz		25°C		90		μV
Dropout voltage	lo=1A		25°C		2		٧
Bias current			25°C		4.4	8	mA
River and the second	Vj = 17.5 V to 30 V			1		1	
Blas current change	IO = 5 mA to 1 A	0-0 10 125-0	0.5			mA	
Short-circuit output current			25°C		230		mA
Peak output current			25°C		2.1	20110	A

Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken in account separately. All characteristics are measured with a 0.33-µF capacitor across the input and a 0.1-µF capacitor across the output.

資料 2 IC(MC7915: MOTOROLA)の仕様書とその特性



- Output Current Up to 1.5 A
- No External Components
- Internal Thermal Overload Protection
- High-Power Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Essentially Equivalent to National LM320 Series

description

This series of fixed-negative-voltage monolithic integrated-circuit voltage regulators is designed to complement Series µA7800 in a wide range of applications. These applications include on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. Each of these regulators can deliver up to 1.5 A of output current. The internal current limiting and thermal shutdown features of these regulators make them essentially immune to overload. In addition to use as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents and also as the power pass element in precision regulators.





	I	PACKAG	CHIP		
TA	VO(nom) (V)	HEAT-SINK MOUNTED (KC)	HEAT-SINK MOUNTED	FORM (Y)	
	-5	µА7905СКС	µА7905СКТЕ	µA7905Y	
	-5.2	µA7952CKC	µA7952CKTE	µA7952Y	
	-6	µА7906СКС	µA7906CKTE	µA7906Y	
000 to 10500	-8	µA7908CKC	µA7908CKTE	µA7908Y	
0-0 10 125-0	-12	µA7912CKC	µА7912СКТЕ	µA7912Y	
	-15	µA7915CKC	µA7915CKTE	µA7915Y	
	-18	µA7918CKC	µA7918CKTE	µA7918Y	
	-24	uA7924CKC	µA7924CKTE	uA7924Y	

The KTE package is also available taped and reeled.

7900 SERIES NEGATIVE-VOLTAGE REGULATORS





All component values are nominal.

absolute maximum ratings over operating temperature range (unless otherwise noted)

Input voltage, V1: µA7924C
All others
Continuous total power dissipation at (or below): T _A = 25°C (see Note 1) See Dissipation Rating Tables
T _C = 90°C (see Note 1) See Dissipation Rating Tables
Operating free-air, TA, case, TC, or virtual junction, TJ, temperature range 0 to 150°C
Storage temperature range, T _{sto}
Lead temperature 3.2 mm (1/8 inch) from case for 10 seconds 260°C

NOTE 1: For operation above 25°C free-air or 90°C case temperature, refer to Figures 1 and 2. To avoid exceeding the design maximum virtual junction temperature, these ratings should not be exceeded. Due to variations in individual device electrical characteristics and thermal resistance, the built-in thermal overload protection may be activated at power levels slightly above or below the rated dissipation.

DISSIPATION RATING TABLE - FREE-AIR TEMPERATURE

PACKAGE	T _A ≤ 25°C POWER RATING	DERATING FACTOR ABOVE TA = 25°C	TA = 70°C POWER RATING	TA = 105°C POWER RATING	TA = 125°C POWER RATING
KC	2000 mW	16.0 mW/°C	1280 mW	720 mW	400 mW
KTE	1900 mW	15.2 mW/°C	1216 mW	684 mW	380 mW

DISSIPATION RATING TABLE - CASE TEMPERATURE

PACKAGE	T _C ≤ 90°C POWER RATING	DERATING FACTOR ABOVE TC = 90°C	TA = 125°C POWER RATING		
KC	15000 mW	250.0 mW/°C	6250 mW		
KTE	14300 mW	238.0 mW/°C	5970 mW		

7900 SERIES NEGATIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS058A - JUNE 1976 - REVISED OCTOBER 1996

electrical characteristics at specified virtual junction temperature, V_I = -23 V, I_O = 500 mA (unless otherwise noted)

		- +	P				
PARAMETER	TEST CONDITIONS	TJI	MIN	TYP MAX		UNITS	
		25°C	-14.4	-15	-15.6		
Output voltage‡	IO = 5 mA to 1 A, V ₁ = −17.5 V to −30 V, P ≤ 15 W	0°C to 125°C	-14.25		-15.75	v	
	VI = -17.5 V to -30 V			5	100		
Input regulation	VI = -20 V to -26 V			3	50	mv	
Ripple rejection	VI = -18.5 V to -28.5 V, f = 120 Hz	0°C to 125°C	54	60	Cornell	dB	
	IO = 5 mA to 1.5 A			20	300		
Output regulation	IO = 250 mA to 750 mA	1		8	150	mv	
Temperature coefficient of output voltage	IO = 5 mA	0°C to 125°C		-1		mV/°C	
Output noise voltage	f = 10 Hz to 100 kHz	25°C		375	E 181.5	μV	
Dropout voltage	IO = 1 A	25°C		1.1	- see ally	V	
Bias current		25°C		2	3	mA	
-	VI = -17.5 V to -30 V			0.04	0.5		
Bias current change	IO = 5 mA to 1 A	1		0.06	0.5	mA	
Peak output current		25°C		2.1		A	

[†] Pulse-testing techniques are used to maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 2-µF capacitor across the input and a 1-µF capacitor across the output. [‡] This specification applies only for dc power dissipation permitted by absolute maximum ratings.



ALL DIMENSIONS ARE ±0.010 INCHES UNLESS OTHERWISE LABELED





TOSHIBA

2SC3421

東芝トランジスタ シリコンNPNエピタキシャル形 (PCT方式)

2 S C 3 4 2 1

- 電力增幅用, 励振段增幅用
- 2SA1358とコンプリメンタリになります。
- Po=60~80Wメインアンプのドライバー段に最適です。
- 高耐圧です。

最大定格 (Ta = 25°C)

	項	Ľ	l	記号	定 格	単位
Jν	クタ・ヘ	< - 7	、間電圧	VCBO	120	v
コレ	クタ・エ	ミッ	夕間電圧	VCEO	120	v
,I 3	ッタ・ヘ	< - 2	、間電圧	VEBO	5	V
Э	レク	9	電 流	IC	1	A
~	- ;	ス	電 流	IB	100	mA
zν	ケタ掲	4	Ta=25°C	Pa	1.5	
	1 1 10	. ~ /	Tc=25°C	rC	10	W
接	合	温	度	Тj	150	°C
保	存	温	度	T_{stg}	-55~150	°C



電気的特性 (Ta=25°C)

. v	IJ		E	Ξ			記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
27	レク	夕し	. P	馸	電	流	ICBO	$V_{CB} = 120V, I_E = 0$		-	100	nA
r	3 9	タし	?	断	電	沭	IEBO	$V_{EB} = 5V, I_C = 0$	-	-	100	nA
31	179.	エミン	/夕間	間降	伏電	E	V (BR) CEO	$I_C = 10 \text{mA}, I_B = 0$	120	-	-	v
直	流(雹 流	增	1	幅	寧	hFE (注)	$V_{CE}=5V$, $I_C=100mA$	80	-	240	
31	/クタ・	エミッ	夕ド	间的	和電力	£	VCE (sat)	$I_C = 500 \text{mA}, I_B = 50 \text{mA}$		0.30	1.0	V
~ .	- ス・	エミ	73	別	1電力	Ŧ.	VBE	$V_{CE} = 5V, I_C = 500 mA$	-	0.78	1.0	V
1	ラン	V V	ョン	周	波	数	fT	$V_{CE} = 5V, I_C = 100 mA$		120	_	MHz
Э	レク	9	出;	IJ	容」	量	Cob	V_{CB} =10V, I_{E} =0, f=1MHz		15	_	pF

注:hFE分類 O: 80~160, Y: 120~240





資料 5 デジタル IC(TC74HC221AP)の仕様書及び特性

TOSHIBA

TC74HC221AP/AF

東芝CMOSデジタル集積回路 シリコン モノリシック TC74HC221AP, TC74HC221AF DUAL MONOSTABLE MULTIVIBRATOR TC74HC221Aは、シリコンゲートCMOS 技術を用いた高速 CMOS 2 回路入りモノステーブル・マルナバイブレータです。 CMOSの特長である低い消費電力で、LSTTLに匹敵する高速動 作を実現できます。 トリガ入力は、立ち下がりエッジでトリガする五入力と、立 P (DIP16-P-300-2.54A) ち上がりエッジでトリガナるB入力およびCLR入力がありま 質量:1.00g(標準) す。X、B人力はシェミット・トリガ 人力ですので、人力信号の 上昇、下院時間が長い場合(t=t=ls)でも確実に動作します。 16 CHERRICER いったんトリガされると、出力は CLR 人力を "L" にしない限 り、外付け抵抗とコンデンサにより決まる一定時間単安定モード を継続します。従って、単安定時間内に入力されたトリガ入力は F (SOP16-P-300-1.27) 質量:0.18g (標準) 無視されます。Cx、Rxの時定数を任意に選ぶことにより、広い 範囲に渡るパルス出力が得られます。Cx、Rzの時定数が 1ms 以 ビン接続図 トのとき、出力パルス幅はほほw(out) =1.0Cx・Rx となりま す。また、すべての入力には静電破壊から素子を保護するため に、ダイオードが付加されています。 16 V_{cc} 15 1Rx/Cx 14 1Cx 13 1Q 12 2Q 11 2CLR 1A 1 0 1B 2 0 1CLR 3 0 1Q 4 0 〔特 長〕 2Q 5 🛛 ・ 低润滑電流 …… スタンバイ助 ICC=4µA (MAX.) (Ta=25°C) 2Cx 6 2 2Rx/Cx 7 3 GND 8 3 10 2B $I_{CC} = 700 \mu A (MAX.) (V_{DC} = 5V)$ (TOP VIEW) 高ファンアウト ------ LSTTL10個を直接駆動可能 ・ 対称出力インビーダンス ………… | I_{OH} | = I_{OL} = 4mA (MIN.) 論理図 ・バランスのとれた遅延時間 …… tpLH⇔tpHL 1A (1) 18 (2) • LSTTL (74LS221)と同一ビン接続、同一ファンクション (13) 10 (注):1回路のみ使用する場合には、CLR="L"とし、Rx/Cx・ (4) 1Q 1CLR (14) R 1Cx (14) CX 1Rx/C1 (15) R RX/CX $Cx \cdot Q \cdot \overline{Q}$ はオーブン、その他人力端子は"H"または"L"と してください。 日前 (5) 20 (12) 2Q 20LR (11) 18 2Cx (6) * (6) CX RX/CX

TOSHIBA

TC74HC221AP/AF

真理信表

	INPUTS				PUTS	
	Ā	В	CLR	Q	Q	NOTE
-	L	Н	Н	Л	U	OUTPUT ENABLE
	X	L	н	L	н	INHIBIT
	Н	X	Н	L	Н	INHIBIT
	L	5	H	Л	U	OUTPUT ENABLE
	L	Н	Г	Л	15	OUTPUT ENABLE
	X	X	L	L	н	INHIBIT

最大定格

3	項	8		記号	定 格	単位
電	簿	電	圧	Vcc	-0.5-7	V
λ	カ	商	圧	V _{3N}	-0.5~V _{cc} +0.5	V
出	カ	電	臣	Vour	-0.5~V _{cc} +0.5	V
入力	保護ダイ	ィオード	電流	I _{IK}	± 20	mA
出力	寄生ダイ	「オード	電流	Іок	± 20	mA
田	カ	9	流	lour	± 25	mA
a 1	₹ / G	NDT	置 流	Icc	± 50	mA
許	容	損	失	Pb	500 (DIP)+ / 180 (SOP)	mW
保	存	温	度	Tstg	- 65~ 150	°C

*Tn=-40-65℃まで、500mW。Ta+65-85℃の範囲では-10mW/Cで、900mWまでディレーティングしてくだきい。

推奨動作条件

項		B		記号	定 格	単位
電	源	電	Œ	Vcc	2~6	V
λ	カ	電	正	Vis	0~V _{cc}	V
出	カ	8	正	Vour	0-Vcc	V
動	作	温	度	Topr	- 40~85	°C
入 力 上 昇,下 降 時 間 {CLR 入力のみに適用)				tr, tr	$\begin{array}{l} 0 \sim 1000 \left(V_{CC} = 2.0V \right) \\ 0 \sim 500 \left(V_{CC} = 4.5V \right) \\ 0 \sim 400 \left(V_{CC} = 6.0V \right) \end{array}$	ns
外付	けコ	ンデン	- #	Cx	制限なし*	F
外	付は	ナ扱	抗	Rx	5k 比上 (V _{CC} = 2.0V) + 1k 以上 (V _{CC} ≥ 3.0V) +	Ω

■RxおよびCxの量次給券値は、Cxのリーク電波、Rx/Cx積子の入力リーク電流、 および配焊基板の表面抵抗などに起因するリーク電流に関係します。 Rx>1M0の場合、外部ノイズの影響を受け込くなります。

TOSHIBA

TC74HC221AP/AF

最大定格

1	項	8		記号	定 格	単位
電	源	電	臣	Vcc	-0.5~7	V
λ	カ	電	圧	VIN	-0.5~V _{CC} +0.5	v
出	カ	電	臣	Vour	-0.5~V _{cc} +0.5	V
入力保護ダイオード電流				Itk	± 20	mA
出力	寄生ダイ	オード	電流	loc	± 20	mA
出	カ	ar.	流	lour	± 25	mA
電 :	票 / G	ND	電 流	lee	± 50	mA
許	發	損	失	Pb	500 (DIP)+ / 180 (SOP)	mW
保	存	温	度	Tsto	-65-150	°C

* Ta=-40~65℃まで、500mW。Ta=65~85℃の範囲では-10mW/Cで、300mWまでディレーティングしてください。

推奨動作条件

項		B		記号	定 格	単位
電	源	電	圧	Vcc	2~6	V
λ	カ	電	Ē	VIN	0-Vcc	V
出	カ	雷	Œ	Vour	0~Vcc	V
驗	作	温	度	Topr	- 40~85	*C
入力上昇,下降時間 {CLR入力のみに適用)				t _r , tr	$\begin{array}{l} 0-1000 \left(V_{CC}=2.0V \right) \\ 0\sim 500 \left(V_{CC}=4.5V \right) \\ 0\sim 400 \left(V_{CC}=6.0V \right) \end{array}$	ns
外付	けけコ	ンデン	ンサ	Cx	割譲なしゃ	F
外	付(1 抵	抗	Rx	5k 北上 (V _{cc} = 2.0V) + 1k 北上 (V _{cc} ≥ 3.0V) +	Ω

*RxおよびCxの量大許参値は、Cxのリーク電流、Rx/Cx場子の入力リーク電流、 および配環系板の表向抵抗などに起因するリーク電流に関係します。 Rx>1MΩの場合、外部ノイズの影響を受け続くなります。

謝辞

本実験を進めるにあたって、終始懇篤な御指導を賜った木村正廣先生(高知工 科大学知能機械システム工学科教授)と戸名正英先生(高知工科大学知能機械シ ステム工学科実験講師)に心から感謝いたします。また、共同実験者である高市 智明氏をはじめ研究室の皆様にも深く感謝しております。本実験中には、皆様 の多くの御指導と技術的援助を賜り厚く御礼申し上げます。

参考文献

- H.G.Dehmelt : Advances in Atomic and Molecular Physics,
 3 (1967) , 53.; Advances in Atomic and Molecular Physics, 5 (1969), 109.
- 2) L.S.Brown and G.Gabrielse : Rev.Modern.Phys., 58 (1986), 109.
- 3) D.J.Wineland and W.N.Itano: Phys.Rev., A20 (1979), 1521.
- 4) W.Poul and H.Steinwedel : Z.Naturforschg, **8a** (1953), 448.
- 5) 依田潤:応用物理,58 (1989),1445.
- 6) G.Gabrieles et al. : Phys.Rev.Lett., **63** (1989), 1360.
- 7) H.Stolzenberg, H.Kluge et al. : Phys.Rev.Lett., 65 (1990), 3104.
- 8) H.Kluge : Phys.Scripta, **T22** (1988), 85.
- 9) R.S.Van Dyck, Jr., P. B.Schwinberg, and H.G.Dehmelt,

Phys.Rev.Lett., 59 (1987), 26.

10) W.Poul: Electromagnetic Traps for Charged

and Neutral Particles, Nobel Lecture (1989).

11) H.G.Dehmelt : Experiments with an Isolated Subatomic

Particle at Rest, Nobel Lecture(1989).

12) 豊田岐聡:イオントラップを用いた光分離反応の研究,

大阪大学卒業論文(1994).

- 13) 小林秀幸・酒見泰寛・柴田利明:学生実験で用いるイオントラップの製作, 物理教育,弟44巻 弟4号 (1996),385-388.
- 14) 田島進:物質の質量から何がわかるか,(裳華房,1991).
- 15) 河口広司: プラズマイオン源質量分析, (学会出版センター, 1994).
- 16) Chapman J.R・土屋 正彦: 有機質量分析法, (丸善, 1995).
- 17) 見城尚志・高橋久・加藤肇: 図解・わかるオペアンプ回路,

(総合電子, 1997).

18) 岩本洋:電子回路計算法の完全研究,(オーム社,1996).