

# シュタルク電圧比較器

—直流高電圧測定用—

小林 武・高 島 信 也

Stark Voltage Comparator for D.C. High  
Voltage Measurement.

Takeshi KOBAYASHI and Nobuya TAKABATAKE

## Abstract

The results of experiment applying the Stark effect to measurements of voltage ratio are described. When the two of Stark splitted lines are brought at identical frequency by applying two mutually different voltages, the ratio of the voltages can be measured in terms of the Stark coefficients of two lines. For the experiment, a small absorption cell inside which two pairs of Stark electrodes (6 cm wide, 21 cm long) are in series was built and used. The results, using Stark splitted lines of  $\text{CH}_3\text{CN}$  at 36.8 GHz, showed that the reproducibility of voltage comparison was 0.34%. However, by stabilizing the frequency of an r.f. source, the figure just mentioned can be improved to 0.01%.

## 1. ま え が き

今日、電圧範囲 1KV 以下においては、高精度抵抗分圧器と標準電圧を用いた比較測定法により 1ppm の桁の測定は比較的容易である、しかしながら、数 KV 以上の高電圧領域では精度の高い比較器を入手することは困難である。高電圧用電圧比較器の開発を考える場合、抵抗分圧器の適用電圧範囲の拡張をはかるのも一つの方法であるが、これと原理が全く異なる方法として、分子の回転スペクトルのシュタルク分離を利用する方法も考えられる<sup>1),2)</sup>。

シュタルク効果は電界の印加により回転エネルギーが変化する効果で、回転準位間の遷移スペクトルの分離として観測される。分離した成分線は印加電界の一次または二次に比例する周波数シフトを示すので、シフトの値より印加電圧を求めることができる。さらに、電界依存性の異なる二つの線を利用すれば、二つの電圧の比較測定も可能である。一次効果を示す線を用いたシュタルク電圧計の研究がなされ、数 100 V において  $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  の精度が得られることが明らかにされている<sup>2),3)</sup>。シュタルク効果は電界の作用であるから、電圧に換算するには電極間隔の絶対値を知らねばならない。その決定精度が

電圧計としての到達精度を制限する主要因子の一つである。これに対して電圧比較測定では電極間隔の比を求めればよいので、電圧の直接測定よりは高い精度が期待できる。

本文は同一周波数において、標準電圧（数 10V~数 100V）の印加により一次効果スペクトルを、被測定高電圧の印加により二次効果スペクトルを同時測定して高電圧を標準電圧と比較する方法、ならびに装置について述べたものである。この方式は原理的に無損失であること、ならびに電圧比がスペクトルの周波数と分子定数の項で与えられることに特徴がある。

## 2. 電圧比較原理

一般に分子の回転スペクトルはマイクロ波周波数領域に見出される。これらの分子が静電界中におかれるときは、分子の永久双極子能率と電界との相互作用の結果として回転エネルギー準位の分離を生ずる。この効果はシュタルク効果としてよく知られている。以下においては議論を一次シュタルク効果をあらわす対称コマ分子の場合に限定する。

外部印加電界がないとき、回転準位  $J$  から  $(J+1)$  への吸収遷移に対するスペクトル線の中心周波数は次式で与えられる。

$$f_0 = 2(J+1)B \quad (1)$$

ここで、 $B$  (回転定数)  $= h/8\pi^2 I_B$ ,  $I_B$ : 分子軸に垂直な軸に関する慣性モーメント,  $h$ : プランク定数,  $J$ : 角運動量子数, である。

次に電界を印加した場合を考える。電界による回転エネルギーの変化は摂動計算により求め得る<sup>4), 5)</sup>。電界により分離された回転準位は三つの量子数  $J, K, M$  で指定される。 $K$  および  $M$  は、それぞれ  $J$  の分子軸成分, および電界方向成分で、ともに  $J \sim (-J)$  の間の  $(2J+1)$  個の整数値をとり得る。

印加電界とマイクロ波電界が平行である場合には、遷移に関する選択則  $(J+1) \leftarrow J$ ,  $\Delta K=0$ ,  $\Delta M=0$  に従う吸収遷移が生じ得る。今、 $J=1$  と 2 のシュタルク準位間の遷移により観測されるスペクトルの周波数を求めれば次のように与えられる、ただし、スペクトルを遷移レベルの  $K, M$  の値で区別し、 $S_{KM}$  で表わすこととする。

$$(S_{11}, S_{-1-1}); f_1 = 4B + \frac{1}{3} \left( \frac{\mu}{h} \right) E + \frac{311}{7560} \frac{1}{B} \left( \frac{\mu}{h} \right)^2 E^2 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} S_{10}, S_{-10} \\ S_{01}, S_{0-1} \end{pmatrix}; f_2 = 4B + \frac{13}{210} \frac{1}{B} \left( \frac{\mu}{h} \right)^2 E^2 \quad (3)$$

$$(S_{1-1}, S_{11}); f_3 = 4B - \frac{1}{3} \left( \frac{\mu}{h} \right) E + \frac{311}{7560} \frac{1}{B} \left( \frac{\mu}{h} \right)^2 E^2 \quad (4)$$

$$(S_{00}) f_4 = 4B - \frac{8}{105} \frac{1}{B} \frac{\mu}{h}^2 E^2 \quad (5)$$

ここで、 $E$ : 印加電界の強さ,  $\mu$ : 分子の永久双極子能率である。上記の各式の右辺第一項  $4B$  は電界が無いときの吸収周波数, 第二項以降は電界による周波数シフトである。シュタルク成分  $(S_{11}, S_{-1-1})$ ,  $(S_{1-1}, S_{-11})$  は  $E$  に比例するシフトを示すが、他は  $E^2$  に比例する。遷移は 9 あるがその中で周波数が一致するものもあり、観測できるのは (2)~(5) 式に示される 4 本の吸収線である。

上に示したシュタルク成分を二つの電圧の比較測定に応用するには、周波数シフトが正である一対、または負の一対のスペクトルを用いることになる。本文においては、シュタルク成分  $S_{11}$  と  $S_{10}$  を利用することにする。シュタルク効果の二次項は一次項に比較して極めて小さい。したがって、スペクトル  $S_{10}$  をシフトさせるには高

電圧を加えなければならない。これに対し、 $S_{11}$  には比較的低電圧でよい。

吸収セル内に二つのシュタルク電極を設け、一方に標準電圧  $V_1$  を、他方に被測定電圧  $V_2$  を加え、ある周波数においてそれぞれスペクトル  $S_{11}$  と  $S_{10}$  が一致したとする。このときは、(2) および (3) 式より

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[ \frac{70}{39} \frac{B}{f_s} \right]^{1/2} \frac{d_2}{d_1} + \text{補正項} \quad (6)$$

を得る。ここで、 $f_s$  は零電界周波数  $4B$  からの周波数シフト,  $d_1$  および  $d_2$  はそれぞれの電極間隔である。補正項は (2) 式の  $E^2$  以上の項ならびに (3) 式の  $E^4$  項 (記述を省略してある) 以上の微小項によるものである。

周波数シフト  $f_s$  の値を適当にすることにより種々の電圧比の測定ができる。比  $V_2/V_1$  の精度は  $f_s$  の設定精度に依存するので、スペクトル信号の周波数分解能が一定の条件のもとでは、 $f_s$  をできるだけ大きく (例えば 100 MHz 以上) とすることが望ましい。分子の回転定数  $B$  は数 1000 MHz であるので、電極間隔比  $d_2/d_1$  との組合せも考慮すると、 $V_2/V_1=10 \sim 30$  の範囲の測定が可能である。

### 3. 実 験

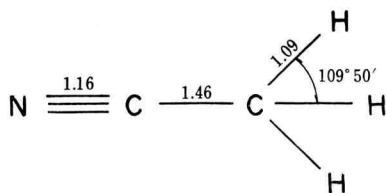
#### [1] 試 料

試料の選定条件を列記すれば、

- (a) 永久双極子能率  $\mu$  が大きいこと、
- (b) 吸収係数  $\gamma$  が大きいこと、
- (c) 線幅  $\Delta f$  が小さいこと、
- (d) 回転スペクトルに影響を与える他の効果がないか、小さいこと。

双極子能率が大きい程シュタルクシフトが大きくとれる。また線幅が小さいとスペクトルの周波数分解能を高め得る。吸収係数が大きいことは  $S/N$  比のよい信号を得るためには必須条件である。特に高電圧比較に応用する場合には、シュタルクセルは機械的安定度を保つためにできるだけ小型であること、ならびに電極間の放電を抑えるために、試料ガスの圧力を極力低くすることが必要である。これらの要求は吸収信号の  $S/N$  比を低める方向に作用する。上記の 4 つの条件を全て満足する試料の選定はできない。今回の実験においては、量 ( $\mu \cdot \gamma / \Delta f$ ) の値の大きいものとして、アセトニトリル ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) を選んだ。

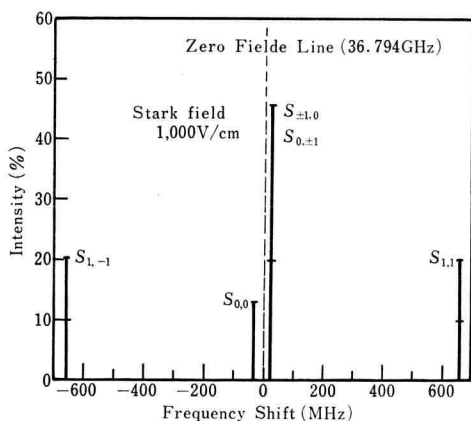
試料  $\text{CH}_3\text{CN}$  は Fig. 1 に示す構造をもつ対称コマ分子である。この回転定数および双極子能率は、それぞれ、

Fig. 1. Structure of  $\text{CH}_3\text{CN}$ .

$$B = 9198.50 \text{ (MHz)}$$

$$\mu = 3.9185 \text{ (Debye)}$$

である<sup>2)</sup>。遷移  $J=2 \leftarrow 1$  の零電界スペクトルは 36.794 GHz において観測される。吸収係数は計算値で約  $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 、線幅は 0.1 Torr において約 6 MHz (測定値) である。この試料のシュタルク分離ならびに各成分線の強度を Fig. 2 に示す。

Fig. 2. Stark splitting of the transition  $J=2 \leftarrow 1$  of  $\text{CH}_3\text{CN}$  with r.f. and Stark fieldes parallel.

アセトニトリルとして通常入手できるのは  $\text{CH}_3\text{CN}^{14}$  である。同位元素  $\text{N}^{14}$  の核スピンは  $I=1$  で、電気四重極効果をシュタルク効果に与える。この場合のシュタルク効果は四重極結合のない場合と異なるのでいくぶんかの補正を要するが、根本的な欠点ではない。 $\text{CH}_3\text{CN}^{15}$  を用いればこの問題はないが、 $\text{N}^{15}$  の原子相対頻度は 0.365% にすぎず、試料は高価である。

## [2] 装置

電圧比較測定系のブロック図を Fig. 3 に示す。

この実験のために試作したシュタルクセルは Fig. 4 に示すごとく、開口寸法  $10 \times 80 \text{ mm}$ 、長さ 450 mm の導波管に同一平面内に二つのシュタルク電極を設けたものである。両電極は機械的安定度を得るために厚さ 5 mm のテフロン板に銅を真空蒸着法で蒸着したものである。電極寸法は幅 60 mm、長さ 210 mm である。セル全体を真空槽におさめる。マイクロ波はクライストロンよりテーパー導波管を通してセルに供給される。

シュタルクセル内の電極-1にはスペクトル  $S_{11}$  にシフ

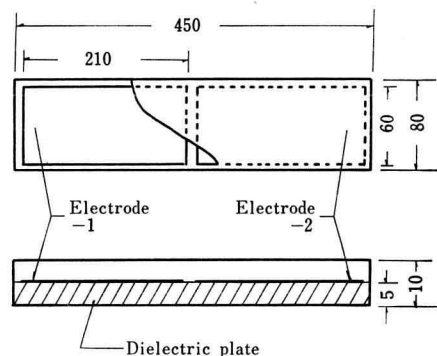


Fig. 4. Dimension of Stark cell.

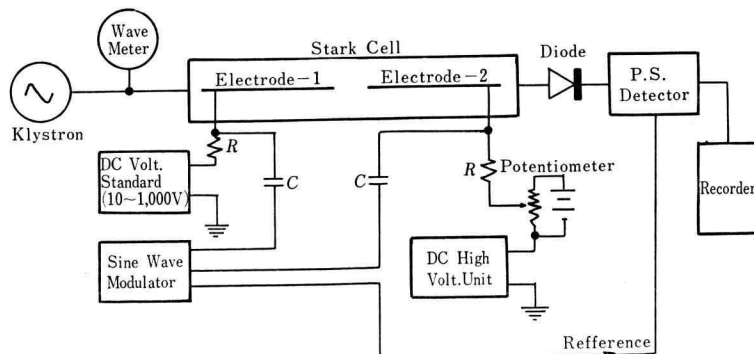


Fig. 3. Block diagram of experimental apparatus.

トを与える標準電圧を加え、電極-2には $S_{10}$ にシフトを与える高電圧が加えられる。標準電圧源には0~1000Vの標準電圧発生器(電圧精度50ppm)を用いた。また高電圧は1500Vまでの可変安定化電源である。スペクトル $S_{10}$ を正確に $S_{11}$ に一致させるために、90V乾電池によるポテンショメータを接続した。この装置の電圧比較器としての精度をテストするには、電極-2に加わる電圧をも正確に知る必要がある。この電圧測定には50ppmで校正されたデジタル電圧計を用いた。

二つの吸収信号の検出はシュタルク変調法によった。周波数10kHzの正弦電圧を結合コンデンサを通して電極-1および2に加える。変調電圧は電極-1には3V、電極-2には25Vである。吸収信号はダイオードで検出され、位相検波器で検出される。各電極の印加電圧を掃引すれば信号は分散波形で観測される。その零電圧位置が信号の中心を与える。

### [3] 測定結果

この装置の電圧比較の再現性のテストとして次のような方法をとった。マイクロ波周波数を一定にし、電極-1および2に印加する電圧 $V_1$ および $V_2$ をそれぞれ調整し、スペクトル $S_{11}$ と $S_{10}$ の中心が一致するときの電圧をそれぞれ測定する。得られた電圧値 $V_1$ および $V_2$ をそれぞれ(2)および(3)式に代入して $f_1$ と $f_2$ を計算し、両者の差を求める。同様な測定と計算を異った周波数で行う。このようにして得られた周波数差のバラツキより再現性を評価できる。測定結果をTable 1に示す。

測定された電圧の値は極性によって差があった。正極性と負極性で電圧を印加したとき、スペクトルの中心を設定周波数に一致させる電圧値に約0.4Vの差があった。これは電極の表面電位によるものである。それゆえ、測定は両極性について行い、その平均値をとった。

各測定値は6~8回の測定の平均値で、( )内は標準偏差である。

電極間隔比 $d_2/d_1$ は同一のスペクトル $S_{11}$ を同時に測定し、その時に両電極に加えられた電圧の比から決定した。その結果は $d_2/d_1=1.0042\pm0.0011$ である。

スペクトル $S_{11}$ の周波数シフト $f_{1s}$ の計算には電極間隔 $d_1=0.436$ mm(測定値)を用い、 $S_{10}$ の周波数シフト $f_{2s}$ には $d_2=1.0042 d_1$ を用いた。周波数 $f_{1s}$ は(2)式により $E^2$ 項まで計算し、 $f_{2s}$ は(3)式に $E^4$ 項<sup>9)</sup>を加えて計算した。なお $f_{2s}$ には四重極効果にともなう補正を行っている。この実験の電界範囲ではシュタルクエネルギー( $\mu E$ )は周波数に変換して200MHz以上であり、試料の超微細構造定数 $eqQ=-4.4$ MHzに比べて十分に大きいので、いわゆる強電界の場合と考えてよい。この場合のシュタルク効果への影響は標準的な方法で計算できる<sup>9)</sup>。スペクトル $S_{10}$ は核スピン $I$ の電界方向成分 $m_I$ が0と $\pm 1$ の場合の2本の線から成り、それらの合成として観測される。各線は四重極効果のない場合の周波数より、それぞれ0.38MHzおよび-0.75MHzだけ偏位している。このために観測される波形は歪み、見掛上のスペクトル中心は-0.15MHzずれることになる。それゆえ、 $f_{2s}$ には+0.15MHzの補正を加えた。同様に周波数 $f_{1s}$ への補正を計算したが値が小さく無視してある。

周波数差 $f_{1s}-f_{2s}$ の平均は0.35MHzの偏位を生じた。これは周波数シフト約100MHzに対し $3.5\times 10^{-3}$ に相当する。これは $f_{1s}$ および $f_{2s}$ の計算に用いた電極間隔 $d_1=4.363$ mmの誤差によるものと考えられることができる。間隔 $d_1$ は電極面上20個所をディップメータで測定した値の平均値である。そのバラツキは1%であるので、0.35%の誤差は考え得る大きさである。

Table 1 Reproducibility of Voltage Comparison

Voltage		Freq. shift (calculated)		$f_{1s}-f_{2s}$ (MHz)
$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$f_{1s}$ (MHz)	$f_{2s}$ (MHz)	
67.30 (0.08)	861.71 (0.32)	101.83	101.50	0.33
73.51 (0.08)	899.71 (0.46)	111.27	110.60	0.62
91.76 (0.19)	1008.6 (1.0)	139.05	138.90	0.15
112.59 (0.23)	1117.0 (1.5)	170.83	170.54	0.29
Average				0.35 (0.34)

#### 4. む す び

二つのシュタルク分離スペクトルの同時測定による電圧比較法, ならびに比較測定での再現性の予備的な実験結果について述べた。現段階では再現性は  $3.4 \times 10^{-3}$  である。

これはマイクロ波の周波数変動により制限されているものである。この実験においてはクライストロンの発振周波数変動は数分間で 100 kHz であった。これはシュタルク推移 100 MHz に対して  $10^{-3}$  に当る。電圧比較精度  $10^{-5}$  を得るためには、マイクロ波周波数を 1 kHz 台に安定化する必要があるが、これは可能なことである。

試作したシュタルクセルは吸収長が 21 cm である。このような小さいセルでも、 $S/N$  が 50 以上の信号が得られ、吸収信号の中心を数 10 kHz で分解できる。シュタルク電界の均一度を高めるためにセルは over size の導波管になっている。それゆえ、マイクロ波伝播は単一モードのみとは考えにくいので、不要モードの影響の検討を要する。

シュタルク電極間に印加できる電界の強さは放電によって制限される。試料ガスの圧力が 0.01~0.05 Torr では 3000 V/cm が限度であろう。したがってこの電圧比較法を 10 KV の桁の高電圧測定に適用するには電極間隔を大きくとらなければならない。このような場合には

不均一電界の測定精度に与える影響も検討を要する。

#### 謝 辞

本実験を行うに当り、本学機械工学科三浦直勝、横井三郎、花井長四郎、高橋政敏、福岡清二の各氏にシュタルクセルの製作において資材ならびに技術上の援助、協力をいただいた。また電気工学科富田鉄雄氏には測定器の校正について協力をいただいた。ここに、上記各氏に対し深謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) Y. Beers and G.L. Strine: IRE Trans. on Instrum. **I-11** (1962) 171.
- 2) Y. Beers and T.W. Russell: IEEE Trans. Instrum. and Measur. **IM-15** (1966) 380.
- 3) K. Hara, T. Kobayashi, T. Matsui, T. Nakase and G. Yonezaki: Japanese Jour. Appl. Phys. **10** (1971) 1066.
- 4) たとえば, C.H. Townes and A.L. Schawlow: Microwave Spectroscopy, (McGraw-Hill, New York, 1955).
- 5) 原: 電気試験所集報, **31** (1967), 1136.
- 6) W. Low and C.H. Townes: Phys. Rev. **76** (1949) 1295.